

Drehzahlerhöhung an Membrankompressoren

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

- 1 Aufbau und Wirkprinzip eines Membrankompressors**
 - 1.1 Funktion**
 - 1.2 Aufbau des Membrankopfes**
 - 1.3 Aufbau des Hydraulikantriebes**

- 2 Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Membrankompressoren**
 - 2.1 Erhöhung des Hubvolumens**
 - 2.2 Drehzahlsteigerung**

- 3 Voraussetzungen zur Leistungssteigerung**

- 4 Grundlagenuntersuchungen an der Ölhydraulik**

- 5 Ergebnisse**

Ausblick

Literatur

Einleitung

Eines der besonderen Merkmale des Membrankompressors ist die Verwendung von statischen Dichtungen, die eine nahezu völlige Leckagefreiheit gewährleisten. Er besitzt keinerlei gleitende und zu schmierende Bauteile im Gasraum. Aufgrund dieser besonderen Konstruktion

- sind Membrankompressoren hermetisch nach außen abgedichtet. Der gesamte Gasraum des Kompressors ist mit metallischen, statischen Dichtungen abgedichtet. Ohne besonderen Aufwand werden Leckraten von 10^{-4} mbar l/s und mit einer besonderen Modifikation Leckraten von 10^{-8} mbar l/s nach außen erreicht. Diese geringen Leckraten machen eine Verwendung für die „heißen“ Bereiche in kerntechnischen Anlagen oder für die Verdichtung von hochgiftigen Gasen möglich.
- arbeiten Membrankompressoren absolut schmiermittelfrei im Arbeitsraum, d.h. das zu fördernde Gas kommt mit keinen Schmiermitteln in Berührung und die Entsorgung verbrauchter und kontaminierter Schmieröle und -fette entfällt. Kritische Gase, wie z.B. Sauerstoff oder Chlorgas, können ohne Probleme auch bei höheren Drücken verdichtet werden.
- fällt im Gegensatz zu anderen Verdichterbauarten kein Abrieb von Kolbenringen und Stopfbuchspackungen an. Spül- und Sperrgaseinrichtungen sind nicht erforderlich. Das zu fördernde Gas verlässt den MembranKompressor mit dem gleichen Reinheitsgrad mit dem es auch angesaugt wurde. Ist die Qualität des angesaugten Gases bereits gegeben, kann dieses Gas ohne Nachbehandlung nach dem Verdichten z. B. als Atemluft, Dotiergas für die Halbleiterindustrie oder als Wasserstoff für die Lebensmittelindustrie zur Verfügung gestellt werden.
- kommt das Gas nur mit metallischen Werkstoffen in Berührung. Je nach Anforderung und Gasart stehen verschiedene Werkstoffqualitäten zur Auswahl. Hierdurch wird bei richtiger Werkstoffwahl eine hohe Korrosionsbeständigkeit erreicht. Die Werkstoffpalette reicht von einfachem Baustahl über rostfreie Edelstähle bis zu Hastelloy. [1]

Diese großen Vorteile gegenüber anderen Kompressorbauarten werden erkauft mit relativ geringen Förderleistungen. Die Förderleistung - auch mit Massen- oder Volumenstrom bezeichnet - ergibt sich aus dem geometrischen Hubvolumen des Membrankopfes und der Drehzahl des Kompressors. Die Drehzahlgrenze liegt zur Zeit bei ca. $400-500\text{min}^{-1}$ bei größeren riemengetriebenen Kompressoren und bei ca. 750min^{-1} bei direkt gekuppelten kleineren Einheiten (bis etwa 40kW Antriebsleistung). Die Hubvolumina liegen zwischen 4,5 und 8000cm^3 .

1 Aufbau und Wirkprinzip eines Membrankompressors

1.1 Funktion

Die Gasverdichtung erfolgt durch eine in einem doppelt konkaven Raum schwingende Sandwich-Membrane. Die Membrane dichtet und trennt den Gasraum mittels einer Metalldichtung hermetisch vom Antrieb ab. Sie ist am Umfang zwischen dem Membrandeckel und dem Flansch mit der Lochplatte eingespannt und wird von einem ölhydraulischen Antrieb oszillierend durchgebogen (Bild 1).

