



Institut für Thermische Turbomaschinen und  
Maschinendynamik



**Aufbau und Inbetriebnahme einer Ringgitterkaskade  
mit Nachlaufgenerator  
zur aerodynamischen Untersuchung von Turbinen-  
Zwischen-Diffusoren unter Einfluss von  
Wirbelgeneratoren**

Michael Moschik

Diplomarbeit

Technische Universität Graz

Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik  
Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Emil Göttlich

Graz, 16. Mai 2012

# ***EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG***

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

Graz, am 16. Mai 2012

.....  
Michael Moschik

# *DANKSAGUNG*

Besonderer Dank gebührt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. techn. Emil Göttlich, der mich stets geduldig betreute sowie immer für mich Zeit fand. Auch hat er mich über den Inhalt diese Diplomarbeit hinaus stets über interessante Entwicklungen im Feld der thermischen Turbomaschinen unterrichtet.

Außerdem gilt mein Dank den beiden Herren Dott. Mag. Rosario Spataro sowie Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Marn, die mir nächtelang bei den Versuchsfahrten zur Seite standen.

Bei Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir möchte ich mich für die Gelegenheit bedanken diese Diplomarbeit an seinem Institut verfassen zu dürfen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und mich während dieser Zeit unterstützten. Ebenso gilt mein Dank meinem Bruder für die motivierende Unterstützung während meines gesamten Studiums sowie für die Hilfe bei den graphischen Darstellungen in dieser Arbeit.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin Kathrin für ihre Unterstützung und den Rückhalt während meines gesamten Studiums, sowie die Geduld, wenn das Lernen an den Wochenenden im Vordergrund stand, bedanken.

# ***KURZFASSUNG***

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist der Aufbau und die Erstinbetriebnahme eines neuartigen Prüfstandes zur aerodynamischen Untersuchung von Turbinen-Zwischen-Diffusoren am Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der technischen Universität Graz.

Dieser Prüfstand, auch Ringgitterkaskade genannt, teilt die Strömung auf einen Ringquerschnitt auf und schafft somit die Zuströmung zu Turbinen-Zwischen-Diffusoren, dem Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Durch rotierende zylinderförmige Stäbchen im Zuströmquerschnitt werden die Auswirkungen von Nachläufen auf den Zwischendiffuser und der darin eingesetzten passiven Strömungsbeeinflussung simuliert.

Im Zuge der Erstinbetriebnahme wird ein aggressiver, ablösender Übergangskanal mit und ohne passive Strömungsbeeinflussung durch Wirbelgeneratoren, mit Hilfe von Ölanstrichen sowie statischen Wanddruckbohrungen untersucht. Als Ergebnis zeigen sich ein voll funktionsfähiger Prüfstand sowie die Untersuchung des Wanddruckverlaufs bei zwei Betriebszuständen. Der Einfluss der Wirbelgeneratoren ist im Ölanstrich ersichtlich.

# ***ABSTRACT***

This thesis deals with the construction and the initial commissioning of a new test facility for aerodynamic research in an intermediate turbine duct at the Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics.

This test facility, also called annular cascade, distributes the flow to a ring-cross-section corresponding with the in-flow to intermediate turbine ducts, the topic of this thesis. Through rotating cylindrical rods in this inlet section the effect of wakes on the intermediate duct and applied passive flow control can be simulated.

In the course of the initial commissioning an aggressive separated intermediate turbine duct is examined with and without passive flow control through vortex generators with the support of oil flow visualization as well as static wall pressure taps. The results show the test facility is fully functioning and the surface pressure distribution at two different operating points. The influence of the vortex generators can be seen in the results of the oil flow visualization.



# ***INHALTSVERZEICHNIS***

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Aufbau und Funktion moderner Strahltriebwerke	2
1.3	Projektbeschreibung	4
1.4	Aufgabenstellung	9
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>10</b>
2.1	Grenzschichttheorie	10
2.1.1	Grenzschichtdicke	11
2.1.2	Verdrängungsdicke	11
2.1.3	Impulsverlustdicke	12
2.1.4	Form Faktor ( <i>shape Factor</i> )	12
2.1.5	Laminare und Turbulente Grenzschicht	12
2.2	Ablöseströmung	14
2.3	Wirbelgeneratoren	16
2.4	Diffusoren	19
2.5	Stäbchennachlauf	20
2.6	S-Förmiger Übergangskanal	25
<b>3</b>	<b>Versuchseinrichtungen</b>	<b>29</b>
3.1	Verdichteranlage	29
3.2	Ringgitterkaskade	30
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>33</b>
4.1	Vorbereitungen für den Aufbau	34
4.1.1	Demontage der vorhandenen Drehvorrichtung	34
4.1.2	Lackieren	37
4.1.3	Aufstellen des Diffusors und Einbau des Motor	37
4.1.4	Aufbau des Krans im Turbolabor	38

4.2	Installation der Messtechnik .....	41
4.2.1	Messinstallationen am Einlauf .....	42
4.2.2	Allgemeines zur Druckmessinstallation in der Ringgitterkaskade.....	45
4.2.3	Druckmessinstallationen an der Innenkontur des Zwischendiffusors .....	45
4.2.4	Herstellung und Installation des Kameraträgers .....	49
4.2.5	Druckmessinstallationen an der Außenkontur des Zwischendiffusors .....	54
4.3	Zusammenbau der Ringgitterkaskade .....	55
4.3.1	Aufbau der Innenkontur des Zwischendiffusors .....	56
4.3.2	Aufbau der Drehvorrichtung .....	61
4.3.3	Einbau des Laufrades .....	67
4.3.4	Aufbau des Einlaufes .....	72
4.3.5	Vorbereitungen für den Transport in das Turbolabor .....	79
4.4	Einbau in die bestehende Windkanalleitung.....	81
4.4.1	Demontage und Montage des vorderen Einlaufes.....	84
4.4.2	Demontage und Montage der Außenkontur des Zwischendiffusors .....	86
4.4.3	Anschluss des Elektromotors .....	88
4.5	Abschliessende Arbeiten.....	88
4.5.1	Zahnradbefestigung.....	88
4.5.2	Schlauchmanagement.....	89
4.5.3	Wuchten des Laufrades .....	91
<b>5</b>	<b>Messtechnik .....</b>	<b>92</b>
5.1	Druckmessung .....	92
5.2	Sondenmessung .....	96
5.2.1	Ermittlung der Messwerte .....	97
5.2.2	Einflüsse auf die Messung mit Fünf-Loch-Sonden.....	98
5.3	Ölanstrich.....	99
<b>6</b>	<b>Messung und Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>100</b>
6.1	Betriebspunkt .....	101
6.1.1	Betriebspunkt ohne Stäbchen.....	103
6.1.2	Betriebspunkt mit Stäbchen .....	105
6.2	Umfangssymmetrie .....	107
6.3	Diskussion der Ergebnisse für unterschiedliche Konfigurationen .....	109
6.3.1	Messung ohne Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren .....	110
6.3.2	Messung ohne Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren.....	112

6.3.3	Messung mit stehendem Laufrad und ohne Wirbelgeneratoren.....	115
6.3.4	Messung mit stehendem Laufrad und mit Wirbelgeneratoren .....	117
6.3.5	Messung mit drehendem Laufrad und ohne Wirbelgeneratoren .....	120
6.3.6	Messung mit drehendem Laufrad und mit Wirbelgeneratoren .....	121
6.4	Vergleich zwischen den Konfigurationen.....	122
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>126</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>127</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>130</b>
<b>10</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>136</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>I</b>
A.1	Druckmessbohrungen im Übergangskanal C5.....	I
A.2	Anschlussplan der Druckschläuche.....	III
A.3	Weitere Auswertung der Fünf-Loch-Sondenmessung .....	IV
A.4	Inbetriebnahme und Datenblatt des Elektromotors .....	VII
A.5	Transsonischer 2D – Windkanal .....	IX
A.6	Transsonische Versuchsturbine.....	X

# NOMENKLATUR

## EINHEITEN

Druck	[Pa]	Pascal, [Pa] = [N/m <sup>2</sup> ]
	[bar]	100000 [Pa] = 1 [bar]
	[mbar]	Millibar, 100 [Pa] = 1 [mbar]
elektrische Spannung	[V]	Volt
elektrischer Strom	[A]	Ampere
Energie	[J]	Joule, [J] = [Nm] = [kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
	[Nm]	Newton Meter, in dieser Arbeit Anzugsdrehmoment
Frequenz	[Hz]	Herz, 1 [Hz] = [1/s]
Gewicht	[kg]	Kilogramm
Kraft	[N]	Newton
Länge	[m]	Meter
	[mm]	Millimeter
Leistung	[W]	Watt, [J/s] = [Nm/s]
Temperatur	[K]	Kelvin
	[°C]	Grad Celsius
Zeit	[s]	Sekunde
	[ms]	Millisekunden

## LATEINISCHE FORMELZEICHEN

A <sub>1</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnitt an der Stelle 1
A <sub>2</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnitt an der Stelle 2
c	[m/s]	Geschwindigkeit
C <sub>p</sub>	[-]	Druckbeiwert
C <sub>p</sub>	[-]	Druckrückgewinnungsfaktor
C <sub>p</sub> *	[-]	maximaler Druckrückgewinn bei vorgeschriebenem dimensionslosem Verhältnis L/h <sub>1</sub>
C <sub>p</sub> **	[-]	maximaler Druckrückgewinn bei vorgeschriebenem dimensionslosem Flächenverhältnis (A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub> )
D,d	[m]	Durchmesser
h	[kJ/kg]	(spezifische) Enthalpie

h	[m]	Höhe
H <sub>12</sub>	[-]	Form Faktor
k	[-]	Parameter
L, l	[m]	Länge
M	[-]	Machzahl
n	[1/s]	Drehzahl, Frequenz
	[U/min]	Drehzahl, [1/s]·60 = [U/min]
p	[Pa]	Druck
r	[m]	Radius
R	[J/kgK]	(spezifische) Gaskonstante; für Luft R=287,2 [J/kgK]
r	[-]	Recovery Faktor
Re	[-]	Reynoldszahl
s	[m]	Weg bzw. Koordinate längs der Strömungsrichtung
S	[-]	Strouhal Zahl
T	[K]	Temperatur
u	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit
w	[m/s]	Relative Geschwindigkeit im Geschwindigkeitsdreieck
x	[m]	Weg bzw. Koordinate längs der Strömungsrichtung
x/L, x/l	[-]	relative Kanallänge

### GRIECHISCHE SYMBOLE

$\alpha$	[°]	Winkel
$\beta$	[°]	Winkel
$\gamma$	[°]	Winkel
$\delta$	[m]	Grenzschichtdicke
$\Delta$ (delta)	[-]	Differenz von zweier Größen
$\delta_1$	[m]	Verdrängungsdicke
$\delta_2$	[m]	Impulsverlustdicke
$\kappa$ (kappa)	[-]	Isentropenexponent, für Luft 0°C und idealem Gaszustand $\kappa = 1,401$
$\lambda$ (lamda)	[m]	Abstand der Stäbchen
$\nu$ (Ny)	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\pi$	[-]	Pi – mathematische Konstante
$\rho$ (rho)	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\phi$ (Phi)	[-]	Durchflusszahl
$\psi$ (Psi)	[-]	Druckziffer

**INDIZES**

(n)	an der Stelle n
0, 1, 2, 3, ...	an der Stelle 0, 1, 2, 3, ...
$\infty$	in theoretisch unendlich großem Abstand von der Wand (Außenströmung)
ab	Abströmkomponente (z.B. Abströmgeschwindigkeit)
abs	Absolute Geschwindigkeit in einem Geschwindigkeitsdreieck
aus	am Austritt
ax	Axiale Komponente (z.B. axiale Zuströmgeschwindigkeit)
C	in der Messebene C
ein, in	am Eintritt
HP	Hochdruckturbine ( <i>high pressure turbine</i> )
krit (kr)	kritisch
l	laminare Strömung
loss	Verlust
LP	Niederdruckturbine ( <i>low pressure turbine</i> )
probe	Sonde
ref	Referenzebene
s, stat	statischer Druck
t	turbulente Strömung
t, tot	Totaldruck
zu	Zuströmkomponente (z.B. Zuströmgeschwindigkeit)

**ABKÜRZUNGEN**

2D	Zwei-Dimensional
AIDA	Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics
bzw.	beziehungsweise
C3, C4, C5	Übergangskanal (Zwischendiffuser) in der Konfiguration 3, 4, 5
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
HD, HP	Hochdruck (z.B. Hochdruckturbine, <i>high pressure turbine</i> )
M	Metrisches Gewinde
ND, LP	Niederdruck (z.B. Niederdruckturbine, <i>low pressure turbine</i> )
TU	Technische Universität
VG	Wirbelgenerator ( <i>vortex generator</i> )
WP	Wendepunkt
z.B.	zum Beispiel
GSZ	Grenzschichtzaun
A,B,C,...	Reihen der Wanddruckbohrungen an der Innenkontur des Zwischendiffusers
AA,AB,AC,..	Reihen der Wanddruckbohrungen an der Außenkontur des Zwischendiffusers

# ***1 EINLEITUNG***

Diese Diplomarbeit befasst sich mit einem neuartigen Prüfstand zur aerodynamischen Untersuchung von Turbinen-Zwischen-Diffusoren. Der diesen Prüfstand umschreibende Name „Ringgitterkaskade“ ergibt sich aus der Zuströmbedingung die dieser Prüfstand für die zu untersuchenden Zwischen-Diffusoren bereitstellt. Dies sind einerseits der **Ringquerschnitt**, auf welchen die Strömung durch den Prüfstand aufgeteilt wird und andererseits das **Stabgitter**, welches sich zur Simulation von Nachläufen rotatorisch in der Zuströmung bei einer definierten Drehzahl bewegt. **Kaskade** steht in diesem Zusammenhang für den aufgebauten Prüfstand.

Im ersten Kapitel wird auf den Begriff Turbinen-Zwischen-Diffusor eingegangen, sowie ein Überblick über die bereits vorangegangenen Untersuchungen, im Speziellen am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der Technischen Universität Graz, gegeben.

Nach einer Auseinandersetzung mit den in Turbinen-Zwischen-Diffusoren auftretenden strömungstechnischen Grundlagen wird auf den eigentlichen Kern der Arbeit, den Aufbau der Ringgitterkaskade eingegangen. Da dieser Teil als Montageanleitung für nachfolgende Projekte konzipiert ist, wird er entsprechend umfangreich ausgeführt.

Ein weiterer Teil dieser Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Erstinbetriebnahme des Prüfstandes sowie den Initialmessungen. Dazu werden nach Erläuterung der verwendeten Messtechnik im fünften Kapitel zwei für diese Arbeit verwendete Betriebspunkte definiert und die statischen Wanddruckbohrungen untersucht. Ebenso finden sich hier Bilder zu den applizierten Ölanstrichen die den Effekt von Wirbelgeneratoren deutlich sichtbar machen.

Den Abschluss bilden die Zusammenfassung sowie ein Ausblick für nachstehende Projekte.

## **1.1 MOTIVATION**

Der Flugverkehr ist einer der stärkst wachsenden Sektoren der Fortbewegung und an unserer modernen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Allein in der EU nimmt der Flugverkehr jährlich um etwa 4% zu, Tendenz weiter steigend. Beobachtet man den Zeitabschnitt von 1990 bis 2003 kann eine

Zunahme von 70% festgestellt werden.<sup>1</sup> Dieser enorme Anstieg im Flugverkehr ist natürlich mit einer drastisch steigenden Belastung der Umwelt durch den Ausstoß von Treibhausgasen und durch erhöhte Lärmbelastung vor allem in flughafennahen Bereichen verbunden.

Aus dem Traum vom Fliegen entnehme ich mein großes Interesse für Flugzeuge und deren Technik. Ich sehe in der Flugzeugindustrie noch ein hohes Entwicklungspotential hinsichtlich einer „sauberen“ Luftfahrt, was mich zum Verfassen dieser Arbeit bewegte. Besonders interessant in der Forschung von Strahltriebwerken finde ich die Kombination von verschiedensten modernen Werkstoffen, gepaart mit hohen Ansprüchen an die Strömungslehre und Thermodynamik bei einer gleichzeitigen Auseinandersetzung mit der Festigkeitslehre.

## 1.2 AUFBAU UND FUNKTION MODERNER STRAHLTRIEBWERKE

Moderne Triebwerke für die zivile Luftfahrt bestehen aus einem Fan (Bläser), einem Verdichter, der Brennkammer, einer Turbine und einer nachstehendem Düse.

Der Fan besitzt die Aufgabe den Luftmassenstrom aus der Umgebung anzusaugen. Mit einem Durchmesser von knapp drei Meter wie es beim Rolls Royce Triebwerk Trent 900 der Fall ist, werden beim Start rund 1245 kg/s Luft angesaugt.<sup>2</sup> Knapp hinter dem Fan wird der Luftmassenstrom auf zwei Kanäle aufgeteilt. Einerseits geht er in den Primärkreis bzw. in das Kerntriebwerk und andererseits in den Sekundärkreis bzw. auch Nebenstrom oder Bypass genannt, wo er am eigentlichen Kerntriebwerk vorbeigeleitet wird. Das Verhältnis von Sekundärluftmassenstrom zu Primärluftmassenstrom wird auch Nebenstrom-Verhältnis genannt und ist triebwerksspezifisch unterschiedlich. Da aufgrund des Nebenstroms die durchschnittliche Strahlgeschwindigkeit abnimmt, wird der Vortriebswirkungsgrad bei gleichzeitig sinkendem spezifischem Brennstoffverbrauch verbessert.<sup>3</sup>

Dies führt zu tendenziell immer höheren Nebenstrom-Verhältnissen, welche heutzutage bis zu 10 erreichen. Da mit dem steigenden Nebenstromverhältnis auch der Durchmesser des Fans steigt, muss hierfür eine im Vergleich geringere Drehzahl realisiert werden. Da sich die Drehzahl des Hochdruckverdichters nicht verändert, kommt es zum Einsatz von Zwei- bzw. Drei-Wellen-Triebwerken oder zur Verwendung von Untersetzungsgetrieben.

Bei dem im folgenden Text als Beispiel herangezogenen Triebwerk aus Abbildung 1-1 handelt es sich um ein Zweiwellentriebwerk der Engine Alliance welches zum Antrieb des Airbus A380 verwendet wird.

---

<sup>1</sup> Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2007.

<sup>2</sup> Vgl. Bräunling 2009, S. 51.

<sup>3</sup> Vgl. Ebda., S. 39.



Der Primärluftmassenstrom gelangt nach dem Fan in den nachstehenden Verdichter, wo er zuerst durch den Niederdruckverdichter in 5 Stufen verdichtet wird. Anschließend wird die vorverdichtete Luft durch einen Übergangskanal in den Hochdruckverdichter geleitet, wo sie in weiteren 9 Stufen auf ein Verdichterdruckverhältnis (Druck nach dem Verdichter zu Druck vor dem Verdichter) von 36,1 gebracht wird.<sup>4</sup>

Damit das gesamte Triebwerk einen Vortrieb erzeugen kann, wird die vorverdichtete Luft durch die Brennkammer geführt, wo die Zufuhr an thermischer Energie in Form von Brennstoff erfolgt. Hierbei steigt die Temperatur des Gases auf eine typische Brennkammeraustrittstemperatur moderner Triebwerke von 1635K (1362°C).<sup>5</sup>

Nach der Brennkammer wird dem heißen Luftmassenstrom über die Hochdruckturbine jene Energie entzogen, welche für den Antrieb des stromaufwärtsliegenden Hochdruckverdichters erforderlich ist. Über einen weiteren sogenannten Turbinenübergangskanal (auch Turbinen-Zwischen-Diffusor genannt) kommt der Luftmassenstrom an der Niederdruckturbine an, wo ihm in weiterer Folge Energie zum Antrieb des Niederdruckverdichters und des Fans entzogen wird.

Die verbleibende Energie im Primärluftmassenstrom wird mittels einer Düse in kinetische Energie umgewandelt und neben dem Luftmassenstrom des Fans zum Vortrieb genutzt. Triebwerke wie das GP 7200 erzeugen so beim Start einen Schub von 311 kN (31 Tonnen).<sup>6</sup>

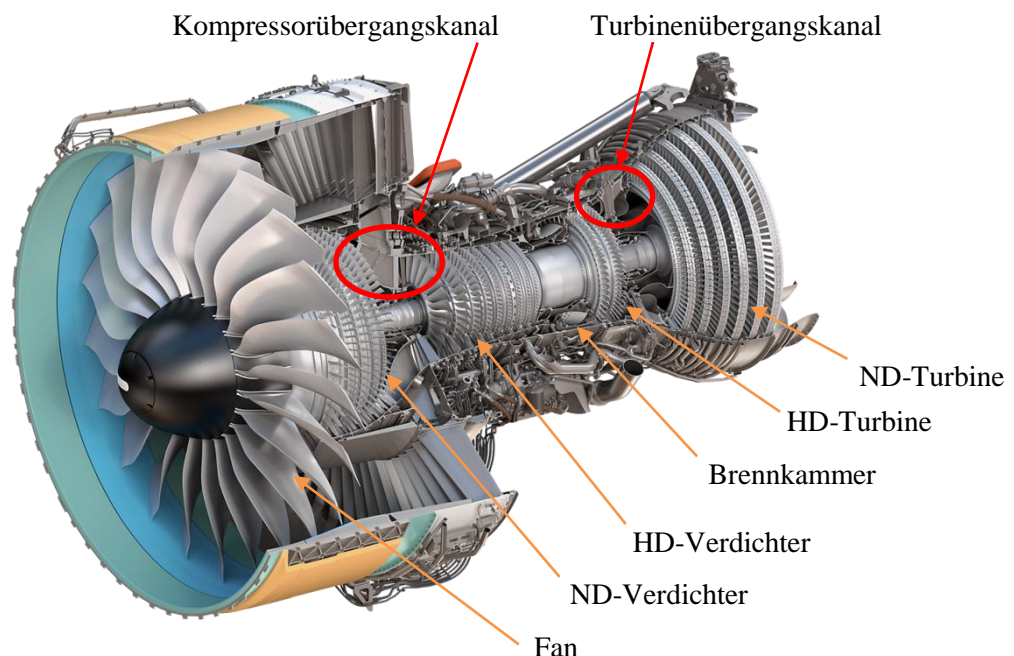


Abbildung 1-1: Fan-Triebwerk GP7200 von Engine Alliance  
[Engine Alliance 2012]

---

<sup>4</sup> Vgl. Pratt / Whitney 2012.

<sup>5</sup> Vgl. Bräunling 2009, S. 36.

<sup>6</sup> Vgl. Pratt / Whitney 2012.

### 1.3 PROJEKTDESCHEIBUNG

Um den Vortriebswirkungsgrad einer Gasturbine zu erhöhen und die Lärmemission zu senken, wurde bereits in den 1950ern nach einer Lösung gesucht. Damals wurde ein Fan mit einem Nebenstrom-Verhältnis von 0,4 entwickelt, dessen Vorteil unter anderem die Reduktion des Lärms darstellt. Durch den damaligen Nebenstrom konnte bei einem konstanten Schub der Lärm um den Faktor 5 gesenkt werden.<sup>7</sup>

Moderne Triebwerke wie das Rolls-Royce Trent 1000 besitzen ein Nebenstrom-Verhältnis von 10. Die Begrenzung für das Verhältnis nach oben hin ist die Balance zwischen einerseits der Lärmreduktion sowie dem Vortriebswirkungsgrad und andererseits den Nachteilen einer größer bauenden Turbine. Große Turbinen müssen vor allem beim Gewicht einbüßen, welches zur Erfordernis größerer Leistungen bei selbigem Schub führt.

Wie erwähnt erfordert ein großes Nebenstromverhältnis einen Fan mit einem großen Durchmesser. Würde der Fan mit gleichbleibender Drehzahl betrieben, folgern aufgrund der Zentrifugalkraft höhere Spannungen zwischen Schaufelblattfuß und Welle. Da die Werkstoffgrenze in diesem Bereich relativ schnell erreicht wird, kann durch ein Absenken der Drehzahl entgegengesteuert werden. Folglich käme es zu einer Veränderung in der Druckziffer der ND-Turbine. Da die Energieumsetzung in der Stufe gleichbleiben soll, resultiert aus unten stehender Formel (1.1) für die Druckziffer und (1.2) für die Umfangsgeschwindigkeit bei sinkender Drehzahl ein größerer Durchmesser für die ND – Turbine.

$$\psi = \frac{\Delta h}{\frac{u^2}{2}} \quad (1.1)$$

$$u = \pi * D * n \quad (1.2)$$

Dieser Sachverhalt kann nicht nur für einen großen Fandurchmesser, sondern auch für eine Gewichtsreduktion genutzt werden. Bei einem größeren Durchmesser der ND-Turbine und einer gleich belassenen Drehzahl steigt die Umfangsgeschwindigkeit. Dies führt zu einem höheren Druckgefälle an der Turbinenstufe, was wiederum bedeutet, dass weniger Turbinenstufen notwendig sind, um dem Fluid die Energie zu entziehen. Weniger Turbinenstufen bedeuten eine kostengünstigere Herstellung bei gleichzeitiger Realisierung einer leichteren und kürzer zu bauenden Turbine.

Diese beiden Sachverhalte lassen es als sinnvoll erscheinen einen größeren Durchmesser der ND-Turbine zu realisieren.

---

<sup>7</sup> Vgl. Gad-el-Hak 2000, S. 264.

Zur besseren Darstellung ist in Abbildung 1-2 ein Vergleich zwischen einem Nebenstrom-Verhältnis von 6 und 10 gegenübergestellt.

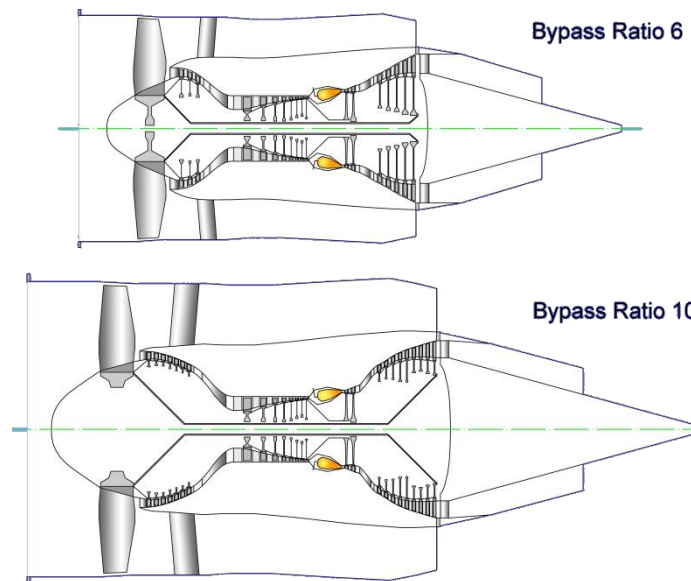


Abbildung 1-2: Vergleich zweier Turbofan-Triebwerke mit Nebenstrom-Verhältnis von 6 und 10  
[Kurzke 2009, S. 149]

Auffallend sind der deutlich größere Durchmesser, sowie die größere Anzahl an Turbinenstufen der ND-Turbine. Die erhöhte Anzahl lässt auf eine geringere Energieabnahme pro Stufe schließen. Dies bedeutet bei einer konstant gehaltenen Druckziffer, dass die Umfangsgeschwindigkeit kleiner ausfällt als jene der HD-Turbine ( $u_{LP} < u_{HP}$ ). Dies würde bei gleicher Axialgeschwindigkeit den Zuströmwinkel der ND-Turbine verändern, und somit eine geänderte Geometrie der ND-Turbine erfordern. Um die Veränderung der Schaufelgeometrie der ND-Turbine dennoch klein zu halten, also den Zuströmwinkel konstant zu belassen, wird die Axialgeschwindigkeit für die ND-Turbine niedriger gewählt ( $c_{ax,ND} < c_{ax,HD}$ ). Um diese niedrigere Axialgeschwindigkeit zu realisieren, besteht das Erfordernis der Ausbildung des Übergangskanals als Diffusor und die Namensgebung Zwischendiffusor, an welches das Projekt AIDA<sup>8</sup> (Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics) anknüpft.

### Projekt AIDA<sup>9</sup>

Wie der Name des Projekts AIDA (Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics) verrät, handelt es sich um die Erforschung „aggressiver“ und „super-aggressiver“ Übergangskanäle, welche eine deutliche Optimierung der ganzen Kompressor und Turbineneinheit erlauben sollen.

---

<sup>8</sup> Vgl. European Commission for Research and Innovation 2012.

<sup>9</sup> Vgl. Ebda.

Der folgende Teil wurde in Anlehnung an die Projektbeschreibung des EU-Projekts AIDA (Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics for Competitive and Environmentally Friendly JetEngines), Contract: AST3-CT-2003-502836, verfasst.

Die Übergangskanäle sind Teile des Flugtriebwerkrahmens, welche ein Gewicht von insgesamt 16 % des trockenen Triebwerksgewichtes ausmachen. Durch die Entwicklung verkürzter und gewichtsoptimierter Übergangskanäle kann so am gesamten Triebwerk eine Gewichtsreduktion von 1 bis 2 % erzielt werden. Gleichzeitig wird ein Grundstein für zukünftige geräuscharme „*ultra-high-bypass-ratio*“ Strahltriebwerke gelegt.

Die Ergebnisse dieses Projektes zielen langfristig darauf ab, Entwicklungskosten auf diesem Gebiet um 5 % und die Produkteinführungszeit um ca. 10 % zu kürzen.

Durch eine Gewichtsoptimierung und einer 1 %igen Wirkungsgradsteigerung der ND-Turbine soll umgerechnet auf den spezifischen Treibstoffverbrauch eine Reduktion von 1-2 % erreicht werden. Dies wäre nicht nur eine Steigerung der Umsatzrentabilität von Fluglinien, sondern bewirkt gleichzeitig eine Reduktion des CO<sub>2</sub> Ausstoßes.

Das Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der TU Graz führte in Zusammenhang mit dem AIDA Projekt die Untersuchung drei verschiedener Konfigurationen dieses Zwischendiffusors durch. Die unterschiedlichen Konfigurationen werden in der nachstehenden Abbildung 1-3 verdeutlicht.

Beim Übergangskanal C3 handelt es sich um eine Variante, bei welcher sich Stützschaufeln im Kanal befinden. Diese erfüllen die Funktion des folgenden Stators. Die Konfiguration C4 repräsentiert den „aggressiven“ Übergangskanal während die Konfiguration C5 den „super-aggressiven“ Übergangskanal darstellt. Die Variante C5 unterscheidet sich von der Variante C4 in einer 20 % kürzeren Bauform. Bei zwei verschiedenen Auslegungspunkten (*aero design points*) und zwei verschiedenen Rotorspalten wurden alle Übergangskanäle an der transsonischen Versuchsturbine des Instituts untersucht. Weiterführende Literatur hinsichtlich der transsonischen Versuchsturbine findet sich in Erhard J. (2002). Detaillierte Beschreibungen der Kanäle mit Untersuchungsergebnissen finden sich unter anderem in Göttlich E. et al. (2009).

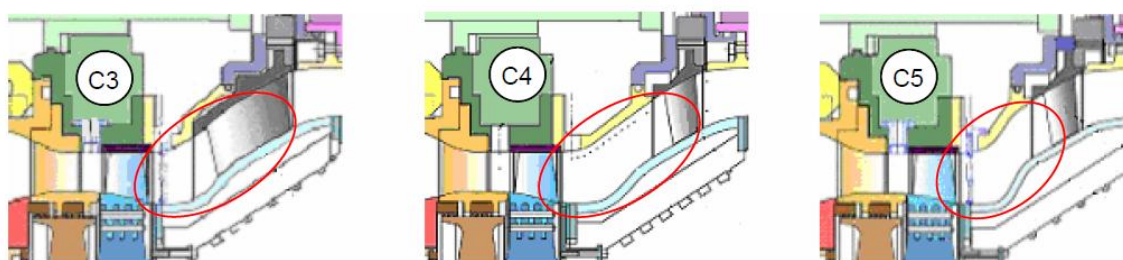


Abbildung 1-3: Ausschnitt aus Versuchsturbine mit den verschiedenen Übergangskanälen (rot umrandet)  
[Santner 2008, S. 4]

Der „super-aggressive“ Übergangskanal C5 ist aufgrund seiner Verkürzung so ausgelegt, dass die Strömung mit Gewissheit an der äußeren Wand ablöst. Damit ist er ein Test-Kanal für CFD – Analysen und Methoden der passiven Strömungsbeeinflussung wie zum Beispiel Wirbelgeneratoren.

