

# Floating Cup

## Ein neues Konstruktionsprinzip für hydrostatische Maschinen

THOMAS PLATZER, ROB A. H. VAN MALSEN,  
PETER A. J. ACHTEN

**Axialkolbenmaschinen spielen eine zentrale Rolle in der mobilen und stationären Hydraulik. Bis jetzt gab es von den geläufigen Einheiten zwei Ausführungen: den Schrägachsen- und den Schrägscheibentyp. Das Floating Cup-Konzept ist ein neuartiger Verdrängungsmechanismus der große Vorteile hat. Ein hoher Wirkungsgrad, Durchtriebmöglichkeit, geringe Pulsationen und niedrige Kosten sind jetzt möglich in einer Einheit. In dem Beitrag werden die Wirkung und Messergebnisse dieser neuen Technologie besprochen.**

### Panta Rhei - Alles fließt

Neuentwürfe sind oft Ergänzungen der bestehenden allgemeinen Kenntnisse und Bräuche innerhalb eines Fachgebietes. Die fachspezifischen Paradigmen formen die Spielregeln des Entwurfsprozesses und bestimmen in welche Richtung nach Lösungen gesucht wird für bestehende Probleme. Einige Beispiele solcher Entwurfsregeln für Axialkolbenmaschinen: „Der Schwenkwinkel sollte groß sein“, „Weniger Bauteile geben geringere Fertigungskosten“ oder „Je mehr Abdichtspalte um so schlechter der Wirkungsgrad“. Mit dieser Perspektive versucht man heutzutage hartnäckige Probleme wie Lärm, Volumenströmpulsation, steigende Preiskonkurrenz und Leckage zu bezwingen.

Innovationen erkennt man daran, dass sie gerade die geltenden Spielregeln brechen. Die natürliche Reaktion auf Innovation ist erstmals Widerstand, der Querdenker ist ein Spielverderber. Stellt sich aber heraus, dass der Spielverderber etwas Wertvolles hinzufügt, sind jene Mitspieler die sich am schnellsten den neuen Regeln anpassen im Vorteil. Wer am flexibelsten ist, wird das neue Spiel beherrschen.

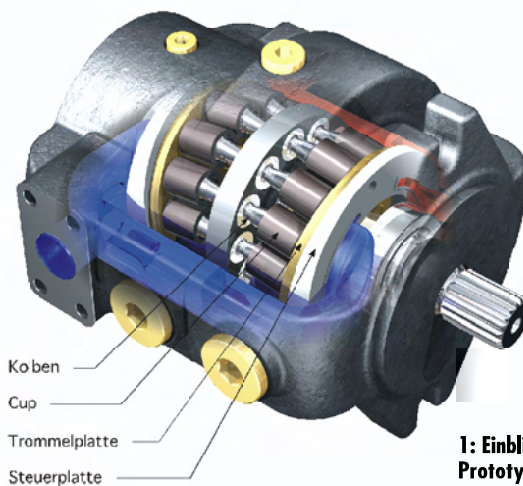
Mit der Einführung der Floating Cup (FC)-Technologie (Bild 1) werden Regeln

gebrochen. Dieser Beitrag berichtet von dem neuen Verdrängungsprinzip das anwendbar ist für alle Axialkolben-einheiten, ob Pumpen, Motoren oder Transformatoren. Ob es wertvoll ist kann man nur beurteilen, wenn man weiß was es beinhaltet. Hier werden der Aufbau und die Wirkung des ersten FC-Pumpenprototyps besprochen. Um eine vollständige Beurteilung der Technologie zu ermöglichen, werden die neuesten Messdaten und eine Kostenstudie der Pumpe präsentiert. Die Messungen wurden vom Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen (IFAS) in Aachen ausgeführt.

### Eine neue Axialkolbenlösung

Die Floating Cup-Pumpe wird zu der Familie der Axialkolbenmaschinen gerechnet. Die Kolben dieses Pumpentyps sind mehr oder weniger parallel an der Antriebsachse montiert wodurch die Ölverdrängung hauptsächlich in axialer Richtung stattfindet. Die wichtigsten und meist verwendeten Axialkolbenpumpen sind die Schrägscheiben- und die Schrägachsenpumpe.

