

Übersicht

In der vorliegenden Arbeit wird die verdünnte Strömung in Spalten von Vakuumpumpen diskutiert. Die durch eine Druckdifferenz (Poiseuille-Strömung), eine bewegte Berandung (Couette-Strömung) oder eine Temperaturdifferenz (thermische Kriechströmung) erzeugten Strömungen, welche isoliert oder kombiniert betrachtet werden, sind Gegenstand der Untersuchungen. Im Rahmen der Arbeit wird eine eindimensionale Theorie validiert, welche diese drei Strömungsarten in einem weiten Bereich der Gasverdünnung abbilden kann. Dafür werden sowohl Simulationen mithilfe der DSMC-Methode (Direct Simulation Monte Carlo), die das Gas auf Ebene der Teilchen modelliert, als auch experimentelle Untersuchungen herangezogen. Insgesamt werden zwei verschiedene Spaltgeometrien betrachtet. Der planparallele Spalt, welcher aus zwei zueinander parallele Konturen gebildet wird und der Radiuspalt, welcher aus einer planen Kontur und einer Kontur mit Radius besteht.

Um allgemeingültige Ergebnisse zu erhalten, werden die zur Beschreibung der Strömung notwendigen dimensionslosen Kennzahlen identifiziert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass in jedem Querschnitt in Strömungsrichtung ein vollständiger Wärmeaustausch zwischen Gas und Wand stattfindet. Die so ermittelten Kennzahlen können im weiteren Verlauf umfangreich variiert werden.

Für die experimentellen Untersuchungen werden zwei geeignete Spaltmodellbauten vorgestellt. Ein Spaltmodell kann zur Messung des Massenstroms einer reinen Poiseuille-Strömung genutzt werden. Ein weiteres Modell dient zur Messung des Massenstroms aufgrund einer kombinierten Couette-Poiseuille Strömung, bei welchem auch ein Konzept zur Bestimmung der Massenströme weiterer Spalte vorgestellt wird, die aufgrund der notwendigen bewegten Berandung entstehen.

Anschließend wird eine umfangreiche experimentelle Untersuchung der Spaltströmung unter Variation der dimensionslosen Kennzahlen durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen der eindimensionalen Theorie und der DSMC-Methode ergibt über einen weiten Bereich der Gasverdünnung eine gute Übereinstimmung. Abweichungen finden sich im Bereich der Kontinuumsströmung zwischen eindimensionaler Theorie und dem Experiment.

Die bei der eindimensionalen Theorie getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zur Berechnung der Strömung werden nachfolgend dahingehen untersucht, in welchem Bereich der dimensionslosen Kennzahlen die eindimensionale Theorie gute Ergebnisse liefert. Die Einsatzgrenzen der eindimensionalen Theorie werden mit einer über die experimentellen Untersuchungen hinausgehenden Variation der dimensionslosen Kennzahlen ermittelt. Zur Beurteilung der Abbildungsgüte der eindimensionalen Theorie werden die Simulationsergebnisse der DSMC-Methode herangezogen und auf diesem Weg können erfolgreich Kriterien für die Einsatzgrenzen herausgearbeitet werden.

Abstract

In the present work the rarefied gas flow in clearances of vacuum pumps is discussed. The flow, which can be caused by a pressure difference (Poiseuille flow), a moving boundary (Couette flow), a temperature difference (thermal creep flow) or a combination of these flow types, is considered. In this work a one dimensional theory is validated, which is able to reproduce these three flow types in a wide range of gas rarefaction. For this purpose the DSMC-method (Direct Simulation Monte Carlo), which models the gas by means of particles, is used as well as experimental investigations. Two different clearance geometries are considered. A plane clearance, which is formed by two parallel contours and a radius-clearance, which is formed by a plane contour and a contour with a radius.

To achieve an universal description of the flow, the necessary nondimensional numbers are identified. For this, the assumption is made, that a complete heat exchange between gas and boundary is conducted for every cross section along the flow. A large variation of the identified nondimensional numbers is performed further on.

Two appropriate clearance setups are presented for the experimental investigations. One setup can be used to measure the mass flow of a Poiseuille flow. A further setup is used to measure the mass flow of a combined Couette Poiseuille flow. This includes a concept for the determination of the mass flow of additional clearances, which are necessary due to a moving boundary.

A comprehensive experimental investigation of the clearance flow varying the non-dimensional numbers is conducted. Comparing the experimental results with results found by the one dimensional theory and the DSMC-method a good agreement can be found over a wide range of gas rarefaction. A discrepancy can be found in the continuum flow range between one dimensional theory and experiment.

Assumptions and simplifications, which are made for the one dimensional theory, are investigated in order to find the range of nondimensional numbers in which the one dimensional theory can be used. The limits of use of the one dimensional theory are determined by an additional variation of the nondimensional numbers, which goes beyond the experimental investigations. To evaluate the results of the one dimensional

theory, simulations by the DSMC-method are used. Thus, criteria for the limits of use of the one dimensional theory can be presented successfully.

Kapitel 1

Einleitung

Heute spielt die Vakuumtechnik sowohl im Bereich der Forschung als auch in der industriellen Anwendung eine zentrale Rolle. Der Begriff *Vakuum* ist aus dem lateinischen *vacuus*, übersetzt *entblößt, frei, leer* abgeleitet und beschreibt in der Physik einen Raum unter der Abwesenheit von Materie. Technisch kann ein absolutes Vakuum (eine Teilchenanzahldichte von null) allerdings nicht erzeugt werden. Eine Definition findet sich in der entsprechenden DIN-Norm 28400 Teil 1:

”Vakuum heißt der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenanzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d.h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck.” [Dinb]

Der Druckbereich technisch erzeugbarer Vakua erstreckt sich über mehr als 15 Dekaden ($10^5 - 10^{-10} Pa$), sodass sich eine Einteilung in verschiedene Vakuumbereiche in Abhängigkeit des Druckes etabliert hat. Diese gliedern sich in das Grob- ($10^5 - 10^2 Pa$), Fein- ($10^2 - 10^{-1} Pa$), Hoch- ($10^{-1} - 10^{-5} Pa$) und Ultrahochvakuum ($< 10^{-5} Pa$) [Dina].

Die Anwendungsbereiche sind vielfältig und haben die Entwicklung leistungsfähiger Vakuumpumpen voran getrieben. Der Begriff der *Pumpe*, welche üblicherweise inkompressible Medien fördert, ist irreführend, da die Vakuumpumpe im eigentlichen Sinne ein Kompressor für verdünnte Gase ist. Die Begründung ist historisch bedingt, da Wasserpumpen den Ursprung der ersten Vakuumpumpe darstellen [Jou10c]. Anwendungsbereiche in der Forschung erstrecken sich über die Elementarteilchenphysik, Massenspektroskopie, Materialforschung und Weltraumsimulationen, um nur wenige zu nennen [Jou10b]. Beispiele der industriellen Anwendung finden sich im Bereich der Metallurgie, Medizintechnik, Trocknung und Entgasung, Lebensmittelindustrie und der Halbleiterindustrie [Jou10b].

In der jüngeren Vergangenheit ist insbesondere die Weiterentwicklung von trockenlaufenden Vakuumpumpen vorangetrieben worden. Der wesentliche Vorteil dieser Vaku-

umpumpen besteht darin, dass eine Verunreinigung des Arbeitsgases mit Hilfsfluiden vermieden wird. Gleichzeitig besteht der Hauptverlustmechanismus in den für das Betriebsverhalten schädlichen Spaltströmungen. Die Kenntnis dieser Spaltströmungen ist für die Simulation des Betriebsverhaltens somit von großer Wichtigkeit. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Betrachtung von Spaltströmungen in trockenlaufenden Verdrängervakuumpumpen. Der weite Druckbereich technisch erzeugbarer Vakua zeigt, dass mitunter Gasströmungen bei extrem geringen Dichten betrachtet werden müssen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von verdünnten Gasströmungen. Die Kennzahl zur Quantifizierung der Gasverdünnung ist die Knudsenzahl

$$Kn = \frac{\lambda}{l_{char}}, \quad (1.1)$$

die das Verhältnis aus mittlerer freier Weglänge λ und einer charakteristischen Länge l_{char} darstellt. Die mittlere freie Weglänge kennzeichnet den statistischen Weg, den ein Molekül im Raum zwischen der Interaktion mit zwei anderen Molekülen zurücklegt. Als charakteristische Länge wird üblicherweise die kleinste geometrische Ausdehnung gewählt, welche bei einer Spaltströmung die Spalthöhe ist. Eine Einteilung der Strömung in Abhängigkeit der Knudsenzahl wird in Kapitel 3.2.2 durchgeführt.

