

Betriebsparameter eines öleingespritzten Schraubenkompressors

G. Benes, Gießen-Friedberg

Zusammenfassung

Anhand experimentell ermittelter Daten wurde der Einfluß einiger Parameter auf die Betriebscharakteristik eines öleingespritzten Schraubenverdichters dargestellt. Es wurden die optimalen Betriebsparameter definiert und ihre Zusammenhänge aufgezeigt. Der Einfluß der diskreten kin. Viskosität des Öls auf das Momentverhalten wurde ausführlich erläutert.

Summary

The influence of some parameters on the operational characteristic of an oil injected screw compressor was shown by the experimental determination of certain data. The optimum operational parameters were defined and their connections were shown. The influence of the oil's discrete kin. viscosity on the torque course characteristics was explained in detail.

1. Einleitung

Der öleingespritzte Schraubenverdichter gilt heute als ein unverzichtbares Element in der Druckluft- und Kältetechnik. Als Trockenläufer, Lader bzw. als Schraubenmotor findet er weitere Einsatzgebiete. Die stetig steigenden Anforderungen bedingen allerdings auch Grundlagen, auf deren Basis eine Auslegung bzw. Optimierung durchgeführt werden kann. Die Lücken in den allgemeingültigen, theoretischen Grundlagen sind begründet durch den fehlenden Nachweis der Ölverteilung und ihrer Form in der Verdichtungskammer sowie in den Spalten.

Im vorliegenden Beitrag sollen experimentell ermittelte Größen vorgestellt und ihre Zusammenhänge erläutert werden. Weiterhin werden optimale Betriebsparameter sowie ihre Abhängigkeiten aufgezeigt. Die vorliegenden Meßergebnisse lassen auch eine Aussage bezüglich der Ölschwallhypothese /1/ zu, die eine Modellvorstellung über die Ölverteilung darstellt. Weiterhin dienen Sie als Grundlage für ein Simulationsprogramm /2/ zur Auslegung von Kompressoranlagen.

2. Betriebsparameter

In der nachfolgenden Betrachtung wird der Einfluß des Öls als wesentlicher Einflußfaktor auf die Betriebscharakteristik erläutert. Es wird besonders sein Einfluß auf das Antriebsmoment untersucht.

2.1 Ölvolumenstrom

Die Wirkung des eingespritzten Öls ist die Ursache für die Vorteile des Schraubenverdichters. Es kühlt, dichtet die Spalten ab, schmirt und dämpft die Schallemission. Daß das Öl die volumenspezifische Arbeit beeinflusst, zeigt Abb. 1. Mit steigendem spez. Ölvolumen sinkt die volumenspezifische Arbeit und das jeweilige Minimum verschiebt sich zu einer kleineren Umfangsgeschwindigkeit.

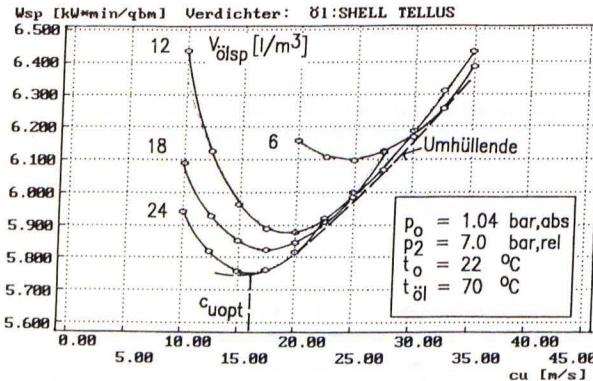


Abb. 1 Volumenspez. Arbeit als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit für $\pi = 8$
 Fig. 1 Volume specific work dependent on peripheral speed for $\pi = 8$

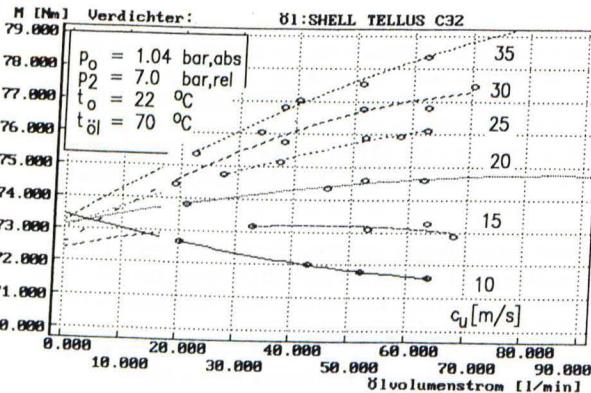


Abb. 2 Moment als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit für $\pi = 8$
 Fig. 2 Torque course dependent on oil volume flow for $\pi = 8$

