

# Spaltproblematik in Schraubenspindel-Vakuumpumpen

## Problems of clearances in spindle vacuum pumps

Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dipl.-Ing. D. Wenderott, Dortmund

(Diese Arbeit wird durch die freundliche Unterstützung der VDMA - Fachgemeinschaft Kompressoren und Vakuumpumpen gefördert)

### Zusammenfassung

Die Schraubenspindel-Vakuumpumpe gehört wie die Schraubenmaschine zu den Verdrängermaschinen der Drehkolbenbauart. Dabei grenzt sie sich jedoch durch charakteristische Merkmale ihrer Rotorgeometrie von der Schraubenmaschine ab. Die Schraubenspindel-Vakuumpumpe dient als Beispiel zur grundlegenden Erörterung der Probleme, die bei der Dimensionierung funktionsbedingter Spalthöhen und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die thermodynamischen Eigenschaften und die Betriebssicherheit auftreten. Der beschriebene Lösungsansatz weist auf die Abhängigkeit der Güte von Ergebnissen aus Finite-Elemente-Rechnungen von den zugrunde gelegten Randbedingungen hin und leitet hieraus eine Notwendigkeit zur numerischen Simulation der Prozeßführung ab. Grundlage hierfür ist ein *Basisprogramm*, das sich durch geringfügige Adaptionen beliebiger Verdrängergeometrien und Prozeßparameter eignet, probate Randbedingungen für Finite-Elemente-Rechnungen zu bestimmen. Der Lösungsweg zur Generierung eines derartigen Basisprogramms führt dabei von der Kategorisierung der Spaltformen über die Messung von Leitwerten an ebenen Spaltabschnitten (Untersuchung der Spaltkontur) zur Messung von Leitwerten an bewegten Spaltberandungen (Einfluß der Relativbewegung). Die Meßwerte bilden die Basis für die Quantifizierung von Spaltmassenströmen in Programmmodulen für verschiedene Strömungsarten, die in Ihrer Gesamtheit das Basisprogramm bilden.

### Abstract

The spindle vacuum pump belongs to the class of positive displacement pumps - like the better known screw-type machine. But there are a few differences by the characteristic geometry of rotors. The spindle vacuum pump is used to describe the problem of dimensioning the height of clearances and the resulting influences to the thermodynamic process and the function-reliability. The discussed solution remembers to the functional relationship between the quality of finite-element-calculations and the thermal boundary conditions, they are based on. This leads to the need of numerical simulation of the thermodynamic process

in such pumps. This is the task of a *basis program*, which can be easily adapted for different geometrical and thermodynamic parameters. The described approach to generate this basis programm starts with the classification of clearances by aspects of form and contour. The next steps are the measurements of the conductance of plane clearances and of clearances with moving walls. On these measurements the quantification of inner leakage in different states of flow are based and they are implemented in the basis program.

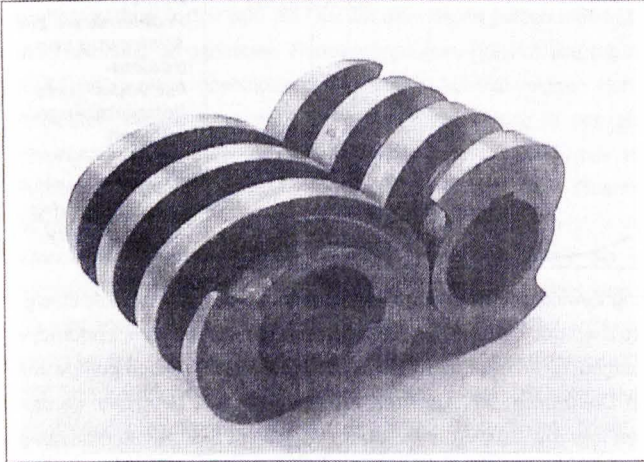
## 1 Einleitung

Die bedeutenden vakuumtechnischen Fortschritte der beiden letzten Jahrzehnte sind in hohem Maße auf die gesteigerten technischen Ansprüche an das Vakuum aufgrund der vorgesehenen Einsatzbereiche zurückzuführen. Die Erfüllung dieser Ansprüche ist heute keineswegs abgeschlossen, [1]. So stellt die Reinheit des Vakuums für viele empfindliche Prozesse und Anwendungen, z.B. bei der Halbleiterfertigung, der Metallurgie oder der chemischen Verfahrenstechnik sowie der Forschung und Entwicklung eine unverzichtbare Voraussetzung dar [2], [3], [4], [5], d.h. es wird ein sauberes Vakuum mit geringst möglicher Kontamination durch Fremd- bzw. Hilfsstoffe gefordert. Mit Hilfsstoffen betriebene z.B. ölgedichtete Rotationsverdränger-Vakuumpumpen können diesen Ansprüchen nur mit erheblichem konstruktiven und anlagentechnischen Aufwand in Maßen genügen. Die Forderung nach einem „sauberen Vakuum“ ist somit primär mit der Forderung nach trockenlaufenden Vakuumpumpen gleichzusetzen. Am Beispiel eines typischen Vertreters der Rotationsverdränger in Drehkolbenbauart, der Schraubenspindel-Vakuumpumpe, orientiert sich die hier im weiteren dargestellte Spaltproblematik.

Folgende charakteristische Merkmale dieses Maschinentyps stellen wesentliche Unterschiede zu der bekannteren Schraubenmaschine dar:

- Die Arbeitskammern lassen sich geometrisch immer genau einem Rotor zuordnen (beidseitig dichtende, profilierte Rotorzähne vorausgesetzt), und bestehen nicht wie bei SM aus korrespondierenden nebenrotor- und hauptrotorseitigen Anteilen.
- Die Ansaugdrücke während eines Evakuierungsprozesses schwanken bis zu sechs Zehnerpotenzen bei konstantem Auslaßdruck. Für die daraus resultierenden Druckverhältnisse können die inneren Volumenverhältnisse z.B. mittels entsprechender Rotorgeometrien nicht angepaßt werden. Die Prozeßführung erfolgt energetisch nicht optimiert (isochor bzw. nicht angepaßtes inneres Volumenverhältnis).