Im Folgenden werden trockenlaufende Verdrängervakuumpumpen zunächst bezüglich Bauart und Wirkungsweise eingeordnet. Anhand einer Schraubenvakuumpumpe wird das Arbeitsspiel mit dem wichtigsten Verlustmechanismus, der Spaltströmung, erläutert. Die Notwendigkeit der Bestimmung der Spaltmassenströme wird anhand einer Zusammenfassung der üblichen Methoden zur Simulation trockenlaufender Vakuumpumpen motiviert. Abschließend wird der Stand der Wissenschaft zu Spaltströmungen in Vakuumpumpen aufgezeigt.

1.1 Trockenlaufende Verdrängervakuumpumpen

1.1.1 Einordnung der Bauarten

Für die technische Erzeugung von Vakua stehen in der heutigen Zeit verschiedene Vakuumpumpen zur Verfügung, wobei der erreichbare Druckbereich im Wesentlichen vom Wirkprinzip und der Bauart abhängig ist. Eine Kategorisierung von Vakuumpumpen nach dem Wirkprinzip wird in **Abbildung 1.1** gezeigt. Die DIN-Norm 28400 Teil 2 [Dina] teilt Vakuumpumpen zunächst nach dem Wirkprinzip einer Gastransfer- und einer gasbindenden Vakuumpumpe ein. Die gasbindende Vakuumpumpe arbeitet nach dem Prinzip der Sorption oder Kondensation des zu fördernden Mediums an festen Oberflächen. Die Gastransfervakuumpumpe wird in zwei weitere Kategorien untergliedert. Eine Kategorie repräsentiert die Verdrängervakuumpumpe, gekennzeichnet durch einen gekapselten Arbeitsraum, dessen Größe sich während eines Arbeitsspiels zyklisch än-

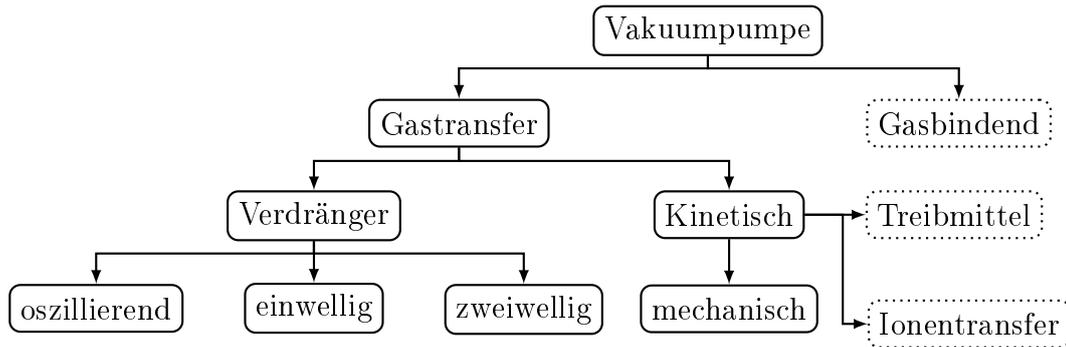


Abbildung 1.1: Kategorisierung von Vakuumpumpen nach dem Wirkprinzip. Nach [Dina] und [Jou10b]

dert. Die zweite Kategorie besteht aus den kinetischen Vakuumpumpen, gekennzeichnet durch einen offenen Arbeitsraum, bei welchen die Energiewandlung durch eine Impulsänderung des Gases herbeigeführt wird. Die weitere Einteilung wird entsprechend der Bauart der Vakuumpumpe durchgeführt.

Grundsätzlich existieren Vakuumpumpen mit und ohne einem Hilfsfluid, das mit dem zu fördernden Gas in Kontakt kommt. Bei diesen Hilfsfluiden handelt es sich häufig um Öl oder Wasser, das zur Kühlung des zu fördernden Gases und Abdichtung interner Spaltverbindungen dient. Wesentliche Nachteile ergeben sich durch eine mögliche Rückströmung in den Ansaugstutzen und somit der Verunreinigung der Vakuummkammer oder einer möglichen Verunreinigung des Hilfsfluides, wenn Prozessgase oder Partikel gefördert werden müssen [Jou10d]. Seit den 1980er Jahren ist zunehmend die Bedeutung der trockenlaufenden Vakuumpumpen insbesondere durch Nachfrage der Halbleiterindustrie gestiegen und besitzen heute einen hohen Marktanteil. Da sich die vorliegende Arbeit mit der Spaltströmung in trockenlaufenden Vakuumpumpen beschäftigt, werden im folgenden Beispiele für verschiedene Bauarten gegeben und in **Abbildung 1.2** in den entsprechenden Vakuumbereich eingeordnet.

Nach Jousten [Jou10b] können Verdrängervakuumpumpen in oszillierende und rotierende Verdrängervakuumpumpen eingeteilt werden, wobei letztere sich durch einen einwelligen oder zweiwelligen Aufbau unterscheiden. Alle hier genannten Verdrängervakuumpumpen, mit Ausnahme der Wälzkolbenpumpe, verringern üblicherweise das Arbeitskammervolumen bevor das Gas ausgeschoben wird und besitzen somit eine innere Verdichtung. Die Membran- und Hubkolbenpumpen besitzen oszillierende Kolben und zumeist einen Schadraum. Haupteinsatzgebiet ist der Bereich des Grobvakuums, wobei niedrige Enddrücke nur durch eine mehrstufige Anordnung erreicht werden können. Beispiele für einwellige Rotationsverdrängervakuumpumpen sind trockenlaufende Drehschieberpumpen, wobei die Schieber aufgrund des fehlenden Öls als Schmiermittel aus einem Verbundwerkstoff mit dem Hauptbestandteil Graphit bestehen [Kos10]. Aufgrund der fehlenden Dichtwirkung eines Schmiermittels werden diese Vakuumpumpen im Bereich des Grobvakuums eingesetzt. Die Scroll-Pumpe wird teilweise bei den