Das Minimum für eine konstante Umfangsgeschwindigkeit wird demnach für einen bestimmten Ölvolumenstrom erreicht. Eine Umhüllende stellt den Verlauf der mi-

nimalen volumenspezifische Arbeit in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit bei entsprechendem Ölvolu- menstrom dar. Die Umhüllende weist ein Minimum auf, das den optimalen Betriebspunkt für das gegebene Druckverhältnis darstellt. Dieses Verhalten ist ebenfalls bei einem anderen Druckverhältnis feststellbar.

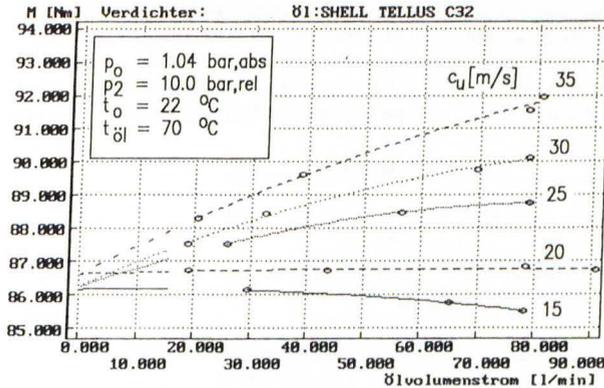


Abb. 3 Moment als Funktion des Ölvolu- menstromes für $\pi = 10$
 Fig. 3 Torque course dependent on oil volume flow for $\pi = 10$

Der direkte Einfluß des Ölvolu- menstroms kann am besten anhand des Antriebs- momentes (Abb. 2) und des vol. Liefergrades (Abb. 5) für das Druckverhältnis $\pi = 8$ erläutert werden.

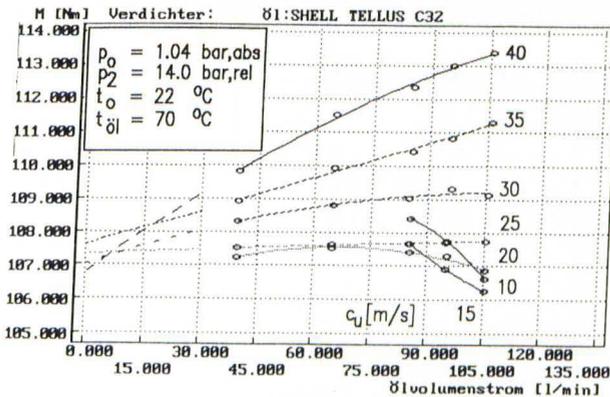


Abb. 4 Moment als Funktion des Ölvolu- menstromes für $\pi = 15$
 Fig. 4 Torque course dependent on oil volume flow for $\pi = 15$

Mit steigendem Ölvolumenstrom steigt oberhalb $c_U = 15,7$ m/s das Moment degressiv an, unterhalb sinkt es. Bei $c_U = 15,7$ m/s bleibt das Moment konstant. Dies bedeutet, daß bei dieser Umfangsgeschwindigkeit das Öl keinen Einfluß auf das Moment ausübt. Im Vergleich mit Abb. 1 ist eine Übereinstimmung mit dem optimalen Betriebspunkt feststellbar. Es handelt sich also um die optimale Umfangsgeschwindigkeit für das gegebene Druckverhältnis. Bei einem Druckverhältnis von $\pi = 11$ (Abb. 3) und $\pi = 15$ (Abb. 4) ist ein ähnliches Verhalten feststellbar. Allerdings steigt mit zunehmendem Druckverhältnis auch c_{Uopt} . Eine Extrapolation für $c_U \geq c_{Uopt}$ ergibt einen gemeinsamen Schnittpunkt bei Null. Dieser Schnittpunkt stellt das Moment eines trockenlaufenden quasi dichten Schraubverdichters dar. Dieses Moment stimmt mit dem optimalen Moment überein.