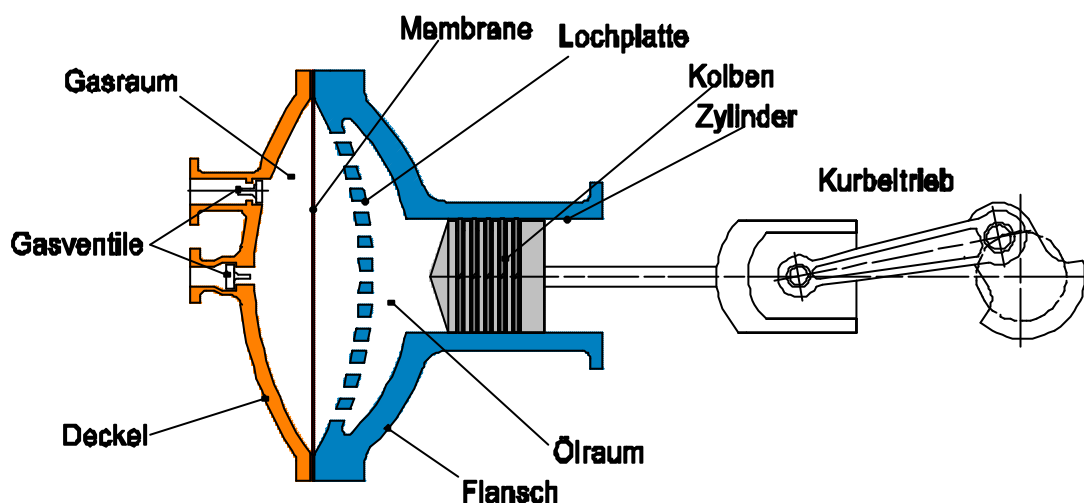


Bild 1: Membrankopf und Kurbeltrieb [1]

Durch diese räumliche Durchbiegung wird der Gasraum zwischen der Membrane und dem Membrandeckel zyklisch vergrößert und verkleinert. Mit Beginn der Vergrößerung des Gasraumes wird Gas aus der Ansaugleitung über das im Membrandeckel eingebaute Kompressorsaugventil angesaugt und während der Gasraumverkleinerung über das ebenfalls im Membrandeckel eingebaute Kompressordruckventil in die Druckleitung ausgeschoben.

Der für die Durchbiegung der Membrane erforderliche Öldruck wird von einem Kurbeltriebwerk mit einem oszillierend bewegten Kolben aufgebaut. Das Hubvolumen dieses Kolbens entspricht annähernd dem Hubvolumen des Membrankopfes.

Während des Druckhubes schiebt der Kolben das Öl in den Membrankopf und dort durch die Lochplatte auf die Rückseite der Membrane. Die Membrane wird dadurch gegen die konkave Oberfläche des Membrandeckels gebogen. Der zurücklaufende Kolben zieht die Membrane gegen die ebenfalls konkave Oberfläche der Lochplatte.

Da der Kolben bei einer Umdrehung der Kurbelwelle einen kompletten Hub durchläuft, entspricht die Schwingfrequenz der Membran der Verdichterdrehzahl. [1]

1.2 Aufbau des Membrankopfes

Der Membrankopf besteht im wesentlichen aus dem Membrandeckel, der 3-fach Sandwichmembrane, der Lochplatte und dem Flansch. Die Kompressorventile sind nebeneinander im Membrandeckel angeordnet. Sie werden, gedichtet mit metallischen Dichtringen, über Druckstücke gehalten.

Das aus 3 einzelnen, nicht profilierten Blechen bestehende Membranpaket ist am Umfang zwischen dem Membrandeckel und der Lochplatte gasdicht eingespannt, wobei die Abdichtung nach außen durch einen Metall-O-Ring erfolgt.