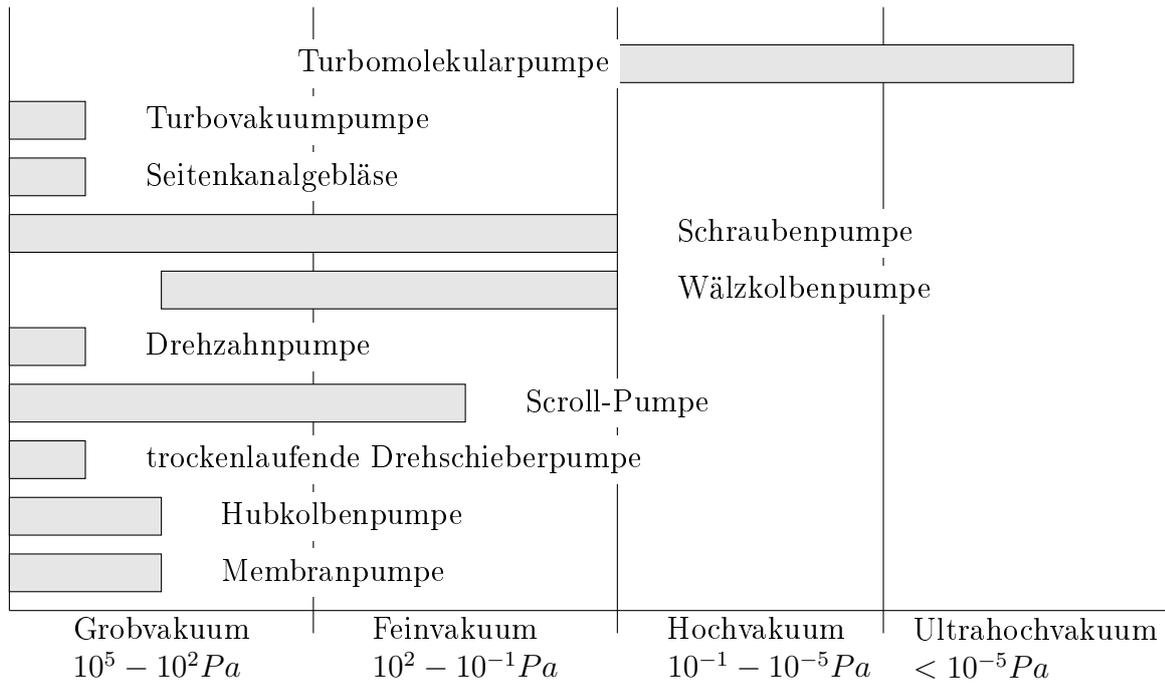


Abbildung 1.2: Verschiedene Bauarten von trockenlaufenden Vakuumpumpen und Zuordnung zum jeweiligen Vakuumbereich. Nach [Dina] und [Jou10b]

oszillierenden Vakuumpumpen eingeordnet und wird häufig als trockenlaufende Alternative zu nasslaufenden Drehschieberpumpen eingesetzt [Jou10d]. Der Ansaugdruck der Scroll-Pumpe reicht bis in den Bereich des Feinvakuums. Schraubpumpen, Drehzahnpumpen und Wälzkolbenpumpen stellen trockenlaufende zweiwellige Rotationsverdränger dar. Schraubpumpen zeichnen sich durch Rotorprofile mit einem großen Umschlingungswinkel und somit mehreren in Reihe geschalteter Arbeitskammern aus. Hierdurch wird eine gute Abdichtung erreicht, weshalb Ansaugdrücke bis in den Bereich des Feinvakuums erzielt werden. Aufgrund gesteigerter Möglichkeiten in der Fertigungstechnologie besitzen aktuelle Ausführungen zumeist Rotorprofile mit variabler Steigung, sodass auch diese Pumpenbauart eine innere Verdichtung aufweist. Die Drehzahnpumpe besitzt zwei sichelförmige Rotoren und nur eine geringe Anzahl in Reihe geschalteter Arbeitskammern, sodass diese nur im Bereich des Grobvakuum eingesetzt werden kann. Die Wälzkolbenpumpe besitzt keine innere Verdichtung und ist daher nur für geringe Druckdifferenzen geeignet. Diese Bauart wird hauptsächlich in Kombination mit einer gegen Atmosphäre verdichtenden Vorpumpe kombiniert, um das Gesamtsaugvermögen zu erhöhen.

Die kinetischen Gastransferpumpen werden weiter in mechanische, Treibmittel und Ionentransferpumpen unterteilt. Die Treibmittelpumpen nutzen ein bewegtes Arbeitsmedium (flüssig oder gasförmig) um eine Impulsänderung des zu fördernden Mediums herbei zu führen. Bei der Ionentransferpumpe wird das Gas ionisiert und mittels eines elektrischen Feldes gefördert. Bei den kinetisch mechanischen Gastransferpumpen werden im Bereich des Grobvakuum Seitenkanalgebläse und Turbovakuumpumpen

eingesetzt. Im Bereich des Hoch- und des Ultrahochvakuums werden Turbomolekularpumpen eingesetzt und häufig mit einer Molekularpumpe kombiniert, um den Einsatz bis in den Bereich des Feinvakuums zu ermöglichen.

1.1.2 Arbeitsprinzip

Der Aufbau und die Wirkungsweise der Verdrängervakuumpumpen wird am Beispiel einer Schraubenvakuumpumpe erläutert. **Abbildung 1.3** zeigt beispielhaft eine Schraubenvakuumpumpe mit Zykloidenprofil und zwei Zähnen pro Rotor. Die Arbeitskammer

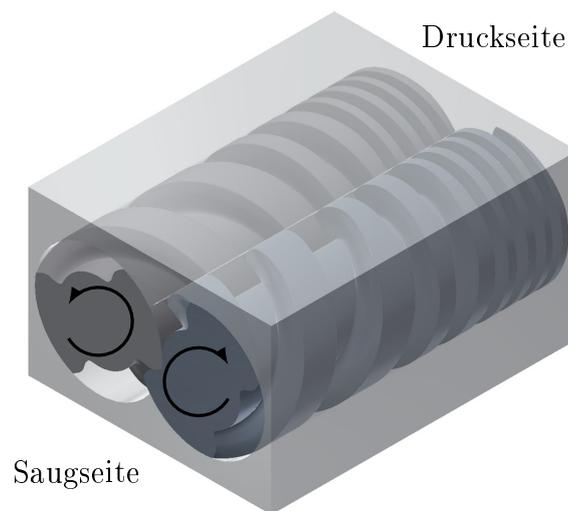


Abbildung 1.3: Geometrie einer beispielhaften Schraubenvakuumpumpe mit Zykloidenprofil, zwei Zähnen pro Rotor und variabler Steigung.

mern werden durch die Zahnlückenräume gebildet, die infolge einer Rotation der Rotoren kontinuierlich von der Saug- zur Druckseite gefördert werden. Aufgrund des symmetrischen Profils werden die Arbeitskammern getrennt auf beiden Rotorseiten ausgebildet. Üblicherweise wird ein Synchronisationsgetriebe genutzt, um eine Berührung der Rotoren zu vermeiden.

Das Arbeitsspiel wird in **Abbildung 1.4** gezeigt und unterteilt sich in die Phasen *Ansaugen*, *Transportieren/Verdichten* und *Ausschieben*. Durch die Rotation der Rotoren wird eine Arbeitskammer im Zahnlückenraum ausgebildet, die über die Stirnseite mit der Saugseite verbunden ist. Durch eine kontinuierliche Vergrößerung des Arbeitskammervolumens wird Gas in die Kammer angesaugt. Im weiteren Verlauf schließt die Arbeitskammer von der Saugseite ab und wird axial weiter in Richtung Druckseite transportiert. Das gezeigte Profil weist zusätzlich eine variable Steigung auf, wodurch eine innere Verdichtung des Gases herbeigeführt wird. Erreicht die Arbeitskammer die Druckseite, wird das Gas über die Verbindung auf der Stirnseite ausgeschoben. Das Arbeitsspiel endet, wenn das Kammervolumen null wird. Schraubenvakuumpumpen weisen keinen Schadraum auf.

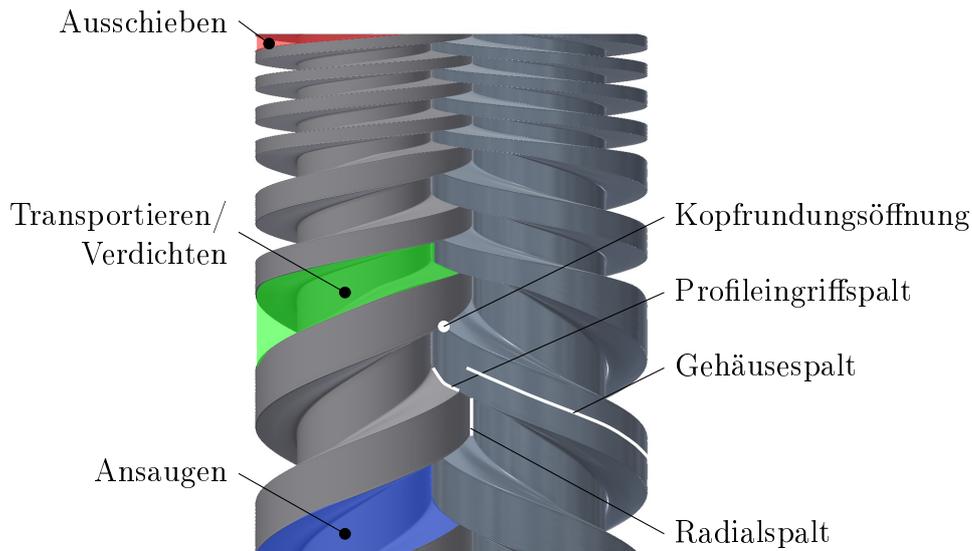


Abbildung 1.4: Kennzeichnung der drei Phasen des Arbeitsspiels sowie der geometrischen Lage der betriebsbedingten Spalte einer beispielhaften Schraubenvakuumpumpe.

