

Voruntersuchungen des Floating Cup - Axialkolbenprinzips

Ir. Johan van den Oever, Dr. Ir. Inéz López Arteaga, Dr. Ir. Peter Achten

Innas B.V.
Nikkelstraat 15
NL – 4823 AE Breda
Niederlande
www.innas.com

Zusammenfassung

Das Floating Cup - Prinzip wird als neuer Typ einer Axialkolbenmaschine präsentiert. Trotz der Vielzahl der Kolben, die für geringe Strömungspulsationen sorgen, ist die Floating Cup - Maschine durchaus kostengünstig. Im Vergleich zu konventionellen Axialkolbenmaschinen sind die Anfertigungskosten gering, da hierbei abweichende Herstellungsverfahren zum Einsatz gelangen können. Anstelle eines einteiligen Trommels mit Schwingkolben besitzt die Floating Cup - Maschine feste Kolben und bewegliche Zylinderbüchsen. Aufgrund der Axialsymmetrie dieser Maschine werden die Axialkräfte, die auf die Kolben wirken, kompensiert.

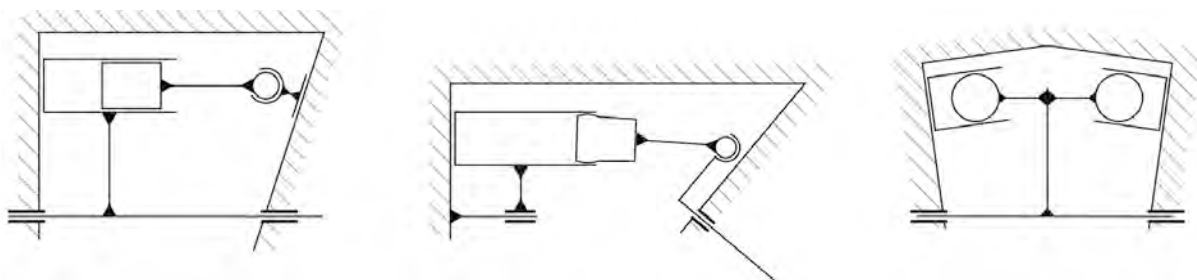
Die balancierten Kolbenringe verringern generell die Reibung. Aus entsprechenden Berechnungen und Messungen ergibt sich, dass die Auswirkung größerer Neigungswinkel der Kolben in den Zylindern durch die geringere Kolbenringreibung ausgeglichen wird. Leckagemessungen zeigen, dass der hier vorgestellte balancierte Kolbenring einen Kompromiss zwischen den Reibungskräften und den Leckagen darstellt.

Schlüsselwörter: Floating Cup - Maschine, Kostenpreis, Kolbenring – Messungen, Reibung, Leckage, Volumenstrompulsation

Seit vielen Jahren sind erhebliche Bemühungen zur Optimierung von Hydraulikmaschinen unternommen worden, um der steigenden Nachfrage nach besserer Nutzleistung, gedämpftem Geräuschpegel und reduzierten Kosten gerecht zu werden. Die meisten Untersuchungen konzentrieren sich auf Axialkolbenmaschinen, deren Funktionsprinzip auf zwei Grundbauarten beruht: dem Schrägscheibenbauart beziehungsweise der Schrägachsenbauart. Diese Maschinen erzielen einen guten Wirkungsgrad, die Kosten sind auf ein Minimum reduziert, und auch der Geräuschpegel ist dabei weitestmöglich minimiert worden. Die weitere Optimierung dieser Prinzipien im Hinblick auf bestimmte Aspekte ist durchaus möglich, hat jedoch negative Auswirkungen auf andere Aspekte. Somit kann man durch Einbau weiterer Kolben die Strömungspulsationen verringern und infolgedessen auch die Systemgeräusche dämpfen, kompensiert dies jedoch durch einen signifikanten Kostenanstieg. Diese Kompromiss-Situation ändert sich hingegen vollkommen mit der Einführung eines neuen Grundprinzips, das Floating Cup – Prinzip.

Beim Floating Cup - Prinzip handelt es sich um ein neues Axialkolbenprinzip, das in Hydraulikmotoren, Pumpen und Transformatoren zum Einsatz gelangen kann [1].

- Die Verschiebung ergibt sich aus der Auf- und Abwärtsbewegung der Kolben in den Zylindern;
- Die Zylinder sind in eine Trommel eingebaut und die Zylinderachse ist ungefähr parallel zur Achse orientiert;
- Die Trommel dreht sich oben auf eine Steuerplatte; diese Kombination aus Trommel und Steuerplatte funktioniert als Ventil, ähnlich der Weise, in der ein Kommutator in einem Elektromotor wirkt.