Um vor der Vermessung dieses Übergangskanal die geometrischen Faktoren in Bezug auf deren Wirkung besser zu verstehen, wurde im Rahmen von C. Santner et. al. (2012) ein strömungsähnlicher 2D Kanal untersucht. In weiterer Folge wurde die Effektivität der sogenannten Niedrigprofil-Wirbelgeneratoren (*low-profile vortex generators*) zum Wiederanlegen der Strömung im C5 Übergangskanal untersucht. Um hier fundierte Erkenntnisse über deren Wirkung bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und ohne Strömungseffekten wie Nachläufe von Schaufeln oder Spaltwirbeln zu sammeln, wurden Niedrigprofil-Wirbelgeneratoren ebenso im 2D Kanal durch C. Santner (2008) erprobt. Die Conclusio war in Hinblick auf die Niedrigprofil-Wirbelgeneratoren, dass diese im 2D Kanal durchaus eine Verbesserung in der Ablösung hervorriefen. Des Weiteren konnte durch die Niedrigprofil-Wirbelgeneratoren das Wiederanlegen der Strömung strömungsaufwärts verschoben und die Höhe des Ablösegebiets verringert werden.

In der Versuchsturbine hingegen verschlechterten die Niedrigprofil-Wirbelgeneratoren die Ablösung an der äußeren Kanalwand aus derzeit ungeklärter Ursache. Vermutet wurden entweder die Interaktion mit Verdichtungsstößen an der Rotorschaukel oder die starke Winkelvariation welche durch die Nachlaufstraße der Turbinenstufe entstehen.<sup>10</sup>

Daraus leitet sich der Zweck des neuartigen Prüfstandes ab. Dieser ist neben der aerodynamischen Untersuchung von Übergangskanälen die Findung der Ursache für die unterschiedlichen Messergebnisse im 2D-Kanal und der transsonischen Versuchsturbine. Dazu kann eine Einordnung der Ringgitterkaskade gemäß Abbildung 1-4 (siehe nächste Seite) stattfinden.

---

<sup>10</sup> Vgl. Marn 2008, S. 206.

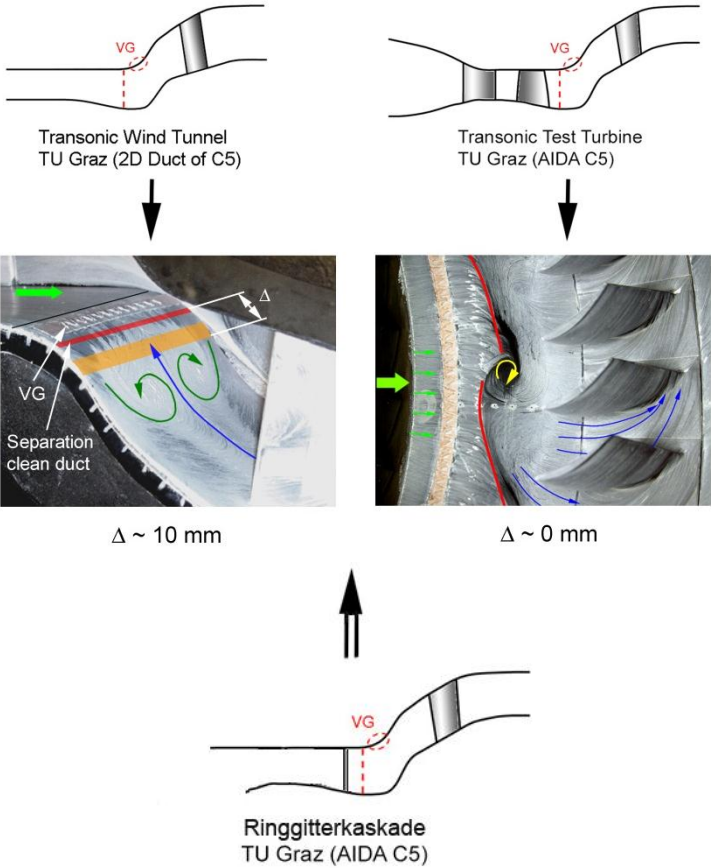


Abbildung 1-4: Wirbelgeneratoren im 2D Kanal (links oben), in der transsonischen Versuchsturbine (rechts oben) und in der Ringgitterkaskade mittig unten [Vgl. Göttlich 2011, S. 273]

## 1.4 AUFGABENSTELLUNG

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist das Bereitstellen eines neuartigen Prüfstandes zur aerodynamischen Untersuchung von Turbinen-Zwischen-Diffusoren. Dazu gehören im speziellen der Aufbau und die Erstinbetriebnahme der sogenannten Ringgitterkaskade, welche im Vorfeld durch Herrn Pan J. (2008) im Rahmen einer Diplomarbeit konzeptioniert und bis zur Fertigungsüberleitung gebracht wurde.

Der Aufbau beinhaltet den Zusammenbau und die zentrische Ausrichtung aller Komponenten, sowie den Einbau in die Windkanalleitung des Instituts für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik. Abschließend ist eine genaue Montageanleitung für nachfolgende Projekte zu verfassen.

Für die Initialmessungen mit dem gewünschten Übergangskanal C5 ist die fix zu verbauende Messtechnik anzuschließen, in Betrieb zu nehmen und die Software für die Messdatenauswertung bereitzustellen.

Die Erstinbetriebnahme der Ringgitterkaskade gliedert sich in drei Kernbereiche:

- Finden eines Betriebspunktes sowohl mit als auch ohne eingebauten Nachlaufgenerator. Hierbei soll der Betriebspunkt so gewählt werden, dass vergleichbare Messergebnisse mit den vorangegangenen Untersuchungen im 2D-Kanal sowie der transsonischen Versuchsturbine erhalten werden können. Dazu gehört das Vermessen des Mach-Profiles über die Kanalhöhe, sowie das Aufzeichnen der statischen Wanddruckbohrungen und deren Vergleich im Umfang.
- Zum Validieren des Effektes passiver Strömungsbeeinflussung durch Wirbelgeneratoren im Prüfstand sind Initialmessungen mit zwei unterschiedlichen Wirbelgeneratorpositionen durchzuführen. Deren Auswirkung ist mittels Ölanstrich an der Außenkontur des Übergangskanals darzustellen. Hierdurch sollen wenn möglich erste Charakteristiken im Vergleich zum 2D-Kanal und der transsonischen Versuchsturbine ausgemacht werden.
- Zur Darstellung der Strömungsbeeinflussung durch das Laufrad ist eine Initialmessung mit stehendem und drehendem Laufrad durchzuführen und der Einfluss im Ölanstrich und in den Wanddruckbohrungen aufzuzeigen.

## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Um den komplexen Vorgang der Durchströmung eines Übergangskanals besser zu verstehen, sollen im Folgenden die grundlegenden physikalischen Phänomene, die sich auf die Grenzschichttheorie, der Theorie über die Wirbelgeneratoren und Diffusoren im Allgemeinen beziehen, erklärt werden. Zusammenfassend soll das Zusammenwirken der Effekte in dem in dieser Arbeit zu untersuchenden Übergangskanal C5 erklärt werden.

### 2.1 GRENZSCHICHTTHEORIE

Gerne wird in der Strömungstechnik mit dem Idealfall der reibungsfreien Strömung gerechnet. Dies ist durchaus zulässig, solange man nicht in den wandnahen Bereich kommt, wo die Haftbedingung gilt. Diese besagt, dass die an der Wand angrenzende Fluidschicht aufgrund von Adhäsion anhaftet.

Ludwig Prandtl gelang es 1904 auf dem internationalen Mathematiker Kongress in Heidelberg für dieses Problem mit Hilfe seiner präsentierten Grenzschichttheorie Abhilfe zu schaffen. Er führte eine Trennung der Strömung in eine Außenströmung und eine Randströmung ein.

**Außenströmung:** Als Außenströmung wird jener Bereich definiert, in welchem angenähert eine konstante Geschwindigkeit und eine nahezu reibungsfreie Bewegung herrschen. Hier können aufgrund geringer Zähigkeit, die Reibungskräfte gegenüber den Trägheitskräften vernachlässigt werden. Bei vorausgesetzter Wirbelfreiheit kann in diesem Bereich mit den Gesetzen der Potenzialströmung gerechnet werden.<sup>11</sup>

**Randströmung:** Für die Randströmung charakteristisch ist ein steiler Geschwindigkeitsanstieg. In diesem Bereich gelten die Gesetze für die viskose Fluidbewegung. Zwar ist die Fluidviskosität gering, doch ist infolge der hohen Geschwindigkeitsgradienten die Reibungswirkung erheblich. Mathematisch exakt beschrieben wird dieser Bereich mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen.<sup>12</sup> Hinsichtlich des

---

<sup>11</sup> Vgl. Sigloch 2007, S. 95.

<sup>12</sup> Vgl. Ebda.



Druckes herrscht in der Grenzschicht der gleiche Druck wie in der Hauptströmung. „Man sagt, daß der Druck der Außenströmung der Grenzschicht ‚aufgeprägt‘ wird.“<sup>13</sup>

Zur Beschreibung der Grenzschicht unterscheidet man zwischen Grenzschichtdicke und Verdrängungsdicke.

### 2.1.1 GRENZSCHICHTDICKE

Als Grenzschichtdicke bezeichnet man die Höhe der Randströmung. Die Trennung zwischen Außenströmung und Randströmung gestaltet sich aufgrund eines asymptotischen Geschwindigkeitsübergangs als schwierig. Theoretisch erfolgt eine Trennung der Grenzschicht von der Außenströmung, wenn der Geschwindigkeitsunterschied nur mehr 1% beträgt. Die Grenzschichtdicke  $\delta$  wird in Abbildung 2-1 verdeutlicht und für laminare ( $\delta_l$ ) sowie turbulente ( $\delta_t$ ) Grenzschicht als Formel (2.1) und (2.2) angegeben:

$$\delta_l = 5 * \sqrt{\frac{v * s_l}{c_\infty}} \quad (2.1)$$

$$\delta_t = 0,37 * \sqrt[5]{\frac{v * s_t^4}{c_\infty}} \quad (2.2)$$

### 2.1.2 VERDRÄNGUNGSDICKE

Durch das in der Grenzschicht langsamer fließende Fluid wird weniger Fluidmenge in dieser Zone transportiert. Übertragen auf eine Rohrströmung bedeutet diese eine Versperrung des Kanals im Radius um den Betrag der Verdrängungsdicke. Daher wird die Verdrängungsdicke definiert als der Betrag, welcher durch die Verschiebung der Stromlinien nach außen zu Stande kommt. Mathematisch beschreibt Schlichting die Verdrängungsdicke:

$$\delta_1 = \frac{1}{c_\infty} * \int_{n=0}^{\infty} (c_\infty - c(n)) \, dn \quad (2.3)$$

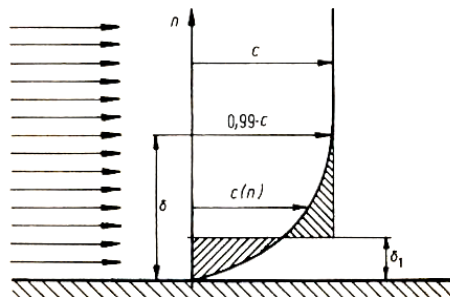


Abbildung 2-1: Grenzschichtdicke und Verdrängungsdicke  
[Sigloch 2007, S. 96]

<sup>13</sup> Schlichting 1964, S. 28.

### 2.1.3 IMPULSVERLUSTDICKE

In der Grenzschicht fällt der Impulsdurchfluss gegenüber der Hauptströmung aufgrund von Reibungskräften geringer aus. Somit kann für die Impulsverlustdicke nach (2.4) geschrieben werden.

$$\delta_2 = \int_{y=0}^{\infty} \frac{u}{u_{\infty}} \left(1 - \frac{u}{u_{\infty}}\right) dy \quad (2.4)$$

### 2.1.4 FORMFAKTOR (*SHAPE FACTOR*)

Der Formfaktor wird definiert als das Verhältnis zwischen Verdrängungsdicke und Impulsverlustdicke.

$$H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \quad (2.5)$$

Für laminare Grenzschichten ohne Druckgefälle kann ein Wert von etwa 2,6 angenommen werden. Bei turbulenten Grenzschichten ohne Druckgefälle entwickelt sich ein fülligeres Geschwindigkeitsprofil, wodurch der Formfaktor auf einen Wert von ungefähr 1,3 sinkt. Bei einer Ablösung steigt der Formfaktor auf Werte von über 4 an.<sup>14</sup>

### 2.1.5 LAMINARE UND TURBULENTE GRENZSCHICHT

Grundsätzlich kann die Strömung nicht nur in der Hauptströmung sondern auch in der Grenzschicht turbulent sein. Beim Umschlag von laminarer auf turbulente Strömung wird die Schichtenströmung mit unregelmäßigen Querbewegungen überlagert. Diese turbulente Mischbewegung verzehrt kinetische Energie, wodurch der Strömungswiderstand und somit auch der Druckabfall deutlich ansteigen. In weiterer Folge findet durch die Mischbewegung ein Impulsaustausch zwischen den Schichten der Rohrmitte und denen in wandnahen Bereichen statt, wodurch das Geschwindigkeitsprofil über den Querschnitt gleichmäßiger wird. Trotz der deutlich dickeren turbulenten Grenzschicht weist sie einen steileren Geschwindigkeitsanstieg an der Wand auf, was zu einer Erhöhung der Wandschubspannung beiträgt. Abbildung 2-2 stellt das Geschwindigkeitsprofil einer laminaren und einer turbulenten Grenzschicht gegenüber.

---

<sup>14</sup> Vgl. Breitbach 2002, S. 17.

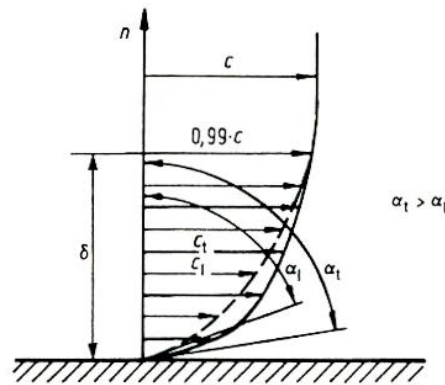


Abbildung 2-2: Geschwindigkeitsprofilunterschied zwischen laminarer und turbulenter Grenzschicht [Sigloch 2007, S. 97]

Der Übergang einer laminaren in eine turbulente Grenzschicht soll anhand einer Plattenströmung wie in Abbildung 2-3 verdeutlicht werden. Hierbei wird eine theoretisch unendlich große Platte in ein Strömungsgebiet eingebracht. Beginnend mit dem Staupunkt S an der Plattennase bildet sich eine anwachsende laminare Grenzschicht aus. Diese wird zu Beginn auch bei turbulenter Anströmung aufgrund von Viskositätseinflüssen laminar ausfallen. Durch das Anwachsen der Grenzschicht sinkt der Dämpfungseffekt hervorgerufen durch die Reibungskräfte, die Grenzschicht wird instabil und schlägt theoretisch am Punkt U um. Für die Lage des Umschlagpunktes U ist die kritische Reynoldszahl (2.6) der Außenströmung charakteristisch und kann bei einer Platte mit  $3,2 \cdot 10^5$  angegeben werden. Tatsächlich findet der Umschlag nicht nur in einem Punkt sondern in einem Bereich statt. In der Literatur wird dieser Bereich als Umschlaggebiet oder transiente Grenzschicht bezeichnet. Eine laminare Unterschicht bleibt aufgrund überwiegender viskoser Kräfte im wandnahen Bereich bestehen.

$$Re_{x \text{ krit}} = \left( \frac{u_{\infty} \cdot x}{\nu} \right)_{\text{krit}} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ (Platte)} \quad (2.6)$$

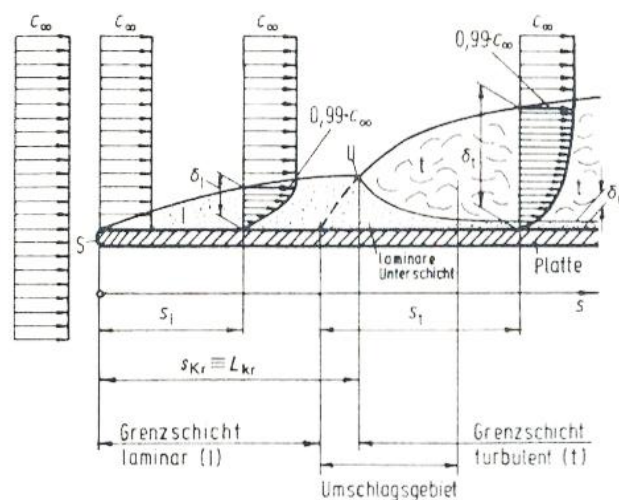


Abbildung 2-3: Grenzschichtausbildung an einer ebenen Platte [Sigloch 2007, S. 98]

## 2.2 ABLÖSESTRÖMUNG

Eine ablösende Strömung bedeutet, dass sich die Grenzschicht von der Bezugswand ablöst. Die Ablösung einer Grenzschicht ist eng mit der statischen Druckverteilung im Strömungsfeld verbunden. Um das Entstehen einer Ablösung und deren Verknüpfung besser zu verdeutlichen sei an dieser Stelle auf das Beispiel mit einem Diffusor wie in Abbildung 2-4 hingewiesen.

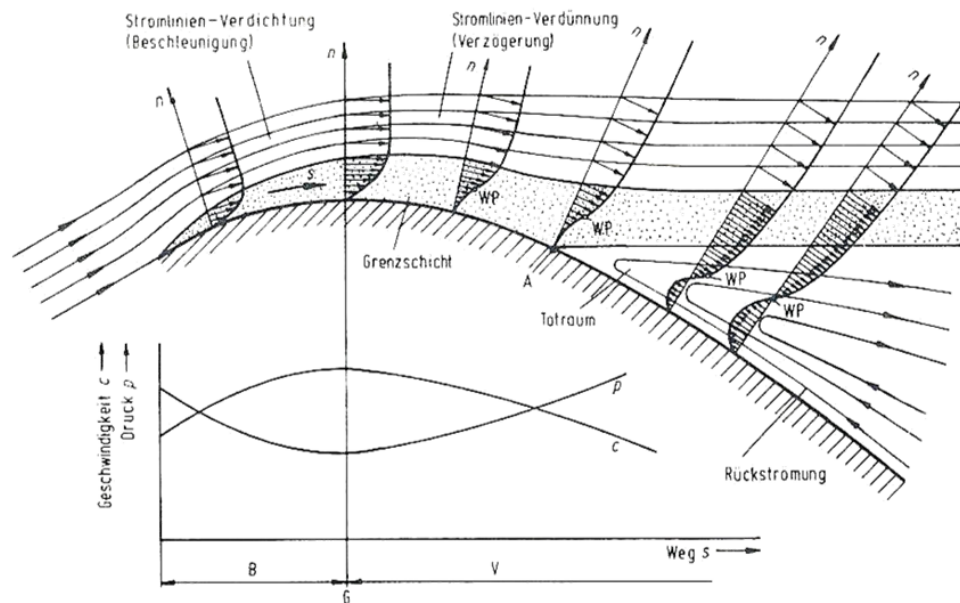


Abbildung 2-4: Geschwindigkeitsprofile bei Druckabfall (Bereich B) und Druckanstieg (Bereich V).  
[Sigloch 2007, S. 101]

Zu Beginn ist die Kontur so ausgeprägt, dass sich eine beschleunigte Strömung mit Druckabfall ausbildet. Die Hauptströmung wird in diesem Bereich die Druckenergie in kinetische Energie (Geschwindigkeit) umsetzen, d.h. sie beschleunigt. Für die Grenzschicht, welche sich unmittelbar zu Beginn ausgebildet hat, folgert die Aufprägung des abnehmenden statischen Druckes. Die Verzögerung im wandnahen Bereich kann durch die Beschleunigung kompensiert werden und die Strömung neigt nicht zum Ablösen. Die höchste Geschwindigkeit und der niedrigste Druck werden am Punkt G erreicht. Nachfolgend erfährt die Strömung im Bereich V eine Verzögerung. Dabei wandelt die Hauptströmung ihre kinetische Energie wieder in Druckenergie um. Die Zone nahe der Wand kann aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeit nicht die nötige kinetische Energie für den Druckanstieg aufbringen und es kommt im Punkt A zum Verschwinden des senkrecht zur Wand stehenden Geschwindigkeitsgradienten. Danach kehrt der Geschwindigkeitsgradient sogar um und es entsteht eine rückläufige Strömung zwischen Körperoberfläche und Grenzschicht. Diese Erscheinung wird in der Literatur als Rückströmung bezeichnet. Die Außenströmung wird von der Körperoberfläche weggedrückt und es entsteht dazwischen eine labile Fläche, welche sich in späterer

Folge spiralförmig einrollt. Die zum Einrollen verwendete Energie ist bei diesem Vorgang mechanisch verloren und spiegelt sich in einem erhöhten Strömungswiderstand wieder.<sup>15</sup>

Turbulente Grenzschichten besitzen durch den Impulsaustausch einen größeren Geschwindigkeitsgradienten im wandnahen Bereich. Dadurch ergibt sich ein fülligeres Geschwindigkeitsprofil, wodurch die Grenzschicht mehr kinetische Energie besitzt. Diese ist dafür verantwortlich, dass die Strömung entgegen dem ansteigenden Druck länger anlaufen kann. Daraus leitet sich ab, dass eine turbulente Grenzschicht weniger stark zu einer Ablösung neigt und sich im Verhältnis zur laminaren Grenzschicht später beginnt abzulösen. Das Wirbelgebiet (Totraum) wird kleiner und der damit verbundene Strömungswiderstand sinkt. Für den Gesamtwiderstand muss zwischen dem geringeren Strömungswiderstand aufgrund der Wirbel und einem höheren Wandwiderstand aufgrund des größeren Geschwindigkeitsgradienten abgewogen werden.

Neben der produzierten turbulenten Grenzschicht zum Anlaufen entgegen einem Druckanstieg können zusätzliche technische Maßnahmen gesetzt werden.

Physikalisch einfach wäre das Mitbewegen der Wand. Dabei steht das Fluid relativ zur Wand still und besitzt gegenüber der Hauptströmung keine bzw. nur einen geringen Geschwindigkeitsunterschied. Die technische Realisierung dieser Methode erweist sich meist als schwierig.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Grenzschichtabsaugung. Die Wirkung wird in der Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 dargestellt. Dabei wird durch einen an der Wand angebrachten Schlitz die Grenzschicht abgesaugt. Heutzutage werden auch poröse Werkstoffe verwendet, durch welche ein großflächiges Absaugen der Grenzschicht möglich wird. Dies verhindert ein Anwachsen der Grenzschicht und somit eine damit in Verbindung gebrachte Erreichen der kritischen Reynoldszahl in der Dicke.<sup>16</sup>

Eine für Tragflächen wesentliche Beeinflussung der Grenzschicht stellt sich durch das Verändern der Geometrie. Da bereits wie oben erwähnt der Druckanstieg die Problematik für die Grenzschicht bildet, wird durch eine günstige Wahl der Kontur das Druckminimum soweit wie möglich strömungsabwärts verschoben. Dadurch kann eine laminare Grenzschicht mit geringeren Wandschubspannungen länger aufrechterhalten bleiben.<sup>17</sup>

Durch Zu- oder Abführen von Wärme kann die Viskosität in der wandnahen Zone verändert werden. So sinkt bei gasförmigen Medien die Viskosität beim Absenken der Temperatur. In diesem Zusammenhang steigt der Geschwindigkeitsgradient an der Oberfläche und das

---

<sup>15</sup> Vgl. Sigloch 2007, S. 101f.

<sup>16</sup> Vgl. Gad-el-Hak 2000, S. 112f.

<sup>17</sup> Vgl. Ebda., S. 114f.

Geschwindigkeitsprofil wird fülliger. Bei flüssigen Medien hingegen ist umgekehrt ein Sinken der Viskosität bei Erwärmung zu beobachten.<sup>18</sup>

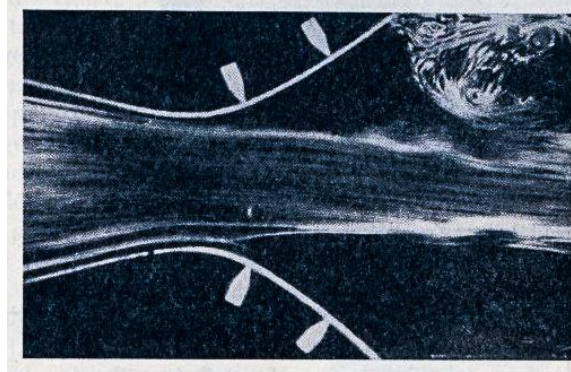


Abbildung 2-5: Strömung in einem stark erweiternden Kanal mit Ablösung  
[Schlichting 1964, S. 33]

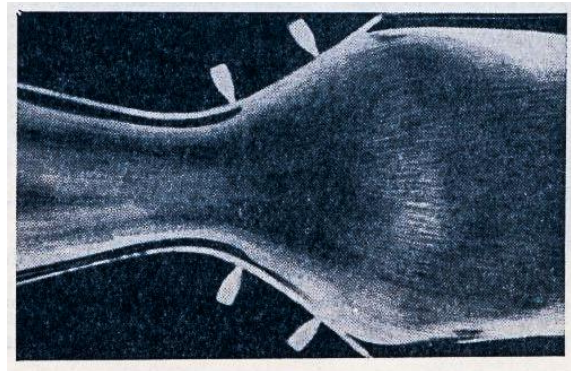


Abbildung 2-6: Strömung in einem stark erweiternden Kanal mit Absaugung der Grenzschicht an beiden Kanalwänden  
[Schlichting 1964, S. 33]

## 2.3 WIRBELGENERATOREN

Zur Beeinflussung der Strömung gibt es noch weitere Möglichkeiten. Eine Art der Unterscheidung kann hinsichtlich passiver und aktiver Strömungsbeeinflussung getroffen werden. Im Gegensatz zu den aktiven benötigen passive Strömungsbeeinflussungen keine Hilfsenergie.<sup>19</sup> Die hier besprochenen Wirbelgeneratoren (*vortex generators*) gehören zu der Gruppe der passiven Strömungsbeeinflussung.

Dabei handelt es sich um senkrecht auf die Strömungskontur angeordnete Plättchen, welche im wandnahen Bereich Wirbel in Strömungsrichtung generieren. Die in dieser Arbeit verwendeten Wirbelgeneratoren sind in Abbildung 2-7 dargestellt.

---

<sup>18</sup> Vgl. Gad-el-Hak 2000, S. 116.

<sup>19</sup> Vgl. Ebda., S. 28.



Abbildung 2-7: Wirbelgenerator

Die Wirbelbildung selbst ist auf den Druckausgleich den die Strömung zwischen der Druck- und Saugseite ausführt, zurückzuführen. Durch die Wirbel wird hoch energetisches Fluid aus der Hauptströmung in die Grenzschicht transportiert.

Geometrieabhängig erzeugen Wirbelgeneratoren gleichläufig oder gegenläufig drehende Wirbel. Die unterschiedliche Geometrie ist in Abbildung 2-8 ersichtlich. Selbstverständlich erzeugen diese zusätzlichen Wirbel durch ihren Energieaustausch zwischen Grenzschicht und Hauptströmung zusätzliche Strömungsverluste.

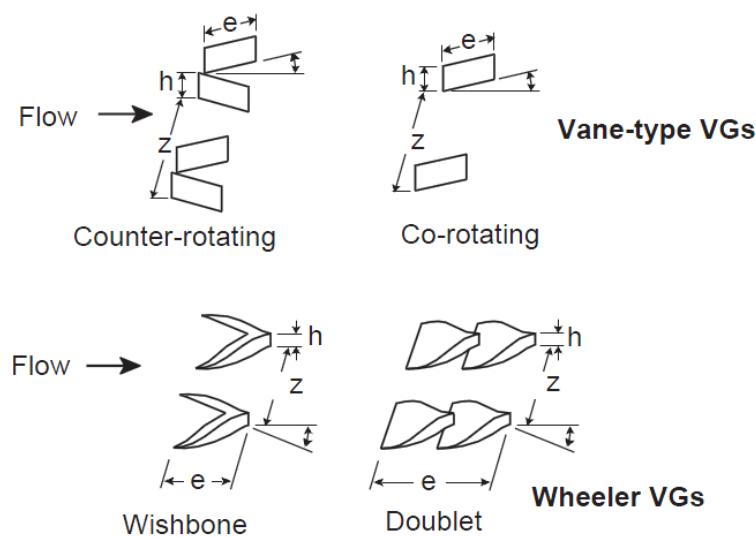


Abbildung 2-8: Ausformung der Wirbelgeneratoren  
[Lin 2002, S. 395]

Desto höher die Wirbelgeneratoren ausgeführt sind, desto stärker fallen die gebildeten Wirbel aus. Dies kann zwar zu einer besseren Wirkung führen, erzwingt jedoch auch höhere Strömungsverluste. So folgert eine wichtige Unterscheidung hinsichtlich der Höhe welche man relativ zur Grenzschichtdicke im applizierten Bereich bemisst. Fällt die Höhe größer als die Grenzschicht aus ( $h > \delta$ ) spricht man von Hochprofil-Wirbelgeneratoren (*high-profile vortex generators*), wohingegen bei



einer geringeren Höhe ( $h < \delta$ ) von Niedrigprofil-Wirbelgeneratoren (*low-profile vortex generators*) gesprochen wird. Nach Lin<sup>20</sup> besitzen Wirbelgeneratoren mit einer Höhe von 0,1 bis 0,5  $\delta$  bereits eine ausreichende Höhe um die Grenzschicht zu beeinflussen. So können die Verluste durch eine geringe Höhe der Wirbelgeneratoren in einem vertretbaren Rahmen gehalten werden.<sup>21</sup>

In weiterer Folge kann für die Wirbelgeneratoren neben der Höhe auch der Winkel, die Lauflänge und der Abstand zur Ablösekannte als entscheidende Faktoren für die Wirkung ausgemacht werden. Für weiterführende Literatur hinsichtlich der Variation der Parameter von Niedrigprofil-Wirbelgeneratoren sei auf Lin (2002) verwiesen. Für die in dieser Arbeit angewandten Wirbelgeneratoren wird die von Canepa et al. (2006) als beste ermittelte Geometrie verwendet. Die Prinzipskizze in Abbildung 2-9 stellt die Hauptparameter der verwendeten Wirbelgeneratoren, welche gegenläufig drehende Wirbel erzeugen dar. In der nachstehenden Tabelle 2-1 können die dafür in Frage kommenden Parameter abgelesen werden.

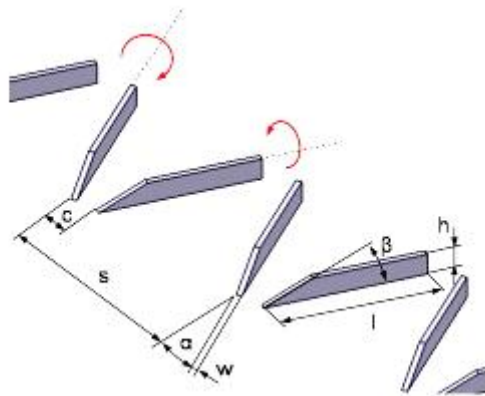


Abbildung 2-9: Wirbelgenerator Geometrie mit seinen Hauptparametern und dargestelltem Wirbel  
[Santner et al. 2012, S. 4]

Tabelle 2-1: Abmessungen der in dieser Arbeit verwendeten Wirbelgeneratoren  
[Santner et al. 2012, S. 4]

h	0,7	mm
l	5	mm
w	0,1	mm
c	0,7	mm
s	6,7	mm
$\alpha$	25	deg
$\beta$	35	deg

---

<sup>20</sup> Vgl. Lin 2002, S. 391.

<sup>21</sup> Vgl. Göttlich 2011, S. 271.



## 2.4 DIFFUSOREN

In Diffusoren erfolgt eine Umwandlung von kinetischer Energie in Druck, wobei der Totaldruck bis auf Einbußen durch Verluste konstant bleibt. Im Unterschallbereich ergibt sich eine Querschnittserweiterung wie sie Abbildung 2-10 schematisch verdeutlicht wird.