Wie man in Bild 2 sehen kann, findet bei beiden Prinzipien die Ölabdichtung am einen Kolbenende und die Übertragung des Antriebsmoments auf die Kolben am anderen Kolbenende statt. Für diese Umsetzung des Moments  $T$  in die Kraft  $F_p$  wird in beiden Bauarten ein Kugelenk eingesetzt, das zusätzliche Radialkolbenkräfte zur Folge hat. Die Größe dieser Radialkräfte in Kombination mit hohen Kolbengeschwindigkeiten, verursachen einen nicht unwichtigen Teil der Reibungsverluste.

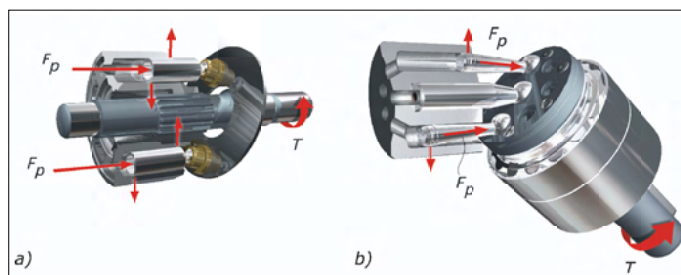


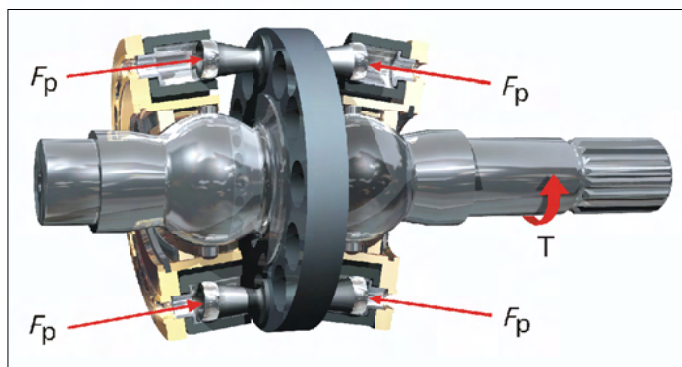
**1: Einblick in das Prototyp der Floating Cup-Pumpe**

In der FC-Pumpe befindet sich die Abdichtungsfläche und die Kraftübertragung am gleichen Kolbenende. Das Gelenk, das den Schrägstand der Trommel ermöglicht, wurde weggelassen (Bild 3). Das Antriebsmoment hat, wegen ihrer starren Verbindung mit dem Rotor, eine direkte Kraft auf die Mitte jeden Kolbenpaares zur Folge. Die Kräftebalance eines Kolbenpaares ist in Bild 4 zu sehen. Der Schrägstand der Abdichtlinie an den Kolbenköpfen ergibt zwei Horizontalkomponenten und zwei Vertikal-komponenten der hydraulischen Kraft  $F_p$ . Durch den symmetrischen Aufbau werden die großen Horizontalkräfte ausgeglichen. Es bleiben die vertikalen Kräfte übrig. Die Kraftübertragung ist rein hydraulisch. Die auftretenden Reibungskräfte sind im Vergleich zu konventionellen Lösungen stark reduziert. In Kombination mit dem kleineren Trommelwinkel, was zu niedrigeren Kolbengeschwindigkeiten führt, ist ein höherer hydro-mechanischer Wirkungsgrad garantiert. Die Leistungsdichte bleibt erhalten wegen der hohen Kolbenzahl und der relativ großen Kolbendurchmesser (Bild 5).

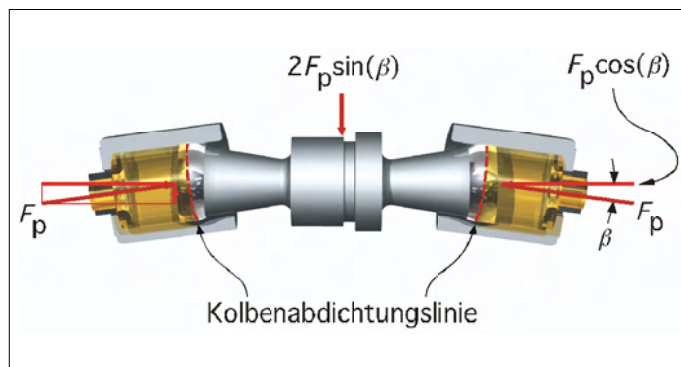
Die Fixierung der Kolben hat zur Folge, dass die Verdrängungszyylinder einen zusätzlichen Freiheitsgrad haben müssen damit die Achsenrotation ohne kinemati-