1a: Schrägscheibenprinzip 1b: Schrägachsenprinzip 1c: Floating Cup - Prinzip

Bild 1. Axialkolben - Prinzipien

Anstelle einer einzigen Trommel sind bei diesem neuen Prinzip zwei Trommeln einander spiegelbildlich gegenübergestellt. Dadurch heben sich die starken hydrostatischen Axialkräfte auf beiden Seiten vollkommen auf. Die Radialkräfte sind geringer als bei der Schrägscheiben- beziehungsweise Schrägachsenbauart.

Beim Floating Cup - Konzept sind die Kolben fest am Rotor montiert, so dass sich der Rotor und die Kolben als eine Einheit drehen. Aufgrund der leichten Schrägstellung der Trommel (siehe Bild 2) beschreibt die Drehbewegung der Kolben einen elliptischen Weg auf der Rotationsfläche der Trommel.

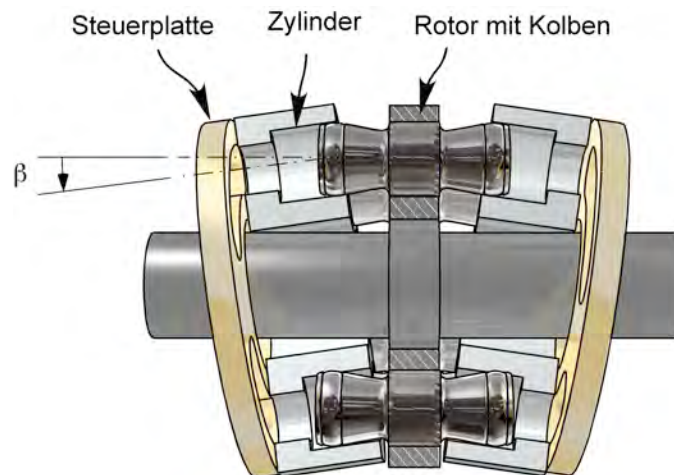


Bild 2. Der Winkel zwischen dem Kolben und dem Zylinder entspricht dem Neigungswinkel der Trommel.

Wenn der Neigungswinkel der Trommel gering ist, können die elliptische Differenz wie auch andere Toleranzen durch den Einbau von Kolbenringen kompensiert werden, die in Radialrichtung in einer Rille im Kolben frei beweglich sind. Je größer der Zwischenraum, der mit Hilfe der Kolbenringe geschlossen werden muss, desto größer ist hingegen die strukturelle Belastung der Ringe.

Es gibt jedoch eine weitere Möglichkeit zur Kompensation der elliptischen Differenz. Beim Floating Cup - Prinzip besitzt jeder fixierte Kolbenring seinen eigenen büchsenartigen Zylinder anstelle eines gemeinsamen Zylinderblocks. Die Zylinderbüchsen sind auf der rotierenden Trommelebene frei beweglich und kompensieren somit die elliptische Abweichung zwischen der Rotationsebene und der Trommelebene (siehe Bild 3).

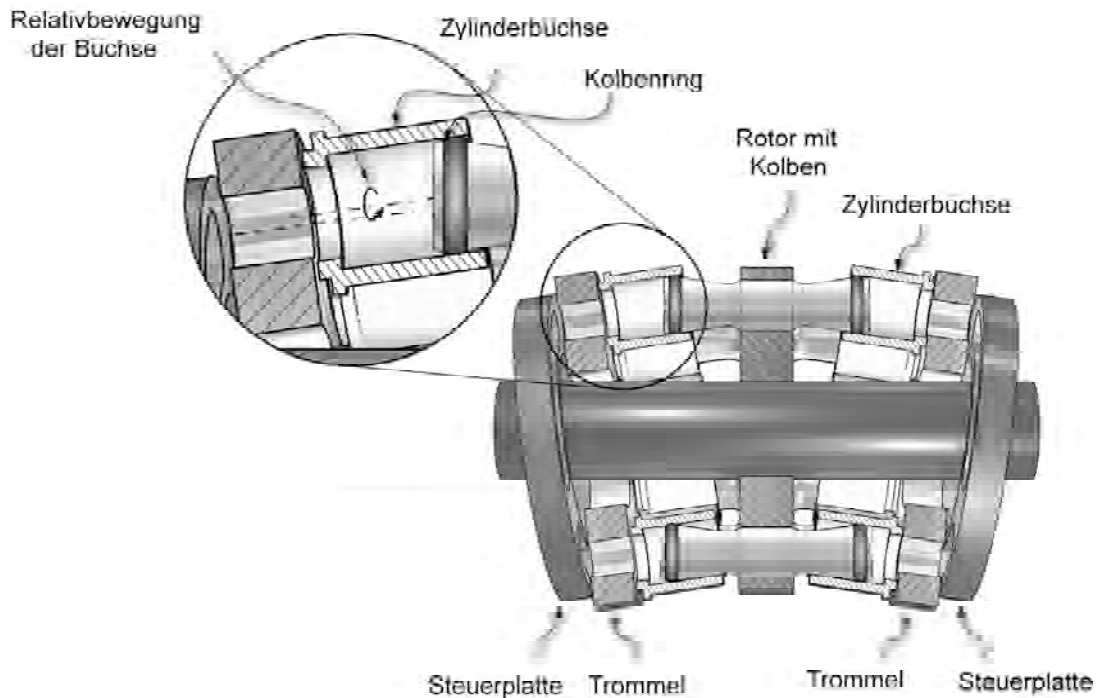


Bild 3. Axialkolben - Prinzip mit gleitenden Zylindern. Die Trommeln müssen lediglich die Dichtungsfunktion für die Steuerplatte übernehmen. Das Lager und der Mechanismus zur Drehung der Trommel sind hier nicht abgebildet.

