

Auslegung und experimentelle Untersuchung eines Relaminisierungs - Testfalls

Diplomarbeit
von

Simon Dorfer

Mai 2011

Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sanz
Dipl.-Ing. (FH) Maria Elisabeth Collins

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der rechnerischen Auslegung und der experimentellen Untersuchung eines Relaminisierungs-Testfalls. Bei der Relaminisierung handelt es sich um den Übergang eines turbulenten Strömungszustands in einen laminaren. Dieses Verhalten entspricht einer Umkehrung der Transition. In dieser Diplomarbeit wird in erster Linie die Relaminisierung der Grenzschicht untersucht, die durch stark beschleunigte Strömungen entstehen kann.

Es wird die rechnerische Auslegung einer geeigneten Geometrie mit Hilfe von LINARS, dem CFD-Code des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, beschrieben. Die Anfangsgeometrie lieferte der Hochdruck-Stator der Testturbine des AIDA Projektes. Davon ausgehend wird gezeigt, wie Veränderungen der Geometrie Auswirkungen auf die Auslegungsparameter haben. Spezielles Augenmerk wird auf den Beschleunigungsparameter geworfen, der ein Maß für die Relaminisierung ist.

Es folgt eine Erläuterung des für die Messungen genutzten, transsonischen Prüfstandes und des Versuchseinsatzes, der für die Experimente konstruiert wurde. In den Versuchen kamen verschiedene Messmethoden wie Druckmessung, Schlierenvisualisierung und Laservibrometrie zum Einsatz. Diese Messmethoden werden in dieser Arbeit genauer beschrieben und einzelne Ergebnisse werden vorgestellt. Eine Besonderheit stellt die Vermessung der Grenzschicht mit dem Laservibrometer dar. Mit Hilfe der Laservibrometrie können sehr kleine Änderungen der Dichte detektiert werden.

Die totale bzw. statische Druckmessung bestätigte sich als erprobte und sichere Messmethode. Der Versuch, den laminaren oder turbulenten Zustand der Grenzschicht mit der Schlierenvisualisierung zu bestimmen, scheiterte. Die Laservibrometrie lässt eine Relaminisierung im vorderen Bereich des Versuchseinsatzes nur vermuten. Um die Ergebnisse aus dieser Arbeit zu bestätigen, wären weitere Experimente sinnvoll.

Abstract

This diploma thesis is about the numerical design of a relaminarisation testcase followed by experimental testing. Relaminarisation describes the process where a turbulent flow reverts into a laminar state. It corresponds to a reverse transition. The main focus of this work is on the reversion of the boundary layer in highly accelerated flows.

First LINARS, the in-house CFD code of the Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics, was used to design a suitable geometry numerically. This geometry is based on the high pressure stator passage of the AIDA test turbine. The impact of geometry variations on the design parameters was demonstrated. A very special design parameter is the acceleration parameter K .

Subsequently the transonic test rig, where the relaminarisation experiments were set up is explained. In addition, the experiment insert is shown. Different methods of measurement, like pressure probes, Schlieren flow visualization and laser vibrometry, which were used in the experiments are described in this work. The laser vibrometer is a very sensitive and promising tool to detect density fluctuations in the boundary layer.

The probe measurements of the total or static pressure proved as a functional and reliable method of measurement. In contrast, the detection of laminar or turbulent state by Schlieren flow visualization failed. The laser vibrometer results presumably indicate relaminarisation in the front region of the experimental setup. But to confirm the findings of this diploma thesis, further experiments are required.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort

Datum

Unterschrift

Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde im Studienjahr 2010/2011 am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der Technischen Universität Graz verfasst.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betuern, Frau Dipl.-Ing. (FH) Maria Elisabeth Collins und Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sanz, für die hervorragende Unterstützung und die vielen fachlichen Diskussionen, die ich keinesfalls missen möchte.

Ich möchte mich außerdem bei allen Mitarbeitern des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik bedanken, die alle meine Fragen mit ausführlichen Erklärungen beschenkt und bei den Versuchsfahrten, zur Bedienung der Verdichteranlage und der Messtechnik, zahlreiche Nächte geopfert haben. Besonders möchte ich mich bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jakob Woisetschläger bedanken, der mir unter anderem beim Aufbau der Messtechnik und der Auswertung half und immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ich bedanke mich bei meinen Freunden, mit denen ich unzählige Erlebnisse unseres gemeinsamen Studentenlebens teile, für ihre Hilfsbereitschaft und die schöne Zeit.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglichten und mich in jeder Phase meines Studiums und Lebens bestmöglich und ohne Einschränkung unterstützten. Außerdem danke ich meinen beiden Schwestern, die mit ihren vielen Umzügen für interessante Arbeits- und Besuchs-Wochenenden sorgten. Ein herzliches Dankeschön geht an meine Freundin, die mich in jeder erdenklichen Situation unterstützte und sehr großen Anteil an meinem Studium genommen hat.

Graz, im Mai 2011

Simon Dorfer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Grenzschichtströmung	3
2.1.1 Laminare Grenzschichtströmung	4
2.1.2 Turbulente Grenzschichtströmung	5
2.1.3 Abgelöste Grenzschichtströmung	6
2.1.4 Viskose Unterschicht	7
2.2 Transition	8
2.2.1 Natürliche Transition	10
2.2.2 Bypass Transition	11
2.2.3 Transition über eine Ablöseblase	12
2.2.4 Transition über instationäre Nachlaufdüsen	12
2.2.5 Relaminisierung	13
2.3 Relaminisierung	13
2.3.1 Formen der Relaminisierung	14
Relaminisierung durch Dissipation	14
Relaminisierung in stabil geschichteter Strömung	15
Relaminisierung in stark beschleunigter Strömung	16
Weitere Formen	16
2.3.2 Relaminisierung in stark beschleunigter Grenzschichtströmung	17
Erkennungsmerkmale der Relaminisierung	19
Bereiche der Relaminisierung	20
Beschleunigungsparameter - K-Wert	21
3 Auslegung und Simulation	23
3.1 Auslegung	23
3.1.1 Auslegeparameter	24
Beschleunigungsparameter K	24
Druck	25
Geschwindigkeit	26
3.1.2 Verschiedene Düsen-Geometrien	27
3.2 Netzgenerierung	30
3.2.1 AiGrid	30
3.2.2 Vernetzung der Geometrie	31
3.3 Simulation	32

3.3.1	LINARS	32
3.3.2	Simulationsergebnisse	33
	Veränderung der Geometrie	33
3.4	Gewählte Düse für den Versuchs-Einsatz	43
4	Prüfstand und Versuchseinsatz	48
4.1	Verdichteranlage	48
4.2	Transsonischer Prüfstand	50
4.3	Relaminierungs-Versuchseinsatz	51
	4.3.1 Aufbau	51
	Einlaufplatte	52
	Ebenen Platte	53
	Zweigeteilte obere Kontur	54
	4.3.2 Stolperdraht	55
5	Messtechnik	57
5.1	Druckmessung	57
	5.1.1 Totaldruckmessung	57
	5.1.2 Statische Druckmessung	58
5.2	Schlierenvisualisierung	59
	5.2.1 Prinzip der Messmethode	59
	5.2.2 Versuchsaufbau	60
5.3	Laservibrometrie	62
	5.3.1 Prinzip der Messmethode	62
	5.3.2 Versuchsaufbau	63
6	Messergebnisse	66
6.1	Ergebnisse der Druckmessung	68
	6.1.1 Totaldruckmessung - Messergebnisse	68
	6.1.2 Statische Druckmessung - Messergebnisse	69
6.2	Ergebnisse der Schlierenvisualisierung	70
6.3	Ergebnisse der Laservibrometrie	74
	Messung 4	76
	Messung 5	81
	Zusammenfassung der Laservibrometer-Messergebnisse	85
7	Zusammenfassung und Ausblick	87
	Abbildungsverzeichnis	89
	Tabellenverzeichnis	92
	Nomenklatur	93
	Literaturverzeichnis	96
A	Anhang	98
A.1	Übersicht der Simulationsergebnisse	98

A.2	Ergebnisse der Druckmessung	101
A.3	Koordinaten der Laservibrometer-Messungen	103

Kapitel 1

Einleitung

Wie in allen Bereichen der Technik spielt das Erreichen einer immer höheren Effizienz auch bei den thermischen Turbomaschinen eine wichtige Rolle. Wird bedacht, dass der Gewinn von Flugunternehmen in wenigen Prozenten der Treibstoffkosten gemessen wird, sind neben Gründen der Nachhaltigkeit auch die wirtschaftlichen Interessen wichtiger Antrieb. Ohne Zweifel muss die Menschheit bei der steigenden Zahl an Umweltkatastrophen ihre gewohnte Lebensweise überdenken und in den Klimaschutz investieren. Um jedoch die Verschwendung von Ressourcen zu minimieren wird eine alleinige Verbesserung der Effizienz durch die Technik nicht reichen. Bestenfalls kann sie ein Zeichen setzen und ein Bewusstsein bilden.

Die Strömungszustände in thermische Turbomaschinen sind größtenteils turbulent und instationär. Wird die Beschaukelung einer axialen Turbinenstufe betrachtet, können auch Gebiete auftreten in denen eine laminare Strömung herrscht. Auf der Saugseite geht die laminare Grenzschichtströmung in eine turbulente über, während auf der Druckseite das genaue Gegenteil passieren kann. Diesen Umschlag von einer ungeordneten, turbulenten Grenzschichtströmung hin zu einer geordneten, nennt man Relaminisierung. Ausgelöst wird sie durch eine starke Beschleunigung des Fluids. Die Relaminisierung ist ein komplexes Themengebiet, auf dem noch Grundlagenforschung betrieben werden muss. Sie könnte im besten Fall der Schlüssel zur Modellierung der Turbulenz sein. Je nach Anforderung könnte die Strömung von einem turbulenten in einen laminaren Zustand wechseln und umgekehrt, mit Hilfe der Transition. Es könnten Schaufelprofile konstruiert werden, bei denen eine Grenzschicht relaminisiert, um den Reibungswiderstand zu senken und somit die Effizienz zu erhöhen. Die bisherige Forschung hat klar gemacht, dass die laminare Strömung kein Grundzustand ist, sondern eher der Ausnahmefall einer von Turbulenz bestimmten Strömung.

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen der AIDA Teststufe wurde eine Relaminisierung im Stator der Hochdruck-Stufe der Testturbine vermutet. AIDA steht für „Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics for Competitive and Environmentally Friendly Jet Engines“ und ist ein EU-Projekt mit zahlreichen europäischen Flugtriebwerkhersteller sowie Forschungseinrichtungen, um die Übergangskanäle eines Triebwerks zwischen der Hoch- und Niederdruckturbine weiter zu verbessern.

Hieraus entstand die Motivation für diese Diplomarbeit, in der eine ähnliche Geometrie gefunden und konstruiert wurde, bei der die Relaminisierung experimentell untersucht werden kann. Eine Besonderheit bei diesem Testfall sollten die turbinenähnlichen, überkritischen Zustände sein, die in den meisten bereits gemachten Experimenten zur Relaminisierung nicht erreicht wurden. Die Laservibrometrie als Messmethode für sehr kleine Dichteschwankungen sollte hierbei eine Relaminisierung der Grenzschicht beweisen. Bisher wurde sie zum größten Teil mit Heißfilmsonden erforscht. Die optische Messtechnik hat den Vorteil, die Grenzschichtströmung nicht zu beeinflussen.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Grenzschichtströmung

Wenn ein reales Fluid entlang einer ebenen Platte strömt, werden neben Normalkräften auch Tangentialkräfte übertragen. Diese Tangentialkräfte entsprechen der Reibung und hängen mit der Viskosität des Fluides zusammen. Die meisten in der Technik interessanten Fluide, wie z.B. Wasser und Luft, weisen eine sehr geringe Viskosität auf [1].

Direkt auf der Platte haftet das Fluid und hat somit keine Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit des Fluides muss also ihrem Wert von Null an der Wand bis ungefähr zur Anströmgeschwindigkeit steigen. Der Bereich normal zur Strömungsrichtung in dem sich diese Änderung vollzieht, wird als Grenzschicht bezeichnet.

Eine Grenzschicht kann also nur genau dann auftreten, wenn eine Reibung zwischen den Fluidteilchen besteht. In einem idealen Fluid, das laut Definition reibungsfrei ist, bildet sich keine Grenzschicht aus.

Die Dicke der Grenzschicht ist dort erreicht, wo die Grenzschichtgeschwindigkeit u der Anströmgeschwindigkeit U_∞ entspricht. Da die Anströmgeschwindigkeit der Asymptote der Grenzschichtgeschwindigkeit u entspricht, wird sie theoretisch nie erreicht. Um trotzdem eine Grenzschichtdicke definieren zu können, wurde sie bei einem Verhältnis von $U_\infty/u=0,99$ festgelegt.

In der folgenden Tabelle 2.1 sind Werte für die Grenzschichtdicke δ und Dicke der viskosen Unterschicht δ_ν bei turbulenter Strömung an einer ebenen Platte für Luft und Wasser aufgelistet. Dabei ist ν die kinematische Viskosität, U_∞ die Anströmgeschwindigkeit im Freistrom und l die Plattenlänge.

Tabelle 2.1: Grenzschichtdicke δ und Dicke der viskosen Unterschicht δ_v [1]

	U_∞ in m/s	l in m	Re	δ in mm	δ_v in mm
Luft $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	50	1	$3,5 \cdot 10^6$	8	0,4
	100	1	$6,6 \cdot 10^6$	8	0,2
	100	5	$3,3 \cdot 10^7$	36	0,2
	200	10	$1,3 \cdot 10^8$	69	0,1
Wasser $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	1	2	$2,0 \cdot 10^6$	17	1
	2	5	$1,0 \cdot 10^7$	39	0,6
	5	50	$2,5 \cdot 10^8$	321	0,4
	10	200	$2,0 \cdot 10^9$	1122	0,1

Entlang einer ebenen Platte nimmt die Dicke der Grenzschicht $\delta(x)$ in Strömungsrichtung zu. Dies ist durch eine Erfassung von immer mehr Fluidteilchen durch die Reibung zu erklären [2]. Die Grenzschicht und deren Dicke ist also ein durch die Reibung bestimmtes Phänomen. Die Reibung zwischen den Fluidteilchen wird maßgeblich von zwei Faktoren beeinflusst, von der Zähigkeit und der Geschwindigkeit des strömenden Mediums. Als Beispiel für ein Fluid mit hoher Viskosität sei hier der Honig genannt. Dessen Grenzschichtdicke ist viel größer als jene von zum Beispiel Luft.

Zum Ausdruck bringt diesen Zusammenhang das Elementargesetz der Fluidreibung:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Die Wandschubspannung ist ein Maß für die übertragenen Tangentialkräfte und verhält sich umgekehrt proportional zur Grenzschichtdicke. Bei Newtonschen Fluiden besteht ein linearer Zusammenhang zwischen τ und $\frac{du}{dy}$. [1]

Die Grenzschichtströmung kann in laminarer oder turbulenter Form auftreten. Außerdem kann sie sich von der Wand ablösen.

2.1.1 Laminare Grenzschichtströmung

In der laminaren Grenzschichtströmung strömen die Fluidteilchen nebeneinander und in geordneten parallelen Bahnen. Es gibt keine Querbewegungen der Fluidteilchen normal zur Strömungsrichtung. Die einzelnen Bahnen der laminaren Grenzschicht haben jedoch in der Grenzschicht verschiedene Geschwindigkeiten, wodurch sich ein Geschwindigkeitsprofil ausbildet.

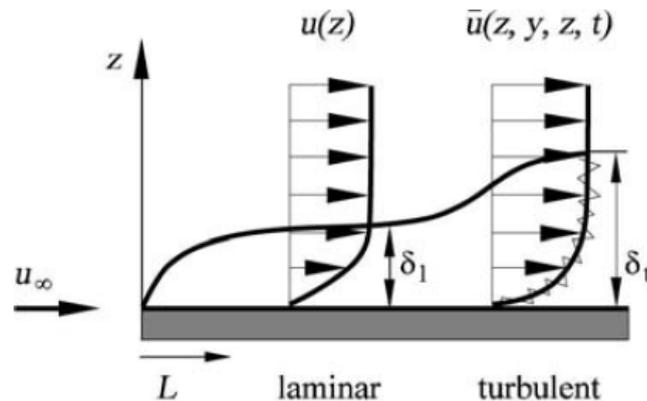


Abbildung 2.1: Unterschied zwischen laminarem und turbulentem Geschwindigkeitsprofil [3]

Abbildung 2.1 veranschaulicht den Unterschied der beiden Grenzschichten. Es ist ersichtlich, dass das turbulente Geschwindigkeitsprofil bauchiger ist als das laminare.

2.1.2 Turbulente Grenzschichtströmung

Im Gegensatz zur laminaren Grenzschichtströmung kommt es bei der turbulenten zu chaotischen Bewegungen der Fluidteilchen quer zur Strömungsrichtung. Durch die unregelmäßigen Geschwindigkeitsschwankungen kommt es zu einem höheren Impulsaustausch. Dieser führt zu einem besserem Stoff- und Wärmeaustausch, der in der Technik häufig genutzt wird. Allerdings kommt es bei einer turbulenten Strömung auch zu einem Anstieg des Reibungswiderstandes.

Die nach O. Reynolds benannte Reynolds-Zahl ist ein Maß für die Turbulenz einer Strömung.

$$Re = \frac{u_\infty \cdot l}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}} \quad (2.2)$$

Die Reynoldszahl ist eine der wichtigsten Kennzahlen in der Strömungsmechanik und gibt den Einfluss der Zähigkeit an. Wenn die Zähigkeit eines Fluides sehr klein ist, muss die Reynolds-Zahl groß sein. Die Annahme einer reibungsfreien Strömung ist also nur gerechtfertigt, wenn die Reynolds-Zahl sehr groß ist. Ist die dimensionslose Reynolds-Zahl für zwei verschiedene Strömungen gleich, ist eine mechanische Ähnlichkeit dieser Strömungen vorhanden [1]. Die Reynolds-Zahl ist von der durchströmten Geometrie, der Strömungsgeschwindigkeit, dem Fluid, der Wandrauhigkeit, der Temperatur und Störungen in der Strömung abhängig.

Die Strömung kann in laminarer oder turbulenter Form vorliegen. Mit einer, je nach Anwendungsfall unterschiedlichen kritischen Reynolds-Zahl kann man bestimmen,

welche der beiden Strömungsformen vorliegt. Die kritische Reynolds-Zahl gibt an, zu welchem Zeitpunkt eine Strömung die Transition abgeschlossen hat und turbulent ist. Sie ist abhängig von Störungen in der Zuströmung. Je kleiner die Störungen in der Zuströmung, desto größer ist die kritische Reynolds-Zahl.

$Re < Re_{krit}$: Schichtenströmung \rightarrow laminare Strömung

$Re \geq Re_{krit}$: Querbewegungen \rightarrow turbulente Strömung

Diese kritische Reynolds-Zahl beträgt für folgende Beispiele:

- Rohr

$$Re_{krit} = 2300$$

Hier wird der Innendurchmesser des Rohres als charakteristische Länge zur Bildung der kritischen Reynolds-Zahl gewählt.

- Ebene Platte

$$Re_{x,krit} = 3,5 * 10^5 bis 10^6$$

Im Gegensatz zur Rohrströmung definiert die kritische Reynolds-Zahl $Re_{x,krit}$ das Ende des laminar-turbulenten Übergangs der Grenzschichtströmung. Dabei wird als charakteristische Länge die Lauflänge x der Platte gewählt [2].

Der Umschlag einer laminaren zu einer turbulenten Strömung wird als Transition bezeichnet.

2.1.3 Abgelöste Grenzschichtströmung

Ist der Druckanstieg in einer Strömung zu groß, kann es zu einer Ablösung der Grenzschicht kommen.

Die Geschwindigkeit an der Oberfläche eines vom Fluid umströmten Körpers wird mit steigendem Druckanstieg immer kleiner. Somit ergibt sich eine geringere kinetische Energie in der Grenzschicht. Zu einer Ablösung kommt es, wenn der Geschwindigkeitsgradient an der Wand gleich Null ist.

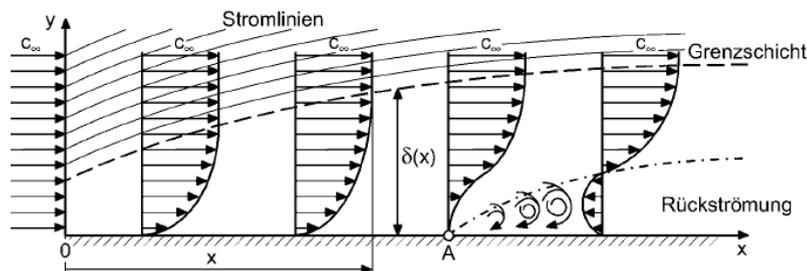


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer Grenzschichtströmung in der Nähe einer Ablösestelle [2]

Wie in der Abbildung 2.2 gezeigt, kann es nach der Ablösung zu einer Rückströmung kommen. In diesem Fall besitzt das Geschwindigkeitsprofil der Grenzschicht einen Wendepunkt. Der Punkt A markiert die Ablösestelle der Grenzschichtströmung.

Als Ablösebedingung gilt:

$$\tau_w = \eta \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)_w = 0 \quad (2.3)$$

Zu einer abgelösten Grenzschichtströmung kann es bei laminarer und turbulenter Grenzschicht kommen. Eine turbulente Grenzschichtströmung löst sich jedoch später als eine laminare von der Körperoberfläche ab. Dies ist begründet durch die höhere kinetische Energie der turbulenten Grenzschicht, welche durch die Querbewegungen die schnelleren Fluidteilchen aus den äußeren Schichten näher zur Wand bringt. Daher ist das turbulente Geschwindigkeitsprofil viel bauchiger (siehe Abbildung 2.1). Das Ablöseverhalten kann durch Änderung der Form eines Körpers mit einhergehender Änderung der Druckverteilung beeinflusst werden [1].

In der Natur kann die Ablösung eines Fluides am besten von einer Brücke beobachtet werden. Hier bildet sich ein so genanntes Totwassergebiet an der von der Strömung abgewandten Seite eines Brückenpfeilers aus.

In der Technik ist das Ablösen einer Strömung meist unerwünscht, da die Rückströmung eine Erhöhung des Strömungswiderstandes bedeutet. Eine Ablösung ist jedoch nicht immer von Nachteil, das beweist das Morelli-Heck bei Automobilen. Durch eine „Schanze“ über der Heckklappe kommt es zu einer Zwangsablösung der Strömung. Das so entstandene Totwassergebiet bildet, selbst bei Kombis, ein perfekt Stromlinienförmiges Heck [4].

2.1.4 Viskose Unterschicht

Wird eine Strömung als reibungsfrei betrachtet, besitzt sie keine Haftbedingung an der Wand und somit keine Grenzschicht. Eine Strömung mit hoher Reynolds-Zahl, also von Fluiden mit hoher Viskosität, welche in der Technik häufig auftreten, kann man in zwei Bereiche unterteilen. In die reibungslose Außenströmung und in die Grenzschicht an der Wand, in welcher Reibkräfte wirken.

Bei einer laminaren Grenzschicht hat die Viskosität und somit die Reibung Einfluss in der Grenzschicht. In einer turbulenten Grenzschichtströmung bilden sich Schichten aus, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. In der unteren Schicht überwiegt der laminare Anteil der Schubspannung, der durch die Viskosität beeinflusst wird. In dieser dünnen Schicht, die als viskose Unterschicht bezeichnet wird, herrscht eine laminare Strömung. Der turbulente Anteil der Schubspannung wird nicht von der Viskosität, sondern von den Schwankungsbewegungen der turbulenten Grenzschichtströmung bestimmt. In der turbulenten Innenschicht haben die laminaren und turbulenten Anteile an der Schubspannung in etwa die gleiche Größenordnung.

In der turbulenten Außenschicht sind die laminaren Schubspannungen nahezu Null und es dominieren die turbulenten Schubspannungen.

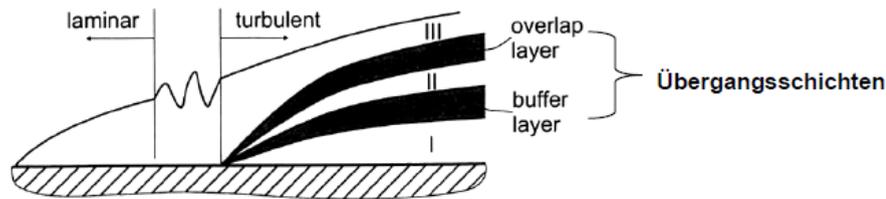


Abbildung 2.3: Schichten der turbulenten Grenzschichtströmung [5]

Die Dicke der viskosen Unterschicht nimmt mit steigender Lauflänge stromabwärts ab. Je größer die Turbulenz (Reynolds-Zahl), desto dünner ist sie [1].

2.2 Transition

Steigt die Reynolds-Zahl in einer Strömung über einen gewissen Wert, kommt es zu einer auffälligen Änderung der Strömungsform. Das anfangs laminare Fluid wird turbulent. Als Transition wird der Übergang von einer laminaren Grenzschichtströmung in eine turbulente Grenzschichtströmung bezeichnet. Diese Entstehung der Turbulenz ist für die gesamte Strömungsmechanik von großer Bedeutung [1].

Anfangs wurde die Transition gerne als ein zweidimensionaler, stationärer Prozess betrachtet, der lediglich von einer laminaren Strömung zu einer turbulenten abläuft. Heute weiß man, dass es ein stochastisches, dreidimensionales, instationäres Phänomen ist, das sogar in die Gegenrichtung ablaufen kann (Relaminisierung) [6].

Die Transition soll in geraden „Rohren und Kanälen“ sowie entlang einer „längs angeströmten Platte“ betrachtet werden.

- Gerade Rohre und Kanäle

In einem geraden Rohr, bei niedrigen Reynolds-Zahlen, bewegt sich jedes Fluidteilchen in einer geradlinigen Bahn mit konstanter Geschwindigkeit. Wie im vorherigen Kapitel 2.1 beschrieben, wird nur die Geschwindigkeit in Wandnähe, aufgrund der Reibung, langsamer. Es herrscht ein laminarer Strömungszustand in nebeneinander geordneten Bahnen. Steigt nun die Reynolds-Zahl über einen kritischen Wert, wird die Hauptströmungsrichtung von Querbewegungen überlagert. Es kommt zu einem Impulsaustausch, der eine starke Durchmischung des Fluides und eine gleichmäßigere Verteilung der Geschwindigkeit über den gesamten Rohrquerschnitt zur Folge hat.

Wie in folgender Abbildung 2.4 zu erkennen, ist das turbulente Geschwindigkeitsprofil gleichmäßiger bzw. bauchiger, im Gegensatz zum parabolischen laminaren.

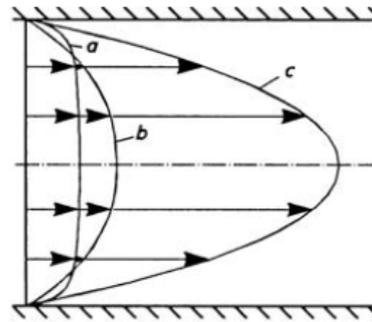


Abbildung 2.4: Geschwindigkeitsverteilung in einem Rohr: (a) turbulent, (b) laminar mit gleichem Volumenstrom wie a und (c) laminar mit gleichem Druckgradient wie a; [1]

Bei der Transition handelt es sich um ein Stabilitätsproblem. Man kann sich vorstellen, dass ein laminares Fluid mit hoher Viskosität kleine Störungen in der Strömung dämpfen kann. Wie man aus der Gleichung der Reynolds-Zahl Gl.2.2 erkennen kann, beschert eine hohe Viskosität eine geringe Reynolds-Zahl. Ist die Reynolds-Zahl jedoch sehr groß, reicht die Dämpfung des Fluides nicht mehr aus und es kommt zu einer Transition. Welcher Art diese Störungen dabei sind, spielt für den laminar-turbulenten Übergang auch eine Rolle. Es ist zu beobachten, dass eine Rohrströmung, im Gegensatz zu einer Grenzschichtströmung gegen zweidimensionale Störungen immun ist. Erst dreidimensionale Störungen initiieren, bei ausreichend hohen Reynoldszahlen, eine Transition.

Folgende Merkmale kann man bei einer turbulenten Rohrströmung beobachten, wenn man einen fixen Raumpunkt betrachtet:

- Druck und Geschwindigkeit sind nicht konstant
- Es treten unregelmäßige Schwankungen wechselnder Frequenz auf
- Im Mittel ist die Strömung jedoch zeitlich konstant - man spricht von einer quasi-stationären Strömung [1]

- Längsangeströmte Platte - Grenzschicht

Die Transition in der Grenzschicht wurde erst später als die der Rohrströmung erforscht. Bei einer Strömung entlang einer ebenen Platte herrscht eine laminare Grenzschicht an der Platten-Vorderkante. Die Grenzschicht und deren Dicke wächst mit der Lauflänge an. Wie bereits im Kapitel 2.1.2 beschrieben kommt es ab einer gewissen Lauflänge x , die bei einer Platte die charakteristische Länge ist, zu einer Überschreitung der Reynolds-Zahl $Re_{x,krit}$ und somit zu einem Übergang der laminaren in eine turbulente Grenzschicht. Die kritische Reynoldszahl ist, wie auch bei der Rohrströmung, abhängig von den Störungen in der Außenströmung. Je kleiner der Druckgradient, der Turbulenzgrad und die Wandrauigkeit, desto stabiler ist die Strömung.

Ist der Druckgradient bei einem schlanken umströmten Körper groß, sodass das Fluid stark beschleunigt wird, bleibt die Grenzschicht im allgemeinen laminar. Bei einem kleinen Druckanstieg kommt es meistens zu einer Transition. Durch eine geeignete Geometrie kann der Umschlag und somit die Erhöhung des Reibwiderstandes nach hinten verschoben werden. Diese Profile, bei denen versucht wird die breiteste Stelle so weit nach hinten wie möglich zu verschieben, werden Laminarprofile genannt [1].

Nicht immer ist dieser Übergang vom laminaren zum turbulenten unerwünscht. Bei stumpfen Körpern, wie z.B. einer Kugel, kommt es bei einer Reynolds-Zahl von $Re \approx 3 \cdot 10$ zu einem Abfall des Widerstandsbeiwerts [1].

Zu erklären ist dieser Effekt durch die Turbulenz der Grenzschicht, die mehr kinetische Energie als eine laminare Grenzschicht hat. Durch den Impulsaustausch normal zur Strömungsrichtung werden die inneren Schichten der Grenzschicht beschleunigt. Die Ablösestelle des Fluides verschiebt sich weiter nach hinten. Dadurch wird das Rückströmgebiet, das verantwortlich für einen größeren Widerstand ist, kleiner. Diesen Effekt konnte als erster L. Prandtl (1914) mit seinem „Prandtlschen Stolperdraht“ beweisen.

Wie genau und in welchen verschiedenen Formen das Fluid vom laminaren in den turbulenten Zustand wechselt, wird in den nächsten Kapiteln erläutert. Grundsätzlich wird die Transition entlang einer ebenen Platte wie folgt eingeteilt:

- Natürliche Transition
- Bypass Transition
- Transition über eine Ablöseblase
- Transition über instationäre Nachlaufdüsen
- Relaminisierung

2.2.1 Natürliche Transition

Die Natürliche Transition ist die klassische Form der Transition. Eine gute Beschreibung, die auf theoretische Überlegungen und experimentelle Beobachtungen basiert, liefert [1]. In der folgenden Abbildung 2.5 werden die einzelnen Stadien der natürlichen Transition dargestellt.

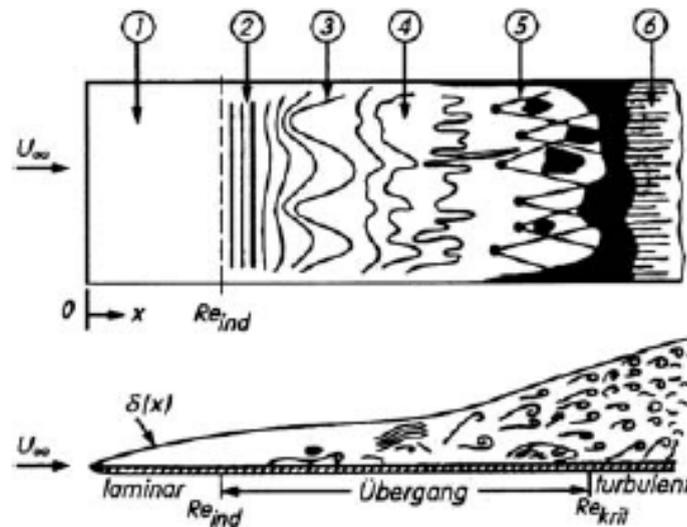


Abbildung 2.5: Stadien der natürlichen Transition an der ebenen Platte [1]

1. An der Vorderkante der ebenen Platte herrscht eine stabile laminare Strömung.
2. Ab der sogenannten Indifferenz-Reynoldszahl Re_{ind} kommt es zur Ausbildung von instationären, zweidimensionalen Tollmien-Schlichting-Wellen.
3. Die Instabilität verstärkt sich weiter bis zu dem Punkt, wo sich dreidimensionale Wellen und Wirbel bilden.
4. Diese Wirbel lösen sich auf.
5. Nach dem Zerfall verwandeln sich die Wirbel in Turbulenzflecken.
6. Die Turbulenzflecken wachsen im weiteren Verlauf zusammen und es bildet sich eine vollturbulente Grenzschichtströmung. Der eigentliche Transitionsprozess ist ab der kritischen Reynoldszahl Re_{krit} abgeschlossen [6].