- Die Schraubenspindel-Vakuumpumpen verfügen über weitaus größere Umschlingungswinkel als die Schraubenmaschinen. Hieraus resultieren mehrere abgeschlossene Arbeitskammer, die in axialer Richtung hintereinander liegen, vergl. **Bild 1**. Die hohen Druckverhältnisse erfordern thermodynamisch diese Mehrstufigkeit.

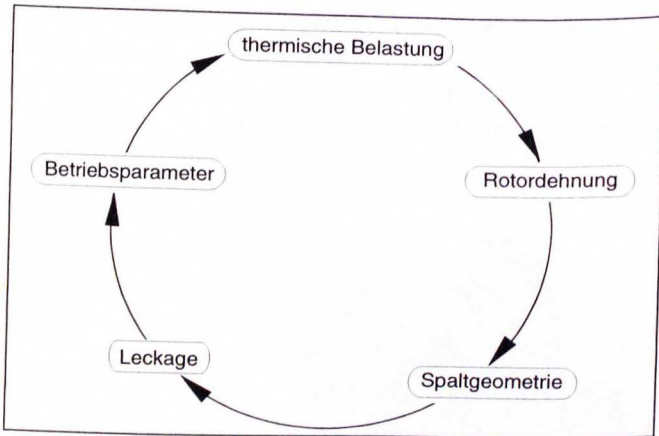


**Bild 1:**  
*Rotorgeometrie  
mit konstanter  
Rotorsteigung*  
**Fig. 1:**  
*Geometry of  
rotors with  
constant lead of  
screw*

Die Schraubenspindel-Vakuumpumpe findet dabei nicht nur in der Vakuumtechnik Anwendung. Dies zeigen die weltweit steigenden Produktionszahlen u.a. im Bereich „der Förderung niederviskoser Fördergüter oder der Förderung von Multiphasengemischen“ im Überdruckbereich, [6].

## 2 Spaltproblematik

Bei den trockenlaufenden Schraubenspindel-Vakuumpumpen steht kein Hilfsfluid in direktem Kontakt zu dem zu fördernden Gas im Schöpfraum. Ein „sauberes Vakuum“ ist zwar maschinenseitig die unmittelbare Folge, damit fehlt aber auch neben der Kühlwirkung die Dichtwirkung der Hilfsfluide an den funktionsbedingten Spalten des Arbeitsraumes. Dies führt zu der Anregung des in **Bild 2** abgebildeten Problemkreises zur Auslegung von trockenlaufenden Rotationsverdrängerpumpen.



**Bild 2:**  
*Problemkreis zur  
 Auslegung von  
 trocken-  
 laufenden Rotä-  
 tionsverdränger-  
 pumpen*  
**Fig. 2:**  
*Posing the  
 problem for dry-  
 running rotary  
 pumps*

Die fehlende Dichtwirkung bewirkt höhere Spaltmassenströme als bei der mit Hilfsflüssigkeiten betriebenen Maschine. Um bei gleicher Rotorgeometrie vergleichbare Enddrücke bzw. effektive Saugvermögen zu erzielen, muß die Schraubenspindel-Vakuumpumpe mit vergleichsweise höheren Drehzahlen, d.h. kürzeren Arbeitsspielzeiten, betrieben werden als etwa eine ölgedichtete. Hieraus resultiert unmittelbar eine höhere thermische Belastung der Schraubenspindel-Vakuumpumpe bei gleichzeitig fehlender direkter Kühlwirkung durch ein Hilfsfluid. Mit der höheren thermischen Belastung gehen aber größere Rotordehnungen und Maschinenverformungen einher. Für den sicheren Betrieb der jeweiligen Schraubenspindel-Vakuumpumpe sind diese mit dem Ziel gleicher Warmspalthöhen der Maschine durch entsprechend größere Kaltspalthöhen auszugleichen. Die effektiven Warmspalthöhen sind im Betrieb der Maschine aufgrund der thermisch bedingten Rotordehnungen kleiner als die konstruktiv festzulegenden Kaltspalthöhen. Der Konstrukteur muß also schon in der Konzeptionsphase der Maschine von den Kaltspalthöhen auf die Warmspalthöhen schließen können.

Hieraus ergibt sich ein Optimierungsproblem zwischen möglichst engspaltigen Maschinen und damit geringen Leckagen auf der einen Seite und der stets zu gewährleistenden Betriebssicherheit, z.B. gegen Anlaufen der Rotoren, auf der anderen Seite. Dieses Optimierungsproblem kann derzeit nur mit Erfahrungswerten und den damit verbundenen Unsicherheiten angegangen werden. Mit diesen Unsicherheiten zwischen den konstruktiv einzustellenden Kaltspalthöhen und den im Betrieb resultierenden effektiven Warmspalthöhen schließt sich der heute bestehende Problemkreis, da aus Gründen der Betriebs-

sicherheit in der Regel zu Lasten der inneren Leckagen zu große Spalthöhen gewählt werden bzw. werden müssen, [7], [8], [9].