In Axialrichtung sind die Zylinderbüchsen nicht ganz balanciert und die verbleibende Kraft klemmt die Büchsen weiterhin an der Trommel fest (siehe Bild 4). Aufgrund der geringen relativen Bewegung und der geringen Axialkraft zwischen den Zylindern und der Trommel ergeben sich in diesem Fall nur leichte Reibungsverluste.

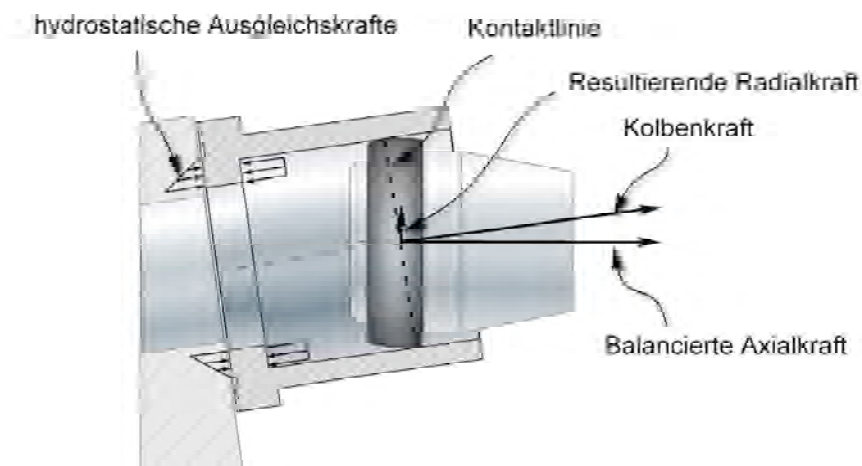


Bild 4. Detaildarstellung: Querschnitt durch eine gleitende Zylinderbüchse.

Die Kontaktlinie zwischen dem Kolbenring und der Zylinderbüchse ist quer zum Zylinder orientiert. Daher sind die Zylinderbüchsen in Radialrichtung im Gleichgewicht. Die Hydraulikkraft wirkt direkt auf den Kolben. Die Axialkomponente

der Kraft hingegen wird von der Axialkraft kompensiert, die am gegenüber liegenden Ende des Rotors auf den Kolben wirkt. Die Radialkomponente erzeugt ein auf die Achse wirkendes Drehmoment, das für hydrostatische Maschinen, wie Motoren, Pumpen und Transformatoren, wesentlich ist.

3 Kolbenring - Reibung

Die Kolben bestimmen die Position der Zylinderbüchsen relativ zur Trommel. Die Kolbenringe sind so auf dem Pumpenkolben fixiert, dass die Radialbewegung unterdrückt wird und somit keine Reibungsverluste zwischen den Kolben und den Kolbenringen auftreten.

Die Reibungsverluste zwischen den Kolbenringen und den Zylinderbüchsen können jedoch nicht vernachlässigt werden. Die auf den Kolbenring wirkenden Radialkräfte aufgrund des Hydraulikdrucks sorgen für eine gewisse Reibung zwischen dem Kolbenring und der Zylinderbüchse. In Bild 5 (links) wird für ein konventioneller unbalancierter Kolbenring die radiale Druckbelastung gezeigt. Für jedes Segment $\Delta\varphi$ des Kolbenrings wirkt eine effektive Radialkraft auf den Kolbenring (rechts im Bild). Die Radialbelastung ist horizontalsymmetrisch, in vertikaler Richtung jedoch asymmetrisch. Ein Segment auf etwa 180° ist fast gänzlich kompensiert; ein Segment auf etwa 0° hingegen ist kaum kompensiert. Da der Kolbenring bei 0° einer starken Aufwärtskraft und bei 180° einer geringen Abwärtskraft ausgesetzt ist, wirkt die effektive Kraft auf den Kolbenring unter dem Strich aufwärts. Daher tendiert der Kolbenring zur Aufwärtsbewegung und verursacht somit die auf den Kolben wirkende Antriebskraft.