Da durch diese Anordnung nur:

- der Membrandeckel
- das gasseitige Blech der Sandwich-Membrane
- die Kompressorventile mit den Druckstücken und Dichtringen
- der Metall O-Ring der Membranabdichtung

gasberührt sind, ist die Leckfreiheit mit geringem Aufwand zu gewährleisten. Die statischen Dichtungen, speziell deren Geometrie und Einbauräume, sind erprobt und haben sich in jahrzehntelanger Praxis bewährt [2]. Einzig der den Lastspielwechseln unterworfenen Membransatz bedarf einer Überwachung. Mit dieser Überwachung kann das Versagen einer Einzelmembran erfasst und der Verdichter frühzeitig abgeschaltet werden.

1.3 Aufbau des Hydraulikantriebes

Der Membrankopf ist über den Flansch mit dem Zylinder verschraubt. Die oszillierende Bewegung des Kolbens schiebt während des Druckhubes das sich im Zylinder befindende Hydrauliköl in den Flansch und von dort durch die Lochplatte auf die Rückseite der Membrane.

Da bei jedem Hub des Kolbens eine geringe Menge Öl an der Kolbenabdichtung vorbei zurück in das Kurbeltriebwerk verloren geht, muss dieser Verlust kontinuierlich ergänzt werden.

Dies geschieht durch die sogenannte Kompensationspumpe (Bild 2). Diese Ölpumpe wird direkt von der Kurbelwelle angetrieben und fördert bei jedem Saughub des Kolbens eine geringe Menge Öl in den Raum hinter der Membrane. Da der genaue Ölverlust nicht bekannt ist, muss die eingespritzte Ölmenge in jedem Fall größer als die Leckage sein. Damit ist der Ölraum hinter der Membrane vor dem Druckhub etwas überfüllt.

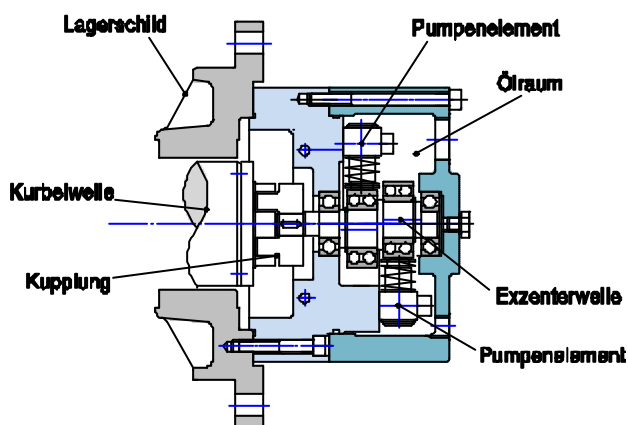


Bild 2: Kompensationspumpe [1]

Das zuviel geförderte Öl muss nun aus dem System entfernt werden. Zu diesem Zweck befindet sich am höchsten Punkt des Ölraumes im Flansch ein Ölüberströmventil. Dieses Ventil schleust das von der Kompensationspumpe zu viel eingespritzte Öl wieder aus. Der Öffnungsdruck des Ventils wird über eine vorgespannte Feder eingestellt. Er liegt ca. 10% höher als der Gasenddruck der jeweiligen Stufe.

Kurz bevor der Kolben den oberen Totpunkt erreicht, hat er die Membrane bereits am Membrandeckel zum Anliegen gebracht. Das während des restlichen Kolbenhubes von wenigen Millimetern verdrängte Öl strömt nun über das Überströmventil zurück in den Öltank. Gleichzeitig wird Luft, die sich durch Ausgasung des Hydrauliköles am höchsten Punkt angesammelt hat und ebenfalls den Wirkungsgrad des Kompressors beeinträchtigt, mit ausgetragen.

In dem Öltank kann das Öl ausgasen. Aus diesem Behälter wird das Öl von der Kompensationspumpe auch angesaugt. Durch diese Anordnung ist gewährleistet, dass das Hydrauliksystem jederzeit optimal gefüllt und der Ölraum immer vollkommen entlüftet ist.