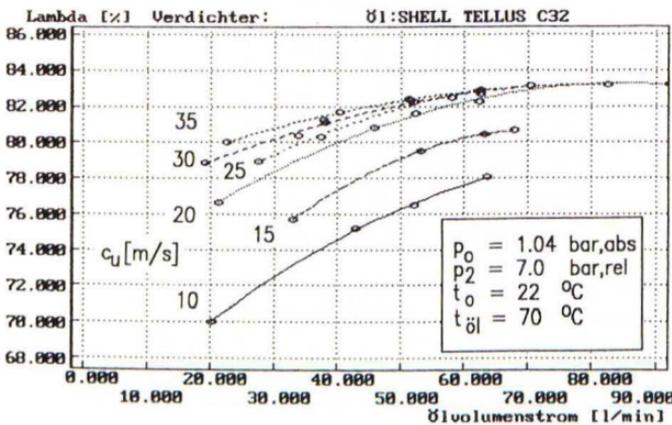


Abb. 5 Vol. Liefergrad als Funktion des Ölvolumenstromes für $\pi = 8$
 Fig. 5 Vol. efficiency dependent on oil volume flow for $\pi = 8$

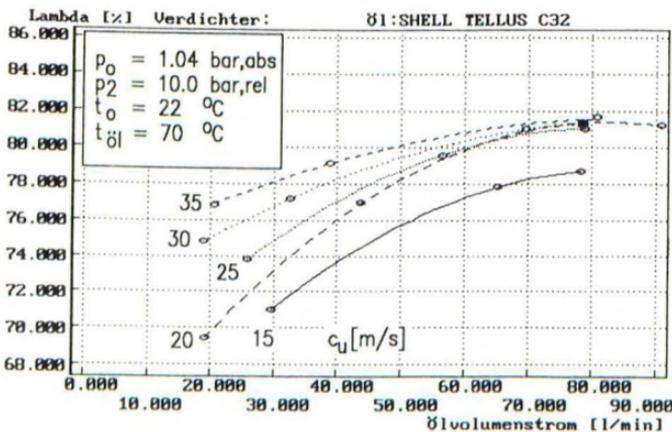


Abb. 6 Vol. Liefergrad als Funktion des Ölvolumenstromes für $\pi = 11$
 Fig. 6 Vol. efficiency dependent on oil volume flow for $\pi = 11$

Der Einfluß des Ölvolu­menstroms auf den volumetrischen Liefergrad (Abb. 5 und 6) ist ebenfalls deutlich feststellbar. Mit steigendem Ölvolu­menstrom steigt der vol. Liefergrad asymptotisch an. Die Verdichtungsendtemperatur (Abb. 7) zeigt ein gegenläufiges Verhalten. Mit steigendem Ölvolu­menstrom sinkt sie asymptotisch.

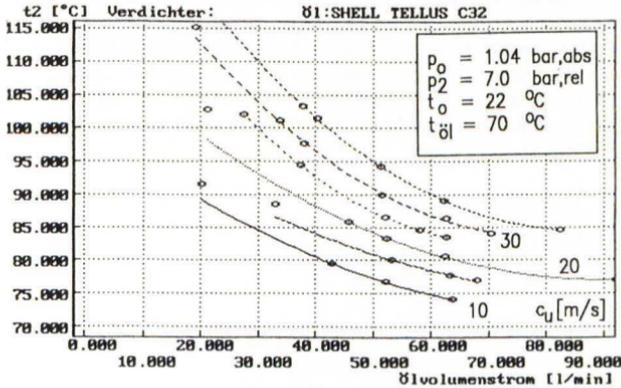


Abb. 7 Verdichtungsendtemperatur als Funktion des Ölvolu­menstromes für $\pi = 8$
Fig. 7 Discharge temperature dependent on oil volume flow for $\pi = 8$

2.2 Diskrete kin. Viskosität

Bei der Erfassung der Strömung eines Zweiphasengemisches ist die Ermittlung der Reynolds-Zahl mit fundamentalen Schwierigkeiten verbunden. Es fehlt an einem geeigneten Mittelwert für die Viskosität des Zweiphasengemisches. Untersu-

