



Christoph Schenk (Autor)

**Theoretische und experimentelle Untersuchungen an ebenen  
aerostatischen Gaslagererelementen unter  
Hochvakuumbedingungen**

Christoph Schenk

**Theoretische und experimentelle  
Untersuchungen an ebenen  
aerostatischen Gaslagererelementen  
unter Hochvakuumbedingungen**

 Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1587>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einführung

Der Einsatz von Gaslagern und Gasführungen in einer Vakuumumgebung – permanent versorgt mit unter hohem Druck stehenden Gasen – scheint zunächst ein Paradoxon zu sein. Warum sollten also solche Systeme in eine Umgebung integriert werden, zu deren Erhalt Gase mit hohem technologischen Aufwand unablässig entfernt werden müssen?

Gaslagerelemente werden seit mehreren Jahrzehnten aufgrund ihrer hervorragenden Lager- und Führungseigenschaften unter atmosphärischen Bedingungen in Präzisionstischen eingesetzt. Diese Tische finden in einer Vielzahl von Anlagen der Halbleitertechnik und Messmaschinen Anwendung, da hier Positionier- und Führungsgenauigkeiten bis in den Nanometerbereich gefordert werden. Für die nächste Generation vieler dieser Geräte und Anlagen wird eine Prozessverlagerung in eine Vakuumumgebung unabdingbar sein, um atmosphärische Störeinflüsse (z.B. Absorption oder Änderung der Brechzahl) auf die Prozesse auszuschließen und damit Auflösung und Genauigkeit der Systeme weiter erhöhen zu können.

Die konventionell im Vakuum eingesetzten wälzgeführten Tische weisen im Vergleich zu gasgeschmierten Tischsystemen ein schlechteres Schwingungs- und Reibungsverhalten auf, das durch die Vakuumumgebung noch zusätzlich negativ beeinflusst wird. Die Auswahl an vakuumkompatiblen Schmierstoffen zur Reibminderung ist stark eingegrenzt und die aus den Schmierstoffen austretenden Dämpfe können sich auf empfindlichen Systemkomponenten ablagern und deren Funktion beeinträchtigen. Deshalb wird oft mit Trockenreibung gearbeitet. Zudem kann reibungsbedingter Verschleiß zur Kontamination mit Partikeln führen. Den kommenden Systemanforderungen werden wälzgeführte Tische daher nicht mehr gerecht.

Konventionelle, unter atmosphärischen Bedingungen eingesetzte Gaslager und -führungen können jedoch nicht ohne weiteres in Vakuumsysteme überführt werden, da sie das zur Schmierung benötigte Betriebsgas einfach an die Umgebung abgeben. Das Einströmen solcher Gasmengen in ein Systemvakuum im Bereich von  $10^{-6}$  ...  $10^{-8}$  mbar, wie es in vielen der genannten Anwendungsfelder angestrebt wird [1–4], würde zum sofortigen Einbrechen des Vakuums führen. Die Herausforderung bei der Integration von Gaslagern und

## 1 Einführung

-führungen in Vakuumsysteme ist es also, durch geeignete Maßnahmen die Abgabe des Betriebsgases in das Vakuumsystem zu unterbinden bzw. stark einzuschränken.

### 1.1 Grundlagen aerostatischer Lagerelemente

Gaslagerelemente können sowohl in Gaslagern (Drehgelenken) als auch in Gasführungen (Schubgelenken) eingesetzt werden und stützen dabei zwei sich relativ zueinander bewegende Teile so ab, dass nur ein Bewegungsfreiheitsgrad verbleibt. Der gasförmige Schmierstoff zwischen den Funktionsflächen der Gelenke gewährleistet verschleiß- und stick-slip-freie Relativbewegungen mit extrem geringen Reibungsverlusten (Reibwerte im Bereich  $10^{-6}$ ) [5].

Die hohe Kompressibilität der Gase führt dazu, dass die Schmierfilmhöhe im Mikrometerbereich liegt. Um eine sichere Funktion zu gewährleisten, müssen die Gestalt- und Lageabweichungen der Funktionsflächen in Summe deutlich kleiner als die angestrebte Schmierfilmhöhe sein [6]. Der räumlich ausgedehnte Gasfilm führt zu einer Verteilung der übertragenen Kräfte auf eine große Fläche. Die Relativbewegung wird durch das Rauheitsprofil dieser Fläche kaum beeinflusst, da der Gasfilm eine mittelnde (glättende) Wirkung zeigt. All diese gerade beschriebenen Charakteristiken führen dazu, dass mit Gaslagerelementen gestützte Bewegungsabläufe hochpräzise ausgeführt werden können.

