# Strömungen in arbeitsraumbegrenzenden Spalten von trockenlaufenden Schraubenmaschinen Gas flow in clearances between working chambers of dry running <sup>screw</sup> machines

Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dipl.-Ing. R. Sachs, Dortmund

(Diese Arbeit wird dankenswerterweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert)

# Zusammenfassung

Gasströmungen in Schraubenmaschinen sind von Bedeutung, weil sie einen wesentlichen Einfluß auf Gütegrad, Liefergrad und thermische Bauteildehnung der Maschine haben. Die Spaltströmungen wirken als Leckmassen- und Entropieströme innerhalb der Maschine und damit auf die gesamte Energiewandlungsgüte jeder engspieligen Verdrängermaschine.

Die zu erwartende Komplexität der instationären Strömungsverhältnisse an den Spalten Sowie in der Arbeitskammer legt eine experimentelle Vorgehensweise zur Untersuchung dieser Gasströmungen nahe. Auf Grund der schwer zugänglichen Geometrie des Profileingriffspaltes in Zusammenhang mit meßtechnischen Problemen, dient als Versuchsgrundlage für derartige Untersuchungen ein ebener, geradverzahnter Stirnschnitt durch eine Schraubenmaschine. Eine qualitative Visualisierung der Strömungen in diesem 1:1 Modell wird mit Hilfe der Schlierentechnik unter Verwendung einer sehr kurzen Belichtungszeit  $(0,5\mu s)$  der Einzelbilder erreicht. Mittels einer Wechselbeziehung von strömungsmechanischer Charakterisierung und Experiment wird ein Beitrag zur zunächst qualitativen Klärung des komplexen Strömungsverhaltens in Schraubenmaschinen angestrebt.

# Summary

Gas flows in screw-type machines are important because of their vital influence on the efficiency, the volumetric efficiency as well as the thermal extension of the machine. The gas flows through the clearances have an effect on the entire energy conversion of every displacement type machine by leakage mass flows and entropy flows inside the machine.

The expected complexity of the non-steady flow conditions at these gaps and inside th working chamber suggests research by experiment. As the complicated geometry of the profile meshing clearance provides problems with view to measuring techniques, a plane non-screwed profile has been the chosen basis for the experiment. A qualitative flow visualisation at an 1:1 model is achieved by applicating the Schlieren-technique with a short exposure time (0.5µs) for single pictures. Combining theoretical considerations with experiments, it is meant to be a contribution towards a qualitative definition of the complex flow-behaviour in screw-type machines.

# 1 Einleitung

Schraubenmaschinen werden als Schraubenkompressoren, -lader und -motoren in der Forschung behandelt. Gasströmungen in Schraubenmaschinen sind sowohl als Arbeitskammer- als auch als Spaltströmung von Interesse, weil Liefer- und Gütegrade dadurch signifikant beeinflußt werden. Eingehendere experimentelle Untersuchungen der Gasströmungen sind bisher nicht durchgeführt worden, obwohl gerade in trockenlaufenden Maschinen die Dichtwirkung einer Hilfsflüssigkeit, z.B. Öl oder Wasser, zur Verringerung der Spaltmassenströme nicht genutzt werden kann.

Für ein experimentelles Vorgehen wird ein ebener Stirnschnitt durch eine Schraubenmaschine gewählt, um an diesem Modell die Strömung sowohl bei feststehender, als auch später bei bewegter Berandung mit Hilfe der Schlierentechnik zu visualisieren. Aus der qualitativen Beschreibung der Gasströmungen können Wege abgeleitet werden, um konstruktive Maßnahmen zur Spaltströmungsbehinderung aufzuzeigen, die ihrerseits die Energiewandlungsgüte von trockenlaufenden Schraubenmaschinen verbessern helfen.

Dieser Beitrag beinhaltet den Aufbau und die Anpassung der Versuchs- und Meßtechnik, sowie Strömungsuntersuchungen an Gehäusespalt- und Arbeitskammerströmungen mit zunächst feststehenden Berandungen.

# 2 Spaltproblematik und Stand der Forschung

Die arbeitsraumbegrenzenden Spalte üben den Haupteinfluß auf die Energiewandlungsgüte sowie auf die Betriebssicherheit der Schraubenmaschine aus, weil als Funktion der Spaltflächen und Spaltdruckverhältnisse Leckmassen- und Enthalpieströme innerhalb der Maschine wirksam sind [1]. Die verschiedenen Spalte in der Maschine, der

- Stirnspalt,
- Gehäusespalt,
- Profileingriffsspalt und die
- Kopfrundungsöffnung (Blasloch)

sind im Anhang "Arbeitsraumbegrenzende Spalte der Schraubenmaschine" des Heftes "Schraubenmaschinen; Forschungsberichte des FG Fluidenergiemaschinen" [1] beschrieben.

Über experimentelle Untersuchungen der Gasströmungen in Arbeitsräumen und Spalten trockenlaufender Schraubenmaschinen sowie in den Spalten der Maschine existieren nach Kenntnis der Verfasser keine Arbeiten.

Peveling [2] untersuchte diverse ebene Spaltformen für den Fall einer stationären Gasströmung mit feststehender Spaltberandung. Gemessen wurden Durchflußbeiwerte als Funktion der Spalthöhe und des Spaltdruckverhältnisses. Mit den experimentell ermittelten Durchflußbeiwerten wurden in einem Simulationsprogramm die Spaltpriopitäten für einen Schraubenkompressor bestimmt und auf räumlich gekrümmte Spalte übertragen.

In Arbeiten von *Jacobsen* [3] und *Scherer* [4] wird auf den Durchfluß der Spalte in Durchblicklabyrinthen eingegangen. In diesem Fall der Strömung durch Räume mit bewegter Berandung stehen Strömungs- und Wandbewegungsrichtung stets orthogonal zueinander.

*Dreißig* [5] hat den Einfluß der Relativbewegung einer Spaltbegrenzungsfläche in der und gegen die Strömungsrichtung auf den Spaltdurchfluß untersucht. Er geht davon aus, daß die Strömung im Spalt mit einer Couette-Strömung verglichen werden kann. Bei der Übertragung der Ergebnisse auf die realen Spalte eines Schraubenmotors nimmt *Dreißig* eine stets senkrecht zur Spaltausdehnung verlaufende, homogene Strömung an.