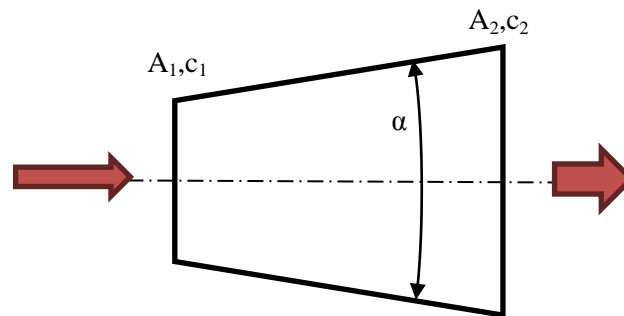


Abbildung 2-10: Prinzipskizze eines Diffusors

Durch die Strömung gegen einen Druckanstieg entsteht wie im Kapitel 2.2 behandelt eine Ablösegefahr, welche durch eine richtige Ausformung abgewandt werden kann. Ein wichtiger Faktor dafür ist der Öffnungswinkel, welcher den Ein- und Austrittsquerschnitt in Verhältnis zur Länge stellt. Mit dem Anstieg dieses Winkels steigt die Wahrscheinlichkeit einer Ablösung im Diffusor. Diese Ablösung würde ein Totraumgebiet und eine Rückströmung verursachen, wodurch die Strömungsverluste stark ansteigen. Ein hingegen geringer Winkel würde für ein definiertes Öffnungsverhältnis ( $A_{\text{aus}}/A_{\text{ein}}$ ) einen länger zu bauenden Diffusor bedeuten. Dies würde die Strömungsverluste infolge von Reibung anheben. Daraus folgert, dass es je nach Anwendungsfall ein Optimum zu finden gilt.

Für einen ringförmigen Diffusor kann nach dem Diagramm von Sovran und Klomp (Abbildung 2-11) der maximal mögliche Druckrückgewinn ermittelt werden. In den untersuchten Diffusoren wurde eine Grenzschichtblockade von 2% zugelassen.  $C_p^*$  gibt die maximale Druckrückgewinnung für ein dimensionsloses Verhältnis von  $L/h_1$  an, wobei  $L$  die Länge und  $h_1$  die Eintrittshöhe wiedergeben.  $C_p^{**}$  ergibt die maximale Druckrückgewinnung für ein dimensionsloses Flächenverhältnis (*area ratio*) zwischen Ein- und Austritt.<sup>22</sup>

---

<sup>22</sup> Vgl. Marn 2008, S. 15.

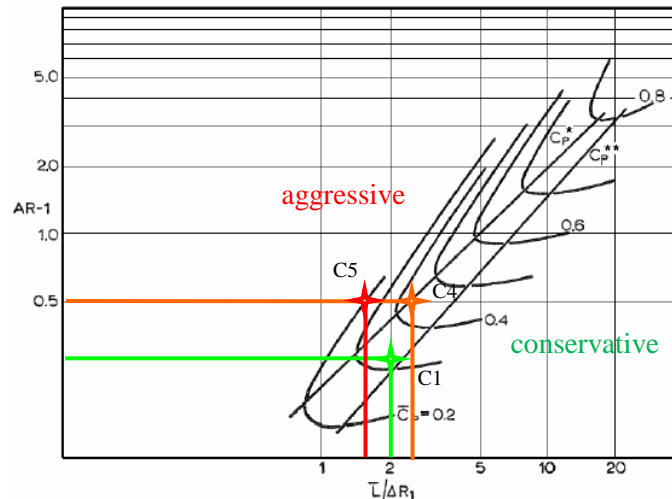


Abbildung 2-11: Einordnung der Übergangskanäle im Diagramm von Sovran und Klomp [Marn 2008, S. 15]

In Abbildung 2-11 wurde der in dieser Arbeit untersuchte Übergangskanal in Rot eingezeichnet. Aufgrund der Position im Diagramm lässt sich der Name „super-aggressive“ vergeben. Der grün eingezeichnete Diffusor stellt einen „state of the art“ Übergangskanal dar, welcher auch als „non-aggressive“ bezeichnet werden kann. Die orange Linie gibt einen weiteren an der TU Graz untersuchten Übergangskanal mit der Einstufung „aggressive“ zum Vergleich an.<sup>23</sup>

## 2.5 STÄBCHENNACHLAUF

Ein vielfach untersuchtes Beispiel im Zusammenhang mit der Grenzschicht ist die Umströmung eines Kreiszyinders. Dieses soll an dieser Stelle gesondert in Hinblick auf das in dieser Arbeit verwendete Laufrad besprochen werden.

Bei der Umströmung des Kreiszyinders stellt sich ein Druckprofil wie in Abbildung 2-12 ein. Hierbei beschleunigt die Strömung im vorderen Bereich zwischen D und E, wobei eine beschleunigte Strömung immer mit einer Umwandlung von Druck in kinetische Energie einhergeht. Folglich ist der Druck im Punkt E, also genau nach 90° (gemessen vom vorderen Staupunkt aus), am niedrigsten. Auf der Strecke von E nach F verzögert die Strömung und es erfolgt eine Umwandlung von kinetischer Energie in Druck. Dabei reicht die kinetische Energie in der Grenzschicht nicht aus, um gegen den Druckanstieg anzuströmen und es kommt im Punkt A zum Stillstand der Strömung in der Grenzschicht bzw. kehrt sie sich in weiterer Folge um. Eine Rückströmung mit nachfolgender Wirbelbildung entsteht und ist in Abbildung 2-13 mittels der „hydrogen bubble methode“ verdeutlicht.

<sup>23</sup> Vgl. Marn 2008, S. 15.

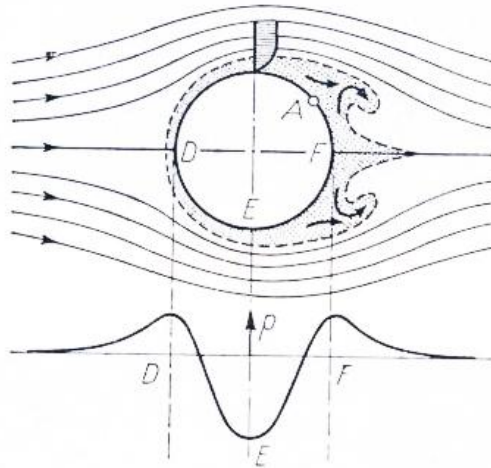


Abbildung 2-12: Ablösung der Grenzschicht und Wirbelbildung am Kreiszyylinder (Schematisch)  
[Schlichting 1964, S. 29]

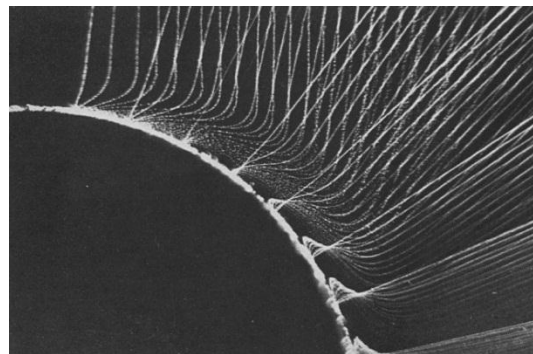


Abbildung 2-13: Rückströmung im hinteren Bereich des Kreiszyinders bei  $Re=1,2 \cdot 10^3$  (Aufgenommen 2 sec nach Bewegungsstart, Wasser, Strömungsgeschwindigkeit 2 cm/s, Zylinderdurchmesser 7cm)  
[The Japan Society of mechanical engineers 1988, S. 18]

Der sich bildende Wirbel wächst in Folge an, bis er sich vom Körper ablöst und nach hinten abgetrieben wird. Gleich nach dem Ablösen des ersten Wirbels bildet sich an der gegenüberliegenden Seite ein weiterer, gegenläufiger Wirbel aus, welcher sich ebenfalls ablöst. So entsteht die sogenannte Kármánsche Wirbelstraße, welche in Abbildung 2-14 zu sehen ist. Deutlich sichtbar ist diese nur in einem Reynoldsbereich von etwa 60 bis 5000. Darüber hinaus findet im Nachlauf eine völlig turbulente Durchmischung statt. Stromabwärts nimmt die Breite der Wirbelstraße bei gleichzeitig schwächer werdenden Wirbeln durch die Reibung zu. Im Zuge dessen kann die Strouhal-Zahl als eine dimensionslose Frequenz eingeführt werden. Für größere Reynoldszahlenbereich ist sie etwa konstant mit  $S=0,21$  zu setzen.<sup>24</sup> Die Formel gibt die Strouhal Zahl wieder, wobei  $D$  den Durchmesser in [m],  $c$  die Geschwindigkeit in [m/s] und  $n$  die Frequenz der Wirbelablösung [1/s] darstellen.

$$S = \frac{n * D}{c} \quad (2.7)$$

<sup>24</sup> Vgl. Schlichting 1964, S. 31.

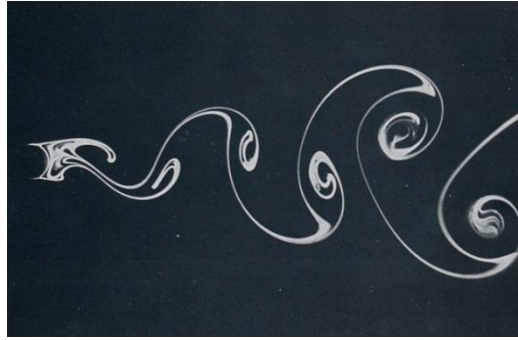


Abbildung 2-14: Kármánsche Wirbelstraße hinter einem Kreiszyylinder bei  $Re=140$  (Wasser, Strömungsgeschwindigkeit 1,5cm/s, Zylinderdurchmesser 1cm)  
 [The Japan Society of mechanical engineers 1988, S. 10]

Die Wirbelstraße bewegt sich aufgrund vom Strömungswiderstand und der Energieverluste der Wirbel mit geringerer Geschwindigkeit stromabwärts als die Anströmgeschwindigkeit. Dies ist deutlich in einer Delle im Geschwindigkeitsverlauf hinter einem Zylinder zu sehen und in Abbildung 2-15 dargestellt.

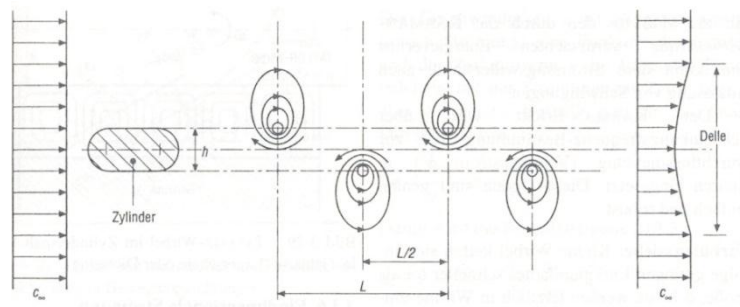


Abbildung 2-15: Kármánsche Wirbelstraße mit Geschwindigkeitsverlauf  
 [Sigloch 2007, S. 107]

Befinden sich mehrere Stäbchen in konstantem Abstand in der Strömung, wird ein Geschwindigkeitsprofil wie in Abbildung 2-16 dargestellt gebildet.

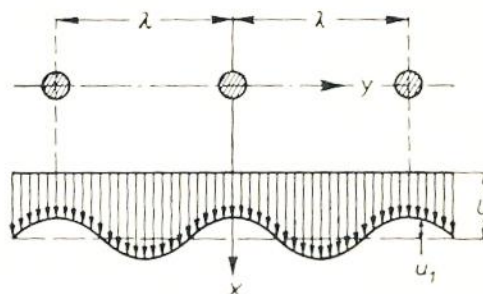


Abbildung 2-16: Nachlauf mehrerer Stäbchen  
 [Schlichting 1964, S. 687]

Wird wie in der Versuchsanordnung das Laufrad in Bewegung versetzt, muss die Umfangsgeschwindigkeit mit berücksichtigt werden. Die Abströmung im Relativsystem wird nicht mehr axial sondern unter einem definierten Winkel erfolgen, welcher sich anhand des Geschwindigkeitsdreieckes gemäß Abbildung 2-17 einstellt.

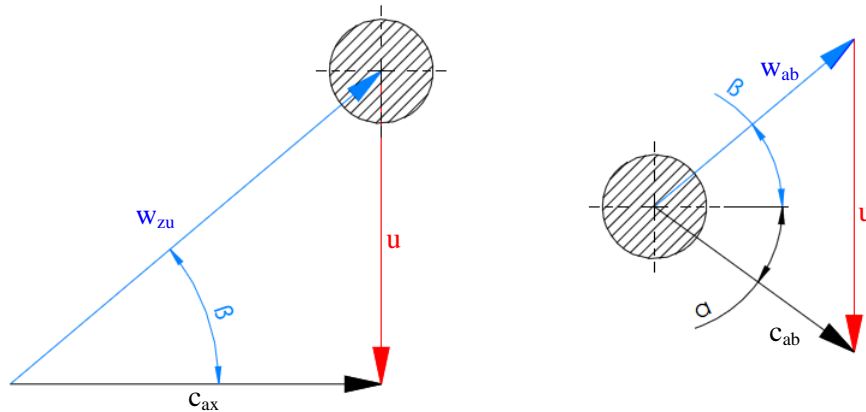


Abbildung 2-17: Geschwindigkeitsdreieck bei einem bewegten Stab

Bei einer Zuströmung mit der Geschwindigkeit  $c_{ax}$  wird das Stäbchen, welches sich mit der Umfangsgeschwindigkeit  $u$  bewegt mit der Realativgeschwindigkeit  $w_{zu}$  angeströmt. Daraus folgert, dass sich die Nachläufe der Stäbchen entsprechend der Richtung der Relativgeschwindigkeit  $w_{ab}$  einstellen, wodurch ein Nachlaufwinkel  $\beta$  (2.9) eingeführt werden kann. Zur Vereinfachung der Rechnung führt Schwarze<sup>25</sup> die Durchflusszahl  $\phi$  (2.8) als ein Maß für die Abweichung zwischen Strömungsrichtung und Nachlauforientierung ein.

$$\phi = \frac{c_{ax,1}}{u} \quad (2.8)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{u}{c_{ax}}\right) = \arctan\left(\frac{1}{\phi}\right) \quad (2.9)$$

Wenn die Relativgeschwindigkeit  $w_{ab}$  mit der Umfangsgeschwindigkeit  $u$  wieder zurücktransformiert wird, ergibt sich für die Absolutgeschwindigkeit aufgrund der Tatsache das  $w_{ab} < w_{zu}$  ist, ein Winkel von  $\alpha$  nach Abbildung 2-17.

Angewendet auf die Wirbelgeneratoren in dieser Arbeit bedeutet dies in den Nachläufen eine Fehlanströmung mit dem besagten Winkel  $\alpha$ , welcher in Abbildung 2-18 verdeutlicht wird. Der Einfluss auf die Wirbelgeneratoren muss noch erforscht werden. Tatsache ist, dass die Wirbelgeneratoren bei Fehlanströmung nicht ihre volle Wirkung entfalten können.

<sup>25</sup> Vgl. Schwarze 2012, S. 23-25.

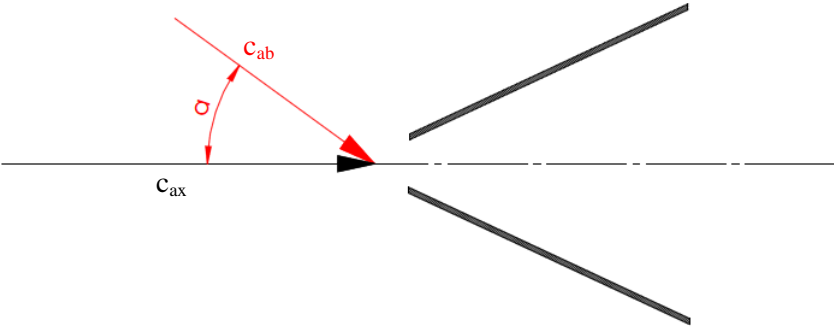


Abbildung 2-18: Fehlanströmung der Wirbelgeneratoren

## 2.6 S-FÖRMIGER ÜBERGANGSKANAL

Die Strömung durch einen S-förmigen Übergangskanal ist komplexer, als sie in einem einfachen Diffusor mit gerade verlaufenden Wänden ist. So führen gleich mehrere Effekte zu Druckgradienten und beeinflussen damit die Strömung.

Für einen Übergangskanal definiert Göttlich<sup>26</sup> nicht nur das Flächenverhältnis sondern auch die Krümmung der Seitenwände als Faktor der Beeinflussung der Strömung und somit der Stromlinien in Übergangskanälen. Die Krümmung der Stromlinien wird nahe der Seitenwand zusätzlich durch die örtliche Ausbildung der Grenzschicht stark beeinflusst.

Weiters zeigt Göttlich<sup>27</sup> noch Rotornachläufe und deren Modulation in ihrer Stärke durch die Stator-Rotor Interaktion, welche die Strömung im Übergangskanal beeinflusst. Genauere Informationen über die Beeinflussung und deren Wirkung kann der Arbeit von Göttlich entnommen werden.<sup>28</sup>

Um die allgemeinen Zusammenhänge bei der Durchströmung eines Zwischendiffusors zu erläutern, ist es sinnvoll die Abbildung 2-19 mit der Machverteilung und die Abbildung 2-20 mit dem statischen Druckverlauf heranzuziehen.

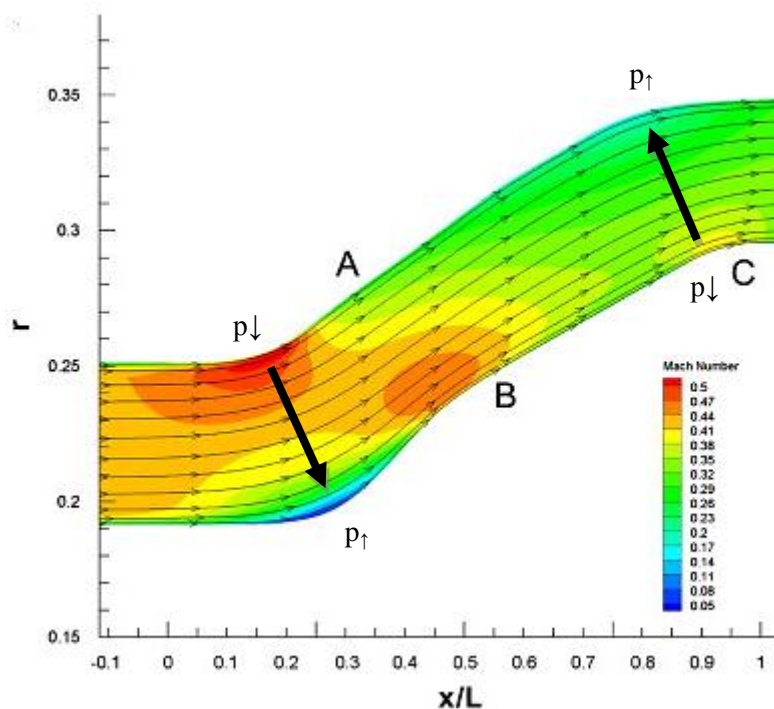


Abbildung 2-19: Machverteilung durch einen Zwischendiffusor  
[Göttlich 2011, S. 253]

<sup>26</sup> Vgl. Göttlich 2011, S. 252.

<sup>27</sup> Vgl. Ebda, S. 253.

<sup>28</sup> Vgl. Ebda., S. 249-279.

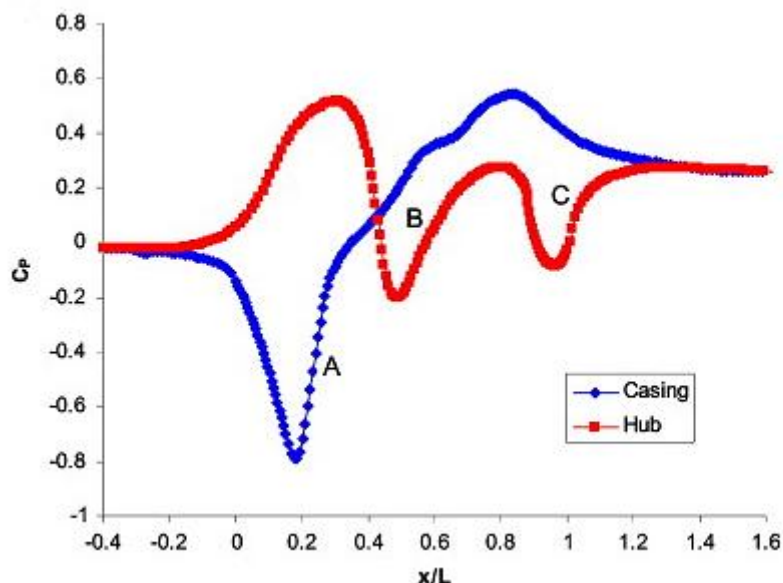


Abbildung 2-20: Statische Druckverteilung an der Außen- und Innenkontur des Zwischendiffusors  
[Götlich 2011, S. 253]

In der Abbildung 2-19 ist die Machverteilung im Kanal über der relativen Länge ( $x/L$ ) aufgetragen. Beim statischen Druckverlauf gemäß Abbildung 2-20 wird, der Außenkonturverlauf (blaue Linie) gemeinsam mit der Innenkontur (rote Linie) dargestellt. Um Umgebungseinflüsse zu minimieren ist nicht direkt der statische Druck sondern der Druck-Koeffizient  $C_p$  nach Formel (2.10) über die relative Länge  $x/L$  aufgetragen. Der Beginn der Krümmung im Diffusor wird durch die Stelle  $x/L = 0$  markiert, während  $x/L = 1$  den Austritt aus dem Diffusor darstellt.

$$C_p = \frac{p_x - p_{stat,in}}{p_{tot,in} - p_{stat,in}} \quad (2.10)$$

Wie aus Abbildung 2-19 hervorgeht, wird die Strömung zweimal umgelenkt. Der erste Bug (*1st bend*) bringt die Strömung von der achsparallelen Zuströmung in eine radiale Richtung. Die Stromlinien werden dadurch gebogen und es entsteht aufgrund des radialen Gleichgewichts ein Druckgradient wie er in Abbildung 2-19 ersichtlich ist. Dieser ist mit dem Druckgradient, welcher aufgrund der Diffusorwirkung auftritt, überlagert. Für den zweiten Bug (*2nd bend*) stellt sich die Situation umgekehrt dar. Die Strömung wird zurück in die axiale Richtung gedreht, die Stromlinien biegen sich entgegengesetzt dem ersten Bug und der Druckgradient in Abbildung 2-19 kehrt sich um und weist von der Innenkontur hin zur Außenkontur.

Entlang der Außenkontur (*casing*) beschleunigt die Strömung bis hin zum ersten Bug, einhergehend mit einem Druckabfall wie er in Abbildung 2-20 ersichtlich ist. An der Innenkontur (*hub*) steigt der Druck bis zum Bug hin an, wodurch die Machzahl in Abbildung 2-19 entgegengesetzt bis zum Minimum absinkt. In der Unterschallströmung können Einflüsse auf die Strömung bereits



stromaufwärts ausgemacht werden. So kann hier der Einfluss des Buges im statischen Druckverlauf bereits vor dem Kanaleintritt ( $x/L = 0$ ) durch das Divergieren der beiden Kurven erkannt werden.

Nach diesem ersten Bug kommt es durch den stromaufwärts befindlichen Flächenanstieg in Verbindung mit der konvexen Biegung der Innenkontur, zum stärksten Druckgradienten an der Außenkontur. Ein steiler Druckgradient ist in Hinblick auf eine Strömungsablösung problematisch, wobei er an dieser Stelle durch eine spezielle Konturausformung verhindert werden soll.

Der größte statische Druck der Außenkontur kann bei etwa  $x/L = 0,84$  bzw. in etwa an der Stelle des zweiten Buges (*2nd bend*) ausgemacht werden. Die Machzahl sinkt dementsprechend in diesem Bereich auf das Minimum der Außenkontur ab. An der Innenkontur kommt es gemäß Abbildung 2-20 an der Stelle  $x/L = 0,3$  durch die konvexe Biegung nach dem ersten Bug zu einem deutlichen Druckabfall. Dieser Druckabfall geht mit einer Beschleunigung der Strömung einher und ist in der Machzahl an der Stelle B zu sehen.

Eine weitere konvexe Biegung ist im Bereich C ersichtlich. Dadurch wird auch hier die Strömung beschleunigt, die Machzahl in diesem Bereich steigt und gemäß Abbildung 2-20 ist ein Druckabfall sichtbar. Der im Bereich zwischen „B“ und „C“ ersichtliche Druckanstieg ist auf die Diffusorwirkung zurückzuführen.

Weiters wird der Abbildung 2-20 entnommen, dass am Austritt aus dem Zwischendiffuser ( $x/L = 1$ ) eine Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenkontur bestehen bleibt.

Befinden sich zusätzlich Nachläufe, hervorgerufen durch eine Turbinenstufe im Zwischendiffuser wird der Strömungsvorgang zusätzlich beeinflusst. Dazu ist in der Abbildung 2-21 der Strömungskanal unter dem zusätzlichen Einfluss von stationären Nachläufen dargestellt.

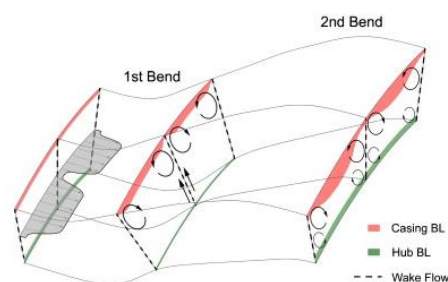


Abbildung 2-21: Druckgetriebene Sekundärströmungen hervorgerufen durch die S-Form und stationäre Nachläufe [Göttlich 2011, S. 253]

Göttlich<sup>29</sup> erklärt, dass der vorherrschende Druckgradient im ersten Bug das Fluid aus der Grenzschicht der Innenkontur über die Nachläufe hin zur niedrig energetischen Außenkontur transportiert. Die aufgedickte Grenzschicht an der Außenkontur wird durch den Transport energetisiert

---

<sup>29</sup> Vgl. Göttlich 2011, S. 253f.

und wie in der Abbildung 2-21 dargestellt an der Stelle des Transportes dünner. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Grenzschicht im ganzen Kanal schon angewachsen ist und durch ihre Dicke den Kanalquerschnitt einengt. Dies führt zu einem geringeren statischen Druck und somit einem geringeren Wirkungsgrad des Diffusors.

Im Falle dieser Diplomarbeit wird der Übergangskanal C5 untersucht. Da der Flächenverlauf für die Strömung durch den Zwischendiffusor von Bedeutung ist, wird er an dieser Stelle für den besagten Übergangskanal in Abbildung 2-22 dargestellt.

In diesem speziellen Übergangskanal ist eine ähnliche Strömungsbeeinflussung wie in dem oben diskutierten Fall zu verzeichnen. Deutlich zu sehen ist, dass im Bereich zwischen „B“ und „E“ zur Entschärfung der Ablöseproblematik eine Flächenabnahme und somit eine Düsenwirkung erzeugt wird. Im Bereich „F“ steigt der Flächenverlauf wieder an, jedoch geringer als im ersten Bug. Dadurch ist die Gefahr der Ablösung in diesem Bereich ebenso geringer.

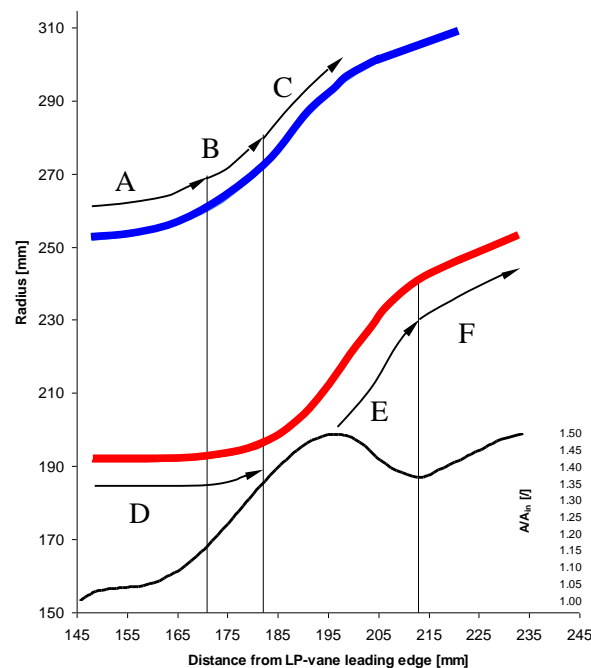


Abbildung 2-22: Kontur und Flächenverlauf des Übergangskanals C5  
[Marn 2008, S. 66]

# 3 VERSUCHSEINRICHTUNGEN

## 3.1 VERDICHTERANLAGE

Die Verdichteranlage besteht aus zwei Schraubenverdichtern (Atlas Copco ZA6 und 6B) sowie aus zwei Turboverdichtern (Atlas Copco SC20 mit Nachleitapparat und SC14 mit verstellbaren Vorleitschaufeln). Die beiden Schraubenverdichter befinden sich in einem Gehäuse und werden nur von einem Motor angetrieben (siehe Abbildung 3-1). Um die Temperatur der abströmenden verdichteten Luft einzustellen sind zwei Luftkühler nachgeschaltet. Der Massenstrom kann in einem Bereich von 2,6 kg/s bis 16,7 kg/s variiert werden. Des Weiteren kann neben dem Variieren des Massenstromes durch die verschiedene Parallel- und Seriellschaltungen der Verdichter in insgesamt 13 verschiedenen Varianten (Fahrweisen) ein maximales Druckverhältnis von ca. 3 bis ca.10 realisiert werden. Die verschiedensten Versuchsstände, wie auch die Ringgitterkaskade sind über ein Hoch – bzw. Niederdruckleitungssystem mit den Verdichtern verbunden. Nach den Versuchsständen wird die Luft durch einen Abluftturm mit Schalldämpfer nach draußen geleitet.

Die Eckdaten der einzelnen Verdichter werden in der nachstehenden Tabelle 3-1 angegeben, während in der Abbildung 3-1 der Schaltplan der Verdichteranlage ersichtlich ist.

Tabelle 3-1: Eckdaten der Verdichter

Verdichter	Ansaugvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	Massenstrom [kg/s]	Druckverhältnis [-]	Verdichterdrehzahl [U/min]	Motordrehzahl [U/min]	Motorleistung [kW]
SC20	27500	9,0	2,9	15780	2978	1450
SC14	15500	5,1	2,9	20930	996-1482	900
E1+E2	8000	2,6	3,1	3730	1485	400

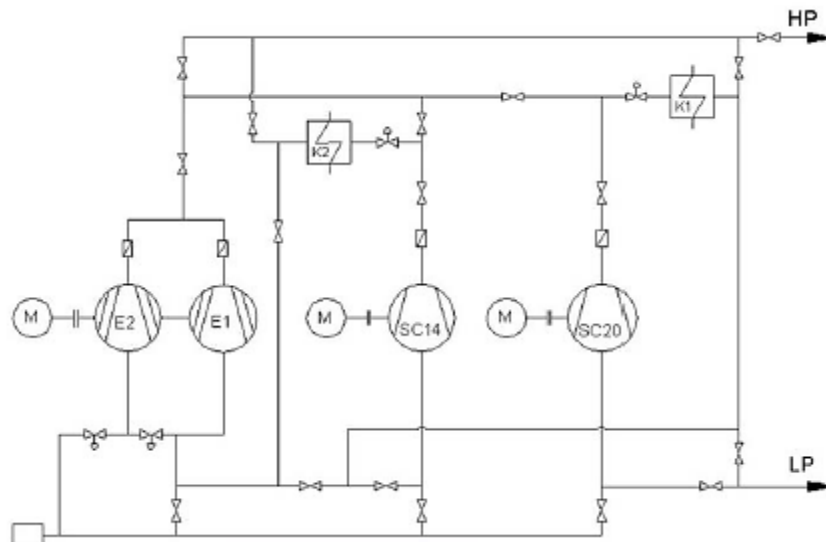


Abbildung 3-1: Schaltplan der Verdichteranlage

Für die gegenständlich behandelte Ringgitterkaskade wird die Fahrweise 6 ausgewählt. Diese schaltet die Verdichter in der aus Abbildung 3-2 ersichtlichen Reihenfolge. Somit kann der notwendige Massenstrom von 15,6 kg/s bei einem Totaldruck nach den Verdichtern von ca. 1,8 bar und einer Temperatur von ca. 60°C bereitgestellt werden. Die Temperatur kann je nach Notwendigkeit ohne Weiters nach oben bzw. unten geregelt werden.

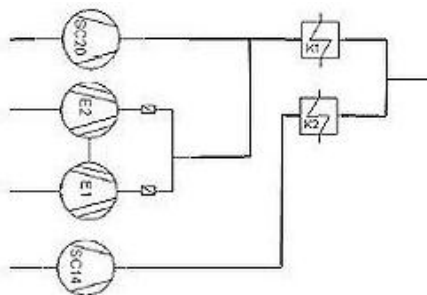


Abbildung 3-2: Fahrweise 6 der Verdichteranlage

## 3.2 RINGGITTERKASKADE

Bei der Ringgitterkaskade handelt es sich um einen Prüfstand zur aerodynamischen Untersuchung von Turbinen-Zwischen-Diffusoren, welche in die bestehende Windkanalleitung am Institut für thermische Turbomaschinen eingebaut wird. Der Aufbau der Ringgitterkaskade ist unter anderem Bestandteil dieser Diplomarbeit und wird in Kapitel 4 näher beschrieben.

