

1. Einleitung

Das Fördern von Erdöl und Erdgas erfolgt aus der überwiegenden Zahl natürlicher Quellen in Form mehrphasiger Gemische aus Öl, Gas und wässrigen Salzlösungen mit darin suspendierten festen Partikeln. Die Gemische strömen unter der Wirkung des natürlichen Druckgefälles aus der Lagerstätte durch die Fördersonde zu den in unmittelbarer Nähe angeordneten Trennapparaten. Von dort werden die einzelnen separierten Volumenströme über große Entfernungen zu den entsprechenden Verarbeitungsanlagen transportiert. Da es sich hierbei um einphasige gasförmige oder flüssige Medien handelt, lassen sich diese mit Hilfe erprobter Pumpen oder Kompressen durch die dafür vorgesehenen Rohrnetze fördern. Um den Betriebsbereich derartiger Anlagen auch auf extreme Förderbedingungen zu erweitern, ist es notwendig, die aus der Fördersonde austretenden mehrphasigen Gemische ohne sie zu trennen auf höhere Drücke zu verdichten. Dies kann durch das Zwischenschalten von geeigneten Pumpen erreicht werden, wenn der Druck der mehrphasig aus der Fördersonde austretenden Gemische derart erhöht wird, dass diese über große Entfernungen zu transportieren sind. Anwendungsfälle hierfür ergeben sich in schwer zugänglichen Fördergebieten, die z.B. unter Wasser oder in Regionen mit durch Permafrost verfestigten Böden liegen. Als Pumpen scheiden solche aus, deren volumetrische Förderleistung durch Dichteänderungen der zu fördernden Gemische beeinflusst wird, so dass allein sog. Verdrängerpumpen zum Einsatz kommen. Als solche haben sich Schraubenspindelpumpen für die Erdölförderung bewährt.

Sie bestehen aus zwei achsparallel angeordneten und dicht kämmenden Schnecken, die gegensinnig rotieren. Bei jeder Umdrehung bilden sich zwischen den Spindelinflanken abgeschlossene und nur über enge wandnahe Spalte verbundene Kammern. Diese bewegen sich in einem zylindrischen Gehäuse von der Saug- zur Druckseite. Sie bewirken das Fördern der Gemische, welche aus fluiden Phasen beliebiger volumetrischer Zusammensetzung bestehen.

Bisher sind wenige technische Daten bekannt, die das Dimensionieren derartiger Pumpen oder das Vorhersagen von deren Förderverhalten im betrieblichen Einsatz ermöglichen. Hierzu dienen sog. Fördercharakteristiken, welche den funktionellen Zusammenhang der angesaugten Volumenströme und der zwischen Saug- und Druckstutzen aufgebauten Druckdifferenzen angeben. Ihre Messung erfolgt für speziell konstruierte zweispindlige Schraubenspindelpumpen mit Hilfe einer Versuchsanlage im halbtechnischen Maßstab. Diese

ermöglicht es, das Förderverhalten für mehrphasig strömende Gemische beliebiger Zusammensetzung, also insbesondere auch solcher Gemische mit hohen Strömungsgasanteilen zu messen. Dabei sollen die Einflüsse unterschiedlicher sich im Ansaugquerschnitt der Pumpe einstellender Strömungsformen auf deren Förderverhalten erkannt werden. Die beim Fördern von mehrphasigen Gemischen stattfindende Kompression der gasförmigen Phase führt zwischen den einzelnen Kammern zu Ausgleichs- und Leckströmen der flüssigen Phasen.

Durch den Einsatz von Schraubenspindeln mit sich verminderten Kammervolumen wird der thermodynamische Wirkungsgrad der Mehrphasenpumpen erhöht, da sie eine kleinere Wellenleistung erfordern. Aufgrund des kürzeren Wegs der Spindelflanken in Förderrichtung wird weniger Arbeit für das Überwinden der Druckdifferenz geleistet. Aus diesen Gründen werden neben Schraubenspindeln mit konstanter Steigung auch solche mit abnehmender Steigung erprobt. Für letztere werden erstmalig die Fördercharakteristiken gemessen, wobei die Drehzahl der Spindeln und die relativen Strömungsanteile der einzelnen Phasen einstellbare Parameter sind.

