

# Berechnung verschleißabhängiger Kennlinien von schräg verzahnten Drehkolbenpumpen

Zweiwellige Drehkolbenpumpen werden oft zum Fördern von Suspensionen mit Grobstoffen eingesetzt, so etwa in Klär-, Gülle- oder Biogasanlagen. Die Pumpenkennlinien werden in der Regel mit Wasser ermittelt und verändern sich mit dem Verschleiß in erheblichem Maße. Es wurde ein Berechnungsmodell für die verschleißbedingten Leckageverluste entwickelt, um die realen Pumpenkennlinien in Abhängigkeit vom Verschleiß und der Viskosität zu ermitteln. Ein neues Pumpenauslegungsprogramm dient zur praktischen Anwendung.

Dipl.-Ing. (FH) René Brückner war und Dipl.-Ing. Burkhard Verhülsdonk ist Mitarbeiter der Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH, Holthöge, 49632 Essen (Oldbg.); e-mail: [verhuelsdonk@vogelsang-gmbh.com](mailto:verhuelsdonk@vogelsang-gmbh.com)

Dr.-Ing. habil. Meno Türk und Dipl.-Ing. (FH) Thomas Zenke sind Mitarbeiter in der Abteilung „Technik in der Tierhaltung“ im Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB) (Direktor: Prof. Dr.-Ing. J. Zaske), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam; e-mail: [mtuerk@atb-potsdam.de](mailto:mtuerk@atb-potsdam.de)

Referierter Beitrag der LANDTECHNIK, die Langfassung finden Sie unter LANDTECHNIK-NET.com.

## Schlüsselwörter

Drehkolbenpumpe, Verschleiß, Spaltverluste, Förderverhalten, Berechnung, Software

## Keywords

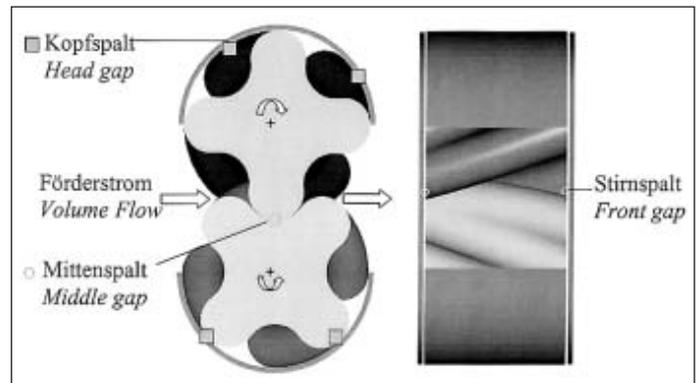
Rotary lobe pumps, wear, slip, pumping behaviour, leakage calculation, software

## Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 03502 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

Bild 1: Spalte in einer Drehkolbenpumpe mit schräg verzahnten Kolben

Fig. 1: Gaps in a rotary lobe pump with helical toothed lobes



In Drehkolbenpumpen sind zwischen rotierenden Kolben und ortsfestem Gehäuse stets definierte Spalte vorhanden. Dadurch treten Spaltverluste (Leckage) auf. Während der Betriebszeit vergrößern sich diese Spalte in Folge von Gleit- und Strahlverschleiß durch abrasive Grobstoffe. Dadurch verändern sich die Pumpenkennlinien. Die Auswirkungen dieser Spalte auf das Förderverhalten sind im Wesentlichen vom Fließverhalten der Fördermedien abhängig [1]. Deshalb ist es für Anwender und Konstrukteure hilfreich, wenn die Pumpenkennlinien in Abhängigkeit von relevanten Einflussfaktoren berechnet werden können. Dazu wird ein Pumpenauslegungsprogramm entwickelt.

## Berechnung der Spaltverluste

Schräg verzahnte Drehkolben vermindern die Durchsatz- und Druckpulsation der Pumpe auf ein Minimum [2]. Der kontinuierliche Förderstrom verbessert die Laufruhe der Pumpe.