Die Konzeptionierung und technische Zeichnung wurde von Pan J. (2008) im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt. Kleine Designänderungen sind aufgrund fertigungstechnischer Notwendigkeiten im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt worden. Die größte Abänderung findet

sich im Bereich des Diffusors, welcher aus Kostengründen nicht wie vorgesehen zweigeteilt ausgeführt wurde.

Die Abbildung 3-3 zeigt die verbaute Ringgitterkaskade und benennt die Hauptkomponenten.

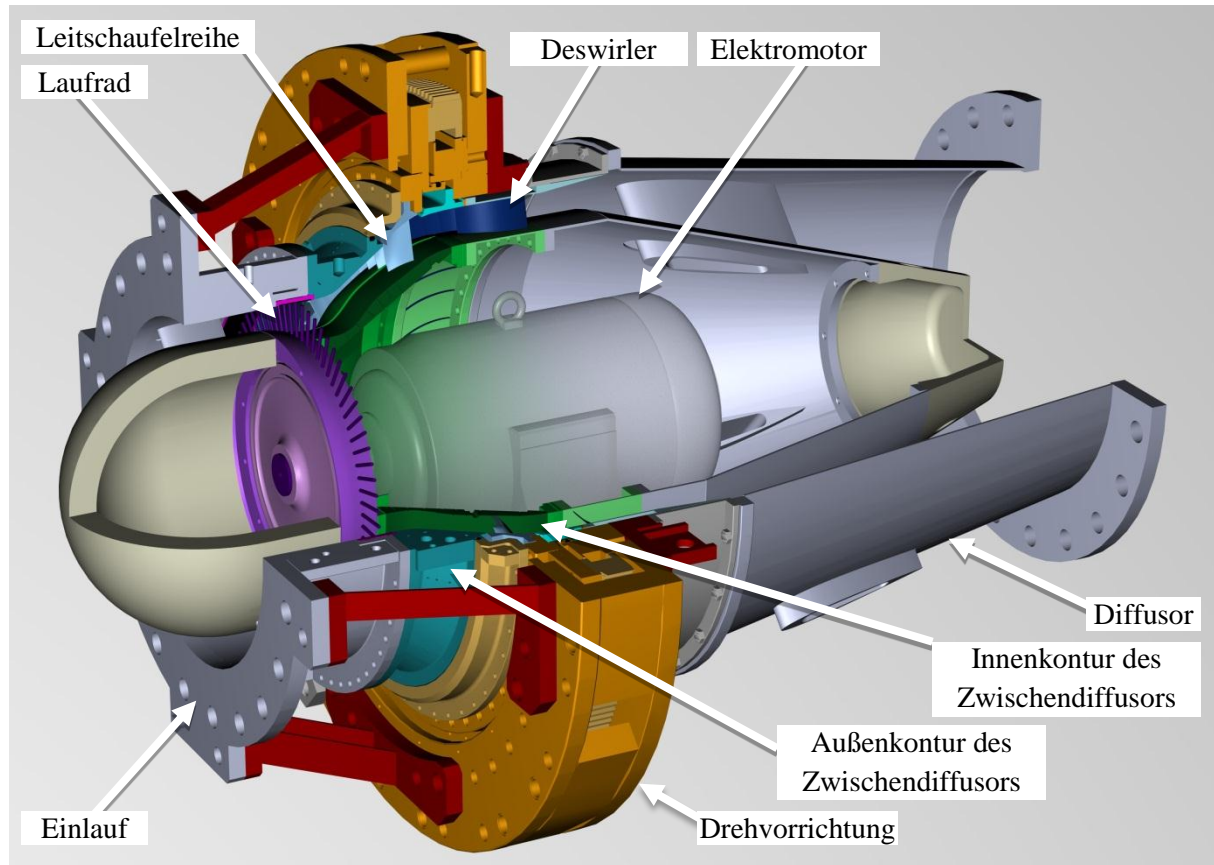


Abbildung 3-3: Schnittdarstellung der Ringgitterkaskade

Der Einlauf erfüllt die Funktion der Strömungsteilung auf einen ringförmigen Querschnitt mit einem Außendurchmesser von 495,4 mm und einer Fläche von 62 422 mm<sup>2</sup>. Die zwei Messpunkte an den vorderen Stützrippen ermitteln die Totaltemperatur sowie den Totaldruck und dienen der Bestimmung des Betriebspunktes.

Damit der Strömungskanal in diesem Bereich zugänglich bleibt, ist der Einlauf in zwei geteilter Form ausgeführt. So kann zum Beispiel zur Applikation des Ölanstriches die obere Halbschale ausgebaut werden, ohne dass die Ringgitterkaskade aus der Windkanalleitung gehoben werden muss.

Das nach dem Einlauf folgende Laufwerk stellt den Nachlaufgenerator dar. Hierbei erzeugen die Stäbchen einen ähnlichen Nachlauf wie sie durch eine Turbinenstufe erzeugt werden. Grundsätzlich können die Stäbchen in der Stückzahl sowie in der axialen Position variiert werden. In dieser Diplomarbeit wurde die Konfiguration mit 72 Stäbchen in der Position D nach Abbildung 4-56 ausgewählt. Diese ist repräsentativ für die von der transsonischen Versuchsturbine am Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik erzeugten Nachläufe.

Angetrieben wird das Laufrad durch einen Elektromotor mit einer Leistung von ca. 20 kW und einem Drehzahlbereich von 0 - 5500 U/min. Der Elektromotor ist explosionsgeschützt ausgeführt, da im installierten Turbolabor des Institutes die Bestimmungen für explosionsgefährdete Räume gelten. Angesteuert wird der Motor über einen Frequenzumrichter der Type Lenze L-force Drives 8400, über welchen die Drehzahl stufenlos eingestellt werden kann.

**Der Zwischendiffuser ist der eigentliche Forschungsgegenstand dieses Prüfstandes.** Daraus folgt, dass sich große Teile der Messtechnik in diesem Bereich befinden. Strömungstechnisch wie auch bei der Montage wird eine Unterscheidung hinsichtlich der Außen- und Innenkontur getroffen. Die Außenkontur besitzt neben den Wanddruckbohrungen zum Aufzeichnen des statischen Druckes entlang der Kontur noch weitere Zugänge für das Messen mit Lasermessmethoden und für die Messung mit Sonden. Die Innenkontur besitzt neben den statischen Wanddruckbohrungen ein Fenster, durch welches mit Hilfe einer Kamera der Kanal bzw. ein eventuell applizierter Ölanstrich an der Außenkontur beobachtet werden kann. Zugänge für eine Sondenmessung sind prinzipiell vorgesehen, jedoch im verbauten Zustand in der Ringgitterkaskade von innen nicht zugänglich.

Die Drehvorrichtung wurde der transsonischen Versuchsturbine (siehe Anhang Abbildung A-12) entnommen. Sie gilt als Verbindung von Einlauf und Diffuser und eignet sich durch den in diesem Bereich liegenden Schwerpunkt als Befestigungspunkt hin zum Federfundament. Im vorderen Bereich ist eine Leitschaufelreihe integriert, welche über das Lager mit Verzahnung in jede beliebige Position verdreht werden kann. Während des Betriebes wird die Verzahnung über ein Ritzel geklemmt, so dass die Leitschaufelreihe nicht durch die Strömung angedreht werden kann.

Stromabwärts befindet sich ein Deswirler, welcher die Strömung in eine axiale Abströmung umlenkt.

Im hinteren Bereich findet sich der Diffuser, welcher die Strömung wieder in einen Kreisquerschnitt für die Windkanalleitung überführt. Der Diffuser ist von Pan J.<sup>30</sup> so ausgelegt worden, dass durch das Verhindern einer Ablösung in diesem Bereich keine Beeinflussung des Messbereiches erfolgt.

---

<sup>30</sup> Vgl. Pan 2008, S.34-36.

## ***4 VERSUCHSAUFBAU***

In diesem Kapitel wird näher auf den mechanischen Aufbau der Ringgitterkaskade eingegangen. Aufgrund der Tatsache, dass dieses Kapitel auch als eine Bedienungsanleitung für eventuell nachfolgende Projekte dienen soll, wird in den folgenden Seiten besonderer Wert auf detailgetreue und lückenlose Nachvollziehung gelegt. Die Verständlichkeit wird durch eine hohe Anzahl an Bildern unterstützt.

Um dieses Kapitel über den Versuchsaufbau übersichtlicher zu gestalten, wird an dieser Stelle der Ablauf kurz angerissen.

Zu Beginn wird auf die zu treffenden Vorbereitungen eingegangen. Diese erstrecken sich über die Demontage der bereits vorhandenen Komponenten sowie das Vorbereiten der Ringgitterkaskade für einen reibungslosen Zusammenbau. Des Weiteren wird der Aufbau eines Krans erklärt, welcher für den späteren Einbau des Prüfstandes in die Windkanalleitung im Turbolabor des Instituts für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik erforderlich ist.

Da ein Großteil der Messtechnik nach dem Zusammenbau von außen nicht mehr zugänglich ist, wird die Applikation dieser im zweiten Unterkapitel beschrieben. Dies umfasst die fest installierte messtechnische Instrumentierung zur Erfassung des Betriebspunktes sowie die Messtechnik für den zu untersuchenden Übergangskanal (Zwischendiffusor) C5.

Im dritten Unterkapitel wird detailliert der Zusammenbau der Ringgitterkaskade erörtert und auf die einzelnen Komponenten eingegangen.

Nach dem Zusammenbau erfolgt der Einbau in die Windkanalleitung. Dazu wird sich neben dem Einbau auch mit der späteren Zugänglichkeit des Strömungskanals auseinandergesetzt.

Abschließend werden noch weitere Arbeiten, welche zur Inbetriebnahme des Prüfstandes erforderlich sind, im fünften Unterkapitel beschrieben.

## 4.1 VORBEREITUNGEN FÜR DEN AUFBAU

Vor dem Aufbau und Zusammenbau der Ringgitterkaskade erweist es sich als vorteilhaft folgende Vorbereitungen zu treffen, wobei von einem Arbeitsplatz an welchem längere Zeit ungestört gearbeitet werden kann, auszugehen ist.

### 4.1.1 DEMONTAGE DER VORHANDENEN DREHVORRICHTUNG

Die Drehvorrichtung war ursprünglich in der transsonischen Versuchsturbine des Instituts für thermische Turbomaschine und Maschinendynamik installiert und wird in diesem Kapitel zur Anwendung als Ringgitterkaskade adaptiert. Eine Schnittdarstellung der transsonischen Versuchsturbine ist dem Anhang zu entnehmen.

Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 stellen das Abluftgehäuse mit der montierten Drehvorrichtung sowie der eingesetzten Innenkontur des Zwischendiffusers, welcher ebenso für die Ringgitterkaskade benötigt wird, dar.

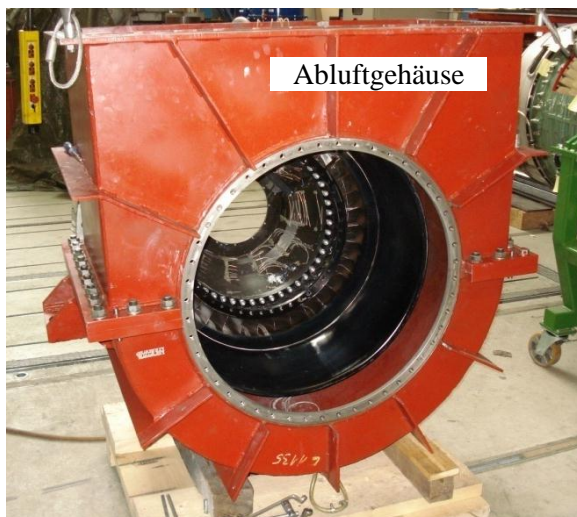


Abbildung 4-1: Darstellung des Abluftgehäuses

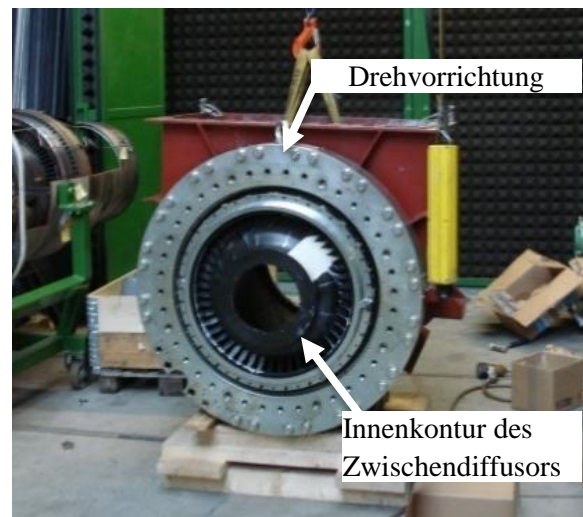


Abbildung 4-2: Darstellung der Drehvorrichtung

Nachdem alle, die Innenkontur und das Abluftgehäuse verbindenden Schrauben entfernt wurden, klemmt die Innenkontur nur mehr durch die Passung am äußeren Umfang. Zur Demontage im horizontalen Zustand wird eine eigens für diesen Zweck konstruierte Vorrichtung von der hinteren Seite eingesetzt und mittels Hallenkran bis in die Horizontale angehoben. Die Vorrichtung dient dem Herstellen eines Gleichgewichtszustandes, so dass durch leichte Krafteinwirkung von vorne der Mittelteil zurückrutschen und auf der Vorrichtung aufschweben kann.

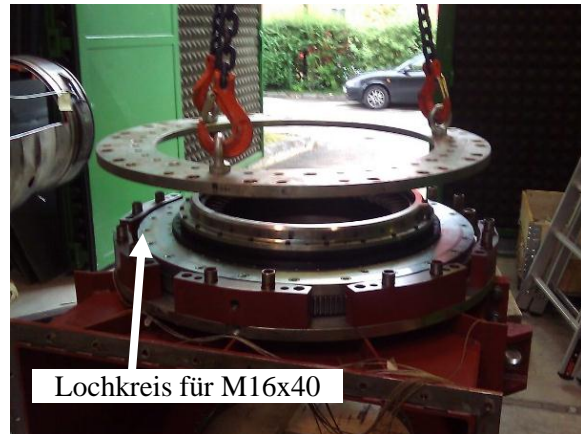
Vorsicht gilt den Leitschaufeln, welche bei dieser Demontage nicht am Rand anstoßen dürfen.



Zur leichteren Demontage der Drehvorrichtung wird das rote Abluftgehäuse wie in Abbildung 4-3 umgelegt.



*Abbildung 4-3: Darstellung des Anhebens der Drehvorrichtung*



*Abbildung 4-4: Abheben der Deckplatte der Drehvorrichtung*

Durch das Lösen der M24x150 Sechskantschrauben kann die Deckplatte wie in Abbildung 4-4 ersichtlich angehoben werden. Um ein gerades Anheben zu gewährleisten, ist eine Dreipunktbefestigung am Kran erforderlich. Damit wird eine Verkantung an den Passhülsen und somit ein erhöhter Kraftaufwand vermieden.

Im nächsten Schritt wird der mittig sitzende zweigeteilte Zentrierring abgeschraubt. Dabei sind die M8x60 Zylinderkopfschrauben, welche den Ring mit dem Schaufelring verbinden, zu lösen.

Zum Abheben der ND-Leitschaufelreihe werden die M16x40 Schrauben, welche in Abbildung 4-4 am größten Teilkreisdurchmesser liegen, gelöst. Unter keinen Umständen dürfen die schwarzen Schrauben in der Nähe der Leitschaufeln gelöst werden, da diese die Positionierung der Leitschaufeln zueinander definieren. Würden diese gelöst, müsste eine neue Zentrierung aller Leitschaufeln durchgeführt werden.

Um die Turbinenschaufelreihe anheben zu können, werden Gewindehaken in die dafür vorgesehenen drei Bohrungen an der Scheibe eingedreht und die Lasthaken eingehängt.

Nachdem die Einheit mit den Leitschaufeln entfernt wurde, wird das kombinierte Lager mit Verzahnung sichtbar. Im weiteren Schritt werden die im Abbildung 4-5 dargestellten Schrauben M16x60 entfernt und in den zwei am selben Teilkreis befindlichen Gewindebohrungen die Lastösen zum Anheben des Lagers eingeschraubt. Auf diese Weise kann nun das Lager mit dem Kran abgehoben werden.

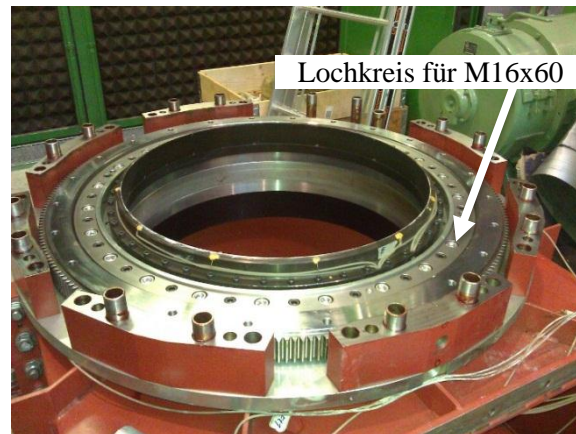


Abbildung 4-5: Darstellung des kombinierten Lagers mit Verzahnung

Es befindet sich nun nur mehr die hintere Befestigungsplatte an dem Abluftgehäuse. Dazu werden die Schrauben aus dem Lochkreis für M24x55, wie in Abbildung 4-6 ersichtlich, entfernt und der Lasthaken des Kranes in die eingeschraubten Ösen eingehängt.

Bevor die hintere Befestigungsplatte in Abbildung 4-6 abgehoben wird, soll das Markieren der radialen Position zwischen der in schwarz dargestellten Ringkontur und der Befestigungsplatte die spätere Repositionierung erleichtern. Die in Abbildung 4-6 ersichtlichen Druckschläuche werden an dieser Stelle vorsichtig ausgezogen, so dass die Ringkontur problemlos durch das Lösen der M8x60 Zylinderkopfschrauben abgehoben werden kann.

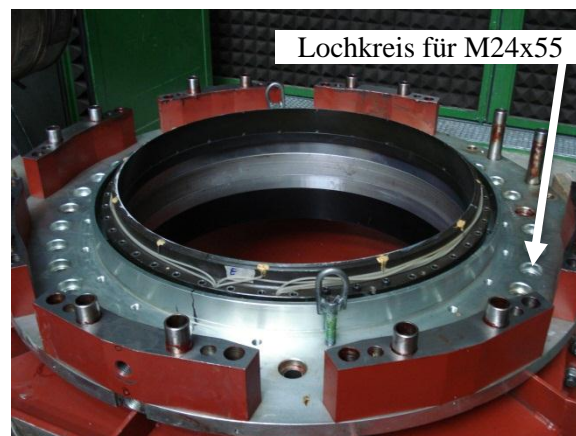


Abbildung 4-6: Darstellung des unteren Teiles der Drehvorrichtung

Damit ist die Zerlegung der Drehvorrichtung abgeschlossen. Es empfiehlt sich die Einzelteile auf einer Palette zu lagern und zum Schutz vor Verschmutzung abzudecken. Vor der Montage müssen die Einzelteile gereinigt werden.

#### 4.1.2 LACKIEREN

Das Lackieren der Kaskade hat korrosionsschützende Wirkung. Dabei ist darauf Acht zu geben, dass Flächen, die aufgrund ihrer Funktion als Pass- oder Dichtflächen ausgeführt sind, nicht lackiert werden dürfen. Um ein Beeinflussen der Strömung zu verhindern, muss des Weiteren bei den strömungsführenden Teilen darauf geachtet werden, dass ein Auftragen des Lackfilms dünn erfolgt und keinesfalls Tränen zieht. Für das Trocknen des Lackes wird eine saubere und staubfreie Umgebung vorausgesetzt.

#### 4.1.3 AUFSTELLEN DES DIFFUSORS UND EINBAU DES MOTOR

Für die späteren Arbeiten erweist es sich als notwendig den Diffusor in vertikaler Position aufzustellen. Dadurch gestaltet sich die Zentrierung sämtlicher darauf aufbauender Bauteile erheblich einfacher und es können die Bauteile mit dem Hallenkran aufgesetzt werden.

Nach dem Zerlegen der Drehvorrichtung wird das rote Abluftgehäuse mit der Flanschseite für die Drehvorrichtung nach oben unter den Diffusor gelegt. Die Abbildung 4-7 verdeutlicht diesen Aufbau. Dadurch entsteht ein Zugang zum Diffusor von unten, welcher zum Verschrauben der innenliegenden Komponenten benötigt wird. Aus sicherheitstechnischen Gründen muss der Diffusor während den Arbeiten von unten immer am Lasthaken des Krans eingehängt sein.



Abbildung 4-7: Aufstellen des Diffusors auf das Abluftgehäuse

Vorbereitend für das Aufsetzen der Innenkontur des Zwischendiffusors auf den Diffusor wird der Motor mittels Kran von oben in den aufgestellten Diffusor gehoben. Da der untere Ausgang des Diffusors kleiner als der Motor ist, kann er nicht nach unten hinausfallen. Die Einrichtung des Motors erfolgt zusammen mit dem Aufbau der Innenkontur des Zwischendiffusors gemäß Kapitel 4.3.1. Die

Kabel des Motors werden vorerst nach oben herausgeführt und erst zum späteren Zeitpunkt gemäß Kapitel 4.3.1 durch die Rippen des Diffusors gezogen. Dieser Sachverhalt ergibt sich durch die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht definierbare Rippe, welche sich aus Strömungsrichtung blickend rechts oben befinden wird.

#### 4.1.4 AUFBAU DES KRANS IM TURBOLABOR

Damit der Aufbau der Ringgitterkaskade reibungslos erfolgen kann, ist ein Portalkran mit einem Handkettenzug und einer Nutzlast von 2 Tonnen zu installieren. Die Wahl auf den Handkettenzug fiel einerseits aus Kostengründen und andererseits aus der Auflage heraus, dass im Turbolabor die Richtlinien für einen Explosionsschutzraum eingehalten werden müssen. Um die Raumhöhe optimal auszunutzen, besitzt der Kran eine Höhenverstellung über eine rechts und links angebrachte Zahnstange. Diese darf nur ohne Last verstellt werden und wird während des Hebevorgangs mit einem Bolzen gesichert.

Der Kran kommt wie in Abbildung 4-8 ersichtlich zusammengelegt mit Rollen, welche später die Stützrollen des Krans darstellen. Aufgrund des Platzmangels im Turbolabor müssen die Träger einzeln zum Montageort gebracht werden. Da dort keine Hebemöglichkeit zur Verfügung steht, werden an der Decke Schlaufen montiert, mit deren Hilfe der Kran aufgerichtet werden kann. Der erste Schritt ist das Bereitlegen des Trägers mit den Stützrollen am Aufstellungsort, wobei es sich als sinnvoll erweist, zuerst mit dem Träger an der hinteren Seite (zwischen den Rohren) zu beginnen. Dazu wird der Vertikalträger unter den Rohren durchgefädelt und zwischen den Rohren zum Liegen gebracht. Mittels eines Handkettenzugs, welcher an der zuvor montierten Schlaufe im Deckenbereich eingehängt wird, kann der Träger wie in Abbildung 4-9 ersichtlich in die Vertikale gebracht werden. Vorsichtig wird so weit angehoben, bis der Träger mit den Rollen darunter gefahren und verschraubt werden kann. Damit der Handkettenzug frei zum Aufstellen des zweiten Vertikalträgers ist, wird das Befestigen des Trägers in der Vertikalen mit einem Zurrigurt erforderlichlich.



Abbildung 4-8: Angelieferter Kran

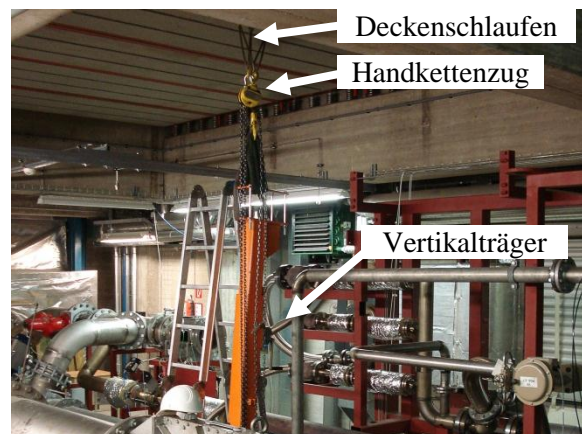


Abbildung 4-9: Aufstellen des Vertikalträgers







Abbildung 4-11: Stahlträger als Laufbahn des Krans

Für ein problemloses Anheben der Ringgitterkaskade muss der zweite Vertikalträger soweit als möglich am Hallenrand platziert werden. Dies geschieht durch ein mittiges Anheben des Horizontalträgers, wodurch die Vertikalträger vom Boden abgehoben und nach außen geschoben werden können. Im selben Schritt werden die Träger mit den Rollen im rechten Winkel zum Horizontalträger ausgerichtet, wodurch ein Geradlauf gesichert ist. Der fertig aufgestellte Kran und die Position der Vertikalträger kann der Abbildung 4-13 entnommen werden.



Abbildung 4-12: Verschraubung der Vertikalträger



Abbildung 4-13: Portalkran

## 4.2 INSTALLATION DER MESSTECHNIK

In diesem Kapitel soll näher auf die feste Installation der Messtechnik in der Ringgitterkaskade eingegangen werden. Die Abbildung 4-14 zeigt die Komponenten, in welchen eine Applikation der Messtechnik durchgeführt ist.

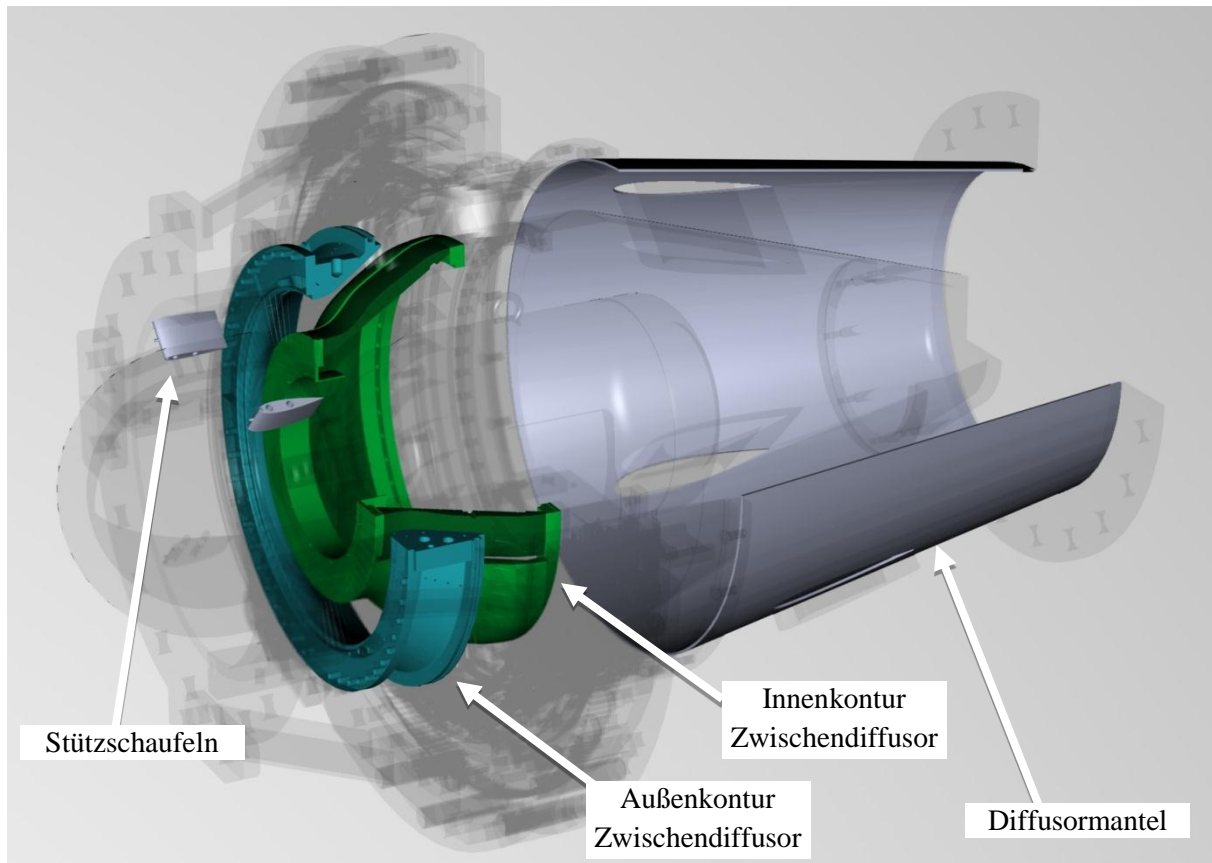


Abbildung 4-14: Bereiche in denen die Messtechnik installiert wird

Hierbei findet in den beiden Stützschaufeln im Einlauf die Messung des Totaldruckes bzw. der Totaltemperatur statt.

An der Außen- und Innenkontur des Zwischendiffusers wird der statische Druck mit Hilfe von Wanddruckbohrungen aufgezeichnet. Die Außenkontur besitzt neben den Wanddruckbohrungen, Zugänge für das Messen mit Fünflochsonden und Lasermessmethoden. An der Innenseite des Prüfstandes befindet sich eine Kamera, welche für den Ölanstrich einen Ausschnitt an der Außenkontur des Zwischendiffusers beobachtet.

Im Diffusormantel im hinteren Bereich der Ringgitterkaskade wird über sechs Wanddruckbohrungen wieder der statische Druckverlauf beobachtet.

Folglich gliedert sich das Kapitel in die Messinstallationen am Einlauf, der Installation der statischen Druckmessbohrungen sowie die Installation der Kamera.

#### 4.2.1 MESSINSTALLATIONEN AM EINLAUF

Um die Zuströmbedingung hinsichtlich des Totaldruckes und der Totaltemperatur messtechnisch zu erfassen bieten sich die beiden vorderen Stützschaufeln im Einlauf an.

Dazu wird wie in Abbildung 4-15 ersichtlich einer Druckmessbohrung, für die Messung des Totaldruckes und einem Temperatursensor zur Messung der Totaltemperatur in die Stützschaufeln integriert. Zusätzlich ergibt sich für die Installation der Messtechnik in den Stützschaufeln der Vorteil, dass der ankommende Luftstrom so gering wie möglich beeinflusst wird. Da wie bereits erwähnt, vor allem der obere Bereich für die Vermessung interessant ist, werden auch diese Bohrungen an den oberen Stützschaufeln gesetzt.

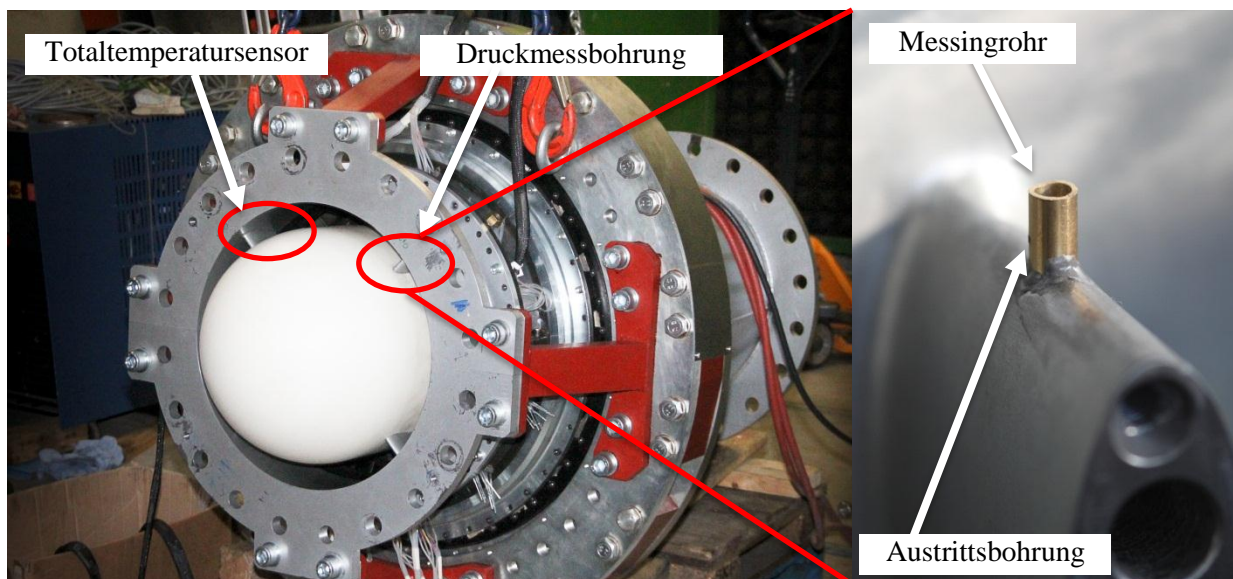


Abbildung 4-15: Einlauf mit Druck - und Temperaturmesspunkt

Wie aus der Theorie bekannt, bildet sich im Einlauf trotz stark beschleunigter Strömung eine Grenzschicht im wandnahen Bereich aus. Um diesen Bereich bei der Messung zu meiden, wird die Bohrung 1 in Abbildung 4-16 von der Höhe her in der Kanalmitte gesetzt.