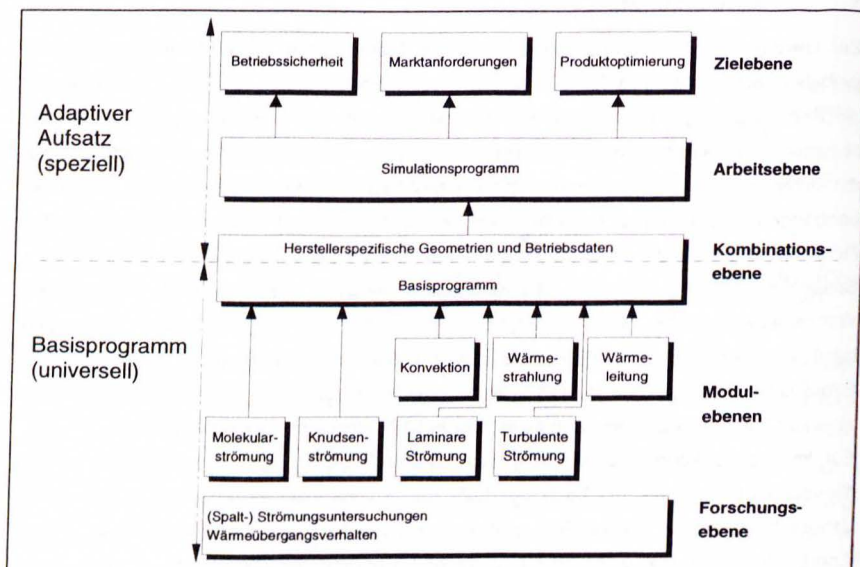
### 3 Lösungsansatz

Zur Lösung des Optimierungsproblems ist die Methode der Finiten-Elemente (FE) ein probates Mittel. Dabei wird die Qualität der Lösung jedoch unmittelbar abhängig von den in die Rechnung eingehenden *Randbedingungen*, [9]. Um alle relevanten Einflüsse auf die Randbedingungen geschlossen erfassen zu können, eignen sich Simulationsprogramme mit deren Hilfe die thermodynamische Prozeßführung in den abzubildenden Rotationsverdrängervakuumpumpen modelliert werden kann. Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Rechnung ergeben die Rotordehnungen und damit eine Quantifizierung der absoluten Spalthöhenänderung zwischen den Kaltspalten und den sich im Betrieb einstellenden Warmspalthöhen. Die FE-Rechnungen ermöglichen somit die gewünschten Aussagen bezüglich der notwendigen Betriebssicherheit. Dabei besteht eine wesentliche Stärke von Simulationsrechnungen darin, daß sich einzelne Wirkmechanismen sehr gut getrennt von einander untersuchen lassen und so eine gezielte Maschinenentwicklung ermöglichen, [10]. Für, im Überdruckbereich arbeitende, trockenlaufende Schraubenkompressoren haben sich Simulationsprogramme, die nach der Füll- und Entleermethode arbeiten, in den letzten Jahren bewährt, [7]. Diese Füll- und Entleermethode basiert auf einer Massen- und Energiebilanz, d.h. für diskretisierte Betrachtungspunkte der Prozeßführung müssen die inneren Spaltmassenströme bzw. die Erhaltungssätze quantifiziert werden. Während die Anzahl der jeweiligen in die Bilanz eingehenden Terme (z.B. die Anzahl der Spalte einer Arbeitskammer) immer vom betrachteten Maschinentyp abhängig ist, kann die Quantifizierung, z.B. der Spaltmassenströme, durch eine Abstraktion der Spaltgeometrien generell für jeden Maschinentyp gleich erfolgen.

Übergeordnetes Ziel dieses Lösungsansatzes ist die realitätsnahe Modellierung der Prozeßführung und die Bestimmung der daraus bedingten Wärmeübergangsrandbedingungen für FE-Rechnungen zur Beschreibung des Deformationsverhaltens von trockenlaufenden Vakuumpumpen. Das hierzu notwendige Simulationssystem besteht aus einem Simulationsprogramm und FE-Rechnungen der Maschinengeometrien. Die Simulation einer speziellen Vakuumpumpe ist dabei immer vom Maschinentyp abhängig.

Die Quantifizierungen der Massen- und Energiebilanz beruhen aber immer auf den gleichen Wirkmechanismen. Diese gemeinsamen Wirkmechanismen sind für abstrahierte Parameter in Form eines Basisprogramms umzusetzen, das es durch geringfügige Adaptionen erlaubt, eine beliebige Vakuumpumpe realitätsnah zu simulieren. Dabei darf die Eingangsinfo-

mation des Programms nur aus auch schon in der Konzeptionsphase der Maschine ohnehin bekannten Daten wie der makroskopischen Geometrie und den geplanten Betriebsparametern bestehen.



**Bild 3:** Einbindung des Basisprogramms in den beschriebenen Lösungsansatz  
**Fig. 3:** Implementation of the basis program in the described solution

**Bild 3** verdeutlicht den eben beschriebenen Lösungsansatz in grafischer Form. Basierend auf in der Forschungsebene zu den Spaltströmungen zu leistenden Untersuchungen, sind die im Arbeitsbereich trockenlaufender Rotationsverdränger-Vakuumpumpen relevanten Wirkmechanismen zu ermitteln und in einzelne Programmodule umzusetzen. Diese Elemente der *Modulebenen* münden in das Basisprogramm, das für abstrakte Parametervorgaben die notwendigen Terme zur Bilanz der Erhaltungssätze (Masse, Energie) quantifiziert. Erst in der *Kombinationsebene* erfolgt die Adaption maschinenspezifischer oder gar herstellerepezifischer Parameter, d.h. hier müssen z.B. die Geometriedaten (Volumenkurve, Spallängen, etc.) für das Basisprogramm bereitgestellt werden. Die Kombination dieser beiden Teile, des universellen Basisprogramms und der jeweils speziellen Adaption, ergibt das Simulationsprogramm. Dieses Simulationsprogramm liefert die für die FE-Rechnung benötigten energetischen und thermischen Randbedingungen. Das iterative Zusammenspiel der thermodynamischen Simulation und der FE-Rechnung in der Arbeitsebene ermöglicht letztlich die Lösung der Spaltproblematik in der *Zielebene* (Be-

*triebssicherheit*). Dabei definiert sich diese Zielebene über die Betriebssicherheit hinaus frei nach den Bedürfnissen der jeweiligen Programmanwender.

#### 4 Lösungsweg

Der hier dargestellte Lösungsweg beschreibt die notwendigen Arbeitsschritte zur Generierung des definierten Basisprogramms. Hierbei ist zu beachten, daß die Strömung des Arbeitsfluid in den verschiedenen Vakuumbereichen einen gänzlich unterschiedlichen Charakter aufweist, wie auch das Arbeitsfluid dementsprechend vollständig unterschiedliche thermodynamische Zustände erfährt. Die für ein numerisches Verfahren wichtige Quantifizierung der Spaltströmung beruht jedoch für alle Strömungsarten gleich auf der Bestimmung von Leitwerten. Dieser Leitwert ( $L$ ) definiert sich als Quotient der Spaltstromstärke ( $q_{pV}$ ) über der am Spalt anliegenden Druckdifferenz ( $\Delta p$ ) gemäß Gleichung 1.

$$L = \frac{q_{pV}}{\Delta p} \quad [m^3 \text{ s}^{-1}] \quad (\text{Gl. 1})$$

Hier liefert die Vakuumtechnik für die Auslegung von Vakuumkomponenten zahlreiche empirische Ansätze zur Beschreibung und zur Quantifizierung von Gasströmungen in den unterschiedlichen Vakuumbereichen, [11] - [23]. Dabei beziehen sich die Messungen auf der einen Seite und die Algorithmen zur Berechnung von Leitwerten auf der anderen Seite vornehmlich auf charakteristische Längen wie sie für Vakuumanlagenkomponenten bei Rohren, Ventilen, Flanschverbindungen etc. relevant sind. Mit den bisherigen Untersuchungen können derzeit jedoch nicht die inneren Leckagen von *rotierenden* Bauelementen in Vakuumpumpen, d.h. von engspieligen Spalten mit bewegten Spaltberandungen, ausreichend genau quantifiziert werden.