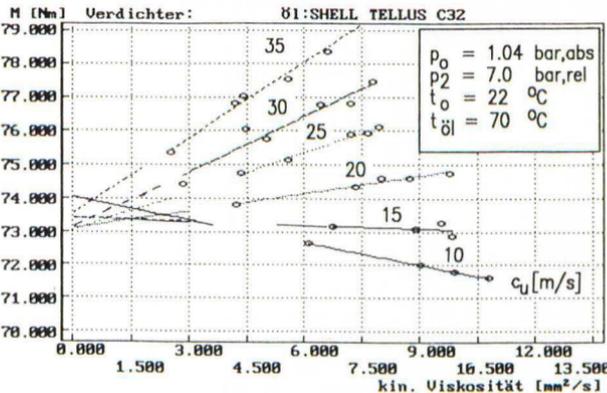


Abb. 8 Moment als Funktion der mittl. kin. Viskosität für $\pi = 8$
Fig. 8 Torque course dependent on average kin. viscosity for $\pi = 8$

chungen von Kauder [3] zeigen aber, daß das Öl sich im Arbeitsraum überwiegend als glatter, meist blasenfreier Ölfilm darstellt. Dies bestätigt die Annahme, die dazu führte, die kinematische Viskosität des Öls in die nachfolgenden Betrachtungen miteinzubeziehen.

Während des Verdichtungsvorgangs verändert sich die Verdichtungstemperatur in der Kammer in Abhängigkeit von der Rotorstellung (Abb. 19). Somit ändert sich auch die diskrete kin. Viskosität des Öls. Für die Ermittlung einer mittleren kin. Viskosität wurde näherungsweise von einer gemittelten Verdichtungstemperatur ausgegangen. Abb. 8 zeigt die Momentabhängigkeit von der mittleren kin. Viskosität, die aus dem Betriebszustand im Abb. 2 ermittelt wurde. Die Funktion der konstanten Umfangsgeschwindigkeit verläuft linear. Eine Extrapolation zeigt einen Schnittpunkt für alle $c_u \geq c_{uopt}$ im Nullpunkt.

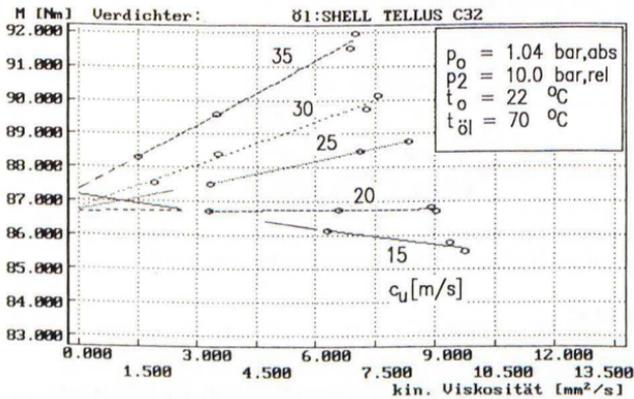


Abb. 9 Moment als Funktion der mittl. kin. Viskosität für $\pi = 11$

Fig. 9 Torque course dependent on average kin. viscosity for $\pi = 11$

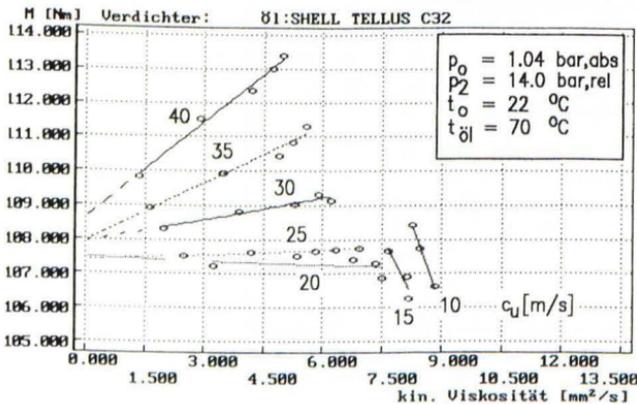


Abb. 10 Moment als Funktion der mittl. kin. Viskosität für $\pi = 15$

Fig. 10 Torque course dependent on average kin. viscosity for $\pi = 15$

Auch die optimale Umfangsgeschwindigkeit ist von der kin. Viskosität unabhängig. Sie verändert sich infolge einer Änderung des Druckverhältnisses (Abb. 9 und 10). Die Funktionen des Momentes für $c_u < c_{uopt}$ folgen nicht dem für $c_u \geq c_{uopt}$ typischen Verhalten. Die Ursache dafür wird in Kapitel 4 erläutert.

