

# Theoretische Untersuchung über die Seitenwandgrenzschichten in Axialverdichtern

VON DER  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN ZÜRICH  
ZUR ERLANGUNG DER  
WÜRDE EINES DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
GENEHMIGTE  
PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON

**Peter Suter**

dipl. Masch.-Ing. ETH  
von Baden (Kt. Aargau)

Referent: Herr Prof. Dr. W. Traupel

Korreferent: Herr Prof. Dr. J. Ackeret



## Einleitung und Übersicht

Die Seitenwandgrenzschichten von Turbomaschinen sind noch weitgehend unerforscht. Dies hängt damit zusammen, daß sie einen ausgeprägt dreidimensionalen Charakter besitzen. Wir stellten uns die Aufgabe, eine Zergliederung der verwickelten Erscheinungen vorzunehmen, um anhand eines vereinfachten Modells eine gewisse Einsicht in die Strömungsverhältnisse zu gewinnen, wobei die gemachten Vernachlässigungen nach Möglichkeit zu überprüfen sind.

Wir beschränken uns dabei auf Axialverdichter und vereinfachen das Problem, indem wir die Schaufelkränze abwickeln, d. h. eine Folge von abwechselnd ruhenden und bewegten ebenen Gittern betrachten. Die Grundannahme ist nun die, daß wegen des großen Teilungsverhältnisses das Gebiet der Seitenwandgrenzschichten aufgeteilt werden kann in einen Bereich in der Nähe der durch Wand und Schaufel gebildeten Ecke, in welchem starke Radialbewegungen und Druckgradienten auftreten und welcher die hauptsächliche Quelle der sogenannten Randverluste ist, sowie in die dazwischenliegende Region in der Umgebung der Teilungsmittle, wo das Druckfeld der Grenzschicht im wesentlichen von der reibungsfreien wandfernen Strömung aufgeprägt wird. Das Strömungsfeld der Grenzschicht in diesem Bereiche bezeichnen wir als *Grundlösung* und die mit ihr verbundene Dissipation als Wandreibungsverlust. Die vorliegende Untersuchung befaßt sich, mit Ausnahme des Abschnittes V. 3, vor allem mit dieser Grundlösung; nach unseren Ergebnissen läßt sich ihr mittleres Verhalten durch eine Feldkraftlösung, die unter Vernachlässigung der endlichen Gitterteilung gewonnen wird, im allgemeinen recht gut darstellen.

Während für laminare Grenzschichten schon einige ähnliche Untersuchungen veröffentlicht wurden, ist bei turbulenter Strömung das Problem insofern komplizierter, als die Kenntnis des Turbulenzmechanismus in einem dreidimensionalen Strömungsfeld noch sehr mangelhaft ist. Unsere Untersuchung beschreibt daher eigentlich ein Modellbild einer turbulenten Strömung, das im Gegensatz zum laminaren Fall eine — in Funktion des Wandabstandes — um Größenordnungen variierende Austauschgröße besitzt.

Es erhebt sich nun die Frage, wie man dem strömenden Medium in der Wandgrenzschicht überhaupt die erforderliche zusätzliche Energie zuführen solle, damit es den Druckanstieg in der Stufe überwinden kann.

Ein weiteres Problem ist dieses, wieweit die Reibungskräfte an den Seiten-

wänden die Strömung direkt beeinflussen, d. h. wieweit der Gültigkeitsbereich der bekannten Sekundärströmungstheorien gehe, welche zwar verringerte Geschwindigkeit der Zuströmung in Wandnähe annehmen, sonst aber reibungsfreie Strömung voraussetzen.

Im Kapitel I wird anhand einer allgemeinen Energiegleichung das Verhalten der Wandgrenzschichten untersucht, und es wird auf die wichtigsten bestimmenden Größen hingewiesen. Insbesondere fragen wir uns, unter welchen Bedingungen eine gleichbleibende, d. h. längs der axialen Durchtrittsrichtung sich nicht verdickende Wandgrenzschicht auftreten kann. Dabei können wir die zwei Fälle unterscheiden, daß an den beiden Wänden zwei durch ein Kerngebiet getrennte Grenzschichten vorhanden sind, oder daß sich die beidseitigen Grenzschichten vereinigt haben und, den ganzen Querschnitt ausfüllend, die ausgebildete Kanalströmung darstellen.

Für diesen zweiten Fall untersuchen wir im Kapitel II die Wege, auf denen den wandnahen Gebieten zusätzliche Energie zugeführt werden kann; wir betrachten dabei die beiden Extremfälle, daß einerseits den entsprechenden Zonen direkt zusätzliche Schaufelungsarbeit zugeführt wird, andererseits dem gesamten Strömungsquerschnitt gleichmäßig Impuls in der Form des sogenannten sekundären Druckabfalles entzogen und den Mangelgebieten durch turbulenten Austausch vermittelt wird. Auf diese zweite Art ist ein nennenswerter Energiezuschuß an eng begrenzte Randzonen nur möglich bei erhöhter Turbulenzintensität, welche aber an sich größere Wandreibungsverluste bedingt.