Dörr [6] geht auf die Übertragbarkeit von Spaltdurchfluß-Untersuchungen an großen Modellen auf reale Spalthöhen ein. Die Arbeit bezieht sich auf die Verhältnisse an Durchblicklabyrinthen. Dörr gibt eine empirische Gleichung an, mit der bis zu Druckverhältnissen von ca. 1,4 Leckverlustübertragungen möglich sind. Eine genaue Beurteilung der sehr komplexen Strömungsvorgänge wurde nicht beschrieben.

Für eine stationäre, isentrope und adiabate Düsenströmung beträgt die Reynolds-Zahl für Luft, ein überkritisches Druckverhältnis, eine Eintrittstemperatur von 20°C und einer Kanalweite von 0,1mm Re=8500. Bei Spaltströmungen mit dieser Größenordnung der Reynolds-Zahl treten *kohärente Strukturen in der turbulenten Strömung* auf, die sehr empfindlich auf eine Änderung der Randbedingungen, wie die Größe des Strömungskanales sowie dessen Oberflächengüte (Wandrauhigkeit) reagieren, *Gersten* und *Herwig* [7]. Sind also die durch-

strömten Spalte genügend klein, können Einflüße der Grenzschicht wirken, die in Modellen mit vergrößernden Maßstabsfaktoren nahezu verschwinden. Weiterhin ist zu beachten, daß bei einer Übertragung vom Modellspalt zum Originalspalt neben einer Reynolds-Zahl-Ähnlichkeit auch die Mach-Zahl-Ähnlichkeit erforderlich ist, um repräsentative Aussagen zu erhalten. Die Machzahl ist - wie die Reynolds-Zahl - eine Funktion u.a. der Spaltweiten und der anliegenden Druckdifferenzen. In Untersuchungen an maßstäblich vergrößerten Modelldüsen konnten gasdynamische Effekte, wie *schwingende Verdichtungsstöße in Überschall-strömungen*, im Gegensatz zur Originaldüse, von den Autoren nicht nachgewiesen werden. Diese von der Machzahl abhängigen Erscheinungen beeinflußen die Strömung bzw. die Strömungsgrenzschicht wesentlich, *Schlichting* [8]. Da genaue Aussagen über die Strömung in den Spalten von trockenlaufenden rotierenden Verdrängermaschinen nicht vorliegen, aber komplexe Zusammenhänge erwartet werden müssen, ist es sinnvoll und notwendig, *Untersuchungen mit realen Spalthöhen* durchzuführen. Dabei war mit erheblichen experimentellen Schwierigkeiten a priori gerechnet worden.

Um eine Strömung qualitativ zu beurteilen, wird das *Schlierenverfahren* verwendet. Diese Technik zur Strömungssichtbarmachung zeichnet sich vor allem dadurch aus, daß der Verlauf der Strömung in keiner Weise durch das Verfahren selbst gestört wird und ein Bild des gesamten Strömungsfeldes zustande kommt.

Die Verschraubung der Rotoren in der Schraubenmaschine verhindert eine axiale Durchsicht durch die Maschine. Die optische Zugänglichkeit der Versuchseinrichtung fordert einen ebenen, nicht verschraubten *Profilschnitt*. Ein solcher Schnitt stellt die einzige bekannte Möglichkeit zur ganzheitlichen optischen Strömungsuntersuchung am Profileingriffsspalt bereit. Der Gehäusespalt ist in dieser Ansicht ebenfalls in axialer Richtung sichtbar. Die nach *Peveling* [2] für die Energiewandlungsgüte wichtigsten Maschinenspalte können so strömungsmechanisch untersucht werden.

Um eine möglichst große Realitätsnähe zu erreichen, ist es wie erwähnt notwendig Strömungsuntersuchungen sowohl an einem ebenen Modell mit *nicht bewegter*, als auch mit *bewegter Spaltberandung* auszuführen.

So sollen zum einen durch einen Vergleich der Strömungen in beiden Modellen Aussagen über den Einfluß der bewegten Spaltberandung auf das Strömungsverhalten möglich werden; zum anderen ist die hier zur Strömungssichtbarmachung genutzte Schlierentechnik bisher noch nicht bei extrem kleinen Strömungskanalhöhen von ≤0,1mm eingesetzt worden. Daraus ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit, zunächst an feststehenden Spaltberandungen diese Meßtechnik dem Spaltströmungsproblem anzupassen. Verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Düsenkonturen haben gezeigt, daß bei Kanallängen (die Kanal- oder Spaltlänge entspricht der Dicke der Kontur- bzw. Rotorscheiben) von 2 bis 15mm keine Änderung der Strömungsbilder in Abhängigkeit von der Länge auftritt. Daher, sowie durch Vergleich mit Schlierenbildern aus der Literatur [9], [10] ,wird für die hier gezeigten Strömungsbilder in guter Näherung von einer nur ebenen Strömung ausgegangen.

**Bild 1** enthält die wichtigsten Bezeichnungen des *ebenen Schnittmodells*. Im Gegensatz zu einer realen Schraubenmaschine besitzt das angetriebene zweidimensionale Modell keine innere Verdichtung. Der Gegendruck am Ausgang der Maschine wird erst durch eine Drossel druckseitig ermöglicht werden. Eine Änderung des Druckes in den Arbeitskammern können nur Leckströmungen durch die Gehäusespalte verursachen.



Bild 1: Stirnschnitt eines 4+6 Rotorpaares des ebenen Schraubenverdichtermodells

- 1 = Hauptrotor
- 2 = Nebenrotor
- 3 = Arbeitsraum
- 4 = Gehäusespalt
- 5 = Profileingriffsspalt
- 6 = Drossel

#### Figure 1: Vertical cut of the 4+6 rotor pair of the plane screw compressor model

- 1 = Male rotor
- 2 = Female rotor
- 3 = Working chamber
- 4 = Housing gap
- 5 = Profile meshing clearance
- 6 = Throttle

Die Strömung mit nicht bewegter Berandung wird mit Hilfe der in **Bild 2** gezeigten *Kontuplatten*, die in den Modell-Windkanal der im Kapitel 3 beschriebenen Schlierenanlage einsetzbar sind, visualisiert.