Eine Rückströmung des Gases in den betriebsbedingten Spalten stellt den Hauptverlustmechanismus dieser Vakuumpumpen dar und reduziert den theoretisch geförderten Massenstrom. Spalte treten sowohl zwischen beiden Rotoren als auch zwischen Rotoren und Gehäuse auf. Abbildung 1.4 benennt die Spalte und markiert die Position auf dem Profil. Der *Gehäusespalt* vermeidet eine Berührung zwischen Rotor und Gehäuse und erstreckt sich entlang des Rotorzahnkopfes. Die Spalte der Profileingriffslinie beider Rotoren werden aufgrund ihrer geometrischen Lage weiter in *Profileingriffspalt* und *Radialspalt* unterteilt. Der *Radialspalt* befindet sich zwischen Zahnkopf und Zahnfuß und der *Profileingriffspalt* trennt beide Zahnflanken. Im Bereich der Verschneidungskante der Gehäusebohrungen wird durch das Profil der beiden Rotoren die *Kopfrundungsöffnung* gebildet.

Schraubenvakuumpumpen werden üblicherweise als Vorpumpen eingesetzt, welche gegen Atmosphärendruck verdichten. Aufgrund des großen Umschlingungswinkels und der damit einhergehenden Anzahl in Reihe geschalteter Arbeitskammern, können mit diesen Vakuumpumpen sehr große Druckverhältnisse realisiert werden. Üblicherweise liegt der Enddruck - definiert als der Ansaugdruck, bei dem die schädlichen Spaltmassenströme den durch die Kammern geförderten Massenstrom ausgleichen - dieser Bauart im Bereich $10^{-1} - 1 \text{ Pa}$. Wird zudem berücksichtigt, dass Spalthöhen in Bereichen weniger zehntel Millimeter liegen, bedeutet dies für die Bestimmung der Spaltmassenströme in Schraubenvakuumpumpen, dass Strömungen in einem großen Bereich der Gasverdünnung betrachtet werden müssen.

1.1.3 Simulation

Die Güte einer thermodynamischen Simulation des Betriebsverhaltens von trockenlaufenden Verdrängermaschinen wird maßgeblich durch die Bestimmung der Spaltmassenströme bestimmt. Mit der heute zur Verfügung stehenden Computertechnologie ist es möglich aufwendige 3D-Strömungssimulationen von trockenlaufenden Verdrängermaschinen auf Grundlage der Navier-Stokes Gleichungen durchzuführen. Die Anwendung auf Vakuumpumpen ist jedoch aufgrund der beschriebenen Problematik der Gasverdünnung nur sehr eingeschränkt möglich. Mit zunehmender Knudsenzahl muss auf andere Verfahren zurückgegriffen werden. So wird durch Dechrste und Mieussens [DM16] die Simulation einer Wälzkolbenpumpe auf Grundlage der Boltzmann-Gleichung mittels BGK-Modell beschrieben. Auf diese Weise kann die Druckverteilung in den Arbeitskammern für verschiedene Rotorstellungen bestimmt werden.

Die Auswahl des Berechnungsverfahrens für eine 3D-Strömungssimulation einer Vakuumpumpe ist abhängig vom betrachteten Druckbereich und im Allgemeinen sehr aufwendig. Aus diesem Grund hat sich die Berechnung des thermodynamischen Betriebsverhaltens auf Grundlage eines nulldimensionalen Kammer- oder Stufenmodells durchgesetzt. Die Anwendung eines solchen Kammermodells auf eine mehrstufige Klauenvakuumpumpe wird durch Ioffe et al. aufgezeigt [Iof+95], wobei die Berechnung auf Grundlage der Massen- und Energieerhaltung durchgeführt wird. Es kann gezeigt werden, dass mit einem solchen Modell die Leistungsaufnahme einer mehrstufigen Klauenvakuumpumpe abgebildet werden kann. Li et al. [Li02] wenden ein Kammermodell auf eine trockenlaufende Scroll-Pumpe an, wobei das thermodynamische Betriebsverhalten ebenfalls auf Grundlage der Massen- und Energieerhaltung berechnet wird. Sowohl für die Spalte (radial und axial) als auch für die Einlassfläche wird zur Berechnung der Massenströme die Gasverdünnung in Abhängigkeit der Knudsenzahl berücksichtigt. Der Vergleich mit experimentellen Daten zeigt, dass mit diesem Ansatz sowohl die Leistungsaufnahme als auch der drehzahlabhängige Enddruck der Vakuumpumpe berechnet werden kann. Das berechnete Saugvermögen in Abhängigkeit des Eintrittsdruckes kann ebenfalls qualitativ abgebildet werden. Su et al. [Su+96] berechnen eine Scroll-Pumpe auf Grundlage der Massenerhaltung und einer isothermen Prozessführung. Bei dieser Vakuumpumpe wird von einer berührenden Abdichtung des Axialspaltes ausgegangen. Bei der Ermittlung der Massenströme der Radialspalte wird sowohl die Gasverdünnung als auch eine bewegte Berandung berücksichtigt. Um weiterhin eine gute Abbildung des Betriebsverhaltens sicher stellen zu können, wird zudem die Druckverteilung entlang der Kammer berücksichtigt, die sich durch eine Rückströmung der Spaltmassenströme ergibt. Ein Vergleich des simulierten und gemessenen Enddrucks der Vakuumpumpe zeigt noch Abweichungen. Mithilfe der Simulation kann gezeigt werden, dass der Enddruck sehr stark von der thermischen Ausdehnung der Vakuumpumpe und somit den Spalthöhen abhängt, was zu den relevanten Fehlerquellen zählen kann. Die

Simulation einer Schraubenvakuumpumpe wird durch Ohbayashi et al. beschrieben [Ohb+99]. Die Geometrie des Gehäuse- und Profileingriffspaltes wird durch eine Überlagerung unterschiedlicher Elementargeometrien abgebildet, um so die Spaltmassenströme berechnen zu können. Weiterhin wird eine bewegte Berandung berücksichtigt. Unter Annahme einer isothermen Prozessführung kann so das Saugvermögen in Abhängigkeit des Eintrittsdruckes bestimmt werden und ein Vergleich mit Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung. Der drehzahlabhängige Enddruck der Maschine kann ebenfalls gut abgebildet werden. Rohe [Roh05] nutzt ebenfalls ein Stufenmodell, um das vom Eintrittsdruck abhängige Saugvermögen und den drehzahlabhängigen Enddruck zu berechnen. Zur Bestimmung der Spaltmassenströme nutzt Rohe zunächst einen einfachen analytischen Ansatz der Blendenströmung, der jedoch nur unzureichende Ergebnisse liefert. Zur Verbesserung der Abbildung einer verdünnten Spaltströmung nutzt Rohe die durch Wenderott [Wen01] erstellte Messdatenbasis. Wenderott ermittelt für verschiedene Spaltkonturformen den vom Eintrittsdruck abhängigen Spaltmassenstrom im Bereich der Kontinuumsströmung bis zur freien molekularen Strömung. Pfaller [Pfa12] nutzt diesen Ansatz, um Schraubenvakuumpumpen mit einer variablen Steigung zu berechnen. Die Kombination mit einem evolutionären Optimierungsverfahren ermöglicht die Ermittlung optimaler Steigungsverläufe.