Damit der Totaldruck, bzw. die Totaltemperatur gemessen werden können, muss die Strömung im Messbereich aufgestaut werden. Um die Empfindlichkeit der Messung hinsichtlich einer Fehlanströmung zu senken, erfolgt ein Anbringen des in Abbildung 4-15 dargestellten Messingrohres an der Schaufelnase. Das Rohr besitzt seitlich Austrittsbohrungen mit einem Durchmesser von 0,8 mm, wodurch es nicht zu einem Totwassergebiet rund um den Messpunkt kommen soll. Hierdurch erfolgt eine bewusste Messbeeinflussung dahingehend, dass die Strömungsgeschwindigkeit am Messpunkt nicht Null beträgt. Für eine exakte Messung würde sich daraus die Voraussetzung zum Finden eines sogenannten Recoveryfaktors ergeben. Da für den gewünschten Anwendungsbereich die Temperatur nicht derart exakt bekannt sein muss, kann die Temperaturmessung ohne Recoveryfaktor durchgeführt werden.



Für die Umsetzung der Messbohrungen werden zwei senkrecht aufeinander stehende Bohrungen (Bohrung „1“ und „2“ in Abbildung 4-16) gesetzt. Für die Druckbohrung (Bohrung „1“), welche sich in Strömungsrichtung blickend auf der rechten Stützschaufel befindet, wurde ein 0,8 mm Loch in die Stützschaufel gebohrt. Für die Temperaturmessung ist aufgrund des Durchmessers des Thermoelementes ein Loch an der linken Stützschaufel mit einem Durchmesser von 1,5 mm erforderlich. Um die Bohrung „1“ nach außen hin zugänglich zu machen, ist knapp hinter der Schaufelnase eine Bohrung „2“ mit einem Durchmesser von 5 mm angeordnet. Der Lochdurchmesser ergibt sich einerseits durch den Biegeradius für das Thermoelement und andererseits durch die Dicke des Profils in diesem Bereich.

Der Lochdurchmesser von 5 mm für die Bohrung „2“ beeinflusst die Druckmessung dahingehend, dass die Reaktionsgeschwindigkeit auf Druckänderungen verlangsamt wird. Für die Anforderung hinsichtlich der Messung des Totaldruckes im Betriebspunkt stellt dies kein Problem dar. Damit ein Druck abgefasst werden kann, befindet sich im oberen Bereich (Position „3“ in Abbildung 4-16) ein Rohr mit einem Innendurchmesser von 0,8 mm, welches rundum mit Epoxidharz vergossen wird. Das Thermoelement wird durch die Bohrung „1“ gefädelt und steht etwa 3 mm in das Messingrohr aus Abbildung 4-15. Gleich wie bei der Druckbohrung ist das obere Ende mit Kleber zu vergießen. Zum Abschluss der Bohrung nach unten hin werden kleine Stoppel („4“ in Abbildung 4-16) mit Epoxidharz eingegossen.

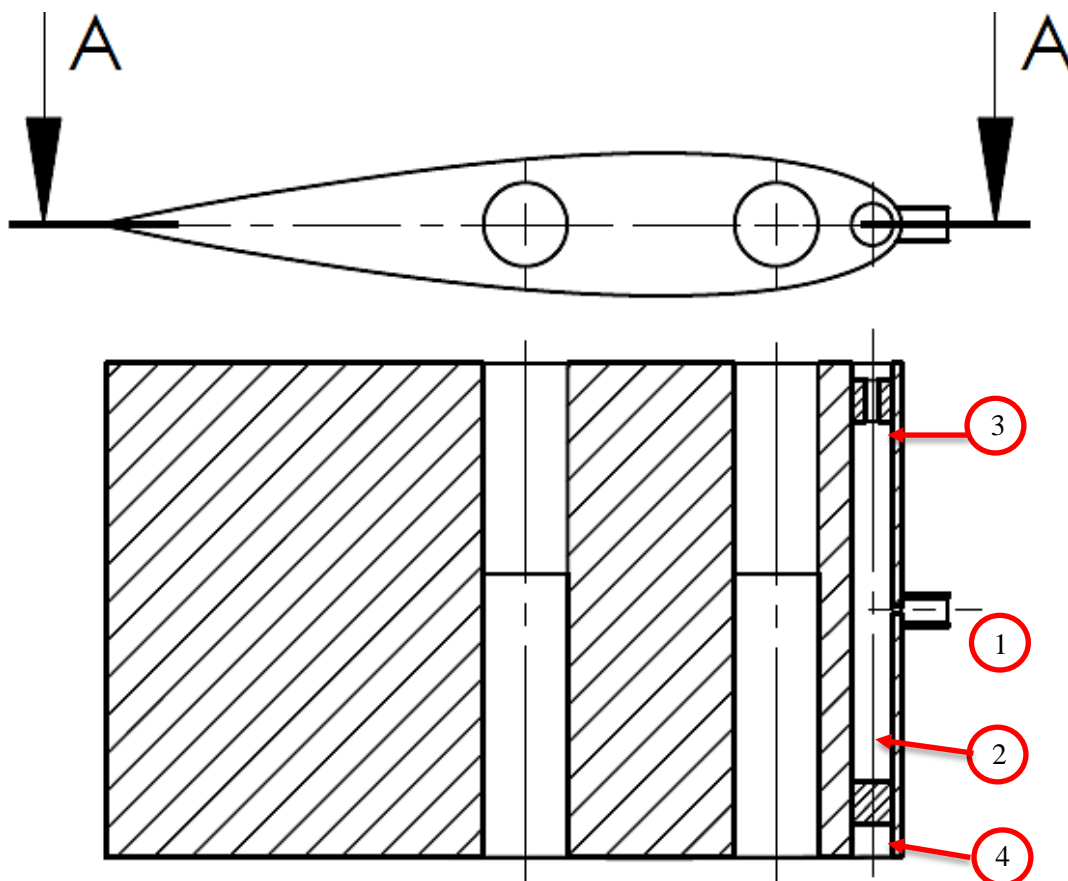


Abbildung 4-16: Querschnitt durch die Einlaufschaufel mit gesetzten Bohrungen

Um die Messabweichung des verwendeten Thermocouple zu kennen, wurde eine Temperaturkalibrierung, dessen Messaufbau in Abbildung 4-17 ersichtlich ist, durchgeführt. Mit dem Kalibrierofen Omega CL-710A wird eine innenliegende Flüssigkeit auf die gewünschte Temperatur gebracht. Da die Genauigkeit des Ofens nicht ausreicht, muss eine Referenzmessung mit aufgenommen werden. Dies geschieht durch das gelbe Messgerät GMH 3750 des Fabrikats Greisinger Elektronik. Bei dem links davon liegenden schwarzen Messgerät handelt es sich um ein Fluke 52 K/J Thermometer, an welchem das später in die Ringgitterkaskade verbaute Thermocouple angeschlossen ist. Das Thermocouple vom Typ K nach TKI 15/100/DIN besitzt einen Messbereich von -200 °C bis 1370 °C und ist ebenso in das Becken des Kalibrierofens eingeführt.



Abbildung 4-17: Darstellung der Temperaturkalibrierung

Für die Kalibrierung wird die Flüssigkeitstemperatur im Kalibrierofen nach der Tabelle 4-1 eingestellt. Nach dem Erreichen der jeweiligen Temperatur muss dem System etwa 5 Minuten Akklimatisationszeit gegeben werden, bevor die Messwerte abgelesen werden können. Der gewählte Kalibrierbereich von 30 °C bis 80°C entspricht dem späteren erforderlichen Messbereich in der Ringgitterkaskade.

Tabelle 4-1: Temperaturkalibrierung

Kalibrierofen °C	Referenzmessgerät °C	Messelement °C	$\Delta T$
30	30,49	30	0,49
40	40,51	39,9	0,61
50	50,64	50,1	0,54
60	60,65	60,1	0,55
70	70,65	70,1	0,55
80	80,56	80,1	0,46

Daraus folgt eine durchschnittliche Messabweichung von 0,53 °C, wodurch für den Einsatz dieses Thermocouples keine Korrektur vorgenommen werden muss.

#### **4.2.2 ALLGEMEINES ZUR DRUCKMESSINSTALLATION IN DER RINGGITTERKASKADE**

Für die Bestimmung der Ablösung werden neben dem später durchgeführten Ölanstrich die Wanddrücke aufgenommen. Aufgrund der Symmetrie der Kaskade ist es ausreichend, die obere Hälfte zu vermessen. Auf der Unterseite kann vom gleichen Wanddruck ausgegangen werden. Leichte Abweichungen sind auf eine ungenaue radiale Zentrierung der Komponenten und der daraus folgenden unterschiedlichen Stufen für die Strömung zurückzuführen. Eine Testmessung für die Kontrolle der Zentrität wird zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt.

Die Aufnahme der Wanddrücke erfolgt mittels Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,5 mm senkrecht auf die jeweilige Oberfläche. In diese werden kurze Rohrstücke mit einem Innendurchmesser von 0,8 mm eingeklebt. Zum Einkleben wird ein 24h Epoxidharz verwendet, bei dem das Anrühren des Harzes entsprechend der Anleitung auf der Rückseite der Packung erfolgt. Es gilt darauf zu achten, dass keine Klebertropfen die Rohrenden verkleben. Würde dies der Fall sein, würde sich bei der Messung nicht der Druck an der Wand, sondern der Atmosphärendruck einstellen. Da manche Messpunkte einen erwarteten Wert auf Höhe des Atmosphärendruckes besitzen, kann nicht festgestellt werden, ob es sich um einen Messfehler oder um einen tatsächlich vorhandenen Wert handelt.

Diese eingeklebten Rohrstücke sind strömungsseitig mit der Wandkontur zu verschleifen, so dass keine Verfälschung der Messergebnisse durch ein vorstehendes Rohr erfolgt. Am inneren Ende der Rohrstücke werden Druckmessschläuche aus Silikon mit einem Innendurchmesser von 0,8 mm angeschlossen.

Die abweichenden Installationen zwischen der Innen- und Außenkontur des Zwischendiffusors sind nachfolgend gesondert beschrieben.

#### **4.2.3 DRUCKMESSINSTALLATIONEN AN DER INNENKONTUR DES ZWISCHENDIFFUSORS**

Für die Installation an der Innenkontur wird eine Schlauchlänge von 4,5 m verwendet und wie in Abbildung 4-18 dargestellt, an den eingeklebten Rohrstücken angeschlossen. Die Länge der Schläuche wird benötigt, um aus der Kaskade heraus in den Druckmessschrank zu gelangen.

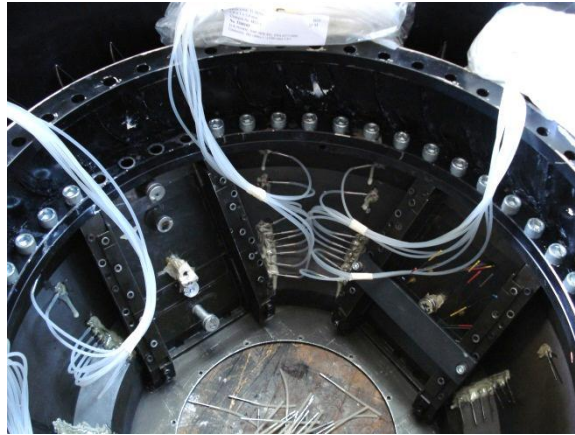


Abbildung 4-18: Anschluss der Druckmessschläuche an der Innenkontur des Zwischendiffusers

Es ist gemäß Abbildung 4-19 zu erkennen, dass die Druckmessbohrungen am Umfang verteilt in Reihen entlang der Strömungsrichtung angeordnet sind. Grundsätzlich können an jeder solchen Reihe 13 Druckmessbohrungen ausgemacht werden.

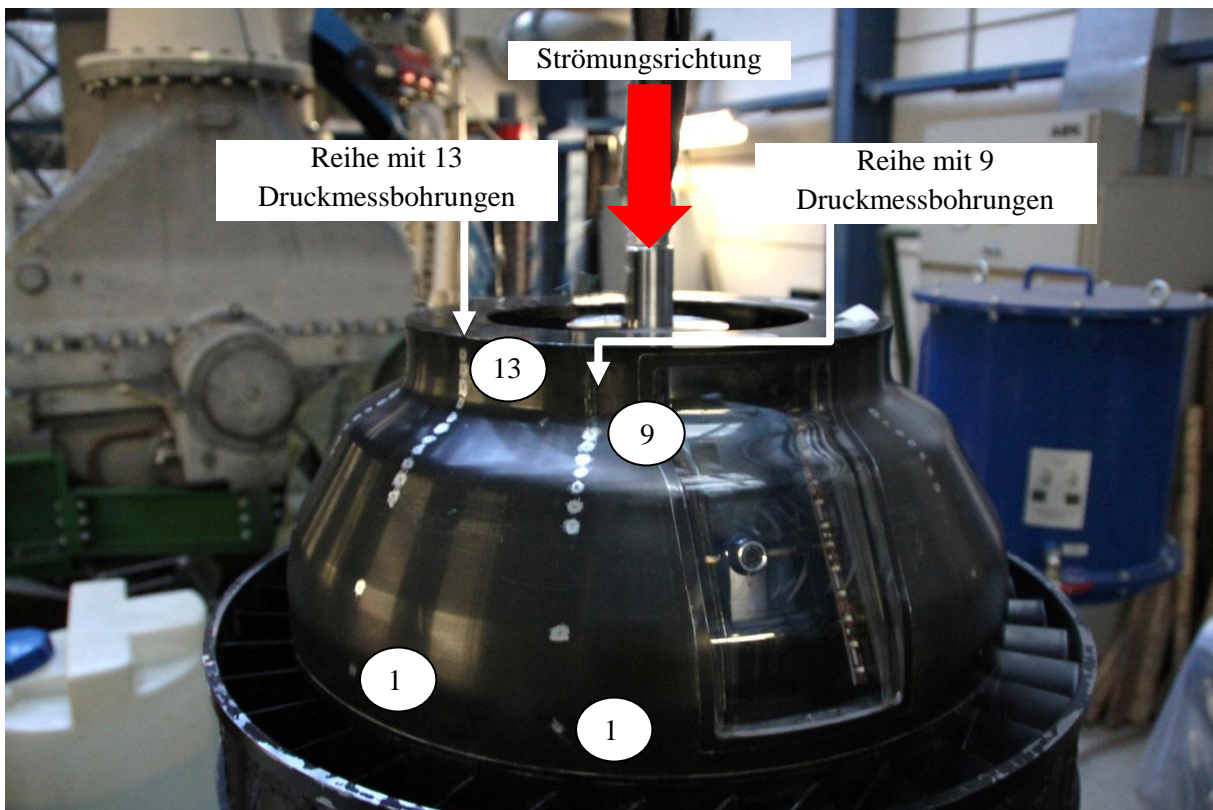


Abbildung 4-19: Positionskreisbestimmung an der Innenkontur des Zwischendiffusers

Aufgrund von Einbauten wie dem Fenster (Abbildung 4-19) können manche dieser Reihen nicht vorne begonnen werden. Daher finden sich in solch einer „kurzen“ Reihe nur neun Druckmessbohrungen. Die axiale Position aller Druckmessbohrungen ist natürlich über diese besagten Reihen hinweg gleich, was zur besseren Übersicht dazu veranlasst entgegen der Strömungsrichtung zu zählen. Das



Schnittbild, sowie die axialen Positionen sind der Tabelle A-1 und der Abbildung A-1 im Anhang zu entnehmen.

Des Weiteren müssen die Reihen für die spätere Zuordnung unterschieden werden. Dazu werden Buchstaben beginnend mit „A“ den unterschiedlichen Reihen zugeordnet. Die Abbildung 4-20 verdeutlicht die Zuteilung der Buchstaben, wobei in Strömungsrichtung blickend im Uhrzeigersinn gezählt wird. Es gilt zu berücksichtigen, dass diese Abbildung von innen aufgenommen wurde und daher die Beschriftung entgegen dem Uhrzeigersinn entspricht. Die Abkürzung GSZ steht hierbei für die Grenzschichtzäune, welche in diesem Bereich für Messungen durch Nachfolgeprojekte angeschlossen wurden.

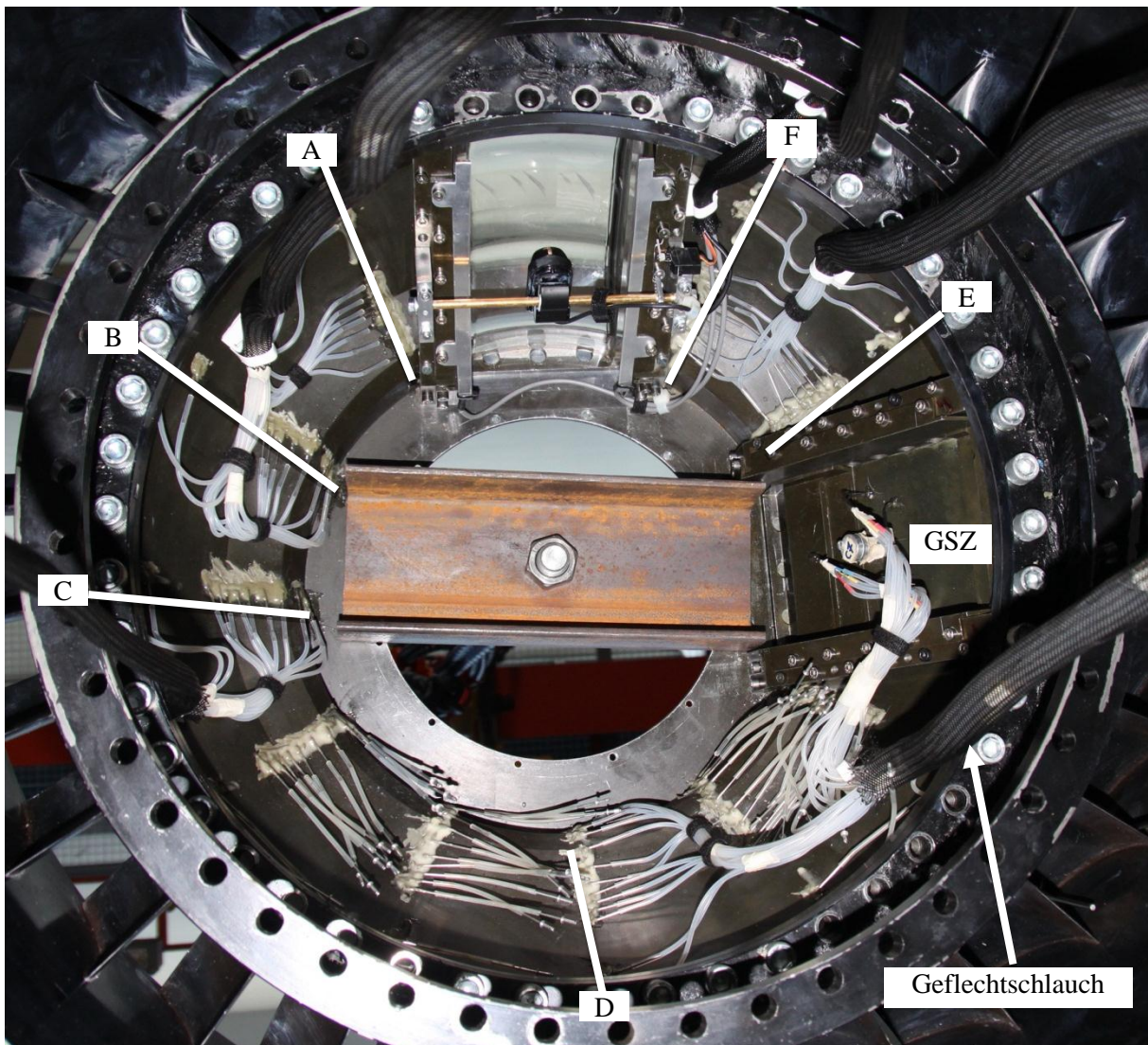
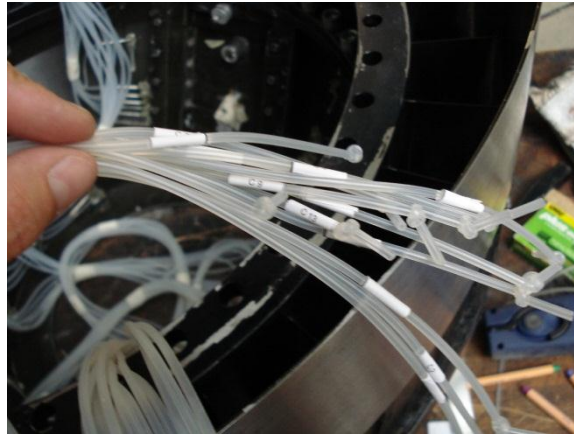


Abbildung 4-20: Druckmessreihen an der Innenkontur des Zwischendiffusors

Für eine spätere Zuordnung zu den einzelnen Druckmessbohrungen wird jeder Schlauch gemäß Abbildung 4-21 mit einem Aufkleber versehen. Jeder Aufkleber besitzt einen Buchstaben für die Reihenzuordnung und eine Zahl, welche repräsentativ für den axialen Abstand ist.



*Abbildung 4-21: Etikettierung der Druckmessschläuche*

Um bei diesen vielen Schläuchen eine Übersicht zu wahren, werden die Schläuche je Reihe (Abbildung 4-20) zu einem Bündel zusammengefasst. Die Bündel werden in einen Geflechtsschlauch mit einem Durchmesserbereich von 12 mm bis 32 mm und 2 m Länge eingezogen, so dass sie neben dem Motor vorbei durch die Stützrippen im Diffusor nach außen gezogen werden können, ohne sie dabei zu verletzen. Damit diese Bündel nicht am Motor anstreifen, werden die Schlauchbündel wie in Abbildung 4-20 ersichtlich mit Hilfe von Kabelbefestigungen an der Wand befestigt. Am Ende werden die einzelnen Reihen noch einmal mit einem Abdeckband gruppiert und mit Reihenbuchstaben versehen. Damit die Schläuche nicht verschmutzen, werden sie wie in Abbildung 4-21 am Ende verknotet und anschließend in eine Plastikhülle gegeben.

Neben den installierten Druckmessschläuchen muss für die in Kapitel 4.2.4 installierte Kamera die eigens für diesen Zweck angefertigte Plexiglasscheibe eingesetzt werden. Dies erfolgt an der Position, die aus Abbildung 4-20 entnommen werden kann.

Hierbei wird zuerst die Scheibe in dem in Abbildung 4-22 ersichtlichen Rahmen eingesetzt. Eine Erwärmung des Rahmens auf 80 °C ist zulässig und kann den Einbau der Scheibe erleichtern. Auf der Außenseite muss auf eine stufenlose Kontur geachtet werden, welche die Strömung nicht stört. In weiterer Folge wird das Fenster gemäß Abbildung 4-23 in die Innenkontur eingesetzt und dabei wie schon beim Einsetzen des Fensters auf eine plane Außenkontur geachtet. Um dies zu realisieren müssen unterschiedlich dicke Beilagen zwischen den Rahmen und dem Flansch der Innenkontur beigelegt werden. Aufgrund des Anzugsmomentes der acht Stück M4x12 Schrauben und den sich dabei verändernden Vorsatz in der Kontur kann ein stufenloses Anliegen nur durch mehrmaliges Beilegen und Verschrauben realisiert werden. In der Abbildung 4-23 werden die ermittelten Distanzen für diesen Zusammenbau angegeben.



Abbildung 4-22: Einbau der Plexiglasscheibe

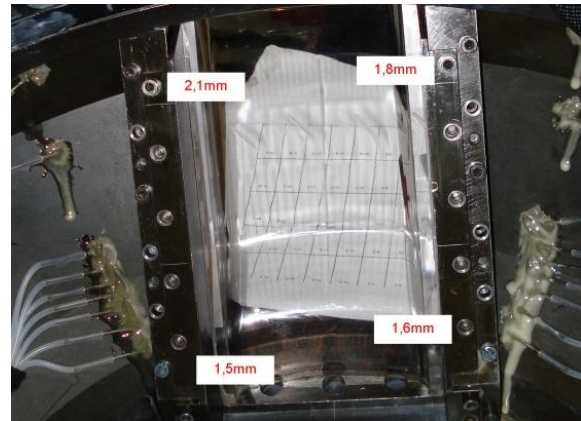


Abbildung 4-23: Distanzen für Einbau des Fensters

#### 4.2.4 HERSTELLUNG UND INSTALLATION DES KAMERATRÄGERS

Zur Beobachtung des Ölanstriches an der Außenwand des Kanals ist ein optischer Zugang erforderlich. Es kann hier die bereits eigens für solche Zwecke vorhandene Plexiglasscheibe genutzt werden. Durch den Aufbau wird es zu einem späteren Zeitpunkt nicht möglich sein zur Innenseite der Plexiglasscheibe zu gelangen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Kamera permanent in der Kaskade zu installieren. Aufgrund des geringen Platzes im Inneren der Maschine muss die Kamera neben einer flachen Bauform eine kurze Fokusslänge von etwa 7 cm aufweisen. Um auf den später aufgetragenen Ölanstrich scharf stellen zu können, muss die Kamera die Eigenschaft besitzen, den Fokus mit Hilfe des Computers einstellen zu können.

Unter einem preislichen Gesichtspunkt fiel die Wahl auf die Kamera „Logitech Portable Webcam C905“ welche die oben beschriebenen Funktionen erfüllt.

Da diese Kamera als Webcam Anwendung findet, musste eine Möglichkeit gefunden werden, diese in die Kaskade zu verbauen. Nach einem ersten Funktionstest der Kamera wurde festgestellt, dass diese nicht den gesamt zu betrachtenden Bereich abdeckt. Zur Abhilfe wurde ein Kurbeltrieb, wie in Abbildung 4-24 ersichtlich, entwickelt.

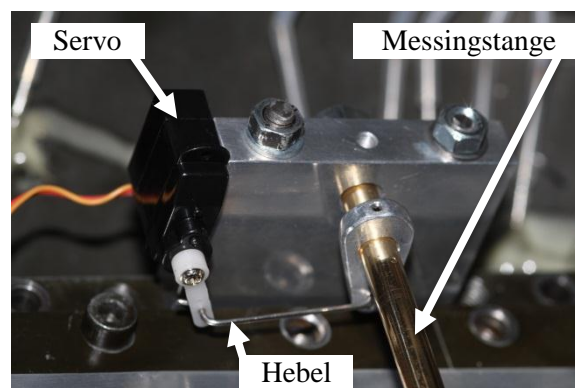


Abbildung 4-24: Anlenkung des Kameraträgers



Zum Antrieb des Kurbeltriebes wird ein Servo der Type Expert MEX-8 aus dem Modellbausektor mit ein Drehmoment von ca. 10 Ncm und einer Versorgungsspannung von 6 V aufgebaut. Dies kann als ausreichend für die hier benötigte Funktion angesehen werden.

Als Steuerglied wird ein SMD-Servotester, ebenfalls aus dem Modellbausektor verwendet. Dieser erzeugt bei einer konstanten Gleichstromversorgung von 4 – 6 V ein Signal mit einer Breite von 0,75 bis 2,5 ms. Verstellbar ist dieses Signal durch ein Potentiometer. Wird der SMD-Servotester mit dem Servo verpolungsrichtig verlötet und mit der Versorgungsspannung beaufschlagt, beginnt sich das Servo abhängig von der Signalbreite zu drehen.

Da durch den Servotester keine Drehwinkelbegrenzung vorgegeben wird, kann lediglich die Drehrichtung und Drehgeschwindigkeit geregelt werden. Aus diesem Grund wird der Kurbeltrieb dementsprechend ausgelegt. Bei einer drehenden Bewegung des Servos bewegt sich die Messingstange nur oszillierend und legt dabei einen Winkel von ca. 35° nach rechts und links zurück. Die Abbildung 4-25 verdeutlicht die Bewegung der Kamera bzw. der Messingstange bei einer Umdrehung des Servos.

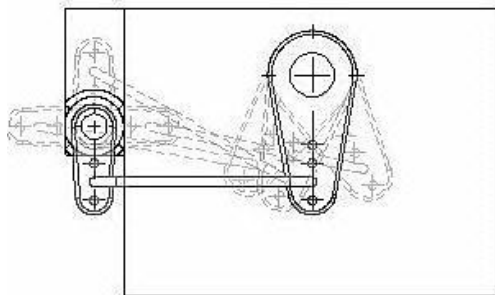


Abbildung 4-25: Bewegungsstudie des Kameraträgers

Befestigt wird der zusammengebaute Kameraträger mit vier Stück M5x60 Gewindestangen und den dazugehörigen Muttern am Fensterrahmen der Innenkontur des Zwischendiffusers gemäß Abbildung 4-26. Die axiale Sicherung der Messingstange erfolgt über eine rechts und links aufgeschraubte M6 Mutter mit jeweils einer Beilagscheibe hin zum Sockel des Kameraträgers. Es ist beim Anziehen der Muttern Vorsicht geboten, da zu starkes Anziehen die Mechanik verklemmen könnte und damit die oszillierende Bewegung nur eingeschränkt möglich wäre. Zur Sicherung der Mutter empfiehlt sich die Verwendung eines Schraubenklebers.



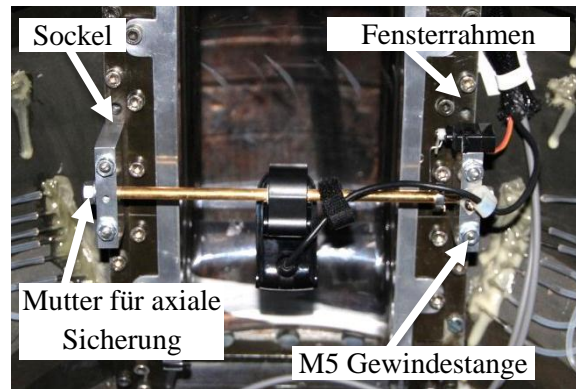


Abbildung 4-26: Einbau des Kameraträgers

Bevor das Servo mit dem eigens dafür gefertigten Hebel eingehängt wird, soll die Mechanik noch einmal auf Leichtgängigkeit überprüft werden. Beim Einhängen ist darauf zu achten, dass die Position wie in Abbildung 4-25 gezeigt eingehalten wird. Leichte Abweichungen dieser Position, hervorgerufen durch einen ungenau gefertigten Hebel, können toleriert werden.

Abbildung 4-27 zeigt den vormontierten Kameraträger mit den eingeschraubten Stellschrauben, welche die Messingstange während der Montage klemmen und somit den Einbau erleichtern. Es erwies sich als ausreichend, die Kamera auf der Messingstange mit Hilfe von Sekundenkleber zu fixieren. Jedoch sollte die Verklebung der Kamera erst nach dem Einbau des Kameraträgers erfolgen, da sich aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten unterschiedlich erforderliche Kamerapositionen ergeben.



Abbildung 4-27: Vormontierter Kameraträger

Zum Einstellen der Kamera empfiehlt es sich mit der Mechanik an einen Umkehrpunkt zu fahren, dort die Stellschrauben einzudrehen und das Kamerabild auf die Kante der Scheibe auszurichten. Anschließend werden die Stellschrauben gelockert und die gegenüberliegende Position angefahren. Hier sollte wiederholt die Glaskante ersichtlich sein. Ist dies nicht der Fall, wird in iterativen Schritten sich den Kanten angenähert. Da aufgrund des Antriebsmotors für das Laufrad nur ein geringer Einbauraum verbleibt, wird die Kamera durch das in der Kamera integrierte Gelenk möglichst parallel zur Wandkontur eingestellt. Abbildung 4-26 stellt die endgültige Montage der Kamera dar.