Bild 2: Querschnitt durch Modell-Windkanal mit ebenen Konturplatten zur Visualisierung der Strömung mit nicht bewegter Berandung a) Hauptrotor-Gehäusespalt

- b) Nebenrotor-Gehäusespalt und Arbeitskammer am Nebenrotor
- Figure 2: Cross-section of model wind tunnel with plane contour sheets for visualisation of the gas flow with not moving bounds
  - a) Housing gap at male rotor
  - b) Housing gap and working chamber at female rotor

# 3 Meßtechnik

Zur Strömungsuntersuchung wird die im folgenden beschriebene Technik verwendet.

# 3.1 Schlierentechnik

Die Schlierentechnik ist ein bildgebendes optisches Verfahren zur Visualisierung von Dichteänderungen in lichtdurchlässigen Medien.

Zur Klärung des Begriffes "Schliere" wird eine Definition von Schardin [11] verwendet:

"Die Ursache für jede auf ein verhältnismäßig kleines Gebiet beschränkte irreguläre Ablenkung des Lichtes werde als Schliere bezeichnet." An der Grenzfläche zwischen zwei optisch unterschiedlich dichten Stoffen wird ein einfallender Lichtstrahl gebrochen (Snelliussches Brechungsgesetz). Den Zusammenhang von Brechzahl n und Dichte  $\rho$  des optisch durchlässigen Mediums beschreibt die *Gladstone-Dale Gleichung*, [12]. Für kompressible Gasströmungen ist somit die Grundlage für den Einsatz der Schlierentechnik gegeben.

Das Verfahren zeichnet sich bei der Anwendung zur Strömungssichtbarmachung vor allem dadurch aus, daß der Verlauf der Strömung in keiner Weise durch die Untersuchung beeinflußt wird und ein zusammenhängendes Bild eines Strömungsfeldes gewonnen werden kann. Voraussetzung für die Anwendung der Schlierenmethode als sogenannte Durchlichttechnik ist das Vorhandensein einer ebenen, schlierendurchsetzten Strömung.

# 3.1.1 Aufbau und Funktionsprinzip der eingesetzten Schlierenanlage

Die verwendete Schlierenanlage arbeitet nach dem Toeplerschen Schlierenverfahren, [13], mit einem Strahlengang in Z-Anordnung.

Die Komponenten der hier weiterentwickelten Schlierenanlage sind in **Bild 3** mit dem Strahlengang von der Lichtbogenlampe bis zur Schlierenblende dargestellt. Der Arbeitsraum, d.h. der *Modellwindkanal* (oder das ebene Schraubenmaschinenmodell) ist verfahrbar gestaltet. Das erleichtert Umbau- und Wartungsarbeiten an den Modellen sowie die Justage der Schlierenanlage.

Von der zunächst als punktförmig angenommenen Lichtquelle verläuft der *Strahlengang* über zwei Hohlspiegel, den Beleuchtungsspiegel und den Schlierenkopf, zur Schlierenblende und fällt auf ein bildaufnehmendes Medium, hier eine Video-Kamera. Zwischen den Spiegeln bleibt der Strahlengang parallel, denn zum einen ist ihr Abstand dann variabel gestaltbar, zum anderen setzt *Woehl*, [14], parallele Lichtstrahlen im Untersuchungsgebiet als Grundlage für eine quantitative Bildauswertung voraus.

Der durch eine *Schliere im Arbeitsraum* um den Winkel  $\varepsilon$  abgelenkte Lichtstrahl trifft auf die Schlierenblende; es kommt zu einer Abdunkelung an der Stelle des entsprechenden Objektpunktes. Wird der Lichtablenkwinkel  $\varepsilon$  negativ, entsteht analog dazu eine Aufhellung (siehe auch  $\Delta a_y$  im **Bild 4**). Im Gegensatz zum Schattenverfahren, bei dem keine Schlierenblende eingesetzt wird, folgt daraus eine eindeutige Zuordnung des Winkels der Lichtstrahlablenkung durch einen *Dichtegradienten zur Helligkeitsänderung* im Schlierenbild. Alle Lichtablenkungen senkrecht zur Kante der Schlierenblende bleiben ohne Einfluß auf das Schlierenbild (siehe auch  $\Delta a_z$  im **Bild 4**).



d 3: Aufbau der eingesetzten Schlierena	nlage
---	-------

- LX = Xenon-Lichtbogenlampe Ko = Kondensor
- W = Wärmeschutzfilter
- Ac1 = Achromat
- BB = Beleuchtungsblende
- BS = Beleuchtungsspiegel
- A = Arbeitsraum
- S = Schliere
- SK = Schlierenkopf
- SB Schlierenblende

- Ac2 = Achromat
- Ob = Kameraobjektiv
- Ba = Balgengerät
- = CCD-Kamera Ka
- ST = Kamera-Steuergerät
- VCR = Videorecorder
- PC1 = Bildverarbeitungscomputer
- = Reflexionswinkel  $2\alpha$ 
  - = Lichtablenkwinkel

# Figure 3: Arrangement of the applied schlieren apparatus

LX	=	Xenon gas discharge lamp	Ac2	= Achromat
Ko	=	Condensor	Ob	= Camera objectiv
W	=	Heat protection filter	Ba	= Bellows
Ac1	=	Achromat	Ka	= CCD-camera
BB	=	Light aperture	ST	= Camera-controller
BS	=	Light mirror	VCR	= Video recorder
Α	=	Working sektion	PC1	= Computer for image analysis
S	=	Schliere (Streak)	2α	= Angel of reflection
SK	=	Schlieren mirror	£	= Angel of light diffraction
SB		Schlieren aperture	C	5 5

ε

# 3.1.2 Empfindlichkeit und Arbeitsbereich

Die Empfindlichkeit, d.h. der minimal von der Schlierenblende auflösbare Lichtablenkwinkel  $\varepsilon_{min}$  und der Arbeitsbereich, d.h. der relativ dazu maximale, eindeutig auflösbare Winkel  $\varepsilon_{max}$ , ist von *Schardin*,[11], ausführlich beschrieben worden.