Die grundlegenden folgenden Untersuchungen orientieren sich daher an Hand dreier eigenständiger Parameterfelder. Diese lauten für die Maschinenspalte in trockenlaufenden Vakuumpumpen:

- Spaltform: Wie wirken sich die makroskopischen Geometrieparameter (Spalthöhe, Spalllänge, Spalttiefe, Spaltkrümmung, etc.) auf die Leitwerte aus?
- Spaltkontur: Welchen Einfluß haben die unterschiedlichen Profilkonturen und damit die Gradienten der zur Hauptströmungsrichtung normalen Querschnittsflächenverläufe auf die Leitwerte?
- Spaltbewegung: Wie beeinflusst die Bewegung des Spaltes die Leitwerte? Aspekte stellen hierbei die Relativbewegung der Spaltkonturen

zueinander auf der einen Seite und die Bewegung der Spaltkonturen zur Hauptströmungsrichtung auf der anderen Seite dar.

#### 4.1 **Kategorisierung von Spaltgeometrien**

Um eine geschlossene Beschreibung der Leitwerte in trockenlaufenden Vakuumpumpen zu erreichen, muß die beliebige Anzahl an räumlich gekrümmten Spalten auf eine endliche Anzahl an abschnittsweise ebenen Spaltkonturen zurückgeführt werden.

Zunächst werden die realen Maschinenspalte beliebiger Vakuumpumpen nach *grundsätzlichen Spaltformen* kategorisiert. In den Spaltkategorien werden die jeweiligen Spalte in abschnittsweise ebene Abschnitte geteilt. Im Bereich des kleinsten Spaltabstandes senkrecht zum Spaltverlauf findet die Betrachtung der Spaltkonturen statt, da diese Bereiche für die Energiewandlung primär maßgebend sind. Die so gefundenen Konturformen lassen sich durch ihre Krümmungskontur nachbilden. Eine Klassifizierung der unterschiedlichen Spaltformen z.B. in konkave und konvexe Spaltberandungen, charakterisiert durch die Krümmung beim minimalen Spaltabstand, ist damit gegeben.

#### 4.2 **Messung von Leitwerten an ebenen Spaltmodellen (Experiment)**

Die Bestimmung der Leitwerte muß durch Messungen an Modellen erfolgen, die das System Vakuumpumpe nachbilden. Die Messung der Leitwerte erfolgt dann an diesen Spaltformen für Parametervariationen der am Spalt anliegenden Zustandsgrößen. Aus einer endlichen Anzahl von Parametern kann so eine Vielzahl räumlicher Spalte mit unterschiedlichen Spaltformen nachgebildet werden. Der Umfang der Messungen bildet den für trockenlaufende Vakuumpumpen relevanten Druckbereich repräsentativ ab und liefert eine hinreichend breite Datenbasis für die folgende Bestimmung der Leitwerte beliebiger, räumlich gekrümmter Spalte.

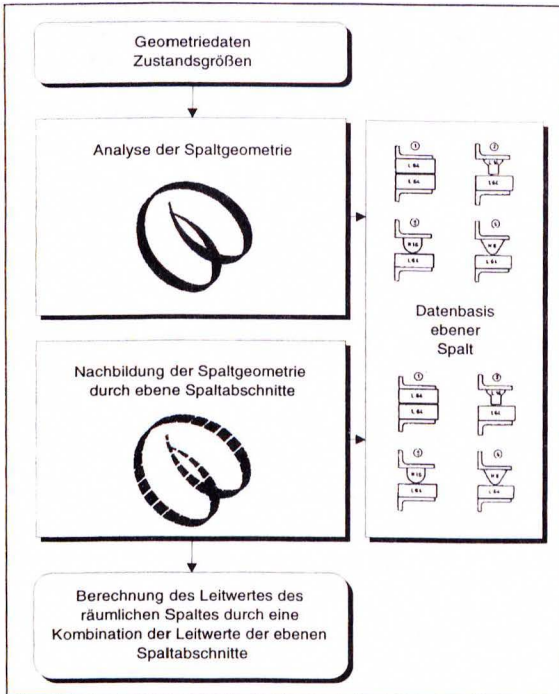
#### 4.3 **Herleitung von Algorithmen zur Beschreibung der Leitwerte beliebiger räumlich gekrümmter Spalte auf Basis der ebenen Spaltabschnitte**

Dieser Arbeitsschritt beinhaltet die *automatisierte Invertierung* der Kategorisierung der Spaltgeometrien. Die Aufgabe des zu entwickelnden Algorithmus zeigt das **Bild 4**.

Die parameterisierten Spaltgeometrien stellen die Eingangsgrößen dar. Die Spaltgeometrie wird analysiert und durch eine Kombination von ebenen Spaltabschnitten nachgebildet. Für die ebenen Spaltabschnitte sind die Leitwerte aus den Messungen bekannt. Analog zu dieser räumlich-geometrischen Nachbildung der Spaltgeometrie wird dann aus den bekannten Leitwerten der ebenen Spalte auf die Leitwerte der räumlich-gekrümmten Spalt-



geometrien geschlossen. Mögliche Ansätze ergeben sich aus der in der Vakuumtechnik bekannten Analogie zur Elektrotechnik zur Reihen- bzw. Parallelschaltung von Leitwerten.



**Bild 4:**  
*Algorithmus zur Berechnung der Leitwerte räumlich-gekrümmter Spalte*

**Fig. 4:**  
*Algorithm to calculate the conductance of double curved clearances*

#### 4.4 Kategorisierung der relativen Spaltbewegungen

Dieser Arbeitsschritt beinhaltet die Analyse der Relativbewegungen der spaltbildenden Bauteile. Eine erste Kategorisierung erfolgt hierbei nach den Kriterien „bewegt - feststehend“ und „bewegt - bewegt“, wobei sich die zweite Kategorie nach der gegebenen oder nicht gegebenen Gleichsinnigkeit der Drehrichtungen weiter differenzieren läßt. Des weiteren lassen sich Unterscheidungen hinsichtlich der Anströmung bzw. der Überströmung der bewegten Berandungen (radial / in Umfangsrichtung) finden, vergl. **Bild 5**.

