Lösung des Dichtungsproblems an schnellaufenden Wellen von Schraubenverdichtern für hohes Druckniveau

Ing. K. H. Victor und Dr.-Ing Dedeken, Dortmund

Zusammenfassung

Die Wirtschaftlichkeit einer Schraubenverdichteranlage wird im großen Maße durch das Abdichtungssystem und dessen Peripherie bestimmt. Durch den Einsatz von EHD-Doppelgleitringdichtungen können bei hohen Systemdrücken die Aufwendungen für den Sperrkreislauf stark reduziert werden. Diese neue Dichtungstechnologie basiert auf elastischen Verformungen der Dichtflächen, die beim Betreiben einen trennenden hydrodynamischen Flüssigkeitsfilm erzeugen. Dieses Verhalten wird durch Kammern, die direkt unter den Dichtflächen angeordnet sind, erreicht. Unter Anwendung der Finiten Elemente Methode konnten durch eine theoretische Analyse unterschiedlicher Bauformen und Größen die Makrogeometrie der Gleitringdichtungen optimiert werden.

1. Einleitung

Schraubenmaschinen haben oft mehr als nur ein Wellenende, das abgedichtet werden muß. Mit der Anzahl der Dichtungsstellen steigt auch deren Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit solcher Maschinen. Für den Betreiber ist es somit von großer Bedeutung, ein möglichst effizientes, wartungsarmes und sicheres Dichtungssystem in seiner Maschine installiert zu haben.

Hier sollen verschiedene Dichtungsstrategien vergleichend vorgestellt werden. Neben den technischen Gesichtspunkten soll auch die Wirtschaftlichkeit der Abdichtungsaufgabe mit berücksichtigt werden.

Für trockenlaufende Prozeßgasschraubenverdichter werden seit Jahren flüssigkeitsgesperrte Gleitringdichtungen erfolgreich eingesetzt. Solche Dichtungssysteme bestehen aus einer Vielzahl verschiedener Komponenten, die in drei Funktionseinheiten gegliedert werden können:

- Abdichtung der Sperrflüssigkeit zum Prozeßgas
- Abdichtung der Sperrflüssigkeit zur Atmosphäre
- Aggregate zum Erhalt des Sperrflüssigkeitskreislaufes (Wärmetauscher, Pumpe, Gasabscheider, etc.)

Mit steigendem Druckniveau wachsen die Aufwendungen für den Sperrkreislauf stark an. Neben den Anschaffungskosten sind auch die Aufwendungen für den Betrieb dieser Versorgungsanlage zu berücksichtigen. Kann der Sperrkreislauf bei hohen Prozeßdrücken klein gehalten werden, so wird damit die Wirtschaftlichkeit der gesamten Schraubenmaschine deutlich verbessert.

2. Niederdrucksysteme

Sind nur geringe Gasdrücke im Prozeßraum abzudichten, so hat sich die Anordnung, wie sie in Bild (1) dargestellt ist, bewährt. Hier wird die Sperrflüssigkeit zum Prozeßgas hin mit einer Gleitringdichtung getrennt. Bei der geringen Druckdifferenz zwischen Sperrmedium und Gas arbeitet die Dichtung mit sehr niedrigen Leckagemengen. Die atmosphärenseitige Abdichtung des Sperrölkreislaufes geschieht entweder mit einem Labyrinth oder einer Schwimmringdichtung. Die Leckölmengen betragen an dieser Seite ein vielfaches der Gleitringdichtung. Die Menge der durchfließenden Sperrflüssigkeit wird durch zwei Faktoren bestimmt:

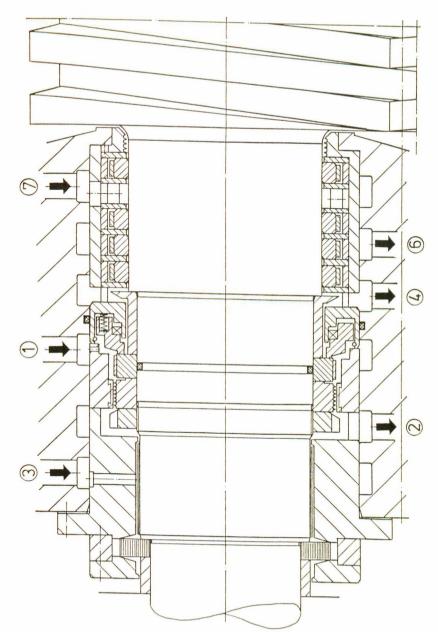
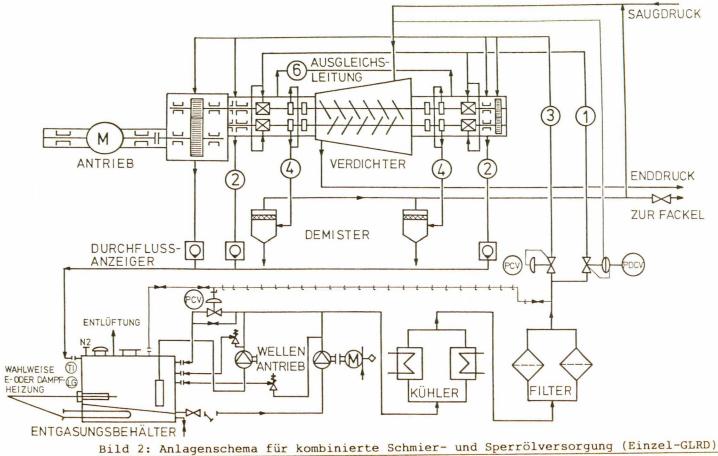


Bild 1: Einzelgleitringdichtung mit atmosphärenseitigem Drosselring



- Labyrinthe oder Schwimmringe arbeiten aufgrund ihrer endlichen Dichtspalte immer mit relativ großen Leckagen. Der Volumenstrom ist dabei stark druckabhängig.
- Die Leckage muß immer so groß sein, daß die an der Gleitringdichtung entstandene Reibungswärme abtransportiert werden kann.

Die Sperrflüssigkeit wird bei dieser Konstruktion sowohl zur Abdichtung des Gases als auch zur Kühlung der Gleitringdichtung verwendet. Bleiben die abzudichtenden Drücke im Prozeßgas kleiner als die des Lagerschmierölsystems, so kann der Sperrölkreislauf und die Lagerversorgung mit dem gleichen Aggregat versorgt werden. Für diese Randbedingungen ist dies eine wirtschaftlich sinnvolle und technisch einfache Lösung der Abdichtaufgabe.

Übersteigen die Prozeßdrücke die der Lagerölversorgung, so ist das gesamte System auf das Druckniveau des Sperrkreislaufes anzuheben. Zur Versorgung der Lager wird dann die Schmierölmenge auf den erforderlichen Druck abgedrosselt. In Bild (2) ist ein solcher Sperrölkreislauf dargestellt. Das Sperrdrucksystem muß dann die Leckölmengen der Schwimmringdichtung wieder auf das Druckniveau des Sperrkreises anheben. Mit zunehmenden Drücken im Prozeßraum und im Sperrdrucksystem steigt der Aufwand für das Pumpen wachsender Leckagemengen auf immer höhere Druckniveaus sehr schnell an. Neben diesem stark zunehmenden Aufwand für das Sperrdrucksystem kommt ein weiterer Nachteil dieses Dichtungskonzepts hinzu. Bei den größeren Mengen und den höheren Drücken steigt auch das Lösungsvermögen von Gasen im Sperröl. Das auf hohem Druckniveau und erhöhter Temperatur im Öl aufgenommene Gas kann erhebliche Mengen annehmen. Nach dem Entspannen des Sperröls hinter der Schwimmringdichtung tritt dann dieses Gas unter starker Schaumbildung als Leckage an die Atmosphäre. Bevor diese Sperrflüssigkeit wieder in den Sperrkreislauf eintreten

kann, muß sie erst vollständig entgast werden. Hierzu sind entsprechend große Behälter notwendig, aus denen darüber hinaus das Leckagegas abführt werden muß.