Die Lagerelemente können verschieden geometrisch gestaltet sein. Die am häufigsten eingesetzten Formen sind zylindrische Lagerelemente mit kreis- oder ringförmigen Lagerbereichen\* und quaderförmige Lagerelemente mit rechteckigem Lagerbereich.

#### 1.1.1 Prinzip aerostatischer Lagerelemente

Aerostatische Lagerelemente werden mit einem konstant vorgespannten Gas gespeist. In Verbindung mit einer dem Element parallel gegenüberliegenden Fläche entsteht ein Spalt, den das Gas durchströmt und dabei einen zusammenhängenden tragfähigen Schmierfilm bildet. Zwischen der Einspeisung und dem Rand des Lagerelementes entspannt sich das Gas bis auf den Umgebungsdruck.

---

\* Unter Lagerbereich soll allgemein die Fläche verstanden werden, über der sich der tragende gasförmige Schmierfilm (Druckpolster) ausbildet.

## 1.1 Grundlagen aerostatischer Lagerelemente

Für die Funktion der Lagerelemente ist es wichtig, dass sie sich Laständerungen anpassen können. Die aufnehmbare Last darf also nicht einzig eine Funktion der Vorspannung des Gases sein. Dies gelingt, wenn die Abhängigkeit des Strömungswiderstandes von der Spalthöhe geschickt ausgenutzt wird<sup>†</sup>. Das durchströmte Volumen wird in mehrere Bereiche aufgeteilt, die einen unterschiedlich stark von der Spalthöhe abhängenden Strömungswiderstand aufweisen. Für verschiedene Lasten kann sich ein stabiler Gleichgewichtszustand einstellen, da sich der Druckverlauf über dem Lagerbereich in Abhängigkeit von der Spalthöhe ändert. Für Präzisionssysteme ist es dabei von großer Bedeutung, die Strömungswiderstände so zu optimieren, dass sich das Druckpolster bereits durch eine minimale Spaltänderung an eine Laständerung anpasst.

Dieser Ansatz wird auf verschiedene Weise in Lagerelementen umgesetzt, siehe Abbildung 1.1. Der Strömungswiderstand auslassgedrosselter Lagerelemente zeigt im Randbereich eine stärkere Abhängigkeit von der Spalthöhe als im Zentrum, da der Lagerbereich so geformt ist, dass die Spalthöhe zum Rand hin abnimmt. Bei einlassgedrosselten Lagerelementen wird das Gas über einen zusätzlichen, von der Spalthöhe nahezu unabhängigen Strömungswiderstand (Einlassdrossel) in den Spalt eingespeist. Eine Änderung der Spalthöhe führt zu einer Druckänderung nach der Einlassdrossel. Als Einlassdrosseln werden sowohl Einzeldüsen, mehrere Düsen, flächig diskret verteilte Mikrodüsen, poröse Werkstoffe als auch oberflächenverdichtete poröse Werkstoffe eingesetzt.

### 1.1.2 Wichtige Kenngrößen

Das Leistungsvermögen von Gaslagerelementen wird anhand einer Vielzahl mechanischer Kenngrößen charakterisiert, von denen die wichtigsten nachfolgend beschrieben werden. Für hochvakuumtaugliche Lagerelemente sind zusätzlich einige fluidische Kenngrößen maßgebend, die ergänzend in die Liste aufgenommen wurden. Die Definitionen sind an Bartz [6] und Umrath [7] angelehnt.

Die *Spalthöhe* entspricht der Dicke des tragenden Gasfilmes. Sie setzt sich aus dem kürzesten Abstand zwischen dem Lagerbereich eines Lagerelemen-

---

<sup>†</sup>Der Strömungswiderstand ist in erster Näherung indirekt proportional zur dritten Potenz der Spalthöhe.