Eine spaltförmige Beleuchtungsblende sowie eine Schneide als Schlierenblende sind so ausgerichtet, daß die in **Bild 4** gezeigte Lage des Lichtquellenbildes auf der Schlierenblende vorliegt.



Bild 4: Lage des Lichtquellenbildes auf der Schlierenblende

Figure 4: Position of the picture of the light source on the Schlieren aperture

b = Lichtquellenbreite

- h = Lichtquellenhöhe
- a = Resthöhe des Lichtquellenbildes hinter der Schlierenblende
- = breadth of the light source
- = height of the light source
- = residual height of the light source picture behind the Schlieren aperture
- $\Delta a_{y,z}$  = Verschiebung des Lichtquellen- = shift of light source picture by streaks bildes durch Schlieren

Es ist nicht immer sinnvoll, die maximale Empfindlichkeit der Anlage auszunutzten. Der mögliche Arbeitsbereich umfaßt nicht alle maximal auftretenden Dichteänderungen. Es kommt zu sogennanten *Überladungserscheinungen*, d.h. die stärksten Gradienten im Bild werden überzeichnet. Sie sind schwarz oder weiß und lassen keine weitere Auflösung zu. In diesem Fall muß die Empfindlichkeit gesenkt werden. Das mindert gleichzeitig das Problem des zu großen Einflusses der Beugung an der Schlierenblende.

# 3.1.3 Einfluß der Abbildungsfehler

Durch den seitlichen Lichteinfall in die Spiegel tritt ein astigmatischer Bildfehler auf. Das Lichtstrahlenbündel der Lichtquelle, welches ursprünglich einen kreisförmigen Querschnitt besitzt, nimmt nach der Reflexion durch die beiden Spiegel einen ellipsenförmigen Querschnitt an. Der Hohlspiegel hat in der meridionalen (x-y) Ebene einen anderen Brennpunkt als in der sagittalen (y-z). Die meridionale ist die Ebene stärkerer Brechung. An dem Ort des meridionalen (sagittalen) Brennpunktes hat der sagittale (meridionale) Lichtschnitt die Form einer Bildlinie. Es ist, um eine scharfe Abbildung zu erhalten, notwendig, eine schneidenförmige Schlierenblende (hier werden Rasierklingen eingesetzt) im jeweiligen Brennpunkt parallel zur entsprechenden Bildlinie zu orientieren, denn die Abweichung des Lichtbündels zur Linie werden dann nicht von der Schlierenblende erfaßt. Abweichende Drehwinkelstellungen der Blende führen zu unscharfer Bildwiedergabe.

# 3.1.4 Beugungserscheinungen

Die Lichtbeugung wird innerhalb des Welle-Teilchen-Dualismus' des Lichtes mit der Wellentheorie erklärt und ensteht immer dann, wenn die freie Ausbreitung der Wellen behindert wird (Huygenssches Prinzip). Beugung findet demnach u.a. an allen Kanten statt, nicht etwa nur an engen Öffnungen. Es ist aber zu beachten, daß der Anteil der gebeugten Randstrahlen im Verhältnes zu der ungehindert hindurchtretenden Strahlung um so größer ist, je kleiner die Öffnung wird. Bei der Anwendung des Toeplerschen Schlierenverfahrens kommen aus verschiedenen Ursachen Beugungserscheinungen vor.

An der Schliere selbst tritt ebenfalls Beugung auf. *Schardin*, [11], leitet ab, daß das Resthöhenbild hinter der Schlierenblende eine erforderliche Mindestgröße a<sub>min</sub> haben muß, um keine Änderung der Helligkeitsverhältnisse durch Beugung an der Schliere hervorzurufen.

Auch die Schlierenblende ruft eine Lichtbeugung hervor. Bei Verwendung einer Schneide als Schlierenblende kann die Schneidenkante als die eine Begrenzung, die gerade Kante des Lichtquellenbildes als die andere Begrenzung gesehen werden. So entsteht ein Spalt bestimmter Weite. Die hier auftretende Beugung am Spalt wird besonders stark bei sehr empfindlicher Einstellung der Anlage, also bei kleiner Spaltweite a.

An der Grenzfläche von undurchsichtigen Objekten im Arbeitsraum, wie der Spaltberandung, wird das Licht gebeugt. Dieser Effekt stört das Schlierenbild, wenn die Ränder nicht senkrecht zur Schlierenblende (Schneide) stehen. Um diesen Rand entsteht dann ein Saum, der bei sehr engen Spalten dazu führt, daß diese für die Schlierenoptik undurchsichtig werden. Um die Strömung in entsprechend kleinen Spalten beobachten zu können, ist es daher notwendig, die Schneide genau orthogonal zur Spaltberandung zu positionieren. In diesem Fall können nur Dichtegradienten in Spalt-, d.h. in Strömungsrichtung erfasst werden, nicht orthogonal dazu.

# 3.2 Bildaufnahme

Ziel ist das Aufnehmen eines qualitativ hochwertigen Strömungsbildes. Das bedeutet, das Bild sollte gut durchgezeichnet sein (schwarz im Original ist schwarz im Bild, weiß im Original ist weiß im Bild) und einen hohen *Kontrastumfang* besitzen. Es muß beachtet werden, daß die Belichtung eines Bildes stets dem Objektumfang, d.h. der vom Objekt der Kamera angebotenen Beleuchtung (Helligkeit und Kontraste) anzupassen ist.

Die hier verwendete PAL/CCD-Kamera verfügt über eine eingebaute elektronische Shutter -Funktion bis zu einer minimalen Belichtungszeit von 0,5 µs. Sie ist jedoch keine spezielle, serielle Kurzzeitbelichtungs-Kamera, d.h., sie besitzt eine unbefriedigende Bildqualität im Falle kurzer Belichtungszeiten und harter Objektkontraste. Es kommt in einer solchen Belichtungssituation, die bei der hier vorliegenden Anwendung als normal bezeichnet werden kann, zu dem sogenannten "Smear-Effekt". Das sind starke Überstrahlungen im Bild, die auf Streulicht in der Kamera, Restlicht sowie das Funktionsprinzip eines CCD-Chips (Ladungsverschiebungen in Registern), [15], zurückzuführen sind.