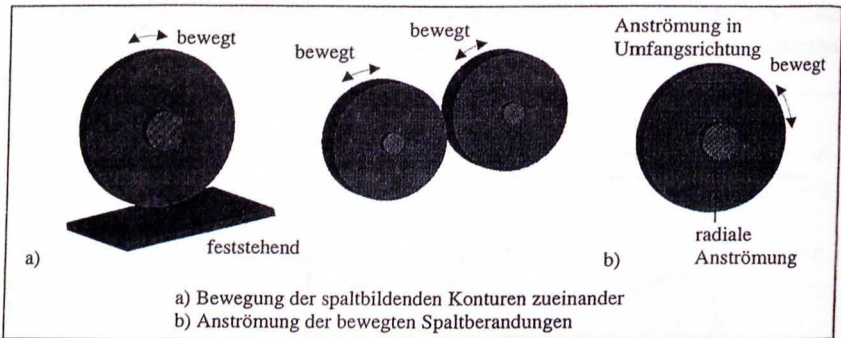


Bild 5: Arten der Relativbewegung

Fig. 5: Kinds of relative motion

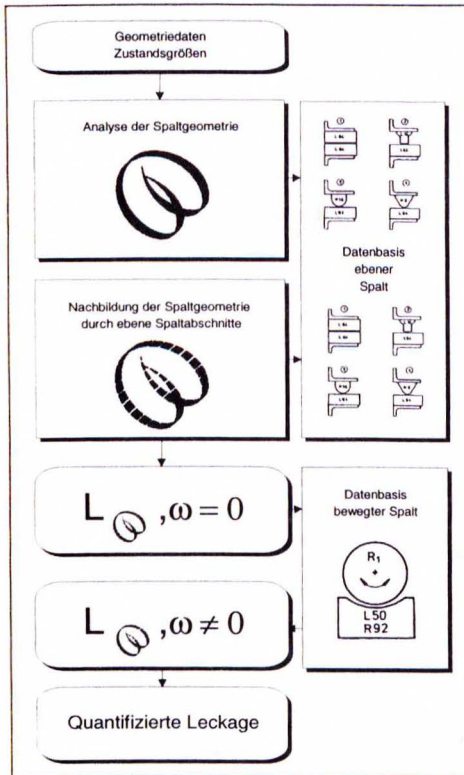
#### 4.5 Messung von Leitwerten an bewegten Spaltmodellen

Zur Bestimmung der Leitwerte wird auf experimentelle Untersuchungen am ebenen, statischen Spalt zurückgegriffen und die Ergebnisse werden auf die räumlichen Spalte übertragen. Der Nachweis, Ergebnisse so übertragen zu können, ist in [8] gelungen. Neben der Abhängigkeit des Leitwertes von der Spaltgeometrie ist aber auch der dynamische Einfluß der bewegten Spaltberandungen von Bedeutung. Experimentelle Bestimmung der Leitwerte am ebenen, bewegten Spalt zeigten zumindest für den Bereich der viskosen Strömung, daß sowohl die Richtung als auch der Betrag der Relativgeschwindigkeit der Spaltberandungen einen nicht zu vernachlässigen Einfluß auf den Beiwert besitzen, [24]. Für ausgesuchte Spaltformen sind also die Leitwerte im rotierenden System zu bestimmen und auf die anderen Spaltformen nach Möglichkeit zu übertragen.

#### 4.6 Beschreibung der Strömungsformen

Die strömungsmechanische Beschreibung kann nur über die verschiedenen Ansätze der viskosen Strömung, der Knudsenströmung und der molekularen Strömung erfolgen. Die bekannten empirischen Ansätze zur Beschreibung der Strömungsformen in Vakuumanlagenkomponenten müssen auf eine Eignung bzw. Verwendbarkeit zur Berechnung der Strömungen in engspieligen Vakuumpumpen geprüft und übertragen werden. Für jede Strömungsart ist ausgehend von den Messungen der Leitwerte am rotierenden Spalt und den ebenen Spalten ein Berechnungsverfahren zu entwickeln, das für vorgegebene Geometrie- und Betriebsparameter am Spalt die jeweilige Strömung beschreibt und die Leckagemassenströme quantifiziert. Die jeweiligen Berechnungsverfahren sind zu automatisieren

und programmtechnisch in Form von einzelnen Modulen umzusetzen. Bild 6 zeigt schematisch den für ein derartiges Modul benötigten Algorithmus.



**Bild 6:**  
**Algorithmus zur Bestimmung der Leitwerte (L) räumlich-gekrümmter Spalte mit bewegten Berandungen ( $\omega \neq 0$ )**

**Fig. 6:**  
**Algorithm for the calculation of the conductance of double curved clearances with moving walls ( $\omega \neq 0$ )**

#### 4.7 Ableiten von Kriterien zur stetigen Abgrenzung der unterschiedlichen Module

Den im vorhergehenden Arbeitsschritt erarbeiteten Modulen zur Beschreibung der Strömung in trockenlaufenden Vakuumpumpen ist gemein, die entsprechenden Quantitäten der Spaltmassenströme als Funktion der Eingangsinformationen zu berechnen. Die verschiedenen Module müssen durch eine Kombination zu einem Basisprogramm zusammengefaßt werden, d.h. vor der Berechnung der Spaltmassenströme durch ein Modul muß geklärt sein, welche Strömungsform als Funktion der Zustandsgrößen und der Spaltgeometrie

vorliegt. Erst mit dieser Information kann das entsprechende Einzelmodul einer Strömungsart automatisch angesteuert werden.