Die Verlustströmungen in Drehkolbenpumpen entstehen in den geometrisch bestimmbaren Kopf-, Mitten- und Stirnspalten (Bild 1). Der Pumpendurchsatz  $Q$  wird durch Spalt- oder Leckageverluste  $Q_S$  reduziert.

$$Q = Q_{th} - Q_S \quad (1)$$

$$Q_S = \sum (A_S \cdot v_S) \quad (2)$$

$$A_S = b_S \cdot h_S \quad (3)$$

Als Spaltfläche werden vereinfachend Rechteckflächen  $A_S$  angenommen. Beim Fördern wird die Druckdifferenz  $\Delta p = p_d - p_s$  zwischen Druck- und Saugseite der Pumpe im Spaltquerschnitt  $A_S$  vollständig abgebaut [3]. Demnach ist:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_S^2 \quad (4)$$

Der Druckverlustbeiwert  $\zeta$  ist eine Funktion der Reynoldszahl, Gl. (5), und bei unveränderter Spaltgeometrie von der Strömungsgeschwindigkeit im Spalt und der Viskosität abhängig.

$$Re = \frac{v_S \cdot d_{hyd} \cdot \rho}{\eta} = \frac{v_S \cdot 2h_S \cdot \rho}{\eta} \quad (5)$$

Der hydraulische Durchmesser der Spalte beträgt

$$d_{hyd} = \frac{4 A_S}{U_S} = \frac{4 b_S \cdot h_S}{2 (b_S + h_S)} \quad (6)$$

Für  $h_S \ll b_S$  kann  $d_{hyd} = 2 \cdot h_S$  angenommen werden. Die Strömungsgeschwindigkeit im Spalt  $v_S$  hängt von der Druckdifferenz und der Umfangsgeschwindigkeit der Verdrängerkolben ab. Die Spaltvolumenströme und die entsprechenden Geschwindigkeiten in den verschiedenen Spalten sind nicht bekannt. Die Druckverlustbeiwerte  $\zeta$  und Spaltströmungsgeschwindigkeiten  $v_S$  müssen daher nach Gl. (7) iterativ ermittelt werden.

$$v_S = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \zeta}} \quad (7)$$

$$\zeta = \zeta_S + \lambda_S \cdot \frac{l_S}{d_{hyd}} \quad (8)$$

Der Druckverlust entsteht einmal durch Reibungsverluste der Strömung an der Pumpenwand (Reibungsbeiwert  $\lambda_S$ ) und durch weitere Strömungsverluste, insbesondere Umlenklverluste, die im Detail nicht berechnet werden können (Widerstandsbeiwert  $\zeta_S$ ).

Eine wichtige Frage ist die geometrische Kennzeichnung der Spaltmaße.

Im *Kopfspalt* nehmen Spalthöhe  $h_K$  und Spaltlänge  $l_K$  mit steigendem Verschleiß zu. Die Spaltlänge  $l_K$  lässt sich als Kreisabschnitt in Abhängigkeit von der Spalthöhe  $h_K$  bestimmen. Die Spaltbreite  $b_K$  kann je nach Kolbenform in Abhängigkeit von der Flügelzahl berechnet werden. Die Dichtheit der Pumpe verbessert sich mit einer höheren Anzahl der Dichtlinien (Flügelzahl).

Im *Mittenspalt* bildet sich nur eine Dichtlinie aus und wird deshalb mit der vollen Breite berücksichtigt. Der Mittenspalt kann auch im Verschleißzustand als dicht angesehen werden. Für die Berechnungen wurde  $l_M = 0,1$  bis  $0,3$  mm angenommen (Fertigungstoleranz).

Der *Stirrspalt* ist aufgrund seiner großen Länge ein Flächenspalt. Bei der Festlegung seiner Breite sind die Wellendurchmesser der Pumpe auf der Getriebeseite abzuziehen. Die Stirrspaltlänge berechnet sich aus der Breite und der Anzahl der Kolbenflügel.