Die Turbulenzflecken haben eine keilförmige Form und treten zeitlich unregelmäßig an beliebigen Stellen im Bereich (5) der Platte auf.

Die natürliche Transition wurde anhand von Tragflügeln, bei denen der Turbulenzgrad niedrig ist, gründlich erforscht und studiert. Bei den thermischen Turbomaschinen spielt diese Art der Transition eine eher untergeordnete Rolle [6]. Wichtiger ist dort die nachfolgende Erscheinungsform der Transition, die Bypass Transition.

2.2.2 Bypass Transition

Bei einem hohen Turbulenzgrad in der Außenströmung werden die ersten Stadien der natürlichen Transition (2) bis (4) (siehe 2.5) einfach übersprungen und es bilden sich direkt aus der laminaren Grenzschicht Turbulenzflecken. Die Bypass Transition spielt bei den thermischen Turbomaschinen die größte Rolle.

2.2.3 Transition über eine Ablöseblase

Ist eine Grenzschichtströmung einem hohen Druckgradienten und somit starker Verzögerung ausgesetzt, kann sie sich von der ebenen Platte ablösen. Dabei löst sich die laminare Grenzschicht ab und legt sich wieder turbulent an. Der Druckgradient kann durch den Impulsaustausch der turbulenten Strömung nach der Ablöseblase überwunden werden.

Die Transition über eine Ablöseblase tritt unter anderem bei Schaufelprofilen von Axial-Verdichtern und Niederdruck-Turbinen auf. Außerdem kann ein solcher Übergang hinter einem Stolperdraht eintreten [6].

Um eine turbulente Grenzschichtströmung zu erreichen, wurde auch bei einem Versuch für diese Diplomarbeit ein Stolperdraht eingebaut.

2.2.4 Transition über instationäre Nachlaufdellen

Diese Form der Transition entsteht durch das Zusammenspiel zwischen den stehenden Statorschaufeln und den umlaufenden Rotorschaufeln. Die Umströmung der Schaufel verursacht einen Geschwindigkeitsdefekt, der „Nachlaufdelle“ genannt wird. Die Transition über Nachlaufdellen tritt vor allem bei thermischen Turbomaschinen auf.

Wie man aus den Abbildungen 2.6 und 2.7 erkennen kann, kommt es zu einer höheren Turbulenz durch das Zusammenwachsen von druck- und saugseitiger Grenzschicht. Diese turbulenten Nachlaufdellen beeinflussen die laminare Grenzschicht in der nachfolgenden Schaufelreihe und führen zu einem zeitlich periodischem Transitionsvorgang.

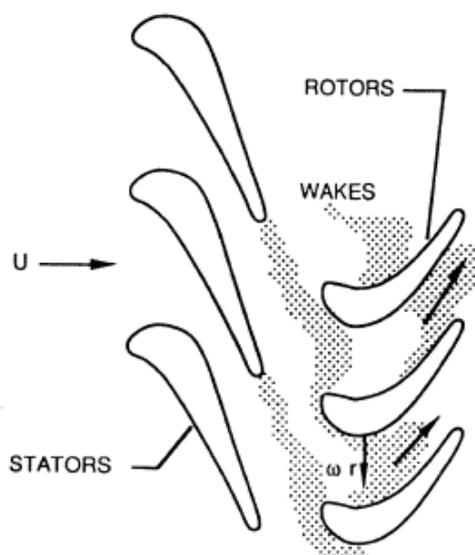


Abbildung 2.6: Nachlaufdellen in einer Turbinenstufe [6]

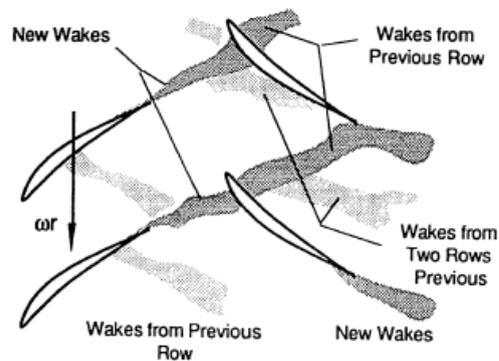


Abbildung 2.7: Nachlaufdehlen in einer Verdichterstufe [6]

2.2.5 Relaminisierung

Die Relaminisierung ist eine weitere Form der Transition und wird im nächsten Kapitel 2.3 näher beschrieben.

2.3 Relaminisierung

Die Relaminisierung ist die Umkehr der eigentlichen Transition. Eine turbulente Strömung wird also laminar. Lange Zeit konnte dieses Verhalten der Strömung nicht nachgewiesen werden. Ein Umschlag von einer ungeordneten, turbulenten Strömung hin zu einer geordneten schien gegen die Gesetze der Thermodynamik zu verstoßen. Man muss jedoch bedenken, dass die Strömung keinem geschlossenen System entspricht und Einwirkungen von Außen unterliegt. Im Jahre 1929 konnte schließlich G. I. Taylor die Relaminisierung experimentell beweisen. Dabei wickelte er einen transparenten Schlauch um einen Zylinder und ließ in das Wasser, an verschiedenen Stellen der Spirale, Farbe injizieren. Wie man im Bild 2.8, einer späteren Wiederholung des Experiments, erkennen kann, hat man im Eintritt eine durch die Turbulenz gut durchmischte Strömung. In den unteren Windungen kommt es nicht mehr zu dieser Durchmischung und es bildet sich ein Farbfaden mit einer scharfen Kante aus. In diesem Bereich kommt es also zu einer Relaminisierung [7].



Abbildung 2.8: Experimenteller Beweis der Relaminisierung [7]

Die Relaminisierung findet nicht nur in wissenschaftlichen Experimenten, sondern auch jeden Tag in unserem Körper statt. Der Übergang von einem turbulenten in einen laminaren Strömungszustand in der Lunge wird im Kapitel 2.3.1 näher erklärt.

Außerdem kann durch die Erforschung der Relaminisierung gesagt werden, dass die laminare Form einer Strömung kein Grundzustand ist. Vielmehr wird die Strömung durch die Turbulenz bestimmt und die laminare Strömung ist der Ausnahmefall.

2.3.1 Formen der Relaminisierung

Der Übergang von einer turbulenten Strömung zu einer laminaren wird durch viele Faktoren beeinflusst: starke Beschleunigung der Strömung, magnetische Felder, Rotation, Aufwärmvorgänge, Krümmung, etc.

Die in dieser Arbeit gewählte Einteilung der Relaminisierung in verschiedene Formen geht auf R. Narasimha und K. R. Sreenivasan [7] zurück. Die beiden Wissenschaftler haben in den 70er Jahren verschiedene Mechanismen, die Relaminisierung auslösen, erfasst und erforscht. Dabei entstand folgende Einteilung:

- Relaminisierung durch Dissipation
- Relaminisierung in stabil geschichteten Strömungen
- Relaminisierung in stark beschleunigten Strömungen
- Weitere Formen

Relaminisierung durch Dissipation

Als Dissipation wird der Übergang von einer gerichteten Energieform (z.B. kinetische Energie) in eine ungerichtete Molekülbewegung (Wärme) bezeichnet. Die Dissipation wertet also eine Energie ab.

Durch die Dissipation wird die Turbulenz einer Strömung unterdrückt und es kommt zum Umschlag zu einer laminaren Strömung. Die turbulente Energie nimmt hauptsächlich durch das Einwirken einer molekularen Transporteigenschaft, wie zum Beispiel Viskosität, ab.

Ein Beispiel für diese Art von Relaminisierung bildet die Strömung durch einen Diffusor. Dabei wird die Geschwindigkeit des Fluides in einem Kanal durch die Querschnittsaufweitung verzögert und die kritische Reynolds-Zahl sinkt. Diese Relaminisierung der Grenzschicht wird also durch das genaue Gegenteil der Transition, bei der über einer kritischen Reynolds-Zahl die Strömung turbulent wird, ausgelöst. R. Narasimha und K. R. Sreenivasan vermuten, dass sich die viskose Unterschicht in eine laminare Grenzschicht verwandelt.

Außerdem erreicht der Reibkoeffizient bei dieser Form der Relaminisierung schneller den laminaren Wert als das Geschwindigkeitsprofil die laminare Form annimmt. Dieser Effekt ist in der folgenden Abbildung 2.9 dargestellt.

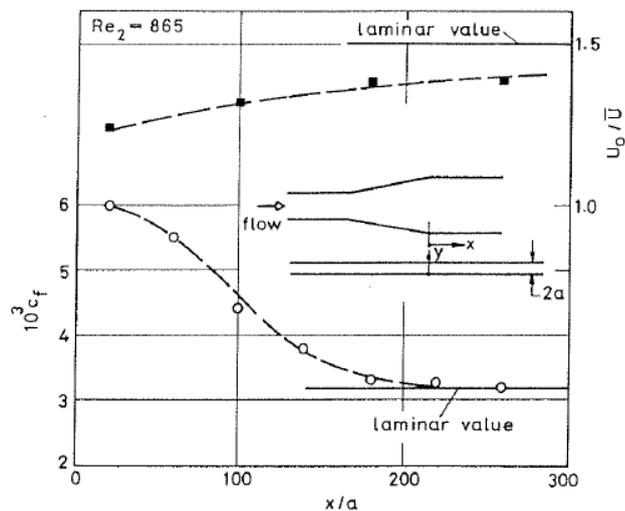


Abbildung 2.9: Verlauf des Reibkoeffizienten und der Geschwindigkeit bei der Relaminisierung, ausgelöst durch Dissipation in einem Diffusor [7]

Wie man aus der Gleichung 2.2 erkennen kann, wird diese Strömung nicht nur in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, sondern auch von der Länge laminar. In einem Rohr ist diese charakteristische Länge genau der hydraulische Durchmesser. Das heißt also, dass die Reynolds-Zahl und somit auch die Relaminisierung durch Dissipation in einem Rohr neben der Geschwindigkeit auch vom Durchmesser abhängt.

So erklärt sich auch die Relaminisierung in der menschlichen Lunge, wo durch eine Verzweigung der Strömung die Reynolds-Zahl unter dem kritischen Wert minimiert wird. Laut Detlef Kamke und Wilhelm Walcher [8] herrscht in der Luftröhre, dem Atemweg zwischen Kehlkopf und Stammbronchien, turbulente Strömung. Die Atemluft wird in weiterer Folge in den Sekundärbronchien auf beide Lungenflügel verteilt. Dadurch kommt es zu einer Reduzierung der Reynolds-Zahl. Noch bevor die Strömung die kleinen Bronchien erreicht, ist sie laminar.

Relaminisierung in stabil geschichteter Strömung

Diese Form der Relaminisierung ist bei einer horizontalen Grenzschicht mit Dichteschwankungen möglich. Solch eine Schichtung tritt z.B. auf, wenn die durch den Wärmeübergang hervorgerufene Dichteänderung einer Grenzschicht berücksichtigt wird.

Eine stabile Schichtung liegt vor, wenn die Dichte des Fluides nach oben abnimmt. Bei einer instabilen ist genau das Gegenteil der Fall.

Genauso wie bei der Relaminisierung bedingt durch Dissipation führt eine Abnahme der turbulenten Energie bei einer stabil dichtegeschichteten Strömung zu einem Umschlag vom Turbulenten ins Laminare. Jedoch bewirkt bei dieser Form die Arbeit gegen äußere Kräfte ein Stabilisieren der Dichtegradienten und somit eine Unterdrückung der Turbulenz. Zu diesen äußeren Kräften zählen neben der Auftriebskraft auch Kräfte durch den Krümmungseffekt.

Ein einfaches Beispiel für diese Form der Relaminisierung ist ein Behälter, gefüllt mit 2 verschiedenen Fluiden. Diese beiden Fluide besitzen eine unterschiedliche Dichte. Das leichtere Fluid wird nach oben steigen und verrichtet damit eine Arbeit gegen eine äußere Kraft, die Schwerkraft. Die turbulente Energie wandelt sich also in potentielle Energie um [7].

Die Kennzahl, die neben der Reynoldszahl von Bedeutung für eine stabil geschichtete Strömung ist, heißt Richardson-Zahl und errechnet sich aus dem Verhältnis von potentieller und kinetischer Energie.

$$Ri = -\frac{g \cdot \frac{d\rho}{dy}}{\left(\frac{dU}{dy}\right)_w^2} \quad (2.4)$$

Die Strömung ist bei kleinen Ri-Zahlen turbulent. Ab der kritischen Richardson-Zahl schlägt die Strömung ins Laminare um. Als Bereich, in dem eine Relaminisierung eintritt, kann eine kritische Richardsonzahl von $Ri = 0,15$ bis $Ri > 0,5$ genannt werden. Laut H. Schlichting [1] ist die bei einer horizontalen Plattenströmung die Grenzschicht ab $Ri > 1/24$ stabil.

Relaminisierung in stark beschleunigter Strömung

Eine weitere Form der Relaminisierung tritt bei einer Strömung mit hohem negativen Druckverhältnis, also bei hoher Beschleunigung auf. Im Gegensatz zum langsamen Umschlag der turbulenten Strömung durch Dissipation braucht diese Form der Relaminisierung, genauso wie die in stabil geschichteter Strömung, viel weniger Zeit.

In dieser Diplomarbeit wird hauptsächlich diese Form der Relaminisierung untersucht. Daher wird sie in einem eigenen Kapitel genauer betrachtet.

Weitere Formen

Laut R. Narasimha und K. R. Sreenivasan können alle weiteren Formen der Relaminisierung durch die Kombination der in den letzten Kapitel beschriebenen Grundtypen erklärt werden. Für genauere Beschreibungen von Relaminisierung ausgelöst durch Krümmung, Rotation, thermische Effekte, magnetische Effekte, etc. wird auf [7] verwiesen.

2.3.2 Relaminisierung in stark beschleunigter Grenzschichtströmung

Wenn eine Strömung und somit deren Grenzschicht beschleunigt wird, erwartet man, dass der Reibungswiderstand c_f ansteigt und die viskose Unterschicht kleiner wird. Beim Übergang der Grenzschichtströmung vom laminaren zum turbulenten Zustand ist jedoch das genaue Gegenteil der Fall.

Diese Form der Relaminisierung benötigt keine kleinen Reynolds-Zahlen oder äußere Kräfte, sie wird hauptsächlich durch die Druckkräfte bestimmt. Es wird ein lediglich kleiner Einfluss von Dissipation und Absorption vermutet. Speziell die Dissipation könnte im wandnahen Bereich, wo sich eine laminare Schicht entwickelt, zur Relaminisierung beitragen [7]. In dieser inneren Schicht zerfällt die „Anfangs-Turbulenz“, sodass sich diese von Viskosität bestimmte innere Schicht aufbauen kann. Die laminare Schicht kann durch die Beschleunigung stabil gehalten werden und wachsen [9].

Es muss jedoch gesagt werden, dass die Relaminisierung der Grenzschicht viel schneller erfolgt als der Umschlag ausgelöst durch Dissipation. Daher kann der Relaminisierungsprozess laut [10] nur zu einem sehr kleinen Teil von der Dissipation, die durch niedrige Reynolds-Zahlen initialisiert wird, bestimmt werden. (siehe Kapitel 2.3.1)

Der Zerfall oder die Zerstörung der Turbulenz in der äußeren Schicht der Grenzschicht ist nicht signifikant, sondern die starke Beschleunigung führt nur zu einer Verzerrung der turbulenten Strukturen. Diese Rest-Turbulenz bleibt zwar bestehen, übt jedoch keinen Einfluss auf die Strömung aus. Die Beeinflussung der von der Viskosität bestimmten inneren Schicht und der äußeren Schicht ist schwach. Sie besitzen jedoch die gleichen Randbedingungen [9].

Diese Form des Grenzschichtüberganges wird im Gegensatz zur „hard“ Relaminisierung, bei der die Turbulenz komplett verschwindet (Dissipation), „soft“ Relaminisierung genannt [10].

Die Relaminisierung der Grenzschicht ist zusätzlich abhängig von der Reynolds-Zahl. Bei niedrigen Reynolds-Zahlen wird sie durch viskose Effekte unterstützt und es kommt zu einem „homogenen“ Übergang von einer turbulenten in eine laminare Grenzschichtströmung. Bei hohen Reynolds-Zahlen kann es, trotz des hohen Druckgradienten, zu turbulenten Spots während der Relaminisierung kommen. Diese Form wird „intermittent“ Relaminisierung genannt [10].

Mayle erklärt die Relaminisierung durch die Streckung der Wirbel, die Turbulenz bilden. Diese Streckung wird durch große Beschleunigung der Grenzschichtströmung und Abbau der Wirbel durch viskose Effekte erreicht. Er glaubt, dass die Relaminisierung aus einem ausgewogenen Gleichgewicht zwischen Konvektion, Produktion und Dissipation von turbulenter kinetischer Energie entsteht.

Die Entwicklung einer neuen laminaren Grenzschicht kann im Experiment von R. Narasimha und K. R. Sreenivasan beobachtet werden. In diesem wurde die Umströmung einer konvexen Ecke mit Überschallgeschwindigkeit mittels Schlierentechnik

sichtbar gemacht. Unter anderem mit Hilfe dieser Technik haben wir im Experiment versucht die Relaminisierung nachzuweisen. Die Schlierentechnik und ihre Ergebnisse werden später näher beschrieben. (siehe 5.2)

In den folgenden Abbildungen 2.10 und 2.11 kann man einen Prandtl-Meyer-Fächer beobachten der bei der Umströmung einer konvexen Ecke mit Überschallgeschwindigkeit entsteht. Der Fächer besteht aus einer unendlichen Anzahl von Machwellen. Die für diese Arbeit interessante Bildung einer laminaren Unterschicht unter der turbulenten Grenzschicht, die immer weiter anwächst, kann man deutlich erkennen.

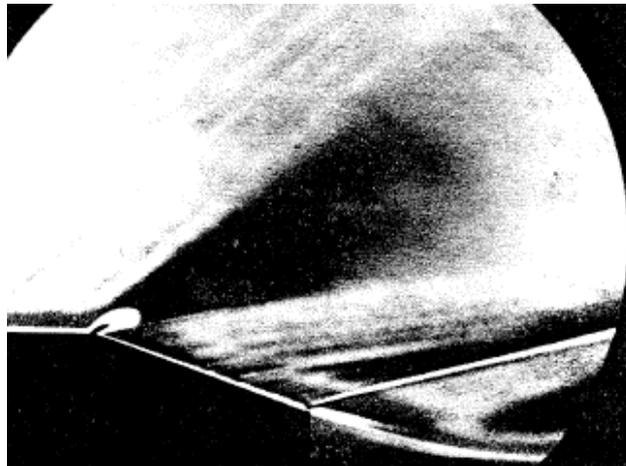


Abbildung 2.10: Schlierenfotografie: Prandtl-Meyer-Fächer bei Umströmung einer konvexen Ecke mit Überschallgeschwindigkeit [7]

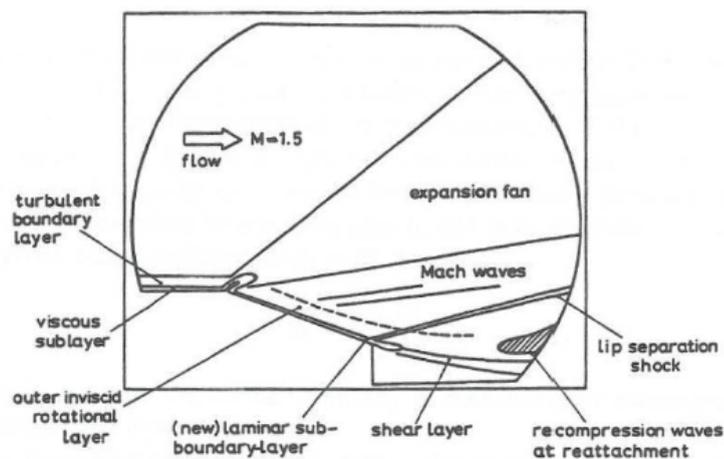


Abbildung 2.11: Prinzipskizze: Prandtl-Meyer-Fächer bei Umströmung einer konvexen Ecke mit Überschallgeschwindigkeit [7]

Interessant ist auch, dass die ersten Experimente zu starker Beschleunigung fast ausschließlich im kompressiblen Überschallbereich gemacht wurden. Im Gegensatz

dazu sind die neueren Versuche meist im inkompressiblen Unterschallbereich durchgeführt worden. Als Beispiel kann hier die Arbeit von Masashi Ichimiya [11] genannt werden.

Erkennungsmerkmale der Relaminisierung

Es gibt also drei physikalische Mechanismen der Relaminisierung. Bei dem durch Dissipation bestimmten Übergang nimmt die turbulente Energie durch molekularen Transporteigenschaft, wie zum Beispiel Viskosität, ab. Für diese Form lässt sich vergleichsweise einfach die kritische Reynolds-Zahl finden, die den Beginn der Relaminisierung definiert. Beim zweiten Mechanismus, der Relaminisierung in stabil geschichteter Strömung, gibt es eine kritische Richardson-Zahl, die die Umwandlung der turbulenten Energie durch äußere Kräfte beschreibt. Ab wann sich eine stark beschleunigte Grenzschichtströmung vom turbulenten in den laminaren Zustand wandelt, ist nicht so einfach zu beschreiben [9].

Die Relaminisierung ist ein schrittweiser Prozess und wird von drastischen Änderungen in der Grenzschicht-Struktur begleitet.

- Die Grenzschichtdicke nimmt ab
- Das Geschwindigkeitsprofil verändert sich, (siehe Abbildung 2.12) wo die beschleunigte Strömung das Blasius-Profil einnimmt.

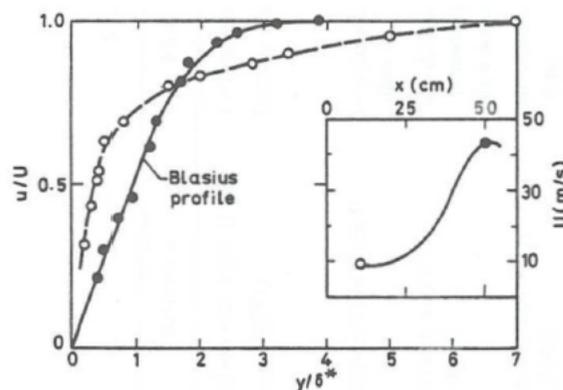


Abbildung 2.12: Geschwindigkeitsprofil vor und nach der Beschleunigungsphase [7]

- Der Formparameter H nimmt zuerst ab und steigt dann wieder an. Der Formparameter errechnet sich wie folgt aus dem Verhältnis von Verdrängungsdicke δ_1 und Impulsverlustdicke δ_2 :

$$H = \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (2.5)$$

hierbei ist:

$$\delta_1 = \int_0^\infty \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy \quad (2.6)$$

$$\delta_2 = \frac{U}{U_\infty} \int_0^\infty \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy \quad (2.7)$$

- Der Reibungswiderstand c_f steigt kurz an, bevor er dann stark abfällt
- Der Wärmeübergangskoeffizient sinkt
- Der Turbulenzgrad Tu sinkt
- Reynoldsspannungen in Wandnähe nehmen ab; weiter entfernt von der Wand bleiben die Reynoldsspannungen konstant
- etc.

Grundsätzlich kann man zwischen physikalische und parametrische Kriterien unterscheiden. Die physikalischen Kriterien sind im wesentlichen die oben beschriebenen Änderungen der Grenzschicht-Struktur. Durch sie kann man die Relaminisierung bemerken, aber ihre Auftreten nicht vorhersagen. Daher versucht man Parameter zu entwickeln die den genauen Start definieren. Leider gibt es bis heute noch keine zufriedenstellende Kennzahl.

Der am weitesten verbreitete Parameter ist der Beschleunigungsparameter K , der im nächsten Kapitel 2.3.2 genauer beschrieben wird.

Bereiche der Relaminisierung

In diesem Kapitel werden kurz die einzelnen Bereiche der Relaminisierung beschrieben.

Laut K. R. Sreenivasan [9] gliedert sich die Grenzschichtströmung, die von einem turbulenten Zustand in einen völlig relaminisierten Zustand übergeht, in folgende Regionen (siehe Abbildung 2.13).

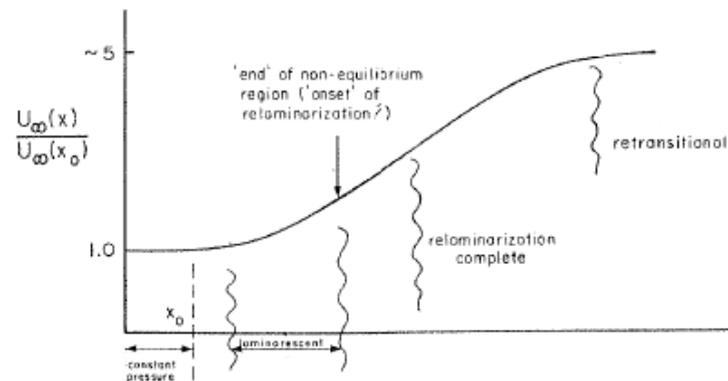


Abbildung 2.13: Bereiche der Relaminisierung nach K. R. Sreenivasan [9]

- In einem kleinen Initialisierungsgebiet, in der die Beschleunigung noch keine große Auswirkung zeigt, gelten die üblichen turbulenten Modelle, wie z.B. das logarithmische Wandgesetz.
- Der sogenannte „laminarescent“ Zustand ist ein frühes Stadium der Relaminisierung. Die Grenzschichtströmung ist also noch nicht laminar, sondern erst am Weg dorthin.
- Nach diesem Bereich beginnt die Grenzschichtströmung zu relaminisieren. Wenn der Druckgradient und die daraus resultierende Beschleunigung zu klein ist, kann es anstatt einer Relaminisierung zur Transition kommen.
- Zum Schluss, wenn der hohe negative Druckgradient nicht mehr aufrecht erhalten werden kann, kommt es zu einer Transition.

Beschleunigungsparameter - K-Wert

Wie im Kapitel 2.3.2 beschrieben, sind die Parameter, die den Anfang oder allgemein das Auftreten der Relaminisierung vorhersagen, nicht unumstritten. Zwischen den meisten Parametern gibt es keine Übereinstimmung. Die meisten von ihnen können jedoch, durch ihre Abhängigkeit von der Viskosität, als eine Art Reynolds-Zahl interpretiert werden. Sie unterscheiden sich also nur von der gewählten Geschwindigkeit und Länge [12].

In den letzten Jahren wurde vermehrt der dimensionslose Beschleunigungsparameter K benutzt, um eine Relaminisierung vorherzusagen. Er ist folgendermaßen definiert:

$$K = \frac{\nu}{U_\infty} \cdot \frac{dU}{dx} \quad (2.8)$$

Die Geschwindigkeit U_∞ ist die Freistromgeschwindigkeit, die sich über die Lauflänge x verändert. Ist der Wert von K positiv, entspricht es einer Beschleunigung der

Strömung. Eine Verzögerung ist durch einen negativen Beschleunigungsparameter gekennzeichnet.

Man kann erkennen, dass der Beschleunigungsparameter ein Freistromparameter ist, der die Vorgänge in der Grenzschicht nicht berücksichtigt. Dies ist der größte Kritikpunkt an diesem Parameter, der eigentlich ein Ereignis in der Grenzschicht beschreiben will ohne Information über sie in die Gleichung einfließen zu lassen. Im Gegensatz zu anderen Parametern lässt er sich jedoch leicht berechnen und hat sich in einer Vielzahl an Versuchen bewährt.

Außerdem wird der Beschleunigungsparameter K von Mayle [6] verwendet um zu zeigen, dass sich der Beginn der Transition bei einer Beschleunigung (positiver Beschleunigungsparameter bzw. negativer Druckgradient) des Fluides weiter nach hinten, in Strömungsrichtung, verlagert. Eine Verzögerung (negativer Beschleunigungsparameter bzw. positiver Druckgradient) bewirkt das genaue Gegenteil und verschiebt den Transitionsbeginn nach vorne.

F. A. Schraub und S. J. Kline haben die Beschleunigungseffekte auf die Grenzschicht folgendermaßen eingeteilt:

Tabelle 2.2: Effekt des Beschleunigungsparameters auf die Grenzschicht[13]

Beschleunigungsparameter	Effekte
$K < 10^{-6}$	Keine bemerkbaren Effekte der Beschleunigung auf die untere Schicht der Grenzschicht.
$10^{-6} \leq K < 3,5 \cdot 10^{-6}$	Die Struktur der unteren Schicht ist merklich von der hohen Beschleunigung beeinflusst, aber immer noch turbulent.
$K \geq 3,5 \cdot 10^{-6}$	Es tritt eine komplette Umkehrung in eine laminare Strömung auf, wenn die Beschleunigung ausreichend lange auf die Grenzschicht wirkt.

Es muss jedoch bemerkt werden, dass der Wert des kritische Beschleunigungsparameters für den Beginn oder das Auftreten von Relaminisierung je nach Bericht variiert.

Kapitel 3

Auslegung und Simulation

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Auslegung der Düsengeometrie für den Relaminisierungs-Einsatz genauer erklärt. Dabei wurden verschiedene Ansätze probiert, um auf die gewünschten Parameter zu kommen. Die Entwicklung war ein iterativer Prozess der aus Konstruktion, Vernetzung, Simulation und Vergleich der erhaltenen Ergebnisse bestand.

3.1 Auslegung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war es, den Hochdruck-Stator des AIDA Projektes auf Relaminisierung zu untersuchen. Bei Simulationen der AIDA Teststufe ist aufgefallen, dass die Ergebnisse der Simulation besser mit den gemessenen Ergebnissen übereingestimmt, wenn die Statorstufe laminar gerechnet wurde. Daraus folgte die Annahme, dass es dort zu einer Relaminisierung in der stark beschleunigten Grenzschichtströmung kommt. In der folgenden Abbildung ist die AIDA Teststufe dargestellt, die im Labor des des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik vermessen wurde.

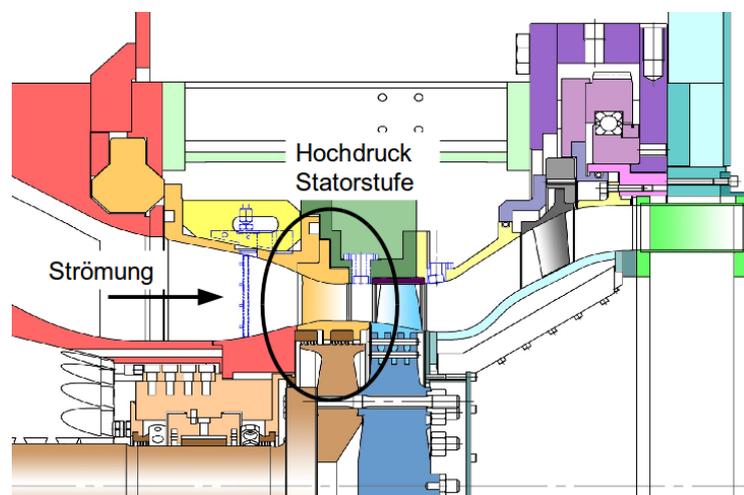


Abbildung 3.1: AIDA Testturbine mit Hochdruckstator-Stufe

Diese Umkehrung der turbulenten Grenzschicht-Struktur in eine laminare sollte experimentell nachgewiesen werden. Der dazu nötige Versuchs-Einsatz, der die Grenzschicht eines strömenden Fluides relaminisiert, wurde durch Simulationen verschiedener Geometrien gefunden und überprüft. Dieser Einsatz wurde in weiterer Folge für den transsonischen Prüfstand des TTM Instituts der TU-Graz gebaut. Der Versuchs-Einsatz sollte einen uneingeschränkten Zugang für verschiedene Messtechniken ermöglichen und die Parameter aus dem AIDA Projekt so gut wie möglich abbilden. Leider war es nicht möglich, alle Auslegeparameter des realen AIDA Stators in dem transsonischen Prüfstand nachzubilden.

Da ein Fluid stark beschleunigt werden musste, ähnelt die Geometrie des Versuchs-Einsatzes einer Düse. Folgende Abbildung 3.2 zeigt eine vernetzte Düse, die simuliert wurde.

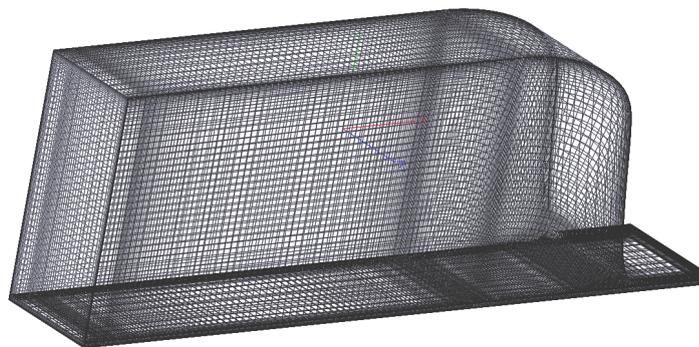


Abbildung 3.2: Rechnetz einer Düse

Im nächsten Kapitel 3.1.1 sind die einzelnen Parameter genauer beschrieben, die die Konstruktion beeinflusst haben.