## 1 Einführung

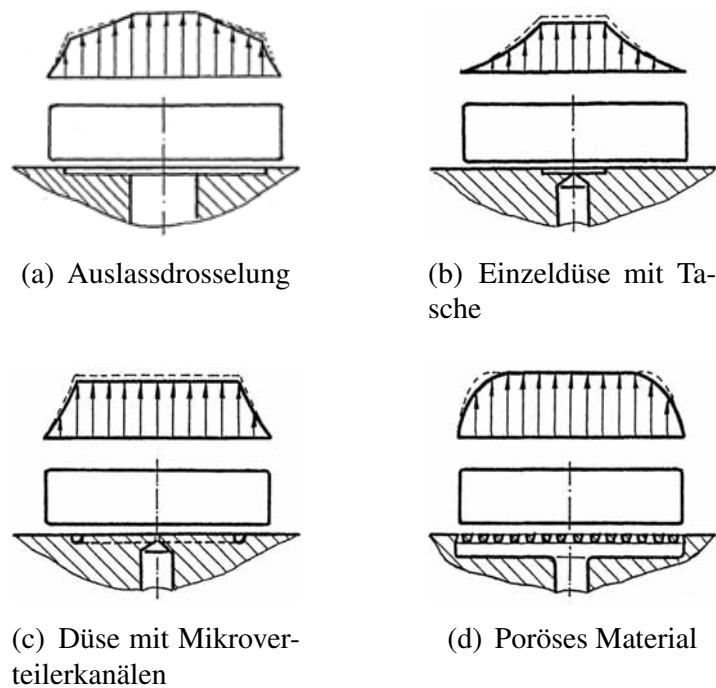


Abbildung 1.1: Verschiedene Drosselsysteme mit typischen zugehörigen Druckprofilen [6]

tes und der gegenüberliegenden Fläche sowie den Profilhöhen innerhalb dieser Flächen zusammen.

Die *Tragfähigkeit* bzw. *Tragkraft* definiert die Last, die das Lagerelement bei einer bestimmten Spalthöhe aufnehmen kann.

Das Verhältnis der Änderung der Tragkraft zur Änderung der Spalthöhe zwischen zwei Gleichgewichtszuständen mit stationären Strömungsverhältnissen im Spalt wird als *statische Steifigkeit* bezeichnet. Die *dynamische Steifigkeit* wird maßgeblich durch die Kompressibilität des Gasfilmes bestimmt, der bei einer Störung des Gleichgewichtszustandes kurzfristig wie eine Gasfeder wirkt.

Bei aufliegenden Funktionsflächen eingeschlossene Hohlräume (z.B. Kammern, Taschen, Kanäle, durch das Rauheitsprofil entstehende Volumina) bilden das sogenannte *Totvolumen*, durch das die dynamische Steifigkeit verringert wird und Ausgleichsvorgänge verzögert werden.

Die *Stabilität* eines Lagerelementes wird durch die von der dynamischen Steifigkeit abhängigen Dämpfung bestimmt. Für Dämpfungswerte kleiner Null

wird das Lagerelement instabil und beginnt zu schwingen. Werden dabei Bereiche positiver und negativer Dämpfung durchlaufen, so dass sich Anfachung und Dämpfung über eine Periode gerade ausgleichen, ist die Schwingung grenzstabil. Das periodische Aufeinanderschlagen der Funktionsflächen bei sehr großen Schwingungsamplituden wird als „air-hammer“ bezeichnet und kann zur Zerstörung der Funktionsflächen führen.

Turbulente Strömungen können bei stabil im Gleichgewicht arbeitenden Lagerelementen stochastische Störbeschleunigungen hervorrufen, die als *Restrauschen* beschrieben werden. Die Schwingungsamplituden liegen im unteren Nanometerbereich.

Der *Gasverbrauch* ist die ein Lagerelement pro Zeiteinheit durchströmende Gasmenge.

Die *Leckrate* bezeichnet die pro Zeiteinheit durch unerwünschte Leitungselemente abgegebene Gasmenge. Übertragen auf vakuumtaugliche Gaslagerelemente gibt sie die aus dem Dichtsystem in die Vakuumumgebung austretende zeitbezogene Gasmenge an.

Unter der *Gasabgaberate* wird die pro Zeiteinheit von den Wänden oder anderen Bauteilen im Inneren eines Vakuumsystems abgegebene Gasmenge verstanden. Im Vakuum eingesetzte Gasführungen geben während des Betriebes von den mit Gas belegten Führungsflächen durch Desorption Gasteilchen in das Vakuumsystem ab, sobald diese in den Raum außerhalb eines Dichtsystems gelangen.