2. Ziele der Arbeit

Der Erdöl- und Erdgasverbrauch wird auch in Zukunft ansteigen. Die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit Erdöl und Erdgas produzierender und verarbeitender Betriebe ist zu erreichen, wenn ein Transport der mehrphasigen Gemische von der Quelle zur Weiterverarbeitungsanlage stattfindet. Dies erfolgt durch den Einsatz von Mehrphasenpumpen. Sie müssen den störungsfreien Betrieb bei langen Wartungsintervallen ermöglichen und dabei gleichzeitig hohe betriebliche Anforderungen erfüllen. Neuartige Mehrphasenpumpen mit degressiver Steigung der Spindeln werden eingesetzt, um den thermodynamischen Wirkungsgrad der Pumpen zu verbessern. Alle bisher publizierten Ergebnisse gelten für das Förderverhalten von Pumpen, welche mit Spindeln konstanter Steigung ausgerüstet sind und Gemische aus Wasser und Luft fördern. Andererseits ist der Einfluss der Viskositäten der flüssigen Phasen von technischem Interesse, da sie das Förderverhalten derartigen Pumpen beeinflussen, wenn sie in der Erdölindustrie eingesetzt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden Fördercharakteristiken für Schraubenspindelpumpen gemessen, die Gemische aus Wasser, Öl und Luft fördern. Dazu werden in einer halbtechnischen Versuchsanlage die relativen Anteile der strömenden Phasen in den Grenzen zwischen 0 und 1 eingestellt und dem Saugstutzen der Pumpe zugeführt. Die sich druckseitig anschließende und in zwei Stufen durchgeführte Trennung der geförderten Phasen Wasser, Luft und Öl ermöglicht es, betriebsnahe Volumenströme und Drücke zu wählen. In den Experimenten werden daher zahlreiche Fördercharakteristiken mit dem Differenzdruck, der Drehzahl, den relativen Strömungsanteilen der Phasen und der Viskosität als Parameter für unterschiedliche Spindeln gemessen. Letztere besitzen unterschiedliche Längen, Kammerzahlen und Steigungen. In den Messungen zum Förderverhalten werden Spindeln mit konstanter und degressiver Steigung eingesetzt.

Die experimentellen Ergebnisse werden mit berechneten verglichen, die auf der Basis einer Modellentwicklung hergeleitet sind. Sie führen zu Erkenntnissen, welche mit Hilfe des Modells zu höheren Pumpenleistungen extrapolierbar sind.

3. Stand der Forschung

3.1. Schraubenspindelpumpen

Schraubenspindelpumpen sind rotierende Verdrängerpumpen, d.h. der von ihnen geförderte Volumenstrom hängt wesentlich von der Drehzahl und weniger vom Gegendruck ab. Aufgrund dieser besonderen Fördereigenschaften werden sie in vielen Bereichen der Industrie eingesetzt. Abhängig von dem Anwendungsfall können verschiedene Bauformen gewählt werden. Aufgrund ihrer besonderen Eignung zum Fördern mehrphasiger Gemische gibt es für sie viele Anwendungen, vorwiegend in der Erdöl- und Erdgasförderung.

Die bisher publizierten experimentellen Ergebnisse zum Förderverhalten beruhen sowohl auf Forschungsarbeiten an Versuchsanlagen, als auch auf Messungen während des Betriebs im Öl- oder Gasfeld. Theoretische Ergebnisse aus Forschungsarbeiten zum Berechnen des Förderverhaltens von Schraubenspindelpumpen ergänzen die experimentellen Untersuchungen.

3.1.1. Schraubenspindelpumpen zum Fördern mehrphasiger Gemische

Schraubenspindelpumpen werden in den letzten 40 Jahren zum Transport mehrphasiger Gemische in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt. Diese befinden sich in der chemischen, der papierverarbeitenden- sowie der petrochemischen Industrie. Im letzten Jahrzehnt werden Schraubenspindelpumpen vorwiegend für das Fördern von Erdöl- und Erdgasprodukten eingesetzt [1] .