Eine Gegenmaßnahme zur Einschränkung der Überstrahlung ist die Reduktion des auf den Chip während eines Belichtungszyklus fallenden Lichtes sowie das Unterbinden von Streulicht. Es bleibt trotzdem bei einer Überstrahlung, die das Schlierenbild der Strömung überdeckt.

Weiterhin ist beachtenswert, daß diese Videokamera nach der CCIR-Norm arbeitet, d.h. nach dem 2:1 Interlace Verfahren, d.h. jede 1/25s wird ein neues Vollbild von der Kamera eingelesen. Dieses Vollbild besteht aus zwei Halbbildern, die bei gleicher Spaltenzahl jeweils die Hälfte der Reihen belegen. Da zwischen der Aufnahme von zwei Halbbildern ein Zeitintervall von 1/50s steht, ist ein Vollbild bei sich schnell ändernden Vorgängen (wie z.B. einer instationäre Gasströmung) eine Überlagerung von zwei Bildern und somit für eine eindeutige Auswertung unbrauchbar. Daher ist es erforderlich, nur Halbbilder einzulesen und diese dann zu verarbeiten.

# 3.3 Bildverarbeitung

Die bisher gewonnenen Strömungsaufnahmen haben aus verschiedenen Gründen eine relativ schlechte Qualität:

- Die Bildqualität wird durch Beugungsunschärfen beeinflußt.
- Weiterhin ist aufgrund der mangelhaften Kontrastwiedergabe der CCD-Kamera bei der hier verwendeten kurzen Belichtungszeit (ca. 0,5μs) der Grauwertumfang der Videobilder beschränkt.
- Schließlich bietet auch das Schlierenbild selbst bei geringen Dichtegradienten in der Strömung nur wenige Graustufen.
- Alle Strömungsbilder sind von Hintergrundfehlern überlagert, wie nicht schlierenfreien Glasplatten, Verunreinigungen in der Luft und auf den Glasplatten, etc.

Eine *Bildverarbeitung* ist in diesem Fall zweckmäßig im Sinne einer *Bildbearbeitung*. Diese Art der Bildmanipulation soll zu einer besseren Darstellung der Vorgänge in den Strömungsbildern dienen und ist so ein erster Schritt auf dem Weg zur Interpretation und Analyse der Vorgänge sowie einer Bildanalyse.

Das Erzeugen eines reinen Strömungsbildes auf der Grundlage eines Schlierenbildes, die sogenannte Normalisierung der Aufnahme, hat zum Ziel, ein Bild zu erhalten, das nur die Dichteänderungen im Untersuchungsraum durch die Strömung zeigt, Kauder, Sachs, [16]. Ausgeschlossen sind dann Fehler, die durch die Glasplatten verursacht werden, ungleichmäßige Bildfeldausleuchtung, Verunreinigungen sowie sonstige zeitlich und örtlich konstante Störungen. Voraussetzung dazu ist, daß neben dem Strömungsbild ein Bild des Versuchsfeldes ohne Strömung existiert. Diese Normalisierung erübrigt nicht das sorgfältige Arbeiten bei der Aufnahme des Schlierenbildes. So werden z.B. Verunreinigungen, die sich nur auf der Strömungsaufnahme befinden und nicht auf dem Referenzbild ohne Strömung, nicht heraus gerechnet. Es empfielt sich, das Hintergrundbild umgehend nach der Strömungsaufnahme zu machen. Auch das Streulicht in der Schlierenanlage, Überladungen auf der Schlierenaufnahme sowie die Raumkonvektion der Umgebungsluft sind weiterhin zu unterbinden.

Strömungsaufnahmen mit nur geringer Grauwerttiefe stellen besonders hohe Anforderung an die Auswertung. Da das menschliche Auge Farbunterschiede besser wahrnehmen kann als Grauwertdifferenzen liegt es nahe, Schwarzweiß-Bilder einer möglichst aussagefähigen Farbzuordnung zu unterziehen, hier wird von einer *Falschfarbendarstellung* gesprochen. Für das Auge steigt dann die Informationsdichte über den Verlauf der Änderung des Dichtegradienten. Das bedeutet nicht, daß auch die Strömungsform besser beurteilt werden kann. Es ist aber zu bedenken, daß das Bild der Strömung für den beurteilenden Menschen genauer wird, wenn ihm mehr Informationen zur Verfügung stehen. Da hier nicht **die** 

Möglichkeit besteht Farbbilder wiederzugeben, sei zu diesem Thema auf eine weitere Veröffentlichung der Verfasser hingewiesen [17].

# 4 Versuchstandaufbauten

# 4.1 Windkanal mit statischer Strömungsberandung

Zur Untersuchung von Strömungen mit nicht bewegter Spaltberandung wird in den Arbeitsbereich der Schlierenanlage ein Modell-Windkanal angeordnet, in den die verschiedenen arbeitsraumbegrenzenden Konturplatten eingebaut werden können. In **Bild 5** ist die Druckluftversorgung des Modellwindkanals gezeigt.



Bild 5:	Druckluftversorgung des
	Windkanals

Figure 5: Compressed air supply of the wind tunnel

1 = Schalldämpfer	= Silencer
2 = Elektromotor	= Electromotor
3 = Schraubenverdicht	ter= Screw type compressor
4 = Durchlaufkühler	= Continuous flow cooler
5 = Zyklonabscheider	= Cyclone seperator
6 = Aktivkohlefilter	= Activated charcoal filter
7 = Druckluftkessel	= Compressed air container
8 = Aktivkohlefilter	= Activated charcoal filter
9 = Feinstfilter	= Superfine filter
10 = Elektroheizer	= Electrical heater
11 = Stellventil	= Adiusting valve
12 = Modell-Windkanal	= Model wind tunnel

Nach der Verdichtung in einem Schraubenkompressor durchströmt die Luft einen Gas-Wasser-Kühler, bevor sie in einen Speicher gelangt.