Die Übergänge und Wechsel zwischen den verschiedenen theoretischen Ansätzen zur Beschreibung der strömungsmechanischen Vorgänge müssen quantitativ stetig und numerisch differenzierbar sein, d.h. es müssen Kriterien wie z.B. die Knudsenzahl gefunden werden, die es ermöglichen, die verschiedenen theoretischen Ansätze gegeneinander abzugrenzen und gleichzeitig untereinander zu verbinden. Die Knudsenzahl als Verhältnis der freien Weglänge zu einer charakteristischen Weglänge ist ein solches Kriterium; für sie gilt:

- *Die Knudsenzahl variiert für einen festen Ort innerhalb der Vakuumpumpe für verschiedene Betriebszustände.*
- *Die Knudsenzahl variiert für eine Arbeitskammer der Maschine für einen stationären Betriebspunkt (Durchlaufen der Betriebszustände von der Saug- zur Druckseite).*
- *Die Knudsenzahl variiert für zwei Orte unterschiedlicher geometrischer Zugehörigkeit (z.B. in der Kammer und dem sie abschließenden Spalt).*

Als weitere Unterscheidungskriterien sind in der Literatur die Reynoldszahl  $Re$  bzw. die Machzahl  $Ma$  zu finden, [19], [20], [21].

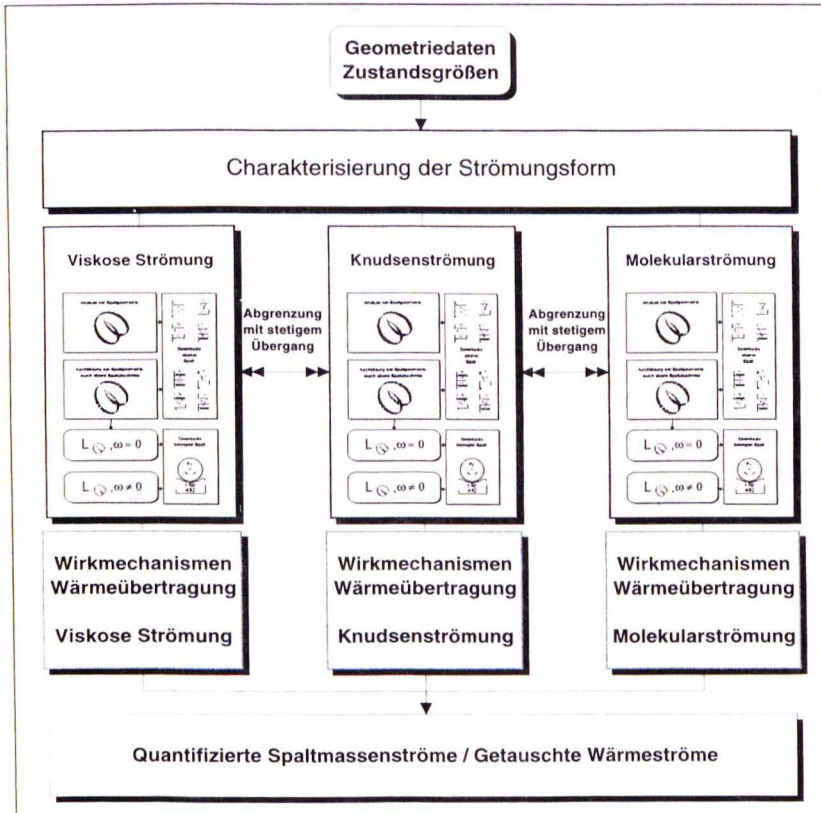
#### **4.8 Beschreibung des Wärmeübergangsverhaltens (Bildung von Modulen) und Implementation der Module in das Basisprogramm**

Für eine ganzheitliche Beschreibung der Betriebssicherheit und der thermodynamischen und strömungsmechanischen Prozesse in Vakuumpumpen ist eine Untersuchung des Wärmeübergangsverhaltens unabdingbar. Mit der Beschreibung des Wärmeübergangsverhaltens werden die folgenden wesentlichen Ziele verfolgt:

- *Erste Bewertungsmöglichkeiten der Maschinenbetriebssicherheit (Konstruktionsphase),*
- *Abbildung der thermodynamischen diabaten Prozeßführung in Vakuumpumpen,*
- *Bestimmung von Wärmeübergangsrandbedingungen für Finite-Elemente-Rechnungen.*

Hierfür ist das komplexe Wärmeübergangsverhalten der Maschine über den gesamten Druckbereich zu analysieren und hinsichtlich auftretender Wirkmechanismen wie z.B. der Wärmestrahlung, der Konvektion und der Wärmeleitung, qualitativ und quantitativ aufzuteilen. Diese Wirkmechanismen sind also auf temporäre und physikalische Parallelität ihres Vorkommens zu prüfen, durch theoretische Ansätze abzubilden und gegeneinander mit stetigem Übergang bzw. numerischer Differenzierbarkeit abzugrenzen. Dabei sind sowohl die Vorgänge in der jeweiligen Arbeitskammer als auch die Wärmeübertragung der für Vakuumpumpen charakteristischen Spaltströmungen relevant.

Die getauschten Wärmen bewirken aufgrund der geringen Dichten und den dadurch bedingten geringen Masseninhalten in den Arbeitskammern eine nicht vernachlässigbare Änderung der spezifischen Enthalpie und damit der Zustandsgröße Temperatur. Hieraus resultieren entsprechend hohe Bauteiltemperaturen, [25]. Die zu erwartenden Bauteilverformungen sind bei den hohen Druckverhältnissen (hohes Temperaturniveau) bei gleichzeitig niedrigen Absolutdrücken insbesondere von den thermischen Bauteildehnungen geprägt, [26].



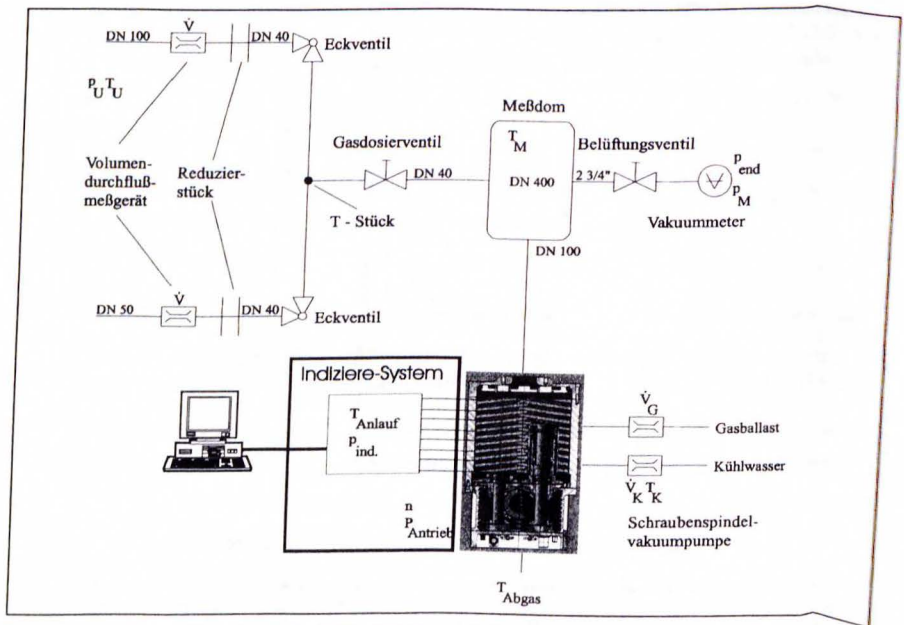
**Bild 7:** Algorithmus für das Basisprogramm