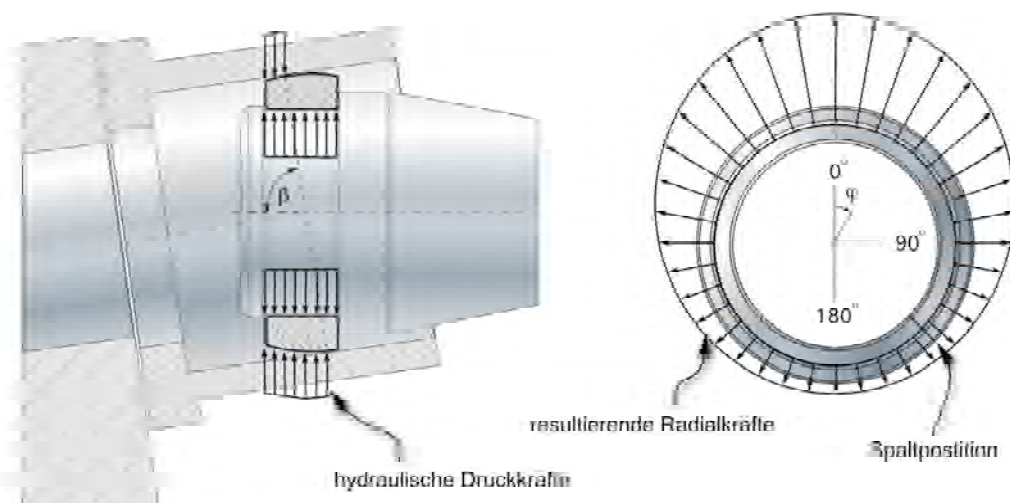


Bild 5. Hydraulikkräfte in Radialrichtung bei einem unbalancierten Kolbenring. Die Pfeile deuten die Summen der Hydraulikkräfte pro Segment $\Delta\varphi$ an.

Da der Kolbenring irgendwo im Bereich seiner Peripherie einen Spalt aufweist, ist die Biegesteife des Kolbenrings insgesamt gering. Die resultierende Hydraulikkraft wird nicht nur auf den Kolben übertragen, sondern auch auf die Zylinderbüchse. In Bild 6 wird ein kleinerer Teil der aufwärts wirkenden Kraft (F_{direkt}) direkt auf den Kolben übertragen. Ein größerer Teil der Kraft (F_{indirekt}) wird jedoch auf den oberen Bereich der Zylinderbüchse übertragen und erzeugt dort eine sehr starke Reibung. Infolge der Kraft F_{indirekt} tendiert die freie Zylinderbüchse zur Aufwärtsbewegung. Die Zylinderbüchse ist relativ steif und überträgt diese Kraft F_{indirekt} auf den Boden der Zylinderbüchse. Hier wird die Kraft F_{indirekt} wiederum auf den Kolbenring und dann auf den Kolben übertragen. So lange eine gewisse relative axiale Geschwindigkeit zwischen dem Kolbenring und der Zylinderbüchse aufrecht erhalten wird, verursacht die Kraft F_{indirekt} eine gewisse Reibung sowohl im oberen wie auch im unteren Bereich des Kolbenrings.

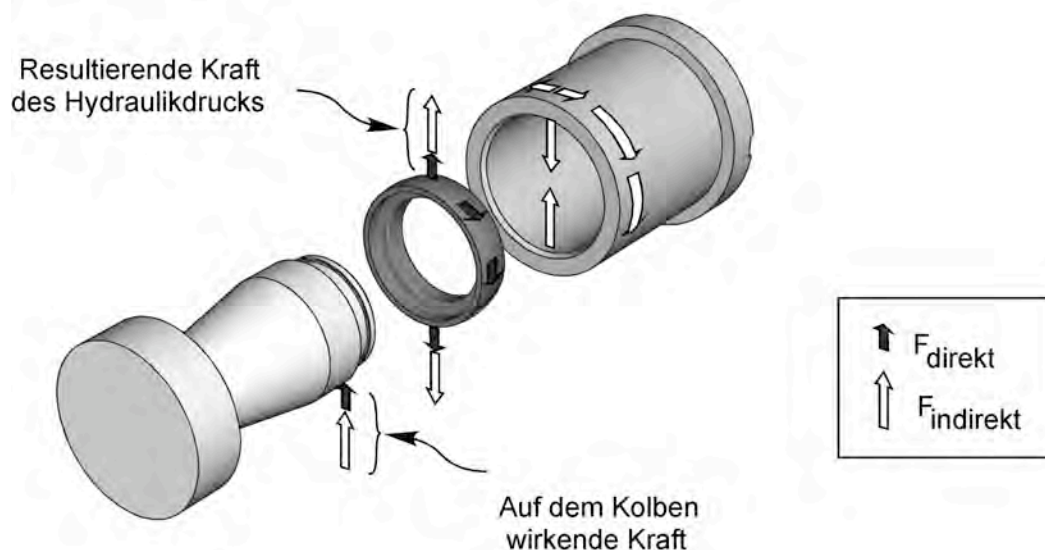


Bild 6. Wechselwirkungskräfte zwischen dem Kolben, dem Kolbenring und der Zylinderbüchse.