Bei hohen Druckniveaus im Prozeßgas übersteigen die Kosten für den Sperrölkreislauf ein vielfaches die der Dichtung. Die Wirtschaftlichkeit der ganzen Schraubenmaschine wird aufgrund des aufwendigen Sperrflüssigkeitssystem in Frage gestellt. Solche Maschinen sind nur bis zu bestimmten Druckbereichen wirtschaftlich zu betreiben.

3. Hochdrucksysteme

Eine technisch bessere und wirtschaftlich sinnvollere Lösung ist der Einsatz einer EHD-Doppelgleitringdichtung. In Bild (3) ist ein solches System dargestellt. Bei dieser Konstruktion ist der zuvor vorgestellte Schwimmring durch eine zweite Gleitringdichtung ersetzt worden. Die zwischen dem Prozeßgas und dem Sperrkreislauf angeordnete Gleitringdichtung arbeitet ebenfalls nur mit einer geringen Druckdifferenz. Es herrschen hier die gleichen Betriebsbedingungen wie in dem vorher vorgestellten Konzept. Die zweite Gleitringdichtung hat nun die Aufgabe, den Sperrölkreislauf zur Atmosphäre hin abzudichten. An dieser Stelle muß die gesamte Druckdifferenz zwischen Sperrkreis und Atmosphäre an einer Dichtfläche abgedrosselt werden. Diese Gleitringdichtung unterliegt dabei extremen Belastungen.

Nach dem heutigen Stand der EHD-Gleitringdichtungstechnik ist es möglich, Systemdrücke bis zu 300 bar und Umfangsgeschwinzigkeiten über 100 m/s an einer Dichtsläche erfolgreich zu beherrschen.

Durch ein solches Doppelgleitringdichtungssystem kann der Aufwand für den Sperrölkreislauf Bild (4) erheblich reduziert werden. Daraus ergeben sich eine Reihe verschiedener

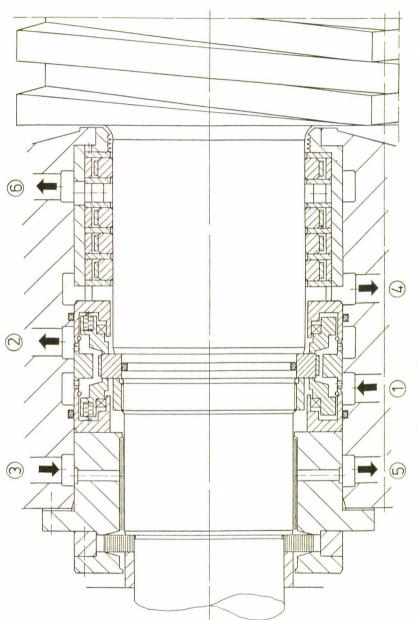


Bild 3: EHD - Doppelgleitringdichtung

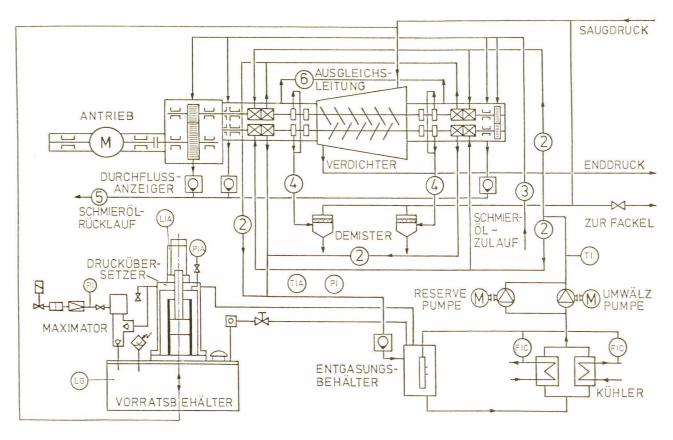


Bild 4: Anlagenschema für Sperrölversorgung (EHD-Doppel-GLRD)

Vorteile, die hier im einzelnen aufgeführt werden sollen.