**Fig. 7:** Algorithm for the basis program

Der in **Bild 7** dargestellte Algorithmus stellt in der Verknüpfung der Einzelmodule für Strömung und Wärmeübertragung das angestrebte Ziel des Projektes als Basisprogramm dar. Mit der Adaption bekannter Geometrie- und Prozeßparametern können die Spaltmassenströme über die Maschinenspalte sowie die zwischen dem Arbeitsfluid und den, die Arbeitsräume begrenzenden, Bauteilen getauschten Wärmeströme quantifiziert werden. Eine hieraus abzuleitende Zielsetzung lautet, die Temperaturverteilung in den Bauteilen (Rotoren, Gehäuse, etc.) möglichst realitätsnah zu modellieren.

#### 4.9 Verifikation

Um die Verifikation der Simulationsergebnisse zu ermöglichen, ist es erforderlich, beispielhaft Messungen an einer Vakuumpumpe durchzuführen. Die Messungen müssen eine breite Datenbasis bereitstellen, die den Arbeitsbereich einer Vakuumpumpe repräsentativ wiedergibt. Den hierzu benötigten Versuchsaufbau nach **Bild 8** liefert die DIN 28426.



**Bild 8:** Versuchstand nach DIN 28426 zur Messung von Zustandsgrößen mit Indizierung

**Fig. 8:** Layout plan (DIN 28426) for measurement of variables of state with implemented indication

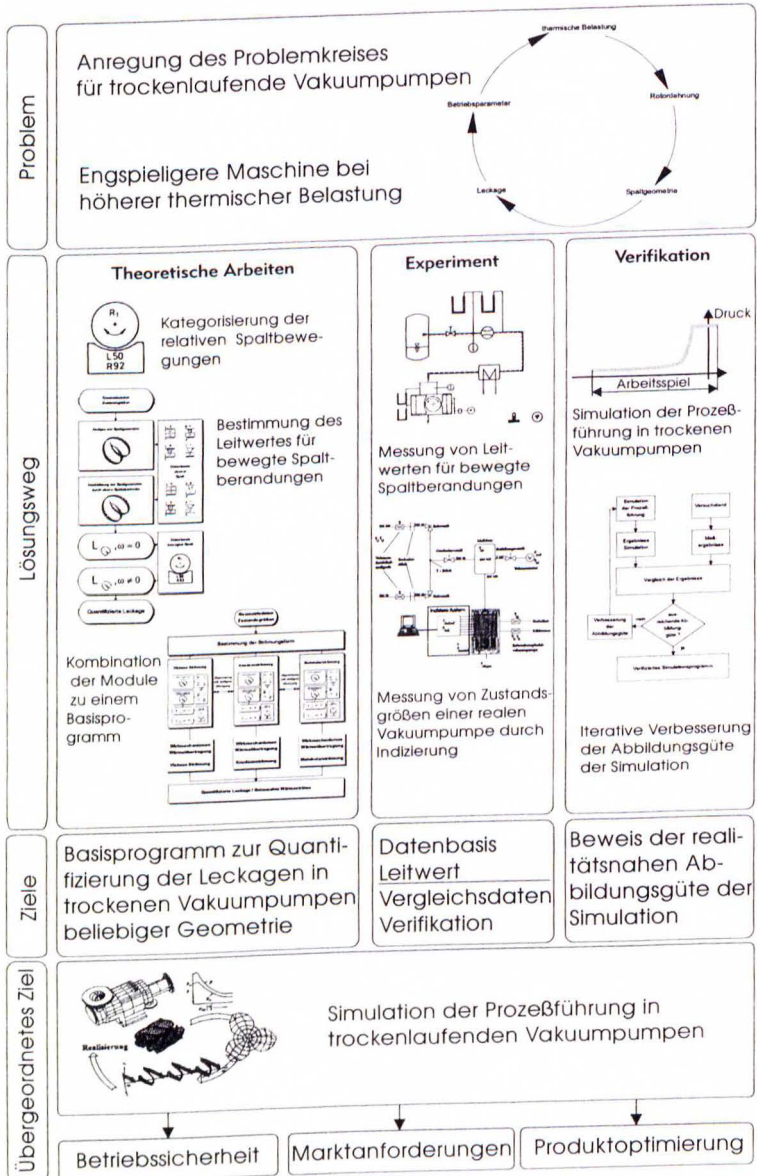
Eine Indizierung des Prozeßverlaufs in der Maschine ist unerlässlich, um die Zustandsgrößen des Prozeßverlaufes als Funktion eines arbeitsspielbeschreibenden Parameters, z.B. des Drehwinkel, zu kennen. Hierzu dienen dynamische Druckaufnehmer, die durch eine geeignete Anordnung in der Maschine ein Abtasten des gesamten Arbeitsbereiches erlauben. Die Indizierung der Maschine zielt also wirklich auf die Verläufe der Zustandsgrößen während der Prozeßführung in der Maschine ab. Vergleichsdaten wie der Enddruck, das effektive Saugvermögen, die Auslaßtemperatur oder aber auch statische Druckmessungen lassen immer nur integrale Aussagen über die Prozeßführung zu und sind deshalb für eine Verifikation nicht geeignet.

