


Experimentelle Untersuchung zur Mehrphasenströmung in öleingespritzten Mehrphasenschraubenspindelpumpen

Marian Lottis*, Mohammad Deeb und Andrea Luke

DOI: 10.1002/cite.201900141

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Für die Förderung von Gemischen mit hohen Gasanteilen erfolgt die Entwicklung eines neuen Kühlkonzepts, indem das Prozessfluid in flüssiger Phase extern in die Förderkammer einer Mehrphasenpumpe eingespritzt wird. Neben der Regulierung des Thermomanagements trägt dies zur Spaltabdichtung bei, so dass der effektiv geförderte Volumenstrom steigt. Zur Untersuchung der Thermo- und Fluidodynamik einer solchen Mehrphasenpumpe wird ein transparentes Förderkammermodell der Pumpe mit externer Fluideinspritzung entwickelt. Das Förderkammermodell ermöglicht Experimente hinsichtlich der Fluidodynamik in den Spalten durch Variation der Anzahl und Richtung der Einspritzungen.

Schlagwörter: Fluideinspritzung, Förderkammermodell, Mehrphasenpumpe

Eingegangen: 13. September 2019; *revidiert:* 03. Dezember 2019; *akzeptiert:* 05. Februar 2020

Experimental Investigation of the Multiphase Flow in Oil-Injected Multiphase Twin Screw Pumps

Twin screw pumps are used to transport gas-liquid mixtures in process technology. Nevertheless, a new cooling concept has to be developed for conveying mixtures with high gas content. An idea is to inject the liquid process fluid into the chambers of the pump. This method has a positive influence on the cooling effect and it also contributes to a better sealing of the gaps, hence, increasing the volume flow. At first, a transparent test rig, modeling one chamber of the pump with fluid injection, is designed to investigate the effect of the injection into the chamber of a twin screw pump. The test rig allows an analysis regarding the fluid dynamics in the gaps by varying the direction and number of injection.

Keywords: Chamber model, Fluid injection, Multiphase pump

1 Einleitung

Erdöl wird auch weiterhin als fossiler Energieträger und als Rohstoff für die stoffumwandelnde Industrie von großer Bedeutung sein. Die erdölreichen Quellen sind zunehmend ausgeschöpft, weshalb immer mehr Erdöllagerstätten erschlossen werden, die einen hohen Begleitgasanteil aufweisen. Dieses wird unmittelbar nach der Förderung abgefackelt. Zur Vermeidung der Abgasverbrennung und zur Erhöhung des Ausbeutungsgrades der Lagerstätte werden Mehrphasenschraubenspindelpumpen eingesetzt, wodurch keine Phasentrennung notwendig ist. Die Förderung mit Schraubenspindelpumpen ermöglicht einen effizienten Transport mehrphasiger Stoffsysteme mit niedrigen bis zu mittleren Gasgehalten [1] und moderaten Druckdifferenzen [2, 3]. Durch das Eingreifen der Schraubenspindeln entstehen Förderkammern, in denen das Gemisch von der Saugseite zur Druckseite transportiert wird. Konstruktiv bedingt

sind die Förderkammern durch Spalte verbunden (Radial-, Flanken- und Umfangsspalt), in denen ein Volumenstrom entgegengesetzt der Förderrichtung strömt. Dieser Verlustvolumenstrom, ist u. a. abhängig von der Zusammensetzung des Stoffsystems, Druckdifferenz und Rotation. Hohe Gasanteile führen aufgrund der niedrigeren Viskosität des Gases zu signifikanten Verlustvolumenströmen [4, 5] und zu einer starken thermischen Belastung der Komponenten [5, 6] (s. [7]). Dies hat einen schlechten volumetrischen Wirkungsgrad, d. h. eine geringere Förderleistung und einen hohen Verschleiß der Komponenten, zufolge. Da die Funktionsfähigkeit der Mehrphasenpumpen auch bei begleitgasreichen

Marian Lottis, Mohammad Deeb,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Andrea Luke
ttk@uni-kassel.de
Universität Kassel, Technische Thermodynamik Kassel, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland.