**2: Kraftübertragung der Schrägscheibenpumpe (a) und der Schrägachsenpumpe (b)**



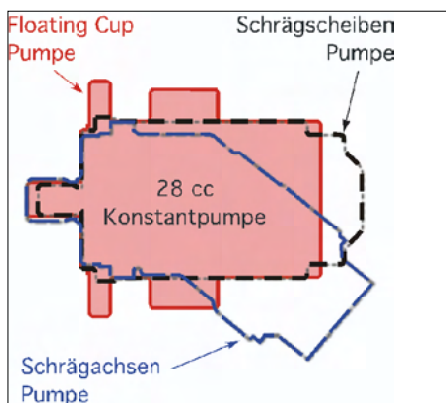


### 3: Kraftübertragung in der Floating Cup-Pumpe



#### 4: Hydraulische Umsetzung des Antriebsmomentes in Ölkkräfte

sche Probleme ablaufen kann. Man stelle sich eine Zylinderwand durch die Längsachsen aller Kolben vor. Bekanntlich bekommt man eine Ellipsenförmige Schnittfläche bei der schrägen Anschneidung eines Zylinders. Die Bahn der Cups liegt auf jener Ellipse. Ein vergleichbares Phänomen tritt bei Schrägscheibenmaschinen auf [10], wo die hydraulische Lagerung der Gleitschuhe diesen Maschinen



## 5: Vergleich der Größe mit zwei geläufigen Pumpen

den benötigten Freiheitsgrad bietet. In der FC-Pumpe wird der Freiheitsgrad realisiert, durch die Verdrängungszyylinder von der Trommel zu entkoppeln. Diese konstruktive Ausführung ist der Grund für den Namen ‘Floating Cup’. **Bild 6** zeigt einen Querschnitt der Pumpe womit der Mechanismus im Detail verdeutlicht wird.

Jeder Kolben hat einen separaten Verdrängungszyylinder, hier 'Cup' genannt. Die Cups sind mit einem Hohniet lose auf der Trommelplatte befestigt. Die Niete hat zwei Funktionen: erstens hält sie den Cup während des Saugtaktes auf der Trommelplatte. Zweitens verhindert sie, dass der Cup von der Zentrifugalkraft weggeschleudert wird. Im radialen Sinn erlaubt sie dem Cup aber genügend Spiel, um der relativen Kolbenbewegung folgen zu können. Jeder Cup ist hydrostatisch balanciert, vergleichbar zu den Trommeln in heutigen Axialkolbenmaschinen.

Die Trommelplatten werden nicht über die Kolben und Cups angetrieben, sondern direkt mittels eines Koppelstiftes von der Achse (Bild 6). So werden unnötig große Reibungskräfte zwischen Kolbenkopf und Cup vorgebeugt. Zusätzlicher Vorteil der

Floating Cups ist die Unterbrechung der Toleranzkette: relative Positionsfehler der verschiedenen Teile können von den 'schwebenden' Cups aufgefangen werden. Die Trommelplatten drehen sich auf den Steuerplatten, die fest im Gehäuse liegen. Der Winkel der Trommelplatten bezüglich des Rotors kennt seine Begrenzungen. Weil der Cup sich schräg am Kolben auf und ab bewegt, muss der Kolben kegelförmig sein. Der minimale Durchmesser des Kolbenhalses und damit auch seine Steifheit, bestimmen den maximalen Schwenkwinkel. Floating-Cupmaschinen mit 24 Kolben die bis 400 bar ausgelegt werden, haben daher einen maximalen Trommelwinkel von etwa 11°. Durch die doppelseitige Ausführung wäre das vergleichbar zu einer einseitigen Pumpe mit etwa 22°. Der kleine Trommelwinkel hat als Vorteil, dass Durchtrieb möglich ist. Wäre der Trommelschrägstand groß, wurde das Loch in den Steuerplatten zu klein werden, um eine durchgehende Achse mit genügender Steifigkeit zuzulassen.

## Messungen

Allgemein kann von dem FC-Prinzip gesagt werden, dass es die Vorteile der Schrägscheibenbauart (Durchtrieb, niedrige Fertigungskosten) vereint mit die der Schrägachsenbauart (hoher Wirkungsgrad, gutes Anlaufverhalten).