3.1.1 Auslegeparameter

Beschleunigungsparameter K

Dieser Parameter soll, wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben, das Auftreten der Relaminisierung vorhersagen. Als Indiz für eine Umkehrung der Grenzschichtströmung ist er nicht unumstritten, jedoch ist der K -Wert der wohl am weitesten verbreitete Parameter, der in den meisten Arbeiten verwendet wird. Der kritische Wertebereich, bei dem es zur Relaminisierung kommt, ist bekannt und liegt in etwa bei $K = 3,0 \cdot 10^{-6} \div 3,5 \cdot 10^{-6}$.

Errechnet wird der Beschleunigungsparameter K nach folgender Gleichung mit der kinematischen Viskosität, der Freistromgeschwindigkeit U und dem Weg in Strömungsrichtung x :

$$K = \frac{\nu}{U_\infty} \cdot \frac{dU}{dx} \quad (3.1)$$

Der Beschleunigungsparameter des Relaminisierungs-Einsatzes sollte den der Stator-kaskade, welche in der Abbildung 3.3 über der Sehnenlänge s der Druckseite des Stators dargestellt ist, so gut wie möglich darstellen. Um jedoch in einer experimentelle Messung den Nachweis für eine Relaminisierung zu ermöglichen, sollte der kritische Beschleunigungsparameter in einem größeren Gebiet K_{krit} übertreffen.

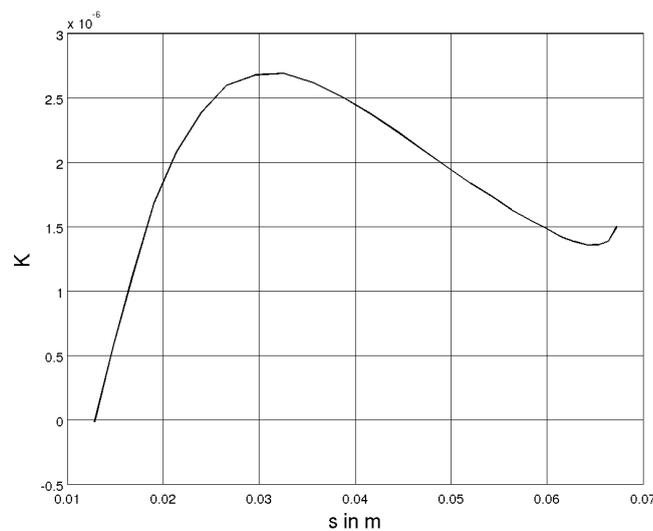


Abbildung 3.3: Verlauf des Beschleunigungsparameter auf der Druckseite des Stators der AIDA-Konfiguration

Wie aus Gleichung 3.1 ersichtlich, hängt der Verlauf des Parameters von der Freistromgeschwindigkeit und zum größten Teil von der Freistrombeschleunigung ab. Die Beschleunigung in einer Düse wird durch einen negativen Druckgradienten erreicht, der durch die Geometrie vorgegeben wird. Daraus folgt, dass der Beschleunigungsparameter K vom Totaldruck im Einlass und dem daraus resultierenden Druckgradienten abhängt.

Druck

Wie bereits beschrieben, hat der totale Einlassdruck großen Einfluss auf den Beschleunigungsparameter und somit auf die Relaminisierung. Der Druckverlauf wird durch die Geometrie der Düse bestimmt. Da der transsonische Prüfstand dem hohen Druck, der auf der Druckseite des Stators herrscht und in Abbildung 3.4 über der Sehnenlänge s dargestellt wird, nicht stand hält. Musste ein geringerer Einlassdruck für die Auslegung der Geometrie gewählt werden.

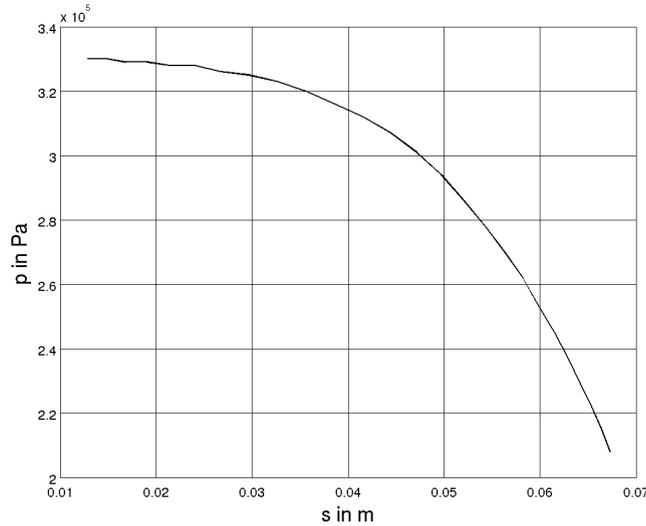


Abbildung 3.4: Verlauf des Drucks auf der Druckseite des Stators der AIDA-Konfiguration

Eine weitere Reduzierung des Totaldrucks im Experiment war notwendig, um eine Zerstörung der Glasscheiben des Versuchseinsatzes zu vermeiden. Die Scheiben im Versuchseinsatz ermöglichen den optischen Zugang für die Messung mittels Schlierentechnik und Laservibrometer.

Geschwindigkeit

Wie auch der Druck ist die Geschwindigkeit durch die Geometrie der Düse bestimmt.

Die Freistromgeschwindigkeit in Abhängigkeit von x wurde aus den Simulationsergebnissen mit Hilfe der isentropen Mach-Zahl Ma und der Schallgeschwindigkeit a errechnet.

$$U_{\infty}(x) = Ma(x) \cdot a \quad (3.2)$$

Hierbei errechnet sich die herrschende Schallgeschwindigkeit folgendermaßen:

$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T(x)} = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p(x)}{\rho(x)}} \quad (3.3)$$

Die isentrope Mach-Zahl wird wie folgt nach [14] berechnet:

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_{tot}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{p(x)}} \quad (3.4)$$

Die folgende Abbildung 3.5 gibt den Verlauf der Freistromgeschwindigkeit über die Sehnenlänge entlang der Druckseite wieder.

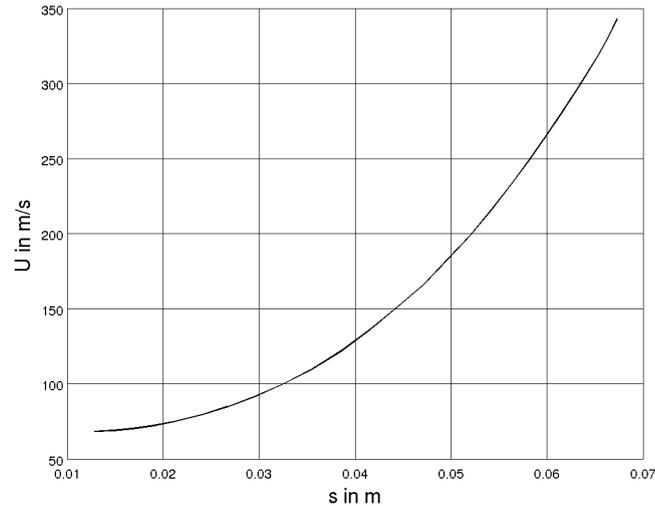


Abbildung 3.5: Verlauf der Geschwindigkeit in der Druckseite des Stators der AIDA-Konfiguration

3.1.2 Verschiedene Düsen-Geometrien

Wie bereits erklärt, ergibt die Geometrie der Düse den Druck- und Geschwindigkeitsverlauf. Dabei ist zu beachten, dass die Breite der Düse von 100mm durch den transsonischen Prüfstand vorgegeben ist. Eine Variation der Geometrie konnte also nur durch Anpassen der oberen und unteren Kontur erreicht werden.

Grundsätzlich ergeben sich nun zwei Konstruktionsmöglichkeiten. Man kann die obere oder die untere Kontur als ebene Platte ausführen und die Beschleunigung ausschließlich mit der anderen Kontur bewerkstelligen. Oder man probiert mit der Verengung von Ober- und Unterseite, also einer Düse im herkömmlichen Sinn, das Fluid zu beschleunigen.

In den folgenden Punkten soll genauer auf diese beiden Möglichkeiten eingegangen werden.

- Düse mit ebener Platte

Der Druckgradient wird bei der ebenen Platte durch die Geometrie der Gegenkontur aufgebracht. Folgende Abbildung 3.6 zeigt eine Düse mit ebener Platte, welche für diese Diplomarbeit konstruiert wurde.

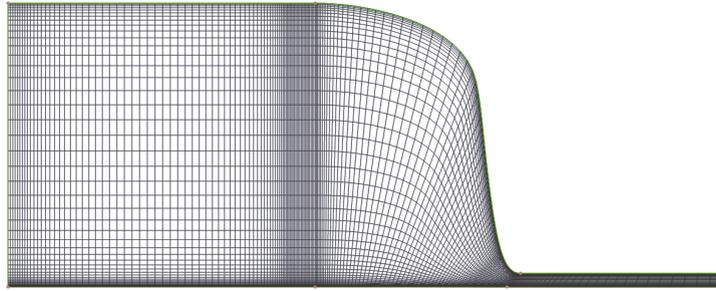


Abbildung 3.6: Rechennetz einer Düse mit ebener Platte

Der Vorteil einer solchen Geometrie ist, dass der statische Druck, den man durch Druckmessbohrungen normal zur ebenen Platte erhält, genau gemessen werden kann. Bei einer gekrümmten Fläche ist die Fertigung von einer größeren Anzahl von Druckmessbohrungen normal zur gekrümmten Fläche äußerst aufwändig. Ein weiterer Vorteil ist, dass die einzelnen Messpunkte in der Grenzschicht über der ebenen Platte leichter zu erfassen sind. Es muss zum Beispiel mit dem Vibrometer keine Kurve mit der Hilfe von zwei Translationsachsen abgefahren werden, sondern es reicht eine Achse für eine geradlinige Bewegung.

Diese Konstruktion bietet jedoch nicht nur Vorteile, sondern auch Nachteile. So muss z.B. die ganze Verengung der Düse durch die obere Kontur bewerkstelligt werden. Bei einem hohen Druckverhältnis von Einlass- zu Auslassdruck führte dies zu einer starken negativen Steigung der Kurve. Wurde die Steigung zu groß, konnte die Strömung der oberen Kontur nicht mehr folgen und es bildete sich, wie in Abbildung 3.7 gezeigt wird, eine Ablöseblase aus.

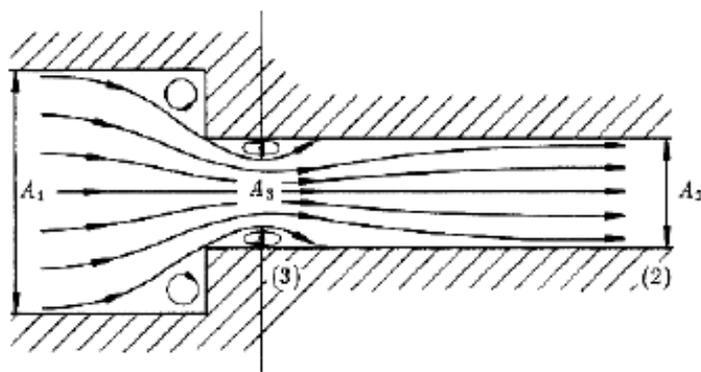


Abbildung 3.7: Plötzliche Querschnittsverengung führt zu einer Ablösung an der scharfen konvexen Kante. [14]

Die Konstruktion der ebenen Platte wurde in den meisten, in der Literatur gefundenen unterkritischen Relaminisierungs-Experimenten verwendet. Für diese Diplomarbeit ist ebenfalls eine Düse mit ebener Platte gewählt worden.

Ein sinusförmiger Verlauf der oberen Kontur, wie von Masashi Ichimiya für seinen Relaminierungs-Versuch verwendet, konnte für diese Arbeit nicht gewählt werden, da sich bei hohem Druck eine Ablöseblase am Anfang der oberen Kontur bildete.

- Konventionelle Düse

Wie beschrieben besitzt diese Geometrie eine Kurve an der Ober- und Unterseite. Durch diese Konstruktion wird die Steigung der Kontur reduziert.

Außerdem ist es möglich eine Düse für einen bestimmten Druckverlauf auszulegen, der wiederum den Beschleunigungsparameter K beeinflusst. Ist also der Druck über eine Lauflänge x bekannt, kann die Fläche der Düse über die Lauflänge x bestimmt werden und somit auch die Geometrie der Düse. Für eine genauere Erläuterung zur Auslegung einer Düse sei [14] empfohlen.

Bedauerlicherweise eignet sich diese Art der Düsenauslegung nicht für das Finden einer Düse mit Relaminisierung in der Grenzschicht. Denn, wie in Abbildung 3.8 zu erkennen ist, ändert sich der Druck in der Grenzschicht entlang der Wand nicht genauso wie in der Symmetrieachse der Düse.

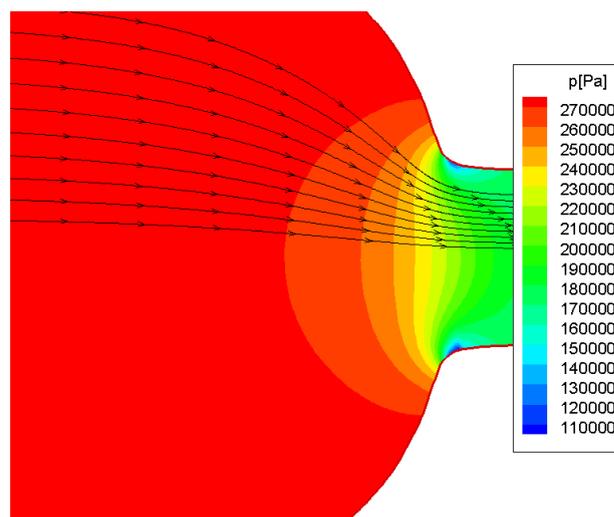


Abbildung 3.8: Druckverteilung in einer Düse

Daher konnte der Verlauf des „Wunsch“-Beschleunigungsparameter entlang der Wand mit dieser Methode nicht modelliert werden.

Durch die im Kapitel 3.3.2 beschriebenen konstruktiven Maßnahmen konnte der Verlauf von Druck, Geschwindigkeit und Beschleunigungsparameter beeinflusst werden.

3.2 Netzgenerierung

Um die ausgelegten Geometrien simulieren zu können, mussten sie vernetzt werden. Das Rechenetz bildet also die Grundlage für eine CFD-Simulation. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden zwei- und dreidimensionale Netze erstellt. Die zweidimensionalen Netze dienten der „Konturfindung“, während die Simulation mit dreidimensionalen Netzen der Kontrolle diente, um zum Beispiel zu sehen, wie die Seitenwände einzelne Parameter beeinflussen. Der Unterschied der Simulationsergebnisse war nicht sehr groß, wie in Kapitel 3.3.2 näher beschrieben wird.

Grundsätzlich können die Rechenetze in strukturierte und unstrukturierte unterteilt werden. Bei den strukturierten Netzen besitzen die Zellen eine logische Anordnung. Es kann von einer Zelle auf ihre Nachbarzelle, in jede Richtung, geschlossen werden. Dies führt neben einer verkürzten Rechenzeit und Minimierung des benötigten Speicherbedarfs auch zu Vorteilen in der Auswertung der Simulationsergebnisse.

Bei komplizierten Geometrien ist Diskretisierung mit einem strukturierten Netz nicht immer möglich oder einfach zu aufwändig. Hier kommt das unstrukturierte Netz mit seinen unregelmäßig angeordneten Gitterpunkten zum Einsatz.

Die Zellen sind je nach Dimension des Rechenetzes Flächen- oder Volumenelemente. Im zweidimensionalen Fall können das Dreiecke, Quadrate oder Trapeze sein. Ein dreidimensionales Gitter kann aus Hexaeder, Tetraeder, Prismen oder Pyramiden aufgebaut sein. Für strukturierte Rechenetze, wie sie für diese Diplomarbeit generiert wurden, bestehen die Elemente meistens aus Vierecken bzw. Hexaeder. Bei unstrukturierten werden häufig Tetraeder verwendet, um die komplexen Geometrien zu vernetzen.

Das zum Vernetzen verwendete Programm wird im nächsten Kapitel 3.2.1 näher beschrieben.

3.2.1 AiGrid

In dieser Diplomarbeit wurde der Netzgenerator AiGrid zum Vernetzen der entworfenen Düsen verwendet. Mit diesem Programm ist es möglich zwei- und dreidimensionale strukturierte Netze zu erstellen. Dabei liegt der Schwerpunkt dieses Generators auf das Vernetzen von rotierenden Turbomaschinenstufen.

Das besondere an diesem Netzgenerator ist, dass ein Rechenetz durch eine einfache Programmiersprache generiert wird. Es lassen sich Parameter definieren, die das Netz beliebig verändern. So ist es möglich, das Rechenetz nach Belieben zu verfeinern, ohne die Verteilung der Knotenpunkte ändern zu müssen.

Außerdem können ähnliche Geometrien, wie die Relaminisierungsdüse, schnell und nur mit geringen Anpassungen vernetzt werden.

3.2.2 Vernetzung der Geometrie

Damit ein Rechennetz die Rechenergebnisse nicht negativ beeinflusst, muss es bestimmte Anforderungen erfüllen. So sollen die Zellen nicht zu sehr verzerrt sein (Skewness) und in Strömungsrichtung orientiert sein. Auch das Seitenverhältnis (Aspect Ratio) ist eine wichtige Kenngröße für die Qualität eines Netzes. So soll zum Beispiel im zweidimensionalen Fall eine rechteckige Zelle nicht zu langgezogen sein. Außerdem darf sich die Größe eines Elements nicht zu sehr von der des Nachbarelements unterscheiden. Diese Anforderung wird auch Expansionsrate genannt.

Wie bereits beschrieben, ist eine strukturierte Vernetzung bei großen Änderungen in der Geometrie schwer zu machen. Bei einer Düse mit einer großen Krümmung im Verlauf der Kontur ist genau das der Fall. Einzelne Zellen werden stark verzerrt (siehe 3.9). Um diesen negativen Effekt auf die Qualität des Rechennetz zu reduzieren, wurden die Verteilungen der Gitterpunkte an der oberen und unteren Wand der Düse angepasst.

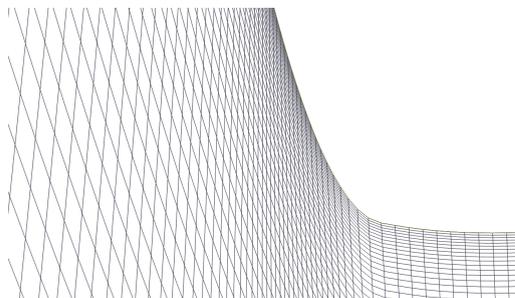


Abbildung 3.9: Verzerrtes Rechennetz

Da die Rechennetze für weitere Simulationen mit Transitionsmodellen geeignet sein sollten, wurde das Netz in Wandnähe hoch aufgelöst. Um keine Netz-Verzerrung in der Grenzschicht an der Wand zu haben, wurde ein zusätzlicher Gitter-Block eingefügt. Wie in Abbildung 3.10 ersichtlich, ermöglicht dieser zusätzliche untere Block eine Entkoppelung vom oberen, dessen Zellen durch die Krümmung der oberen Kontur stark verzerrt sind. In der folgenden Darstellung kann man das fein aufgelöste Gitter in Wandnähe erkennen.

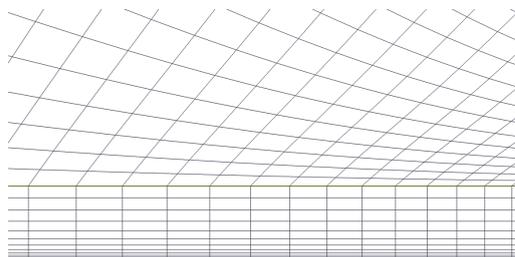


Abbildung 3.10: Rechennetz mit einem zusätzlichen Gitter-Block in Wandnähe

Das strukturierte Netz wird aufgrund der Düsenform mit der Lauflänge x immer feiner.

3.3 Simulation

Die Simulation war ein sehr wichtiger Schritt für das Finden einer geeigneten Düsenform, bei der Relaminisierung auftritt.

Simuliert wurde mit LINARS, dem CFD Code des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, der im nächst Kapitel 3.3.1 genauer erklärt wird. Wie schon im vorherigen Kapitel 3.2 beschrieben, sind zwei- und dreidimensionale Netze simuliert worden.

Zusätzlich ist das CFD Simulationsprogramm ANSYS CFX zum Einsatz gekommen, um die Ergebnisse vergleichen zu können.

3.3.1 LINARS

LINARS ist eine CFD Code und wird am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik entwickelt.

LINARS benötigt nur vier Dateien um eine Simulation starten zu können. Die erste und Wichtigste ist die „control.xml“ Datei. In dieser Datei können die einzelnen Simulationsparameter eingestellt werden. Die Datei „geom.txt“ gibt die Geometrie vor und die „faces.xml“ Datei legt die Oberflächen der Geometrie und ihre Eigenschaften fest. Beide Eingabedateien für LINARS werden von AiGrid generiert. In der letzten Datei „boundCond.xml“ werden die Randbedingungen für die Simulation vorgegeben.

Die simulierten Ergebnisse werden in LINARS in Form von „Tecplot“- und ASCII Text-Dateien ausgegeben. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, Dateien für verschiedene Ergebnisvisualisierungs-Programme generieren zu lassen.

In der folgenden Abbildung ist eine Düse mit den geometrischen Randbedingungen für eine Simulation dargestellt.

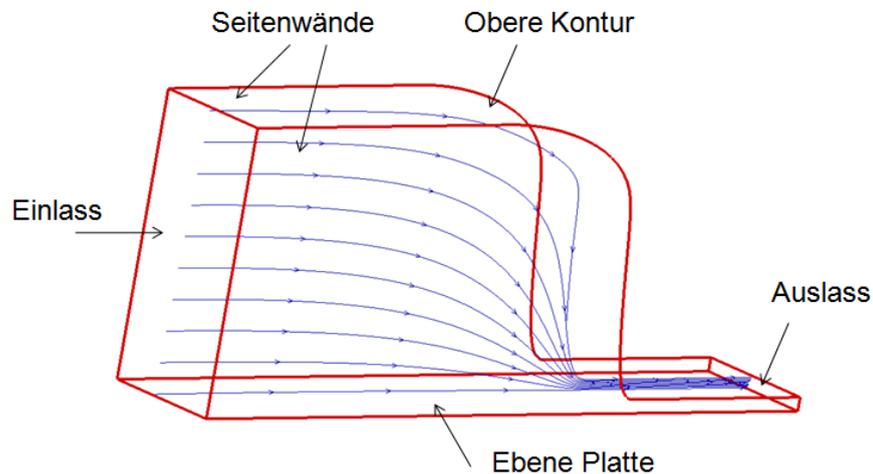


Abbildung 3.11: Düse mit Bezeichnung der Flächen

3.3.2 Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden ausgewählte Simulationsergebnisse für entworfene Düsen präsentiert.

Veränderung der Geometrie

Aus den verschiedenen Geometrien wurden mit Hilfe von AiGrid zweidimensionale Rechenetze erstellt und mit LINARS simuliert.

Die vorgestellten Düsen wurden mit den folgenden Randbedingungen simuliert.

Tabelle 3.1: Randbedingungen der Simulation

Luft	Isentropenexponent κ	1,4
	Spezifische Gaskonstante R	$287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
	Konstante dynamische Viskosität η	$1,88 \cdot 10^{-2} \text{ N}/\text{m}^2$
Einlass	Totaldruck p_{tot}	2,8 bar
	Totaltemperatur T_{tot}	320 K
Auslass	Statischer Druck p_{stat}	0,9 bar

Die restlichen Randbedingungen sowie eine genaue Auflistung der Simulationsergebnisse aller gerechneten Düsen befindet sich im Anhang (siehe A.1).

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils vier Diagramme, wobei in jedem Diagramm die Simulationsergebnisse für zwei verschiedene Düsengeometrien miteinander verglichen sind. Das erste Diagramm zeigt die Geometrie bzw. Kontur der Düse. Das Fluid strömt von links nach rechts. Es folgt der aus den Simulationsergebnissen errechnete Beschleunigungsparameter K aufgetragen über die Lauflänge x (siehe Kapitel 3.1.1). Das dritte Diagramm stellt die Geschwindigkeit U über der Lauflänge dar. Im Letzten ist der Verlauf des Drucks dargestellt.

- Erhöhung der Steigung von D_1 auf D_5

Im folgender Abbildung 3.12 sind die Düsen D_1 und D_5, beides Geometrien mit ebener Platte, dargestellt. Eine Erhöhung der Steigung entspricht einem steileren Verlauf der Geschwindigkeit U und somit einer erhöhten Beschleunigung. Diese Erhöhung der Beschleunigung korreliert jedoch mit der Gefahr der Bildung einer Ablöseblase, verursacht durch die plötzliche Querschnittverengung. Außerdem kann man erkennen, dass das Geschwindigkeits-Maximum durch die frühere Verengung weiter nach vorne wandert. Der Beschleunigungsparameter K entlang der Platte der Düse D_5 ist durch die höhere Beschleunigung größer als der von Düse D_1.

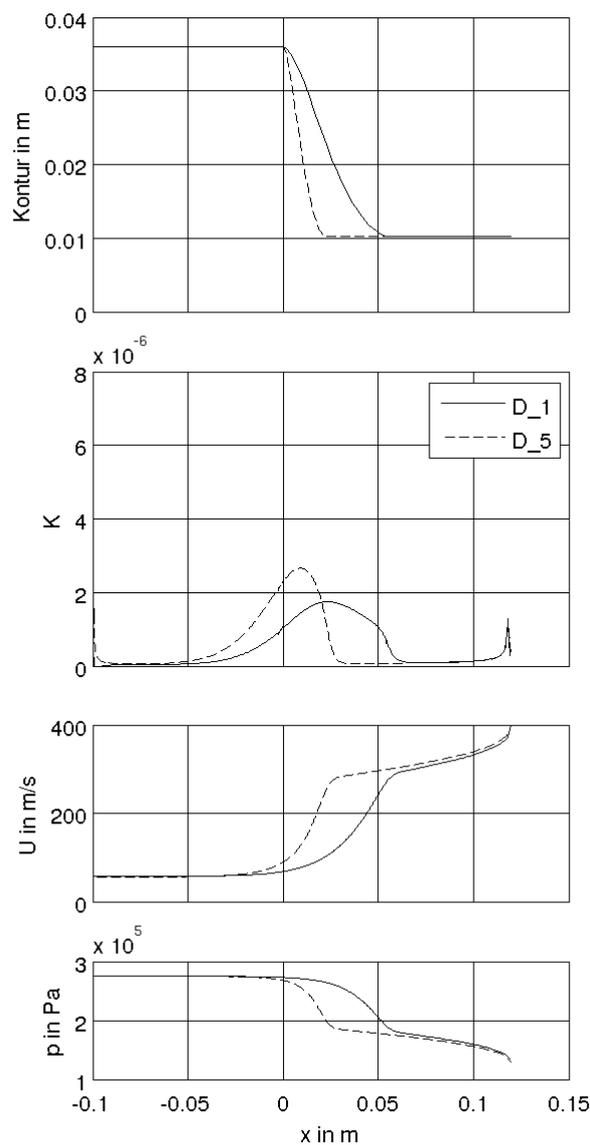


Abbildung 3.12: Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Erhöhung der Steigung von D_1 auf D_5

- Erhöhung der Steigung von D_58 auf D_57

Bei den „konventionellen“ Düsen D_57 und D_58 wurde auch die Steigung verändert. Im Gegensatz zu einer Düse mit ebener Platte wird hier der Beschleunigungsparameter mit der Sehnenlänge ds berechnet. Die Diagramme wurden jedoch mit der Lauflänge x gebildet, um sie mit den anderen vergleichen zu können. Würde der Beschleunigungsparameter über die Sehnenlänge s aufgetragen werden, wäre sein Verlauf breiter.

Durch Erhöhung der Steigung kann man dieselben Effekte wie bei den Düsen mit ebener Platte (z.B. D_1 - D_5) beobachten.

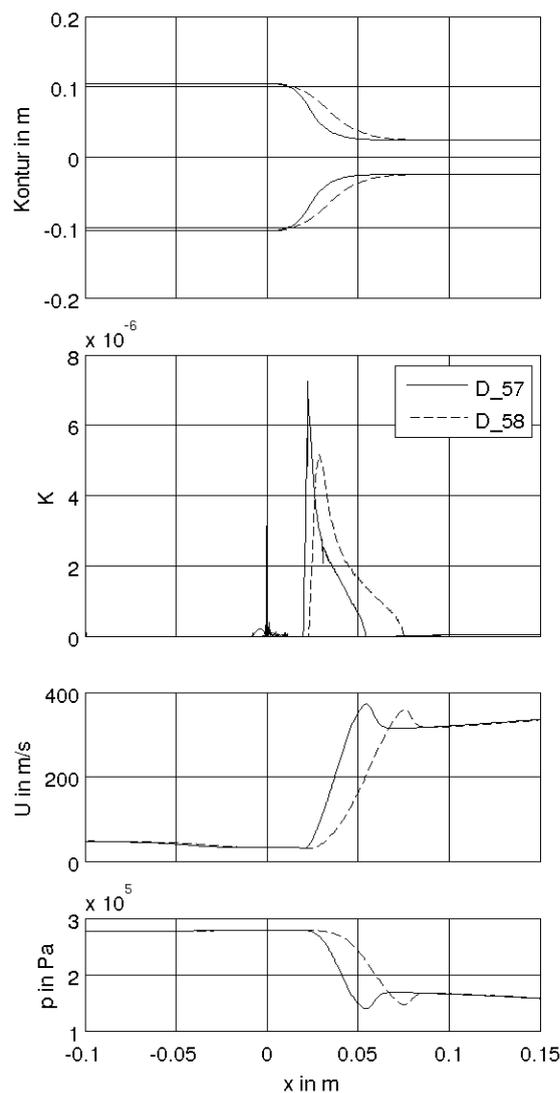


Abbildung 3.13: Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Erhöhung der Steigung von D_58 auf D_57

- Aufweitung des Einlasses von D_1 auf D_4

Wie in Abbildung 3.14 zu erkennen, ist die Höhe des Einlasses von D_4 doppelt so groß wie die von D_1 . Bei gleichem Totaldruck sinkt daher die Geschwindigkeit umgekehrt proportional zur Einlasshöhe. Weil beide Düsen im kritischen Querschnitt in etwa die gleiche Geschwindigkeit haben, ist die Beschleunigung des Fluides in D_4 größer. Zusätzlich führt die höhere negative Steigung zu einem Anstieg des Beschleunigungsparameter-Maximums.

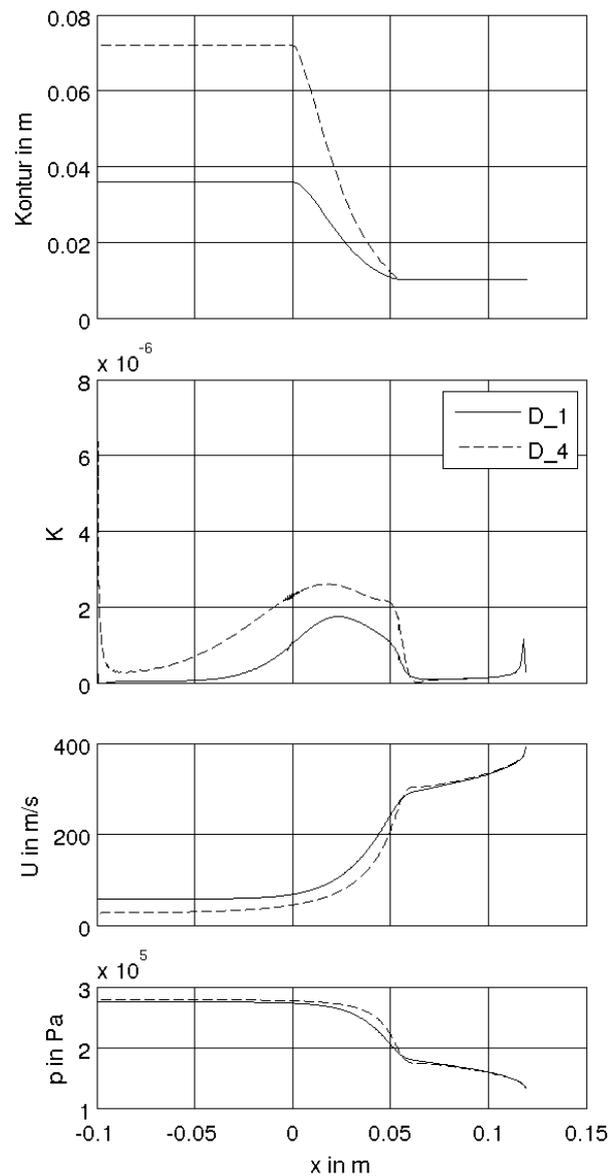


Abbildung 3.14: Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Aufweitung des Einlasses von D_1 auf D_4

- Verengung des Auslass von D_23 auf D_4

Das Verengen des Auslasses führt, wie das Aufweiten des Einlasses, zu einer Erhöhung des Beschleunigungsparameter-Maximums. Dabei ist anzumerken, dass die Änderung der Steigung zwischen „D_4 - D_23“ nicht so groß ist wie zwischen „D_1 - D_4“ (siehe Abbildung 3.15). Bei der Düse D_4 ist die Geschwindigkeit und somit auch der Massenstrom kleiner als bei der Düse D_23.