Lagerstätten gewährleistet werden soll, wird ein Konzept zur Förderung mehrphasiger Stoffsysteme mit hohen Gasgehalten entwickelt, indem die Kühlung und die Spaltabdichtung durch eine Prozessfluideinspritzung realisiert werden. Eine weitere Anwendung für die prozessimmanente Schraubenspindelpumpe liegt in der Industriekälte, da dort z. B. keine Totalverdampfung bzw. Kondensation benötigt wird, wodurch Wärmeübertrager präziser ausgelegt werden können. Dazu wird der Einfluss der Einspritzung auf die Thermo- und Fluidodynamik in einem Modell einer Mehrphasenpumpe im Labormaßstab quantifiziert.

2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur experimentellen Untersuchung des Einflusses einer Prozessfluideinspritzung auf die Thermo- und Fluidodynamik in Mehrphasenpumpen wird ein transparentes Modell einer einzelnen Förderkammer im Labormaßstab entwickelt und in Betrieb genommen (Abb. 1). Hauptkomponente des Modells ist eine beidseitig gelagerte Welle (1), auf der sich zwei axial voneinander versetzte Scheiben befinden. Der

Umfangsspalt zwischen Gehäuse und rotierender Scheibe ist auf 0,5 mm ausgelegt und entspricht somit dem realer Mehrphasenpumpen. Der Eingriff der Gegenschraube wird mithilfe eines statischen Einschubs (2), der sich zentrisch zwischen den beiden Scheiben befindet, berücksichtigt. Durch den Einschub bilden sich der Radial- und der Flankenspalt, deren Spaltmaß ebenfalls 0,5 mm entspricht. Die Aufprägung des Gasmassenstroms wird mithilfe einer Bohrung vor den Scheiben in das Modell herein und durch eine Bohrung hinter den Scheiben herausgeführt. Die Einspritzung des Prozessfluids erfolgt mithilfe von fünf azimuthal verteilten Düsen entlang der Scheibenachse. Davon befinden sich drei oben, eine seitlich und eine unten. Die drei obigen Düsen unterscheiden sich in ihrem Einspritzwinkel (30° , 90° , 150°).

Der Versuchsaufbau setzt sich aus drei unterschiedlichen Kreisläufen zusammen, der Gaskreislauf (gestrichelte Linie), der Sättigungskreislauf (gepunktete Linie) und der Einspritzkreislauf (durchgezogene Linie). Als Gas wird Luft und als Flüssigkeit mit Luft gesättigtes medizinisches Weißöl verwendet. Der Gaskreislauf bildet den Betrieb der Mehrphasenpumpe bei der Förderung eines volumetrischen Gasgehaltes von ≈ 1 ab, d. h. bei reiner Gasförderung. Der volumetrische Gasgehalt ist das Verhältnis aus Gasvolumenstrom bezogen auf den gesamt geförderten Volumenstrom. Da die Mehrphasenpumpe prozessimmanent abgedichtet und gekühlt werden soll, wird das Prozessfluid zunächst mit Luft gesättigt und auf 20°C temperiert. Die Temperatur des Gaskreislaufes wird ebenfalls auf 20°C eingestellt. Der vollständig gesättigte Zustand im Öl ist erreicht, wenn erste Gasblasen im Blasenabscheider aufsteigen [8]. Anschließend wird das aufbereitete Öl aus dem Blasenabscheider mithilfe einer Zahnradpumpe zum Kammermodell gefördert und eingespritzt. Dabei werden der Einspritzwinkel, die Anzahl der Einspritzungen, die Position und der Volumenstrom des gesättigten Öls variiert (s. Tab. 1). Die Zustandsgrößen \dot{V}_{gas} , $p_{\text{g,ein}}$, $T_{\text{öl}}$ und $p_{\text{öl,ein}}$ werden konstant gehalten. Der Ölvolumenstrom wird in einem Bereich von $0,15\text{ L min}^{-1}$ bis $1,5\text{ L min}^{-1}$ und die Drehzahl zwischen 400 min^{-1} und 1600 min^{-1} variiert. Der Ölvolumenstrom ist so gewählt, dass dieser 1–10 % des Gasvolumenstroms