In der Floating Cup - Maschine könnte man unbalancierte Kolbenringe verwenden. Die Radialkräfte eines unbalancierten Kolbenrings in einer Floating Cup - Maschine aber, sind viel höher als die Radialkräfte des gleichen Rings in einer Schrägachsenmaschine. Dies erfolgt aus den größeren Neigungswinkeln in der Floating Cup - Maschine (9°) im Vergleich zur Schrägachsenmaschine (3°). Angesichts der erwünschten guten Leistung der Floating Cup Maschine besitzen die konventionellen unbalancierten Kolbenringe deshalb eine unakzeptabel hohe Reibung.

4 Der balancierte Kolbenring

Zur Behebung des Reibungsproblems wurde ein balancierter Kolbenring vorgesehen (siehe Bild 7). Die resultierende hydraulische Belastung pro Segment ist jetzt anders. Anstelle einer nach aussen wirkenden Kraft in jedem einzelnen Segment der Peripherie wirkt nun eine nach innen gerichtete Kraft in der unteren Hälfte des Kolbenrings.

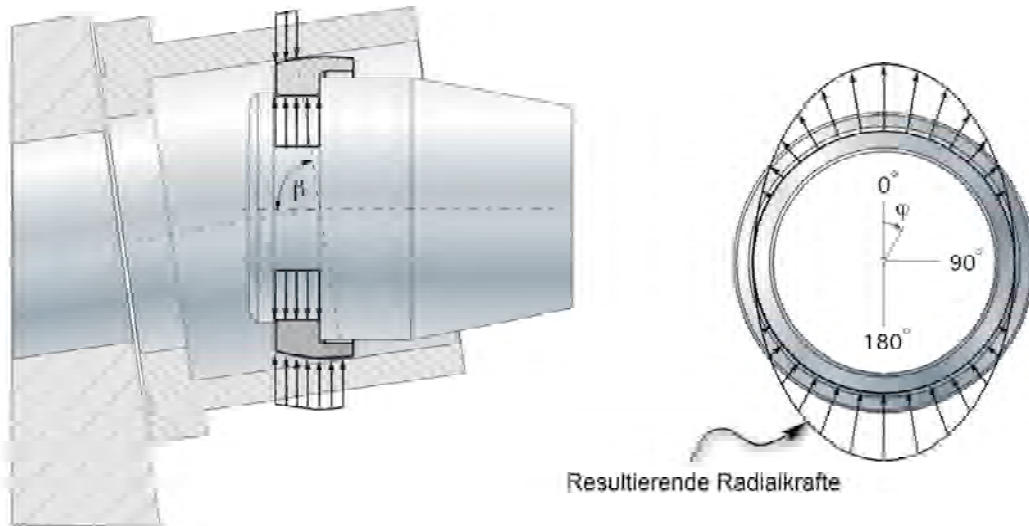


Bild 7 Hydraulikkräfte in Radialrichtung bei einem balancierten Kolbenring.

Im Vergleich zum unbalancierten Kolbenring führt dies zu einer erheblichen Verringerung der Kräfte, die die Reibung verursachen. Die Kraft F_{direkt} , die direkt auf den Kolben übertragen wird, erhöht sich; und die Kraft F_{indirekt} , die über die Zylinderbüchse übertragen wird, verringert sich. Dadurch nimmt auch die Reibung zwischen dem Kolbenring und der Büchse ab.

5 Finite Element- Analyse

Dieser erhebliche Einfluss der Ausbalancierung des Kolbenrings auf die Reibung wird durch Finite Element – Berechnungen bestätigt (Bild 8). Im Vergleich zum unbalancierten Kolbenring verringern sich die maximalen Kontaktspannungen beim balancierten Kolbenring auf 60%. Noch wichtiger ist jedoch die Tatsache, dass die Reibung des balancierten Kolbenrings dadurch auf 25% reduziert wird.