Ein allgemeines Kammermodellverfahren zur Berechnung beliebiger Verdrängermaschinen ist am *Fachgebiet Fluidtechnik* der *Technischen Universität Dortmund* entwickelt worden (*KaSim*). Die objektorientierte Modellierungsmethode wird durch Janicki [Jan07] beschrieben, bei welcher eine beliebige Verdrängermaschine durch Abstraktion in Kapazitäten und Verbindungen aufgeteilt und das thermodynamische Betriebsverhalten auf Grundlage der Massen- und Energieerhaltung berechnet werden kann. Kapazitäten können Arbeitskammern, Wärmekapazitäten oder mechanische Kapazitäten darstellen. Verbindungen stellen dabei die Interaktion dieser Kapazitäten in Form von Spalten, Wärmeübergängen oder Kraftangriffsflächen dar. Durch die Nutzung eines Zeitschrittverfahrens kann die Methode auch zur Simulation instationärer Vorgänge genutzt werden. *KaSim* ist insbesondere auch dazu geeignet Verdrängervakuumpumpen zu simulieren. Die durch Wenderott [Wen01] erstellte Messdatenbasis kann genutzt werden, um verdünnte Spaltströmungen ohne bewegte Berandung abzubilden. Stratmann [Str10] greift die durch Wenderott untersuchten Geometrien auf und ermittelt den Durchfluss mithilfe der Testpartikel-Methode, die nur Gültigkeit für eine molekulare Strömung besitzt. Hierbei wird auch die bewegte Berandung berücksichtigt. Unter der Annahme, dass die bewegte Berandung im Kontinuum keinen Einfluss auf den Durchfluss besitzt, schlägt Stratmann [Str10] zudem eine Interpolationsvorschrift für den Bereich der Schlupf- und Übergangsströmung vor. Weiterhin untersucht Stratmann [Str10] den Effekt der Sorption und Desorption, der insbesondere für Verdrängervakuumpumpen im Feinvakuum eine Rolle spielt. Die vorgeschlagenen Modelle werden am Beispiel einer Wälzkolbenvakuumpumpe und einer Schraubenvakuumpumpe

pe validiert. Nadler [Nad17] nutzt zur Abbildung der Spaltströmung das Modell nach Sharipov [SS98]. Sharipov bestimmt den Massenstrom einer Kanalströmung mithilfe der linearisierten Boltzmann-Gleichung und das BGK-Modell. Nadler diskutiert auch den Einfluss einer thermischen Kriechströmung. Die Validierung wird anhand einer trockenlaufenden Schraubenmaschine im Blower-Betrieb durchgeführt. Um den Einfluss des Wärmeübergangs auf das thermische Betriebsverhalten beurteilen zu können, werden durch Rohe [Roh05] Wärmeübergangsmodelle vorgeschlagen, wobei eine von der Gasverdünnung abhängige Wärmeleitung des Gases berücksichtigt wird. Die Modelle werden anhand einer Schraubenvakuumpumpe validiert. Sowohl Rohe [Roh05] als auch Nadler [Nad17] nutzen diese Modelle, um eine gekoppelte thermodynamische und thermische Rechnung der jeweiligen betrachteten Vakuumpumpe durchzuführen. Die durch die thermodynamische Berechnung ermittelten Wärmeströme werden dabei für eine transiente strukturmechanische Simulation der Bauteile genutzt. Hieraus ergeben sich eine geänderte Temperaturverteilung und Spalthöhensituation, die für eine erneute thermodynamische Simulation genutzt werden können.

1.2 Spaltströmung in Vakuumpumpen

Die gegebene Übersicht zu den Simulationen trockenlaufender Vakuumpumpen zeigt, dass die Bestimmung der Spaltmassenströme eine wichtige Rolle spielt. Zur Abbildung der Spaltströmungen existieren vielfältige Ansätze. Je nach Komplexität des Modells reichen diese von einfachen theoretischen Ansätzen über vollständige mehrdimensionale Simulationen der Strömung bis hin zu umfangreichen Messdatenbasen. Allgemein kann festgestellt werden, dass alle Spalte Verbindungen zwischen Arbeitskammern herstellen und die Spaltmassenströme das Betriebsverhalten der Vakuumpumpen maßgeblich beeinflussen [Str10]. Eine Strömung in Spalten von Vakuumpumpen kann durch verschiedene Wirkmechanismen erzeugt werden, welche nachfolgend aufgelistet werden.

- Die über Spalte miteinander verbundenen Arbeitskammern weisen in der Regel unterschiedliche Drücke auf. Durch den Druckgradienten wird eine Strömung erzeugt, die nach einem französischen Physiker als **Poiseuille-Strömung** benannt wird.
- Durch die Rotation der Rotoren weisen die Berandungen der Spalte unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten auf. Hierdurch wird eine Scherströmung erzeugt, die nach einem französischen Physiker auch als **Couette-Strömung** bezeichnet wird.
- Arbeitskammern können zudem unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Dies verursacht auch eine Temperaturverteilung in den Bauteilen. Durch einen Temperaturgradienten im Gas wird ebenfalls eine Strömung induziert, die als **ther-**

mische Kriechströmung bezeichnet wird.

Die durch einen Konzentrationsunterschied einer Gasmischung hervorgerufene Strömung soll nicht berücksichtigt werden, da von einer homogenen Mischung in allen Arbeitskammern ausgegangen wird. Im Folgenden wird der Stand der Wissenschaft zu verdünnten Spaltströmungen dargelegt. Zunächst wird eine Übersicht über die Methoden zur Berechnung der Strömung gegeben. Anschließend wird auf die oben genannten drei Wirkmechanismen eingegangen.

1.3 Stand der Wissenschaft

1.3.1 Methoden zur Berechnung von Spaltströmungen

Die Strömung in Vakuumsystemen durch Spalte, Kanäle und Rohre erreicht aufgrund der niedrigen Drücke hohe Knudsenzahlen. Die Betrachtung einer verdünnten Strömung im atmosphärischen Druckbereich kann auch durch sehr kleine geometrische Abmaße erforderlich werden. So kann bei hydrodynamischen Lagern die Schmierfilmdicke des Gases so gering sein, dass eine verdünnte Strömung betrachtet werden muss [Bur58]. In der jüngeren Vergangenheit hat sich durch eine starke Weiterentwicklung von Elektro-Mechanischen-Mikrosystemen MEMS (englisch: Microelectromechanical Systems) ein weiteres großes Anwendungsgebiet ergeben [KBA05]. Insbesondere Prozesse der Strömungs- und Wärmeübertragung spielen in diesen Systemen eine Rolle. Zu den experimentellen Pionierarbeiten zählen die Untersuchungen durch Knudsen [Knu09]. Zu dieser Zeit war bereits bekannt, dass das Hagen-Poiseuille-Gesetz mit zunehmender Gasverdünnung seine Gültigkeit verliert. Knudsen nutzt hierbei einen geeigneten Versuchsaufbau, um den Durchfluss durch Glasrohre für verschiedene Druckbereiche und Gasarten zu bestimmen. Seither ist die Bestimmung der Strömung in Abhängigkeit der nach Knudsen benannten dimensionslosen Kennzahl, der Knudsenzahl, Gegenstand vieler theoretischen und experimentellen Untersuchungen.