Ab einer bestimmten Membrankopfgröße wird das Hydrauliköl im Membrankopf gekühlt. Mit einer kühlwasserdurchströmten Rohrschlange wird hier schon ein Teil der Verdichtungs- und Reibungswärme abgeführt.

Als Hydraulikmedien werden spezielle Mineralöle verwendet, die gleichzeitig auch als Schmieröl für das Kurbeltriebwerk dienen. An diese Öle werden folgende Forderungen gestellt:

- gute Schmiereigenschaften
- geringe Kompressibilität
- geringe Neigung zum Schäumen
- möglichst hoher Viskositätsindex

Für besondere Anwendungs- und Einsatzfälle müssen aber auch andere Hydraulikmedien eingesetzt werden, z. B. synthetische Spezialöle oder Wasser mit Rostinhibitor (hierbei ist jedoch ein getrennter Triebwerks-Schmierkreislauf erforderlich) für Hochdruck-Sauerstoffverdichter. Die Verwendung dieser speziellen Hydraulikmedien ist eine reine Vorsichtsmaßnahme. Auch in dem höchst unwahrscheinlichen Fall, daß der gesamte Membransatz gleichzeitig zerstört wird und das Hydraulikmedium mit dem Gas in Berührung kommt, wird ein Ausbrennen verhindert. [1]

2 Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Membrankompressoren

Die Leistungssteigerung eines Membrankompressors lässt sich scheinbar recht einfach verwirklichen, muss man doch einfach nur das Volumen pro Hub oder die Anzahl der Hübe pro Zeiteinheit erhöhen. Dabei sind durch die Physik jedoch Grenzen gesetzt.

2.1 Erhöhung des Hubvolumens

Eine Erhöhung des Hubvolumens kann zum einen durch eine Vergrößerung der Membranauslenkung, zum andern durch Vergrößerung des Membrandurchmessers erreicht werden. Die Auslenkung der Membranen erfolgt nach speziellen Kurvengeometrien, da dadurch die Lebensdauer bestimmt wird. Dabei spielt unter anderem die maximale Auslenkung der Membranen für die Lebensdauer eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund wird man nicht so schnell von bewährten Geometrien abweichen, ohne eine entscheidende Verbesserung zu erzielen.

Die Vergrößerung des Membrandurchmessers ist dagegen ein hervorragende Möglichkeit, die Produktpalette zu standardisieren und verschiedene Leistungsstufen anzubieten. Das Hubvolumen ändert sich proportional zu D^3 und hat somit den größten Effekt. Die Änderungen der Membrankopfgeometrie und der Kolbenabmessungen auf der Hydraulikseite sind mit relativ geringem konstruktivem Aufwand verbunden. Der maximale Durchmesser wird durch die am Markt erhältlichen Blechgrößen bestimmt (z. Z. 1400mm).

Ab einer bestimmten Membrankopfgröße sind die Nachteile offensichtlich. Das Membranpaket wird mit wachsendem Durchmesser immer "weicher". Diesem Effekt begegnet man mit einer größeren Anzahl an Einzelmembranen, die dann als "Paket" arbeiten. Ein Membranwechsel kann dann für den Betreiber sehr kostenintensiv werden, da unter anderem die Montagezeit durch die deutlich vergrößerte Schraubenanzahl bei großen Kopfdurchmessern stark ansteigt. Auch das zu zerspanende Material bei der Fertigung großer Membranköpfe nimmt erheblich zu, so dass die Fertigungskosten sich deutlich erhöhen.

Ein nicht zu unterschätzender physikalischer Faktor ist die Ölmenge, die in einem Membrankopf bewegt werden muss. Diese ist deutlich größer als das Hubvolumen (Faktor 3 und höher). Für den Wirkungsgrad eines Membrankopfes ist der Strömungsverlauf, also die Bewegung des Öls, und damit der Druckaufbau im Hydraulikraum des Membrankopfes von entscheidender Bedeutung. Nur durch eine Strömung, die einen Druckaufbau von außen nach innen erzeugt, ist gewährleistet, dass sich das Membranpaket vom äußeren Durchmesser beginnend nach innen am Membrandeckel abrollt und das Gas komplett aus dem Membrankopf geschoben wird. Andernfalls bilden sich lokale Gasblasen, die den Wirkungsgrad und somit die Förderleistung verschlechtern und zusätzlich durch örtliche Spannungsspitzen, die Lebensdauer des Membranpaketes erheblich reduzieren.