Das Konzept befindet sich noch im Frühstadium der Entwicklung, doch die Resultate bis jetzt sind vielversprechend. Die ersten Prototypen wurden von Innas entworfen und gebaut in 2002, die ersten Tests fingen September 2002 an [1,2,3]. Das IFAS hat in März 2004 Messungen ausgeführt nach ISO 4409-1986. In diesem Beitrag werden die neuesten Testresultate präsentiert. Es wurden drei Pumpen gemessen:

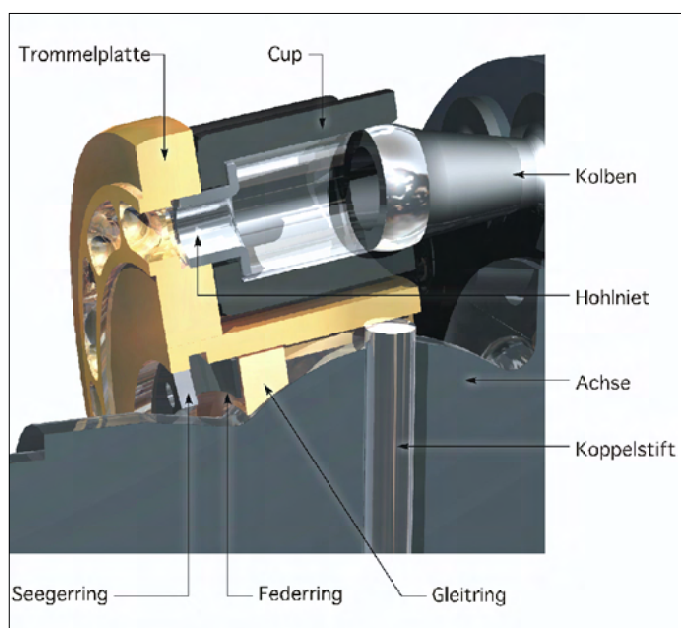
- Floating Cup-Pumpe (Konstantvolumen, 28cm<sup>3</sup>/U, 24 Kolben),
- Schrägscheibepumpe (Konstantvolumen, 28cm<sup>3</sup>/U, 9 Kolben),
- Schrägachsenpumpe (Konstantvolumen, 28cm<sup>3</sup>/U, 7 Kolben).

Alle Messungen wurden ausgeführt bei einer Öltemperatur von 40 °C mit HLP46 Öl.

## Wirkungsgradmessungen

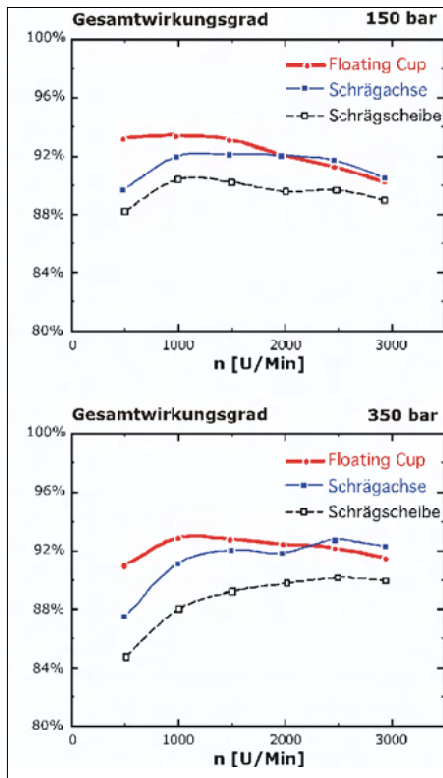
Energieverbrauch ist ein ständiges Thema in der Hydraulik. Die Optimierung der Pumpenwirkungsgrade war und ist noch immer erwünscht [4]. Daher ist für das FC-Konzept der Wirkungsgrad im Verhältnis zu anderen Pumpen ein wichtiges Vergleichskriterium. Die Wirkungsgrade der Pumpen sind alle am gleichen Prüfstand gemessen worden. Die Geschwindigkeit kann variiert werden von 500 bis 3000 U/min, der Druck von 50 bis 350 bar.