Hamelberg [2], [3] berechnet Druckfelder, Schraubenspindelprofile, Schraubenspindelkräfte und resultierenden Deformationen der Schraubenspindeln.

Herpel, Muschelkautz und Mayinger [4] beschreiben ein mehrphasiges Fördersystem, das mit Schraubenspindelpumpen ausgestattet ist. Vor der Pumpe erfolgt die Trennung des Gases von der flüssigen Phase. Die Feststoffe werden in einem Hydrozyklon abgeschieden. Mit Hilfe der Schraubenspindelpumpe wird der Druck soweit erhöht, dass die Flüssigkeit als Strahl in einem Injektor wieder mit dem Gas und den Feststoffen zusammengeführt werden kann, um das Gemisch zu fördern. Für volumetrische Gasanteile größer als 0,5 wird der Einsatz eines zusätzlichen Kompressors empfohlen.

Karge [5] untersucht eingängige, zweispindelige, doppelflutige Schraubenspindelpumpen in drei unterschiedlichen Baugrößen, in welchen Wasser-Luft-Volumenströme bis zu 120 m³/h beim Austrittsdruck von 70 bar gefördert werden. Der geförderte Gemischvolumenstrom steigt mit steigendem Gasanteil des Volumenstroms von 0 bis 0,95 an. Karge definiert den Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{MIX-adiabat}}}{P_{\text{tot}}} \quad (3.1)$$

mit der kleinstmöglich aufzubringenden Leistung für die adiabate Druckerhöhung des Förderstromes $P_{\text{MIX-adiabat}}$ und der Gesamtleistung P_{tot} . Der so definierte Gesamtwirkungsgrad sinkt mit steigendem Strömungsgasanteil des Gesamtvolumenstroms im Ansaugstutzen. Ferner ergeben die Messungen eine vom Gasanteil unabhängige Leistungsaufnahme für die Förderung eines zweiphasigen Gemischs. Für das Förderverhalten entwickelt Karge ein Modell: Die Schraubenspindelpumpe arbeitet während der Gemischförderung nicht als Pumpe sondern auch als Verdichter. Jede Spindel bildet gemeinsam mit ihrer Nachbarspindel und dem Gehäuse Förderkammern konstanten Volumens, die axial vom Einlass zum Auslass bewegt werden. Sie sind durch Spalte endlicher Weite voneinander getrennt, durch die Leckströme in Richtung des Druckgefälles fließen. Aus den Ergebnissen der Experimente folgt, dass der Volumenstromverlust infolge der Leckströmung auch für die zweiphasige Förderung fast ausschließlich aus einem Verlust an Flüssigkeit besteht.

Vetter und Wincek [6], [7], [8] beschreiben ebenfalls ein Modell für die Förderung von Flüssigkeits-Gas-Gemischen durch Schraubenspindelpumpen. Sie nehmen an, dass die Gaskompression isotherm und allein durch die Flüssigkeitsrückströmung erfolgt. Die Kammern werden als adiabat betrachtet. Der gesamte Leckstrom setzt sich aus den einzelnen Leckströmen durch die Spalte zwischen Gehäusewandung und den Flanken der Spindeln zusammen. Der jeweilige einphasig flüssige Leckstrom eines Spaltes ist:

$$\dot{V}_s = \dot{V}_{\text{sd}} + \dot{V}_{\text{sr}} \quad (3.2)$$

Er resultiert aus einem Differenzdruck- $\dot{V}_{sd}$ und einem Rotationsanteil $\dot{V}_{sr}$, die getrennt voneinander berechnet werden. Der Differenzdruckanteil wird mit bekannten Gesetzen der Spaltströmung berechnet. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- voll ausgebildete und stationäre Strömung
- Ein- und Ausströmverluste bleiben unberücksichtigt
- linearer Druckverlauf über den Spalten

Zum Überprüfen der berechneten Ergebnisse führen Vetter und Wincek Messungen an ein- und zweigängigen Pumpen mit Gasanteilen des Volumenstroms bis 0,9 für Gemische aus Wasser und Luft durch.