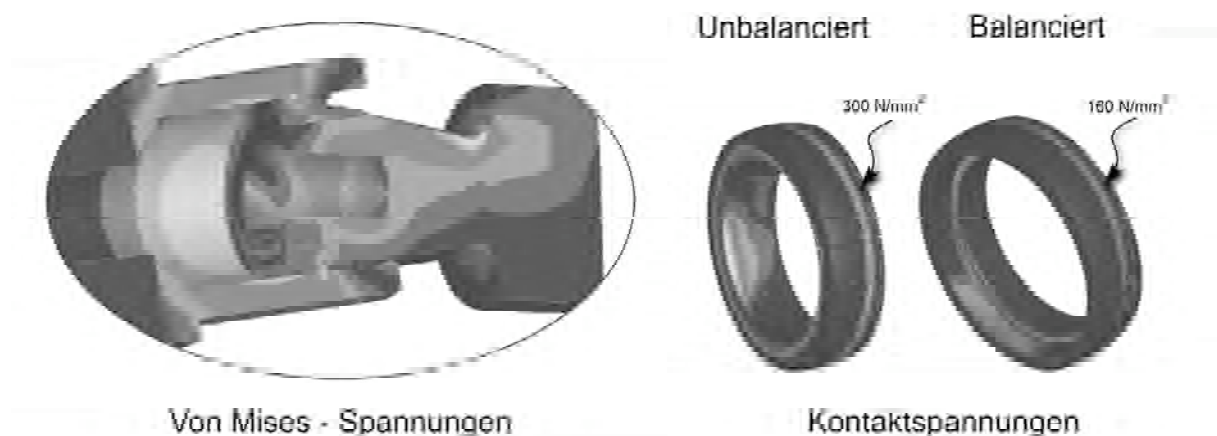


Bild 8 Ergebnisse der Finiten Elemente – Berechnungen für die unbalancierten und die balancierten Kolbenringe. Der Winkel der Spaltposition ist 0°.

6 Reibungsmessungen

Auch die Messungen der Reibung geben ein ähnliches Ergebnis. Die Reibung zwischen dem Kolbenring und der Büchse wird mit einer spezifischen Versuchsanordnung gemessen (Bild 10).

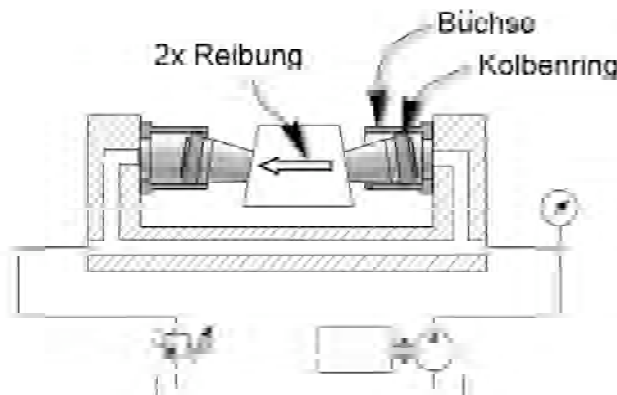


Bild 9. Versuchsanordnung für die Kolbenring-Reibung und Leckage

In Bild 10 sind die gemessenen Reibungswerte dargestellt als Prozentsatz der Kolbenkraft; sie sind dadurch mit den früheren Messergebnissen an Kolbenringen vergleichbar [2]. Die Messwerte für die Reibung zeigen einen erheblichen Unterschied zwischen den unbalancierten und den balancierten Kolbenringen. Im Vergleich zum unbalancierten Ring verringern sich die Messwerte für die Reibung des balancierten Rings auf etwa 20-30%. Die Verringerung der Reibung hängt vom Grad der Ausbalancierung (dem Ausgleichsgrad) ab. Das Ausgleichsverhältnis ist in Bild 10 definiert. Für ein Ausgleichsverhältnis 1.0 gilt eine Reibungsreduktion bis

27%; bei einem Ausgleichsverhältnis von 1.13% hingegen kann die Reibung bis auf 20% verringert werden.