Abb. 11 zeigt den Einfluß der mittleren kin. Viskosität auf den vol. Liefergrad. Die Funktion für c_{uopt} weist keine besonderen Eigenschaften auf.

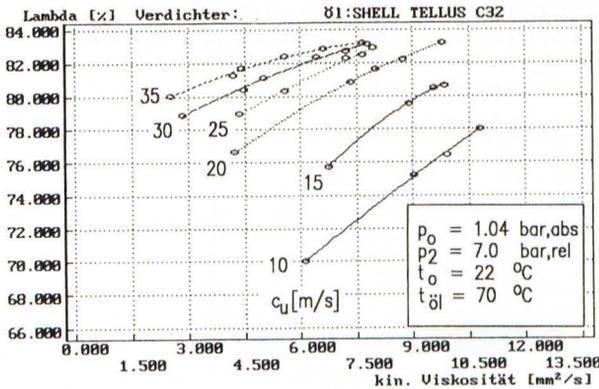


Abb. 11 Vol. Liefergrad als Funktion der mittl. kin. Viskosität für $\pi = 8$
 Fig. 11 Vol. efficiency dependent on average kin. viscosity for $\pi = 8$

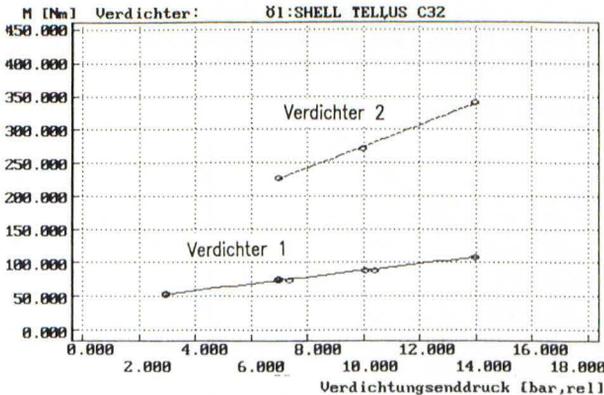


Abb. 12 Opt. Moment als Funktion des Verdichtungsenddruckes
 Fig. 12 Opt. torque course dependent on discharge pressure

3. Zusammenhänge der opt. Kenngrößen

In Kap. 2 wurden der Einfluß des Ölvolumenstroms und der mittl. diskreten kin. Viskosität auf den volumetrischen Liefergrad und das Moment dargestellt. Es zeigte sich, daß die optimale Umfangsgeschwindigkeit und das optimale Moment vom Druckverhältnis abhängig sind. Abb. 12 zeigt die Abhängigkeit des opt. Momentes vom Verdichtungsdruck. Zum Vergleich wurden zwei Verdichter unterschiedlicher Größe einer Baureihe herangezogen. Die linearen Funktionen weisen unterschiedliche Kennwerte auf. Bezieht man sie auf das Moment M_{opt} , erhält man identische Verläufe (Abb. 13). Das opt. Moment M_{opt} ist das Moment, das bei der Übereinstimmung des inneren Druckverhältnisses im Optimum mit dem Betriebsdruckverhältnis zu verzeichnen ist.

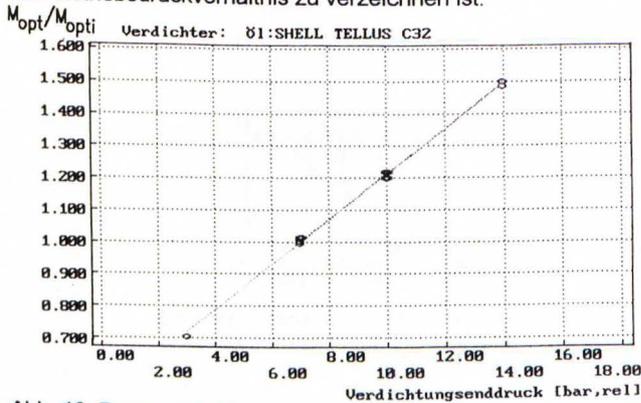


Abb. 13 Bezog. opt. Moment als Funktion des Verdichtungsdruckes
Fig. 13 rel. opt. torque course dependent on discharge pressure