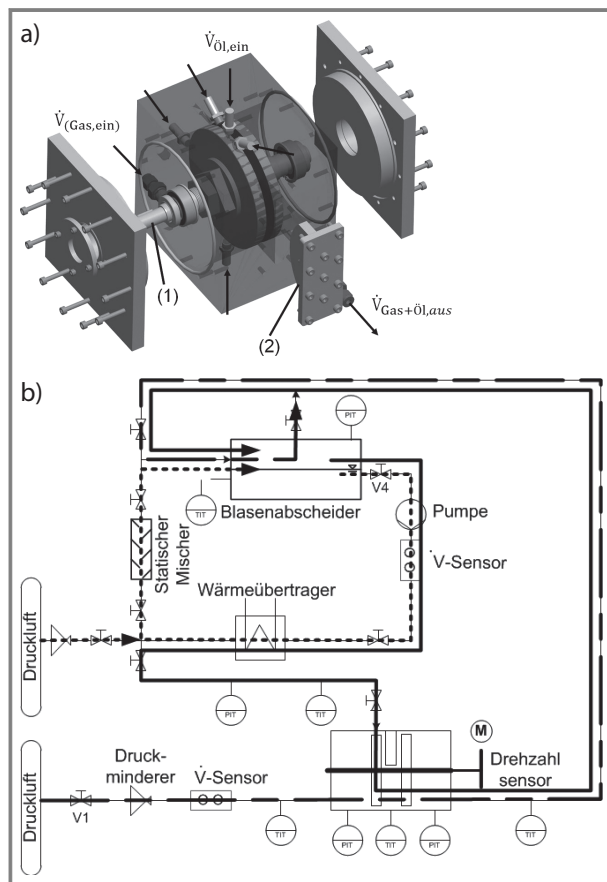


Abbildung 1. 3D-Zeichnung des Kammermodells für eine Mehrphasenpumpe (a) und die schematische Darstellung vom Fließbild des Versuchsaufbaus (b).

Tabelle 1. Übersicht der variablen Parameter für die experimentelle Untersuchung von öleingespritzten Mehrphasenpumpen. Konstante Einstellungen: $\dot{V}_{\text{gas}} = 15\text{ L min}^{-1}$; $p_{\text{g,ein}} = 2\text{ bar}$; $T_{\text{öl}} = 20^\circ\text{C}$; $p_{\text{öl,ein}} \approx p_{\text{g,ein}}$.

Drehzahl n [min^{-1}]	Volumenstrom Öl [L min^{-1}]	Einspritzposition
– 400	– 0,15	– oben
– 800	– 0,45	– Seite
– 1600	– 0,75	– oben/Seite/unten
	– 1,05	– in Drehrichtung
	– 1,5	– gegen Drehrichtung

entspricht und damit den Bereich abbildet, in dem eine zweiphasige Strömung im Umfangspalt vorliegt [1].

Die Quantifizierung der Abdichtwirkung im Umfangspalt erfolgt mithilfe der gemessenen Druckdifferenz zwischen Kammer eins und Kammer zwei (s. Abb.2). Der Ablauf einer erfolgreichen Abdichtung wird im Folgenden erläutert:

- Das Gas strömt in das Kammermodell.
- Der Ölvolumenstrom wird an der gewünschten Position aufgebracht.
- Das Öl verteilt sich bedingt durch die eingestellte Drehzahl der Welle entlang des Umfangspaltes.
- Der Flüssigkeitsfilm im Umfangspalt dichtet den Umfangspalt ab und verhindert den Durchfluss des Gases von Kammer 1 in Kammer 2.
- Die gemessene Druckdifferenz gilt als Indikator zur Quantifizierung der Spaltabdichtung.

3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die gemittelten experimentellen Ergebnisse für die unterschiedlichen Einspritzpositionen (oben, seitlich, in Drehrichtung und an drei Positionen gleichzeitig) sind in Abb. 3 in Abhängigkeit des eingespritzten Ölvolumenstroms für drei Drehzahlen von 400 bis 1600 min^{-1} dargestellt. Mit steigendem Ölvolumenstrom werden höhere Differenzdrücke zwischen den Kammern und dadurch bessere Spaltabdichtungen erzielt. Dieser Zusammenhang ist für alle Injektionsrichtungen gegeben. Die Zunahme des Differenzdrucks verhält sich annähernd linear zur Menge des eingespritzten