Körner [9], [10] untersucht das Förderverhalten von Schraubenspindelpumpen für Gemische aus Wasser und Luft mit Gasanteilen bis 0,99 und erweitert zu diesem Zweck das von Wincek und Vetter angegebene Modell. Es gelingt ihm den Förderstrom, die Leckströme und die einzelnen Kammerdrücke in Abhängigkeit vom Gasanteil des Volumenstroms im Zulauf, der Drehzahl und dem Differenzdruck zu berechnen. Die Ergebnisse werden durch Messungen an einer Schraubenspindelmaschine mit dem Spindelaußendurchmesser 100 mm und der Kammerzahl 3,347 sowie dem Förderstrom von ca. 50 m³/h bei 2900 1/min bestätigt. Für Gasanteile des Volumenstroms, die oberhalb von 0,9 liegen, werden im Einlassquerschnitt mit steigendem Gegendruck abnehmende Förderströme gemessen.

Etzold [11] leitet ein Modell zur Berechnung der Verluste von Schraubenspindelpumpen für die Förderung zweiphasiger Gemische her. Die Ergebnisse zu den berechneten Volumenströmen vergleicht er mit experimentellen Untersuchungen, die mit Gemischen aus Wasser und Luft durchgeführt sind. Für Bereiche niedriger Gasanteile des Volumenstroms und großer Druckdifferenzen weichen die berechneten Leckverluste bis zu 20% von den Messwerten ab.

Nakashima, Oliveira Jr. und Caetano [12], berechnen das Förderverhalten von Schraubenspindelpumpen mit Hilfe des Simulationsprogramms Hysys. Die Berechnungen für die stationäre Förderung erfolgen unter der Annahme adiabater Zustandsänderungen in den Kammern und einphasig flüssiger Spaltströmung. Sie veröffentlichen noch ein zweites Modell [13] in dem sie Massen- und Energiebilanzen für die in den geschlossenen Kammern

befindlichen flüssigen und gasförmigen Phasen nach dem Modell von Rausch [14] formulieren. Zusätzlich wird eine Massenbilanz der stofflichen Komponenten durchgeführt. Von den Autoren wird vorgeschlagen, die Stoffgrößen und das Phasengleichgewicht in der Pumpe zu berechnen. Damit berechnen sie [33] Störfälle, bei denen aufgrund sehr hoher Druckdifferenzen und niedriger Viskositäten der flüssigen Phase, sehr hohe Verlustströme auftreten, die in einzelnen Fällen zum kompletten Ausfall der Pumpenleistung führen. Die daraus folgenden Temperaturerhöhungen können zur Wärmeausdehnung des Gehäuses und der Spindel führen. Das Modell dient dazu, diese Temperaturerhöhungen zu berechnen.

Prang [15] untersucht eine Pumpe mit dem Schraubenspindeldurchmesser 135 mm und 8,5 bzw. 4,5 Kammern für Gemische aus Wasser und Luft mit Differenzdrücken bis ca. 16 bar. Er stellt fest, dass Schraubenspindelpumpen eine kleine Steigung und damit viele Kammern benötigen, um Gemische mit hohen Gasanteilen zu fördern. Prang und Cooper [16], [17] beschreiben ein Modell zum Berechnen des Fördervolumenstroms über den theoretischen Volumenstrom und den Verlustvolumenstrom. Sie untersuchen auch den Einfluss der Viskosität auf den Fördervolumenstrom. Für weniger viskose Flüssigkeiten sinkt der Volumenstrom mit zunehmender Druckdifferenz stärker als dies für hoch viskose der Fall ist.

Egashira [18] untersucht die Rückströmung in Schraubenspindelpumpen für Gemische aus Wasser und Luft. Es werden Gemischvolumenströme von ca. $100 \text{ m}^3/\text{h}$ gefördert, deren Gasanteile im Einlass 0 oder zwischen 0,6 und 0,9 betragen. Er misst die Druckprofile, aus denen empirisch die Rückströmungen berechnet werden. Im Grenzfall der reinen Flüssigkeitsförderung hat die Drehzahl keinen Einfluss auf die Rückströmung und der Druckaufbau erfolgt proportional zur Spindellänge.