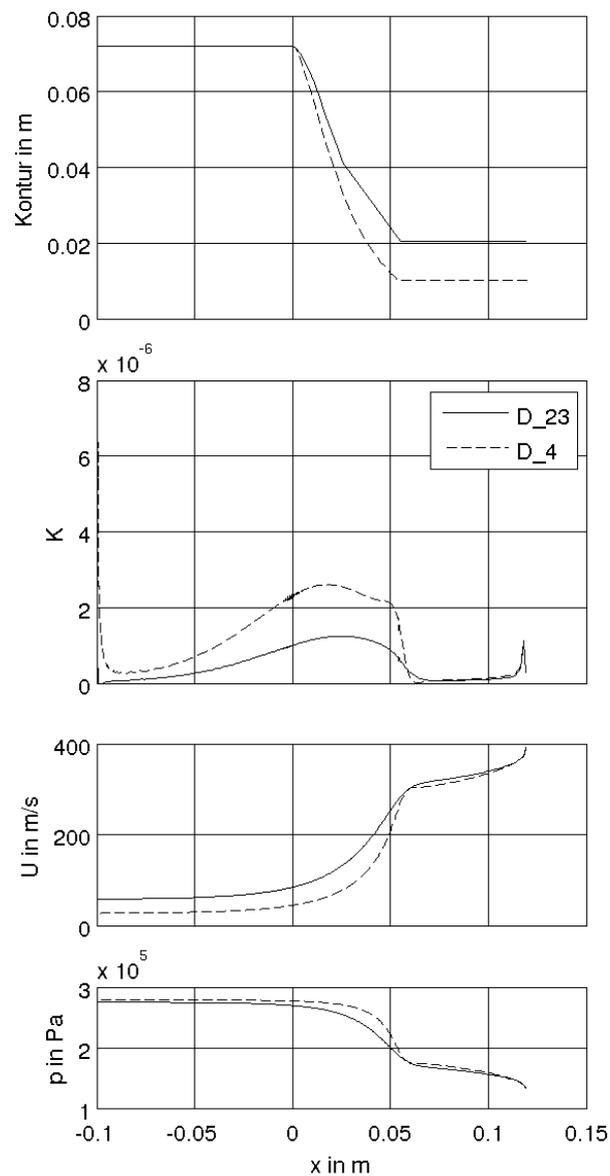


Abbildung 3.15: Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Verengung des Auslass von D_4 auf D_23

- Konstruktion einer Laval Düse von D_76 auf D_74

Die Geometrien von D_74 und D_76 ähneln sich, bis auf die Aufweitung bei D_74 nach dem engsten Querschnitt A_{krit} . Aus Abbildung 3.16 ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit wie bei einer Lavaldüse nach dem engsten Querschnitt, wo $Ma = 1$ herrscht, weiter beschleunigt. Die Abnahme im Verlauf des Beschleunigungsfaktors wird hinausgezögert. Für das Relaminisierungs-Experiment ist das kein wirklicher Vorteil, denn die geringe Kanalhöhe in diesem Bereich der Düse erschwert eine Messung mit dem Laservibrometer.

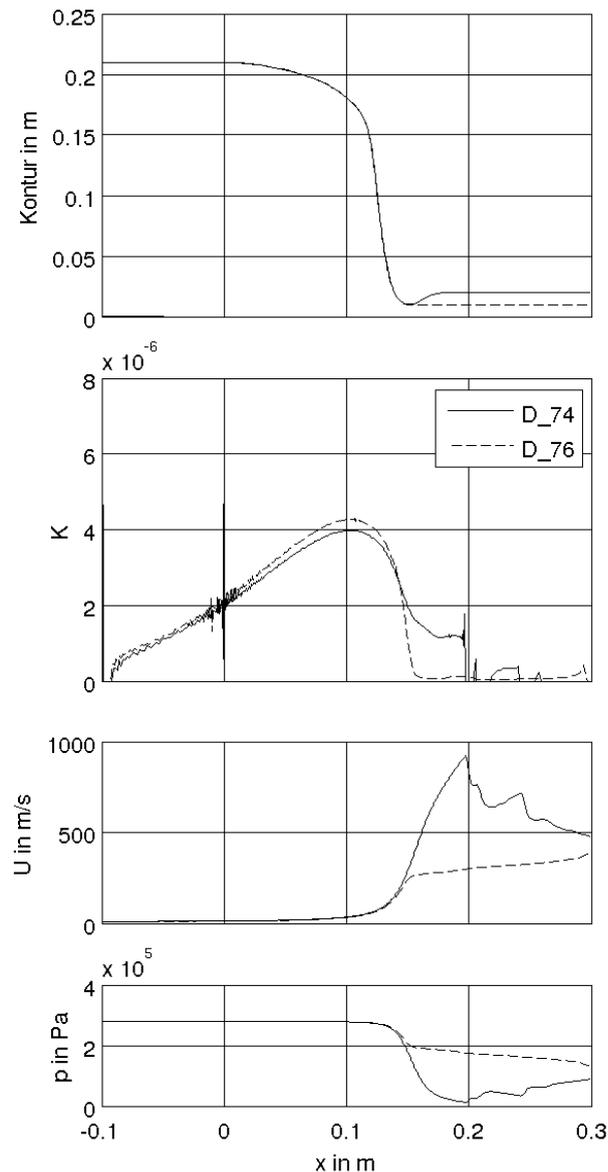


Abbildung 3.16: Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei Konstruktion einer Laval Düse von D_76 auf D_74

- Nachobensetzen der Kontur von D_1 auf D_15

Das Nachobensetzen einer Kontur bewirkt wie in Abbildung 3.17 ersichtlich einen flacheren Geschwindigkeitsverlauf und somit eine geringere Beschleunigung.

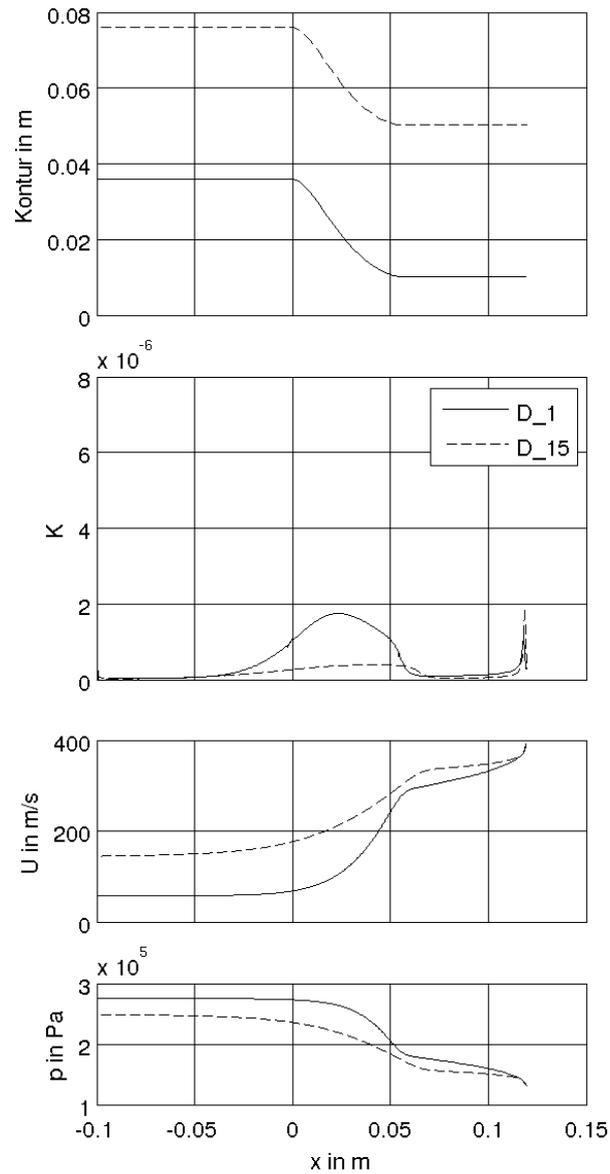


Abbildung 3.17: Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks beim Nachobensetzen der Kontur von D_1 auf D_15

- Skalieren der Geometrie von D_5 auf D_37

In der folgenden Abbildung 3.18 wurde die Düse D_5 um den Faktor Vier in beiden Richtungen vergrößert. Beim Skalieren besitzen die beiden Düsen ein gleiches Flächenverhältnis. Jedoch ändert sich beim Skalieren auch der Weg x in Strömungsrichtung. So ist auch die geringere Beschleunigung zu erklären.

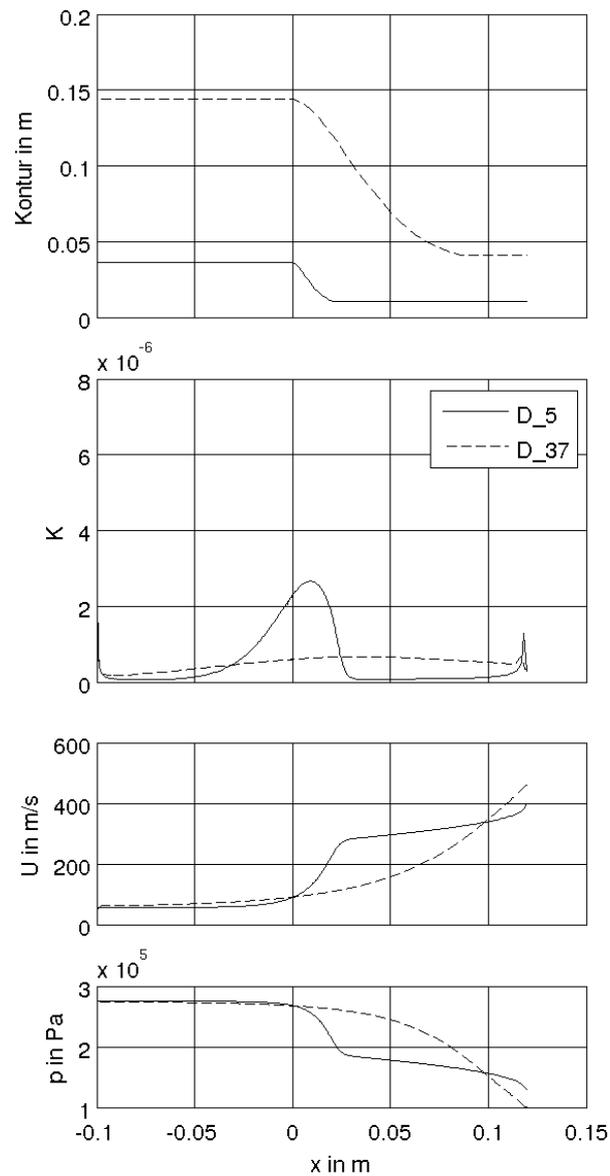


Abbildung 3.18: Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks beim Skalieren der Geometrie von D_5 auf D_37

- Unterschied zwischen einer „konventionellen“ Düse und einer Düse mit ebener Platte D67 - D68

Beide Düsen besitzen über die Lauflänge x ein gleiches Flächenverhältnis. In Abbildung 3.19 ist zu erkennen, dass der Beschleunigungsparameter an der gekrümmten Wand größer ist als an der ebenen Wand.

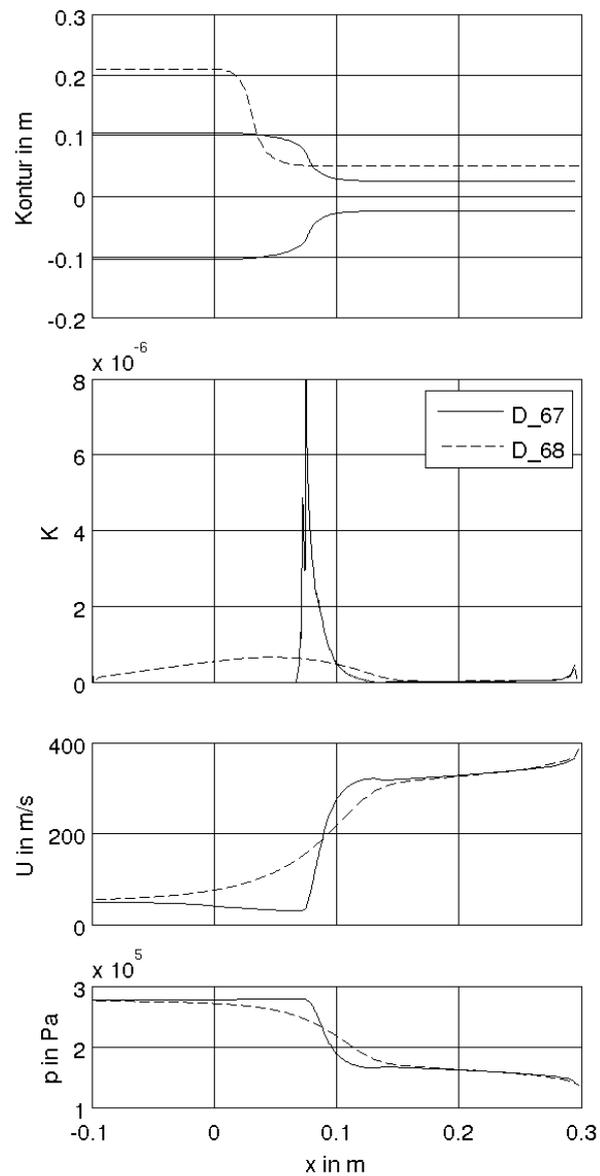


Abbildung 3.19: Unterschied des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks beim einer „konventionellen“ Düse D_67 und einer Düse mit ebener Platte D_68 mit gleichem Flächenverhältnis

3.4 Gewählte Düse für den Versuchs-Einsatz

Eine Aufgabe dieser Diplomarbeit war die experimentelle Untersuchung der Relaminisierung. Aus diesem Grund mussten geeignete Düsengeometrien gefunden werden, um schließlich die Entscheidung zu treffen, welche Düse gefertigt und in den Versuchs-Einsatz eingebaut wird.

Aufgrund folgender Kriterien wurde die Düse D_76 mit ebener Platte gewählt:

- Die Abmessungen der Geometrie passen in den Einsatz des transsonischen Prüfstands.
- Idealer Verlauf des Beschleunigungsparameters K , sowohl das Maximum als auch der Bereich entlang der Platte, in dem $K = 3,0 \cdot 10^{-6}$.
- Das erwartete Relaminierungs-Gebiet ist weit genug vom engsten Querschnitt der Düse entfernt.
- Die Düsenhöhe im Relaminierungs-Gebiet ermöglicht gutes Messen. Eine zu niedrige Höhe würde die Gefahr von Reflexionen des Laserstrahls des Laservibrometers mit sich tragen.

In der folgenden Abbildung 3.20 ist die für das Relaminierungs Experiment gewählte Düse D_76 dargestellt.

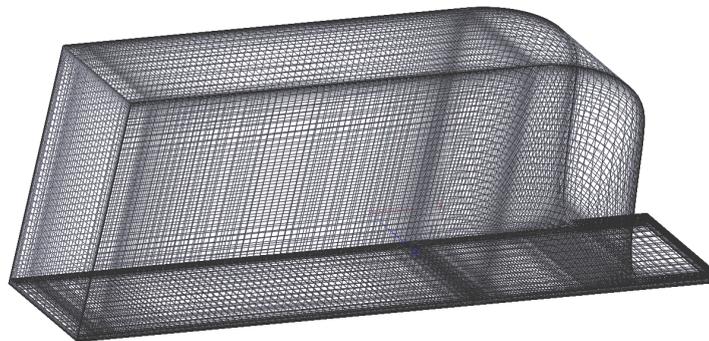


Abbildung 3.20: Rechennetz der Düse D_76

Die Simulationsergebnisse werden, wie im vorherigen Kapitel mit Hilfe der vier Diagramme, für unterschiedliche Drücke dargestellt. Das obere zeigt die Kontur der Düse D_76, gefolgt vom Beschleunigungsparameter K, der Geschwindigkeit U und dem Druck p, jeweils über der Lauflänge x aufgetragen.

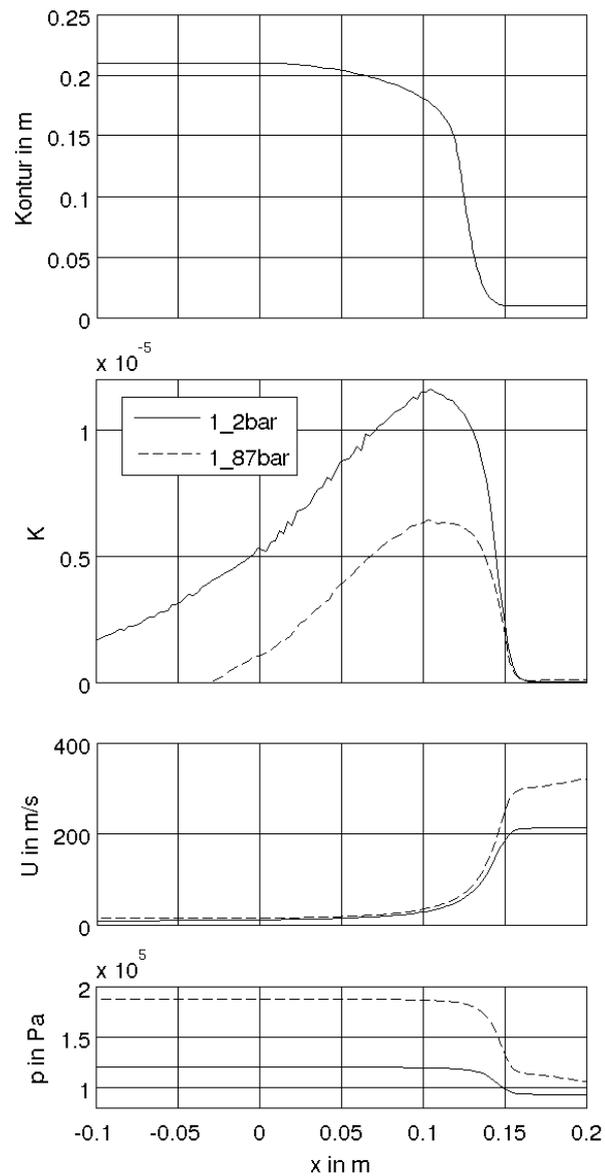


Abbildung 3.21: Abhängigkeit der Simulationsergebnisse für die Düse D_76 vom totalen Eintrittsdruck

- Variation des Drucks im Einlass

Anhand der Abbildung 3.21 soll die Abhängigkeit des Beschleunigungsparameters K und der Geschwindigkeit U vom totalen Einlassdruck gezeigt werden.

Man erkennt, dass die Geschwindigkeit im Einlass bei kleinerem totalen Einlassdruck sinkt. Das Maximum und die Breite des Beschleunigungsparameter-Verlaufs nimmt bei geringerem totalen Einlassdruck zu.

Wie bereits beschrieben, konnte der Auslegungsdruck der Düse D_76 von 2,8 bar im Experiment aus Sicherheitsgründen nicht erreicht werden. Der Versuchseinsatz für den transsonischen Prüfstand besaß zu große Scheiben für die optische Messung. Die hohe Kraft beim Auslege-Druck hätten die Scheiben nicht unversehrt überstanden.

Dieses Absenken des Druckes war für das Erreichen des kritischen Beschleunigungsparameters, um voraussichtlich eine Relaminisierung zu erreichen, kein Nachteil. Durch die größere Beschleunigung verschob sich der Anfang des Relaminisierungs-Gebiets weiter zum Einlass. Dieser Effekt verkürzte die Länge auf der Platte vor dem Relaminisierungs-Gebiet, in der das Fluid turbulent werden sollte. Wie im Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist die Transition der Grenzschicht auf einer ebenen Platte von der kritischen Reynoldszahl $Re_{x,krit}$ abhängig.

$$Re_{x,krit} = 3,5 \cdot 10^5 \div 10^6$$

Die folgende Abbildung zeigt die Reynoldszahl Re_x über der Lauflänge x , abhängig vom Totaldruck im Einlass.

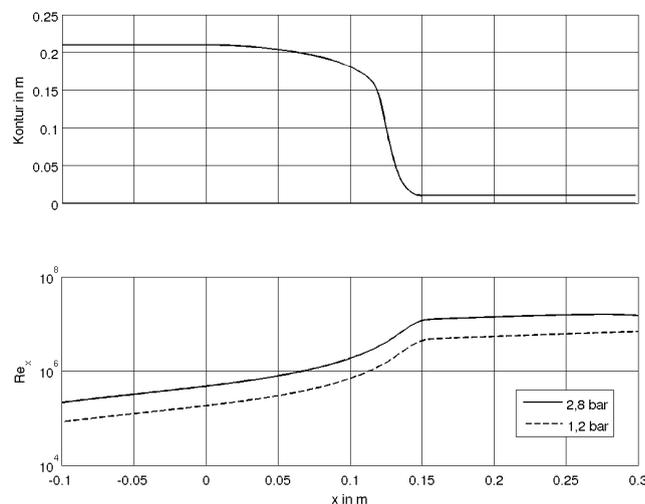


Abbildung 3.22: Die Reynoldszahl Re_x abhängig vom Totaldruck im Einlass

Wenn keine Transition der Grenzschicht vor dem Beginn der Beschleunigungszone erreicht wird, ist kein Übergang von einer turbulenten in eine laminare Grenzschichtströmung sichtbar. Der Grund dafür ist, dass die einsetzende Relaminisierung die Transition unterdrückt und die Grenzschicht des Fluides bis $K < 3,0 \cdot 10^{-6}$ laminar ist. Um eine Transition sicher zu stellen, wurde bei einigen Experimenten ein Stolperdraht montiert.

- Unterschied zwischen zwei- und dreidimensionaler Berechnung

In der folgenden Abbildung 3.24 ist der Unterschied der Simulationsergebnisse für ein zwei- und dreidimensionales Rechenetz dargestellt. Man kann erkennen, dass das zweidimensionale Ergebnis gut mit dem dreidimensionalen übereinstimmt. Bei der räumlichen Simulation wurden die einzelnen Werte in der Symmetrie der ebenen Platte entnommen. Entlang dieser Linie konnten durch die Simulation keine von den Seitenwänden ausgelösten Randeffekte festgestellt werden.

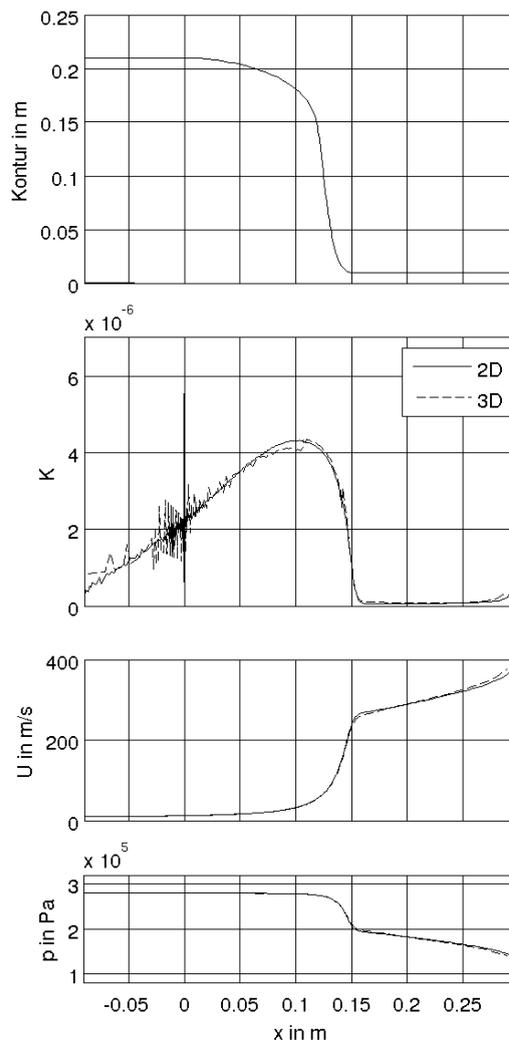


Abbildung 3.23: Vergleich der Ergebnisse einer zweidimensionalen mit einer dreidimensionalen Simulation

- Vergleich LINARS mit Ansys CFX

Um die Simulationsergebnisse von LINARS, dem Code des Instituts, mit den Ergebnissen eines anderen CFD-Programmes vergleichen zu können, wurde Ansys CFX genutzt. Um mit demselben Rechenetz zu simulieren, ist das Gitter von AiGrid in ein Ansys CFX kompatibles konvertiert worden. Wie in Abbildung 3.24 zu sehen, ist der Unterschied beim Beschleunigungsparameter nicht groß. Die Simulationsergebnisse von Druck und Geschwindigkeit nach dem engsten Querschnitt unterscheiden sich aber.

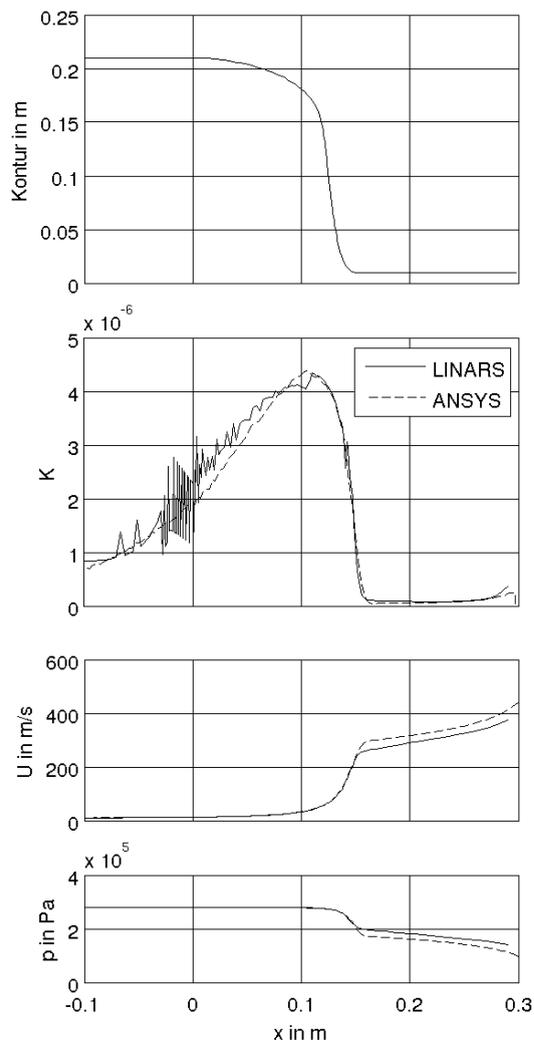


Abbildung 3.24: Vergleich der Simulationsergebnisse von LINARS mit Ansys CFX

Kapitel 4

Prüfstand und Versuchseinsatz

4.1 Verdichteranlage

Im zweiten Kellergeschoss des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik steht die Verdichteranlage mit einer maximalen Leistung von 3MW. Sie besteht aus den beiden Radialverdichtern SC14 und SC20 sowie zwei Schraubenverdichtern in einem gemeinsamen Gehäuse (E1 und E2). Alle Verdichter wurden von Atlas Copco hergestellt. Rückkühlanlagen ermöglichen eine Temperaturregelung.

In der folgenden Tabelle 4.1 sind die technischen Daten der einzelnen Verdichter aufgelistet.

Tabelle 4.1: Technische Kenndaten der einzelnen Verdichter

Verdichter	Ansaugmassenstrom in m^3/h	Massenstrom in kg/s	Druckverhältnis	Motorleistung in kW
SC20	27500	9,0	2,9	1450
SC14	15500	5,1	2,9	900
E1 und E2	8000	2,5	3,1	400

In Abbildung 4.1 ist der prinzipielle Schaltplan der Verdichteranlage dargestellt.

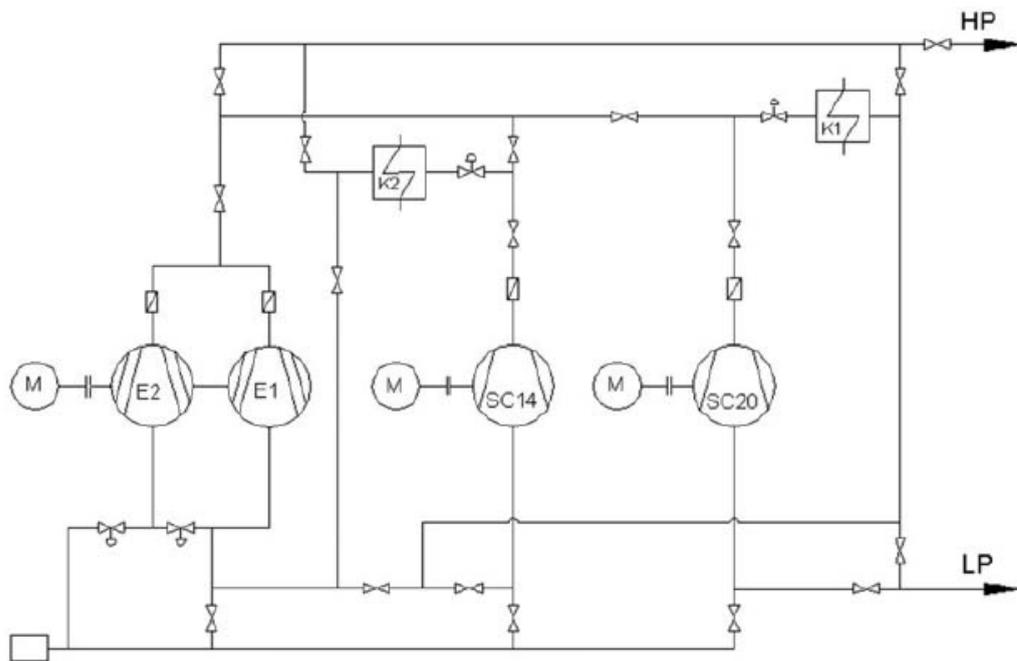


Abbildung 4.1: Schaltplan der Verdichteranlage des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik

Durch das unterschiedliche Schalten der Klappen, welche die Verdichter verbinden, sind 13 verschiedene Fahrweisen möglich. Die Fahrweisen ermöglichen einen großen Arbeitsbereich der Verdichteranlage. Bei den Experimenten für diese Diplomarbeit wurde die Verdichteranlage mit der Fahrweise FW1 betrieben.

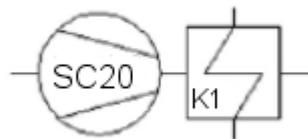


Abbildung 4.2: Fahrweise FW1

Der Asynchronmotor vom Verdichter SC14 ist drehzahlregelt und erlaubt damit, den Massenstrom zu regeln. Dieser Vorteil konnte nicht für die Relaminierungs-Experimente genutzt werden, da ein Lagerschaden des Asynchronmotors den Betrieb des Verdichters unmöglich machte. Aus diesem Grund wurde der Radialverdichter SC20 mit der Fahrweise FW1 gewählt.

Einen Hoch- und Niederdruckleitung verbindet die Verdichteranlage mit den Versuchsständen im ersten Untergeschoss.

4.2 Transsonischer Prüfstand

Der transsonische Prüfstand ist eine Versuchseinrichtung, die der Untersuchung einer stationären, möglichst zweidimensionalen Strömung dient. Er ist außerdem für verschiedene Versuchseinsätze konstruiert. Messtische an beiden Seiten und Glasscheiben in den Versuchseinsätzen sind ideal für optische bzw. laseroptische Messmethoden.

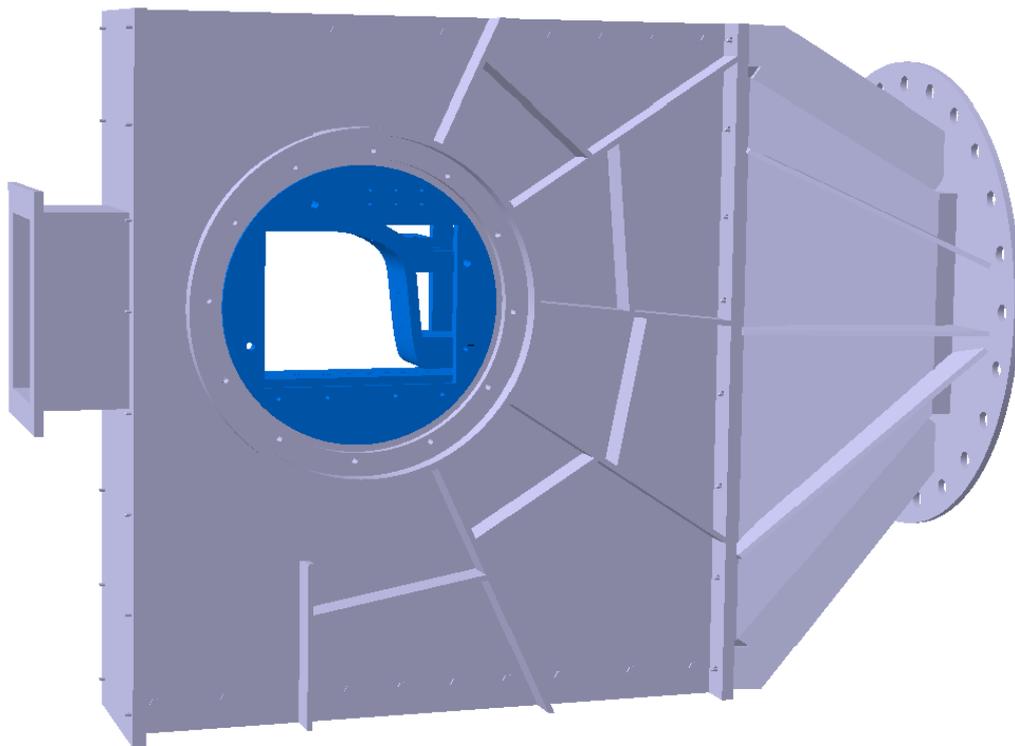


Abbildung 4.3: Transsonischer Prüfstand mit Versuchseinsatz

Der transsonische Prüfstand, in dem der Relaminisierungs-Versuchseinsatz eingebracht wurde, ist mit der Verdichteranlage über die Niederdruckleitung verbunden. Diese hat einen Nenndurchmesser von 600mm und besitzt eine Klappe vor dem transsonischen Prüfstand. Diese Klappe wurde als Drossel genutzt, um den für das Relaminisierungs-Experiment geringen Massenstrom zu erreichen. Am Ende der Niederdruckleitung befindet sich ein Einlass-Trichter mit Düse. Danach strömt die Luft über einen Rechteck-Kanal mit einer Höhe von 230mm und einer Breite von 100mm in den Messraum des transsonischen Prüfstands. In die beiden konzentrischen Öffnungen mit einem Durchmesser von 400mm können die verschiedenen kreisrunden

Versuchseinsätze in den Messraum eingesetzt werden. Der Versuchseinsatz setzt die Seitenwände des Prüfstands im Messbereich fort.