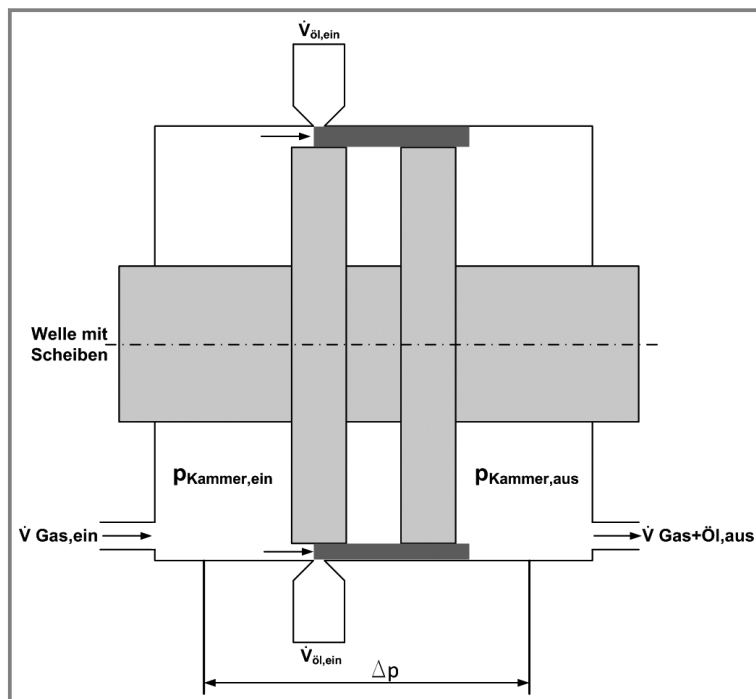


Abbildung 2. Schematische Darstellung des Druckaufbaus im Falle der Spaltabdichtung durch einen Flüssigkeitsfilm.

Öls, wobei sich die Steigung der Regressionsgeraden proportional zur Drehzahl verhält. Der niedrigste Differenzdruck liegt für alle Einspritzvarianten beim geringsten Ölvolumenstrom und bei der höchsten Drehzahl vor. Hingegen tritt bei allen Einspritzausrichtungen die höchste Druckdifferenz beim größten Ölvolumenstrom und der höchsten Drehzahl auf. Es ist zu sehen, dass der Einfluss der Einspritzrichtung mit steigendem Ölvolumenstrom zunimmt (vgl. die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsfunktionen). Die dreiseitige Einspritzung weist im Rahmen dieser Messungen die beste Spaltabdichtung auf. Grund dafür ist die Verteilung der Flüssigkeit entlang der Scheibe. Im Vergleich der einseitigen Einspritzungen werden die höchsten Differenzdrücke bei der obigen senkrechten Einspritzung und die niedrigsten bei der seitlichen Einspritzung gemessen. Dies ist auf die schwerkraftbedingte Flüssigkeit am Boden des Kammermodells zurückzuführen. Diese Restflüssigkeit benetzt die rotierenden Scheiben zusätzlich und haftet auf diesen. Im Falle der Einspritzung von der Seite führt diese zu einem Zusammenstoßen der mitgerissenen Flüssigkeit und der eingespritzten Flüssigkeit mit den entsprechenden Turbulenzen, die die Spaltabdichtung im Vergleich mit der Einspritzung von oben verschlechtern. Die winkelgerichtete Einspritzung (30°) von oben bewirkt eine etwas schlechtere Abdichtwirkung als die senkrechte Einspritzung von oben, allerdings eine bessere als die seitliche Einspritzung.