- Der Sperrflüssigkeitskreislauf kann von der Schmierölversorgung getrennt werden und ist völlig autark. Dadurch ist der Einsatz von angepaßten und mit dem Produktgas verträglichen Sperrflüssigkeiten möglich.
- Die Leckage der atmosphärenseitigen Gleitringdichtung ist im Vergleich zu einem Schwimmring vernachlässigbar gering. Das in den Sperrkreis nachzufördernde Volumen ist damit auch klein und kann durch eine mit Druckluft gesteuerte Kolbenpumpe geschehen.
- Die Wärmeabfuhr aus den Gleitringdichtungen geschieht durch einen Wärmetauscher, der sich im Sperrkreislauf befindet. Die abzuführende Wärmemenge ist aufgrund der elastohydrodynamisch arbeitenden Gleitringdichtung minimal.
- Die Pumpe im Sperrkreislauf dient nur noch zur Umwälzung der Flüssigkeit. Die Energieaufnahme wird deshalb sehr klein.
- Die Entgasung der Sperrflüssigkeit entfällt, da sie immer im geschlossenen Kreislauf unter ständig hohem Druckniveau verbleibt. Nachdem das Sperröl gesättigt ist, wird kein weiteres Gas aus dem Produktraum gelöst. Die Gasleckage über den Sperrflüssigkeitskreislauf wird damit verhindert.

Durch den Einsatz einer EHD-Doppelgleitringdichtung reduziert sich der Aufwand für den Sperrflüssigkeitskreislauf erheblich. So ist es möglich, Schraubenmaschinen bei einem erheblich höheren Druckniveau wirtschaftlich zu betreiben. Um die Reduzierung des Sperrdrucksystems zu ermöglichen, ist der Einsatz einer

EHD-Gleitringdichtung erforderlich, die einen erhöhten technischen Einsatz erfordert. Dieser zusätzliche Aufwand für die Dichtung beträgt aus wirtschaftlicher Sicht nur einen Bruchteil der Einsparungen am Sperrdrucksystem.

4. Aufbau der EHD-Gleitringdichtung

Im folgenden soll die Wirkungsweise und der theoretische Hintergrund der elastohydrodynamischen Gleitringdichtung beschrieben werden.

Es handelt sich hierbei um Gleitringdichtungen, die aus dem Werkstoff Siliciumkarbid hergestellt werden. In Bild (5) ist eine solche Dichtung dargestellt.

Unter den Dichtflächen sind Hohlkammern angeordnet, die eine in Umfangsrichtung unterschiedliche Steifigkeit erzeugen. Durch die im Spalt wirkenden Druckkräfte wird sich während des Betreibens eine Welligkeit der Dichtflächen einstellen, die wiederum hydrodynamische Druckkräfte erzeugt. Sind die Elastizitätsunterschiede der Dichtflächen in Umfangsrichtung ausreichend groß, werden die elastohydrodynamisch erzeugten Drücke im Spalt eine vollständige Trennung von Gleit- und Gegenring bewirken. Ist ein solcher Zustand erreicht, arbeitet die Gleitringdichtung verschleißfrei mit kleiner Verlustleistung und geringer Wärmeentwicklung.