Sie passiert weiter einen Zyklonabscheider sowie einen Aktivkohlefilter. Da dieser Umfang der Luftreinigung noch immer so viele Verunreinigungen im Windkanal hinterläßt, daß enge Spalte (<0,5mm) innerhalb von Sekunden für die Schlierenoptik

undurchsichtig werden, befindet sich hinter dem Kessel ein weiteres Aktivkohle- sowie ein Feinstfilterelement. Die komprimierte Luft wird anschließend einem elektrischen Heizer zugeführt. Die Luft muß vor dem Entspannen im Windkanal so weit aufgeheizt werden, daß keine Vereisungen durch einen zu starken Temperaturabfall entstehen. Es hat sich in der praktischen Versuchsdurchführung gezeigt, daß eine zu starke Lufterhitzung ebenfalls von

Nachteil ist. Liegt die Temperatur der Luft oberhalb von etwa 70°C, kann die Luft so viel Wasser und Öl aufnehmen, daß es an den ca. 20°C warmen Glasscheiben zu Kondensationserscheinungen kommt.

### 4.2 Ebenes Schraubenmaschinenmodell

Die Gesamtfunktion und die Anforderungen an die Konstruktion des ebenen Schraubenmaschinenmodells führen über konstruktionssystematische Untersuchungen zu einer Unterteilung in drei Funktionsbereiche, für die nach geeigneter Bewertung als Grundlage der Konstruktion des ebenen Schraubenmaschinenmodells die folgenden Varianten ausgewählt werden:

#### Synchronisationsgetriebe

Auf die Getriebeeingangswelle folgt die erste Zahnradstufe, um die Eingangsdrehzahl zu erhöhen. So wird dann die Nebenrotorantriebswelle getrieben. Von dieser Welle führen zwei Zahnradstufen, wiederum drehzahlsteigernd, zur Hauptrotorantriebswelle. Diese beiden Zahnradpaare sind gegeneinander verspannt, um die Rotorsynchronisation spielfrei zu gestalten. Vier Kurbelwangen des Kuppeltriebes befinden sich auf den Enden der Rotorantriebswellen.

#### Rotorbereich

Der Rotorbereich beinhaltet die beiden Rotorgehäusehälften. Darin sind die vom Kuppeltrieb angetriebenen Rotorwellen gelagert, auf denen die Rotorscheiben befestigt werden.

Um den Profileingriffsspalt einsehen zu können, darf die gesamte Wellenlagerung zwischen den Rotoren nicht mehr Platz einnehmen, als innerhalb der Rotorfußkreise zur Verfügung steht. Der Profileingriffspalt wird zum einen durch die Rotormaße, zum anderen durch die radiale Verdrehung der Rotoren zueinander festgelegt.

Da die Rotoren nicht an den den Strömungsraum in Durchblickrichtung begrenzenden Glasscheiben anlaufen dürfen und die Stirnspalte so klein wie möglich gehalten werden müssen ist eine genaue axiale Einstellbarkeit der Rotorwellen unerläßlich.

Nicht alle luftdurchströmten Bereiche, wie Arbeitskammern oder Spalte, sind in einem Rotormodell einsehbar (Lagerung der Rotorwellen). Daher werden zwei verschiedene Gehäusepaare des Rotorgehäuses in Abstimmung zu dem Getriebegehäuse gefertigt. Ein Umbau des Rotorbereiches, d.h. ein Austausch der Rotorgehäusehälften, ist erforderlich, um die sichtbaren Strömungsbereiche aus dem Gebiet zwischen den Rotorwellen nach außen zu verlegen.

#### Kuppeltrieb

Für die Verbindung der ersten beiden Funktionsbereiche scheidet ein Zahnradgetriebe auf Grund des dann notwendigen Bauaufwandes und eine Lösung mit Hilfe von Zahnriemen wegen mangelnder Übertragungsgenauigkeit bei den erforderlichen Umfangsgeschwindigkeiten aus. Bei dem daher gewählte Weg des Antriebes der Rotorscheiben mit Hilfe von Kuppelstangen werden diese sowohl an einer Rotor- als auch an einer Getriebewelle über einen gleichlangen Hebelarm befestigt und übertragen so die Drehbewegung. Pro Rotorwelle sind zwei um 90 Grad versetzte Stangen erforderlich, um die jeweiligen Totpunkte zu überwinden.



Bild 6 ist die schematische Darstellung eines solchen Getriebes zu entnehmen. Die Kuppelstangen geben periodisch alle Flächen, die nicht durch Gehäuseteile verdeckt sind, zur Durchsicht frei, ohne daß an der Lage des Getriebes oder der Antriebselemente etwas geändert werden muß. Hauptproblem dieser Lösung ist, daß durch eine möglichst vollständige Auswuchtung des Kuppeltriebes die Schwingungen im Betrieb des Schraubenmaschinenmodells beherrschbar bleiben und die Strömungsuntersuchungen nicht beeinträchtigt werden.

Bild 7 zeigt schematisch den Aufbau der Anlage zum Betrieb des zweidimensionalen Schraubenmaschinenmodells. Dieses wird in den Arbeitsbereich des Modell-Windkanals der in Kapitel 3 genannten Schlierenanlage eingebracht werden.



# 5 Strömungsaufnahmen am Gehäusespalt des Hauptrotors mit nicht bewegter Stömungsberandung

Zur Untersuchung des Gehäusespaltes am Hauptrotor befinden sich im Windkanal der Schlierenanlage (**Bild 3**) Konturplatten des Hauptrotors und des Gehäuses. Alle hier vorliegenden Aufnahmen sind mit einer Belichtungszeit von nur 0,5µs entstanden. Die Strömungsrichtung verläuft in allen Schlierenbildern (Bild 8 bis 11) von links nach rechts. Die Schlieren in den Strömungsaufnahmen stellen wie bereits erwähnt Dichteänderungen in Strömungsrichtung dar, weil die Schlierenblende aus Gründen der Lichtbrechung am durchströmten Spalt orthogonal zu diesem angeordnet sein muß (siehe Kap.3).