**Bild 7** zeigt die Gesamtwirkungsgrade bei zwei Druckniveaus. Es ist auffallend,

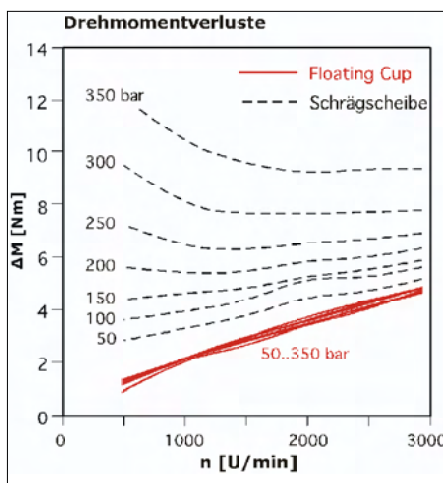


## 6: Detail-Querschnitt der Rotationsgruppe





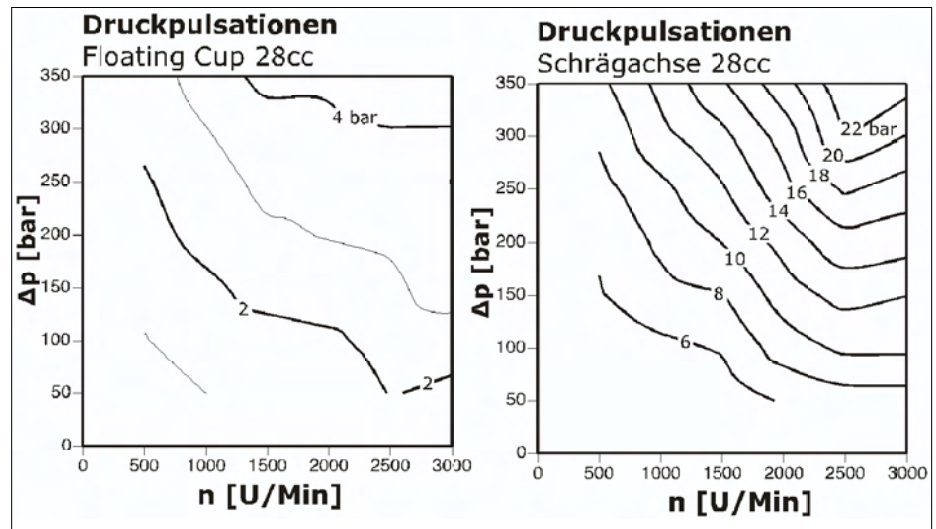
7: Der Gesamtwirkungsgrad der FC Pumpe im Vergleich zu Schrägscheibe und Schrägachse bei 150 und 350 bar



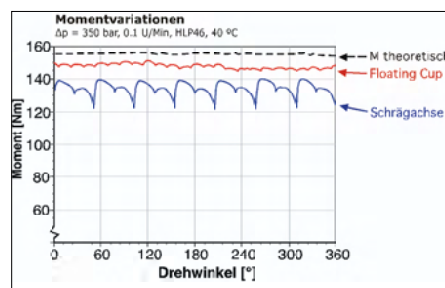
8: Die Reibungsverluste der FC Pumpe sind nahezu druckunabhängig

dass trotz der zusätzlichen Leckspalte und des größeren Trommeldurchmessers, die FC-Pumpe einen hohen Wirkungsgrad hat. Die direkte hydraulische Kraftübertragung spielt hier eine entscheidende Rolle.

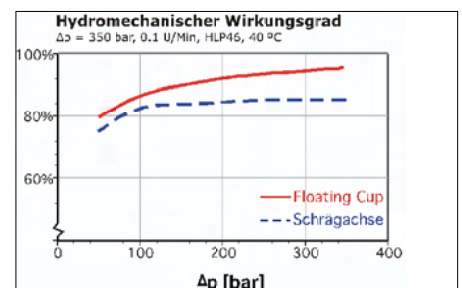
Zusammen mit der Balancierung der Trommelkräfte, die eine gute Abdichtung der Steuernieren ergibt, sind die Reibumstände sehr günstig. Wie Bild 8 sehen lässt, sind daher die Reibungsverluste der FC-Pumpe, hier ausgedrückt als Drehmomentverlust, im Gegensatz zu der Vergleichspumpe druckunabhängig. Über den Gesamtwirkungsgrad kann man durchschnittlich sagen, dass die FC-Pumpe einen besseren Wirkungsgrad hat als die Schrägscheibenpumpe. Im Vergleich zu der Schrägachse ist der Wirkungsgrad besser bis 2000 U/min und bei höheren Drehzahlen vergleichbar gut.