Die Herstellung solcher komplizierter Bauteile aus Siliciumkarbid geschieht mit einer speziell entwickelten Technologie. In Bild (6) ist der Aufbau eines solchen Ringes dargestellt. Er setzt sich aus einer Vielzahl dünner Folien zusammen, die als Rohteile flexibel und leicht bearbeitbar sind. In diesem Zustand des Materials lassen sich beliebige Formen ausstanzen. Durch Übereinanderschichtung der einzelnen Folien erhält man dann

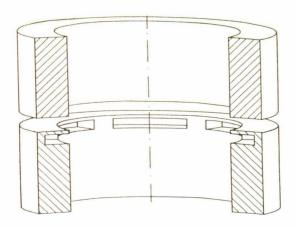


Bild 5: EHD - Gleitringdichtung

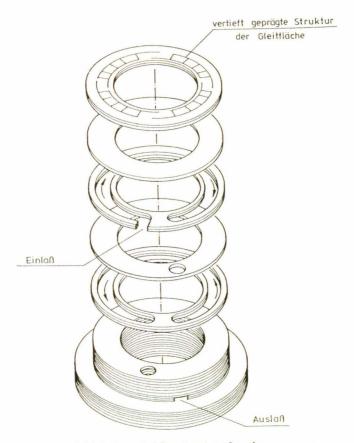


Bild 6: Folientechnologie

das gewünschte Bauteil. Durch den Sinterungsprozeß wird der aus den Laminaten bestehende Körper zu einem homogenen Bauteil. Mittels dieser Folientechnologie ist es auch möglich, in den sonst nur mit Diamantwerkzeugen bearbeitbaren Werkstoff geschlossene Hohlräume einzubringen.

5. Auslegung einer EHD-Gleitringdichtung

Um mit der Fertigungstechnologie optimale Gleitringdichtungen herstellen zu können, war eine eingehende Untersuchung der geometrischen Ausbildung der Kammergeometrien und deren Einfluß auf das Betriebsverhalten von Gleitringdichtungen notwendig. Dazu wurde ein auf der Finiten Elemente Methode basierendes Berechnungsprogramm entwickelt. Mit ihm ist es möglich, 4 verschiedene physikalische Vorgänge in einer axialen Gleitringdichtung zu beschreiben.

- Druckverteilung im Dichtspalt
- elastische Verformungen der Dichtungskörper
- Temperaturberechnung im Dichtspalt
- Temperaturverteilung in der Dichtung

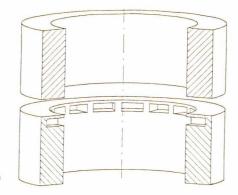
Jeder dieser vier Punkte kann durch eine Differentialgleichung beschrieben werden, die dann mit der Finiten
Elemente Methode numerisch gelöst wird. Nichtlineare
Zusammenhänge werden nach dem Nowton-Raphson-Verfahren
iteriert. Um die konstruktive Gestaltung dieser EHDGleitringdichtungen zu optimieren, wurden eine Reihe
unterschiedlicher Gestaltungsvarianten untersucht.
Sie unterscheiden sich in der Anzahl und der Größe
der Kammern. In Bild (7) ist eine solche Variante dargestellt. In diesem Bauteil sind 16 Kammern eingebracht. Für die Berechnung ist es jedoch nur erforderlich, ein Segment, bestehend aus einer Kammer und