Schraubenspindelpumpen benötigen nur sehr geringe Flüssigkeitsvolumenströme, um die unterschiedlichen Spalte zwischen Gehäuse und Spindel zu dichten und die Schmierung und Kühlung der Gleitringdichtungen zu gewährleisten. Laut Herstellerangaben ist die Förderung von Gasanteilen bis maximal 0,97 möglich [19]. Für hohe Gasanteile des Volumenstroms kann laut Cooper, Prang, Thamsen und Mair [1], Prang [15], Wyborn [19], Neumann [20] und Vauth [21] Flüssigkeit vom Auslass zum Einlass rezirkuliert werden.

Neumann [20] untersucht den Einfluss einer Schwallströmung, die in den Einlass einer Schraubenspindelpumpe eintritt, auf deren Förderverhalten. Er misst Druckmaxima in der Rohrleitung auf der Druckseite und sinkende Temperaturen.

Vauth [21] untersucht das Förderverhalten von zweispindeligen Schraubenspindelpumpen in Rohrnetzen, die von zweiphasigen Gemischen aus Wasser und Luft durchströmt sind. Dazu verwendet er zweispindelige, doppelflutige, außengelagerte Schraubenspindelpumpen mit dem Spindeldurchmesser 133 mm und der Steigung 20 mm mit zwei unterschiedlich langen Spindelsätzen. Die Messungen ergeben nahezu konstante Volumenströme bei Verwendung des Spindelsatzes mit 5 Kammern und Drehzahlen über 1500 1/min bei Gasanteilen von 0,5 bis 0,95. Für den kurzen Spindelsatz mit unter einer Kammer oder Drehzahlen unter 500 1/min nimmt der Fördervolumenstrom mit steigender Druckdifferenz ab. Für hohe Gasanteile über 0,95 wird der geförderte Volumenstrom bei Rezirkulation einer gewählten Flüssigkeitsmenge erhöht. Dieser Flüssigkeitsanteil wird vom Auslass zum Einlass gefördert, um die Spaltabdichtung innerhalb der Schraubenspindelpumpe zu verbessern. Für die untersuchte Pumpe liegt der Flüssigkeitsanteil im Einlassquerschnitt, der sich durch die Rezirkulation und die Zusammensetzung des Zustroms ergibt, für maximale Volumenströme zwischen 4 und 5 %. Liegt der Füllstand der Pumpe unterhalb eines Minimalwertes, so bricht die Förderung für die einphasige Gasströmung zusammen.

Experimentelle Untersuchungen für Schwallströmungen am Pumpeneintritt ergeben für den instationären Betrieb und für beliebige Gasanteile im Einlass ein Förderverhalten, welches nur geringfügig gegenüber dem stationären Betrieb abweicht. Die stark veränderlichen Gasanteile der Schwallströmung rufen keine Druck- oder Leistungsspitzen hervor, die die Funktion der Schraubenspindelpumpe gefährden.

Obwohl Schraubenspindelpumpen Verdrängungspumpen sind, lassen sie sich in Reihenschaltung betreiben. Um Druckspitzen zu vermeiden, ist bei instationärem Betrieb ein Puffervolumen notwendig.

Rausch [22] entwickelt ein Berechnungsmodell zur Vorhersage des Förderverhaltens von Schraubenspindelpumpen. Dazu löst er erstmalig orts- und zeitdiskrete Massen- und Energiebilanzen im Pumpenraum unter Berücksichtigung aller Anfangs- und Randbedingungen. Als Ergebnis erhält er die Druckprofile, Gasanteile und Temperaturen für die durch die Pumpe bewegten Kammern. Seine Ergebnisse stimmen mit den Messungen von Vauth [21] überein. Weiterhin untersucht Rausch das Strömungsfeld in den Kammern von Schraubenspindelpumpen, sowie das im Umfangsspalt. Dabei unterscheidet er bei den Kammern drei verschiedene Strömungsformen: Schichtströmung, inverse Schichtströmung und Strahlströmung. Als Spaltströmungen beobachtet er die reine Flüssigkeitsströmung, eine