**Bild 8** verdeutlicht eine Gesamtansicht des Gehäusespaltes am Hauptrotor. Der Eingangsdruck wird von 2bar über 3bar auf 4bar gesteigert. Die Höhe des in Strömungsrichtung etwa 5mm langen Spaltes beträgt 0,4mm. Am Spalteintritt wird die einströmende Luft, wie an der mit dem Eingangsdruck deutlicher werdenden hellen Schliere erkennbar, verdichtet. Am Ende dieses Spaltes ist ein einseitig am Gehäuse anliegender Freistrahl zu sehen. Bei einem Eingangsdruck von 2bar zeigt sich an der Gehäusewand hinter dem Spalt auf der gesamten im Bild dargestellten Länge eine helle Zone. Das deutet auf einen Dichtegradienten durch eine Geschwindigkeitsänderung zur Wand hin. Der Schlierenkontrast an der Gehäusewand steigt mit dem Eingangsdruck. Die Strömung hinter dem Spalt verhält sich im gesamten Kontrastbereich instationär. Die Struktur dieser Strömung, die gut in dem Bild mit 4bar Eingangsdruck zu erkennen ist, ändert sich nicht bei einer Änderung der Wandrauhigkeit im Bereich einer gemittelten Rauhtiefe von  $R_z=2,5\mu$ m bis  $R_z=160\mu$ m.

Im folgenden **Bild 9** ist die Spaltströmung des **Bildes 8** in einem größeren Aufnahmemaßstab dargestellt.

Die erste Aufnahme ist ein Bild des Spaltes ohne Durchströmung des Spaltes, ein sogennantes *Hintergrundbild* (siehe Kap. 3.3). Hier sind *Hintergrundsfehler* wie eine ungleichmäßige Belichtung des Bildes und Verunreinigungen im Spalt sowie an dessen Ende erkennbar. Auffällige Ablagerungen befinden sich an der Erweiterung der Strömungskontur am Ende des Spaltes.

In der folgenden Aufnahme mit einem Eingangsdruck von 2bar liegt an dieser Stelle die untere, profilseitige Begrenzung des Freistrahles. Diese Strahlablösung ist auch schon bei einem Druck von 0,4bar sichtbar, dann aber als Ablösung eines Unterschallstrahles. Sie wandert auf der Hauptrotorkontur mit steigendem Druck stromabwärts. Der Freistahl hier zeigt eine bekannte, aber noch schwach ausgeprägte Zellenstruktur und deutet auf eine Machzahl wenig größer als Ma=1, also auf eine transsonische Strömung am Spaltende hin.

Aus der örtlichen Machzahl Ma, die das Verhältnis von lokaler Strömungsgeschwindigkeit zu lokaler Schallgeschwindigkeit beschreibt, ergibt sich der entsprechende Machsche Winkel  $\alpha$  zu

$$\sin \alpha = \frac{1}{Ma}$$

Der Machschen Winkel bezeichnet die Neigung der Machschen Linien gegen die Strömungsrichtung. In einer Überschallströmung ist eine Machsche Linie eine Begrenzung in der Strömung auf der sich Druck, Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit unstetig ändern.

Die schrägen Stöße im Freistrahl können daher dazu dienen, mit Hilfe dieser Beziehung eine Machzahl am Spaltaustritt für die beiden folgenden Aufnahmesituationen abzuschätzen.



Bild 8: Hauptrotor / Gehäusespalt; Gesamtansicht; Eingangsdruck-Variation Spalthöhe: 0,4mm; steigender Eingangsdruck; Strömungsrichtung von links nach rechts; Schlierenblende orthogonal zur Horizontalen; Belichtungszeit 0,5 μs;

Figure 8: Housing gap / male rotor; total view; variation of inlet pressure height of gap: 0.4mm; increasing inlet pressure; flow direction from left to right; Schlieren aperture orthogonal to horizontal line; exposure time 0.5 µs;



Bild 9: Hauptrotor / Gehäusespalt; Vergrößerung; Eingangsdruck-Variation Spalthöhe: 0,4mm; steigender Eingangsdruck; Strömungsrichtung von links nach rechts; Schlierenblende orthogonal zur Horizontalen; Belichtungszeit 0,5 μs;

Figure 9: Housing gap / male rotor; enlarged view; variation of inlet pressure height of gap: 0.4mm; increasing inlet pressure; flow direction from left to right; Schlieren aperture orthogonal to horizontal line; exposure time 0.5  $\mu$ s;

Ein Eingangsdruck von 3bar hat eine Machzahl im Bereich von Ma=1,5 und ein Druck von 4bar etwa Ma=1,7 zur Folge.

Das Schlierenbild der Strömung mit 4bar Eingangsdruck läßt darüber hinaus am Beginn der Konturerweiterung aufgefächerte Machwellen erkennen, die der konvex gekrümmten Wand folgen. Im Gegensatz zum Freistrahl selbst, erscheinen diese Linien im bewegten Bild stationär. Im Spalt wird auf diesem Bild eine Struktur von Dichteänderungen orthogonal zur Strömungsrichtung sichtbar. Auch diese Form wirkt stationär und die Dichtegradienten steigen mit dem Druck.



Bild 10 : Hauptrotor / Gehäusespalt; Spalt mit Ein- / Auslauf; Spalthöhenvariation Spalthöhe: 0,1 bis 0,4mm; Eingangsdruck 4 bar; Strömungsrichtung von links nach rechts; Schlierenblende orthogonal zur Horizontalen; Belichtungszeit 0,5 μs;

Figure 10: Housing gap / male rotor; gap with in- / outlet; variation of gap-height height of gap: 0.1 to 0.4mm; inlet pressure 4 bar; flow direction from left to right; Schlieren aperture orthogonal to horizontal line; exposure time 0.5 µs; Im **Bild 10** wird die Spalthöhe im Bereich von 0,4mm bis 0,1mm variiert, der Aufnahmemaßstab ist nocheinmal vergrößert.