Dichtungsgeometrie

Anzahl der Segmente : 16 Kammergröße : 17,5°

Steggröße : 5°

mittlere Segmentlänge : 10,1 mm



verformte Finite Elemente Struktur

Anzahl der Freiheitsgrade : 4407

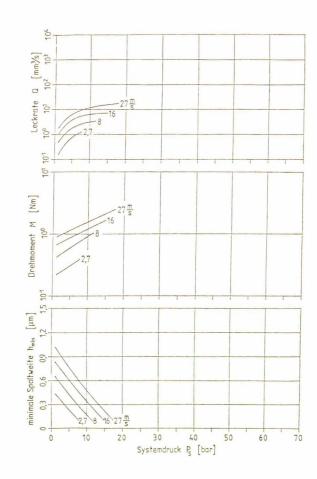
Anzahl der Elemente : 226

Gleitgeschwindigkeit :8 m/s

Systemdruck :10 bar



Bild 7: Leistungskennfeld 16 Kammern



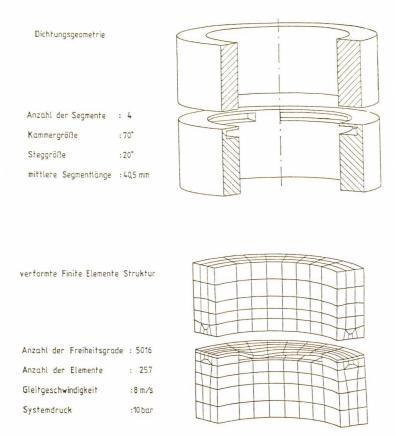
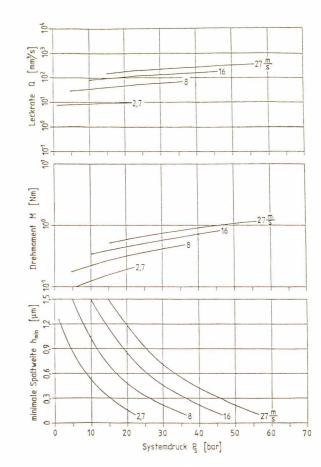


Bild 8: Leistungskennfeld 4 Kammern



einem Steg, zu betrachten. An den Schnittflächen sind dann die entsprechenden periodischen Randbedingungen zu beachten.

Als Ergebnis der Berechnungen erhält man ein Leistungsdiagramm dieser Dichtung. Dort ist in Abhängigkeit der minimalen Spaltweite, des Reibmoments und der Leckage von dem abzudichtenden Systemdruck aufgetragen. Im Vergleich dazu ist in Bild (8) eine Variante mit nur 4 Kammern dargestellt. Anhand des dargestellten, verformten FE-Netzes erkennt man bei dieser Dichtung erheblich größere Verformungen der Dichtflächen. Auch im Leistungsdiagramm ist eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit zu erkennen. Zur Optimierung dieser Dichtungsgeometrien wurden weitere Varianten berechnet. Um die Ergebnisse vergleichend beurteilen zu können, wurde eine mittlere Segmentlänge definiert. Sie errechnet sich aus dem mittleren Radius und dem Umfangswinkel eines Segmentes. In Bild (9) ist der maximal zulässige Systemdruck über der Segmentlänge aufgetragen. Das Optimum der Belastbarkeit ist etwa bei einer Länge von 20 mm abzulesen. Hier ist die größtmögliche Anzahl der Kammern bei noch ausreichender Elastizität erreicht. Neben der maximalen Belastung ist für die optimale Auslegung der Gleitringdichtung auch die Leckrate und das erforderliche Drehmoment von Interesse. In Bild (10) sind für zwei verschiedene Systemdrücke das Drehmoment und die Leckrate über die mittlere Segmentlänge aufgetragen. Das minimale Drehmoment liegt auch hier im Bereich von 20 mm Segmentlänge. Das Leckageverhalten der Dichtung ist dem des Drehmomentes entgegengesetzt. Hier werden die größten Werte im Bereich um 20 mm Segmentlänge erreicht. Bei der Untersuchung der Temperaturverteilung innerhalb der Dichtungen zeigt sich, daß hohe Leckraten zusammen mit einem niedrigen Drehmoment zu den niedrigsten Betriebstemperaturen führen. In Bild (11) ist diese Abhängigkeit für zwei unterschiedliche Systemdrücke dargestellt. Zusammenfassend ist aus den Berechnungen zu schließen, daß die günstigste Bauform bei etwa 20 mm Segmentlänge der Kammer liegt. Hier werden die höchsten Tragfähigkeiten mit den niedrigsten Betriebstemperaturen erreicht.