Die Literatur bietet unterschiedliche Methoden zur Abbildung verdünnter Strömungen. In der Kontinuumsströmung wird die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen unter Einhaltung einer Haftbedingung zwischen Gas und Wand genutzt, was mit zunehmender Knudsenzahl jedoch keine gute Näherung mehr darstellt. Im Bereich der Schlupfströmung kommt es zu einem nennenswerten Geschwindigkeitsschlupf und Temperatursprung zwischen Gas und Wand. Die Knudsenrenzschicht nimmt zunehmend einen größeren Bereich des Strömungsquerschnitts ein. Zur Abbildung des Geschwindigkeitsschlupfes und des Temperatursprungs existieren Modelle, welche als Randbedingung zur Berechnung der Strömung mittels Navier-Stokes-Gleichungen genutzt werden. Es existieren Modelle erster und höherer Ordnung [KBA05], wobei höhere Ordnungen das Knudsenminimum abbilden sollen. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass im Bereich der Übergangsströmung die Navier-Stokes-Gleichungen an Gültigkeit verlieren. In diesem

Bereich muss auf die Boltzmann-Gleichung zur Ermittlung der Strömungsvorgänge zurückgegriffen werden, die das Gas auf Molekülebene beschreibt [Bir94; She05]. Die Lösung dieser Integro-Differentialgleichung wird durch den intermolekularen Kollisionsterm der rechten Seite erschwert, sodass zunächst nur Lösungen für Grenzfälle, wie der molekulare Strömung, oder anderen Vereinfachungen existieren. Im Allgemeinen werden die Verfahren zur Lösung der Boltzmann-Gleichung in deterministische und nicht-deterministische Methoden eingeteilt [Jou10a]. Weiterhin finden sich in der Literatur Ansätze zu Bestimmung der Strömung mithilfe eindimensionaler Methoden. Nachfolgend wird der Stand der Wissenschaft dieser drei Methoden beschrieben.

Zu den deterministischen Methoden gehört die linearisierte Boltzmann-Gleichung [Jou10a], die häufig zur Berechnung der verdünnten Strömung bei kleinen Störungen von der Gleichgewichtsverteilung (Maxwell-Boltzmann Verteilung) genutzt wird [Sha16]. Um den numerischen Aufwand weiter zu reduzieren, wird der intermolekulare Kollisionsterm durch eine geeignete Modellgleichung ersetzt [Jou10a]. Eine mögliche Modellgleichung ist beispielsweise das Bhatnagar-Gross-Krook Modell (BGK-Modell) [BGK54]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass durch die intermolekulare Wechselwirkung eine beliebige Verteilungsdichtefunktion eine Relaxation zur Maxwell-Boltzmann-Verteilung beschreibt [Hä04]. Dieses Modell besitzt Gültigkeit, wenn es sich um schwache Störungen von der Maxwell-Boltzmann-Verteilung handelt. Weiterhin werden Randbedingungen für die Interaktion zwischen Molekül und Wand benötigt. Eine Möglichkeit bietet das Maxwell-Modell [Bir94], das davon ausgeht, dass ein Teil der Moleküle bei der Kollision mit einer Wand vollständig diffus und ein Teil spiegelnd reflektiert werden. Der Akkomodationskoeffizient gibt dabei den Anteil der diffus reflektierten Moleküle an. Die genannten Modelle sind in Kombination mit einem numerischen Verfahren dazu geeignet, Strömungsvorgänge im verdünnten Bereich berechnen zu können.

Cercignani und Daneri [CD63] berechnen mithilfe der linearisierten Boltzmann-Gleichung mit dem BGK-Modell den Massenstrom einer druckgetriebenen Strömung zwischen zwei parallelen Platten. Das Verfahren besitzt Gültigkeit für kleine Druckgradienten, wie sie für große Spaltlängen auftreten. Ein Vergleich mit Messungen zeigt, dass diese Methode den Knudsenzahlabhängigen Massenstrom abbilden kann. Loyalka und Hamoodi [LH90] nutzen die linearisierte Boltzmann-Gleichung, um die druckgetriebene Strömung in einem Rohr zu berechnen. Ein Vergleich mit den durch Knudsen ermittelten Massenströmen [Knu09] zeigt, dass die Methode das Knudsenminimum abbilden kann. Ein bekanntes Problem des BGK-Modells ist eine fehlerhafte Abbildung der Prandtl-Zahl $Pr = 1$, die bei der Betrachtung eines Hartkugelmodells jedoch $Pr = 2/3$ beträgt [Bir94]. Aus diesem Grund wird durch Shakhov als weitere Modellgleichung das S-Modell vorgeschlagen [Sha68], das eine korrekte Abbildung der Prandtl-Zahl liefert. Sharipov nutzt das Modell in Kombination mit der linearisierten Boltzmann-Gleichung

zur Berechnung der knudsenzahlabhängigen druck- und temperaturgetriebenen Massenströme in einem Rohr [Sha96].

Das durch Cercignani, Lampis und Lord entwickelte Modell (CLL-Modell) greift die Modellierung der Interaktion zwischen Molekül und Wand auf [CL71], [Lor91]. Hierbei werden die tangentialen und die normale Molekülgeschwindigkeitskomponenten unabhängig voneinander betrachtet. Der tangentielle Akkomodationskoeffizient beschreibt den Anteil der diffus reflektierten Moleküle in tangentialer Richtung und der normale Akkomodationskoeffizient den Anteil der diffus reflektierten Moleküle in normaler Richtung. Auf diese Weise kann die kombinierte Betrachtung von Reibung und Wärmeübergang einer Strömung an der Wand verbessert werden. Sharipov nutzt dieses Modell zur Berechnung der Strömung zwischen zwei Platten für verschiedene Akkomodationskoeffizienten mithilfe der linearisierten Boltzmann-Gleichung und dem S-Modell [Sha02].

Die DSMC-Methode (Direct Simulation Monte Carlo) stellt ein statistisches Verfahren zur Lösung der Boltzmann-Gleichung dar und gehört zu der Gruppe der nicht-deterministischen Verfahren [Bir94]. Eine genauere Beschreibung der Methode, welche auf der Betrachtung von Teilchen basiert, folgt in Kapitel 4. Piekos und Breuer [PB95] berechnen mit der DSMC-Methode den Druckverlauf des planparallelen Spaltes und den Mach-Zahl Verlauf einer Laval-Düse. Das statistische Verfahren zur Bestimmung der Teilchenbewegungen macht es notwendig, dass lange Mittelungsintervalle bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten gewählt werden müssen. Um dem Problem der daraus resultierenden langen Rechenzeiten zu begegnen, kann die durch Fan und Shen [FS01] entwickelte IP-Methode (Information Preservation method) genutzt werden. Hierbei wird für jedes Teilchen neben der Teilchengeschwindigkeit eine Informationsgeschwindigkeit gespeichert, mit der die makroskopischen Größen berechnet werden.

Für die Berechnung von hydrodynamischen Lagern wird durch Fukui und Kaneko [FK87], [FK88] und [FK90] die generalisierte Reynoldsgleichung genutzt. Hierbei wird von einer Superposition aus Poiseuille-, Couette- und thermischer Kriechströmung ausgegangen, wobei der Massenstrom der elementaren Strömungen unabhängig voneinander über einen weiten Bereich der Gasverdünnung bestimmt wird. Das Ziel besteht darin, den Druckverlauf und somit die Tragfähigkeit der hydrodynamischen Lager zu bestimmen. Sowohl Fukui und Kaneko [FK87] als auch Cercignani et al. [CLL05] bestimmen den Poiseuille-Massenstrom mithilfe der linearisierten Boltzmann-Gleichung für verschiedene Akkomodationskoeffizienten. Alexander et al. [AGA94] nutzen die DSMC-Methode zur Berechnung eines hydrodynamischen Lagers, wobei die Ergebnisse mit den Ergebnissen der Theorie nach Fukui und Kaneko [FK87] eine gute Übereinstimmung aufweisen. Bahukudumbi und Beskok [BB03] nutzen eine Schlupfrandbedingung höherer Ordnung zur Bestimmung der Strömung in einem hydrodynamischen Lager, wobei auch dieses Modell eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen von Alex-

ander et al. [AGA94] und auch Fukui et al. [FK87] besitzt. Zahid et al. [ZYZ07] untersuchen die kombinierte Couette-Poiseuille-Strömung, bei der, im Gegensatz zu der Strömung in hydrodynamischen Lagern, ein Druckverhältnis über den Spalt anliegt. Hierbei werden die Navier-Stokes Gleichungen mit einer Schlupfrandbedingung genutzt, um die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung einer mäßig verdünnten Strömung zu berechnen. Sharipov et al. [SFZ05] nutzen die Berechnung einer kombinierten Couette-Poiseuille-Strömung zur Berechnung des Betriebsverhaltens einer Holweck-Pumpe.