4.3 Relaminisierungs-Versuchseinsatz

Kapitel 3.1.2 beschreibt, wie die Geometrie für die „Relaminisierungs-Düse“ gefunden wurde. Als nächster Schritt musste sie für den Versuchseinsatz des transsonischen Prüfstands konstruiert werden.



(a) Konstruierter Versuchseinsatz



(b) Foto - Versuchseinsatz eingebaut in den transsonischen Prüfstand, mit Druckmessschläuchen

Abbildung 4.4: Versuchseinsatz

Wie aus Abbildung 4.4 ersichtlich, besteht ein Versuchseinsatz für den transsonischen Prüfstand aus zwei parallelen, kreisrunden Stahlplatten. Auf jeder Seite ist eine Glasscheibe innen bündig in den Versuchseinsatz eingebaut. Diese Glasplatten dienen als optischer Zugang.

Die Bohrungen an der in Strömungsrichtung linken Seite des Einsatzes ermöglichen das Herausführen von Druckmessschläuchen aus dem Prüfstand zu den Druckmesssensoren. In Kapitel 5.1 wird beschrieben, wie und wo genau der Druck im Versuchseinsatz gemessen wurde.

4.3.1 Aufbau

In Abbildung 4.5 sind die Abmessungen der Einlaufplatte und der ebenen Platte des Relaminisierungs-Versuchseinsatzes abgebildet. Es ist zu beachten, dass der Ursprung am Beginn der Verengung der Düse liegt.

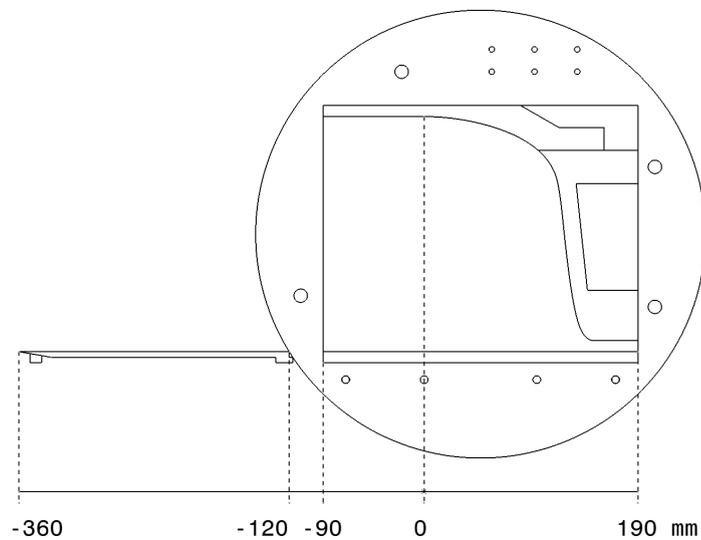


Abbildung 4.5: Maße der Einlaufplatte und der ebenen Platte

Um den Versuchseinsatz in den transsonischen Prüfstand einbauen zu können, waren der Einlaufbereich und der Hauptbereich der ebenen Platte getrennte Bauteile. Dadurch entstand ein Spalt zwischen den beiden Teilen, der nicht vollständig geschlossen werden konnte. Dieser Spalt könnte möglicherweise im Experiment die Grenzschicht abgesaugt haben.

In den folgenden Punkten werden die konstruierten und gefertigten Teile für den Versuchseinsatz vorgestellt.

Einlaufplatte

Das Foto 4.6 zeigt die Einlaufplatte, die in den Kanal direkt vor dem Messraum eingebracht wurde. Sie besteht aus einem, an der Vorderseite angespitzten 3mm starken Blech. Das Blech liegt nicht auf der Unterseite des Kanals des Prüfstandes auf. Direkt an der Vorderseite der Einlaufplatte ist der Totaldruckmessbaum angebracht. Die Druckmessrohre werden unter der Einlaufplatte nach hinten zum Versuchseinsatz geführt



Abbildung 4.6: Foto - Einlaufplatte mit Totaldruckmessbaum und Stolperdraht

Die Einlaufplatte wurde als erstes Bauteil in den transsonischen Prüfstand eingebaut und hatte drei Hauptaufgaben zu erfüllen:

- Abschneiden der Grenzschicht, die sich in der Niederdruckleitung aufgebaut hat, um für einen definierten Anfang zu sorgen. Die Grenzschicht muss also vom Plattenanfang neu anwachsen wie in Bild 2.5 gezeigt wird.
- Die Einlaufplatte sollte durch ihre Länge von 250mm eine Transition der Grenzschichtströmung ermöglichen, damit am Anfang der eigentlichen Platte eine turbulente Strömung herrscht. Diese ist nötig, um einen detektierbaren Übergang vom turbulenten zum laminaren Zustand zu haben. Um das auch bei geringem totalem Einlassdruck zu garantieren, wurde ein Stolperdraht verwendet (siehe Kapitel 4.3.2).
- Die letzte Aufgabe der Einlaufplatte ist es, den Totaldruckmessbaum an der vorderen Plattenkante zu fixieren. Dieser war nötig um den totalen Einlassdruck als Eintrittsbedingung für Messung und Simulation zu erhalten.

Ebenen Platte

In Strömungsrichtung direkt nach der Einlaufplatte war die eigentliche ebene Platte angeordnet. In der Grenzschicht der ebenen Platte sollte die Relaminisierung nachgewiesen werden. Entlang ihrer Oberfläche wurde mit dem Laservibrometer gemessen. Die ebene Platte besteht aus einem Aluminium-Frästeil, das so mit dem Versuchseinsatz verschraubt ist, dass die Fläche 10mm über dem unteren Glasrahmen liegt, um einen guten optischen Zugang auf die Grenzschicht zu haben. Entlang der ebenen Platte befinden sich in der Mitte 69 Druckmessbohrungen. In diese Bohrungen wurden Druckmessrohre gesteckt, die zur Messung des statischen Druckes dienen. Silikonschläuche verbinden die einzelnen Druckmessrohre mit den Drucksensoren.

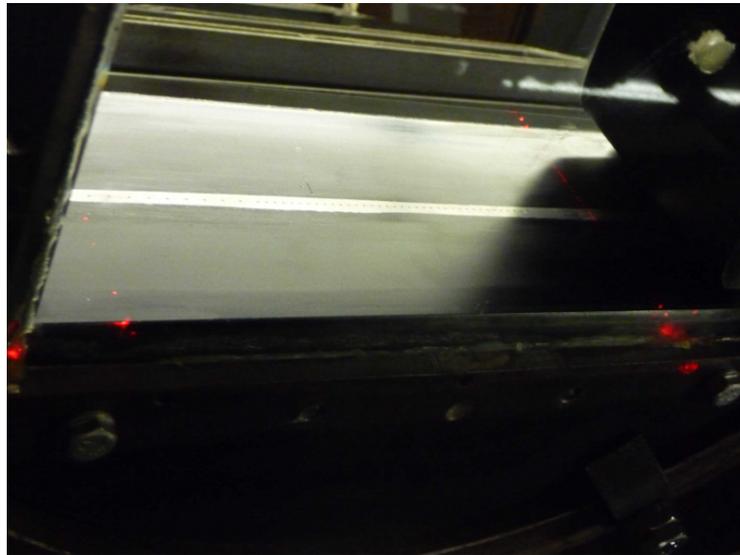


Abbildung 4.7: Foto - Ebene Platte mit den Druckmessbohrungen in der Mitte und zwei Laserstrahlen; aufgenommen während der Laservibrometermessung

Außerdem wurde die ebene Platte mit schwarzem Lack lackiert, um eine Reflexion des Laserstrahls an der Oberfläche zu verhindern.

Zweigeteilte obere Kontur

Die obere Kontur entspricht der ausgelegten Geometrie der Düse D_76. Wie auch entlang der ebenen Platte werden die statischen Wanddrücke gemessen. Die Kontur besteht aus zwei Aluminium-Frästeilen die durch 2 Schrauben miteinander verbunden sind. Die Anbindung an den Versuchseinsatz erfolgt mit Hilfe von drei Bolzen, die die Position der oberen Kontur definieren und fixieren. Das Foto 4.8 zeigt die obere Kontur während des Zusammenbaus.

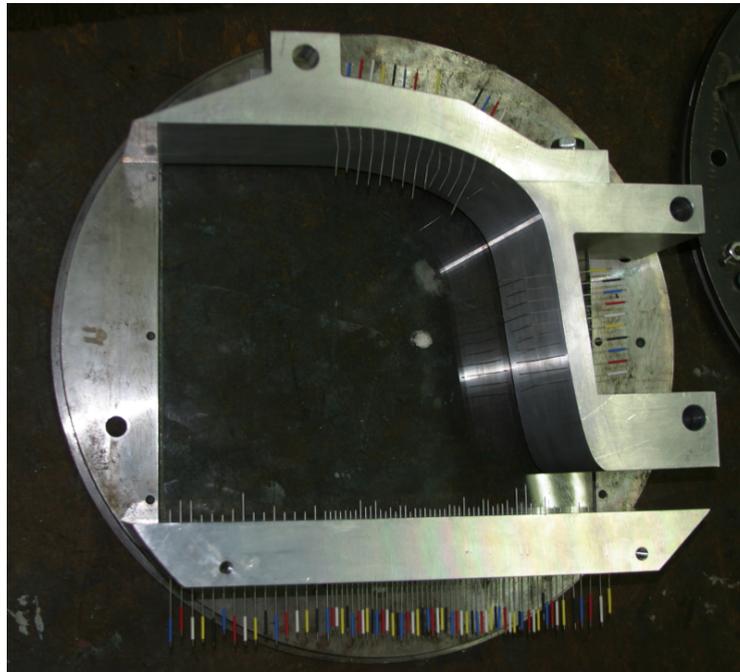


Abbildung 4.8: Foto - Obere Kontur und ebene Platte mit Druckmessrohren

An der oberen Eintrittskante war ein Spalt, der die Möglichkeit der Grenzschichtabtrennung bot. In allen Versuchen wurde diese geschlossen, weil ein Großteil der Strömung über den Spalt entspannte, ohne durch die eigentliche Düse zu strömen.

Wie auch die ebene Platte wurde die obere Kontur schwarz lackiert.

4.3.2 Stolperdraht

Der Übergang von einer laminaren in eine turbulente Grenzschichtströmung, die Transition, wurde bereits in Kapitel 2.2 beschrieben. Ein Stolperdraht, der auf die Oberfläche eines Körpers aufgebracht ist, soll die Transition beschleunigen. Weitere Maßnahmen, die ergriffen werden können, um einen laminar-turbulenten Umschlag zu erzwingen, sind Wirbelgeneratoren und eine Rauigkeitsveränderung der Oberfläche.

Wie beschrieben, ist zur Feststellung der Relaminisierung eine turbulente Grenzschichtströmung vonnöten. Aus diesem Grund wurde bei verschiedenen Messungen ein Stolperdraht eingebaut.

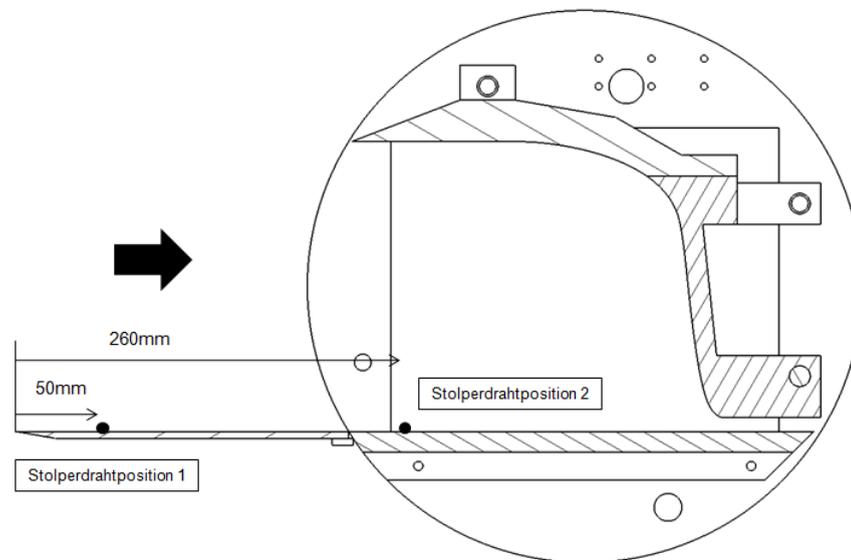


Abbildung 4.9: Verschiedene Positionen des Stolperdrahts

Abbildung 4.9 zeigt die beiden verschiedenen Positionen, an denen ein Stolperdraht eingebaut wurde. Der Stolperdraht bestand aus einem Stahlrohr mit 1mm Außendurchmesser und wurde auf die jeweilige Position geklebt.

In der folgenden Tabelle 4.2 ist aufgelistet, ob und wo bei den verschiedenen Messungen ein Stolperdraht montiert wurde.

Tabelle 4.2: Positionen des Stolperdrahts bei verschiedenen Messungen

Versuch Nr.	Stolperdrahtposition
1	Kein Stolperdraht eingebaut
2	Kein Stolperdraht eingebaut
3	Stolperdrahtposition 1
4	Stolperdrahtposition 2
5	Stolperdrahtposition 1

Kapitel 5

Messtechnik

5.1 Druckmessung

Bei durchgeführten Relaminisierungs-Versuchen wurden der Totaldruck im Eintritt und statische Wanddrücke entlang der ebenen Platte und der Kontur gemessen.

Die Messdatenerfassung erfolgte durch sechs PSI Module der Firma Pressure Systems. Die Module sind piezoelektrische Sensoren vom Typ Netscanner 9016, besitzen je 16 Anschlüsse zur Druckmessung und sind in einem portablen Messschrank verbaut. Jeweils 48 Silikonschläuche von den Druckmesssonden werden in einen „Connector“ gesteckt, der eine einfaches Anschließen an den Messschrank ermöglicht. Die Module sind über einen Netzwerk-Router mit einem Computer in der Messwarte verbunden. Die Anzeige und Aufzeichnung der Druckmessung erfolgte über ein LabVIEW-Programm.

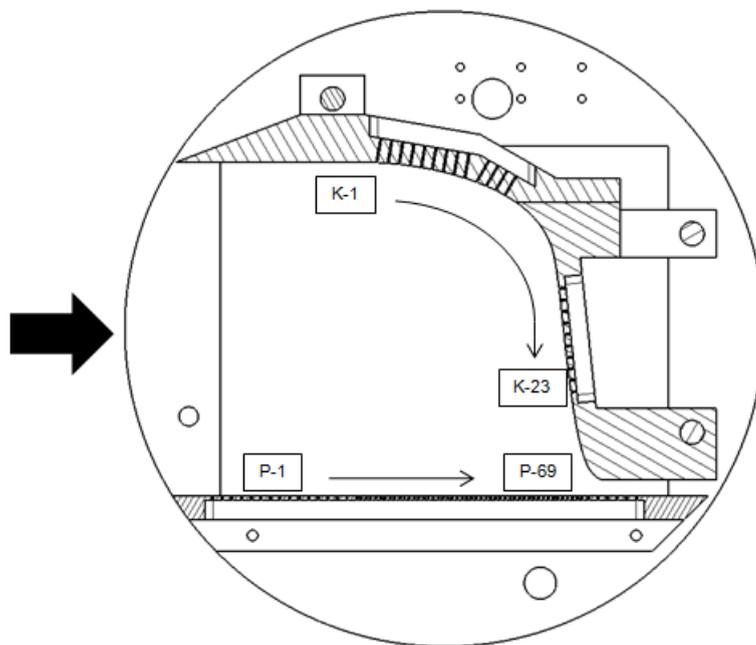
5.1.1 Totaldruckmessung

Im Versuch wurde der Totaldruck mit Hilfe des Totaldruckbaums an der Eintrittskante des Platteneinlaufs gemessen (siehe Abbildung 4.6). Er bestand aus 14 Pitotrohren mit einem Innendurchmesser von 0,5mm und einem Außendurchmesser von 0,8mm. Um die Strömung möglichst nicht zu beeinflussen, wurde versucht den Körper aus Epoxidharz, der die Pitotrohre umschließt und schützt, so dünn wie möglich zu machen.

Die Aufgabe des Messbaums bestand in der Aufzeichnung des Totaldruckverlaufes im Eintritt. Speziell der Verlauf in der Grenzschicht sollte mit geringen Abständen der Mess-Rohre über der Platte hoch aufgelöst werden. Der Totaldruckbaum befindet sich auf der in Strömungsrichtung gesehen rechten Seite des Platteneinlaufs, um die Strömung in der Mitte nicht zu stören.

5.1.2 Statische Druckmessung

Die Messung des statischen Wanddrucks erfolgte an der ebenen Platte sowie an der oberen Kontur. In den Druckmessbohrungen mit einem Durchmesser von 0,8mm befanden sich Druckmessrohre mit einem Innendurchmesser von 0,5mm. Die 69 Messstellen entlang der ebenen Platte und die 14 der oberen Kontur befanden sich in der Mitte des Strömungskanals.



Druckmessbohrungen - Ebene **Platte** P-1 bis P-69
 - Obere **Kontur** K-1 bis K-23

Abbildung 5.1: Schnitt durch den Versuchseinsatz mit Benennung der Druckmessbohrungen von ebener Platte und oberer Kontur

In der Abbildung 5.1 werden die Druckmessbohrungen mit Benennung gezeigt. Ihre genaue Position ist aus den Fertigungszeichnungen zu entnehmen.

Um eine Falschanströmung der Druckmesssonden an der oberen Kontur zu vermeiden, wurden versucht die Bohrungen möglichst rechtwinkelig zur oberen Kontur zu konstruieren. Falschanströmung bedeutet, dass die Druckmessbohrung nicht normal zu Wand und Strömungsrichtung stehen.

5.2 Schlierenvisualisierung

Beim ersten Experiment dieser Diplomarbeit kam die Schlierenvisualisierung zum Einsatz. Ziel war es die Grenzschicht abzubilden, um turbulente bzw. laminare Zustände zu detektieren. Leider lieferte diese Methoden nicht die gewünschten Ergebnisse (siehe Kapitel 6.2).

5.2.1 Prinzip der Messmethode

Schlieren entstehen durch die Ablenkung des Lichts in einem Gas, ausgelöst durch eine Veränderung des Brechungsindex. Der Gradient des Brechungsindex steht in direktem Zusammenhang mit dem Dichtegradienten. Die Schlierenvisualisierung macht die Dichtegradienten einer Gasströmung sichtbar, ist aber weniger für deren genaue Vermessung geeignet. Ein einfaches Beispiel für Schlieren ist das Luftflimmern über heißen Asphalt. Ausgelöst werden sie durch den Temperaturunterschied zwischen heißem Boden und kühlerer Luft, der eine Änderung der Luftdichte zur Folge hat.

In der folgenden Abbildung 5.2 wird die Ablenkung bzw. Brechung eines Lichtstrahls, der durch ein Testvolumen mit Dichtegradienten strahlt, gezeigt.

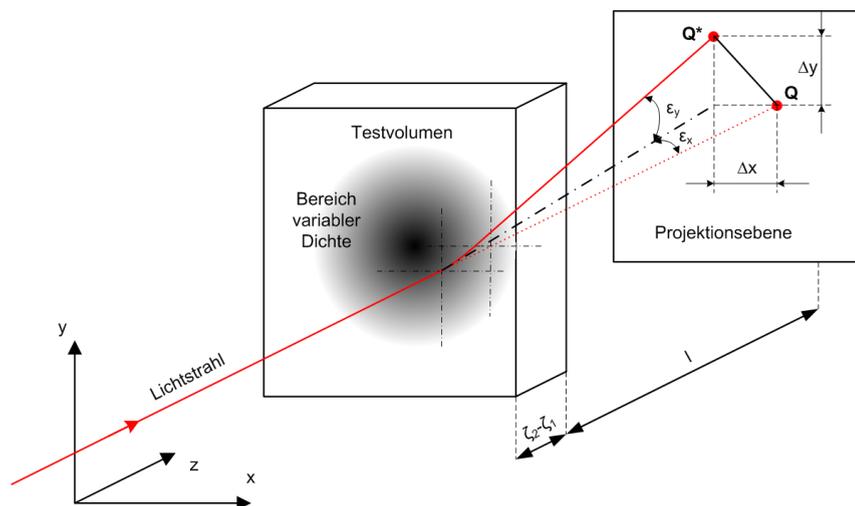


Abbildung 5.2: Brechung eines Lichtstrahls durch Dichtegradienten [15]

Errechnen lassen sich die beiden Winkel ε_2 und ε_1 wie folgt:

$$\varepsilon_1 = \frac{G}{G \cdot \rho + 1} \cdot \frac{d\rho}{dx} (\zeta_2 - \zeta_1) \quad (5.1)$$

bzw.

$$\varepsilon_2 = \frac{G}{G \cdot \rho + 1} \cdot \frac{d\rho}{dy} (\zeta_2 - \zeta_1) \quad (5.2)$$

Dabei ist G die Gladstone-Dale-Konstante, ρ die Dichte und $(\zeta_1 - \zeta_2)$ der Weg durch das Testvolumen.

Je nachdem, ob der durch den Dichtegradienten abgelenkte oder nicht abgelenkte Anteil bei der Schlierenvisualisierung aufgezeichnet wird, unterscheidet man in Hellfeld- bzw. Dunkelfeld-Methode. Die Hellfeld-Methode, bei der der Schlierenfilter nur den abgelenkten Teil des Lichtstrahls durchlässt, wird vor allem bei kleinen Dichtegradienten angewandt. Diese Methode wurde auch bei der Messung für diese Diplomarbeit gewählt, weil mit ihr kleine Dichtegradienten besser zu erkennen sind.

5.2.2 Versuchsaufbau

In der folgenden Abbildung 5.3 ist der schematische Versuchsaufbau der Schlierenvisualisierung zu erkennen.

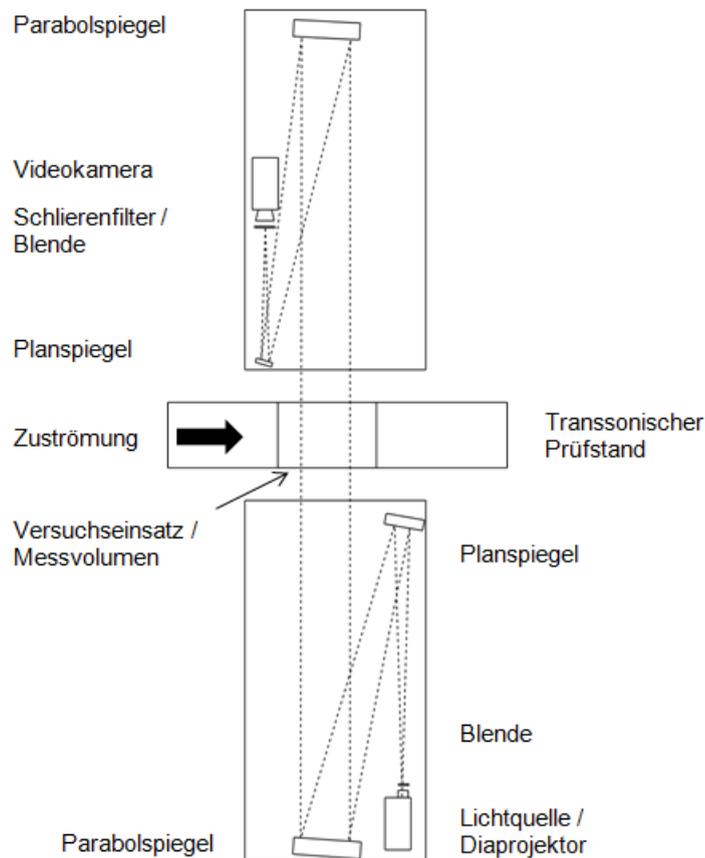


Abbildung 5.3: Schematischer Versuchsaufbau für die Schlierenvisualisierung

Als Lichtquelle wurde ein Diaprojektor verwendet, der über eine Linse und einen Planspiegel das Licht auf einen Parabolspiegel wirft. Der parallele Lichtstrahl scheint durch das Messvolumen und wird dort von den Dichtegradienten gebrochen. Ein zweiter Parabolspiegel bündelt das Licht über einen Spiegel im Schlierenfilter. Dahinter steht eine Videokamera, die das gewonnene Schlierenbild aufzeichnet.

Das Foto 5.4 zeigt den Schlierenaufbau dieser Arbeit.

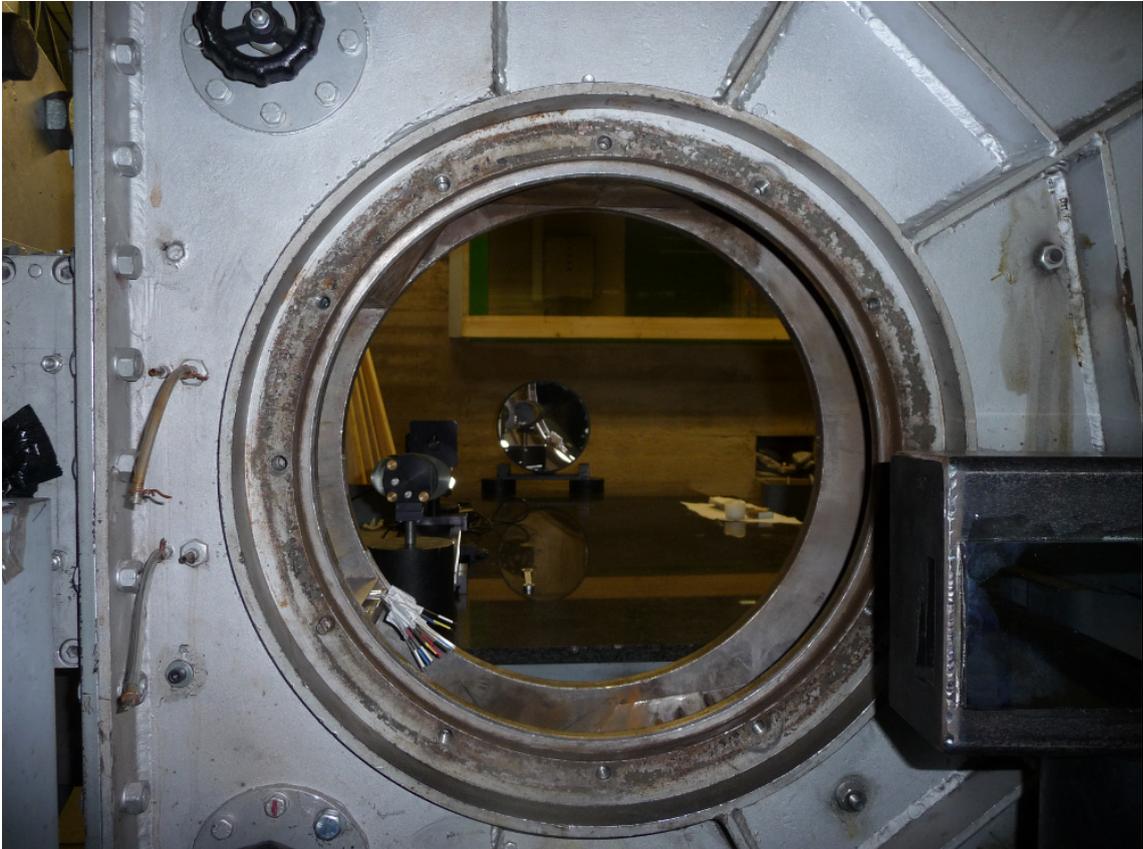


Abbildung 5.4: Foto - Versuchsaufbau für die Schlierenvisualisierung

5.3 Laservibrometrie

Diese Messmethode wurde in allen Versuchen, bis auf den ersten, angewendet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6.3 beschrieben.

5.3.1 Prinzip der Messmethode

Das Laservibrometer wurde zur berührungslosen Messung von Bauteilschwingungen entwickelt. Wie in dieser Arbeit angewandt, wird es mittlerweile auch zum Messen von Dichteschwankungen eingesetzt.

Das Laservibrometer macht sich das Grundprinzip der Interferometrie zu nutze. Als Interferenz versteht man die Überlagerung von Wellen. So können sich aufeinander treffende Wellen auslöschen oder verstärken. Interferenz tritt bei allen Arten von Wellen auf.

Auch das Laserlicht besitzt die Fähigkeit, sich je nach relativer Phasenlage zweier Laserstrahlen zueinander gegenseitig zu verstärken oder auszulöschen.

Die Gesamtintensität I zweier interferierender Lichtquellen errechnet sich nach folgender Formel:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (5.3)$$

Dabei sind I_1 und I_2 die Einzelintensitäten und $\Delta\varphi$ die Phasendifferenz. Wie schon bei der Schlierenvisualisierung beschreibt die Gladstone-Dale-Beziehung

$$n - 1 = G \cdot \rho \quad (5.4)$$

den Zusammenhang zwischen dem Brechungsindex n und der Dichte. Es ergibt sich:

$$\Delta\varphi(t) = G \frac{4\pi}{\lambda} \int_z \Delta\rho(z,t) dz - \varphi_0 \quad (5.5)$$

Für die gesamte Herleitung der Beziehung der zeitlichen Verläufe von Phasendifferenz und Dichte sei auf [16] verwiesen. Dieser Zusammenhang ermöglicht eine Messung des Dichtegradienten durch die Gesamtintensität I aus dem Interferenzmuster.

In der folgenden Abbildung 5.5 ist das Prinzip des Laservibrometers dargestellt.

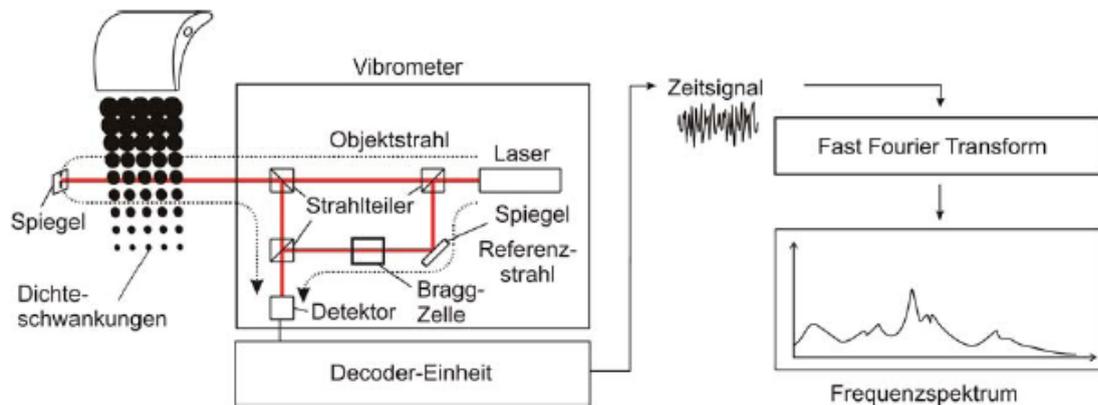


Abbildung 5.5: Funktionsprinzip eines Laservibrometers [17]

Der He-Ne Laser im Vibrometer erzeugt einen Laserstrahl, der in zwei Teile zerlegt wird. Der erste Strahl (Objektstrahl) strahlt durch einen Punkt im Messvolumen und wird wieder zurück in das Laservibrometer reflektiert. Der zweite Strahl (Referenzstrahl) bleibt als Referenz im Vibrometer. Durch die Brechungsindexänderungen, ausgelöst von Dichteschwankungen im Messvolumen, kommt es zu einer Weglängenänderung des Objektstrahls. Eine Weglängenänderung bis zur Größenordnung der Wellenlänge des Lasers kann detektiert werden. Dabei ist es egal, ob eine Änderung durch einen geometrischen oder optischen Weg vorliegt. Die Weglängenänderung hat eine Laufzeitänderung des Objektstrahls zur Folge. Dieser weist dadurch eine Phasendifferenz zum Referenzstrahl auf. Um eine Richtungsumkehr detektieren zu können, hilft eine sogenannte Bragg-Zelle (akusto-optischer Modulator).

Durch diese Phasendifferenz verändert sich die Gesamtintensität I . Die Schwankungen der Intensität werden in einem lichtempfindlichen Detektor in ein Spannungssignal umgewandelt. Das Spannungssignal wird aufgenommen und entspricht einem Zeitsignal, welches über eine Fast Fourier Transformation in ein Frequenzspektrum umgewandelt werden kann.