9: Die Größe der doppelten Druckamplitude der FC-Pumpe im Vergleich zu einer Schrägachsenpumpe



10: Vergleich der Momentvariationen bei einer Umdrehung. Das theoretische Moment geht aus von reibungslosem Betrieb



11: Der hydromechanische Wirkungsgrad der FC-Pumpe bei 0,1 U/min

## Pulsationen

Eine erhöhte Zahl der Verdrängungsvolumen hat mehrere Vorteile. Ein verbesserter Ungleichförmigkeitsgrad des Volumenstroms [6, 8] ist einer dieser Vorteile, der sich auch direkt messen lässt. Das IFAS hat die Druckschwankungen am Ausgang der FC-Pumpe, in verschiedenen Arbeitspunkten gemessen. Als Referenz wurde am gleichen Prüfstand eine Schrägachsenpumpe getestet. Durchschnittlich sind die Pulsationen der FC Pumpe um 80 % niedriger. Bild 9 zeigt die Resultate für das ganze Messfeld.

Mit der starken Verringerung der Pulsationen wird eine wichtige Quelle von systemabhängigem Schall dezimiert [7]. Darüber hinaus werden Schlauche, Kupplungen und zusätzliche Systemkomponente weniger belastet, was der Systemlebensdauer und Leckage zugute kommt [5, 9].

## Anlaufverhalten

In hydraulischen Motoren hat die Anzahl der Kolben einen merklichen Einfluss auf das Startverhalten. Starke Momentvariationen und hohe Reibung verhindern bis jetzt eine strukturelle Verbesserung der Systemdynamik. Die Floating Cup-Technologie kann wegen der 24 Kolben und der günstigen Reibungseigenschaften auch in Motoren vorteilhaft angewendet werden.

Im IFAS ist das Langsamlaufverhalten der FC-Einheit bei einer Geschwindigkeit von 0,1 U/min gemessen worden. Die Floating Cup-Pumpe wurde dabei als Motor

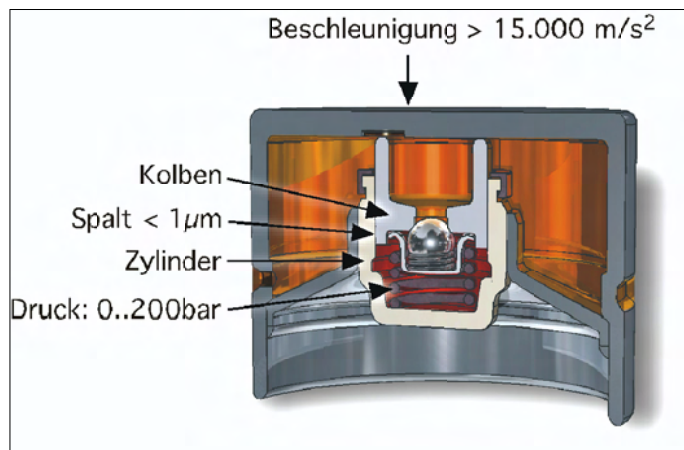
eingesetzt und auf diese Art verglichen mit der Schrägachsenpumpe. Bild 10 zeigt die Momentschwankungen der beiden 'Motoren' bei einem Druck von 350 bar und einer Temperatur von 40 °C. Die FC-Einheit liefert ein hohes Moment mit einer geringen Schwingungsweite.

Der hydromechanische Wirkungsgrad beider Maschinen wurde über einen Bereich von 50 bis 350 bar bestimmt. Wie man in Bild 11 sieht, ist das Floating Cup-Prinzip der Schrägachsentechnik im ganzen Testbereich überlegen. Die Balancierung der Trommellplatten und die direkte Kraftübertragung von Öl auf Achse haben sichtbare Vorteile, auch in Hydromotoren.

## Herstellung und Kosten

Die Kosten sind das ausschlaggebende Kriterium an der jede Innovation gemessen wird. Die Hydraulikindustrie befindet sich ständig in einer Konkurrenzposition. Kosteneffektivität beherrscht den Markt [11]. Eines der Hauptziele der Floating Cup-Entwurfgruppe war deswegen eine signifikante Senkung der Fertigungskosten bei hydraulischen Pumpen. Die Herausforderung dabei war es, trotz der hohen Zahl der Einzelteile, eine Kostensenkung zu realisieren.