Es zeigt sich, daß durch aufwendige Untersuchungen und Entwicklungsarbeit Gleitringdichtungen zu immer höherer Leistungsfähigkeit bei geringerer Temperaturentwicklung gebracht werden können. Durch den gestiegenen Aufwand für die Herstellung, Fertigung und Entwicklung dieser EHD-Gleitringdichtungen lassen sich für das Gesamtsystem "Gleitringdichtung" wirtschaftlichere und kostengünstigere Lösungen finden. So wird es möglich, Schraubenmaschinen auch bei sehr hohen Druckniveaus und Drenzahlen noch wirtschaftlich zu betreiben.

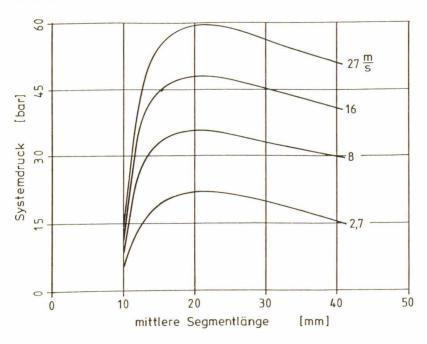
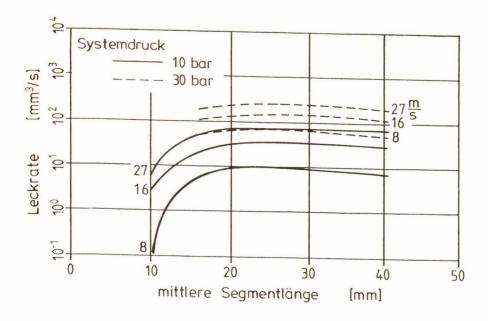


Bild 9: Belastungsdiagramm



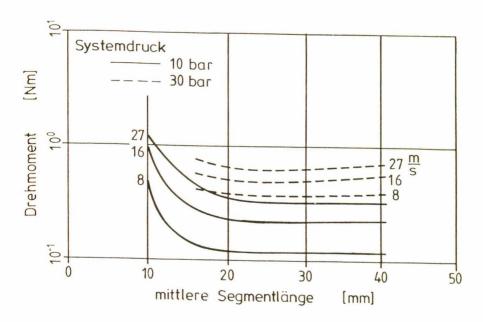


Bild 10: Leistungskennfeld

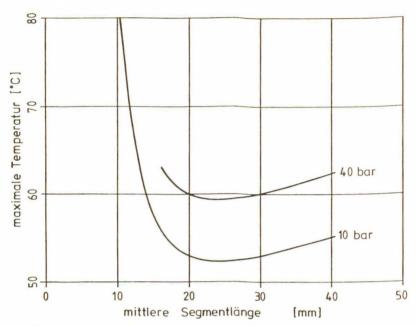


Bild ll: Temperaturkennfeld

Hinweise

- /1/ K. H. Victor
 Gleitringdichtungen für Schraubenmaschinen
 Stand der Technik
 VDI Bericht Nr. 521, 1984, S. 49 76
- /2/ H. Peeken, R. Dedeken
 Elastohydrodynamische Gleitringdichtungen
 VDI Bericht Nr. 600.3, 1987, S. 287 297
- /3/ J. Huber, H. Schelter, K. H. Victor, H. W. Laarmann H. Peeken, R. Dedeken

 Verbesserung der Elastohydrodynamik von
 Gleitringaichtungen durch direkte Temperaturregelung und definierte Oberflächenbeeinflussung
 Tribologie, Band 10, 1985, S. 315 ff
 Springerverlag

- /4/ R. Dedeken

 Optimierung von elastohydrodynamischen axialen

 Gleitringdichtungen mittels der Finiten Elemente

 Methode Diss. 1986
- /5/ K. H. Victor Dichtungen in der Verfahrenstechnik Resch Verlag
- /6/ R. Dedeken
 Elastohydrodynamische Berechnung axialer Gleitringdichtungen
 Finite Element Methode in der Praxis, 1987, S. 94
 114
 - 9. Reutlinger Arbeitstagung, T-Programm