Zu beachten ist, dass ein einzelnes Laservibrometer nur integrale Werte aus dem gesamten durchstrahlten Messvolumen liefert. Für den Relaminisierungs-Versuch bedeutet das, dass immer ein Durchschnittswert der Dichteschwankung über die gesamte Breite von 100mm des Einsatzes gemessen wurde. Die Randeefekte von den Seitenwänden werden somit im Messergebnis aufgenommen.

5.3.2 Versuchsaufbau

In der folgenden Tabelle sind die für die Messungen verwendeten Laservibrometer und die Einstellungen des Laservibrometer-Controllers angeführt.

Tabelle 5.1: Verwendete Laservibrometer und Controller-Einstellungen

Daten der Laservibrometer	Abfahrendes Vibrometer	Fixes Vibrometer
Marke	Polytec	Polytec
Sensorhead	OFV - 503	OFV - 353
Controller	OFV - 5000	OFV - 3001
Abtastfrequenz in Hz	100000	100000
Vibrometerkonstante k in V/mm/s	5	5
Brennweite der Sammellinse in mm	-20	-20

Die folgende Abbildung 5.6 zeigt den schematischen Versuchsaufbau der Laservibrometer-Messung.

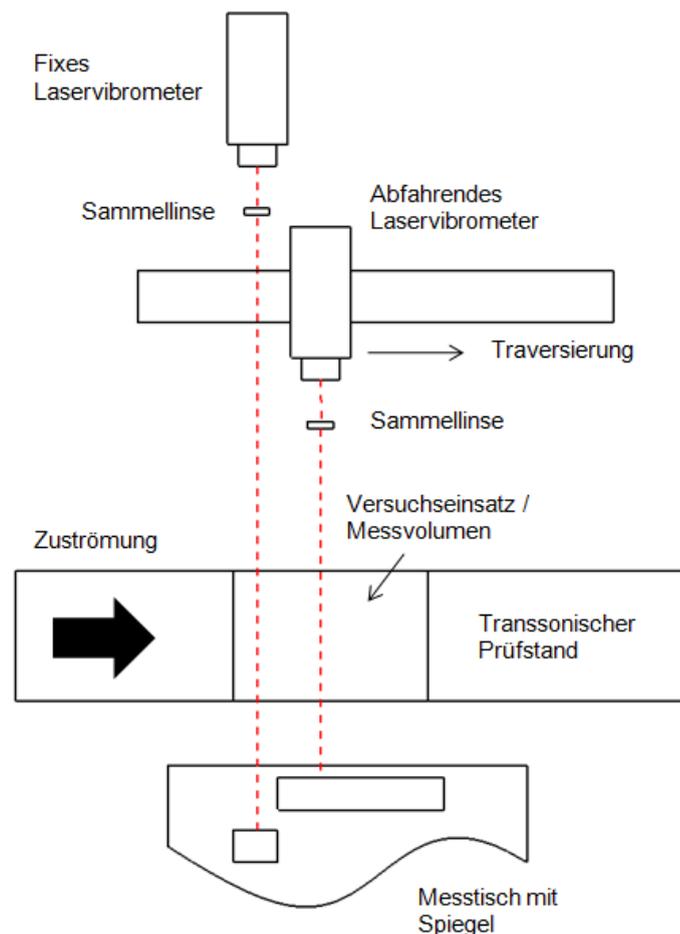


Abbildung 5.6: Schematischer Versuchsaufbau für die Laservibrometermessung

Für die Relaminisierungs-Versuche wurden zwei Laservibrometer vom Typ Polytec OVD 353 verwendet. Eines dieser Vibrometer (Vib_fix) wurde fix auf die Grenz-

schicht im Anfangsbereich der ebenen Platte ausgerichtet. Das zweite Vibrometer (Vib_scan) wurde auf einer einachsigen Traversierung angebracht und fuhr die gewählten Messpunkte auf der Messstrecke ab.

Die Abtastrate der beiden Laservibrometer wurde mit 100kHz festgelegt. Somit konnten nach dem Nyquist-Kriterium Schwingungen bis zu einer Frequenz von 50kHz erfasst werden.

Die Ansteuerung der Traversierung und die Erfassung der Messdaten mittels LabVIEW Programm erfolgte über einen Computer in der Messwarte.

Um Reflexionen zu vermeiden, waren die Laservibrometer nicht normal auf die Glasscheibe ausgerichtet. Grundsätzlich wurde versucht die beiden Laserstrahlen so knapp wie möglich über der Plattenoberfläche zu positionieren, um die Grenzschicht zu erfassen. Dazu wurde der Laserstrahl aus dem Vibrometer nach ca. 20mm fokussiert, um seinen Durchmesser zu reduzieren. Die Laserstrahlen werden durch Spiegel auf der Hinterseite des Versuchseinsatzes in das Laservibrometer zurück reflektiert. Die Masse der Spiegel war sehr hoch, damit ihre Eigenschwingungen im unteren Frequenzbereich blieben.

Das folgende Foto wurde bei einer Messung mit dem Laservibrometer an dem Relaminierungs-Versuchseinsatz aufgenommen.

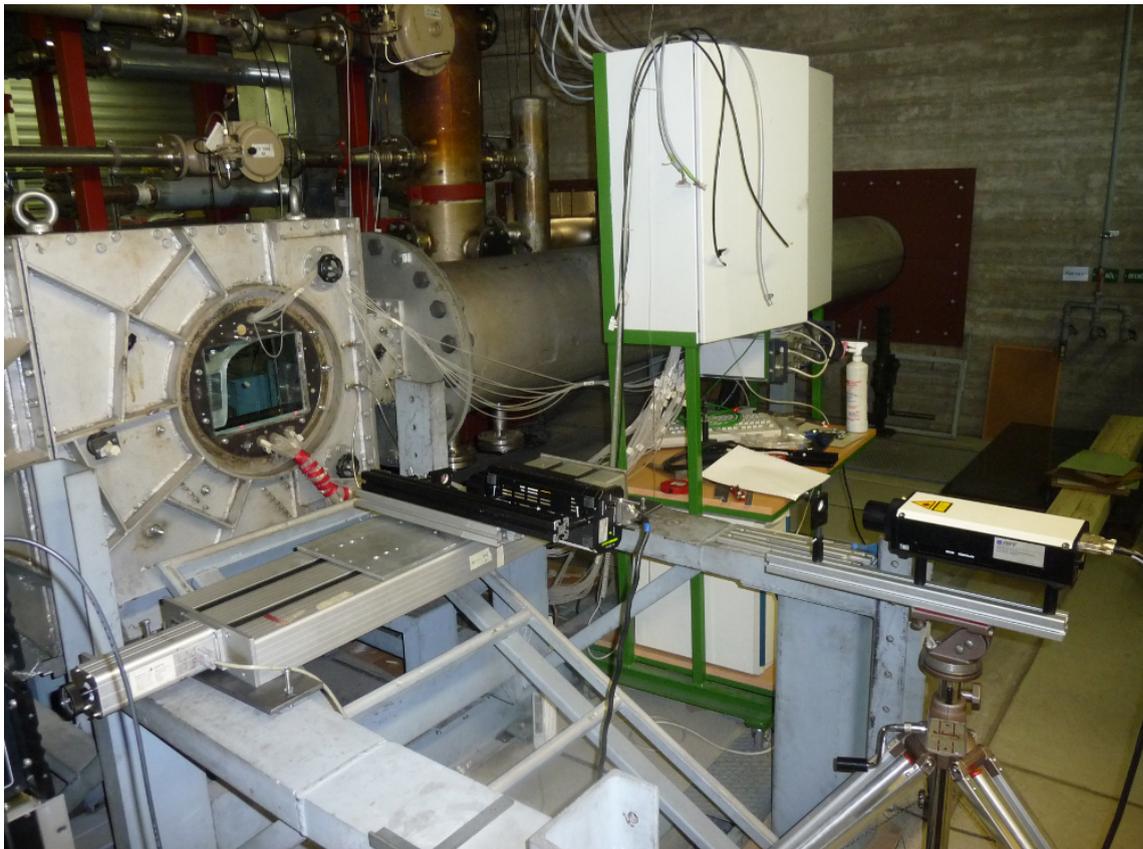


Abbildung 5.7: Foto - Versuchsaufbau für die Laservibromettermessung

Kapitel 6

Messergebnisse

Für diese Diplomarbeit wurden insgesamt 5 Messexperimente an unterschiedlichen Tagen durchgeführt. Wie bereits beschrieben, konnte der Massenstrom durch den Versuchseinsatz nicht exakt mit der Klappe in der Niederdruckleitung eingestellt werden. Dies führte dazu, dass der Totaldruck im Einlass, der durch den Totaldruckbaum gemessen wurde, bei den verschiedenen Versuchen unterschiedliche Werte hatte.

In den folgenden fünf Tabellen sind die Messmethoden, Randbedingungen und Besonderheiten der Versuche genauer beschrieben.

Tabelle 6.1: Versuchsbedingungen der 1. Messung

Messung	1
Messtechnik	Druckmessung Schlierenvisualisierung
Stolperdraht	Nein
Totaler Einlassdruck in bar	1,248
Umgebungsdruck in bar	0,985
Druckverhältnis	0,789
Temperatur im Einlass in °C	50

Tabelle 6.2: Versuchsbedingungen der 2. Messung

Messung	2
Messtechnik	Druckmessung Laservibrometrie
Stolperdraht	Nein
Totaler Einlassdruck in bar	1,324
Umgebungsdruck in bar	0,974
Druckverhältnis	0,736
Temperatur im Einlass in °C	49

Tabelle 6.3: Versuchsbedingungen der 3. Messung

Messung	3	
Messtechnik	Druckmessung Laservibrometrie	
Stolperdraht	Stolperdrahtposition 1	
Totaler Einlassdruck in bar		1,263
Umgebungsdruck in bar		0,974
Druckverhältnis		0,771
Temperatur im Einlass in °C		48

Tabelle 6.4: Versuchsbedingungen der 4. Messung

Messung	4	
Messtechnik	Druckmessung Laservibrometrie	
Stolperdraht	Stolperdrahtposition 2	
Totaler Einlassdruck in bar		1,292
Umgebungsdruck in bar		0,970
Druckverhältnis		0,752
Temperatur im Einlass in °C		52

Tabelle 6.5: Versuchsbedingungen der 5. Messung

Messung	5	
Messtechnik	Druckmessung Laservibrometrie	
Stolperdraht	Stolperdrahtposition 1	
Totaler Einlassdruck in bar		1,295
Umgebungsdruck in bar		0,972
Druckverhältnis		0,750
Temperatur im Einlass in °C		50

6.1 Ergebnisse der Druckmessung

Bei allen Relaminisierungs-Versuchen wurde der Druck gemessen. Die Anzeige und Aufzeichnung der Druckmessung erfolgte über ein LabVIEW-Programm.

Alle Druckmesssonden der ebenen Platte und des Druckmessbaums wurden angeschlossen. Aufgrund einer begrenzten Anzahl von Plätzen für die Druckmessschläuche an den Konnektoren (2x48 Messstellen) waren nicht alle Druckmessstellen der oberen Kontur mit der Druckaufnahme verbunden. Zusätzlich wurde der statische Druck an der rechten Seite im Einlaufkanal des transsonischen Prüfstands gemessen.

6.1.1 Totaldruckmessung - Messergebnisse

Der Totaldruck ist an der Eintrittskante des Platteneinlaufs gemessen worden. Auf der Einlaufplatte befand sich der Totaldruckmessbaum, in dem die Messrohre in Strömungsrichtung und parallel zueinander verbaut waren. In der Abbildung 6.1 ist der Totaldruck im Einlass über den Abstand normal zur Einlaufplatte für die einzelnen Messungen aufgetragen.

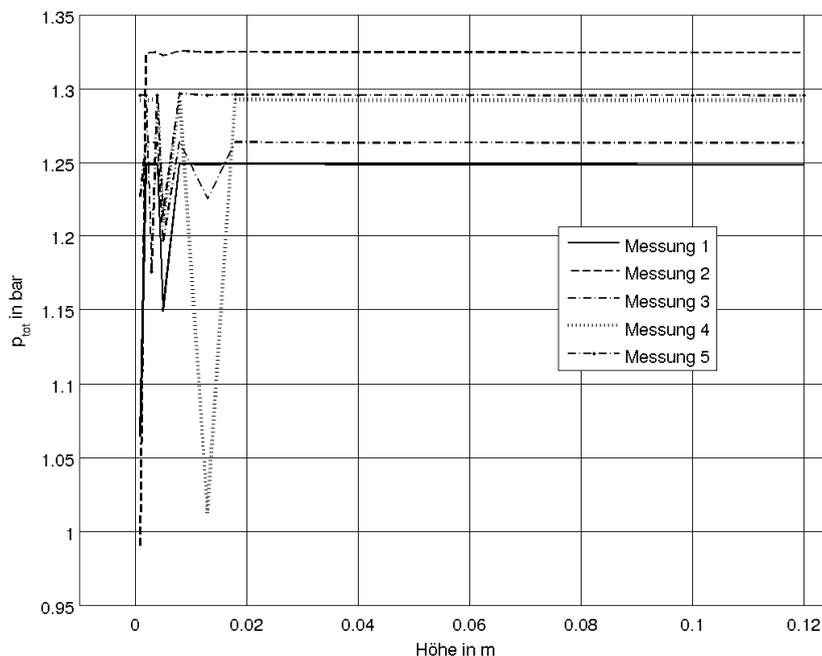


Abbildung 6.1: Messergebnisse des Totaldruckbaums

Wie bereits beschrieben, konnte der Massenstrom und somit auch der Totaldruck durch die Klappe in der Niederdruckleitung nicht exakt eingestellt werden. Somit

unterscheiden sich die Totaldrücke der einzelnen Messungen. Außerdem können einzelne Werte erkannt werden, die nicht dem erwarteten geraden Verlauf entsprechen. Es wird angenommen, dass die Schläuche dieser Druckmessstellen durch den schwierigen Einbau und das Einpassen des Versuchseinsatzes abgedrückt wurden. Auch ein Verstopfen der Pitotrohre, die nur einen Innendurchmesser von 0,5mm haben, ist möglich. Es könnte jedoch auch zu Wirbeln beim Totaldruckbaum an der vorderen Einlaufplatten-Kante gekommen sein.

6.1.2 Statische Druckmessung - Messergebnisse

Wie bereits in Kapitel 5.1.2 beschrieben, ist der statische Druck entlang der Wand an der unteren Platte und oberen Kontur gemessen worden.

Das folgende Diagramm 6.2 zeigt den aufgezeichneten Druck für die verschiedenen Versuche an der ebenen Platte über der Lauflänge x .

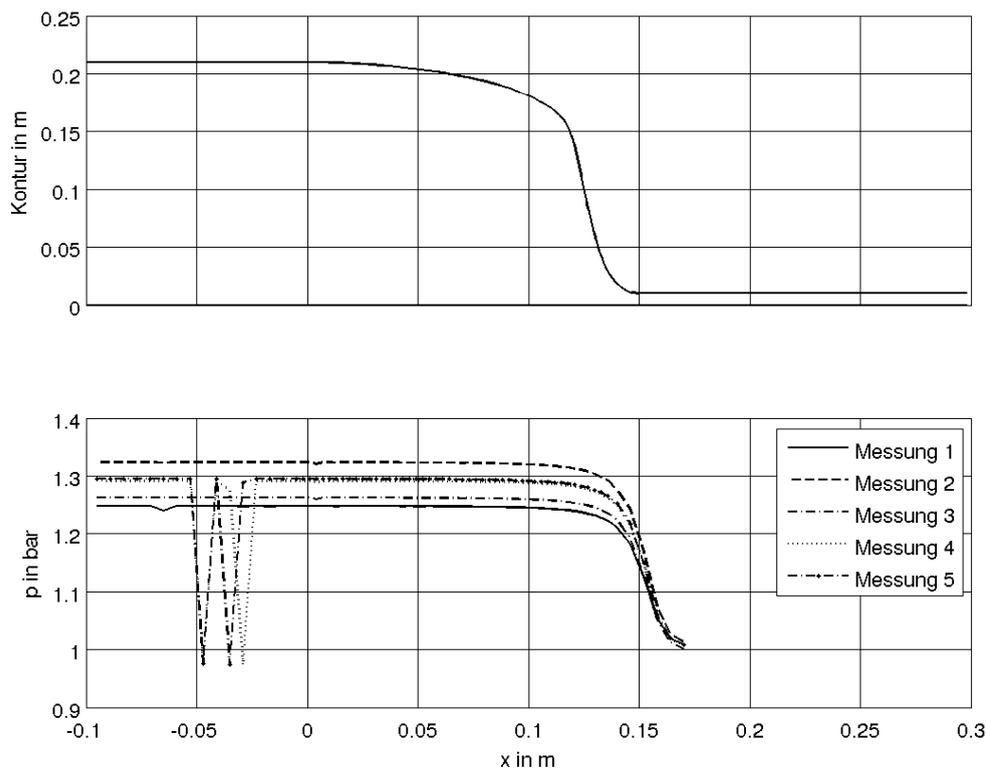


Abbildung 6.2: Ergebnisse der statischen Druckmessung an der ebenen Platte

Man kann erkennen, dass der Druck relativ lange konstant bleibt und erst mit zunehmender Verengung der Düse fällt. Je höher der Druck am Anfang der ebenen Platte, desto größer ist der Abfall des Drucks in der Verengung der Düse.

Wie auch bei der Totaldruckmessung entsprechen einige Messpunkte im vorderen Bereich nicht dem erwarteten Verlauf. Es wird angenommen, dass die Pitotrohre bei diesen Messstellen defekt bzw. verstopft waren.

Der Verlauf des statischen Drucks der Messung 4 wird in Diagramm 6.3 mit den Ergebnissen aus der Simulation verglichen. Hier ist zu erkennen, dass der Verlauf des simulierten Drucks vor dem gemessenen abfällt. Die Form des Abfalls, wenn auch verschoben, ist jedoch ähnlich.

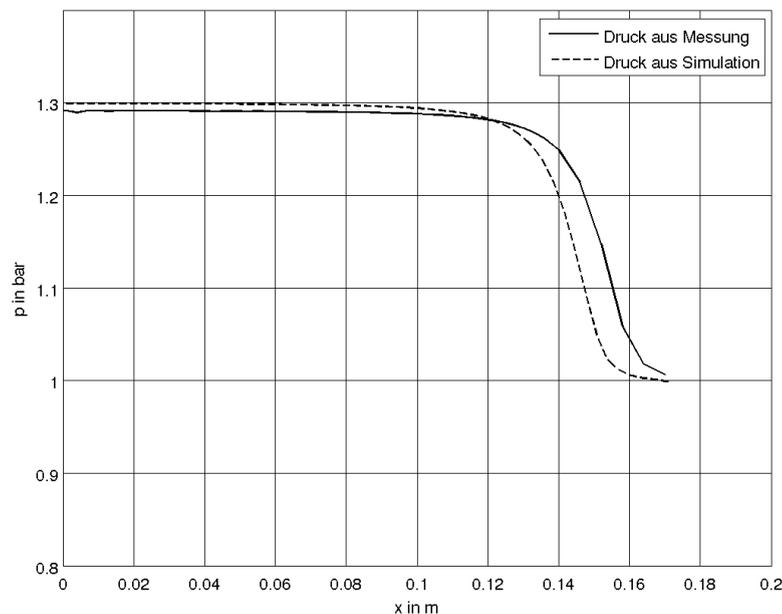


Abbildung 6.3: Vergleich der statischen Druckmessung an der ebenen Platte mit den Simulationsergebnissen

Eine tabellarische Auflistung aller Ergebnisse aus den verschiedenen Druckmessungen befindet sich im Anhang A.2 dieser Arbeit.

6.2 Ergebnisse der Schlierenvisualisierung

Mit der Schlierenvisualisierung sollte eine Veränderung der Grenzschichtdicke beobachtet werden. Des Weiteren sollte die Messung Aufschluss geben, ob die Grenzschichtströmung vor der Relaminisierung turbulent war.

Am Beginn der Messung wurde ungewollt ein Großteil der Luft durch den oberen Grenzschicht-Abtrennschlitz (an der oberen Kontur) geleitet. Der gewünschte Betriebszustand konnte nicht erreicht werden, da die Luft den Weg des geringsten Widerstands wählte und anstatt durch die Düse durch den größeren oberen Schlitz

strömte. Der Spalt wurde geschlossen, um die gewünschte Durchströmung der Düse zu gewährleisten.

Das Bildsignal der Kamera wurde per Firewire an den Rechner geschickt und mittels des Programms Magix aufgezeichnet. Die dargestellten Schlieren-Bilder zeigen einzelne Frames aus den aufgenommenen Filmen.

Abbildung 6.4 veranschaulicht die beiden Bereiche, die mit der Schlierenvisualisierung optisch erfasst werden konnten. Sie sind durch die Größe der Parabolspiegel begrenzt und können nur schwer eingestellt werden.

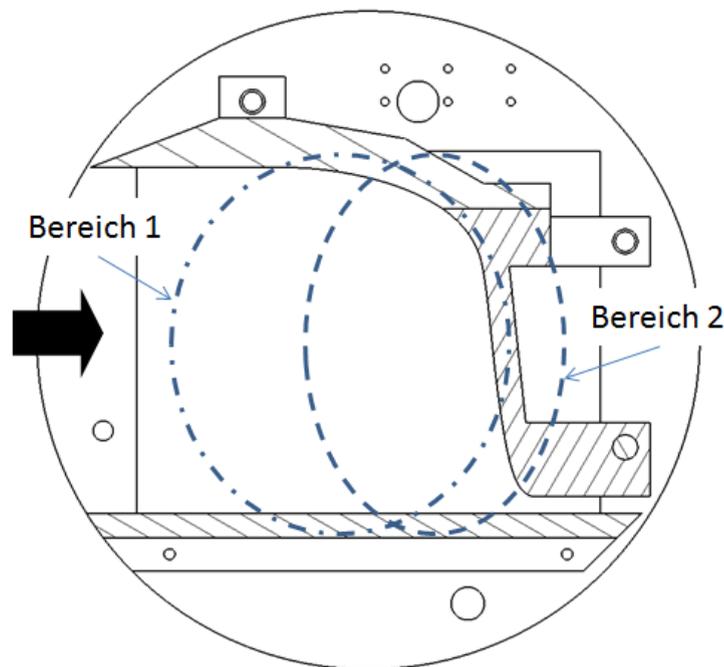


Abbildung 6.4: Erfasste Bereiche bei der Schlierenvisualisierung

Die folgenden beiden Abbildungen 6.5 zeigen den Bereich 2. Man kann rechts unten die starke Verengung der Düse erkennen.

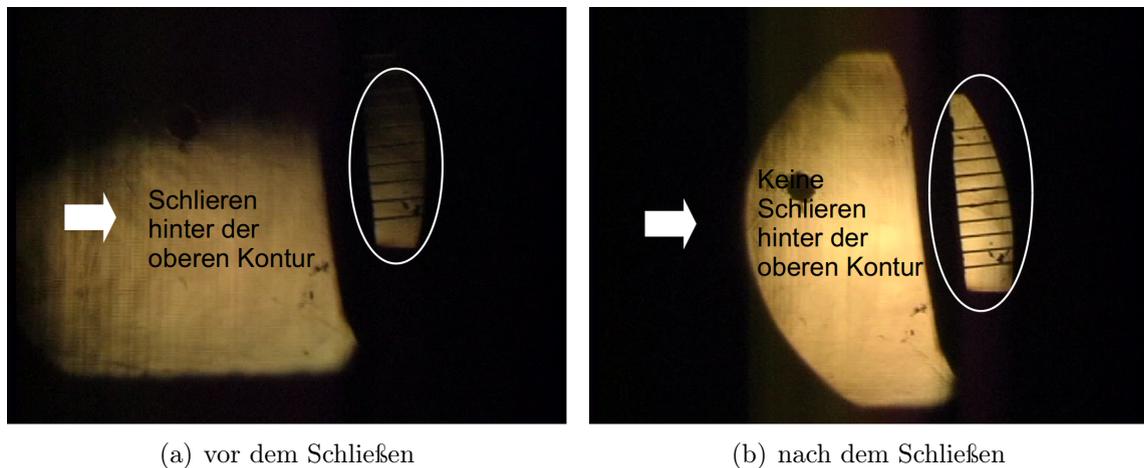


Abbildung 6.5: Schlierenvisualisierung - Versuchseinsatz vor und nach dem Schließen des Grenzschicht-Abtrennschlitzes der oberen Kontur

Das linke Bild wurde vor dem Schließen des Grenzschicht-Abtrennschlitzes aufgenommen. Man kann erkennen, dass die Dichtegradienten und somit die Strömung hinter der Kontur der Düse größer als bei der linken Abbildung sind. Das Schließen des oberen Grenzschicht-Abtrennschlitzes hat somit zu einer Verbesserung der Strömung durch die Düse geführt.

Die folgende Aufnahme 6.6 zeigt den Bereich 1, in dem auf der ebenen Platte Re-laminisierung vermutet wurde. Auf der rechten Seite kann die Einengung der Düse erkannt werden. Leider konnte die Kante der ebenen Platte nicht schärfer dargestellt werden. Somit konnte auch keine Aussage über die Form der Grenzschicht getroffen werden.

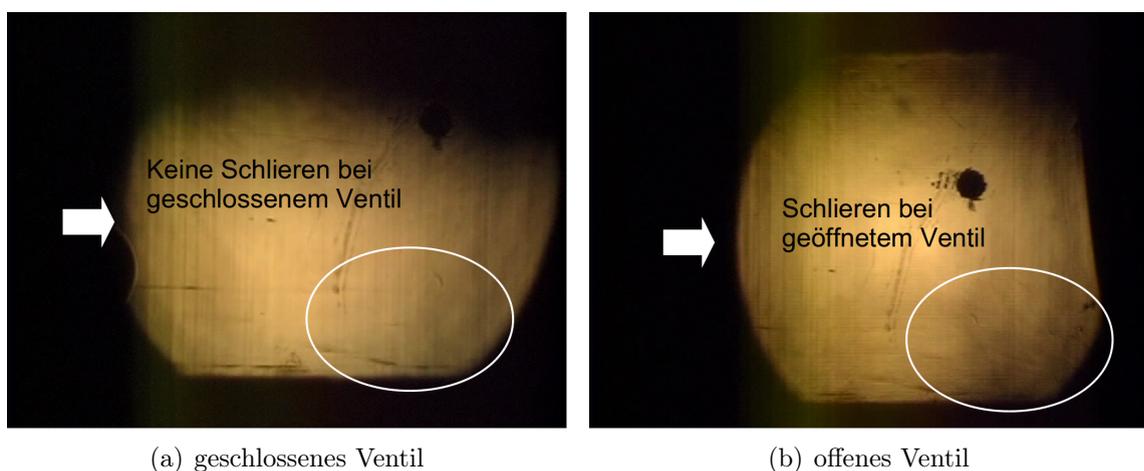


Abbildung 6.6: Schlierenvisualisierung des Versuchseinsatzes mit und ohne Durchfluss

Relativ gut kann man hingegen die Dichtegradienten im Bereich des engsten Düsenquerschnitts und an der oberen Kontur vor der Krümmung erkennen.

Die Darstellung der Dichtegradienten in den Abbildungen 6.7, stammt von den Ergebnissen der Simulation von Düse D_76. Es ist zu sehen, dass höhere Dichtegradienten ρ/dx wie in der Schlierenvisualisierung in der Nähe des engsten Querschnitts und an der Krümmung der Oberseite auftreten.

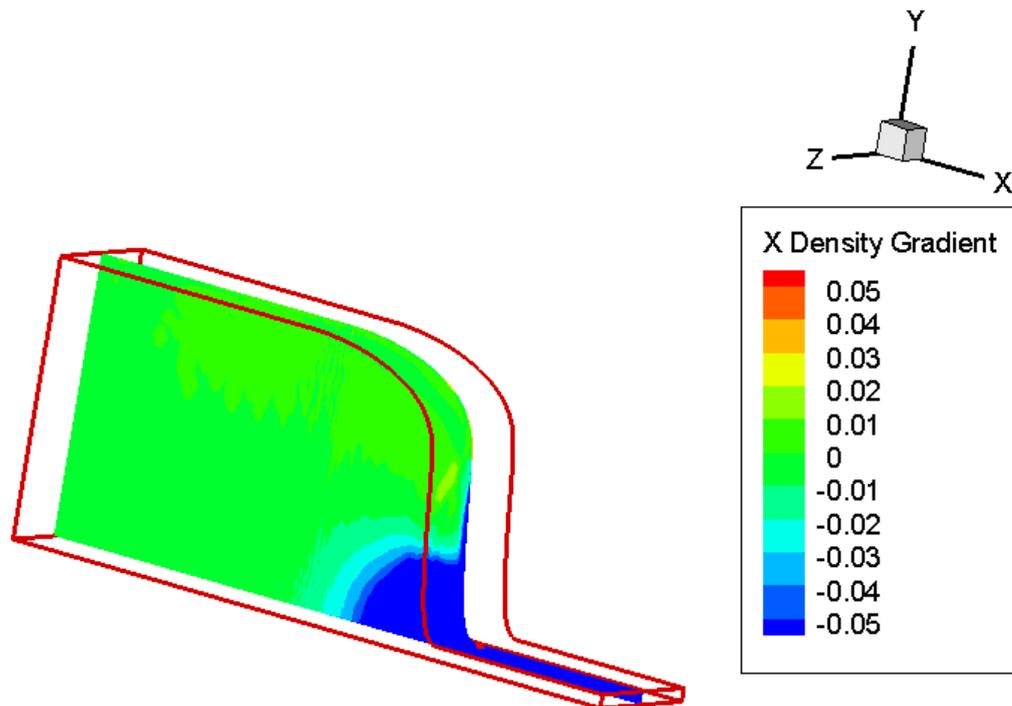


Abbildung 6.7: Simulationsergebnis des Dichtegradienten der Düse D_76

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit Hilfe der Schlierenvisualisierung leider keine Dichtegradienten der Grenzschicht beobachtet werden konnten. Mögliche Gründe dafür sind:

- Ein zu unscharfes Bild bzw. zu geringe Auflösung der Kamera.
- Eine möglicherweise durch die Relaminisierung zu dünne Grenzschicht.
- Die 50°C warme Luft aus der Niederdruckleitung könnte mit temperaturbedingten Schlieren die Dichtegradienten durch den Druck überlagert haben. In Abbildung 6.7 kann man erkennen, dass die Dichtegradienten im Relaminisierungsbereich relativ klein sind.

6.3 Ergebnisse der Laservibrometrie

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus der Messung mit den Laservibrometern präsentiert. Die Laservibrometer erfassen die Dichtegradienten der Grenzschicht um beurteilen zu können, ob ein laminarer oder turbulenter Strömungszustand herrscht. Dafür wurden verschiedene Messpunkte über der Oberfläche der ebenen Platte angefahren und vermessen. Die einzelnen Abfahraster haben sich je nach Versuch unterschieden. Eine genaue Auflistung der Koordinaten befindet sich im Anhang A.3 dieser Diplomarbeit. Die Abbildung 6.8 zeigt die Abstände des fixen und abfahrenden Vibrometers vom vorher beschriebenen Koordinatenursprung. Beim abfahrenden Laservibrometer ist die Startposition aufgetragen von wo weg alle Messungen gemacht wurden.

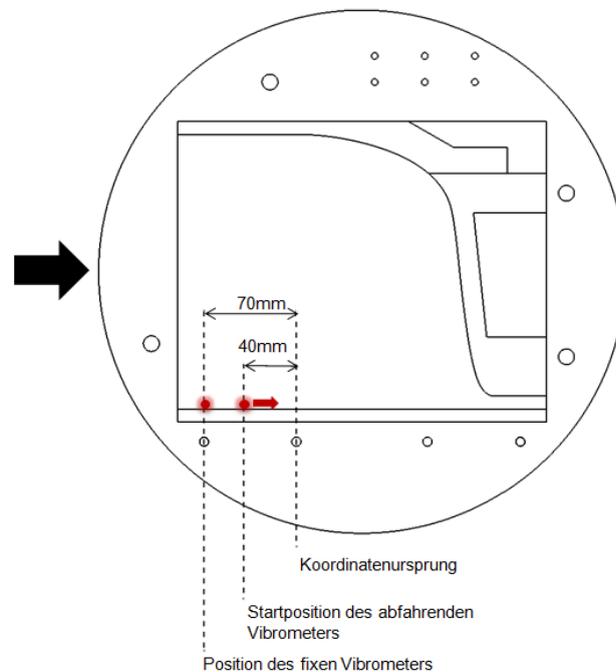


Abbildung 6.8: Abstand vom Koordinatenursprung des fixen und des abfahrenden Laservibrometers

Pro Vibrometer und Messpunkt wurden immer 10 Millionen Werte aufgenommen. Um die Ergebnisse zu mitteln, wurden die Messpunkte fünfmal angefahren und bei jeder Fahrt 2 Millionen Punkte aufgenommen. Eine Ausnahme stellen die beiden letzten Versuche (Messung 4 und 5) dar. Bei ihnen wurden die Messpunkte nur zweimal angefahren und pro Fahrt 5 Millionen Werte für einen Messpunkt aufgenommen. Denn bei den ersten beiden Experimenten wurde festgestellt, dass sich die Temperatur der zuströmenden Luft aus dem Verdichter gut konstant gehalten werden konnte.

Von der Messwerte aus konnten mit Hilfe eines LabVIEW Programms, das kontinuierlich eine FFT(Fourier Fast Transformation) durchführte, die Frequenzspektren

für die einzelnen Punkte beobachtet werden.