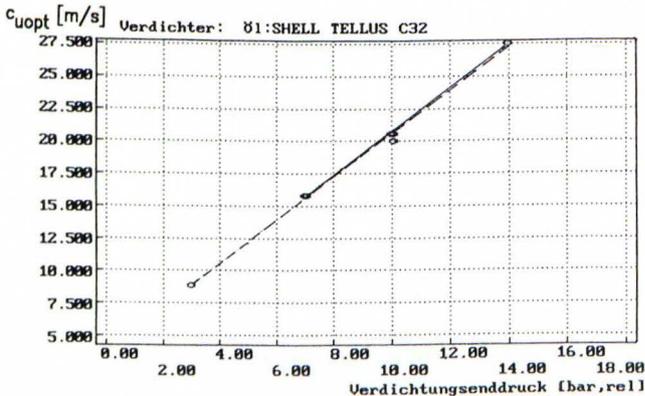


Abb. 14 Opt. Umfangsgeschwindigkeit als Funktion des Verdichtungsdruckes
Fig. 14 opt. peripheral speed dependent on discharge pressure

Der Verlauf der opt. Umfangsgeschwindigkeit über dem Verdichtungsenddruck stellt sich für beide Verdichter annähernd linear dar (Abb. 14).

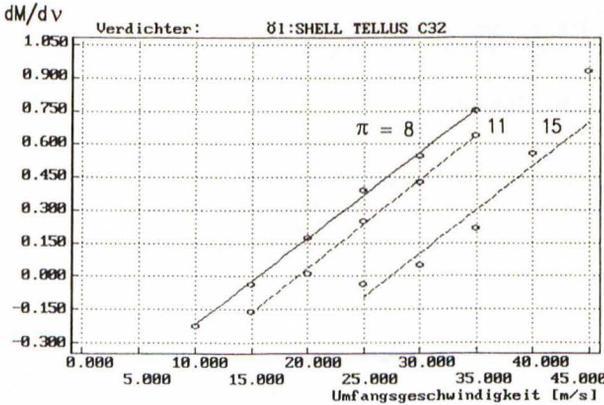


Abb. 15 Ableitung dm/dv als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit
 Fig. 15 Differential dm/dv dependent on peripheral speed

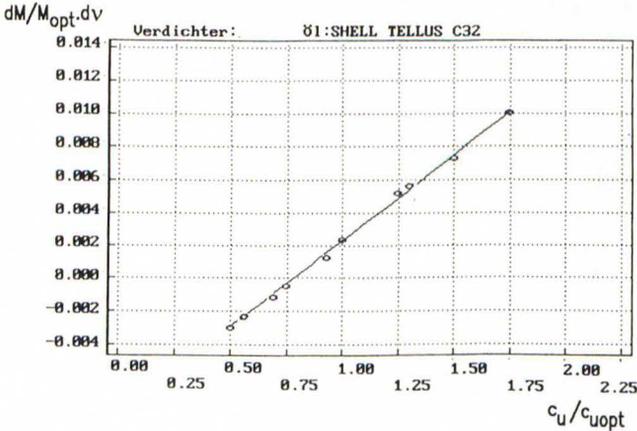


Abb. 16 Bez. Ableitung $dm/M_{opt} \cdot dv$ als Fkt. der bez. Umfangsgeschwindigkeit
 Fig. 16 Rel. differential $dm/M_{opt} \cdot dv$ dependent on rel. peripheral speed

Der Einfluss des Ölvolu-menstroms auf das Moment kann über die Änderung der mittleren kin. Viskosität beschrieben werden. Erfasst man die Steigung dm/dv aus Abb. 8, 9, und 10 und trägt Sie über die Umfangsgeschwindigkeit auf, erhält man eine lineare Abhängigkeit (Abb. 15) für das jeweilige Druckverhältnis. Trägt man schließlich die auf M_{opt} bezogene Änderung dm/dv über die bezogene Umfangsgeschwindigkeit c_u/c_{uopt} auf, erhält man einen vom Druckverhältnis unabhängigen Verlauf der Momentänderung $dm/M_{opt} \cdot dv$ (Abb. 16).