Die Erforschung spanloser Fertigungstechniken wies aus, dass Herstellungsverfahren aus der Automobilindustrie, für die Hydraulikindustrie neue Chancen bieten. Die Herstellungskosten von Kraftfahrzeugen stehen seit langem unter ständigem Preisdruck, wodurch die Industrie nach



**12: Ein Ventilstößel als Beispiel eines billigen Produktes, trotz hohen Toleranzanforderungen**

immer billigeren Herstellungsverfahren sucht. In den letzten Jahrzehnten haben Prozesse wie Feinstanzen, Tiefziehen, Kaltfließpressen und Sintern eine unglaubliche Entwicklung durchgemacht. Ohne die Fertigungsgenauigkeit einzubüßen, konnte das erwünschte konkurrierende Kostenniveau erreicht werden.

Als Beispiel kann der hydraulische Ventilstößel genannt werden, der heute in zahllosen Verbrennungsmotoren angewendet wird. Das zusammengesetzte Produkt ist abgebildet in **Bild 12**. In dem Ventilstößel, der unter schweren Umständen und Belastungen als hydraulischer Zylinder funktioniert, werden Teile mit einer sehr hohen Toleranzgüte benutzt. Der Spalt zwischen Zylinder und Kolben hat eine Abmessung von weniger als  $1\text{ }\mu\text{m}$ . Um zu verdeutlichen was ein assemblierter Ventilstößel kosten darf: Ein Vier-Zylindermotor enthält sechzehn Ventilstößel, zusammen 144 Einzelteile. Die preisgünstige, präzise Anfertigung ist möglich durch die Kombination von Massenfertigungsverfahren wie Fließpressen und Tiefziehen mit Klassifikation der Teile.

Es versteht sich, dass bei der Herstellung von Hydraulikmaschinen vergleichbare Kostenvorteile nur möglich sind, mit einem Entwurf, der spanlose Techniken zulässt. Die FC-Pumpe eignet sich besonders gut für diese neue Art der Produktion. **Bild 13** spezifiziert pro Teil die geeigneten Herstellungsverfahren. Die gewählten Verfahren beruhen auf eine noch laufende Kos-

tenstudie. Nach den vorläufigen Resultaten dieser Studie gilt für eine  $28\text{cm}^3$ -Pumpe, dass der Fertigungspreis der Rotationsgruppe weit unter der hundert Euro-Grenze liegt.

Die große Kolbenzahl der FC-Pumpe ist vorteilhaft bei der Massenproduktion der Einzelteile. Für 10000 Pumpen mit je 24 Cups und 12 doppelseitigen Kolben, ist das gesamte Herstellungsvolumen dieser Teile 240 000 beziehungsweise 120 000. Im Falle verschiedener Baugrößen sind etliche FC-Teile universell anwendbar, womit der Mas-senvorteil optimal ausgenutzt wird.