Die Literatur bietet weitere Methoden zur Berechnung der verdünnten Strömung in Spalten, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt werden sollen. Einen guten Überblick bietet die Arbeit von Sharipov und Seleznev [SS98]. Nachfolgend wird der Stand der Wissenschaft bezüglich der elementaren Strömungsprobleme der Poiseuille-Strömung, der Couette-Strömung und der thermischen Kriechströmung beschrieben.

1.3.2 Untersuchungen zu elementaren Strömungsproblemen

Poiseuille-Strömung:

Die Lösung der linearisierten Boltzmann-Gleichung in Kombination mit einem geeigneten numerischen Verfahren ist Grundlage vieler theoretischer Untersuchungen zur Poiseuille-Strömung, bei welcher der Durchfluss zwischen zwei parallelen Platten in Abhängigkeit der Knudsen-Zahl bestimmt wird [CD63]. Loyalka et al. [LPS79] berechnen den Massenstrom zwischen zwei Platten für unterschiedliche Akkomodationskoeffizienten des Maxwell-Modells. Cercignani et al. [CLL04] betrachten die Strömung zwischen zwei parallelen Platten, bei der die Platten unterschiedliche Akkomodationskoeffizienten besitzen. Sharipov nutzt die linearisierte Boltzmann-Gleichung zur Ermittlung des Durchflusses bei Kanälen mit endlicher Breite [Sha99b]. Fukui und Kaneko [FK90] nutzen ebenfalls die linearisierte Boltzmann-Gleichung zur Bestimmung des Poiseuille-Massenstroms. Ziel ist die Erstellung einer Datenbank zur Berechnung von hydrodynamischen Lagern. Kosuge und Takata [KT08] erstellen auf Grundlage von Simulationen mit der linearisierten Boltzmann-Gleichung eine Datenbank für die Poiseuille-Strömung, die auch Gasgemische und verschiedene Modelle der intermolekularen Wechselwirkung berücksichtigt. Hierbei wird auch der Fall einer Strömung, die durch einen Konzentrationsunterschied der Gasmischung hervorgerufen wird, abgedeckt.

Mit steigenden Möglichkeiten der Computertechnologie wird auch die DSMC-Methode zunehmend zur Simulation einer Poiseuille-Strömung genutzt. Ikegawa und Kobayashi [IK90] simulieren mit einem 2-dimensionalen Solver die Strömung zwischen zwei parallelen Platten und erzielen eine sehr gute Übereinstimmung verglichen mit den Ergebnissen der linearisierten Boltzmann-Gleichung und Messungen. Xue et al. [XFS00]

und Wang und Li [WL04] zeigen Simulationsergebnisse des Geschwindigkeitsprofils und des Druckverlaufes in Strömungsrichtung für die Strömung zwischen zwei Platten, die mit der DSMC-Methode ermittelt werden. Chong [Cho06] untersucht zudem Platten endlicher Länge und zeigt den Massenstrom in Abhängigkeit des Druckverhältnisses. Weitere Geometrien werden durch Wang und Li [WL04] untersucht, die eine Blende und eine Kanalströmung mit 90° Winkel betrachten. Wu und Tseng [WT01] simulieren eine Laval Düse und einen Kanal mit mehreren Ein- und Austritten. Gegenstand der Untersuchungen ist hier der vom Druckverhältnis abhängige Massenstrom.

Eine theoretische Untersuchung zum Gehäusespalt in Schraubenvakuumpumpen unter Berücksichtigung eines Wärmeübergangs wird durch Müller [Mü13] durchgeführt. Hierbei wird ein eindimensionales Modell auf Grundlage einer kompressiblen Strömung in Spalten mit konstantem Querschnitt beschrieben. Zur Abbildung der Reibung werden Reibbeiwerte ermittelt. Diese berücksichtigen auch Einlaufverluste und den Effekt der Gasverdünnung. Weiterhin kann mit dem Modell der Wärmeübergang auf Grundlage einer inkompressiblen Strömung ermittelt werden. Das vorgeschlagene Modell validiert Müller anhand der planparallelen Spaltkontur nach Wenderott [Wen01]. Gemessene Massen- und Wärmeströme stimmen dabei gut mit dem beschriebenen Modell überein.

Neben theoretischen Untersuchungen zur Poiseuille-Strömung existiert eine Vielzahl experimenteller Arbeiten. Harley et al. [Har+95] ermitteln mit einem geeigneten Versuchsaufbau die Poiseuille-Zahl eines Kanals mit trapezförmigen Querschnitt für Stickstoff, Helium und Argon. Die experimentellen Ergebnisse werden mit den Ergebnissen einer eindimensionalen Theorie verglichen. Turner et al. [Tur+04] ermitteln ebenfalls die Poiseuille-Zahl eines Kanals mit rechteckigem Querschnitt. Die Messergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit der analytischen Lösung für eine inkompressible Strömung bei kleinen Reynolds- und Knudsenzahlen. Weiterhin wird der Einfluss der Oberflächenrauheit diskutiert. Ewart et al. [Ewa+07] untersuchen experimentell die Strömung von Helium in einem Kanal. Der Massenstrom wird mit Hilfe der Druckanstiegsmessung in einem Behälter für verschiedene Knudsenzahlen und Druckverhältnisse ermittelt. Bei dieser Methode können Messfehler entstehen, wenn die Zustandsänderung bei der Ermittlung des Druckanstiegs nicht isotherm verläuft. Um diesem Problem zu begegnen, entwickelt Arkilic [ASB97], [Ark97] eine Zwei-Tank Methode, mit welcher der auftretende Messfehler durch einen nicht-isothermen Druckanstieg um mehrere Ordnungen verringert werden kann. Varoutis et al. [Var+09] bestimmen experimentell die Massenströme bei Kanälen mit unterschiedlichen Querschnitten. Veltzke [Vel13] gibt eine gute Übersicht zu den experimentellen Arbeiten auf dem Gebiet der verdünnten Poiseuille-Strömung in Kanälen mit konstantem Querschnitt. Durch Veltzke [Vel13] und Hemadri et al. [Hem+16] wird erstmals der Einfluss eines in strömungsrichtung variablen Querschnitts auf den knudsenzahlabhängigen Massenstrom ermit-

telt. Die experimentelle Untersuchung von Spaltströmungen mit dem direkten Ziel der Übertragung auf Vakuumpumpen wird durch Wenderott beschrieben [Wen01]. Anhand der Verdrängergeometrie kategorisiert Wenderott verschiedene Spaltkonturen, für die experimentell in Abhängigkeit der Knudsenzahl, der Spalthöhe und dem anliegenden Druckverhältnis der Massenstrom bestimmt wird. Die so entstandene Datenbank kann mit Hilfe einer Ähnlichkeitsbetrachtung verallgemeinert werden.

Couette-Strömung:

Der Ansatz der linearisierten Boltzmann-Gleichung wird ebenfalls zur Bestimmung der verdünnten Couette-Strömung genutzt. Sone et al. [STO90] bestimmen die Geschwindigkeitsprofile sowie die Scherspannung der ebenen Couette-Strömung in Abhängigkeit der Knudsenzahl. Sowohl Li [Li02] als auch Cercignani et al. [CLL06] untersuchen die ebene Couette-Strömung mit unterschiedlichen Akkomodationskoeffizienten der oberen und unteren Berandung. Sharipov et al. [SCK04] bestimmen die Scherspannung der ebenen Couette-Strömung für Gasgemische aus Edelgasen.

Boulon et al. [BMT99] untersuchen die ebene Couette-Strömung mithilfe der DSMC-Methode in einem Kanal. Hierbei werden die Geschwindigkeitsprofile an verschiedenen Positionen des Kanals in Abhängigkeit der Knudsenzahl gezeigt. Bao et al. [BLS06] berechnen mithilfe der DSMC-Methode den knudsenzahlabhängigen Geschwindigkeits-schlupf und Temperatursprung einer ebenen Couette-Strömung. Die Ergebnisse werden mit weiteren theoretischen Ergebnissen verglichen. White [Whi13] untersucht die zylindrische Couette-Strömung bei unterschiedlichen Akkomodationskoeffizienten mithilfe der DSMC-Methode.