Zur Berechnung der Reynoldszahl nach Gl. (5) ist die Viskosität des Fördermediums erforderlich. Bei Newtonschen Medien ist die Viskosität  $\eta$  eine Stoffkonstante und nur von der Temperatur abhängig.

Bei nicht-Newtonschen Medien, wie bei vielen organischen Suspensionen, ist die Viskosität von der real wirkenden Schergeschwindigkeit abhängig. Hier wird oft das Fließgesetz von Herschel und Bulkley [4] angewendet:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

Für die Berechnung der Strömungen in einer Drehkolbenpumpe sind die herkömmlichen rheologischen Gleichungen und Messverfahren nur bedingt geeignet. Beim Fördern von grob strukturierten Suspensionen können innerhalb der Spalte Entmischungen auftreten. Wasser trennt sich von den Feststoffen der Suspension und strömt vorrangig durch die Spalte zurück. So können sogar kurzzeitig örtliche Verstopfungen auftreten. Hinzu kommt, dass durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Spalten die Viskosität erheblich vermindert wird. Diese Phänomene treten alle gleichzeitig auf und sind im Detail nicht zu kalkulieren.

Bei Kenntnis der geometrischen Verhältnisse und der Fließkennwerte des Fördermediums kann der Fördervolumenstrom einer Drehkolbenpumpe näherungsweise berechnet werden [5].

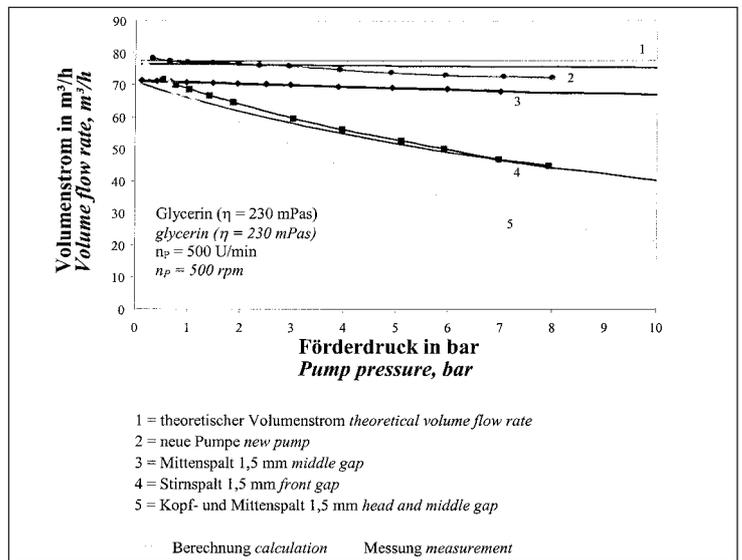
$$Q = Q_{th} - Q_S = 2 \cdot (A_{F0} - A_v) \cdot n_p \cdot b_p \cdot \left( \sum_{s=1}^n v_s \cdot A_s \right) \quad (10)$$

Die Spaltfläche  $A_S$  und Pumpenbreite  $b_p$  sind bekannte Größen. Die Förderfläche eines Kolbens  $A_{F0}$  ist vom Pumpenhersteller festgelegt.

Die Spaltgeschwindigkeiten werden nach Gl. (7) iterativ berechnet. Aus der ersten errechneten Spaltgeschwindigkeit  $v_s$  ergibt

Bild 2: Vergleich von experimentellen und berechneten Pumpenkennlinien für Glycerin

Fig. 2: Comparing experimental and calculated pump characteristic curves with glycerin



sich eine Reynoldszahl. Damit werden neue Werte für  $\lambda_S$  und  $\zeta_S$  berechnet. Mit Hilfe dieser beiden Werte erhält man eine neue Spaltgeschwindigkeit und so weiter. Die Iterationsschleife wird solange durchlaufen, bis die Abweichung  $\Delta v_S$  einen bestimmten Wert (zum Beispiel  $\Delta v_S < 0,1$  m/s) nicht mehr überschreitet. In der Regel sind vier Iterationsrechnungen ausreichend.