2.2 Drehzahlsteigerung

Da die Membrankompressoren in der Regel über einen Keilriementrieb angetrieben werden, ist eine Drehzahlsteigerung wesentlich einfacher und kostengünstiger. Diese kann entweder über eine entsprechend große Motorscheibe oder mittels Frequenzumrichter, bei variablem Drehzahlbetrieb, geschehen. Der Steigerung der Förderleistung durch Drehzahlerhöhung sind jedoch ebenfalls Grenzen gesetzt (Verschleiß, max. Belastung durch Fliehkräfte, etc.).

Eine Motorscheibe und Keilriemen kosten sind kostengünstig und in der Regel auch nachträglich einfach auszutauschen. Es ist auf eine ausreichende Verschiebbarkeit des Motors und die Größe des Riemenschutzkastens zu achten. In jedem Fall ist die Dimensionierung der Kompressorventile und der Rohrleitungen bei einer nachträglichen Drehzahlerhöhung zu prüfen.

Der Frequenzumrichterbetrieb ist deutlich teurer, benötigt eine Regelung und in explosionsgefährdeten Bereichen entsprechend druckfest gekapselte Motoren. Alle Komponenten zusammen sind bei großen Förderleistungen meistens günstiger als ein größerer Membrankopf. Des Weiteren kann die Maschine auf diese Weise klein gehalten werden, was die Fertigungskosten senkt.

Der gravierendste Nachteil ist die erhöhte Biegewechselbelastung der Membrane, auch wenn diese im Normalbetrieb nur gewalkt wird. Weiterhin wirken sich Störungen in der Ölhydraulik und Gaspolster im Membrankopf nun deutlich stärker auf deren Lebensdauer aus. Auch im Fall der Drehzahlsteigerung ist somit die Ölströmung im Hydraulikteil von entscheidender Bedeutung. Neueste Untersuchungen [2] zeigen, dass sich dies nicht nur, wie früher angenommen, auf große Membrandurchmesser ($D_N > 350$ mm) bezieht, sondern auch auf Durchmesser < 350 mm.

3 Voraussetzungen zur Leistungssteigerung

Die Voraussetzungen, um die Leistung eines Membrankompressors über die zur Zeit existierenden Grenzen hinaus zu verschieben, sind im wesentlichen schon in den beiden vorherigen Kapiteln schon genannt worden. Sie sollen hier noch einmal näher erläutert und zusammengefasst werden.

Wichtig ist, dass die Membranen vom äußersten Durchmesser beginnend zum Mittelpunkt des Membrankopfdeckels abrollen. Das Membranpaket muss dabei an allen Stellen am Deckel anliegen und soll sich dabei nicht verwerfen. Ansonsten entstehen Gaseinschlüsse, die entweder im Membrankopf verbleiben, oder erst später unter erhöhtem Druck der Ölhydraulik aus dem Kopf "gepresst" werden. Dadurch werden Wirkungsgrad und Förderleistung vermindert, der Leistungsbedarf steigt. Zusätzlich entstehen um die Gaseinschlüsse hohe örtliche Biegespannungen in den Membranen, die zu einer stark reduzierten Lebensdauer dieses Bauteils führen.

Um nun eine optimale Bewegung der Membran zu gewährleisten, muss die Ölhydraulik, über die die Membran angetrieben wird, so optimiert werden, dass der Druckaufbau gezielt von außen nach innen erfolgt. Der Druckabfall im Rückhub sollte dementsprechend aus dem Zentrum heraus nach außen erfolgen.

4 Grundlagenuntersuchungen an der Ölhydraulik

Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit Fachhochschule Niederrhein in Krefeld wurden unter dem Titel „**Entwicklung eines Membrankompressors mit neuem Hydraulikkammersystem**“ [3] Grundlagenuntersuchungen zum Strömungsverlauf und Druckaufbau in einem Membrankopf durchgeführt.