Aufgezeichnet wurde die Spannung, die der Laservibrometer-Controller liefert, über die Zeit. Die Spannung kann über die folgende Formel in eine Schwankung der Dichte umgerechnet werden.

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = \frac{k \cdot U(t)}{G \cdot \Delta z} \quad (6.1)$$

Δz entspricht dem Weg durch das Messvolumen und ist im Fall dieser Diplomarbeit die Breite des Versuchseinsatzes von 0,1m. G bezeichnet die Gladstone-Dale Konstante, deren Wert $2,256 \cdot 10^4 m^3/kg$ bei einer Wellenlänge des Lasers von 633nm beträgt. $U(t)$ bezeichnet das aufgenommene, von der Zeit abhängige Spannungssignal des Laservibrometer-Controllers. Der Kalibrations-Faktor k entspricht $5 m/s/V$. Die Herleitung dieses Zusammenhangs kann aus [16] entnommen werden.

Im weiteren Verlauf der Diplomarbeit wird direkt das Spannungssignal in den Diagrammen dargestellt.

Die bei den Messungen mit dem Laservibrometer aufgezeichneten Zeitsignale für die einzelnen Messpunkte wurden mittels eines Matlab-Programms ausgewertet. Das Programm unterteilt das Zeitsignal eines Messpunkts in 2048 bzw. 4096 gleich große Stücke und führt für diese eine FFT-Analyse aus. Zum Abschluss werden die erhaltenen Rohspektren gemittelt. Um alle Punkte und ihre Spektren in einem Diagramm darstellen zu können, wurde ein dreidimensionales Diagramm verwendet, das in den folgenden Abschnitten ausführlich beschrieben wird. Um einen Trend besser von zufälligen Schwankungen unterscheiden zu können, wurden die Messergebnisse lokal gemittelt. Das Ergebnis für eine bestimmte Messposition wurde somit aus der Mittelung der Position mit seinen Nachbarn gewonnen.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse in Form der Amplitudenspektren für die letzten beiden Versuche (Messung 4 und 5) vorgestellt. Die Ergebnisse der Messungen 2 und 3 werden in dieser Diplomarbeit nicht vorgestellt. Der Grund dafür ist, dass in der 2. Messung kein Stolperdraht montiert wurde und somit der Eintrittszustand der Grenzschichtströmung unbekannt ist. Außerdem ist bei den ersten beiden Versuchen mit dem Vibrometer der Spalt in der oberen Kontur erst provisorisch verschlossen worden. Es konnte nicht sichergestellt werden, dass die Strömung durch die Düse strömt und nicht den Weg des geringeren Widerstands hinter der Kontur genommen hat.

Messung 4

Wie bereits in Kapitel 4.3.2 beschrieben, wurde bei der 4. Messung ein Stolperdraht am Anfang der ebenen Platte angebracht. Das fixe Vibrometer war in Strömungsrichtung nach dem Stolperdraht angeordnet.

Bei der 4. Messung wurde vom Ursprung der Laservibrometermessung ausgehend bis 190mm alle 2mm ein Messpunkt aufgenommen. Die Tabelle A.6 im Anhang listet die genauen Koordinaten aller Laservibrometermessungen auf.

Das folgende Diagramm 6.9 zeigt das mit dem fixen Laservibrometer aufgenommene Ergebnis. Auf der Ordinate ist die Frequenz aufgetragen, mit der die aufgenommenen Dichteschwankungen oszillieren. Auf der Abszisse ist die Position des fahrenden Laservibrometers dargestellt. Bei jeder aufgenommenen Position des fahrenden Vibrometers wurde auch eine Aufnahme mit dem fixen Vibrometer gemacht. Die verschiedenen Farben des Diagramms geben an, wie groß die Amplitude der Schwingung bei einer bestimmten Frequenz und Position ist.

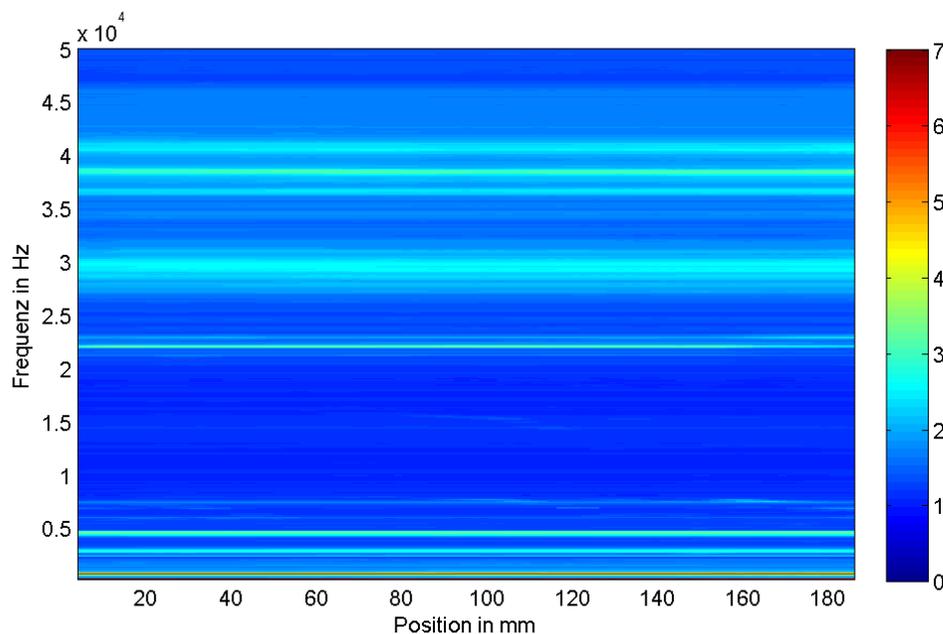


Abbildung 6.9: Amplitudenspektrum der 4. Messung - Fixes Vibrometer

Im Amplitudenspektrum des fixen Vibrometers kann man erkennen, dass die Frequenz bei erhöhter Amplitude für alle Positionen konstant ist. Wie bereits beschrieben nimmt das fixe Vibrometer immer das gleiche Volumen am Plattenanfang auf. Man kann daher aus diesem Diagramm einen stationären Eintrittszustand erkennen.

Für die Amplituden der Schwingungen im unteren Frequenzbereich bis ca. 5000 Hz wird eine Anregung durch den transsonischen Prüfstand angenommen. Die Frequenzspektren aus den Messungen der Prüfstand-Schwingungen durch das Vibrome-

ter bestätigen diese Annahme. Die höheren Frequenzbänder bei ca. 22000, 30000 und 38000 Hz könnten von einem hochfrequenten Pfeifen stammen (Amplituden bei hohen Frequenzen). Diese Frequenz-Bereiche konnten auch in den anderen Messungen beobachtet werden.

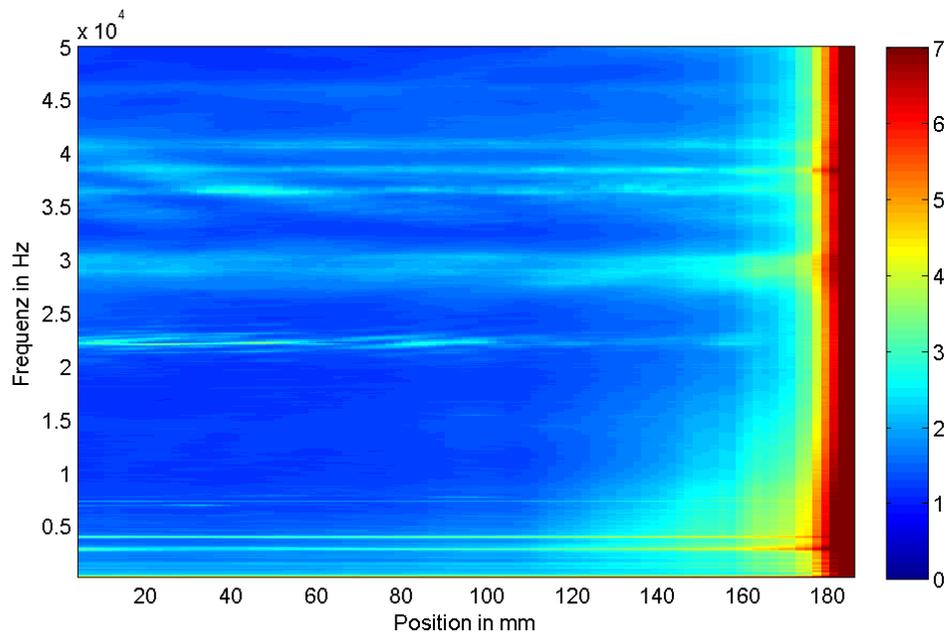


Abbildung 6.10: Amplitudenspektrum der 4. Messung - Fahrendes Vibrometer

In Diagramm 6.10 ist das Amplitudenspektrum des abfahrenden Laservibrometers dargestellt. Es kann wie das oben beschriebene Diagramm gelesen werden. Im Unterschied zum oberen Diagramm ist auf der Abszisse die wirkliche Position des Vibrometers aufgetragen, da es sich um das Fahrende handelt. Hierbei können dieselben horizontalen Strukturen wie im Amplitudenspektrum des fixen Vibrometers erkannt werden.

Die Spektren der einzelnen Messpunkte bleiben etwa bis zur Position 120mm annähernd konstant wie im folgenden Diagramm 6.11 zu sehen ist.

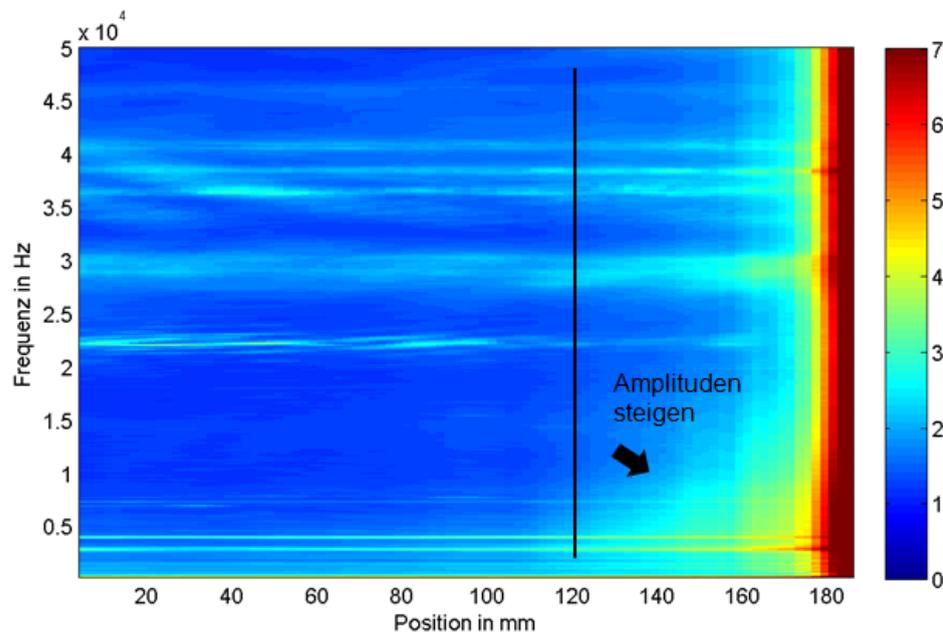


Abbildung 6.11: Amplitudenspektrum der 4. Messung - Fahrendes Vibrometer mit markiertem Anstieg der Amplituden

Ab der Messposition bei 120mm steigen die Amplituden in Strömungsrichtung zuerst im niederfrequenten Bereich an. Ab dem Messpunkt bei 160mm kommt es auch bei den höheren Frequenzen zu einem Anstieg der Signalstärke. Ab der Messposition bei 170mm kommt es im gesamten gemessenen Frequenzbereich zu einer Erhöhung der Amplitude, deren Betrag stromabwärts kontinuierlich ansteigt.

In den folgenden Abbildungen sind Ausschnitte aus dem Zeitsignal der Messungen für ausgewählte Messpunkte dargestellt. Das Zeitsignal ist der Verlauf des Eingangssignals des Vibrometers, das während der Messung für die einzelnen Punkte aufgenommen wurde. Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese Diagramme nur ein $1/2000$ des gesamten aufgenommenen Zeitsignals zeigen. Der Ausschnitt von 0,05s wurde aus dem hinteren Teil des Signals genommen um beim Traversieren entstehende Schwingungen zu vermeiden. Es werden die Messpunkte bei 80mm, 160mm, 166mm, 170mm und 190mm gezeigt.

- Das Zeitsignal bei 80mm zeigt ein niederfrequentes Rauschen.

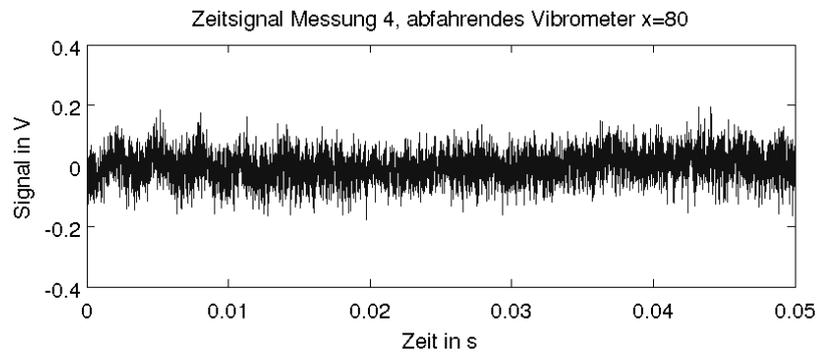


Abbildung 6.12: Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 80mm

- Ab 160mm kann ein geringes Ansteigen der Amplitude mit vereinzelt Spikes (Spitzen) beobachtet werden.

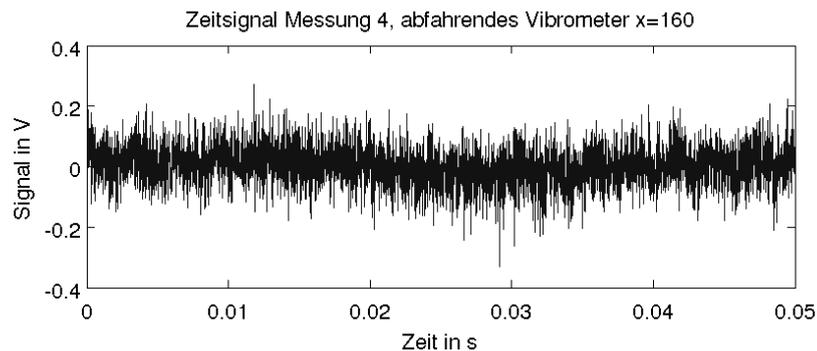


Abbildung 6.13: Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 160mm

- Die Anzahl dieser Spikes, die ein Indiz für höhere Frequenzen sind, nimmt zu, wie man an der Position bei 172mm sieht.

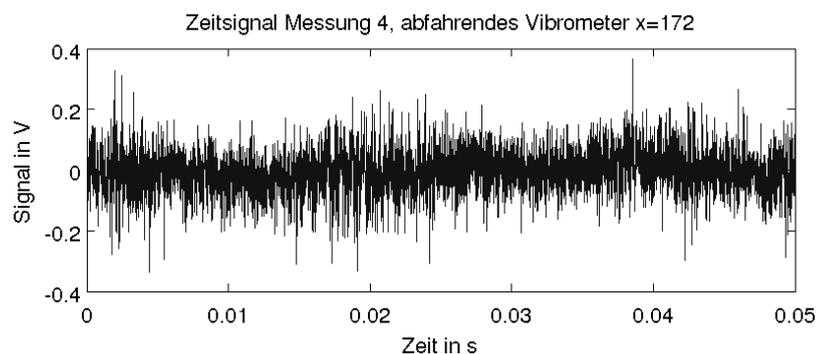


Abbildung 6.14: Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 172mm

- Im Zeitsignal des Messpunkts bei 188mm dominieren diese Spikes eindeutig den Verlauf.

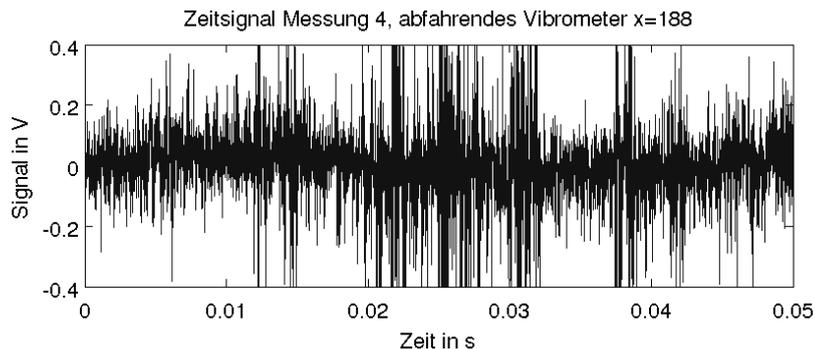


Abbildung 6.15: Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 188mm

Die Messergebnisse der 4. Messung können auf folgende Weise interpretiert werden:

1. Im vorderen Bereich der Strömung ist es schwierig, eine turbulente Grenzschichtströmung auszumachen. Ein möglicher Grund dafür könnte eine zu geringe Amplitude des Messsignals sein. Der Messpunkt, der vom Vibrometer erfasst wird, entspricht der Fläche des durch den Laserstrahls gebildeten Kreises. Das Messergebnis entspricht dem Mittel der Dichtefluktuation in dieser Fläche. Bei einer geringen Dicke der Grenzschicht kann es also passieren, dass nur ein Teil vom Laservibrometer erfasst und aufgenommen wird. Somit könnte die Amplitude des Zeitsignals klein sein und durch Rauschen überdeckt werden. Trotz des kurz vor dem ersten Messpunkt installierten Stolperdrahts kann nicht festgestellt werden, ob die Grenzschichtströmung im Eintrittsbereich der Düse turbulent ist.

Bei einer Relaminsierung wird angenommen, dass die Amplituden des Zeitsignals in allen Frequenzen abnehmen und ein Signal, welches charakteristisch für den laminaren Zustand ist, entsteht.

Leider konnte keine dieser Änderungen des Grenzschichtströmungs-Zustandes im vorderen Messbereich bei der 4. Messung beobachtet werden.

2. Im hinteren Bereich der ebenen Platte, ab der Position bei 120mm, steigen die Amplituden bei niedriger Frequenz an. In diesem Bereich könnten niederfrequente Wirbel auftreten.

Ab 170mm sind Anzeichen für eine beginnende Transition festzustellen. Im Zeitsignal dieses Messpunktes kann man Spikes erkennen. Diese Spikes im Signal treten strömungsabwärts immer öfter auf. Es könnte sein, dass die starke Beschleunigung diesen Transitionsprozess so lange unterdrückt, bis der Beschleunigungsparameter wieder unter den kritischen Wert fällt.

Messung 5

Bei der 5. Messung wurde der Stolperdraht wieder stromaufwärts hinter dem Totdruckbaum auf der Einlaufplatte fixiert. Die Punkte des abfahrende Vibrometers waren bis auf zwei Bereiche 5mm voneinander entfernt. Zwischen den Positionen bei 50mm bis 60mm, ebenso wie zwischen 150mm bis 170mm, wurde im Abstand von 1mm ein Messsignal aufgenommen. Die Tabelle im Anhang A.6 listet die genauen Koordinaten aller Laservibrometermessungen auf.

Wie bereits in Messung 4 beschrieben zeigt das erste Diagramm 6.16 das mit dem fixen Laservibrometer aufgenommen Ergebnis. Auf der Ordinate ist die Frequenz aufgetragen, mit der die aufgenommenen Dichteschwankungen oszillieren. Auf der Abszisse ist die Position des fahrenden Laservibrometers aufgetragen. Bei jeder aufgenommenen Position des fahrenden Vibrometers wurde auch eine Aufnahme mit dem fixen Vibrometer gemacht. Die verschiedenen Farben des Diagramms geben an, wie groß die Amplitude der Schwingung bei einer bestimmten Frequenz und Position ist.

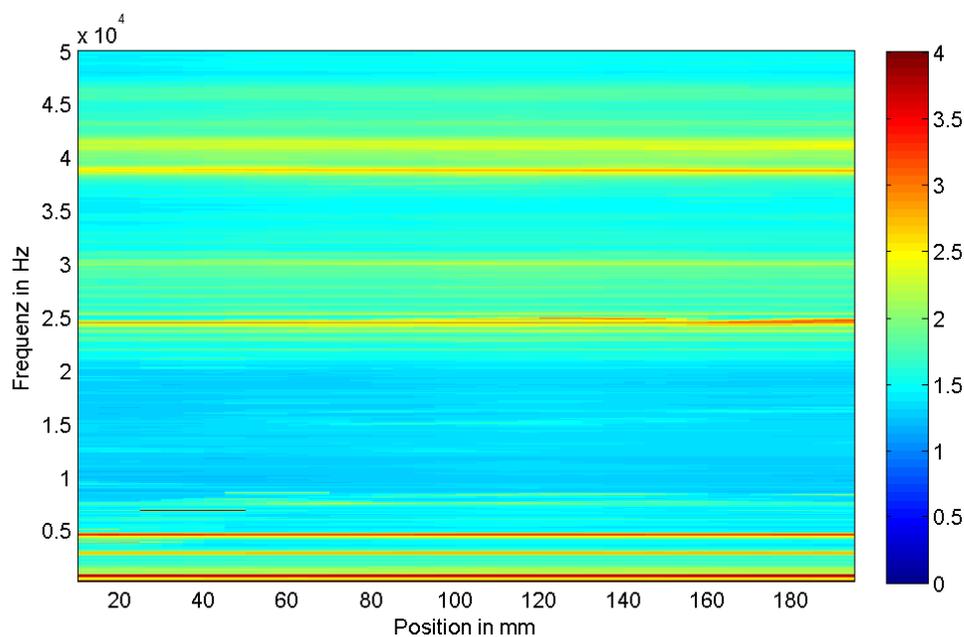


Abbildung 6.16: Amplitudenspektrum der 5. Messung - Fixes Vibrometer

Da sich die Amplituden bei den einzelnen angefahrenen Positionen über der Zeit kaum ändern, kann wie bei der vorherigen Messung von einem stationären Anströmzustand des Versuchseinsatzes ausgegangen werden.

Für den Frequenzbereich bis 5000Hz kann eine Anregung durch den Prüfstand angenommen werden. Bei 25000Hz, 30000Hz und im Bereich von 40000Hz sind erhöhte Amplituden festzustellen. Es wird angenommen, dass diese Strukturen wieder von einem hochfrequenten Pfeifen stammen.

In der folgenden Abbildung 6.17 ist das Amplitudenspektrum des fahrenden Laservibrometers gezeigt. Wie auch im Messergebnis des fixen Vibrometers kann man die erhöhten Amplituden im tiefen Frequenzbereich bis 5000Hz und die Frequenzbänder im hohen Bereich erkennen.

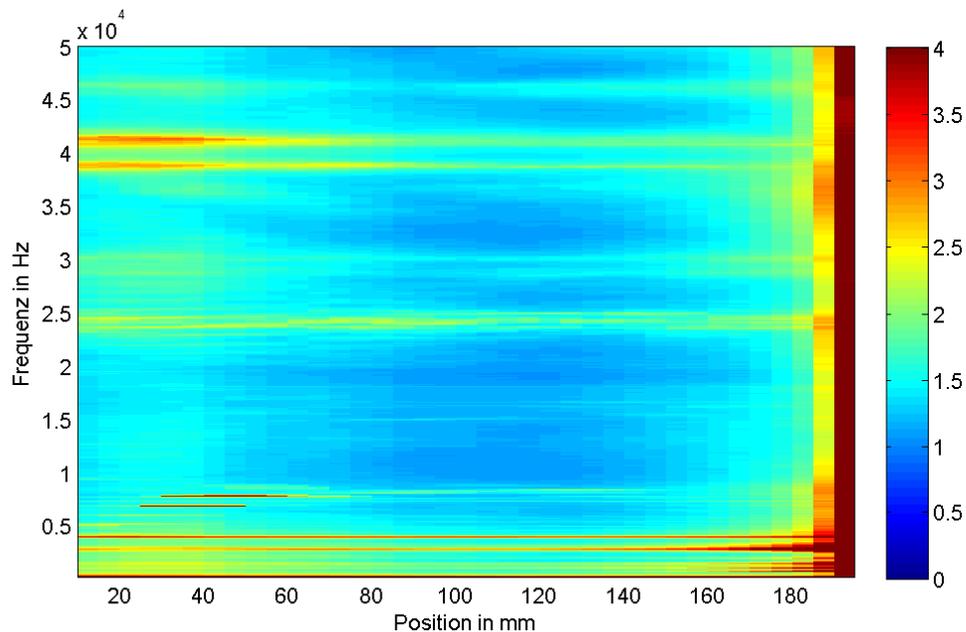


Abbildung 6.17: Amplitudenspektrum der 5. Messung - Fahrendes Vibrometer

Wenn man die Höhe der Amplituden über den Messpositionen betrachtet, können 3 Teilbereiche ausgemacht werden, wie in der Abbildung 6.18 gezeigt wird.

Erster Bereich: von 0mm bis 60mm; zweiter Bereich: von 60mm bis 160mm; dritte Bereich: von 160mm bis zu den letzten Messpunkten.

Der erste Bereich von 0mm bis 60mm zeigt gegenüber dem zweiten Bereich von 60mm bis 160mm eine höhere Amplitude in allen Frequenzbereichen. Im dritten Bereich, der von 160mm bis zum letzten Messpunkt reicht, steigt die Amplitude des Messsignals wieder an. Der Anstieg im dritten Bereich ist dabei schneller als der Abfall im zweiten Bereich.

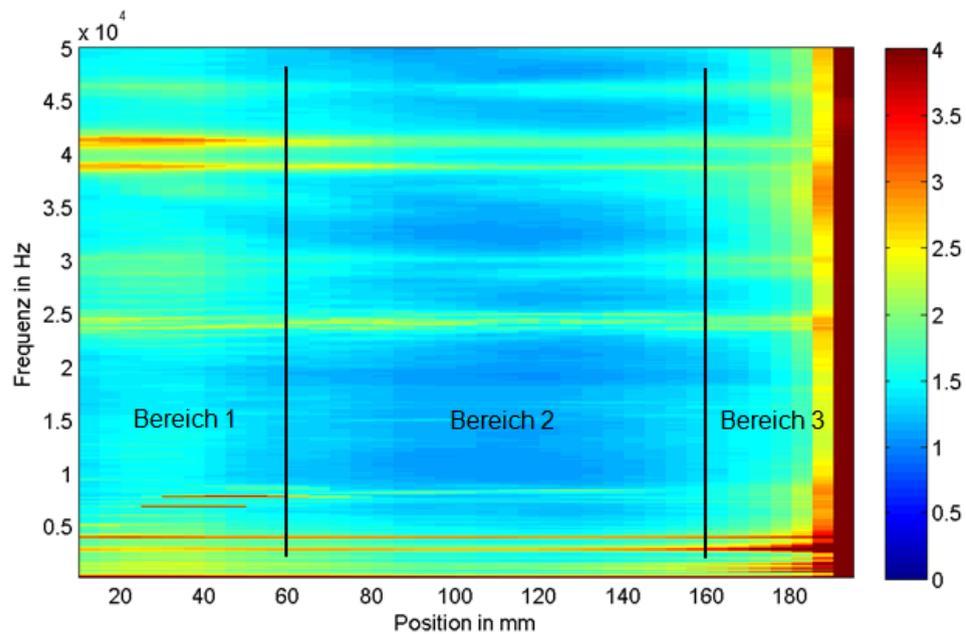


Abbildung 6.18: Amplitudenspektrum der 5. Messung - Fahrendes Vibrometer mit eingezeichneten Bereichen

In den folgenden Diagrammen werden die gemessenen Zeitsignale der 5. Messung, in den Punkten 35mm, 100mm, 185mm und 195mm dargestellt.

- Die Amplituden der Position 35mm bei hoher Frequenz, die im ersten Bereich des Amplitudendiagramms zu sehen sind, können im Zeitsignal nicht ausgemacht werden. Spikes können auch nicht eindeutig identifiziert werden. Möglicherweise sind die Spikes durch das Rauschen überdeckt.

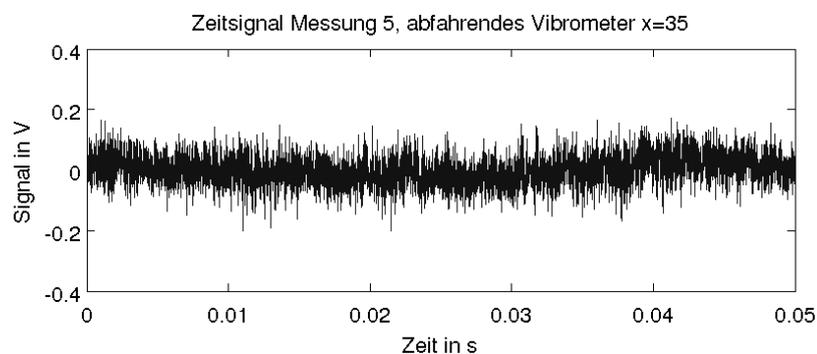


Abbildung 6.19: Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 35mm

- Das Zeitsignal des Messpunkts 100mm zeigt ein niederfrequentes Rauschen

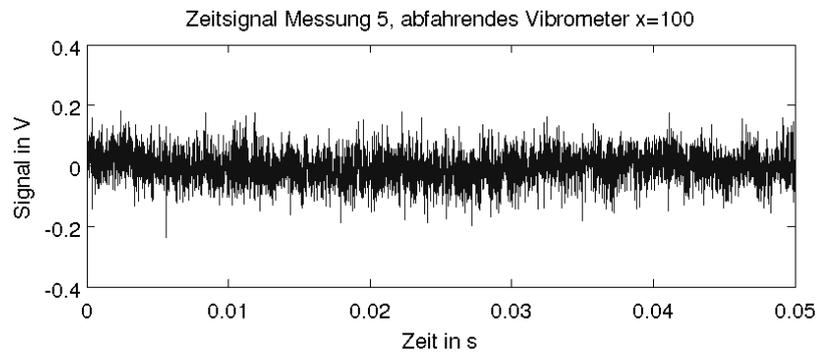


Abbildung 6.20: Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 100mm

- Ab der Position 185mm können ein geringes Ansteigen der Amplitude und vereinzelte Spikes beobachtet werden.

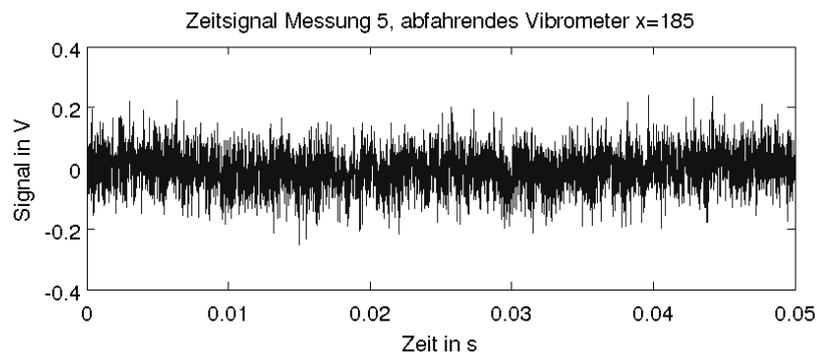


Abbildung 6.21: Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 185mm

- Im Zeitsignal des Messpunkts 195mm sind der Anstieg der Amplitude und die Spikes im Zeitsignal deutlich zu erkennen.

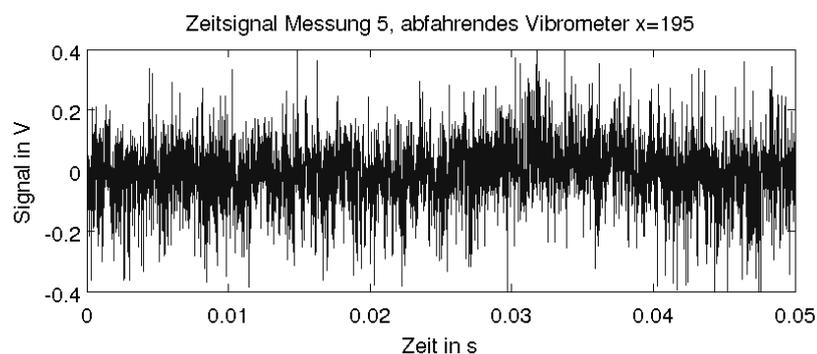


Abbildung 6.22: Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 195mm

Die Messergebnisse der 5. Messung können auf folgende Weise interpretiert werden:

1. Im vorderen Bereich der ebenen Platte (bis 60mm) können die Amplituden über den gesamten Frequenzbereich als transitionale Grenzschicht gedeutet werden, obwohl die charakteristischen Spikes vermutlich durch das Grundrauschen verdeckt werden. Die kleinen Amplituden in diesem Bereich des Versuchseinsatzes könnten durch eine dünne Grenzschichtdicke im Vergleich zur Messfläche des Laserstrahls begründet sein. Wie bereits beschrieben, entspricht das Messergebnis dem Mittel der in der Messfläche des Laserstrahls auftretenden Dichteschwankungen. Die Amplituden der Dichtefluktuationen in einer dünnen Grenzschicht werden so nur zum Teil vom Laservibrometer erfasst.

Dies könnte erklären, warum keine transitionellen Schwankungen im vorderen Bereich des Versuchsaufbaus aus den Messergebnissen ersehen werden konnten.