In Abb. 4 sind die gemessenen Differenzdrücke als Funktion der jeweiligen Einspritzposition (1 oben, 2 in Drehrichtung, 3 entgegen Drehrichtung, 4 seitlich, 5 dreiseitig) für drei Ölvolumenströme und zwei Drehzahlen dargestellt. Die gemessene Druckdifferenz ist für den niedrigsten Ölvolumenstrom näherungsweise unabhängig von der Anzahl bzw. der Position der Einspritzungen, da die Menge an Öl zur Spaltabdichtung unzureichend ist. Mit steigendem Ölvolumenstrom nimmt der Einfluss der Einspritzrichtung bzw. -position zu, der zusätzlich von der Drehzahl abhängig ist (vgl. die unterschiedlichen Differenzdrücke in Abb. 4 von $n = 400 \text{ min}^{-1}$ mit $n = 1600 \text{ min}^{-1}$). Beim höchsten untersuchten Ölvolumenstrom von $\dot{V}_{\text{öl}} = 1,5 \text{ L min}^{-1}$ ist der Einfluss der Einspritzrichtung für beide gemessenen Drehzahlen am stärksten ausgeprägt. Die Ergebnisse zeigen, dass für beide Drehzahlen die seitliche Einspritzung, bedingt durch das Zusammenstoßen der Flüssigkeitsströme und den daraus folgenden Turbulenzen, die niedrigsten Differenzdrücke und dadurch die schlechteste Spaltabdichtung erzielt. Hingegen wirkt sich eine einseitige Einspritzung von oben senkrecht oder eine dreiseitige Einspritzung positiv auf das Abdichtverhalten des Umfangspaltes aus. Eine winkelgerichtete Einspritzung führt nur bei niedrigen Drehzahlen zu einer äquivalenten Abdichtung wie eine senkrechte Einspritzung.