Vernachlässigen wir die endliche Gitterteilung und ersetzen wir das Druckfeld durch ein äquivalentes, längs des Umfanges konstantes Kraftfeld, so läßt sich die Bewegungsgleichung für die Umfangskomponente der Geschwindigkeit unter einer Voraussetzung über den turbulenten Austausch, die in Abschnitt III. 3 näher diskutiert wird, separieren von den Gleichungen für die Axial- und Radialkomponente.

Im Kapitel III bestimmen wir für die ausgebildete Kanalströmung und für eine mittlere Stufe des Verdichters, wo die Strömung quasiperiodischen Charakter hat (das Geschwindigkeitsfeld ist in aufeinanderfolgenden Stufen das gleiche, der Druck aber steigt an), die Umfangskomponente der Geschwindigkeit, welche sich unter der Wirkung des die Schaufelung ersetzenden Kraftfeldes einstellt. Wir machen dabei die Feststellung, daß sich die Abweichungen von der reibungsfreien Lösung auf ein wandnahes Gebiet beschränken, dessen Tiefe in einer mittleren Stufe nicht mehr als die Hälfte der Verdrängungsdicke beträgt.

Anschließend verifizieren wir noch, daß die Annahme eines konstanten Profils der Axialgeschwindigkeit längs der axialen Durchtrittsrichtung keine unzulässige Vereinfachung war, indem sich die Lösung für die Umfangskomponente

nur wenig ändert, wenn die Axialgeschwindigkeit längs der Stufe periodisch variiert.

Im Kapitel IV führen wir für eine Stufe am Anfang des Verdichters eine analoge Untersuchung wie im Kapitel III durch, wobei zwei getrennte, längs der Stufe linear anwachsende Wandgrenzschichten vorausgesetzt werden. Schon nach einer Stufe sind die Strömungsverhältnisse ähnlich denjenigen der periodischen Lösung für die ausgebildete Kanalströmung. Wesentlich größer ist der Einflußbereich der Reibungskräfte, und zwar um so größer, je geringer die Lauflänge der Grenzschicht bis zum Eintritt in die Stufe. Hingegen ist er, ins Verhältnis zur Verdrängungsdicke gesetzt, von ähnlicher Größe wie in der laminaren Grenzschicht, die von andern Autoren behandelt wurde.

Für die Wandreibungsverluste stellen wir anhand der Ergebnisse einen Ansatz auf, welcher Anteile von der mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit und von den oszillierenden Komponenten her aufweist und welcher sowohl für die ausgebildete Kanalströmung als auch für getrennte Grenzschichten gilt. Während der Sitz der üblichen Dissipation vornehmlich die unmittelbar an die Wand angrenzende Zone ist, entsteht bei Turbomaschinen auch im Strömungsinnern wegen der dort vorhandenen Turbulenz ein gewisser Verlust (neben den Profilverlusten), den wir hier zwar nicht quantitativ angeben können, der aber unter Umständen eine spürbare Größe besitzt.

Im Kapitel V schätzen wir den Einfluß der endlichen Gitterteilung ab, indem wir die Entwicklung der Grenzschicht in einem Gitter anhand eines zweiparametrischen Ansatzes verfolgen. Daraus ergibt sich, daß die Kraftfeldlösung (Vernachlässigung der endlichen Teilung) Ergebnisse liefert, die das mittlere Verhalten der Grenzschicht repräsentieren. Die Bedeutung einer am Eintritt in das Gitter vorhandenen Unterströmung für die weitere Entwicklung der Grenzschicht ist beträchtlich, für die Grenzschicht in der Sauggecke geradezu entscheidend, was aus einer rohen Abschätzung der Eckengrenzschicht folgt. Soll der Gitterversuch bezüglich der Randverluste Ergebnisse liefern, die auf mehrstufige Maschinen übertragbar sind, so ist durch geeignete Vorkehrungen dafür zu sorgen, daß schon die Grenzschicht beim Eintritt dreidimensionalen Charakter hat, d. h. daß sie eine Unterströmung aufweist.

Abschließend untersuchen wir in einem Anhang A die Entwicklung der Quergrenzschicht, wenn in einer gleichbleibenden Grenzschicht die überströmte Wand von einer bestimmten Stelle an quer zur Strömungsrichtung bewegt ist. Das Problem tritt auf, wenn die Grenzschicht, die sich in der Einlaufpartie des Verdichters gebildet hat, dem Anfang der Rotorwand begegnet. Bei unserer Lösung für das turbulente Modell breitet sich der Einfluß der Wand im Vergleich zum laminaren Falle schneller ins Innere der Strömung aus und die Gradienten in Wandnähe sind größer, d. h. das Profil der Quergrenzschicht ist eckiger.