Andererseits besteht auch die Möglichkeit, dass die Grenzschicht im Spalt zwischen Einlaufplatte und ebener Platte abgesaugt wurde. Diese Annahme würde erklären, warum die Grenzschicht in diesem Bereich dünn bzw. trotz Stolperdraht nicht vollturbulent ist. Dieser Spalt konnte jedoch nicht vollständig geschlossen werden, denn er ist nötig, um den Versuchseinsatz in den Prüfstand einbauen zu können.

2. Im mittleren Bereich (von Messposition 60mm bis 160mm) nehmen die Amplituden ab. Dies könnte durch eine dünnere Grenzschicht hervorgerufen werden und somit ein Anzeichen für eine laminare Grenzschichtströmung infolge Relaminisierung sein. Das Zeitsignal in diesem Bereich kann als ein Rauschen, ausgelöst durch zum Beispiel elektrische Signale, interpretiert werden.
3. Im hinteren Bereich ab Position 160 kann, ähnlich wie bei der 4. Messung, Transition vermutet werden. Die Spikes und die höher werdende Amplitude des Zeitsignals könnten dafürsprechen. Es wäre möglich, dass der Übergang zu einer vollturbulenten Grenzschichtströmung durch den hohen Beschleunigungsparameter nach hinten verschoben, die Turbulenz unterdrückt und der laminare bzw. transitionelle Zustand der Grenzschicht aufrecht erhalten wurde.

Zusammenfassung der Laservibrometer-Messergebnisse

Die Messergebnisse der Laservibrometer-Messung zeigen in dem Bereich, in dem die Relaminisierung vermutet wird, eine kleine Amplitude (Messung 4) bzw. eine Absenkung der Amplituden (Messung 5). Dieser Effekt kann mit drei verschiedenen Szenarien erklärt werden (siehe Abbildung 6.23).

1. Die Dicke der Grenzschicht könnte abnehmen und somit die durch den Laserstrahl gemessenen Amplituden verkleinern.

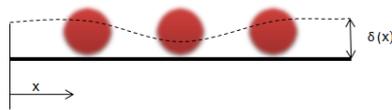


Abbildung 6.23: Abnahme der Grenzschichtdicke und der mit dem Vibrometer gemessenen Amplituden

2. Die Grenzschichtdicke bleibt konstant, es nimmt die Intensität der Dichteschwankungen ab.
3. Das dritte Szenario wäre eine Kombination aus den beiden ersten. Grenzschichtdicke und die Intensität der Dichteschwankungen nehmen ab und führen zu einer geringeren Amplitude des Messsignals.

Alle diese Punkte könnten auf eine Relaminisierung hindeuten. Denn wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ist die Abnahme der Grenzschichtdicke ein Erkennungsmerkmal der Relaminisierung. Eine laminare Unterschicht, die sich bei einer Relaminisierung aufbaut und weiter wächst, könnte die Abnahme der Intensität der Dichtefluktuationen erklären.

Auch könnte eine starke Beschleunigung die Transition verzögern und erst, wie beobachtet, im hinteren Bereich der Düse stattfinden lassen. In dem folgenden Diagramm 6.24 ist der Verlauf des Beschleunigungsparameters über der Lauflänge x aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Wert des kritischen Beschleunigungsparameters, der ein Parameter für die Relaminisierung ist, bereits ab der ersten Messposition des fahrenden Vibrometers überschritten ist. Es ist möglich, dass aus diesem Grund keine Anzeichen für eine turbulente Grenzschichtströmung gefunden wurden.

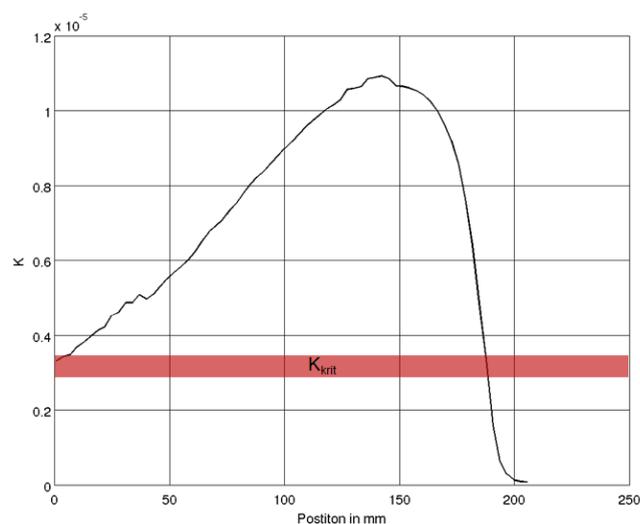


Abbildung 6.24: Verlauf des Beschleunigungsparameters über die Lauflänge der Laservibrometer-Koordinaten

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde ein Relaminisierung-Testfall zuerst rechnerisch ausgelegt und dann experimentell untersucht. Die Ergebnisse wurden miteinander verglichen. Die aus der Simulation erhaltenen Resultate, wie der Druckverlauf, deckten sich größtenteils mit den Messergebnissen.

Als erstes musste eine Kontur mit passender Geometrie die das Beschleunigungsverhalten eines am Institut untersuchten Turbinenstators nachbildet für das hohe Druckverhältnis und das begrenzte Platzangebot des transsonischen Windkanals ausgelegt werden. Eine besondere Schwierigkeit war es, die Strömung der Kontur folgen zu lassen und dabei eine Ablöseblase zu vermeiden. Der Konstruktion und dem Zusammenbau folgte die experimentelle Untersuchung des Relaminisierungseinsatzes mit verschiedenen Messmethoden im transsonischen Prüfstand des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik. Dabei musste jedoch das hohe Auslegungs-Druckverhältnis im Versuch sicherheitsbedingt reduziert werden.

Die totale bzw. statische Druckmessung stellte sich als erprobte und sichere Messmethode heraus. Der Versuch, den laminaren oder turbulenten Zustand der Grenzschicht mit der Schlierenvisualisierung zu bestimmen, scheiterte. Gründe dafür sind die Unschärfe der erhaltenen Bilder, die möglicherweise zu kleine Grenzschicht und die hohen Dichtegradienten durch die hohe Eintritts-Temperatur der Luft. Außerdem ist zu beachten, dass die Strömung bei der Schlierenvisualisierung wie bei der Laservibrometrie integral über die gesamte Kanalbreite dargestellt wird. Die durchgeführten Messungen mit dem Laservibrometer haben gezeigt, dass diese Messtechnik bereits sehr kleine Änderungen der Dichte detektieren kann. Der Laserstrahl misst dabei ein Volumen über der Oberfläche der untersuchten Wand. Es kann bei der Messung nicht genau festgestellt werden, ob und zu welchem Teil sich die Grenzschicht innerhalb dieses Messvolumens befindet. Durch das Rauschen im erhaltenen Messsignal können Strukturen in den aufgezeichneten Zeitsignalen nicht zweifelsfrei bestimmt werden. Mit einem Stolperdraht wurde versucht, eine turbulente Strömung der Grenzschicht vor dem Relaminierungs-Gebiet zu gewährleisten. Eine Relaminisierung im vorderen Bereich der Düse, bei geringen Amplituden, kann ebenso wie eine laminare Grenzschichtströmung nur vermutet werden. Es konnte jedoch eine Transition im hinteren Bereich der Düse, bei hohen Amplituden des Messsignals, beobachtet werden. Diese Beobachtung könnte für eine Unterdrückung des Umschlags

in eine turbulente Grenzschichtströmung oder für eine Relaminisierung im stark beschleunigten Bereich sprechen.

Für eine weiterführende Arbeit wäre es ratsam, den Zustand der Grenzschicht im Einlass zu untersuchen. Denn wenn sich keine turbulente Grenzschichtströmung nach dem Stolperdraht einstellt, bleibt sie durch die hohe Beschleunigung laminar und es kann keine Relaminisierung beobachtet werden. Ein Experiment mit ebener Platte ohne Druckgradient wäre für eine Kalibration der Messmethode sinnvoll, da dort die zu erwartenden Ergebnisse bekannt sind. Außerdem könnte ein Experiment mit höherem Druckverhältnis, wofür die Düsengeometrie ausgelegt wurde, durchgeführt werden. Als erprobte und teure Messtechnik zur Detektion von Relaminisierung kann die Heißfilmsonde genannt werden. Als Alternative wäre eine Thermographie-Kamera, die sehr feine Temperaturunterschiede auflösen kann, anzuwenden. In einem weiteren Schritt könnte man die bei dieser Diplomarbeit gewonnenen Messergebnisse mit einer erneuten Simulation validieren. Dabei sollten die Vorgänge in der Grenzschicht mit einem geeigneten Transitionsmodell abgebildet werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Unterschied zwischen laminarem und turbulentem Geschwindigkeitsprofil [3]	5
2.2	Schematische Darstellung einer Grenzschichtströmung in der Nähe einer Ablösestelle [2]	6
2.3	Schichten der turbulenten Grenzschichtströmung [5]	8
2.4	Geschwindigkeitsverteilung in einem Rohr: (a) turbulent, (b) laminar mit gleichem Volumenstrom wie a und (c) laminar mit gleichem Druckgradient wie a; [1]	9
2.5	Stadien der natürlichen Transition an der ebenen Platte [1]	11
2.6	Nachlaufdüsen in einer Turbinenstufe [6]	12
2.7	Nachlaufdüsen in einer Verdichterstufe [6]	13
2.8	Experimenteller Beweis der Relaminisierung [7]	13
2.9	Verlauf des Reibkoeffizienten und der Geschwindigkeit bei der Relaminisierung, ausgelöst durch Dissipation in einem Diffusor [7]	15
2.10	Schlierenfotografie: Prandtl-Meyer-Fächer bei Umströmung einer konvexen Ecke mit Überschallgeschwindigkeit [7]	18
2.11	Prinzipskizze: Prandtl-Meyer-Fächer bei Umströmung einer konvexen Ecke mit Überschallgeschwindigkeit [7]	18
2.12	Geschwindigkeitsprofil vor und nach der Beschleunigungsphase [7]	19
2.13	Bereiche der Relaminisierung nach K. R. Sreenivasan [9]	21
3.1	AIDA Testturbine mit Hochdruckstator-Stufe	23
3.2	Rechenetz einer Düse	24
3.3	Verlauf des Beschleunigungsparameter auf der Druckseite des Stators der AIDA-Konfiguration	25
3.4	Verlauf des Drucks auf der Druckseite des Stators der AIDA-Konfiguration	26
3.5	Verlauf der Geschwindigkeit in der Druckseite des Stators der AIDA-Konfiguration	27
3.6	Rechenetz einer Düse mit ebener Platte	28
3.7	Plötzliche Querschnittsverengung führt zu einer Ablösung an der scharfen konvexen Kante. [14]	28
3.8	Druckverteilung in einer Düse	29
3.9	Verzerrtes Rechenetz	31
3.10	Rechenetz mit einem zusätzlichen Gitter-Block in Wandnähe	31
3.11	Düse mit Bezeichnung der Flächen	33
3.12	Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Erhöhung der Steigung von D_1 auf D_5	35

3.13	Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Erhöhung der Steigung von D_58 auf D_57 . . .	36
3.14	Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Aufweitung des Einlasses von D_1 auf D_4 . . .	37
3.15	Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei einer Verengung des Auslass von D_4 auf D_23 . . .	38
3.16	Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks bei Konstruktion einer Laval Düse von D_76 auf D_74 .	39
3.17	Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks beim Nachobensetzen der Kontur von D_1 auf D_15 . . .	40
3.18	Veränderung des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks beim Skalieren der Geometrie von D_5 auf D_37	41
3.19	Unterschied des Beschleunigungsparameters, der Geschwindigkeit und des Drucks beim einer „konventionellen“ Düse D_67 und einer Düse mit ebener Platte D_68 mit gleichem Flächenverhältnis	42
3.20	Rechenetz der Düse D_76	43
3.21	Abhängigkeit der Simulationsergebnisse für die Düse D_76 vom totalen Eintrittsdruck	44
3.22	Die Reynoldszahl Re_x abhängig vom Totaldruck im Einlass	45
3.23	Vergleich der Ergebnisse einer zweidimensionalen mit einer dreidimensionalen Simulation	46
3.24	Vergleich der Simulationsergebnisse von LINARS mit Ansys CFX . . .	47
4.1	Schaltplan der Verdichteranlage des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik	49
4.2	Fahrweise FW1	49
4.3	Transsonischer Prüfstand mit Versuchseinsatz	50
4.4	Versuchseinsatz	51
4.5	Maße der Einlaufplatte und der ebenen Platte	52
4.6	Foto - Einlaufplatte mit Totaldruckmessbaum und Stolperdraht . . .	53
4.7	Foto - Ebene Platte mit den Druckmessbohrungen in der Mitte und zwei Laserstrahlen; aufgenommen während der Laservibrometermessung	54
4.8	Foto - Obere Kontur und ebene Platte mit Druckmessrohren	55
4.9	Verschiedene Positionen des Stolperdrahts	56
5.1	Schnitt durch den Versuchseinsatz mit Benennung der Druckessbohrungen von ebener Platte und oberer Kontur	58
5.2	Brechung eines Lichtsstrahl durch Dichtegradienten [15]	59
5.3	Schematischer Versuchsaufbau für die Schlierenvisualisierung	60
5.4	Foto - Versuchsaufbau für die Schlierenvisualisierung	61
5.5	Funktionsprinzip eines Laservibrometers [17]	63
5.6	Schematischer Versuchsaufbau für die Laservibrometermessung	64
5.7	Foto - Versuchsaufbau für die Laservibrometermessung	65
6.1	Messergebnisse des Totaldruckbaums	68
6.2	Ergebnisse der statischen Druckmessung an der ebenen Platte	69

6.3	Vergleich der statischen Druckmessung an der ebenen Platte mit den Simulationsergebnissen	70
6.4	Erfasste Bereiche bei der Schlierenvisualisierung	71
6.5	Schlierenvisualisierung - Versuchseinsatz vor und nach dem Schließen des Grenzschicht-Abtrennschlitzes der oberen Kontur	72
6.6	Schlierenvisualisierung des Versuchseinsatzes mit und ohne Durchfluss	72
6.7	Simulationsergebnis des Dichtegradienten der Düse D_76	73
6.8	Abstand vom Koordinatenursprung des fixen und des abfahrenden Laservibrometers	74
6.9	Amplitudenspektrum der 4. Messung - Fixes Vibrometer	76
6.10	Amplitudenspektrum der 4. Messung - Fahrendes Vibrometer	77
6.11	Amplitudenspektrum der 4. Messung - Fahrendes Vibrometer mit markiertem Anstieg der Amplituden	78
6.12	Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 80mm	79
6.13	Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 160mm	79
6.14	Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 172mm	79
6.15	Zeitsignal der 4. Messung bei Messposition 188mm	80
6.16	Amplitudenspektrum der 5. Messung - Fixes Vibrometer	81
6.17	Amplitudenspektrum der 5. Messung - Fahrendes Vibrometer	82
6.18	Amplitudenspektrum der 5. Messung - Fahrendes Vibrometer mit eingezeichneten Bereichen	83
6.19	Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 35mm	83
6.20	Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 100mm	84
6.21	Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 185mm	84
6.22	Zeitsignal der 5. Messung bei Messposition 195mm	84
6.23	Abnahme der Grenzschichtdicke und der mit dem Vibrometer gemessenen Amplituden	86
6.24	Verlauf des Beschleunigungsparameters über die Lauflänge der Laservibrometer-Koordinaten	86

Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzschichtdicke δ und Dicke der viskosen Unterschicht δ_v [1]	4
2.2	Effekt des Beschleunigungsparameters auf die Grenzschicht[13]	22
3.1	Randbedingungen der Simulation	33
4.1	Technische Kenndaten der einzelnen Verdichter	48
4.2	Positionen des Stolperdrahts bei verschiedenen Messungen	56
5.1	Verwendete Laservibrometer und Controller-Einstellungen	64
6.1	Versuchsbedingungen der 1. Messung	66
6.2	Versuchsbedingungen der 2. Messung	66
6.3	Versuchsbedingungen der 3. Messung	67
6.4	Versuchsbedingungen der 4. Messung	67
6.5	Versuchsbedingungen der 5. Messung	67
A.1	Übersicht der Simulationsergebnisse	98
A.2	Übersicht der Druckmessergebnisse - ebene Platte	101
A.3	Übersicht der Druckmessergebnisse - Totaldruckmessbaum	103
A.4	Übersicht der Druckmessergebnisse - obere Kontur	103
A.5	Koordinaten der Laservibrometer-Messungen 2 und 3	104
A.6	Koordinaten der Laservibrometer-Messungen 4 und 5	105

Nomenklatur

	Lateinische Symbole	
c_f	Reibungswiderstand	
U_∞	Freistromgeschwindigkeit	m/s
A	Fläche	m^2
a	Schallgeschwindigkeit	m/s
G	Gladstone-Dale Konstante	m^3/kg
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
H	Formparameter	
I	Intensität	W/m^2
K	Beschleunigungsparameter	
k	Kalibrations-Faktor des Laservibrometers	m/s/V
l	Länge	m
Ma	Machzahl	
n	Brechungsindex	
p	Druck	Pa
R	Spezifische Gaskonstante	$J/kg \cdot K$
Re	Reynolds-Zahl	
Ri	Richardson-Zahl	
s	Sehnenlänge	m
T	Temperatur	K
t	Zeit	s

U	Spannung des Messignals	V
u	Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung	m/s

Abkürzungen

AIDA	Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics for Competitive and Environmentally Friendly Jet Engines
ITTM	Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik

Griechische Symbole

$\Delta\varphi$	Phasendifferenz	°
δ	Grenzschichtdicke	m
δ_1	Verdrängungsdicke	m
δ_2	Impulsverlustdicke	m
δ_v	Dicke der viskosen Unterschicht	m
η	Dynamische Viskosität	N/m^2
κ	Isentropenexponent	
λ	Wellenlänge	nm
ν	Kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
τ	Schubspannung	N/m^2
ε	Winkeländerung eines Lichtstrahls durch die Brechung	°
ζ	Weg durch das Testvolumen	m

Indizes

∞	Außenströmung
ind	Indifferenz
krit	kritisch

stat statisch

tot total

w Wand

Literaturverzeichnis

- [1] Herman Schlichting und Klaus Gersten. *Grenzschicht-Theorie*. Springer, 2005.
- [2] Dominik Surek und Silke Stempin. *Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium*. Teubner, 2007.
- [3] Herbert Oertel jr. Martin Bohle und Ulrich Dohrmann. *Strömungsmechanik Grundlagen, Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele*. Vieweg, 2006.
- [4] Wolf Heinrich Hucho und Seyed Rafeeg Ahmed. *Aerodynamik des Automobils*. Vieweg, 2005.
- [5] Günter Brenn und Walter Meile. *Strömungslehre und Wärmeübertragung I Graz*. Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, Technische Universität Graz, Vorlesungsskriptum, 2006.
- [6] Robert Edward Mayle. The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines.
- [7] R. Narasimha and K. R. Sreenivasan. Relaminarization of fluid flows. *Advances in Applied Mechanics*, Vol.19:221–309, 1979.
- [8] Detlef Kamke und Wilhelm Walcher. *Physik für Mediziner*. Teubner, 1994.
- [9] K. R. Sreenivasan. Laminarescent, relaminarizing and retransitional flows. *Acta Mech.*, Vol.44:1–48, 1982.
- [10] Rune Brandt. *Relaminarisation of Turbulent Boundary Layers*. PhD thesis, University of Cambridge, Cambridge, September 1993.
- [11] Masashi Ichimiya Ikuo Nakamura and Shintaro Yamashita. Properties of a relaminarizing turbulent boundary layer under a favorable pressure gradient. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.17:37–48, 1998.
- [12] R. Narasimha and K. R. Sreenivasan. Relaminarization in high accelerated turbulent boundary layers. *Journal Fluid Mechanics*, Vol.61:417–447, November 1973.
- [13] F. A. Schraub und S. J. Kline. A study of the structure of the turbulent boundary layer with and without longitudinal pressure gradients. *Thermosciences Divison Report*, MD-12, 1965.
- [14] Joseph H. Spurk und Nuri Aksel. *Strömungslehre*. Springer, 2006.

-
- [15] Martin Heibel. Untersuchung von flammen und flammeninstabilitäten mittels optischer messtechnik. Master's thesis, Technische Universität Graz, Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, Graz, Österreich, März 2010.
- [16] Bernd Hampel. *Ortsaufgelöste laseroptische Messungen von Dichte- fluktuationen in turbinenrelevanten Gasströmungen*. PhD thesis, Technische Universität Graz, Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, Graz, Österreich, 2005.
- [17] J. Woisetschläger N. Mayrhofer B. Hampel H. Lang and W. Sanz. Laser-optical investigation of turbine wake flow. *Experiments in Fluids*, 34 (2003):371–378, Januar 2003.

Anhang A

Anhang

A.1 Übersicht der Simulationsergebnisse

Tabelle A.1: Übersicht der Simulationsergebnisse

Benennung	$P_{tot}, \text{Eintritt}$ in bar	$P_{stat}, \text{Austritt}$ in bar	U_{Eintritt} in m/s	K_{max}	Datei Nr.
D_1	2,8	0,89	56,29	1,71E-06	3
D_2	2,8	0,89	55,57	3,37E-06	3
D_3	2,8	0,89	116,00	1,07E-06	3
D_4	2,8	0,89	27,80	2,58E-06	3
D_5	2,8	0,89	55,48	2,61E-06	3
D_6	2,8	0,89	56,09	2,65E-06	3
D_6	2,3	0,89	56,10	3,23E-06	4
D_7	2,8	0,89	56,09	3,97E-06	4
D_7	2,2	0,89	56,21	3,97E-06	4
D_9	2,8	0,89	28,20	3,23E-06	3
D_10	2,8	0,89	13,96	zerklüftet	3
D_11	2,8	0,89	27,29	3,32E-06	4
D_11	2,2	0,89	0,25	zerklüftet	3
D_12	2,8	0,89	28,85	3,26E-06	4
D_13	2,8	0,89	56,80	2,62E-06	4
D_14	2,8	0,89	55,58	1,60E-06	4
D_14	2,2	0,89	55,58	1,60E-06	4
D_15	2,8	0,89	145,77	7,74E-07	1
D_16	2,8	0,89	140,74	4,55E-07	1
D_17	2,8	0,89	44,70	7,14E-07	2
D_18	2,8	0,89	42,87	1,27E-06	2
D_19	2,8	0,89	51,22	2,00E-06	1
D_20	2,8	0,89	56,36	5,40E-07	1

Benennung	$P_{tot}, \text{Eintritt}$ in bar	$P_{stat}, \text{Austritt}$ in bar	U_{Eintritt} in m/s	K_{max}	Datei Nr.
D_21	2,8	0,89	53,34	7,55E-07	1
D_22	2,8	0,89	51,51	1,60E-06	1
D_23	2,8	0,89	57,42	1,22E-06	3
D_24	2,8	0,89	43,25	1,93E-06	3
D_25	2,8	0,89	55,26	2,22E-06	1
D_26	2,8	0,89	79,36	1,62E-06	1
D_27	2,8	0,89	45,67	1,47E-06	1
D_28	2,8	0,89	57,18	1,33E-06	3
D_29	2,8	0,89	28,18	2,12E-06	4
D_30	2,8	0,89	26,74	1,72E-06	4
D_31	2,8	0,89	57,92	1,32E-06	1
D_32	2,8	0,89	58,06	1,67E-06	1
D_33	2,8	0,89	57,27	1,34E-06	1
D_34	2,8	0,89	36,70	1,00E-06	3
D_35	2,8	0,89	45,49	1,26E-06	4
D_35	2,0	0,89	45,49	1,76E-06	4
D_36	2,8	0,89	56,09	1,27E-06	1
D_37	2,8	0,89	57,59	6,97E-07	1
D_38	2,8	0,89	57,39	6,63E-07	1
D_39	2,8	0,89	59,12	5,12E-07	2
D_40	2,8	0,89	56,48	5,63E-07	2
D_41	2,8	0,89	56,98	4,59E-07	2
D_42	2,8	0,89	46,88	1,13E-06	2
D_43	2,8	0,89	67,56	5,77E-07	2
D_44	2,8	0,89	38,27	1,00E-06	2
D_45	2,8	0,89	43,49	1,00E-06	2
D_46	2,8	0,89	25,37	2,02E-06	2
D_47	2,8	0,89	31,23	9,01E-07	2
D_47	2,5	0,89	31,51	zerklüftet	2
D_48	2,8	0,89	31,89	1,01E-06	3
D_48	1,6	0,89	31,72	1,78E-06	8
D_49	2,8	0,89	50,73	8,00E-07	5
D_50	2,8	0,89	60,05	8,00E-07	5
D_51	2,8	0,89	48,96	6,89E-07	5
D_51	2	0,89	48,93	9,68E-07	5
D_52	2	0,89	49,48	9,22E-07	5
D_53	2,8	0,89	49,48	6,56E-06	5
D_54	2,8	0,89	49,36	3,13E-06	5

Benennung	$P_{tot}, \text{Eintritt}$ in bar	$P_{stat}, \text{Austritt}$ in bar	U_{Eintritt} in m/s	K_{max}	Datei Nr.
D_55	2,8	0,89	48,97	2,25E-06	5
D_56	2,8	0,89	46,71	8,28E-06	5
D_57	2,8	0,89	48,61	7,25E-06	5
D_58	2,8	0,89	48,72	5,18E-06	5
D_59	2,8	0,89	48,83	4,27E-06	6
D_60	2,8	0,89	48,73	4,20E-06	6
D_61	2,8	0,89	48,82	3,85E-06	6
D_62	2,8	0,89	49,72	4,05E-06	6
D_63	2,8	0,89	48,05	9,13E-06	6
D_64	2,8	0,89	48,75	6,33E-06	6
D_65	2,8	0,89	49,18	6,35E-06	6
D_66	2,8	0,89	39,27	3,71E-06	6
D_67	2,8	0,89	49,01	1,21E-05	7
D_68	2,8	0,89	48,29	6,55E-07	7
D_69	2,8	0,89	44,39	1,48E-06	7
D_70	2,8	0,89	36,18	1,55E-06	7
D_71	2,8	0,89	9,88	3,97E-06	7
D_72	2,8	0,89	19,18	2,17E-06	7
D_73	2,8	0,89	48,98	5,31E-06	7
D_74	2,8	0,89	9,86	3,98E-06	7
D_75	2,8	0,89	9,91	3,98E-06	7
D_75	1,6	0,89	8,99	7,51E-06	7
D_76	2,8	0,89	9,06	4,29E-06	7
D_77	2,8	0,89	49,13	5,62E-06	7

A.2 Ergebnisse der Druckmessung

Tabelle A.2: Übersicht der Druckmessergebnisse - ebene Platte

Position	x in m	p in bar				
		Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5
P_1	-0,095	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_2	-0,089	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_3	-0,083	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_4	-0,077	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_5	-0,071	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_6	-0,065	1,240	1,323	1,263	1,291	1,295
P_7	-0,059	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_8	-0,053	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_9	-0,047	1,248	1,324	1,263	0,973	0,975
P_10	-0,041	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_11	-0,035	1,248	1,324	1,263	1,275	0,974
P_12	-0,029	1,247	1,324	1,263	0,975	1,289
P_13	-0,023	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_14	-0,017	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_15	-0,011	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_16	-0,005	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_17	-0,002	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
P_18	0,001	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_19	0,004	1,248	1,321	1,260	1,289	1,294
P_20	0,007	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_21	0,010	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_22	0,013	1,248	1,323	1,262	1,291	1,295
P_23	0,016	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_24	0,019	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_25	0,022	1,248	1,324	1,262	1,291	1,295
P_26	0,025	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_27	0,028	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_28	0,031	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
P_29	0,034	1,248	1,323	1,262	1,291	1,295
P_30	0,037	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295

Position	x in m	p in bar				
		Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5
P_31	0,040	1,248	1,324	1,262	1,291	1,295
P_32	0,043	1,247	1,323	1,262	1,291	1,294
P_33	0,046	1,248	1,323	1,262	1,291	1,295
P_34	0,049	1,248	1,323	1,262	1,291	1,294
P_35	0,052	1,247	1,323	1,262	1,291	1,294
P_36	0,055	1,248	1,323	1,262	1,291	1,294
P_37	0,058	1,248	1,323	1,262	1,291	1,294
P_38	0,061	1,248	1,323	1,262	1,291	1,294
P_39	0,064	1,247	1,323	1,262	1,291	1,294
P_40	0,067	1,247	1,323	1,262	1,290	1,294
P_41	0,070	1,247	1,322	1,262	1,290	1,294
P_42	0,073	1,247	1,323	1,262	1,290	1,294
P_43	0,076	1,247	1,322	1,261	1,290	1,294
P_44	0,079	1,247	1,322	1,261	1,290	1,294
P_45	0,082	1,247	1,322	1,261	1,290	1,293
P_46	0,085	1,247	1,322	1,261	1,290	1,293
P_47	0,088	1,246	1,322	1,261	1,289	1,293
P_48	0,091	1,246	1,321	1,261	1,289	1,293
P_49	0,094	1,246	1,321	1,260	1,289	1,292
P_50	0,097	1,245	1,321	1,260	1,288	1,292
P_51	0,100	1,245	1,320	1,259	1,288	1,291
P_52	0,103	1,245	1,319	1,259	1,287	1,291
P_53	0,106	1,244	1,319	1,258	1,287	1,290
P_54	0,109	1,243	1,318	1,258	1,286	1,290
P_55	0,112	1,243	1,317	1,257	1,285	1,289
P_56	0,115	1,242	1,316	1,256	1,284	1,288
P_57	0,118	1,241	1,315	1,255	1,283	1,286
P_58	0,121	1,239	1,313	1,253	1,281	1,285
P_59	0,124	1,237	1,311	1,251	1,279	1,283
P_60	0,127	1,234	1,307	1,249	1,276	1,280
P_61	0,130	1,232	1,304	1,245	1,273	1,276
P_62	0,133	1,227	1,298	1,241	1,268	1,271
P_63	0,136	1,222	1,292	1,235	1,262	1,265
P_64	0,140	1,210	1,276	1,223	1,249	1,252
P_65	0,146	1,182	1,242	1,192	1,214	1,217
P_66	0,152	1,126	1,170	1,131	1,147	1,150
P_67	0,158	1,055	1,076	1,052	1,059	1,061
P_68	0,164	1,019	1,027	1,012	1,018	1,020
P_69	0,170	1,009	1,013	1,001	1,006	1,008

Tabelle A.3: Übersicht der Druckmessergebnisse - Totaldruckmessbaum

Position	x in m	p_{tot} in bar				
		Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5
D_1	0,001	1,064	0,988	1,227	1,292	1,296
D_2	0,002	1,248	1,324	1,263	1,292	1,296
D_3	0,003	1,248	1,324	1,263	1,292	1,176
D_4	0,004	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
D_5	0,005	1,149	1,322	1,195	1,209	1,214
D_6	0,008	1,249	1,325	1,264	1,293	1,296
D_7	0,013	1,249	1,324	1,225	1,012	1,296
D_8	0,018	1,249	1,325	1,264	1,292	1,296
D_9	0,028	1,249	1,325	1,264	1,292	1,296
D_10	0,040	1,249	1,325	1,263	1,292	1,296
D_11	0,060	1,249	1,325	1,263	1,292	1,296
D_12	0,080	1,249	1,324	1,263	1,292	1,295
D_13	0,100	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
D_14	0,120	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295

Tabelle A.4: Übersicht der Druckmessergebnisse - obere Kontur

Position	x in m	p_{tot} in bar				
		Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5
K_1	0,001	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
K_5	0,002	1,010	1,079	0,980	0,980	0,981
K_7	0,003	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
K_10	0,004	1,248	1,324	1,263	1,292	1,295
K_13	0,005	1,248	1,324	1,263	1,291	1,295
K_16	0,008	1,247	0,973	1,262	1,291	1,294
K_19	0,013	1,246	1,322	1,261	1,267	1,291

A.3 Koordinaten der Laservibrometer-Messungen

Der Abstand der Startposition des fahrenden Vibrometers zum Koordinatenursprung wird in Abbildung 6.8 dargestellt.

Tabelle A.5: Koordinaten der Laservibrometer-Messungen 2 und 3

x Koordinaten der Messpunkte vom Startpunkt
in mm

Messung 2		Messung 3	
0	100	0	100
5	105	5	105
10	110	10	110
15	115	15	115
20	120	20	120
25	125	25	125
30	130	30	130
35	135	35	135
40	140	40	140
45	145	45	145
50	150	50	150
55	155	55	155
60	160	60	160
65	165	65	165
70	170	70	170
75	175	75	175
80	180	80	180
85	185	85	185
90	190	90	190
95		95	

Tabelle A.6: Koordinaten der Laservibrometer-Messungen 4 und 5

x Koordinaten der Messpunkte vom Startpunkt in mm				
	Messung 4		Messung 5	
0	64	128	0	125
2	66	130	5	130
4	68	132	10	135
6	70	134	15	140
8	72	136	20	145
10	74	138	25	150
12	76	140	30	151
14	78	142	35	152
16	80	144	40	153
18	82	146	45	154
20	84	148	50	155
22	86	150	51	156
24	88	152	52	157
26	90	154	53	158
28	92	156	54	159
30	94	158	55	160
32	96	160	56	161
34	98	162	57	162
36	100	164	58	163
38	102	166	59	164
40	104	168	60	165
42	106	170	65	166
44	108	172	70	167
46	110	174	75	168
48	112	176	80	169
50	114	178	85	170
52	116	180	90	175
54	118	182	95	180
56	120	184	100	185
58	122	186	105	190
60	124	188	110	195
62	126	190	115	200
			120	205