Die Kamerasteuerung erfolgt über die mitgelieferte Logitech-Webkamera Software Version 12.10.1113.0000. Nach der Installation entsprechend der mitgelieferten Anleitung findet sich das Benutzerpanel wie in Abbildung 4-28. Hierbei wird mit einem Klick auf das „Quick Capture“ Symbol ein Fenster mit dem aktuellen Bild der Kamera geöffnet. Mit einem Klick auf das Symbol „Einstellungen ändern“ öffnet sich das Bedienboard der Kamera. Hier kann neben der Zoomfunktion über den Schieberegler auch der Fokus manuell eingestellt werden. Diese Funktion verhindert ein falsches Scharfstellen auf eventuelle Verunreinigungen an der Scheibe. In weiterer Folge können mit Hilfe der Schieberegler im unteren Bereich die Helligkeit, der Kontrast, die Farbintensität und der Weißabgleich manuell nachgestellt werden. Während des gesamten Versuches soll die Gesichtserkennung und -verfolgung auf „AUS“ gestellt sein. Sämtliche Einstellungen können immer im Fenster mit dem aktuellen Bild der Kamera mitverfolgt werden.

Um eine Aufnahme zu starten, wird im Fenster des aktuellen Kamerabildes auf „Video aufnehmen“ gedrückt.

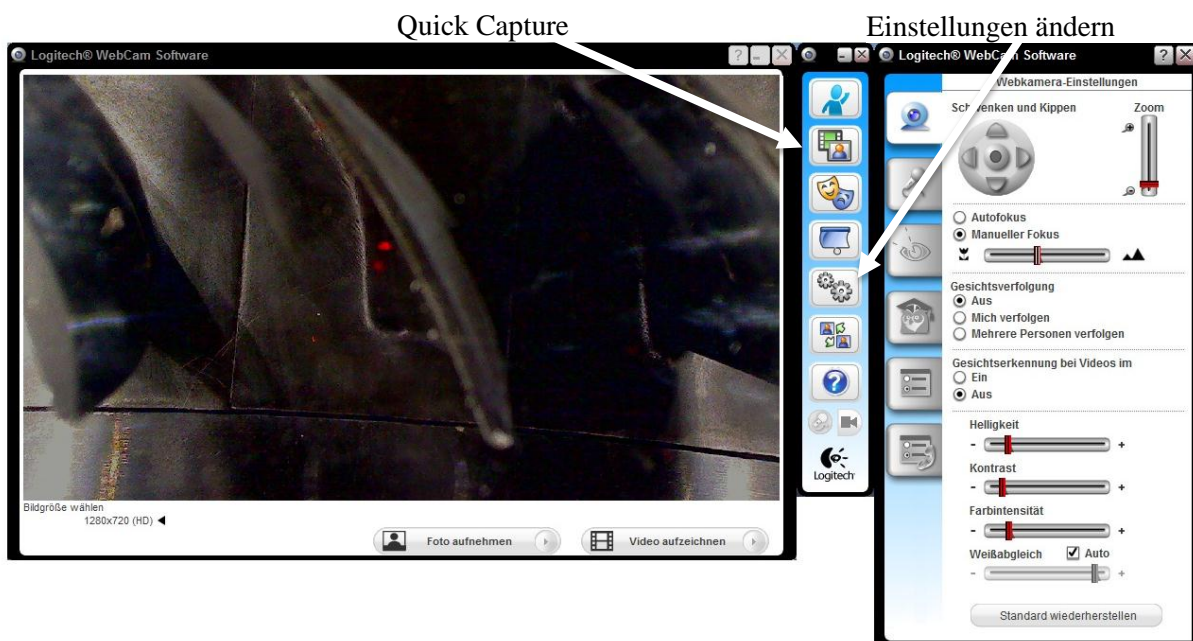


Abbildung 4-28: Logitech - Webkamera Software

Damit der Kanal auch im Bereich des Fensters ausgeleuchtet wird, werden zwei LED – Streifen mit je 12 Stück LED-Lampen, wie in Abbildung 4-29, montiert. Diese werden an den dafür vorgesehenen Stellen mit dem Rahmen des Fensters verschraubt. Um die Justage des Rahmens zu erleichtern, empfiehlt es sich zuerst den Fenstereinbau wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben durchzuführen. Die Anordnung der LED Streifen erfolgt am Rand, so dass die Reflexionen in der gekrümmten Scheibe minimiert werden. Der hervorstehende angeraute Rand spiegelt das ausgestrahlte Licht nicht, so dass es zu einer Minderung von Reflexionen kommt.

Für die Versorgung der LED-Streifen kommt ein handelsübliches Spannungsregelmodul mit einer einstellbaren Spannung von 6 bis 12 V zum Einsatz. Spannungsabhängig ergibt sich die Helligkeit der LED – Lampen nach Abbildung 4-30. Vorsicht sei hier vor Überspannung geboten, welche die Lampen zerstören würde.

Der rechte und linke Leuchtstreifen wird an separaten Kabeln nach außen geführt. Dies ergibt in weiterer Folge den Vorteil, bewusst Schatten für eine bessere Visualisierung des Ölanstriches zu erzeugen. Um eine symmetrische Illumination zu gewährleisten kann das angefertigte Y-Kabel verwendet werden, welches beide Kabel auf einen Anschluss zusammenführt. So kann sichergestellt werden, dass jeder LED – Streifen die idente Spannung und somit Helligkeit besitzt.

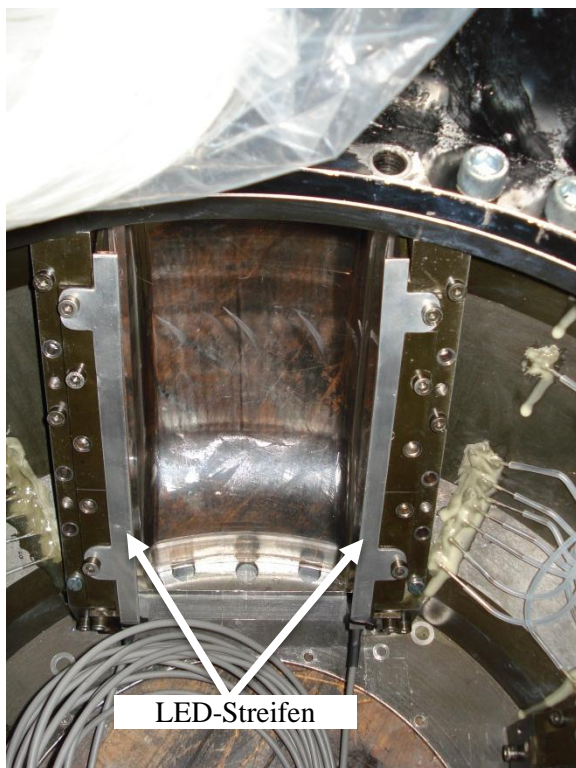


Abbildung 4-29: Positionierung der LED-Streifen



Abbildung 4-30: Helligkeitsunterschied zwischen 6 V und 12 V

#### 4.2.5 DRUCKMESSINSTALLATIONEN AN DER AUßENKONTUR DES ZWISCHENDIFFUSORS

Gleich wie an der Innenkontur sind auch an der Außenkontur die Druckmessbohrungen in Reihen angeordnet. Die Nummerierung der Druckmessbohrungen erfolgt entsprechend der Innenkontur des Zwischendiffusors entgegen der Strömungsrichtung. Prinzipiell besitzen die Reihen an der Außenkontur acht Druckmessbohrungen, wobei eine Reihe zur Erhöhung der Messauflösung 15 Druckmessbohrungen besitzt.

Die Zuordnung der Reihen beginnend mit den Buchstaben „AA“ entspricht in Strömungsrichtung blickend dem Uhrzeigersinn und ist in der nachstehenden Abbildung 4-31 verdeutlicht. Wieder ist zur Darstellung der Druckbohrungen die Abbildung entgegen der Strömungsrichtung ausgerichtet. Die axiale Position der Druckmessbohrungen kann im Anhang der Abbildung A-1 sowie der Tabelle A-2 für die Reihe mit den 15 Bohrungen und der Tabelle A-3 für die Reihe mit den acht Bohrungen entnommen werden.

Es erweist sich als sinnvoll, die hier 3 m langen Silikonschläuche wie bei der Innenkontur des Zwischendiffusors in einen Geflechschlauch mit einem Durchmesserbereich von 12 mm bis 32 mm einzuhüllen. Bis zur endgültigen Montage der Schläuche in den Schaltkästen sollen diese mit einem Knoten am Ende versehen werden. Dadurch wird verhindert, dass der Schlauch durch Verschmutzung verstopft und unbrauchbar wird.

In weiterer Folge soll immer ein besonderes Augenmerk auf die Druckschläuche gelegt werden, da diese sehr verletzungsanfällig sind.

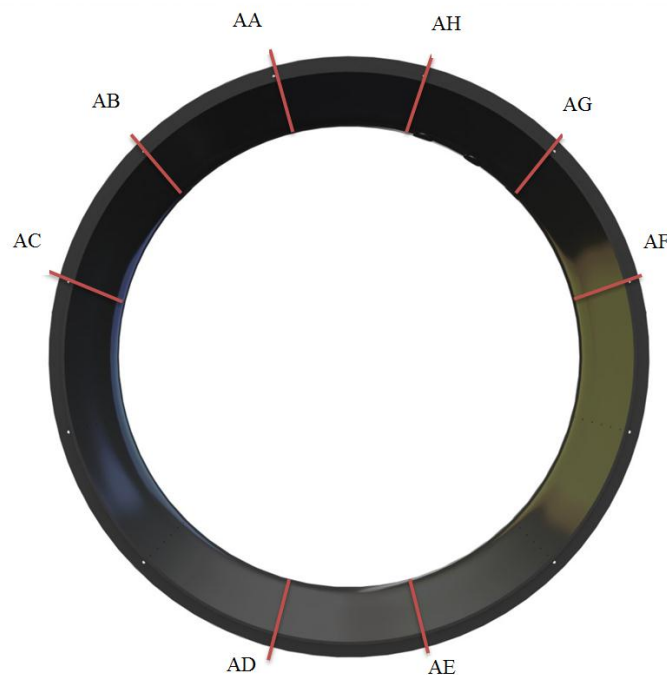


Abbildung 4-31: Druckmessreihen an der Außenkontur des Zwischendiffusors

### 4.3 ZUSAMMENBAU DER RINGGITTERKASKADE

Die Ringgitterkaskade kann nach Pan J.<sup>31</sup> in die drei Bereiche Einlauf, Mittelteil und Diffusor gegliedert werden. Abbildung 4-32 verdeutlicht diese drei Bereiche, welche zur besseren Übersicht auch für die Gliederung dieses Kapitel herangezogen werden.

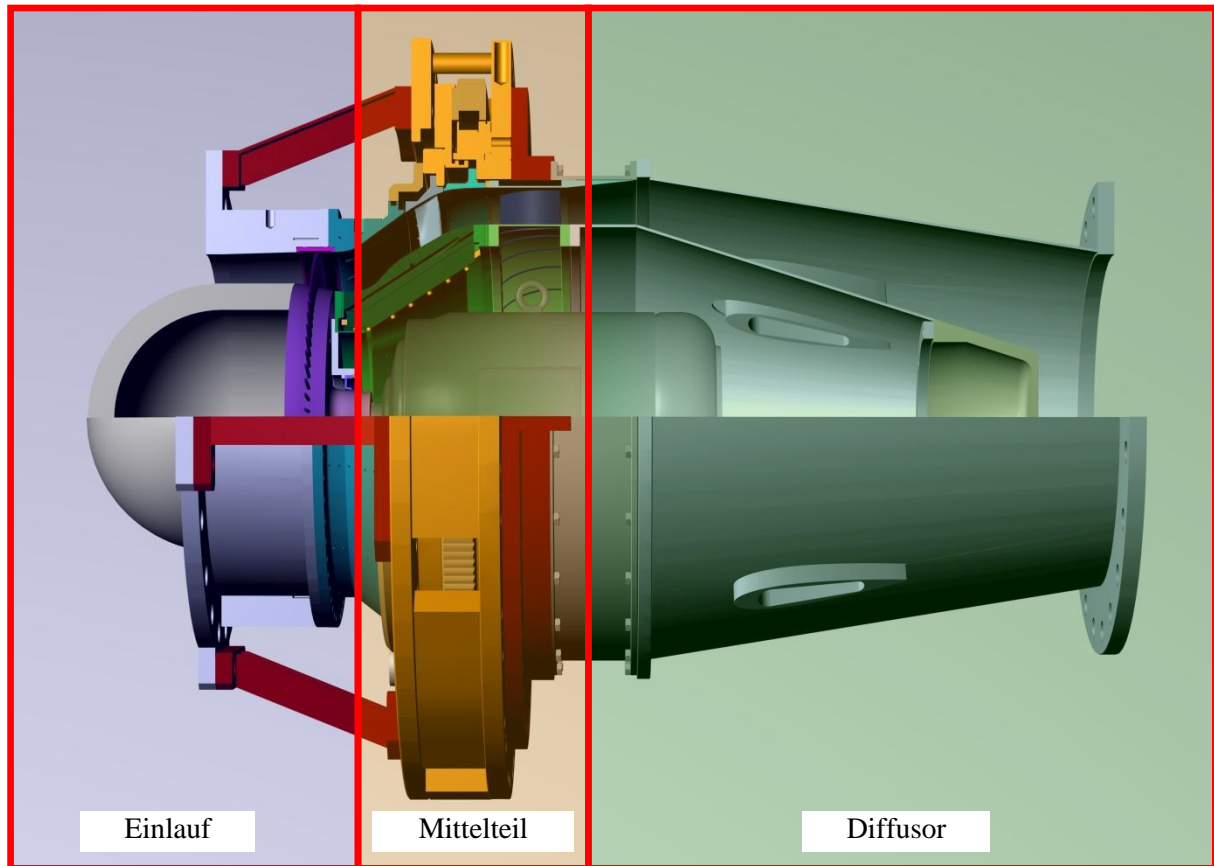


Abbildung 4-32: Bereiche der Ringgitterkaskade

Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass mit dem Bereich Diffusor begonnen werden muss. Durch die von der Drehvorrichtung im Bereich Mittelteil vorgegebene Montagerihenfolge beschränkt sich der Bereich Mittelteil auf die Drehvorrichtung.

Ausgangspunkt für den Zusammenbau der Ringgitterkaskade sind die abgeschlossenen Vorbereitungen aus vorangegangenen Kapitel 4.1 sowie die installierte Messtechnik aus Kapitel 4.2.

<sup>31</sup> Vgl. Pan 2008, S. 15f.



#### 4.3.1 AUFBAU DER INNENKONTUR DES ZWISCHENDIFFUSORS

Gemäß Abbildung 4-33 wird in diesem Kapitel die Innenkontur des Zwischendiffusers mit dem Diffusor verschraubt. Die Deswirler-Einheit wird dadurch, dass sie nicht von der restlichen Innenkontur des Zwischendiffusers getrennt wird, folglich zur Baugruppe Innenkontur des Zwischendiffusers gezählt. Der Elektromotor befindet sich bereits im Diffusor und wird in diesem Kapitel eingerichtet.

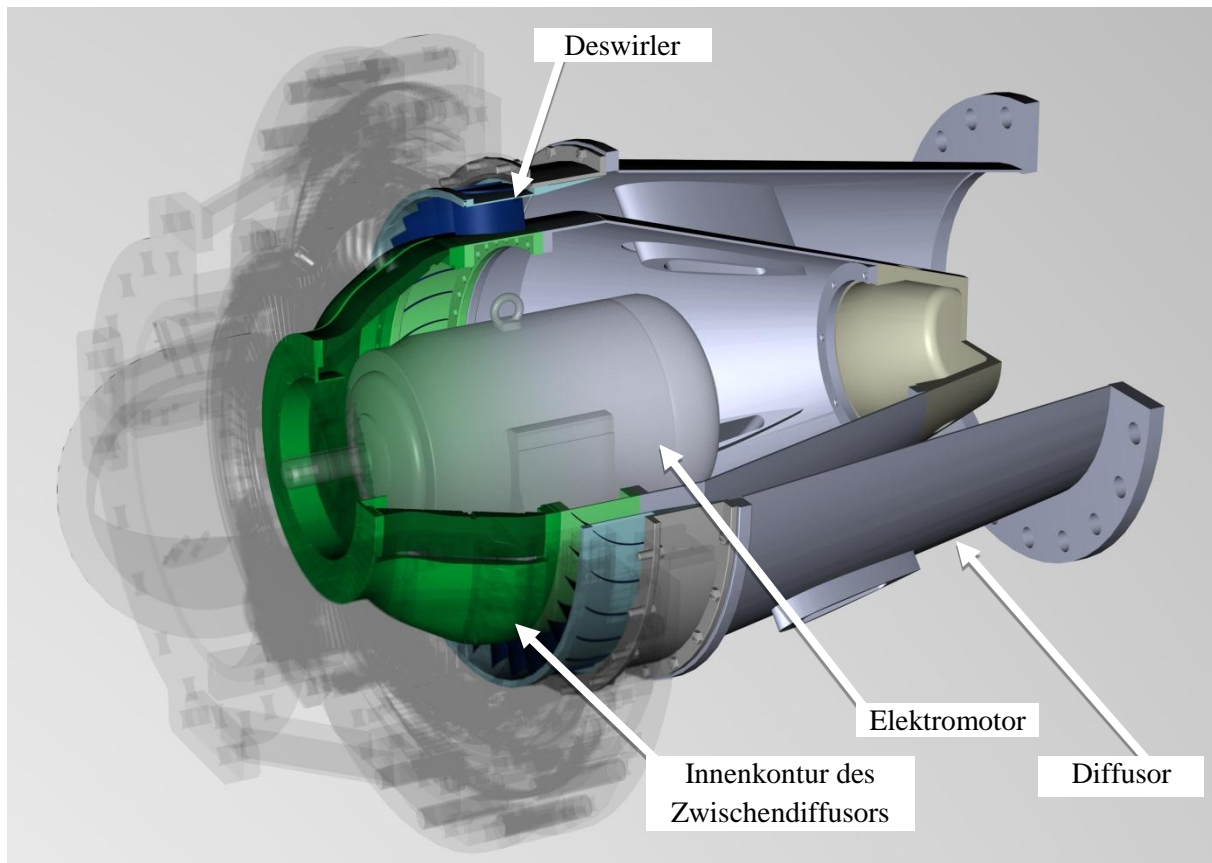


Abbildung 4-33: Bereich Diffusor

Zu Beginn wird die Innenkontur des Zwischendiffusers am Lasthaken des Krans eingehängt und auf den bereits vorbereiteten Diffusor aufgesetzt. Die bereits angeschlossenen Schläuche der Wanddruckbohrungen dürfen durch den Aufbau nicht verletzt werden. Daher ist es notwendig diese in eine Schachtel zu geben, welche gemäß Abbildung 4-34 unter der Innenkontur des Zwischendiffusers befestigt werden kann. Das Aufsetzen der Innenkontur auf den Flansch des Diffusors erfolgt nach dem Einziehen aller Schläuche sowie dem Entfernen der vier Schrauben des Flansches der Innenkontur im Bereich des Motorträgers.

Damit die Schläuche auf der richtigen Seite nach draußen geführt werden, muss an dieser Stelle die endgültige Umfangsposition des Diffusors in der Anlage festgelegt werden. Dieser Sachverhalt ergibt sich aufgrund des Schweißverzuges im Diffusor, wodurch der Flansch nicht exakt rund ist.

Um das Ausrichten zu erleichtern, empfiehlt es sich vor dem Durchziehen der Schläuche die Innenkontur aufzusetzen und die Seite mit der geringsten Stufe zu identifizieren. Abbildung 4-35 zeigt auf die zu achtende Stufe zwischen Innenkontur und Diffusor. Vor allem soll in der hier zu definierenden oberen Hälfte alle Spalt - und Sprungmaße auf ein Minimum reduziert werden. Wird dies an manchen Positionen nicht erreicht, ist zu beachten, dass aus strömungstechnischen Gründen eine Stufe in Strömungsrichtung gesehen nach unten weniger dramatisch ausfällt als ein eine Stufe nach oben. Für die spätere Montage ist es notwendig, die Stelle mit der besten Deckung zwischen Diffusor und Innenkontur, außen am Diffusor zu kennzeichnen.



Abbildung 4-34: Einziehen der Druckschläuche

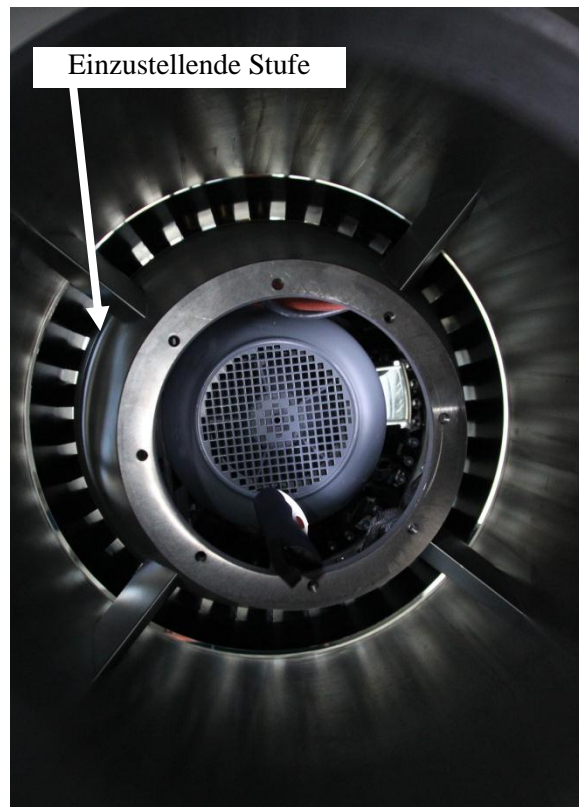


Abbildung 4-35: Darstellung der Stufe zwischen Innenkontur und Diffusor in der Ansicht von innen

Von der definierten Position aus werden vor dem Einziehen der Druckschläuche die Motorkabel durch die Rippe, welche sich in Strömungsrichtung gesehen rechts oben befindet, gezogen. Beim Einziehen gilt es Vorsicht walten zu lassen, da das Motorkabel sehr steif ist und leicht durch scharfe Kanten wie jene an der Innenseite des Diffusors aufgeschnitten werden kann.

Das Einziehen der Druckschläuche erfolgt analog an der Rippe, welche sich in späterer Folge links oben befindet. Um den Vorgang zu erleichtern, empfiehlt es sich wie in Abbildung 4-34 die Schläuche vor dem Einziehen zu sortieren. Des Weiteren dürfen die Schläuche nicht den Boden berühren, da Verunreinigungen den Schlauch verletzen könnten. Das nach oben Hängen der Schläuche (siehe Abbildung 4-34) nach dem Durchziehen durch die Rippe ist somit sinnvoll. Während eines

permanenten Nachziehens der Schläuche an der Außenseite wird die Innenkontur des Zwischendiffusers langsam aufgesetzt. Keiner der Druckschläuche darf zwischen der Innenkontur geklemmt werden.

Auf der Innenseite des Diffusors erfolgt das Befestigen der Schläuche an der Wand wie in Abbildung 4-36. Dies verhindert ein Flattern der Schläuche während des Betriebs und einen Kontakt mit dem Motor.

Nach dem Kontrollieren der Stufe zwischen der Innenkontur und dem Diffusor wird dieser mit Hilfe von 24 Stück Zylinderkopfschrauben M10x45 mit einem Drehmoment von 51 Nm angezogen. Abbildung 4-36 verdeutlicht die Verschraubung zwischen der Innenkontur und dem Diffusor. Im Bereich des Motorträgers sind die Schrauben vorerst auszulassen.

Als nächster Schritt erfolgt das Positionieren des Motors. Dazu wird er mit Hilfe des Krans an der Welle nach oben aus dem Diffusor gehoben. Der dabei entstehende Spalt zwischen Motor und Diffusor ist ausreichend um das Einfädeln der beiden Motorträgerplatten von unten vorzunehmen. Begonnen wird mit dem Einheben der ersten Motorträgerplatte, welche mit vier M10 Schrauben am Flansch zwischen Diffusor und Innenkontur befestigt wird. Abbildung 4-37 verdeutlicht dabei die Verschraubung mit den vier M10x60 Schrauben sowie die Flanschringe. Auf ein Arbeiten mit dem Drehmomentenschlüssel kann an dieser Stelle vorerst verzichtet werden, da das Einrichten des Motors noch folgt. Die untere Motorträgerplatte wird am unteren Flansching mitverschraubt.



Abbildung 4-36: Druckschläuche und Verschraubung von Innenkontur und Diffusor in der Ansicht von innen

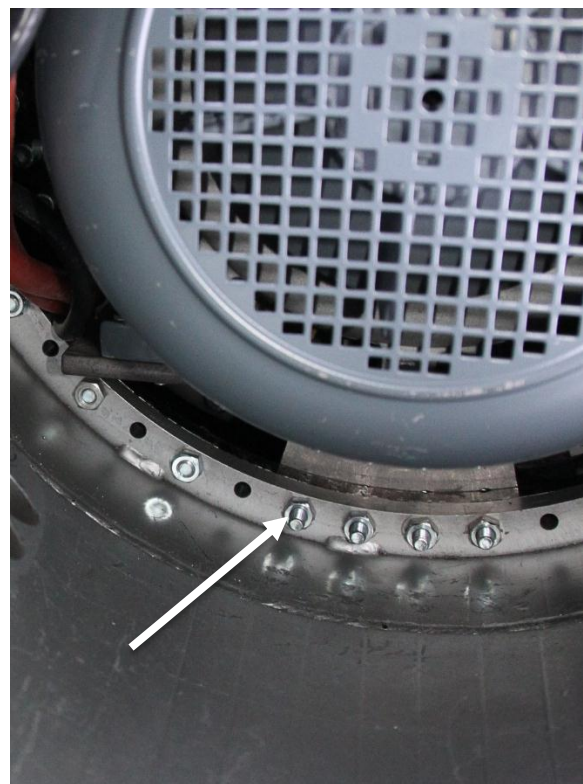


Abbildung 4-37: Motorträgerverschraubung



Durch ein Absenken des Motors können die Bohrungen des Motors sowie jene auf dem Motorträger zur Deckung gebracht werden. Leichte Krafteinwirkungen mittels eines Hebels von oben können hilfreich sein, den Motor flach an den Motorträgerplatten anzudrücken und mit Hilfe der vier M10x40 Schrauben vorerst locker zu befestigen.

Wurde der Motor in die ungefähre Position gebracht, muss er einen Gesamtrundlauf sowie einen Gesamtplanlauf hin zur Bezugsachse der Innenkontur des Zwischendiffusers aufweisen. Als Toleranz des Gesamtrundlaufes wie auch des Gesamtplanlaufes werden 0,05 mm veranschlagt. Die Genauigkeit ist aufgrund der mit 0,8 mm Abstand zur Innenkontur laufenden Scheibe erforderlich. Außerdem hätte eine an dieser Stelle produzierte Strömungsstufe durch eine zu große Rundlauf toleranz Einfluss auf das spätere Messergebnis.

Aufgrund des Eigengewichtes des Motors, kann dieser nur mittels des Krans in vertikaler Lage bewegt werden. Der Schwerpunkt des Motors verlagert sich in Bezug auf den Motorträger beim Wechsel zwischen horizontaler und vertikaler Lage. Dies bedeutet für den Motorträger eine andere Belastung und eine damit in Verbindung zu bringende leichte Positionsveränderung durch die Elastizität der Konstruktion.

Daraus leitet sich das Erfordernis der Maßkontrolle des Motors in horizontaler Position ab, obwohl die Montage nur mit vertikaler Maschinenachse erfolgen kann. Ein mehrmaliges Aufstellen und Umlegen der Kaskade für diesen Arbeitsschritt wird notwendig. Eine Messung in der vertikalen Position, wie Abbildung 4-38 zeigt, ist prinzipiell für ein erstes Abschätzen zulässig und erleichtert die Arbeit.

Zusätzlich wird in vertikaler Lage des Diffusers der Motor am Kran hängend vom Motorträger gelöst und Distanzplättchen wie in Abbildung 4-39 beigelegt.

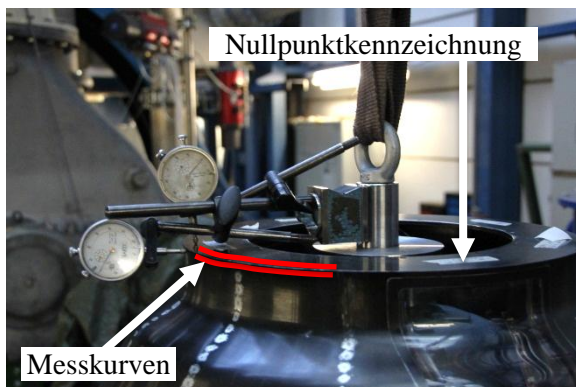


Abbildung 4-38: Messuhrenanordnung zur Einrichtung des Motors



Abbildung 4-39: Position der Unterlegplättchen zur Einrichtung des Motors

Nach dem Umkippen in die horizontale Position kann mit dem Messuhrensetup wie in Abbildung 4-38 dargestellt, der genaue Versatz hin zur Innenkontur festgestellt werden. Die Befestigung der Messuhren erfolgt gemeinsam an der Motorwelle. Für das Messen wird die Motorwelle bei gleichzeitigem Ablesen beider Messuhren gedreht. Es erweist sich als hilfreich, einen Punkt an der

Innenkontur als Messreferenzpunkt zu kennzeichnen. Am besten eignet sich ein Wendepunkt, sprich entweder jenen mit dem größtem oder jenen mit dem geringsten Ausschlag. An diesem Punkt erfolgt die Nullstellung beider Messuhren und das anschließende Vermessen bei drehender Welle. Da die Innenkontur des Zwischendiffusers stark gekrümmt ist, soll im Bereich von max. 5 mm unter der Frontfläche gemessen werden.

Nach einem groben Vorausrichten des Motors müssen die Schrauben immer mit einem Drehmoment von 51 Nm angezogen werden. Denn auch dies beeinflusst die exakte Position der Motorwelle hin zum Innenkontur.

Abschließend wird der äußere Rings gemäß Abbildung 4-40 von oben über den Diffusor aufgesetzt. Zum Verschrauben kommen 12 Stück M12x45 Sechskantschrauben mit einem Anzugsdrehmoment von 79 Nm zum Einsatz. Eine konzentrische Ausrichtung ist nicht erforderlich, da der Ring hin zur Innenkontur des Zwischendiffusers eine Passfläche aufweist.

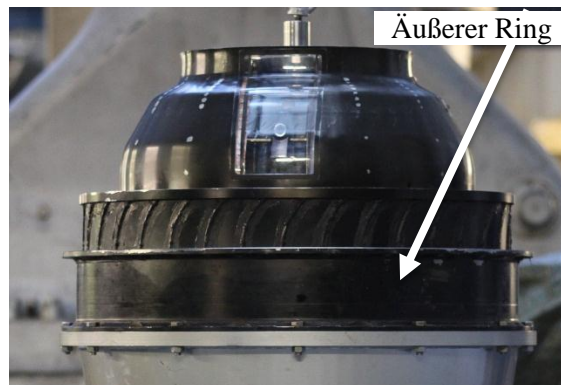


Abbildung 4-40: Aufgesetzter äußerer Ring über die Innenkontur des Zwischendiffusers

#### 4.3.2 AUFBAU DER DREHVORRICHTUNG

Nach der Montage der Innenkontur wird die Drehvorrichtung gemäß Abbildung 4-41, in welcher die speziell in dieser Baugruppe verwendeten Komponenten benannt sind, aufgebaut. Die Montagerihenfolge der Drehvorrichtung sieht den Beginn mit dem Befestigungsflansch vor. Da sehr viele Einzelschritte erforderlich sind, werden diese in Form einer Aufzählung erläutert.