Bezeichnet man das Verhältnis c_U/c_{Uopt} als die relative Umfangsgeschwindigkeit, kann folgendes festgehalten werden:

Die bezogene Änderung des Moments nach der kin. Viskosität verhält sich linear zu der rel. Umfangsgeschwindigkeit. Sie ist vom Druckverhältnis unabhängig.

4. Voraussetzungen für das Optimum

Der rechnerische Nachweis für die Voraussetzungen zum Erreichen der opt. Kennwerte sowie ihrer Abhängigkeiten sind das Ziel weiterer Untersuchungen. Experimentell erbrachte Daten stützen aber die nachfolgenden Ansätze.

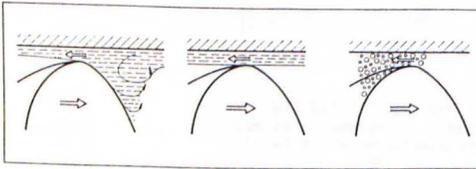


Abb. 17 Ölschwallhypothese /1/

Fig. 17 Oil surge hypothesis /1/

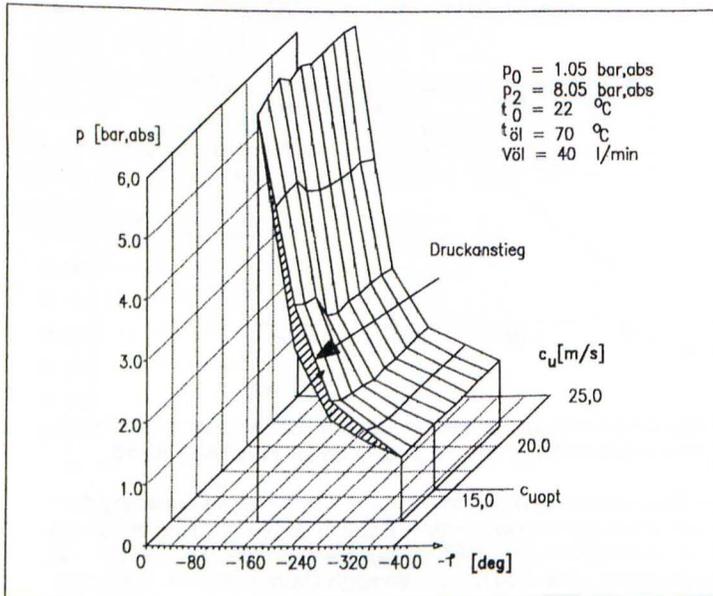


Abb. 18 Injizierter Druckverlauf als Fkt. der Rotorstellg. und der Umfangsgeschw.

Fig. 18 Pressure vs. male rotor rotation angle and peripheral speed

Die von Kauder [3] untermauerte Ölschwallhypothese kann in drei Phasen aufgeteilt werden (Abb. 17). In der zweiten Phase ist der Ölschwall gleich Null. Der Ölfilm reicht aber noch aus, um den Spalt abzudichten. Bei mangelnder Abdichtung während Phase drei erfolgt ein verstärktes Überströmen des Luft-Öl-Gemisches in die benachbarte Kammer. Es handelt sich um einen Leckstrom auf dessen Größe nicht nur die zur Verfügung stehende Ölmenge, sondern auch die Druckdifferenz, die Viskosität, die rel. Geschwindigkeit der beiden Spaltteile, die Oberflächenrauigkeit und zuletzt die Geometrie des Spaltes Einfluß ausüben.

In Abb. 18 ist der injizierte Druckverlauf in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Hauptläufers und der Umfangsgeschwindigkeit aufgetragen. Abb. 19 zeigt den dazugehörigen Temperaturverlauf.