## 1.2 Stand des Wissens

### 1.2.1 Aerostatische Gaslager und Gaslagerelemente

Bereits 1854 entwickelt der französische Physiker Gustave-Adolphe Hirn erste Gedanken, Luft als Schmiermedium einzusetzen. Die praktische Anwendung der Gasschmierung beginnt jedoch erst ein Jahrhundert später mit intensiven Entwicklungs- und Forschungsarbeiten in den 50er und 60er Jahren.

Seither wurden eine Vielzahl detaillierter theoretischer und experimenteller Untersuchungen zur Beschreibung der Eigenschaften von Gaslagern und Gaslagerelementen durchgeführt. Auf analytischer Ebene sind, ausgehend von geschlossenen Näherungsgleichungen, die eine schnelle Abschätzung der Trageigenschaften ermöglichen, bis hin zu sehr exakten, aber auch sehr auf-

## 1 Einführung

wendigen dreidimensionalen numerischen Berechnungsmodellen, verschiedenste Werkzeuge zur Dimensionierung entwickelt worden.

### Statische Kennwerte

Unterberger stellt in [8] Untersuchungsergebnisse rotationssymmetrischer Lagerelemente mit Auslassdrosselung bzw. zentraler Düse und Tasche vor. Zur Berechnung der Tragkraft gibt er eine geschlossene Näherungsgleichung an. Wiemer [9] behandelt die zum Verständnis der Gasschmierung erforderlichen theoretischen Grundlagen und liefert umfangreiche Unterlagen zur Berechnung von Lagerelementen mit zentraler Einzeldüse und mit mehreren Düsen.

Loch [10, 11] beschreibt durch das Zusammensetzen rechnerisch einzeln erfassbarer Grundelemente (Einzeltragfelder) das Verhalten von Lagerelementen und komplexeren Lagern. Für rechteckige und kreisförmige über einen Drosselspalt bzw. Einzeldüsen gespeiste Grundelemente werden Auslegungsgleichungen angegeben, die eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen zeigen. Auch Unterberger [12] zerlegt Lager und Lagerelemente mit mehreren Düsen in Grundelemente mit je einer Düse und schafft es so, die Auswirkungen von unsymmetrisch einwirkenden Kräften bzw. Momenten abzuschätzen. Die von ihm als Elementarlager bezeichneten rotationssymmetrischen Grundelemente werden so aneinander gesetzt, dass sich ihre Wirkungsbereiche gerade tangieren und somit eine unabhängige Berechnung der Trageigenschaften dieser Elemente möglich wird.

Zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Lagerelementen mit Düsen werden verschiedene Wege verfolgt [13–19].

Mertel [13] arbeitet mit Speisedrücken bis 100 bar, um die Tragfähigkeit zylindrischer Lagerelemente mit zentraler Düse und Tasche zu steigern. Bei der Berechnung des Druckprofils führt er slip-Randbedingungen<sup>‡</sup> ein, um den Einfluss eines möglichen Übergangs der Kontinuumsströmung zur Knudsenströmung bei geringen Spalthöhen zu prüfen. Aufgrund der geringen Auswirkungen auf den Druckverlauf sieht er den erhöhten Rechenaufwand nicht gerechtfertigt.

Mussgnug [14] und später auch Donat [15] verbessern die Tragfähigkeit ebener Düsenlagerelemente, indem sie Mikroverteilerkanäle in den Lagerbereich einarbeiten. Die von den Düsen mit Beruhigungskammer ausgehende Kanalstruktur führt zu größeren Bereichen konstanten Druckes, ohne dass wie

---

<sup>‡</sup>Die Strömungsgeschwindigkeit an den Berandungen des Spaltes ist größer Null.

bei auslassgedrosselten Lagerelementen ein großes Totvolumen entsteht. Zur Dimensionierung dieser Lagerelemente entwickelt Donat [16] ein umfangreiches Formelwerk. Bei der Analyse der Strömungsverhältnisse im Spalt zeigt er für geringe Spalthöhen einen Übergang von der Kontinuumsströmung zur Knudsenströmung auf. Ebenso wie Mertel [13] berücksichtigt Donat diesen Übergang in den Berechnungen durch das Einführen von slip-Bedingungen und weist nach, dass erst bei sehr geringen, technisch nicht mehr relevanten Spalthöhen kleiner  $1\ \mu\text{m}$  merkliche Abweichungen in der Druckverteilung gegenüber einer rein ausgeprägten Kontinuumsströmung auftreten. Er schlussfolgert, dass der Übergang der Strömungsformen bei der Auslegung der Lagerelemente nicht berücksichtigt werden muss.