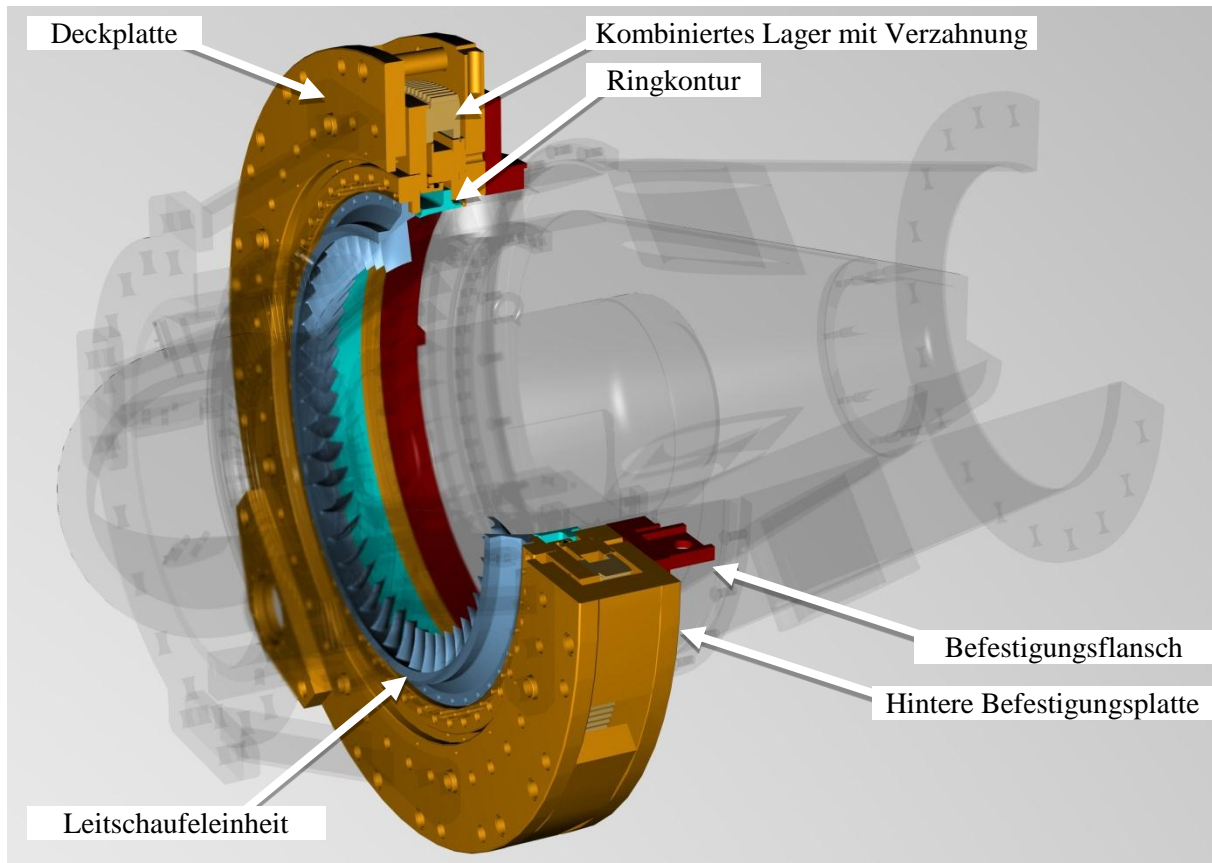


Abbildung 4-41: Bereich Mittelteil (Drehvorrichtung)

1. Der Befestigungsflansch wird mit Hilfe eines Krans waagrecht über die Innenkontur gesetzt und sitzt gemäß Abbildung 4-42 auf dem äußeren Ring auf. Der Flansch darf nicht an der Innenkontur anstoßen, da diese sonst einen Schaden nehmen könnte. Nach dem Abhängen wird er in Position gedreht, wobei die Flächen des Stützaufagers mittig zwischen den oberen und unteren Stützrippen zum Liegen kommen müssen. Die Verschraubung des Flansches geschieht mit M12x25 Zylinderkopfschrauben, welche vorerst nur handfest angezogen werden. Die genaue zentrische Ausrichtung erfolgt durch die weiteren Bauteile der Drehvorrichtung.

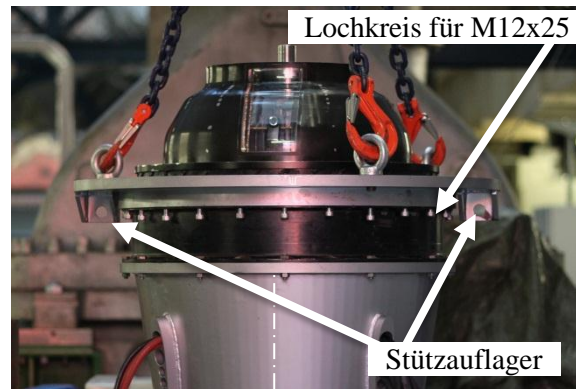


Abbildung 4-42: Befestigungsflansch auf Diffusor aufgesetzt

2. Die hintere Befestigungsplatte der Drehvorrichtung wird über die Innenkontur gehoben und wie in Abbildung 4-43 auf den Befestigungsflansch aufgesetzt. Die Verschraubung geschieht mit M24x55 Zylinderkopfschrauben und einem Drehmoment von 670 Nm am Befestigungsflansch. Beim Aufbringen des Drehmomentes muss der Flansch am Kran eingehängt sein, so dass ein Umkippen des Diffusors verhindert wird.
  
3. Da die beiden miteinander verschraubten Teile zentrisch an die Innenkontur ausgerichtet werden müssen, werden zwei Messuhren gemäß Abbildung 4-44 an der Motorachse befestigt. Eine Messuhr wird auf die hintere Befestigungsplatte der Drehvorrichtung ausgerichtet, die andere auf die Oberkante der Innenkontur des Zwischendiffusors. Wieder darf sich die Messuhr an der Innenkontur wegen der Krümmung der Fläche nur in den oberen 5 mm bewegen. Um die Zentrität bestmöglich zu erreichen, hilft die oben beschriebene Methode mit dem Suchen und Markieren der Wendepunkte.

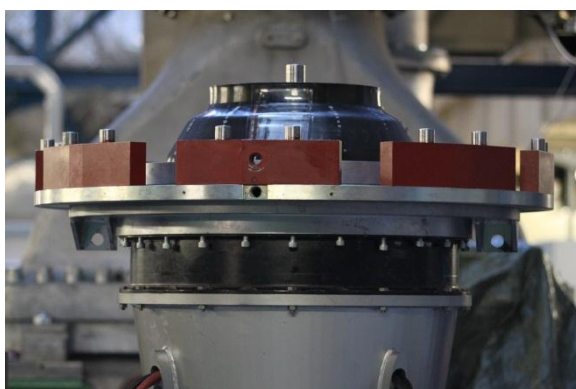


Abbildung 4-43: Hintere Befestigungsplatte der Drehvorrichtung



Abbildung 4-44: Zentrierung der hinteren Befestigungsplatte gegenüber dem Motor

4. Die Lauffläche für die O-Ring-Dichtung in Form eines Ringes wird von oben in die Stufe der hinteren Befestigungsplatte eingesetzt und mit M12x75 Zylinderschrauben vorerst locker



verschraubt. Die Zentrierung erfolgt über das im Folgepunkt 6 eingebaute Lager. Die Abbildung 4-45 zeigt den Lochkreis und die Lauffläche.

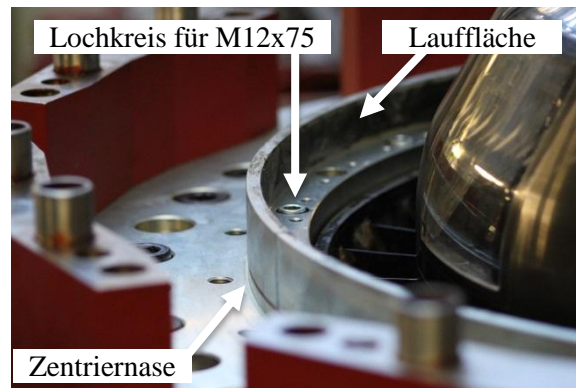


Abbildung 4-45: Lauffläche für O-Ring-Dichtung

5. Das kombinierte Lager mit Verzahnung wird von oben in die Drehvorrichtung eingehoben und zentriert sich aufgrund der Passung hin zur Rückseite der Lauffläche der O-Ring-Dichtung (Zentriernase in Abbildung 4-45).
6. Die Verschraubung der Zahnradereinheit geschieht mit M16x60 Zylinderkopfschrauben entsprechend Abbildung 4-46 auf die hintere Befestigungsplatte. Zum Anziehen verwendet man ein Drehmoment von 215 Nm. Ein zentrisches Ausrichten der Lauffläche für die O-Ring-Dichtung sowie des Lagers ist aufgrund der Zentriernase nicht erforderlich. Es wird jedoch die Zentrität wie in Abbildung 4-47 dargestellt hin zu der Innenkontur des Zwischendiffusers nachgemessen und protokolliert.

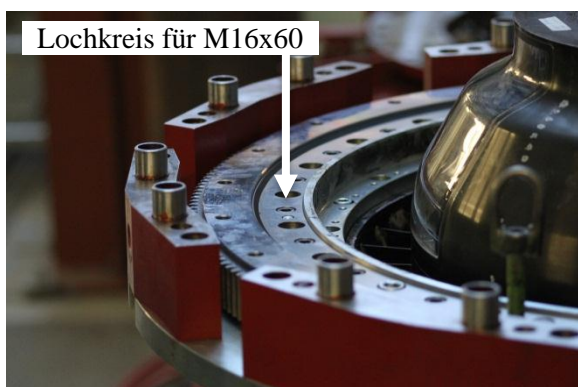


Abbildung 4-46: Eingebautes Lager

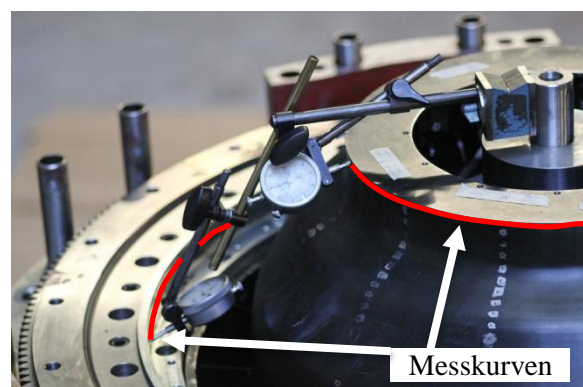


Abbildung 4-47: Zentrierung der Lauffläche für die O-Ring-Dichtung

7. Anziehen der M12x75 Zylinderkopfschrauben gemäß Abbildung 4-45 für die Lauffläche der O-Ring-Dichtung aus Punkt 4 mit 87 Nm.
8. Einstreichen der Lauffläche mit Fett, damit diese ihre Funktion erfüllt.

9. Einsetzen des Distanzringes, welcher in Abbildung 4-48 ersichtlich ist. Dieser ist auf der Innenseite der O-Ring-Dichtung angeordnet.
10. Die Ringkontur wird auf den zuvor eingesetzten Distanzring aufgesetzt. Beide werden zusammen mit M8x60 Zylinderkopfschrauben gegen die Befestigungsplatte der Drehvorrichtung, vorerst nur handfest, verschraubt. Abbildung 4-48 verdeutlicht diese Verschraubung.

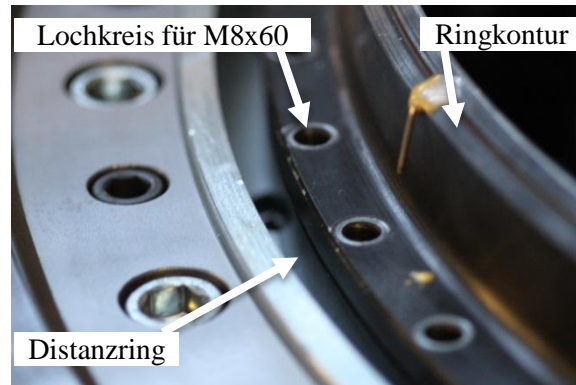


Abbildung 4-48: Distanzring und Ringkontur innerhalb der Lauffläche

11. Um diesen sehr locker sitzenden Ring einzurichten, werden sechs Schrauben über Kreuz mit 25 Nm angezogen. Somit klemmt der Ring soweit, dass er durch leichte Schläge mit dem Gummihammer eingerichtet werden kann.
12. Die verbaute Ringkontur muss ebenfalls zentrisch ausgerichtet werden. Die Messuhrbefestigung geschieht gemäß Abbildung 4-49 am Lager, mit welchem diese im Kreis gedreht werden kann. Damit wird der Ring zentrisch zum Lager ausgerichtet. Aufgrund der Dichtung zwischen Kugellager und Zahnrad, ist das Zahnrad schwer zu bewegen. Die in Abbildung 4-50 eingeschraubten Lastösen geben eine Möglichkeit zum Anfassen und somit zum Verdrehen des Lagers für die Messung.

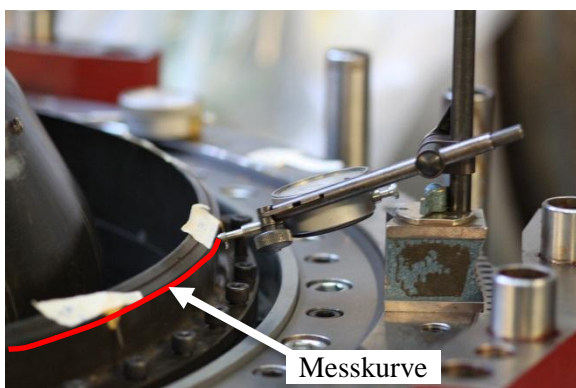


Abbildung 4-49: Befestigung der Messuhr zum Einrichten der Ringkontur

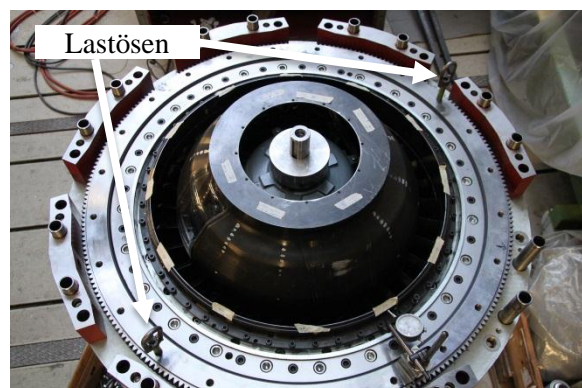


Abbildung 4-50: Befestigung der Messuhr in der Ansicht von oben

13. Wurde der Ring erfolgreich ausgerichtet, werden die restlichen M8x60 Zylinderkopfschaftschrauben mit 25 Nm nachgezogen.
14. Vorsichtig erfolgt das Aufsetzen des nicht zerlegten Ringes mit den Leitschaufeln. Im unteren Bereich sitzt die O-Ring-Dichtung, welche vor dem Zusammenbau auf eventuelle Beschädigungen kontrolliert wird. Die Sicherung hin zum Lager geschieht mit M16x40 Zylinderkopfschrauben, angezogen bei einem Drehmoment von 215 Nm. Aufgrund der O-Ring-Dichtung wird in diesem Schritt auf das Zentrieren verzichtet. Die verbaute Einheit ist in Abbildung 4-51 ersichtlich.



Abbildung 4-51: Verbaute Leitschaufeleinheit

15. Einfetten und Einpressen der Passhülsen in die aus Abbildung 4-52 ersichtliche Position.
16. Aufsetzen der Deckplatte der Drehvorrichtung, welche mit M24x150 Zylinderkopfschrauben zur hinteren Befestigungsplatte der Drehvorrichtung verschraubt wird. Grundsätzlich geschieht das Anziehen dieser Schrauben mit einem Drehmoment von 670 Nm. Für Schrauben, welche durch die Passhülsen führen ist aufgrund der geringen Einschraubtiefe nur ein Drehmoment von 340 Nm vorgesehen. Um ein Umkippen der Kaskade auszuschließen, ist diese vor dem Anziehen mit dem Drehmoment am Kran anzuhängen.

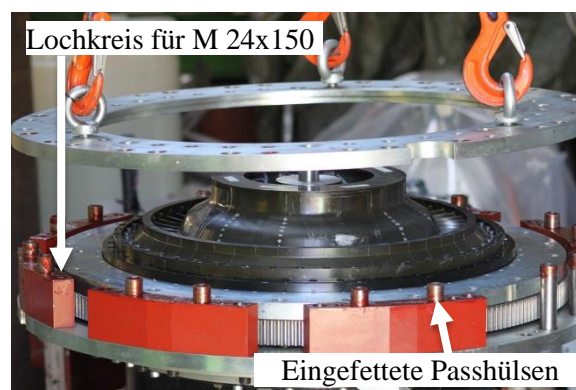


Abbildung 4-52: Einsetzen der Passhülsen und aufsetzen der Deckplatte

17. Den Diffusor mit der fertig aufgebauten Drehvorrichtung vom Abluftgehäuse heben und seitlich platzieren. Das Anheben der Drehvorrichtung erfolgt gemäß Abbildung 4-53 im oberen Bereich mittels dreier Lastösen. Die Motorkabel und Druckschläuche werden separat in eine Kiste gegeben.



Abbildung 4-53: Darstellung der fertig aufgebauten Drehvorrichtung mit den eingesetzten Lastösen zum Anheben



### 4.3.3 EINBAU DES LAUFRADES

Das Laufrad befindet sich gemäß Abbildung 4-54 zwischen der Außenkontur des Zwischendiffusers und der Einlaufeinheit. Da die genaue axiale Position von der Halbkugel des Einlaufes abhängt, kann diese erst nach dem Aufbau des Einlaufes eingestellt werden.

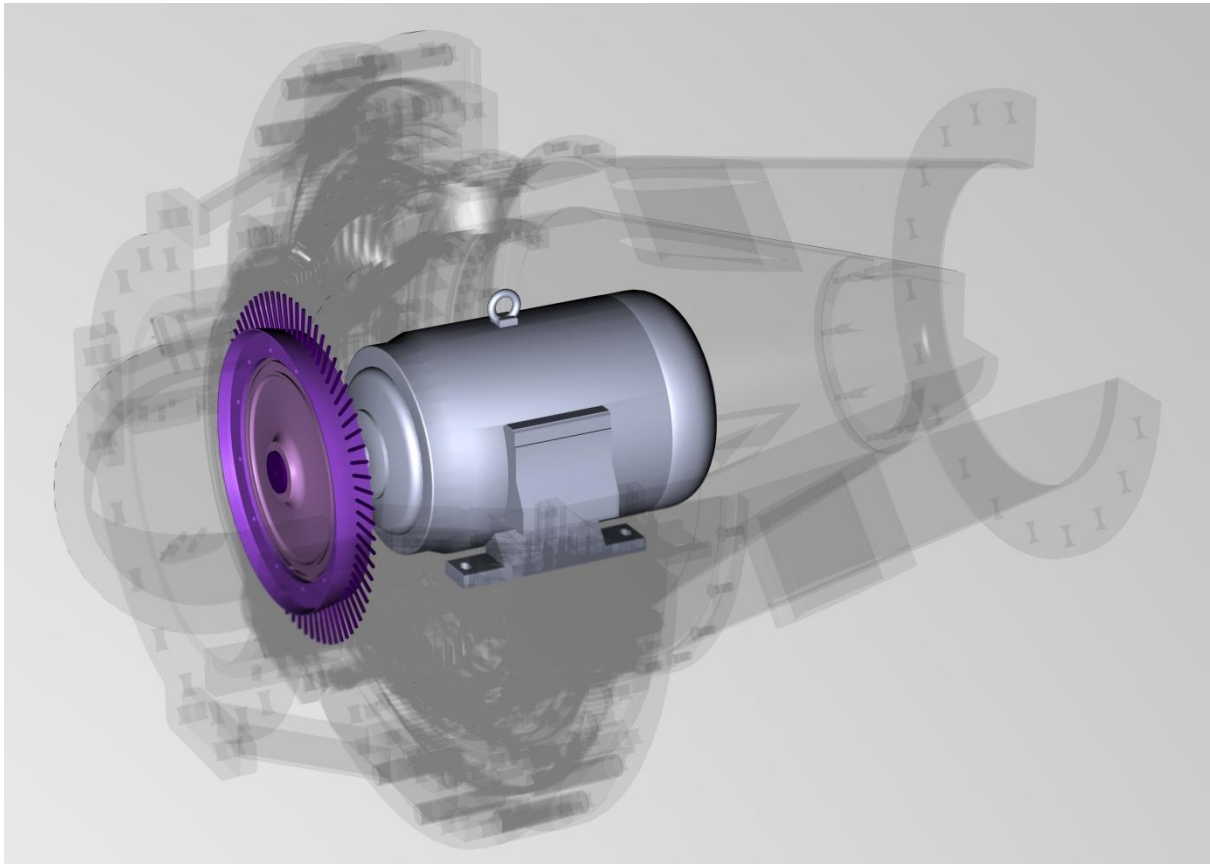


Abbildung 4-54: Bereich Mittelteil (Laufrad)

Das Laufrad besteht aus einem äußeren Ring, dem sogenannten Laufradkranz und einer inneren tragenden Scheibe. Zur besseren Veranschaulichung soll die Explosionsdarstellung in Abbildung 4-55 dienen. Da das Laufrad in späterer Folge zum Simulieren der Nachläufe der Turbine mit 5500 U/min drehen soll, ist im verbauten Zustand ein Wuchten erforderlich. Dazu befindet sich in der Scheibe eine Nut zum Einsetzen von Wuchtgewichten.

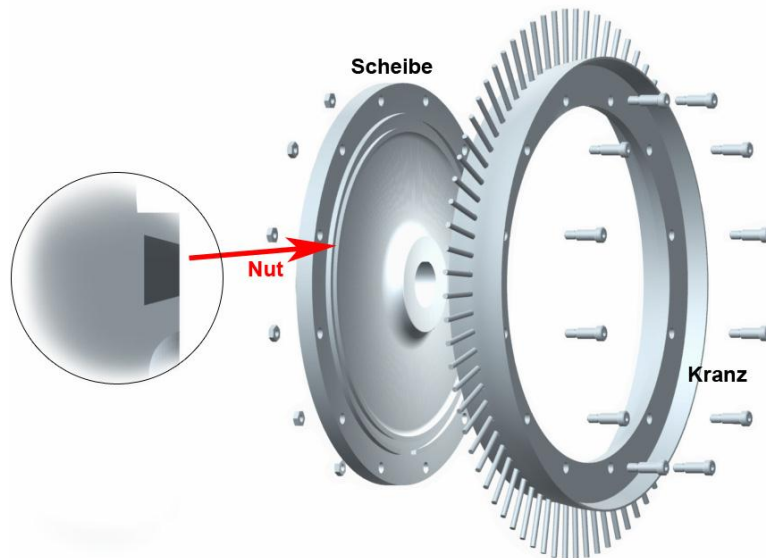


Abbildung 4-55: Explosionsdarstellung des Laufrades  
[Pan 2008, S. 44]

Die Wahl auf die zweigeteilte Scheibe fiel aufgrund des Wunsches, verschiedene Positionen für die Stäbchen zu ermöglichen. So kann durch ein Auswechseln des Laufradkranzes die Stäbchenposition ohne großen Aufwand nach vorne oder hinten verschoben werden. Die Abbildung 4-56 zeigt die Positionsvariation und die für diese Versuchsaufbau ausgewählte Position „D“.

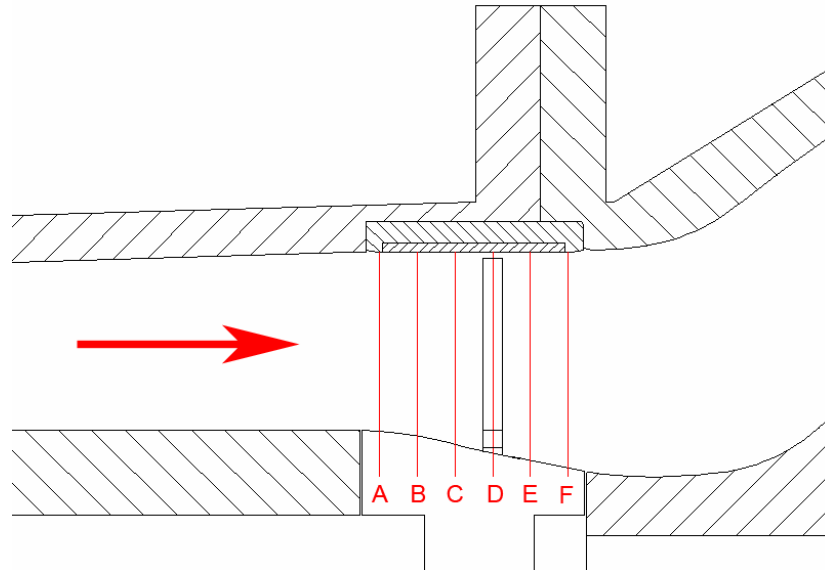


Abbildung 4-56: Variation der Stäbchenposition am Laufrad  
[Pan 2008, S. 46]

Die Scheibe und der Laufradkranz werden mit zwölf Stück M8x25 Sechskantschrauben und den dazugehörigen Muttern bei einem Drehmoment von 25 Nm miteinander verschraubt. Ein Abdrückgewinde im Laufradkranz ermöglicht ein leichtes Abdrücken des Laufradkranzes für die Demontage. Eine Veranschaulichung findet sich in Abbildung 4-57.

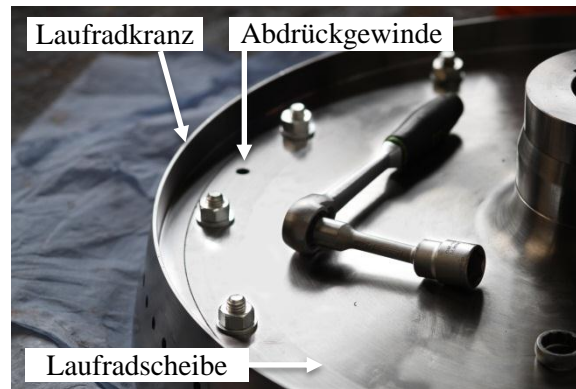


Abbildung 4-57: Verschraubung des Laufrades

Vor dem Aufsetzen des Laufrades muss der Dichtungsdeckel, welcher den Raum des Motors gegen den Scheibenzwischenraum hin abdichtet, eingebaut werden. Dazu wird der Wellendichtring der Type CR 85-130-12 HMS5 - Viton in den Dichtungsdeckel eingeschoben. Um die Einbaurichtung zu identifizieren, muss der dort vorherrschende statische Druck an der Innen – und Außenseite bekannt sein. Die Dichtlippe muß sich an der Seite des höheren Druckes befinden. Nur so unterstützt der Druck die Wirkung der Schlauchfeder, welche die Dichtlippe umschließt. Im Fall der Kaskade kann die Einbaurichtung des Wellendichtrings der Abbildung 4-58 entnommen werden. Gesichert wird der Wellendichtring durch einen Sicherungsring der Type DIN472/J130, welcher ebenso in Abbildung 4-58 ersichtlich ist. Das Verschrauben des Dichtungsdeckels erfolgt mit zwölf Stück M6x10 Zylinderkopfschrauben. Zur leichteren Demontage befinden sich drei Abdrückgewinde im Deckel, welche in Abbildung 4-59 markiert sind.

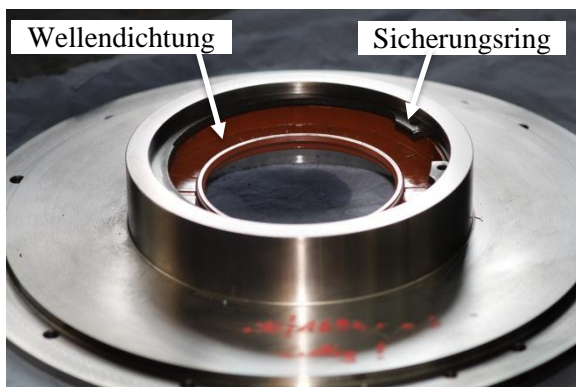


Abbildung 4-58: Dichtungsdeckel mit Darstellung der Einbaurichtung für Wellendichtung

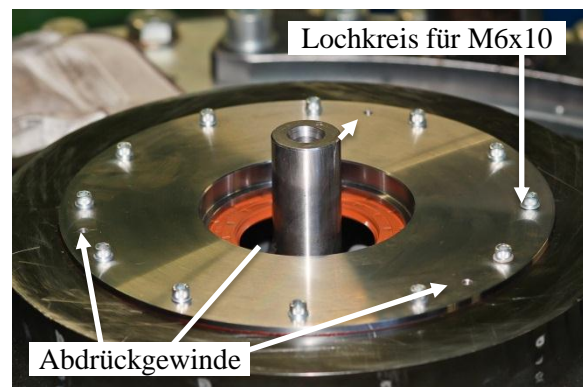


Abbildung 4-59: Einbau des Dichtungsdeckels

Das Aufziehen des Laufrades wird in Abbildung 4-60 dargestellt und geschieht über eine Gewindestange, welche in die Motorwelle geschraubt wird. Darüber wird das Laufrad auf die Motorwelle geführt und aufgrund der Passung aufgepresst. Dazu nutzt man den Deckel zur axialen Sicherung zusammen mit einer Mutter und einer Beilagscheibe. Gemäß Abbildung 4-60 erfolgt die Krafteinleitung zum Aufziehen des Laufrades durch Anziehen der Mutter. Bevor das Laufrad für die weiteren Einstellungen ganz gegen die Innenkontur gezogen wird, muss sich die Maschinenachse der

Ringgitterkaskade in einer horizontalen Position befinden. Dieser Sachverhalt ist durch die Verschiebung des Schwerpunktes und der daraus folgenden leicht unterschiedlichen Position des Motors zwischen einer horizontalen und vertikalen Maschinenachse begründet.

Der endgültige Abstand zwischen dem Laufrad und der Innenkontur des Zwischendiffusors kann erst nach dem in Kapitel 0 aufgebauten Einlauf durchgeführt werden. Dieser Sachverhalt entsteht durch das Erfordernis des mittigen Ausrichtens des Laufrades zwischen der Halbkugel und der Innenkontur.

Zum Abziehen des Laufrades wird ein eigens dafür konstruiertes Abziehwerkzeug gemäß der Abbildung 4-61 verwendet, welches mit Hilfe von drei langen M8 Schrauben am Laufrad befestigt wird. Durch die Drei-Punkt-Konstruktion kommt es zu keinem Verkippen und Schrägziehen des Laufrades. Das Abziehen erfolgt mit einer Mutter, welche an der in der Motorwelle montierten Gewindestange nach außen gedreht wird.

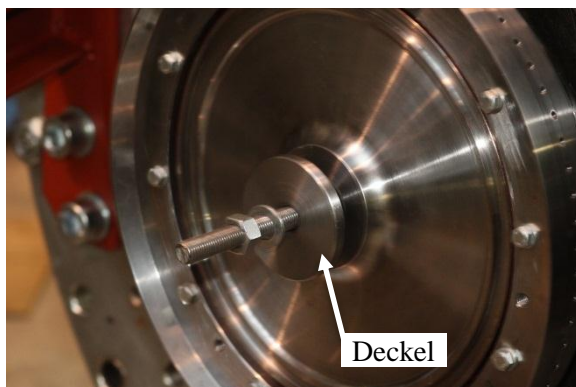


Abbildung 4-60: Montage des Laufrades

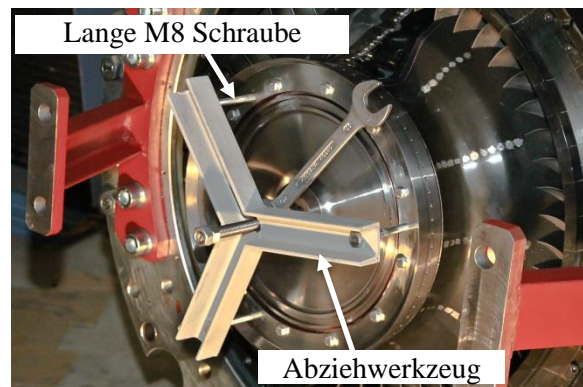
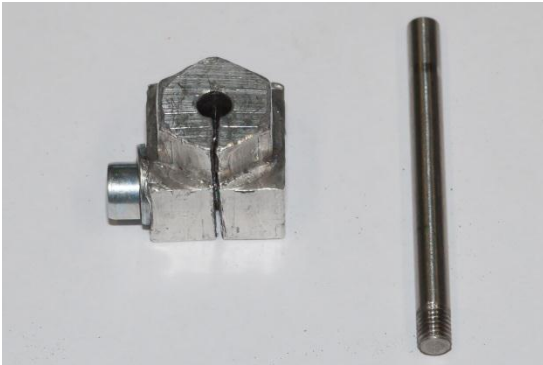


Abbildung 4-61: Demontage des Laufrades

Nach den ersten Versuchsfahrten werden die Stäbchen gemäß Abbildung 4-63 in das Laufrad eingeschraubt. Um der Fliehkraft standzuhalten kommt als Werkstoff Edelstahl 1.4305 mit einer Streckgrenze von 500-700 N/mm<sup>2</sup> zum Einsatz. Auf der Unterseite jedes Stäbchens wird ein M5 Gewinde mit einer Länge von 5 mm aufgeschnitten. Zum Lösen und Anziehen der Stifte wird ein Spezialwerkzeug in Form einer Klemme hergestellt. Die Abbildung 4-62 verdeutlicht das Spezialwerkzeug, womit jeder einzelne Stab angezogen werden kann. So benötigen die Stäbe selbst zum Einschrauben keine strömungsstörende Ausformung in Form eines Sechskant oder einer Abflachung. Dies ergibt einerseits einen fertigungstechnisch wesentlich geringeren Aufwand und ist für die Strömung besser geeignet.