Experimentelle Untersuchungen einer Couette-Strömung sind häufig im Zusammenhang mit der Bestimmung des tangentialen Akkomodationskoeffizienten zu finden. Hierbei findet das Rotorviskositätsmessgerät Anwendung, mit dem die Scherspannung der zylindrischen Couette-Strömung gemessen werden kann [Kuh49]. Hieraus können Größen, wie die Viskosität und der tangentielle Akkomodationskoeffizient, abgeleitet werden [GLS96].

thermische Kriechströmung:

Die linearisierte Boltzmann-Gleichung und das BGK-Modell werden durch Kanki und Iuchi [KI73] genutzt, um den Massenstrom einer thermischen Kriechströmung zwischen ebenen Platten zu bestimmen. Weiterhin wird die Relevanz der thermischen Kriechströmung im Vergleich zur Poiseuille-Strömung herausgestellt. Dabei zeigt sich ein deutlicher Einfluss im Bereich großer Knudsenzahlen. Loyalka et al. [LPS79] betrachten ebenfalls zwei ebene Platten, wobei auch der Akkomodationskoeffizient der Berandung variiert wird. Die im Kapitel der Poiseuille-Strömung genannte Datenbank von Kosuge und Takata [KT08] erstreckt sich auch auf die Untersuchung der thermischen Kriechströmung bei Gasgemischen. Aufgrund der nicht korrekten Abbildung der

Prandtl-Zahl bei der Verwendung des BGK-Modells wendet Sharipov das S-Modell auf die thermische Kriechströmung an. Hierbei wird sowohl eine Rohrströmung unter Variation des Akkomodationskoeffizienten betrachtet [Sha96], als auch die Kanalströmung für verschiedene Querschnittsverhältnisse [Sha99a]. Sharipov wendet das CLL-Modell zudem auf eine Rohrströmung [Sha03b] als auch auf die Strömung zwischen parallelen Platten an [Sha02].

Die Messung einer thermischen Kriechströmung von Gasgemischen in einem Rohr wird durch Huang et al. [Hua+99] durchgeführt. Hierbei wird das thermomolekulare Druckverhältnis bestimmt, welches zwischen zwei miteinander verbundenen Behältern unterschiedlicher Temperatur entsteht. Yamaguchi et al. [Yam+14] vermessen das thermomolekulare Druckverhältnis für eine Kanalströmung und unterschiedliche Gase. Der Messaufbau kann zudem genutzt werden, um den Massenstrom einer thermischen Kriechströmung mit identischen Drücken in beiden Behältern zu bestimmen [Yam+16].

Kapitel 2

Zielsetzung und Vorgehensweise

Der in Kapitel 1.3 vorgestellte Stand der Wissenschaft zu verdünnten Strömungen in Spalten zeigt, dass eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen in diesem Bereich existieren. Ein Großteil der vorgestellten Arbeiten legen die Grundlage rein theoretischer Betrachtungen oder setzen den Fokus auf verschiedene ingenieurstechnische Anwendungsgebiete. Nur ein kleiner Teil der Arbeiten deckt den Bereich der Spaltströmungen in Vakuumpumpen ab. Primäres Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Validierung eines Strömungsmodells, das prinzipiell in ein Kammermodellverfahren implementiert werden kann. Darüber hinaus bietet die Literatur für das gesuchte Strömungsmodell eine Reihe geeigneter Ansätze. Ein wichtiges Kriterium stellt eine geringe Rechenzeit dar, da innerhalb eines Kammermodellverfahrens eine Vielzahl von Spaltverbindungen berechnet werden müssen. Aufwändige mehrdimensionale numerische Verfahren (z.B. DSMC-Methode, linearisierte Boltzmann-Gleichung) können zu diesem Zweck nicht genutzt werden. Weiterhin muss es sich um ein numerisch robustes Verfahren handeln, um eine stabile Simulation einer Vakuumpumpe gewährleisten zu können. Das Strömungsmodell soll zudem alle drei in Kapitel 1.2 genannten Wirkmechanismen der Erzeugung einer Spaltströmung berücksichtigen. Das Modell soll dazu genutzt werden können, die Strömung im Bereich der Schlupfströmung, der Übergangsströmung, bis hin zur freien Molekularströmung abzubilden. Weiterhin sollen verschiedene Spaltgeometrien untersucht werden können, was auch einen veränderlichen Querschnitt in Strömungsrichtung beinhaltet.

Um das Ziel der Erstellung eines geeigneten Strömungsmodells zur Abbildung der Strömung in Spalten von Vakuumpumpen erreichen zu können, sollen zunächst die Grundlagen für die Berechnung einer Strömung im verdünnten Bereich erläutert werden (Kapitel 3). Da ein großer Bereich der Gasverdünnung behandelt werden muss, werden neben den Erhaltungsgleichungen der Kontinuumsmechanik die Grundlagen der kinetischen Gastheorie benötigt. Um die Eignung der verschiedenen Strömungsmodelle einschätzen zu können, wird eine Dimensionsanalyse zur Identifizierung aller für die Strömung

wichtigen Kennzahlen durchgeführt. Am Beispiel einer Schraubenvakuumpumpe wird der relevante Wertebereich der Kennzahlen abgeschätzt.

Um Strömungsgrößen im Spalt berechnen zu können, sollen Simulationen mithilfe der DSMC-Methode durchgeführt werden. Diese vielfach validierte Methode zur Simulation verdünnter Strömungen soll dabei behilflich sein ein tieferes Verständnis der an der Strömung relevanten Wirkmechanismen zu erhalten. Die Methode basiert auf einer teilchenorientierten Modellierung der Gasströmung und ist über den gesamten Bereich der Knudsenzahl gültig. Die Grundlagen der Methode und aller beteiligten Modelle werden in Kapitel 4 beschrieben.

Das ausgewählte Strömungsmodell wird in Kapitel 5 beschrieben, welches grundlegend auf eine eindimensionale Theorie nach Fukui und Kaneko [FK87], [FK88], [FK90] und Sharipov [Sha16] zurückgeht.

Ein wichtiger Kernpunkt der Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der verdünnten Spaltströmung (Kapitel 6). Hierbei wird in einem ersten Schritt das Spaltmodell nach Wenderott [Wen01] und das Messverfahren beschrieben, für das experimentelle Untersuchungen der Poiseuille-Strömung durchgeführt werden. In der Literatur finden sich keine experimentellen Untersuchungen einer kombinierten Couette-Poiseuille-Strömung, für die weiterhin ein geeigneter Versuchsaufbau beschrieben wird.

Die umfangreiche Validierung der DSMC-Methode und der eindimensionalen Theorie wird in Kapitel 7 beschrieben. Es werden systematisch alle identifizierten Kennzahlen im Rahmen der experimentellen Möglichkeiten variiert und umfangreich analysiert. Im Fokus steht neben der Poiseuille-Strömung die Untersuchung der kombinierten Couette-Poiseuille-Strömung. Kennzahlen, die nicht mithilfe der beschriebenen Versuchsmodelle variiert werden können, werden nach Möglichkeit mit experimentellen Ergebnissen aus der Literatur validiert.

Um in einen letzten Schritt die Basis zur Implementierung der eindimensionalen Theorie in ein Kammermodellverfahren zu legen, werden die Grenzen der Modellierung durch eine weitere systematische Variation der Kennzahlen untersucht (Kapitel 8). Aufgrund der Einschränkungen eines experimentellen Aufbaus werden hier die Ergebnisse der eindimensionalen Theorie mit den Ergebnissen der DSMC-Methode verglichen. Weiterhin werden die einschränkenden Annahmen der eindimensionalen Theorie untersucht, um so zusätzlich das Potential zur Verbesserung des Modells im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte herauszuarbeiten.