Bei Laminarströmung Newtonscher und nicht-Newtonscher Medien ( $Re < Re_{krit} = 2300$ ) wird der Reibungsbeiwert  $\lambda_S$  für die Spaltströmung im sehr schmalen Spalt [5] nach Gl. (11) bestimmt:

$$\lambda_S = 96 / Re \quad (11)$$

Für die turbulenten Strömungszustände, Umlenkungs-, Stoß- und Beschleunigungsverluste sind Gleichungen bekannt.

Mit den ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten der einzelnen Spalte können nun die Verlustvolumenströme  $Q_S$  und der zu erwartende reale Volumenstrom der Pumpe  $Q$  unter vorgegebenen Betriebsbedingungen (Differenzdruck, Medium, Verschleißzustand) entsprechend Gl. (1) berechnet und die Pumpenkennlinien Punkt für Punkt konstruiert werden.

## Diskussion

Die Berechnungsergebnisse stimmen mit den experimentellen Ergebnissen gut überein [1]. Bild 2 zeigt die experimentell ermittelten und berechneten Pumpenkennlinien für Glycerin ( $\eta = 0,15 - 0,25$  Pas). Auch eine neue Pumpe mit engsten Spalten erreicht den theoretischen Volumenstrom nicht. Der Hersteller hat stets geringe Spalte vorgesehen, um Reibungsver-schleiß zu vermeiden. Bei Verschleiß im Mittenspalt, in den Stirn- und Kopfspalten mit Mittenspaltanteil verändern sich die Pumpenkennlinien unterschiedlich [1].

Der Einfluss des *Mittenspalt*s ist äußerst gering. Ursache ist die stets vorhandene Dichtlinie zwischen den Kolben, die kaum von Verschleiß beeinflusst wird.

Die Kopfspalte beeinflussen das Förderverhalten am stärksten. Deshalb haben technische Maßnahmen zur Verringerung der

Kopfspalte den größten Erfolg zur Verschleißkompensation in Drehkolbenpumpen.

## Pumpenauslegungsprogramm

Zur praktischen Anwendung des Berechnungskonzeptes wurde ein Pumpenauslegungsprogramm entwickelt. Damit können für spezifische Anwendungsbedingungen (Drücke, Volumenströme, Viskositäten) geeignete Pumpen ausgewählt und die Verschleißwirkungen der Fördermedien berücksichtigt werden.

Der Anwender kann die technisch optimale Pumpe für seinen spezifischen Anwendungsfall auswählen und erhält die Kennlinien für den Neu- sowie für den Verschleißzustand. Damit wird die Pumpenauswahl erheblich erleichtert und verbessert. So können Verschleißwirkungen reduziert und die Lebenszykluszeiten deutlich verlängert werden.

## Zusammenfassung

Zur Berechnung der vom Verschleiß abhängigen Kennlinien schräg verzahnter Drehkolbenpumpen wurden Lösungsvorschläge erarbeitet und Förderversuche bei systematisch veränderten Spaltmaßen und Fördermedien unterschiedlicher Viskosität durchgeführt. Mit Hilfe der erarbeiteten Berechnungsgrundlagen wurde ein Pumpenauslegungsprogramm entwickelt und erprobt. Damit ist eine Vorausberechnung des Förderverhaltens verschiedenster Drehkolbenpumpen möglich, wie etwa zweiflügelige gerade verzahnte, mehrflügelige schräg verzahnte, mehrstufige oder durch Mittelplatten geteilte Pumpenkammern.

Bei Kenntnis der Fließeigenschaften und der geometrischen Abmaße einer Drehkolbenpumpe kann das Förderverhalten mit Hilfe des erarbeiteten Rechenprogramms bestimmt werden.

Ein bekanntes Programm zur Rohrleitungsberechnung [5] wird durch dieses Pumpenauslegungsprogramm ergänzt und damit eine optimale Anlagenauslegung ermöglicht.