Die eigentliche Verifikation der Simulationsergebnisse muß anhand eines Vergleichs mit aufgenommenen realen Meßdaten erfolgen. Hierzu ist die thermodynamische Prozeßführung zu überprüfen. Der entsprechende Ablauf mit den Ergebnissen aus Simulation und Messung auf der Eingangsseite und dem verifizierten Simulationsprogramm auf der Ausgangsseite findet iterativ statt und liefert verifizierende Aussagen, ob das komplexe Simulationssystem über eine hinreichend hohe Abbildungsgüte verfügt.

Die thermodynamische Simulation sollte dabei nicht nur das tendenzielle Verhalten einer realen Maschine widerspiegeln, sondern auch im Rahmen zu tolerierender Grenzen quantitativ zuverlässige Werte liefern können.

#### 4.10 Zusammenfassung von Problemstellung, Ziele und Lösungsweg

In **Bild 9** sind die vorstehenden Ausführungen durch grafische Darstellungen unterstützt zusammengefaßt. Der Lösungsweg basiert auf den drei Säulen theoretische Arbeiten, dem Experiment und der Verifikation. Er führt mit dem überprüften Basisprogramm, der neu geschaffenen Datenbasis zu dem Übergeordneten Ziel der hier vorgestellten Arbeit, der **Simulation der diabaten Prozeßführung in trockenlaufenden Rotationsverdränger-Vakuumpumpen**.



**Bild 9: Grafische Übersicht zum Lösungsweg**  
**Fig. 9: Grafical view of the solution**



## 5 Literatur

- [1] N.N. Delphie-Studie: Zukunftstechnologien Kompressoren- und Vakuumpumpen des VDMA, 1997
- [2] Hablanian, M.H. Aufbau und Eigenschaften verschiedener ölfreier Vakuumpumpen für den Grob- und Feinvakuumbereich  
In: Vakuuum in der Praxis, Nr. 2, S. 96-102, 1990
- [3] Füssel, U. Trockenlaufende Vakuumpumpen in der chemischen Industrie  
In: Vakuuum in der Praxis, Nr. 2, S. 85-88, 1994
- [4] Lamprecht, R. Trockenlaufende Vakuumpumpen  
In: Vakuuum in der Praxis, Nr. 4, S. 255-259, 1993
- [5] Jorisch, W.  
Müller, D. Vakuumpumpen, unentbehrlich für viele Bereiche der industriellen Anwendung  
In: Pumpen und Kompressoren aus Deutschland 1998 mit Druckluft- und Vakuumtechnik, S. 102-107
- [6] Quast, R.  
Rohlfing, G.  
Seeger, D. Anwendungsgebiete moderner Schraubenspindelpumpen  
In: Pumpen und Kompressoren aus Deutschland 1998 mit Druckluft- und Vakuumtechnik, S. 20-26
- [7] Rau, B. Ein Beitrag zur Auslegung trockenlaufender Schraubekompressoren  
Dissertation, Universität Dortmund, 1994
- [8] Peveling, F.-J. Ein Beitrag zur Optimierung adiabater Schraubenmaschinen in Simulationsrechnungen  
VDI Fortschrittsberichte, Reihe 7  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1982
- [9] Kauder, K.  
Keller, G. Wärmeübergangsrandbedingungen für Schraubenmaschinen  
In: Schraubenmaschinen, Forschungsberichte des FG Fluidenergiemaschinen,  
Nr. 3, S. 5-19, Dortmund, 1995
- [10] Kauder, K.  
Dreifert, Th. Profileingriffspaltberechnung für betriebswarme Schraubekompressoren  
In: Schraubenmaschinen, Forschungsberichte des FG Fluidenergiemaschinen,  
Nr. 3, S. 36-50, Dortmund, 1995
- [11] Berman, A. S. Free Molecule Flow in an Annulus  
Department of Aerospace Engineering and Mechanics,  
University of Minnesota, Communications p. 4991-4992, 1969
- [12] Berman, A. S. Free Molecule Transmission Probabilities  
Department of Aerospace Engineering and Mechanics,  
University of Minnesota, Communications p. 3356, 1965
- [13] Adam, H.  
Jokisch, G. Vacuum valves and their use in practice  
Leybold-Heraeus GmbH  
In: Vacuum, S. 681-689, 1987
- [14] Steckelmacher, W. The effect of cross-sectional shape on the molecular flow in long tubes  
School of Mathematical and Physical Sciences, University of Sussex  
In: Vacuum, volume 28, S. 269-275, 1978

- [15] Tingwei, X.                    The relation between the conductance of an elbow and the angle  
Kaiping, W                       between the tubes  
In: Vacuum, volume 32, S. 655-659, 1982
- [16] Clausing, P.                   Über die Strömung sehr verdünnter Gase durch Röhren von  
beliebiger Länge  
In: Annalen der Physik, S. 961- 989, 1932
- [17] Smoluchowski, M.           Zur kinetischen Theorie der Transpiration und Diffusion  
verdünnter Gase  
In: Annalen der Physik, S. 1559-1570, 1910
- [18] Knudsen, M.                 Die Molekularströmung der Gase durch Öffnungen und die  
Effusion  
In: Annalen der Physik, S. 999-1016, 1909
- [19] Kühn, G.                      Gasströme durch Spalte im Grobvakuum  
In: Vakuum -Technik, 33. Jahrgang, Heft 6, S. 171 -175, 1984
- [20] Jitschin, W.                 Viskose Gasströmung: Strömungsarten und pv-Durchfluß  
In: Vakuum in der Praxis, Nr. 4, S. 260-262, 1993
- [21] Jitschin, W.                 Begriffe der Gasströmung, Leitwert bei Molekularströmung  
In: Vakuum in der Praxis, Nr.3, S. 179-180, 1993
- [22] Su, Y.; Haga H.             Theoretical study on the pumping mechanism of a dry scroll  
Sawada, T.                       vacuum pump  
Takemoto, J.                     In: Vacuum, 1993, Band 47 (1996), S. 815-818
- [23] Wutz, Adam,                 Theorie und Praxis der Vakuumtechnik  
Walcher                         5. Auflage, Braunschweig: Vieweg-Verlag 1992
- [24] Dreißig, B.                 Ein Beitrag zur Auslegung von trockenlaufenden Schrauben-  
motoren  
VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 6  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990
- [25] Dreifert, Th.                Thermisches Verhalten der Rotoren in Schraubenkompressoren  
VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 1  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [26] Götde, R.                 Simulation des instationären Betriebes von Schrauben-  
kompressoren.  
VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 1  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994