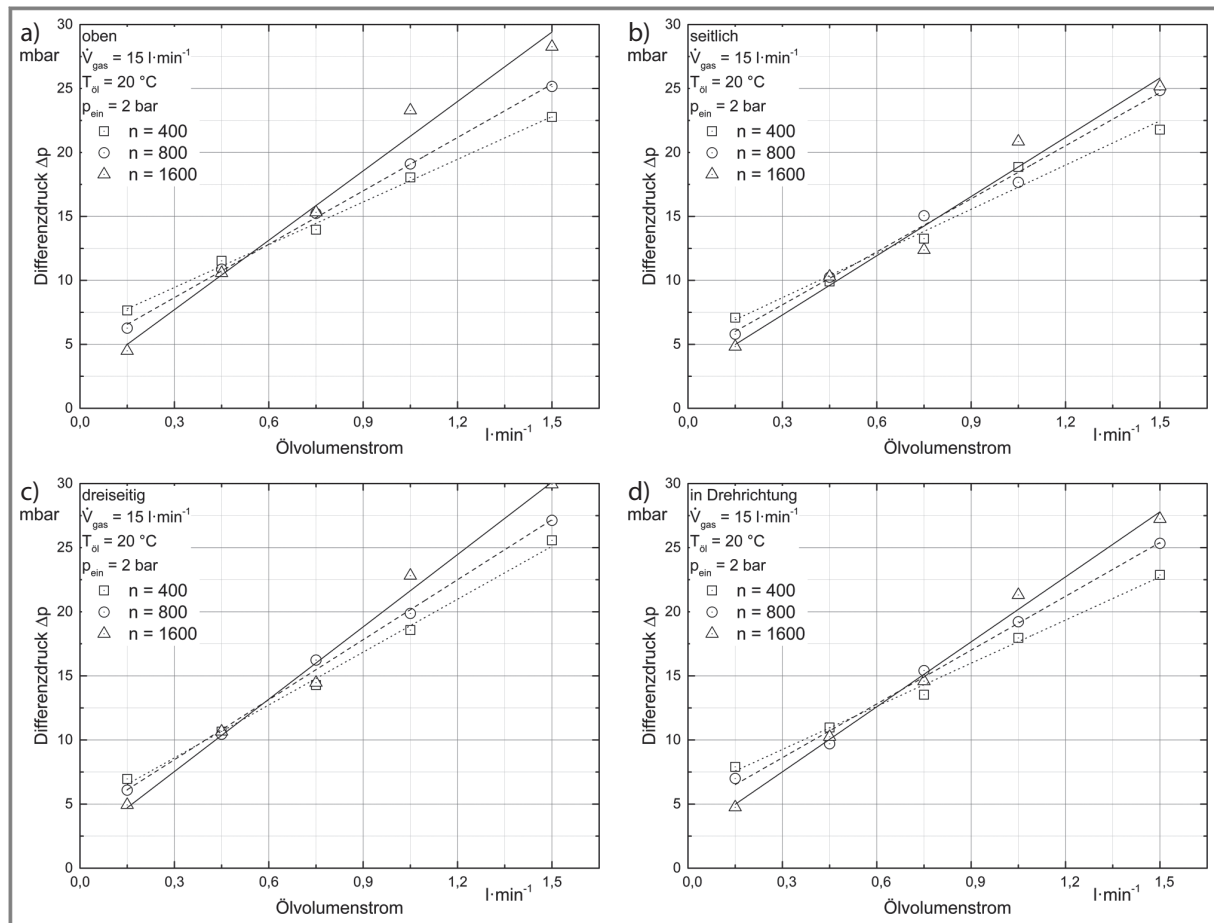


Abbildung 3. Differenzdruck zwischen den beiden Kammern als Funktion des Ölvolumenstroms für drei Drehzahlen zwischen $n = 400 \text{ min}^{-1}$ und $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ für die Einspritzung von oben (a), die seitliche Einspritzung (b), für die dreiseitige Einspritzung (c) und die Einspritzung in Drehrichtung (d).

Der Einfluss unterschiedlicher Drehzahlen und Ölvolumenströme auf die Dissipation der rotierenden Scheiben und damit auf die Kammertemperatur ist in Abb. 5 gezeigt. Die Kammertemperatur nimmt mit Erhöhung des Ölvolumenstroms ab, da durch die höhere spezifische Wärmekapazität des Öls im Vergleich zur Luft mehr Wärme aus dem System abgeführt wird. Der Temperaturverlauf in Abhängigkeit des eingespritzten Ölvolumenstromes entspricht einer exponentiellen Funktion, die gegen die Öltemperatur konvergiert (s. gestrichelte Linie in Abb. 5). Ferner nimmt die Kammertemperatur mit steigender Drehzahl aufgrund der Dissipation zu.

4 Zusammenfassung

Zur wirtschaftlichen Förderung von Erdöl aus Lagerstätten mit hohem Begleitgasanteil wurde eine neue Mehrphasenpumpe mit externer Prozessfluideinspritzung entwickelt. Die Einspritzung dient zum einen der Spaltabdichtung, wodurch die Effizienz der Pumpe erhöht wird, und zum anderen der

Kühlung der Pumpe. Experimente an einem transparenten Modell einer einzelnen Förderkammer einer Mehrphasenpumpe wurden durchgeführt, um den Einfluss einer solchen Einspritzung zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Spaltabdichtung nicht nur vom eingespritzten Ölvolumenstrom abhängig ist, sondern auch von der Position und Anzahl der Einspritzungen. Als beste Einspritzvariante erweist sich die dreiseitige Einspritzung, da eine bessere azimuthale Verteilung der Flüssigkeit entlang der Scheibe im Vergleich zu einer einseitigen Einspritzung vorliegt. Im Falle einer einseitigen Einspritzung erfolgt die beste Spaltabdichtung durch die senkrechte Einspritzung von oben. Die schlechteste Abdichtungswirkung ergibt sich bei seitlicher Einspritzung.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 03SX446D) und bei der Firma ITT Bornemann für die Zusammenarbeit. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