Dabei wurde mit Hilfe eines Finite - Volumen - Modells die Geometrie des Membrankopfes nachgebildet und die durch die Kolbenbewegung entstehende Strömung simuliert. Ähnlichkeitsuntersuchungen mit Hilfe dimensionsloser Kennzahlen sollen die Übertragung der Ergebnisse auf andere Betriebsparameter und Membrankopfdurchmesser ermöglichen.

Nachdem sich die Untersuchungen zunächst in erster Linie auf die Arbeitspunkte vorderer und hinterer Totpunkt konzentrierten, wurde anschließend mit dem besten Geometrieansatz der komplette Ansaug- und Verdichtungszyklus berechnet.

Das folgende Bild 3 zeigt das Modell nach den Modifikationen und die dazugehörigen Randbedingungen.

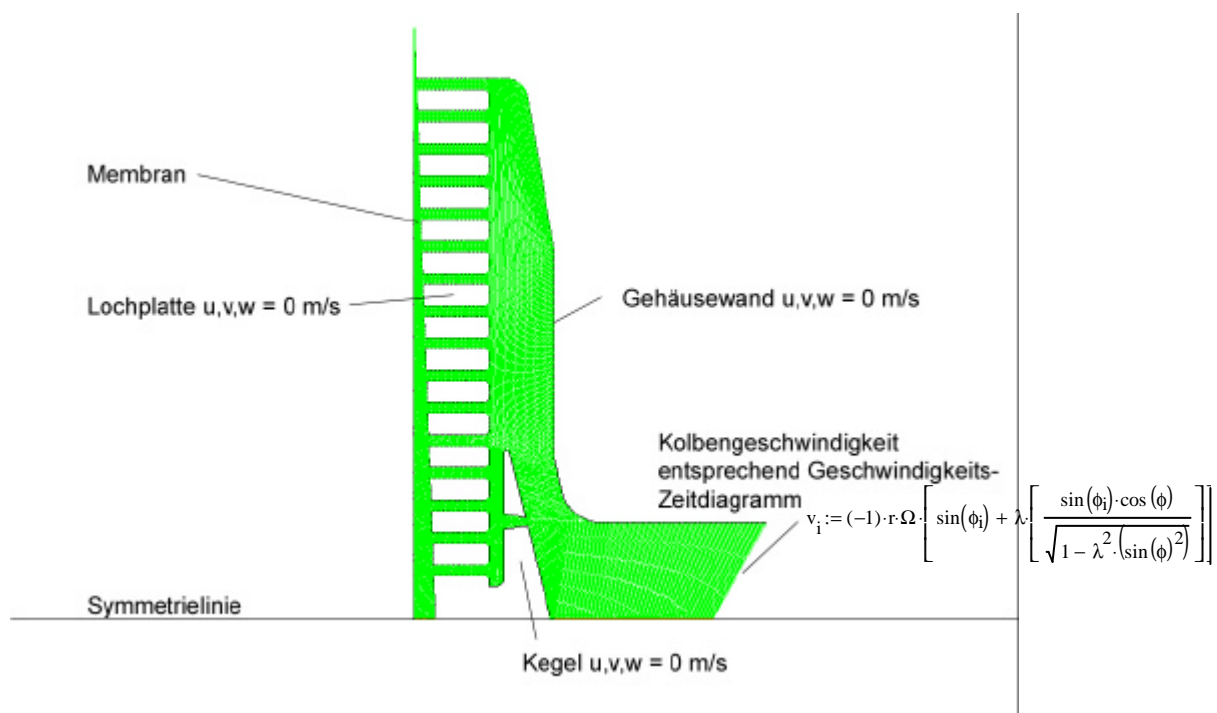


Bild: 3 Simulationsmodellierung [3]

5 Ergebnisse

Die Hauptkomponente des neuen Membrankompressors ist ohne Zweifel der mit Bohrungen versehene Verteilerkegel entsprechend Bild 4 (Patent angemeldet).