### Alles in einem

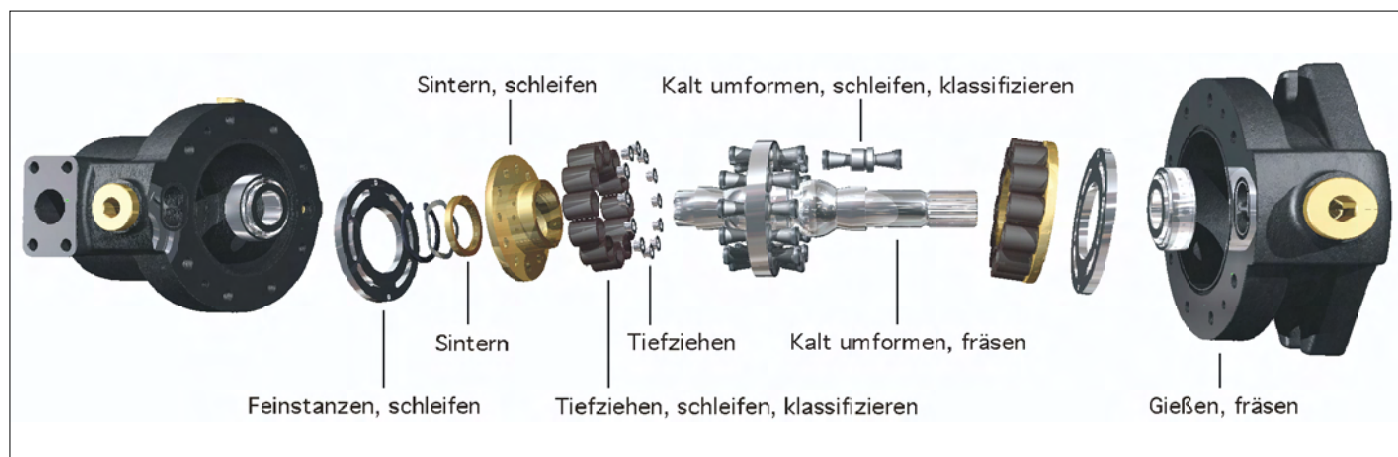
Der Großteil der Pumpenproduktion für den Hydraulikmarkt besteht aus Axialkolbenpumpen. Seit kurzem gibt es ein neues Verdrängungsprinzip, das hier präsentierte Floating Cup-Prinzip. Die besprochene Technologie ist in allen axialen Verdrängungsmaschinen anwendbar, als Pumpe ist sie bereits ausführlich getestet worden. Der Wert der FC-Pumpe kann am besten abgeschätzt werden im Vergleich zu den bestehenden Alternativen. Die Floating Cup-Technologie bringt die typischen Eigenschaften der verschiedenen Pumpenarten zusammen: den Wirkungsgrad der Schrägachse, die Durchtriebsmöglichkeit der Schrägscheibe, die Druckpulsation der Schraubenpumpe, den Preis von Flügelzellenpumpen und das Anlaufverhalten von Radialkolbenmaschinen.

Von der Entwickelzeit her befindet sich das Floating Cup-Konzept noch im Frühstadium ihrer Lebenskurve. Die Möglichkeiten, die eine neue Sichtweise der Pumpenfertigung und der Ölverdrängung bieten, werden in diesem Beitrag anhand einer Konstantvolumenpumpe illustriert. Die Weiterentwicklung dieser Technologie kann von großer Bedeutung sein für Hydraulikproduzenten wie sie ihre Neuprodukte gestalten und fertigen.

#### Literaturhinweise:

- [1] Achten, P., Brink, T.van den, Oever, J. van den, Potma, J., Schellekens, M., Vael, G., Walwijk, M. van, : Dedicated design of the Hydraulic Transformer, Proceedings 3th IFK on Fluid Power, Aachen, Germany, 2002;
- [2] Achten, P., Brink, T.van den, Paardenkooper, T., Platzer, T., Potma, J., Schellekens, M., Vael, G.: Design and testing of an axial piston pump based on the floating cup principle, Proceedings 8th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere Finland, 2003;
- [3] Achten, P.: Designing the impossible pump, Hydraulikdag i Linköping, Linköping Sweden, 2003;
- [4] Backé W., What will be the future of fluid power, Proceedings of International Scientific Forum on Developments in Fluid Power Control of Machinery and Manipulators, 1998, Juni;
- [5] Edge, K.: Designing Quieter Hydraulic Systems, Proceedings 4th International Symposium on Fluid Power, Nara, Japan 1999;
- [6] Ivantysyn, J., Ivantysyn, M.: Hydrostatische Pumpen und Motoren, Vogel-Fachbuch, Würzburg, 1993;
- [7] Johansson, A., Palmberg, J.O.: Quiter hydraulic systems - design considerations, Proceedings of the 5th International Symposium on Fluid Power, Nara, Japan 2002;
- [8] De Rose, D.: Noise reduction in fluid power systems, Fluid power journal, 2003, Nr.4 (Juli/August);
- [9] Sieber, R.: Hochdruckleitungen für hohe, pulsierende und schnelle Drücke, Lexikon der HD Technik [http://www.dieckers.de/lexikon/lexikon\\_1.htm](http://www.dieckers.de/lexikon/lexikon_1.htm) (2003),
- [10] Walzer, W.: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Zylindertrommelmitnahme in Grosswinkel-Axialkolbenmaschinen, Wissensch.Berichte des Institutes für Fördertechnik der Universität Karlsruhe, 1984, Nr. 15;
- [11] Editorial, State of the Fluid Power Industry, Fluid power journal, 2004, Nr. 1 (jan/feb).

Bildnachweis: [www.innas.com](http://www.innas.com), INNAS BV, NL-4823 AE Breda



**13: Übersicht der verschiedenen Fertigungstechniken der Floating Cup-Bauteile**