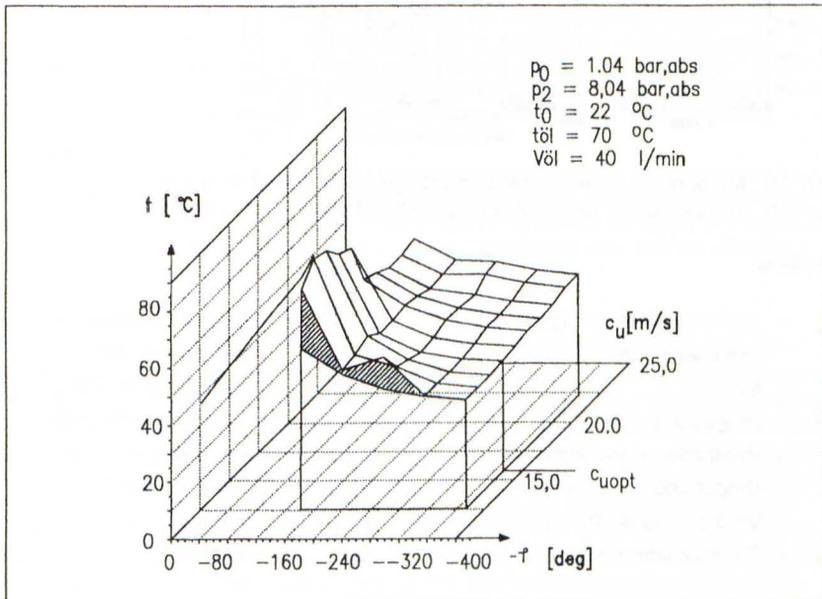


Abb. 19 Injizierter Temp.verlauf als Fkt. der Rotorstellg. und der Umfangsgeschw.
 Fig. 19 Temperature vs. male rotor rotation angle and peripheral speed

Unterhalb von $c_{u,\text{opt}}$ ist ein deutlicher Druckanstieg im Verdichtungsraum zu verzeichnen. Auch die Temperatur steigt überproportional an. Entsprechend steigt auch das Moment (Abb. 20).

Dieses Verhalten läßt sich folgendermaßen erklären: Im Umfangsgeschwindigkeitsbereich $c_u \geq c_{u,\text{opt}}$ dichtet das Öl die Spalte gut ab. Für $c_u < c_{u,\text{opt}}$ läßt die Dichtwirkung nach. Infolge des angestiegenen Spaltstromes steigen auch der Druck und die Temperatur in den nachfolgenden Kammern. Aufgrund des höheren diskreten Druckes steigt auch das aufzubringende Moment an.

Somit stellt die opt. Umfangsgeschwindigkeit die Dichtgrenze dar und würde damit der zweiten Phase der Ölschwallhypothese entsprechen.

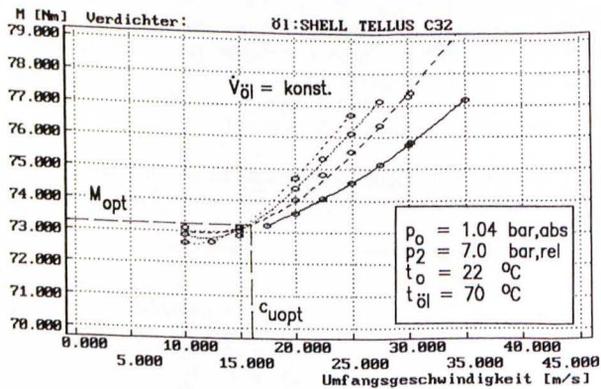


Abb. 20 Moment als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit für $\pi = 8$

Fig. 20 Torque course dependent on peripheral speed for $\pi = 8$

Symbole:

c_u	- Umfangsgeschwindigkeit des Hauptläufers	$\dot{V}_{\text{ölj}}$	- Ölvolumenstrom
M	- Moment	$V_{\text{öls}}p$	- spez. Ölvolumen
p_0	- Umgebungsdruck	W_{sp}	- volumenspez. Arbeit
p_2	- Verdichtungsdruck	λ	- volumetr. Liefergrad
t_0	- Umgebungstemperatur	ν	- kin. Viskosität
t_2	- Verdichtungsdrucktemperatur	π	- Druckverhältnis
$t_{\text{ölj}}$	- Öleinspritztemperatur	i	- inneres
		opt	- optimal

Literatur

- 1/1 Kauder, K. - Energiewandlung in öleingespritzten Schraubenverdichtern, Haus der Technik, Vortragsveröffentlichungen 422, 1987
- 1/2 Benes, G. - Auslegung von öleingespritzten Schraubenkompressoranlagen, Schraubenmaschinen 1994
- 1/3 Kauder, K. - Ölverteilung in Schraubenkompressoren, Forschungsberichte des FG Fluidenenergiemaschinen Nr. 2/1994