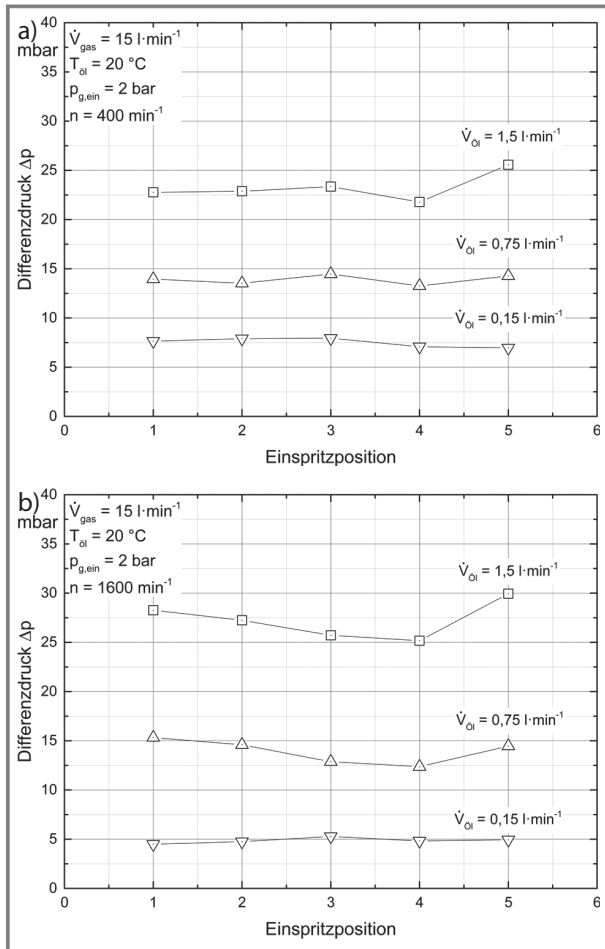


Abbildung 4. Differenzdruck zwischen den beiden Kammern als Funktion der untersuchten Einspritzpositionen für die Drehzahl $n = 400 \text{ min}^{-1}$ (a) und $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ (b) für drei Volumenströme.

Formelzeichen

n	$[\text{min}^{-1}]$	Drehzahl
p_{g}	$[\text{bar}]$	Gasdruck
$p_{\text{öl}}$	$[\text{bar}]$	Gasdruck
Δp	$[\text{bar}]$	Differenzdruck zwischen den beiden Kammern
$T_{\text{öl}}$	$[\text{°C}]$	Öltemperatur
\dot{V}_{gas}	$[\text{L}\cdot\text{min}^{-1}]$	Gasvolumenstrom
$\dot{V}_{\text{öl}}$	$[\text{L}\cdot\text{min}^{-1}]$	Ölvolumenstrom

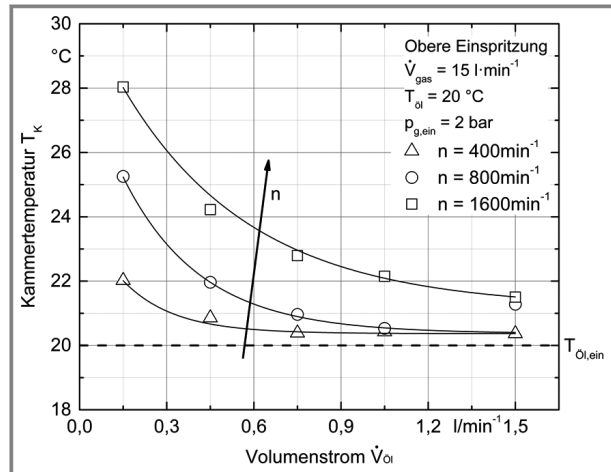


Abbildung 5. Kammertemperatur als Funktion des Ölvolumenstroms für die Drehzahlen $n = 400 \text{ min}^{-1}$, 800 min^{-1} und 1600 min^{-1} bei Einspritzung von oben.

Literatur

- [1] S. Fries, S. Skusa, A. Luke, *Heat Mass Transfer* **2019**, 55 (1), 33–40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2318-2>
- [2] G. Aleksieva, *Förderverhalten von Mehrphasenpumpen mit variabler Spindelsteigung*, Cuvillier Verlag, Göttingen **2008**.
- [3] T. Vauth, *Mehrphasenpumpen im Netzbetrieb*, Cuvillier Verlag, Göttingen **2005**.
- [4] M. Winzek, *Zur Berechnung des Förderverhaltens von Schraubenspindelpumpen bei der Förderung von Flüssigkeits/Gas-Gemischen*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg **1992**.
- [5] A. Körner, *Zum Förderverhalten von Schraubenspindelpumpen für Zweiphasengemische hohen Gasgehalts*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg **1998**.
- [6] T. Rausch, *Thermofluidodynamik zweiphasiger Strömungen in Schraubenspindelpumpen*, Dissertation, Cuvillier Verlag, Göttingen **2006**.
- [7] K. Kauder, R. Piatkowski, *Einfluss des Öls auf den mechanischen Wirkungsgrad öleingespritzter Schraubenverdichter*, VDI-Ber. **1987**, 640, 11–30.
- [8] S. Wagner, K. Zabkova, A. Luke, Sorptionseffekte in gesättigten mehrphasigen Strömungen in Mehrphasenpumpen, *Chem. Ing. Tech.* **2015**, 87 (8), 1083. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201550073>