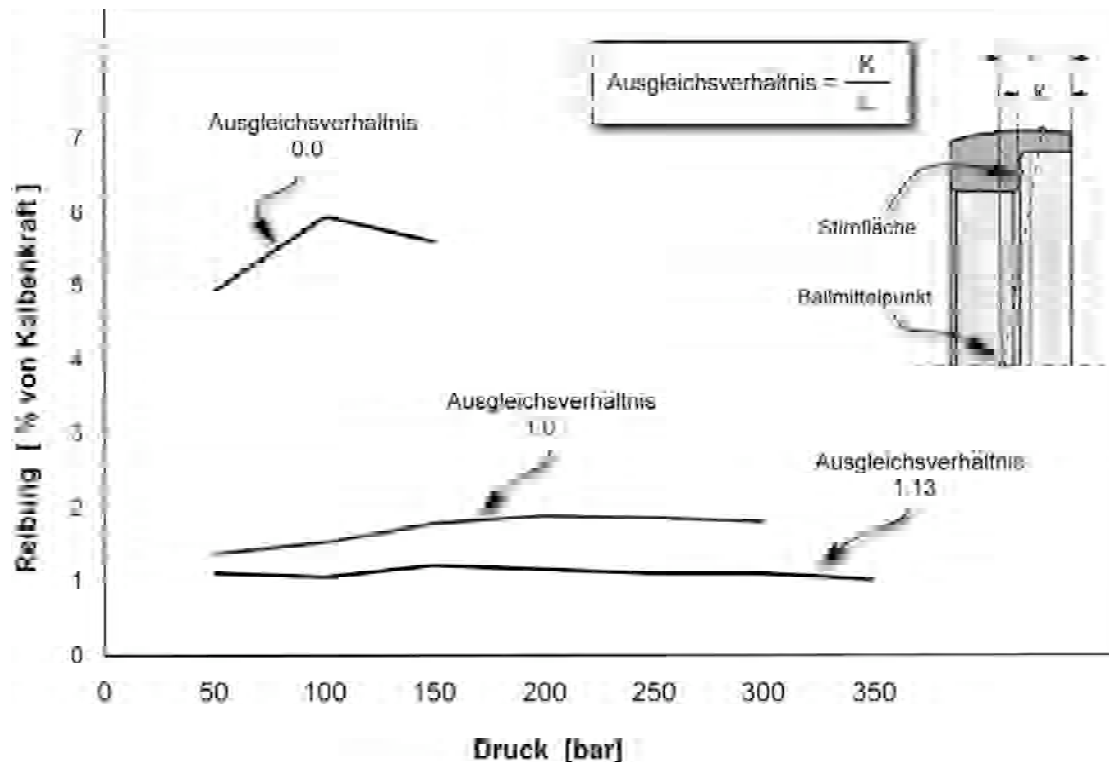


Bild 10. Reibungsmesswerte bei unbalancierten und balancierten Kolbenringen. Der relative Winkel zwischen dem Kolben und der Büchse beträgt 9°. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Mittelwerte der Winkelmessungen in der Spaltposition von 0°, 90° und 180°.

7 Leckagemessungen

Das Ausgleichsverhältnis hat aber auch Einfluss auf die Leckage. Der Bild 11 sind Leckagen zu entnehmen, die mit der in Bild 10 gezeigten Versuchsanordnung ermittelt wurden. Es handelt sich hier um Leckage zwischen Kolbenring und Büchse. Bei einem Ausgleichsverhältnis von 1.0 ist die Leckage gering und fast unabhängig vom Winkel der Spaltposition. Bei einem größeren Ausgleichsverhältnis von 1.13 nimmt die Leckage zu und wird abhängig vom Winkel der Spaltposition. Bei diesen größeren Ausgleichsverhältnissen können die nach innen gerichteten Hydraulikkräfte im unteren Bereich des Kolbenrings den Kolbenring von der Büchse lösen. Auf diese Weise kann dann eine erhebliche Lücke entstehen, insbesondere wenn der Winkel der Spaltposition zwischen 90° und 180° liegt.

Bei einem Ausgleichsverhältnis von 0.0 ist die gemessene Leckage viel größer als bei Ausgleichsverhältnisse von 1.0 und 1.13. Das ist in Widerspruch mit dem Gedanke dass der Ring die ganze Peripherie entlang auf der Büchse gedrückt wird.

Grund für die größere Leckage ist dass der Leckspalt beim Ausgleichsverhältnis von 0.0 im Vergleich zu Ausgleichsverhältnisse 1.0 und 1.13, mehr als 50% größer war. Der Absolutwert der Spalt ist bei den Ausgleichsverhältnissen 1.0 und 1.13 ähnlich wie bei herkömmliche Maschinen, für das Ausgleichsverhältnis 0.0 jedoch größer. Dieser größere Spalt war nicht vom Anfang anwesend, sondern sie hat sich im Betrieb gebildet. Grund dafür ist das die Kontaktspannungen beim unbalancierten Kolbenring so groß sind das die Ringoberfläche plastisch deformiert.

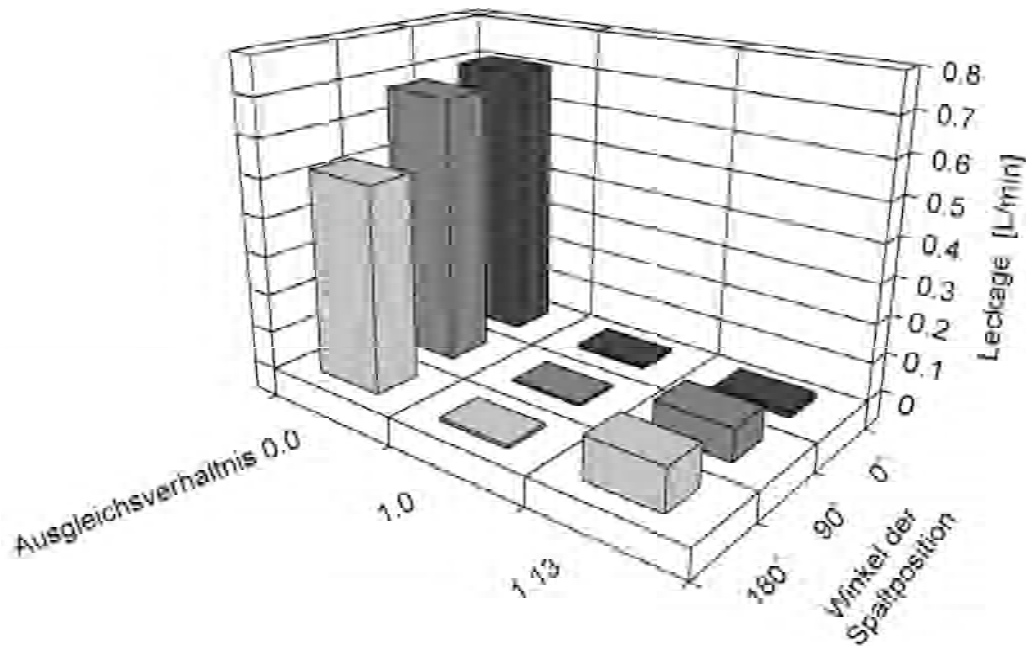


Bild 11. Gemessene Leckagen bei zwei Kolbenringen.