Die stationär scheinenden Dichteänderungen im Spalt bleiben bei einer Spaltverkleinerung nahezu unverändert. Der 0,1mm große Spalt zeigt ebenfalls an der Spalterweiterung Freistrahlzellen. Die gesamte Länge des Überschallfreistrahles nimmt mit der Spalthöhe ab. Der Energieinhalt der Strömung nimmt mit sinkender Spaltweite und steigender Dissipation ab.



*Bild* 11: Hauptrotor / Gehäusespalt; Engste Stelle im Spalt; Eingangsdruck-Variation Spalthöhe: 0,2mm; steigender Eingangsdruck; Strömungsrichtung von links nach rechts; Schlierenblende orthogonal zur Horizontalen; Belichtungszeit 0,5 μs;

Figure 11: Housing gap / male rotor; narrowest part of gap; variation of inlet pressure height of gap: 0.2mm; increasing inlet pressure; flow direction from left to right; Schlieren aperture orthogonal to horizontal line; exposure time 0.5  $\mu$ s;

Der engste Spaltquerschnitt ist in **Bild 11** mit dem größten vorliegenden Aufnahmemaßstab gezeigt. Das Hintergrundbild offenbart Verunreinigungen, die auf den folgenden Bildern nicht mehr vorhanden sind. Es wird deutlich, daß sich die sichtbare Höhe des Spaltes in der Abbildung mit dem Druck nicht ändert. Daraus ist zu schließen, daß orthogonal zur Strömungsrichtung kein Dichtegradient existiert, dessen Existensgebiet sich entlang der

Kontur ausdehnt. Am Spaltein- und -auslauf bilden sich bei steigendem Druck auch stärkere Dichtegradienten. Im Spalt werden die beschriebenen Dichteänderungen mit der Drucksteigerung deutlicher sichtbar, d.h. größer. Der Ort dieser Gradienten bleibt bei der Druckerhöhung von 3bar auf 4bar am Eingang unverändert. Ihr Abstand beträgt etwa 0,2mm bis 0.4mm. Es ist notwendig, diese Strömungserscheinung durch weitere Experimente genauer zu klären.

## 6 Ausblick

Zur weiteren Charakterisierung der Spaltströmungen sind Untersuchungen an ebenen Modellen von Gehäuse- und Profileingriffsspalt erforderlich (siehe auch [16] und [17]). Die Visualisierung der Strömung wird durch dynamische Druckmessungen ergänzt.

Arbeiten mit dem ebenen Schraubenmaschinenmodell (siehe Kap. 4.2) erweitern die zunächst qualitative Strömungsbeschreibung auf die bewegten Strömungskonturberandungen.

Ziel der weiteren Arbeit ist es, einen Beitrag zur Klärung des komplexen Strömungsverhaltens in Schraubenmaschinen zu leisten, um die Grundlagen für konstruktive Maßnahmen zur Spaltströmungsbehinderung aufzuzeigen. Das soll helfen, die Energiewandlungsgüte von trockenlaufenden Schraubenmaschinen zu verbessern.

## 7 Literaturverzeichnis

[1]	Kauder, K. (Hrsg.)	Betriebssicherheit und Steuerung von Schraubenmaschinen In: Schraubenmaschinen, Forschungsberichte des FG Fluidenergie- maschinen Nr. 1, Universität Dortmund, 1993
[2]	Peveling, FJ.	Ein Beitrag zur Optimierung adiabater Schraubenmaschinen in Simulationsrechnungen Dissertation, Universität Dortmund, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987
[3]	Jacobsen, K.	Experimentelle Untersuchungen zum Durchfluß und Wärme- übergang in Durchblick und Stufenlabyrinthdichtungen Dissertation, Universität Karlsruhe, 1987
[4]	Scherer, T.	Grundlagen und Voraussetzungen der numerischen Beschreibung von Durchfluß und Wärmeübergang in rotierenden Labyrinth- dichtungen Dissertation, Universität Karlsruhe. 1994
[5]	Dreißig, B.	Ein Beitrag zur Auslegung trockenlaufender Schraubenmotoren Dissertation, Universität Dortmund, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990
[6]	Dörr, L.	Modellmessungen und Berechnungen zum Durchflussverhalten von Durchblicklabyrinthen unter Berücksichtigung der Übertragbarkeit Dissertation, Universität Karlsruhe, 1985

[7]	Gersten, K. Herwig, H.	Strömungsmechanik Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1992
[8]	Schlichting,H.	Grenzschicht-Theorie Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1982
[9]	Prandtl, L. Oswatitsch,K. Wieghardt, K.	Führer durch die Strömungslehre Viehweg Verlag, 9.Auflage, 1990
[10]	Schnerr, G.	Digitale Bildauswertung für optische Strömungsmeßverfahren 1. DGLR Workshop, Markdorf, DGLR-Bericht 88-04, 1988
[11]	Schardin,H.	Die Schlierenverfahren und ihre Anwendungen Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften, 20. Band, Springer- Verlag, Berlin, 1942
[12]	Holder,D.W. North,R.J.	Schlieren Methods Notes on applied science, No. 31, National Physical Laboratory, Her Majesty's Stationery Office, London, 1963
[13]	Toepler, A.	Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode Max Cohen & Sohn, Bonn, 1864
[14]	Woehi, W.	Optische Verfahren und Geräte zur quantitativen Vermessung von Dichtefeldern I u. II Archiv für technisches Messen, Z 721-1, 1950
[15]	Lenz, R.	Gewinnung von Bilddaten mit CCD-Sensoren in der Videometrie Bildverarbeitung, Symposium, Technische Akademie Esslingen, 1989
[16]	Kauder, K. Sachs, R.	Gasspaltströmungen in einem ebenen Schraubenmaschinenmodell Teil 1 In: Schraubenmaschinen, Forschungsberichte des FG Fluidenergie- maschinen Nr. 5. Universität Dortmund, 1997
[17]	Kauder, K. Sachs, R.	Gasspaltströmungen in einem ebenen Schraubenmaschinenmodell – Teil 2 In: Schraubenmaschinen, Forschungsberichte des FG Fluidenergie- maschinen Nr. 6, Universität Dortmund, 1998