Die Tragkraft lässt sich ebenfalls durch flächig diskret über den Lagerbereich verteilte Mikrodüsen steigern. Köhler [17] stößt bei der Beschreibung der Eigenschaften solcher Lagerelemente an die Grenzen der geschlossenen Berechnungsverfahren und entwickelt ein Finite-Elemente-Modell. Die prinzipiellen Zusammenhänge der fluidischen Größen innerhalb des Modells veranschaulicht er unter Ausnutzung von Analogiebeziehungen anhand eines elektrischen Netzwerkes.

Heinzl und Schulz [18] sowie Fan et al. [19] präsentieren zur Herstellung flächig diskret verteilter Mikrodüsen alternative Fertigungstechnologien zum herkömmlichen Bohren. Schulz fertigt Düsen bis zu einem minimalen Durchmesser von  $25\ \mu\text{m}$  mit dem Laser und erhält Lagerelemente, die aufgrund einer hohen Dämpfung auch bei hohen Versorgungsdrücken betrieben werden können. Fan et al. nutzen Halbleitertechnologien zur Fertigung der Lagerelemente in Silizium. Im Gegensatz zu den klassischen gebohrten Düsen mit kreisförmigem Querschnitt führt die Mikrostrukturierung des Siliziums durch anisotrope Ätzprozesse zu Einlassdrosseln mit quadratischem, sich in Richtung der Austrittsfläche verjüngendem Querschnitt. Es werden sehr kleine Drosselquerschnitte von minimal  $30\ \mu\text{m}^2$  erzielt.

Ebenso wie zur Tragkraft werden auch Untersuchungen zur Steigerung der maximalen statischen Steifigkeit von Lagerelementen durchgeführt [20–23].

Boffey et al. [20] untersuchen die Abhängigkeit der maximalen Steifigkeit eines Lagerelementes mit zentraler Einzeldüse und Mikroverteilerkanal vom Düsendurchmesser. Sie weisen experimentell nach, dass mit kleiner werdendem Durchmesser die maximale Steifigkeit ansteigt und sich der Gasverbrauch sowie die Spalthöhe, bei der die maximale Steifigkeit erreicht wird, verringern. Ausgehend von diesem Zusammenhang setzt Yoshimoto [21] in ein Lagerelement mit Mikroverteilerkanälen an Stelle einer Einzeldüse eine



## 1 Einführung

zentrale Einlassdrossel aus porösem Material mit einem Durchmesser von 1...3 mm ein. Durch die wesentlich stärkere Drosselung verschiebt sich die optimale Spalthöhe des Lagerelementes auf Werte unter einem Mikrometer und es wird gegenüber dem Düsenelement eine zehnfach höhere Steifigkeit erzielt.

Blondeel et al. [22] und Vermeulen et al. [23] integrieren in Lagerelemente mit zentraler Düse eine die Funktionsfläche bildende konische Membran, die sich lastabhängig durchbiegt und so passiv eine zusätzliche variable Auslassdrosselung hervorruft. Auf diese Weise erzielen sie bei einer großen Spalthöhe eine nahezu unendliche Steifigkeit.

Durch die fortschreitende Entwicklung der Rechentechnik und aufgrund der komplizierten Beschreibung von Lagerelementen mit einer Vielzahl von Düsen werden in neueren Arbeiten zunehmend verschiedenste numerische Verfahren zur Berechnung der Eigenschaftscharakteristiken angewendet. So nutzen z.B. Stout et al. [24] die Finite-Differenzen-Methode, Fan et al. [19] die Spektral-Elemente-Methode oder Weck et al. [25] die Finite-Elemente-Methode.

Ebenfalls auf Basis der Finite-Elemente-Methode führt Dormann [26] umfangreiche Simulationen der Strömungsverhältnisse für quaderförmige und zylindrische Lagerelemente mit diskreter Düsenverteilung durch. Sowohl die Spaltströmung als auch die Strömung durch die Einlassdrosseln wird nachgebildet. Die Simulationstechnik ermöglicht es Dormann auch zu zeigen, dass das Druckpolster in Führungen eingesetzter Lagerelemente selbst durch hohe Verfahrgeschwindigkeiten (10 m/s) nicht wesentlich beeinflusst wird.