Aus den Leckagemessungen kann man schließen dass der Durchmesserdiffereenz zwischen Kolbenring und Büchse mehr Einfluss hat auf die Leckage als das Ausgleichsverhältnis. Damit bleiben die Anforderungen an der Anfertigung von balancierte- und unbalancierte Kolbenringen etwa gleich.

8 Fertigung

Die Trommel- und Kolbentoleranzen mit denen zum Beispiel bei Schrägachsenmaschinen gerechnet werden muss, spielen bei der Floating Cup Maschine nur eine kleine Rolle, weil die Büchsen gleitend sind und damit Fertigungstoleranzen aufnehmen können. Die Büchsen und Trommeln sind im Vergleich zu herkömmliche Trommel und Kolben einfach gestaltet. Viele Teile sind mit Feinstanz- und Kaltverformungsprozesse anzufertigen, und mechanische Bearbeitungen werden weitestgehend vermieden. Damit kann sich der Kostenpreis

stark senken, und braucht eine Zunahme der Kolbenzahl nicht zu höhere Kosten zu führen. Die Gesamtkosten können sich sogar senken.

9 Schlussfolgerung

Das Floating Cup - Axialkolbenprinzip kann bei einer Pumpe, einem Motor oder auch einem Transformator zum Einsatz gelangen. Alle diese Maschinen profitieren von der größeren Anzahl der Kolben, womit die Strömungspulsationen – und damit auch der Geräuschpegel – in der Saug- und Druckleitung stark unterdrückt werden.

Obwohl im Floating Cup - Axialkolbenprinzip mehr Kolben verwendet werden, kann der Kostenpreis deutlich reduziert werden, da in diesem Fall Herstellungsprozesse wie beispielsweise die Kaltverformung und das Feinstanzen möglich sind, die heute im Zusammenhang mit Hydraulikmaschinen kaum verwendet werden.

Zu den Teilen, die sich im Vergleich zur heutigen Situation grundlegend geändert haben, zählt auch der Kolbenring. Die balancierten Kolbenringe in der Floating Cup - Maschine sind fest am Kolben montiert und besitzen einen inneren Schnitt. Bei der Floating Cup - Maschine ist der Winkel zwischen dem Kolben und dem Zylinder fast dreimal größer als bei einer Schrägachsenmaschine. Würden in diesem Fall unbalancierte Kolbenringe verwendet, dann wäre die Reibung des Kolbenrings unakzeptabel hoch. Die balancierten Kolbenringe, die bei der Floating Cup – Maschine zum Einsatz gelangen, scheinen hingegen mehr als dreimal weniger Reibung zu entwickeln. Auf diese Weise werden die Auswirkungen der größeren Winkel einerseits und die Wahl eines balancierten Kolbenrings anderseits kompensiert mit Bezug auf die gesamte Reibung der Kolbenring.

Die balancierten Kolbenringe können im Hinblick auf eine geringe Leckage optimiert werden, indem man die richtige Steifheit und das bestmögliche Ausgleichsverhältnis wählt. Jenseits eines spezifischen Ausgleichsverhältnisses erfolgt jedoch immer ein Kompromiss zwischen Reibung und Leckage. Nach Maßgabe der Messergebnisse an verschiedenen Kolbenringen ist zu erwarten, dass das Anlaufverhalten sowie die Eigenschaften einer Floating Cup - Maschine im Hinblick auf die Reibungs- und Leckverluste mit denen einer Schrägachsenmaschine vergleichbar sind oder diese sogar übertreffen.

Die Geräusche, Pulsationen und Nutzleistungen lassen sich nur durch entsprechende Messungen präzise bestimmen. Daher besteht der nächste Schritt bei der Entwicklung der Floating Cup - Maschine in der Untersuchung eines

Prototyps einer entsprechenden Pumpe und der Auswertung der entsprechenden Ergebnisse.

Literatur

- [1]: Peter Achten, Titus van den Brink, Johan van den Oever, Jeroen Potma, Marc Schellekens, Georges Vael, Martijn van Walwijk. A dedicated design of the Innas Hydraulic Transformer, Proc. 3rd IFK, Aachen, March 5/6, 2002.
- [2]: Ingvar Hydrén, Liniendichtung für Kolben in Axialkolbenmaschinen, proc. 8. AFK, Aachen, 1988.