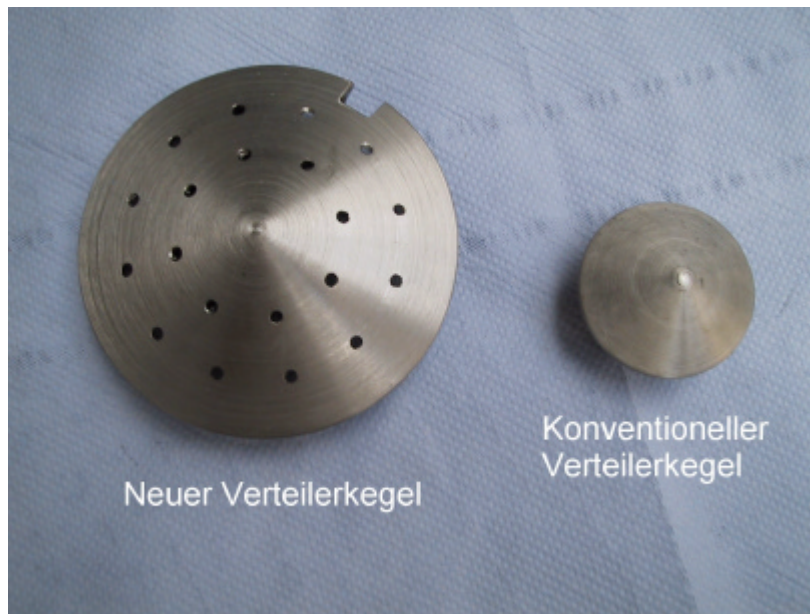
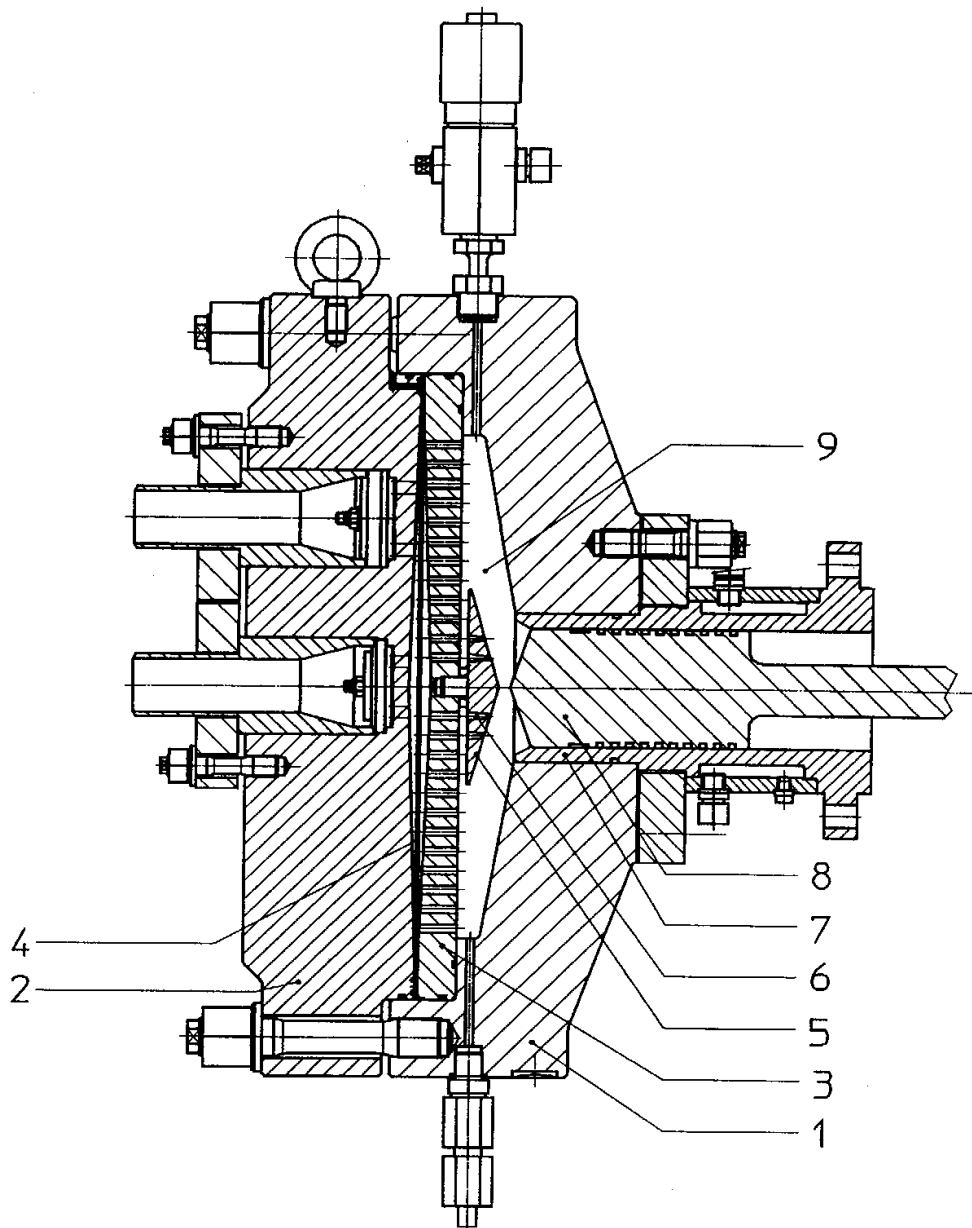