Poröse Lagerelemente, deren Einlassdrossel sich über den gesamten Lagerbereich erstreckt, können durch das breite Druckgebirge ebenso wie Lagerelemente mit flächig diskret verteilten Mikrodüsen hohe Lasten aufnehmen. Aufgrund des vollflächigen Gasaustrittes gestaltet sich die Berechnung der porösen Lagerelemente ungleich schwerer als für Lagerelemente mit Einzeldüsen oder mehreren Düsen. Zur Auslegung wird daher fast ausschließlich auf numerische Verfahren zurückgegriffen.

Eine der ersten umfangreichen Arbeiten zur Dimensionierung zylindrischer poröser Lagerelemente veröffentlichen Gargiulo et al. [27]. Sie berechnen die Trageigenschaften numerisch mittels der Finite-Differenzen-Methode. Die Arbeit beinhaltet zudem zahlreiche experimentelle Untersuchungsergebnisse. Murti [28] gelingt es, den Druckverlauf im Spalt solcher Lagerelemente unter der Annahme eines eindimensionalen Strömungszustandes in geschlossener analytischer Form anzugeben. Er vergleicht von ihm

analytisch ermittelte Abhängigkeiten mit experimentellen Ergebnissen von Gargiulo et al. und stellt eine sehr gute Übereinstimmung fest.

In einer Vielzahl von Arbeiten [29–37] werden die Randbedingungen für die Strömung durch einen Spalt mit poröser Wand diskutiert und deren Auswirkungen auf die Eigenschaften von Lagerelementen mit poröser Drosselschicht untersucht [37–41].

Ausgehend von rein theoretischen Betrachtungen formulieren Ishizawa et al. [29] eine slip-Bedingung unter der Annahme, dass die Strömungsgeschwindigkeit nach Darcy an der porösen Grenzfläche gleich der Strömungsgeschwindigkeit im Spalt ist.

Beavers et al. [30, 31] experimentieren zunächst mit inkompressiblen Medien und beobachten einen erhöhten Durchfluss durch den Spalt, den sie auf eine tangentielle Gleitgeschwindigkeitskomponente an der porösen Grenzfläche zurückführen. Der von ihnen empirisch entwickelte Ansatz geht davon aus, dass die Strömungsgeschwindigkeit an der Grenzfläche innerhalb des porösen Materials in die Strömungsgeschwindigkeit nach Darcy übergeht. Die Gültigkeit des Ansatzes bleibt dabei auf Spalthöhen größer dem Porendurchmesser des porösen Materials beschränkt. Taylor [32] und Richardson [33] bestätigen mit einem anderen Experiment die von Beavers et al. [30] für die poröse Oberfläche eingeführte slip-Bedingung. Sparrow et al. [35] schlagen gestützt durch eine theoretische Analyse von Saffman [34] eine modifizierte slip-Bedingung vor, in der die Strömungsgeschwindigkeit nach Darcy vernachlässigt wird. In einer weiteren Arbeit bestätigen Beavers et al. [36] die Gültigkeit der in [30] aufgestellten Randbedingung für kompressible Medien.

Rao [38] verwendet den Ansatz von Sparrow et al. [35] für die Berechnung ebener Lagerelemente und berichtet, dass Tragkraft und Gasverbrauch durch die slip-Bedingung reduziert werden. Singh et al. [39, 40] nutzen die Gleitansätze von Ishizawa et al. [29], Beavers et al. [30] und Sparrow et al. [35] für die Berechnung der statischen Charakteristiken verschiedener ebener Lagerelemente. Sie beobachten, dass die Gleitbedingungen für die poröse Oberfläche gegenüber der Haftbedingung zu einer reduzierten Tragkraft und – im Widerspruch zu Rao [38] – zu einem erhöhten Gasverbrauch führen.

Kwan et al. [37] bestimmen mit einem an Beavers et al. [36] angelehnten Experiment den Gleitfluss an einer porösen Keramikoberfläche bei Spalthöhen, die für die Gasschmierung typisch sind. Ihre experimentellen Ergebnisse zeigen, dass der beobachtete erhöhte Gasstrom durch den Spalt nicht mit der Vorhersage nach dem Ansatz von Beavers et al. übereinstimmt, sondern besser durch einen additiven Beitrag zur Spalthöhe wiedergegeben wird.