Bild 4: Neue und konventionelle Bauweise des Kompressorverteilerkegels [3]

Dieser neue Kegel hat die Funktion eines Strömungsbegrenzers (im weiteren Sinne ähnlich einem Rückschlagventil), ohne dass - wie sonst üblich - mechanisch bewegte Komponenten benötigt werden, die fehler- und verschleißanfällig wären. Durch Membranköpfe mit dem neuen Verteilerkegel werden folgende Vorteile gegenüber herkömmlich gebauten Membranköpfen erzielt:

- höherer Wirkungsgrad durch Reduzierung / Vermeidung von dissipativen Grenzschichtablösungen und damit verbundenen Strömungswirbeln (Totwasser-gebiete,)
- höherer Wirkungsgrad durch nahezu hundertprozentige Ausnutzung des geometrischen Arbeitsraumes (Membranhubvolumen)
- keine lokalen, erhöhten Biegespannungen in den Membranen durch Vermeidung von Gaspolsterbildung, dadurch verlängerte Standzeiten der Membranen mit entsprechend höherer Verfügbarkeit der Maschinen.

Zusammenfassend ist in Bild 5 der neue Prototyp des Membrankompressors nochmals in einer Schnittzeichnung dargestellt.



Kompressor-komponenten:

- (1) Flansch, (2) Deckel, (3) Lochplatte, (4) Membran,
(5) Neuer Verteilerkegel mit (6) Bohrungen,
(7) Zylinder, (8) Kolben, (9) Neuer Hydraulikraum

Bild 5: Neuer Prototyp des Membrankompressors [3]

Ausblick

Zwischenzeitlich durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass die Simulationsrechnungen in der Praxis nachvollziehbar sind. Vor allem wurden deutlich weniger Störungen / Aussetzer an den druckseitigen Kompressorventilen beobachtet. Auch die positive Beeinflussung sowohl bei kleinen als auch großen Membrankopfdurchmessern ist beobachtet worden. Für eine statistische Absicherung sind noch eine größere Anzahl von Messungen an Membranköpfen unterschiedlichen Durchmessers erforderlich.

Literatur

- [1] Dehnen, Dipl.-Ing. Manfred; Hofer Membranverdichter
- [2] Werksinterna der Fa. Andreas Hofer Hochdrucktechnik GmbH
- [3] Nassenstein, Prof. Dr.-Ing. Christoph; Habel, Dipl.-Ing. Heiko; „Entwicklung eines Membrankompressors mit neuem Hydraulikkammersystem“