Zum Einstellen des Abstandes der Stäbchen von 0,6 mm als Stäbchenspitzenabstand hin zum Anlaufring, müssen vorerst einige Stäbchen montiert werden. Dazu wird das Laufrad in die gemäß Abbildung 4-63 zu erkennende Position gebracht. Mittels Fühlerlehren kann an dieser Position der Abstand zwischen Stäbchen und Anlaufring ausgemacht werden. In iterativen Schritten wird durch ein Nachdrehen der Länge des Stäbchens und erneutem Messen des Spitzenabstandes das Maß von 0,6

mm eingestellt. Dies entspricht jenem Abstand, welcher auch in der transsonischen Versuchsturbine während des Betriebes vorherrscht. Da die Gewindelänge zwischen den Stäbchen nicht exakt gleich ist, wird jedes Stäbchen zusammen mit der Gewindebohrung am Laufrad nummeriert.



*Abbildung 4-62: Spezialwerkzeug zum Anziehen der Stäbchen*



*Abbildung 4-63: Montierte Stäbchen am Laufrad*



#### 4.3.4 AUFBAU DES EINLAUFES

Beim Bereich Einlauf handelt es sich um den vorderen Bereich der Ringgitterkaskade. Die in diesem Kapitel montierten Teile werden in Abbildung 4-64 dargestellt.

Die Positionierung der gesamten Einheit erfolgt nur über die in Rot dargestellten Einlaufstützen. Daraus leitet sich für die Montage ab, dass vor dem Aufsetzen der Einlaufeinheit diese zuerst zusammengebaut wird. Des Weiteren müssen die Einlaufstützen entsprechend den Spaltabständen in der Höhe angepasst werden.

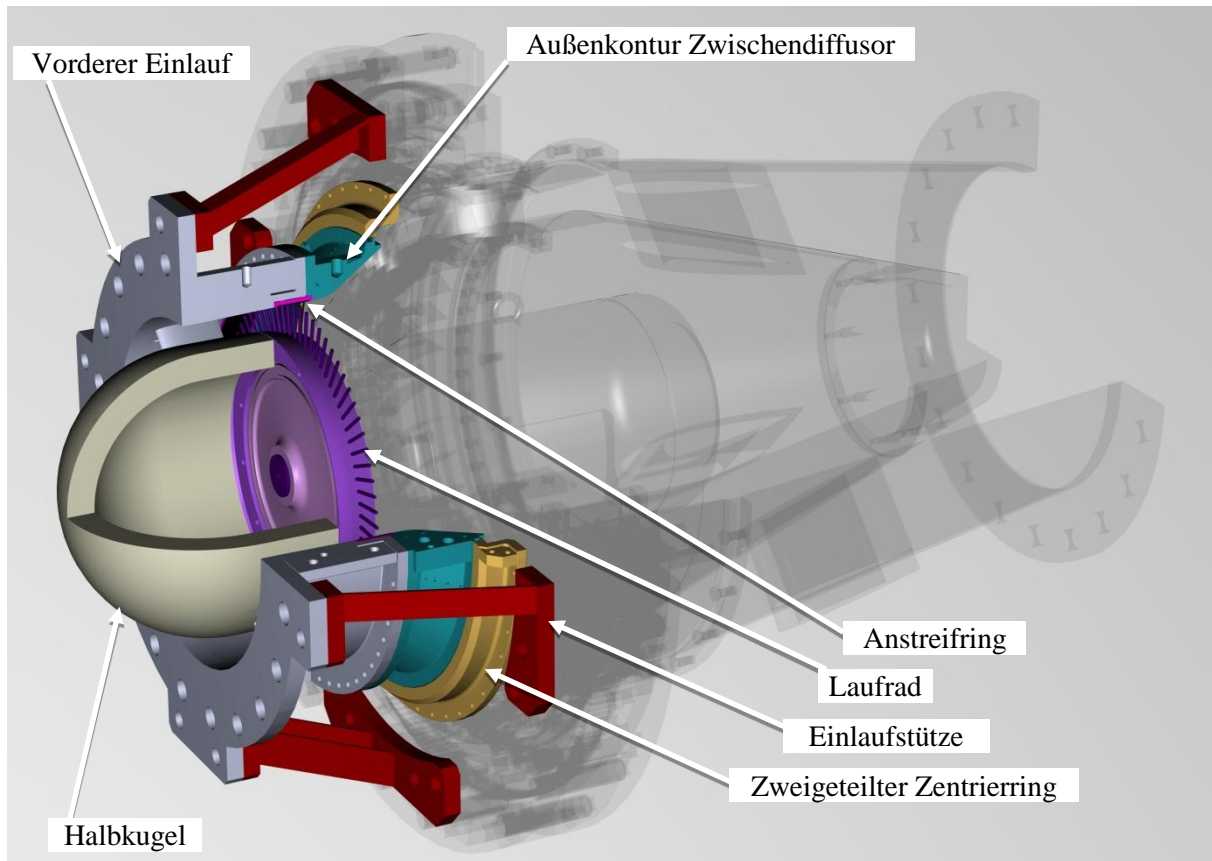


Abbildung 4-64: Bereich Einlauf

Für den Aufbau wird zuerst die zweigeteilte Außenkontur des Zwischendiffusors mit dem zweigeteilten vorderen Einlauf verschraubt.

Zu beachten ist, dass sich auf der Innenseite eine Nut befindet, in welcher ein Anstreifring (siehe Abbildung 4-66) eingelegt wird. Dieser dient dem Zweck, dass im Falle eines Anstreichens der Stäbchen nicht die Wandgeometrie sondern nur der Kunststoff dieses Ringes zerstört wird. Da der Ring dünnwandig ausgeführt ist, wird er zuerst mit dem vorderen Einlauf durch das Zusammenschrauben beider Hälften mit vier Stück M12x45 Schrauben in eine runde Form gepresst. Anschließend werden die beiden Halbschalen der Außenkontur des Zwischendiffusors auf dem anderen Ende des Rings mittels vier Stück M12x50 Schrauben zusammengeschraubt. Dabei müssen



die Trennebenen der Halbschalen des vorderen Einlaufes mit jenen der Außenkontur des Zwischendiffusor deckungsgleich sein. In weiterer Folge können die M10x50 Zylinderkopfschrauben, die den Einlauf mit der Außenkontur gemäß Abbildung 4-64 verbinden, angezogen werden.

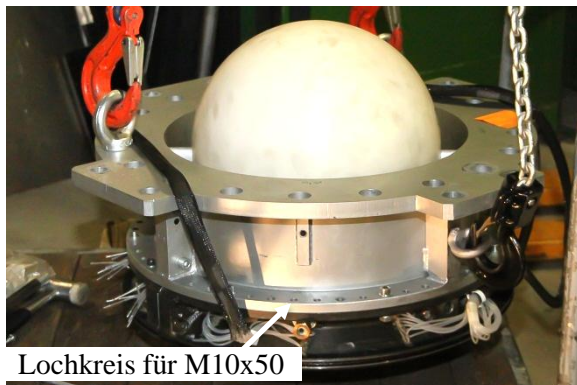


Abbildung 4-65: Einlauf

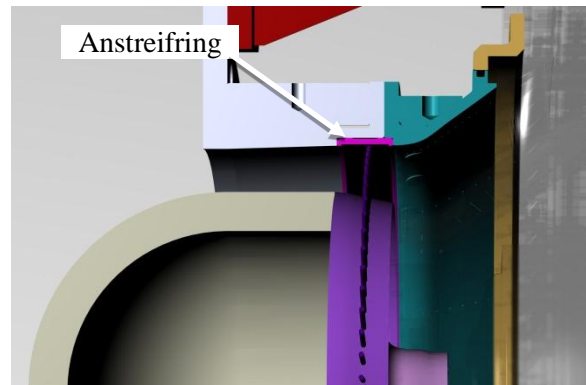


Abbildung 4-66: Schnittdarstellung Einlauf

Eine Zentrierung der beiden Bauteile ist nicht erforderlich, da der eingelegte Anstreifring die beiden Bauteile zueinander ausrichtet. Diese beiden Teile werden beim restlichen Zusammenbau nicht mehr auseinandergenommen und werden im folgenden Text zusammengefasst als Einlauf bezeichnet.

Bevor der Einlauf endgültig auf die Kaskade aufgesetzt wird, müssen die vier Einlaufstützen in der Höhe angepasst und der Dichtungsdeckel sowie das Laufrad verbaut sein. Die Abbildung 4-67 zeigt die Ringgitterkaskade vor dem Aufsetzen des Einlaufes. Dabei besitzen die Stützen zum Einrichten der Spaltmaße ein Übermaß in der Höhe. Wichtig dabei ist die Deckung der Stützhöhen in einem Toleranzfeld von  $\pm 0.05$  mm zueinander, damit der aufgesetzte Ring parallel zur Drehvorrichtung zu liegen kommt. Die Stützen werden mit 16 Stück M24x55 Zylinderkopfschrauben an den Bohrungen verschraubt. Die äußeren Schrauben führen durch Passhülsen mit einem Durchmesser von 32H7, welche die Stützen in Ihrer Position ausrichten. Da durch die Passhülsen die Einschraubtiefe gering ausfällt, beschränkt sich das Anzugsmoment auf 300 Nm. Die inneren Schrauben werden mit einem Drehmoment laut Tabelle von 670 Nm angezogen.

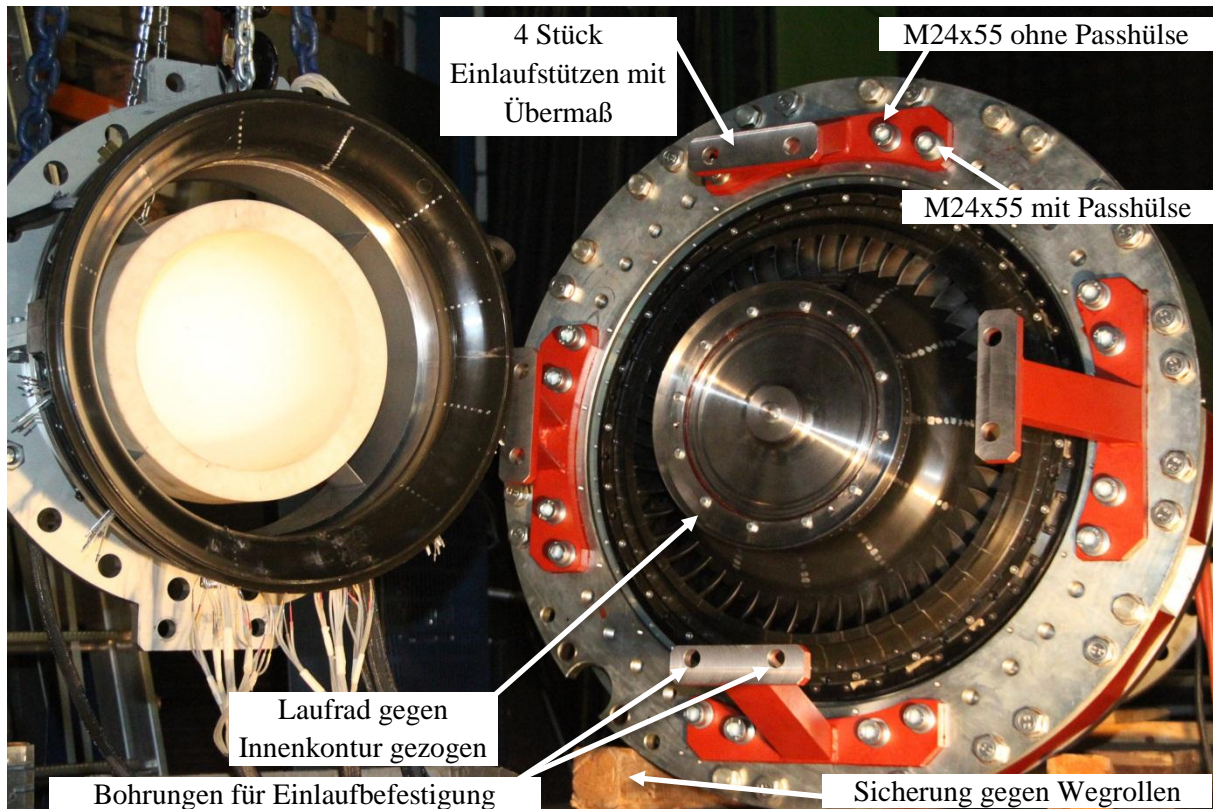


Abbildung 4-67: Für Einlauf vorbereitete Ringgitterkaskade

Im folgenden Schritt wird der Einlauf gemäß Abbildung 4-67 auf die Stützen geschwenkt und mit acht Stück M24 Zylinderkopfschrauben mit einem Drehmoment von 670 Nm verschraubt. Wieder gilt es darauf zu achten, die Kaskade während dem aufbringen des Drehmoments gegen ein Wegrollen zu sichern. Für das Identifizieren der Höhe der Einlaufstützen kann mit Hilfe von Fühlerlehren der Abstand zwischen der Außenkontur des Zwischendiffusors und der Drehvorrichtung festgestellt werden. Abbildung 4-68 stellt die hierfür angewandte Messprozedur dar.



Abbildung 4-68: Distanzmessung zwischen Drehvorrichtung und Einlauf

Vor dem Abfräsen der Einlaufstützen darf auf die Einstellung des Abstandes zwischen Einlaufkugel und Laufrad mit den Stützen nicht vergessen werden. Um diesen Abstand zu identifizieren, müssen die Oberschale des vorderen Einlaufes entsprechend Abbildung 4-69 im verbauten Zustand abgehoben und die Halbkugel, sofern nicht schon geschehen, eingesetzt werden. Das Abheben der oberen Halbschale erfolgt analog wie nach der Endmontage in Kapitel 4.4.1.

Zum Verschrauben der Halbkugel finden pro Halbschale vier M8x90 Passschrauben ihre Anwendung. Beim Anziehen der Schrauben ist Vorsicht geboten, da sich das Gewinde in der Kunststoff-Halbkugel in einer eingepressten Messingbuchse befindet.

Gleich wie schon zuvor wird nun mit Fühlerlehren der Abstand herausgemessen. Wichtig ist auch das Messen am ganzen Umfang, da eine Abweichung aufgrund der Toleranz der Einlaufstützen möglich wäre. Als Distanz zwischen Drehvorrichtung und Außenkontur sind gleich wie zwischen Laufrad und Halbkugel 0,8 mm einzustellen. Wichtig beim Messen dieser Distanzen sind eine horizontale Maschinenachse der Ringgitterkaskade sowie das gegen die Innenkontur des Zwischendiffusors gezogene Laufrad. Die Abbildung 4-70 verdeutlicht das Ausmessen des Abstandes.

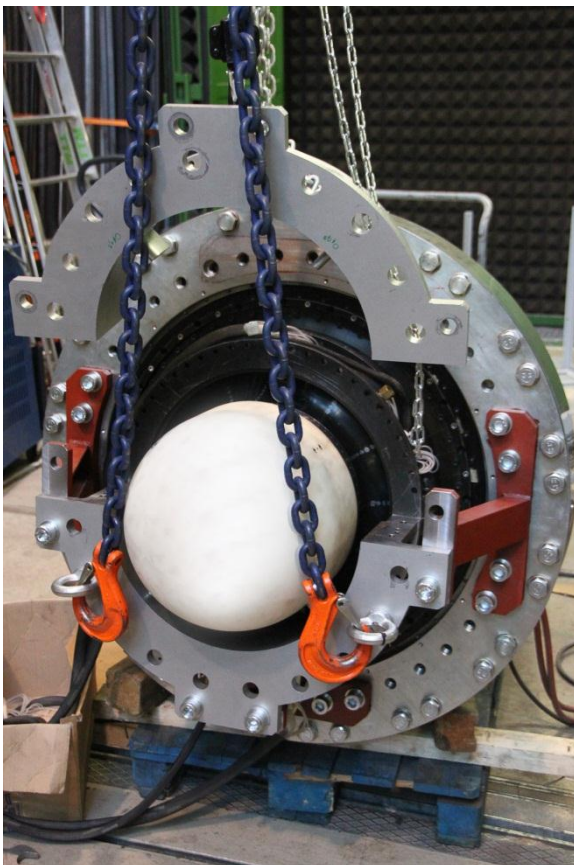


Abbildung 4-69: Abheben der oberen Einlaufhalbschale und Montage der Halbkugel

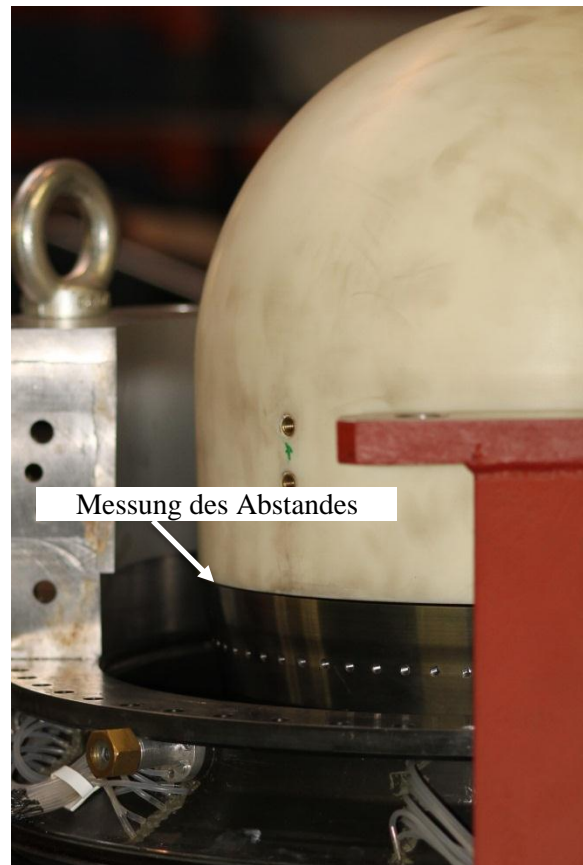


Abbildung 4-70: Distanzmessung zwischen Halbkugel und Laufrad



Für das Ausrechnen des zu überfräsenden Abstandes wird folgendes Beispiel gegeben:

Die Werte gelten dabei für den Abstand bei einer einzelnen Stütze, wobei für jede Stütze so eine Rechnung durchzuführen ist.

- Distanz zwischen Laufrad und Halbkugel: 3,45 mm
- Distanz zwischen Außenkontur und Drehvorrichtung: 2,95 mm

Daraus folgt, dass für den Spalt von 0,8 mm zwischen Außenkontur und Drehvorrichtung 2,15 mm abgefräst werden müssen. ( $2,95 - 0,8 = 2,15$  mm)

Für den Spalt zwischen Laufrad und Halbkugel bedeutet eine theoretische Absenkung von 2,15mm einen Spalt von 1,3mm ( $3,45 - 2,15 = 1,3$  mm). Dieser Spalt muss, wenn von einem gleich großen Spalt auf der linken und rechten Seite des Laufrades ausgegangen wird, halbiert werden. Daraus folgt, dass sich der Spalt zwischen der Innenkontur des Zwischendiffusers und dem Laufrad sowie zwischen dem Laufrad und der Halbkugel auf  $1,3/2 = 0,65$  mm beläuft.

Da sämtliche Versetzungen im Einlaufbereich sehr gering zu halten sind, wäre dieser Spalt in Ordnung. Abbildung 4-71 zeigt den Spalt zwischen Laufrad und Halbkugel, wie auch hin zur Innenkontur, bei waagrechter Maschinenachse.



Abbildung 4-71: Spalt zwischen der Innenkontur, dem Laufrad und der Halbkugel bei waagrechter Maschinenachse

Ein weiterer einzufließender Faktor in das Spaltmaß ist ein Axialversatz der Motorwelle durch das Inbetriebnehmen des Motors. Dazu wird der Einlauf gemeinsam mit der Halbkugel abgenommen und ein Messuhraufbau entsprechend Abbildung 4-72 vorbereitet. Damit das Laufrad nicht gegen die Innenkontur des Zwischendiffusers drückt, muss zwischen die Laufradscheibe und den Motorwellenabsatz eine Distanzscheibe mit einem Übermaß gegeben werden. Die Position ist der Schnittzeichnung in Abbildung 4-73 zu entnehmen.



Abbildung 4-72: Messuhrensetup für Motorachsversetzung im Betrieb

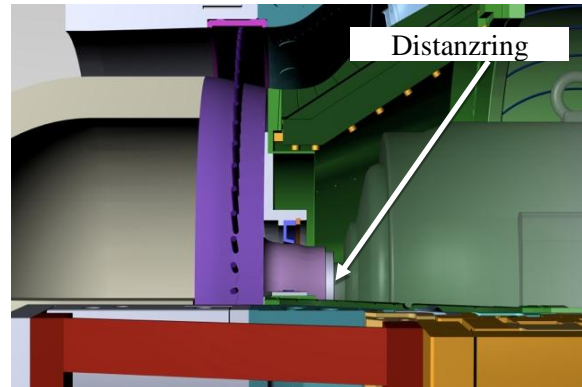


Abbildung 4-73: Schnittdarstellung des aufgebauten Laufrades am Motor

Der Messuhrenaufbau muss stabil ausgeführt sein, damit die Messuhr wirklich den Axialversatz misst. Die Messuhr selbst wird genau auf das Zentrum der Welle hin ausgerichtet. Somit überträgt sich nicht die Umfangsgeschwindigkeit auf die Messuhr und die Spitze der Messuhr muss nicht über eventuelle Unebenheiten gleiten. Der Motor wird nach einer ordnungsgemäßen elektronischen Installation, welche in Kapitel 4.4.3 beschrieben wird, auf 1000 U/min hochgefahren.

Der dabei festgestellte axiale Versatz wurde mit  $< 0,01$  mm identifiziert. Aus diesem Sachverhalt folgt, dass die axialen Spalte zwischen Laufrad und der Innenkontur des Zwischendiffusers realisiert werden können.

Nach dem Ausmessen muss die erforderliche Dicke der Distanzscheibe gemäß Abbildung 4-73 zwischen Laufrad und dem Anschlag an der Motorwelle ermittelt werden. Dabei wird die bereits verwendete Distanzscheibe mit einer Dicke größer als der herzustellende Spalt hinter dem Laufrad belassen. Mittels Fühlerlehren kann dann der Spalt zwischen der Innenkontur und dem Laufrad gemäß Abbildung 4-71 definiert und das noch abzutragende Maß für die Distanzscheibe errechnet werden.

Wurden alle Spaltmaße korrekt eingestellt, kann mit dem endgültigen Zusammenbau des Einlaufes mit der Drehvorrichtung begonnen werden. Dieser kann zur erleichterten Montage in einer vertikalen Maschinenachse erfolgen. Das Laufrad befindet sich nach der Justage bereits in seiner Position und muss nicht verändert werden. Einzig die zentrische Schraube zur axialen Sicherung muss auf das korrekte Drehmoment überprüft und es muss sichergestellt werden, dass die Passfeder an der Motorwelle verbaut ist.

Zur Abdichtung des Einlaufes hin zur Drehvorrichtung wird ein O-Ring mit einem Schnurdurchmesser von 8 mm verwendet. Dieser wird am unteren Teil des Einlaufes vor dem Einheben zwischen die Einlaufstützen in die dafür vorgesehene Rille gestülpt. Die Abbildung 4-74 verdeutlicht den Verbau des O-Ringes, der natürlich eingefettet werden muss, damit er nicht an der Kontur reibt.

An dieser Stelle wird der zweigeteilte Ring aus Abbildung 4-75 zwischen die Einlaufstützen eingefädelt und rund um den Einlauf positioniert. Wichtig ist, dass sich die Halbschalen-Trennebenen

mit jenen des Einlaufes decken. Zum Ausrichten des Einlaufes ist es nützlich zuerst sechs der M8x60 Schrauben, welche den Ring mit der Drehvorrichtung verbinden, locker einzudrehen.

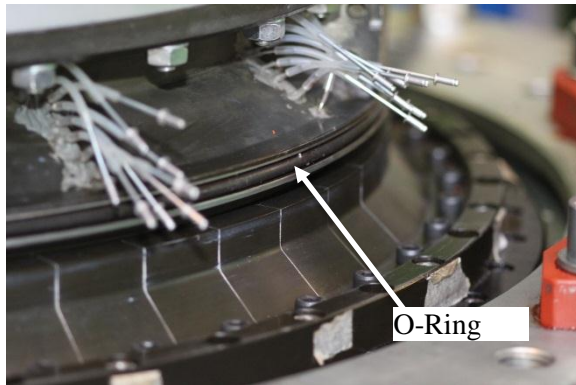


Abbildung 4-74: Position des O-Ringes

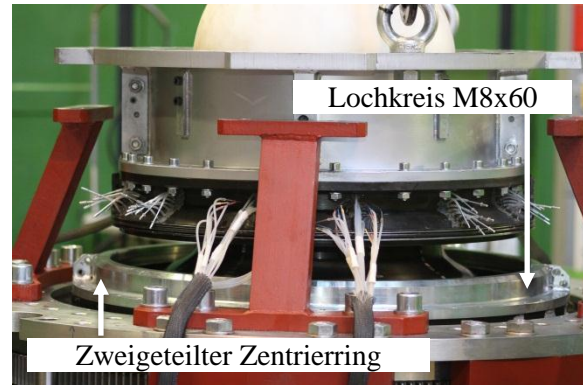


Abbildung 4-75: Zentrierung des Einlaufes

Das Einheben des Einlaufes zwischen die Einlaufstützen erfolgt mittels Kran. Dabei ist auf die Druckschläuche ein besonderes Augenmerk zu legen, da scharfe Kanten beim Zusammenbau diese verletzen könnten. Ebenso muss auf die Ausrichtung des Einlaufes geachtet werden. Die Schrauben können bereits in die sich deckenden Bohrungen gegeben werden, dürfen allerdings vor der späteren zentrischen Einrichtung nicht angezogen werden.

Auf diesen Schritt folgt das Anziehen der Schrauben, welche die zwei Halbschalen des zweigeteilten Zentrierrings zusammenziehen. Die Zentrierung des Einlaufes sollte somit abgeschlossen sein. Eine Kontrolle der Stufe an der Innenseite, d.h. bei der Strömungskontur muss dennoch durchgeführt werden. Das Aufbringen eines seitlichen Druckes am Einlauf kann helfen, hier die Stufe geringfügig zu verändern. Die endgültige Position wird mit dem Festziehen des Ringes durch die M8x60 Zylinderkopfschrauben mit einem Drehmoment von 25 Nm und dem Anziehen der M24x55 Zylinderkopfschrauben hin zu den Einlaufstützen mit einem Drehmoment von 670 Nm fixiert.

Die exakte Positionierung des Einlaufes wird einerseits durch die verbauten Passhülsen in den Einlaufstützen hin zur Drehvorrichtung gesichert, andererseits werden zwischen Einlauf und Einlaufstützen Anreißmarkierungen an allen vier Stützen gezogen. So kann der Einlauf auch in der verbauten Ringgitterkaskade immer wieder zentrisch ausgerichtet werden.



#### 4.3.5 VORBEREITUNGEN FÜR DEN TRANSPORT IN DAS TURBOLABOR

Nach dem abgeschlossenen Aufbau in der Werkstätte wird die Ringgitterkaskade für den Transport in das Turbolabor, welches sich im ersten Kellergeschoß befindet, vorbereitet.

Da die Baulänge der Ringgitterkaskade länger als der Ausschnitt im Rohr ist, muss die Halbkugel für den Einbau in die Versuchsanlage entfernt werden. Die Demontage dieser erweist sich aufgrund des Platzmangels im Turbolabor in der Werkstätte als einfacher. Des Weiteren wird im hinteren Bereich der Kunststoffkegel des Diffusors aus Abbildung 4-76 mittels acht Schrauben eingeschraubt.

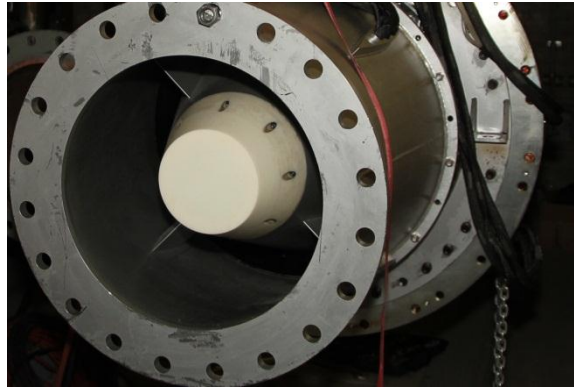


Abbildung 4-76: Einsetzen des hinteren Kegels

Um den Transport mit dem Hubstapler um das Gebäude herum zu ermöglichen, muss die Kaskade auf eine Palette aufgelegt werden. Um zu gewährleisten, dass die Kaskade waagrecht auf der Palette liegt werden die unterschiedlichen Durchmesser am Diffusor entsprechend unterlegt.

Das Umlegen der Ringgitterkaskade hat kontrolliert gemäß der Bildfolge in Abbildung 4-77 zu erfolgen.

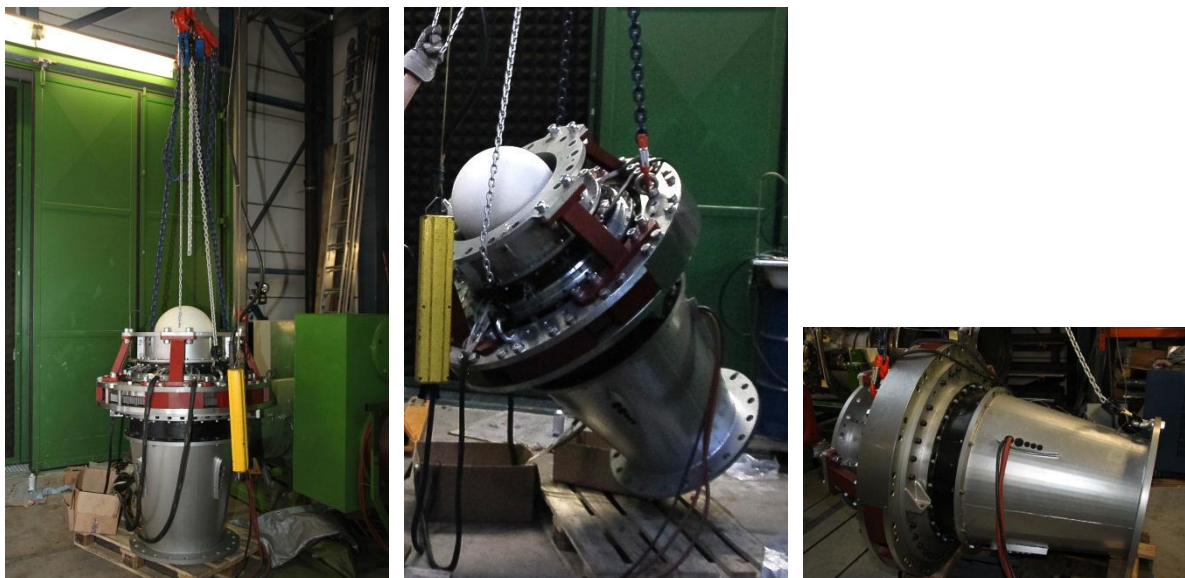


Abbildung 4-77: Bildfolge beim Umkippen der Ringgitterkaskade

Dazu werden drei Lasthaken in den oberen Flansch der Drehvorrichtung eingehängt, wobei ein Lasthaken über einen Handkettenzug mit dem Kran verbunden ist. Der Handkettenzug besitzt in der Abbildung 4-77 eine silberfarbene Hebekette, während jene des Hallenkran in Blau gehalten sind. Nach dem Anheben mit dem Hallenkran wird der Handkettenzug langsam abgelassen, bis auf dieser Kette keine Spannung mehr zu vernehmen ist. Zum weiteren Kippen wird die freie Kette am hinteren Flansch des Diffusors eingehängt und dort solange hochgezogen, bis sich die Maschinenachse in der Waagrechten befindet.

Um die Kaskade gegen Wegrollen zu sichern werden an der rechten und linken Seite Hölzer unterlegt. Zusätzlich wird die Kaskade mit Zurrgurten an der Palette niedergezurrt. Die einzig zulässigen Auflagepunkte für die Zurrgurte sind der Abbildung 4-78 zu entnehmen. Andere Punkte können die Kaskade beschädigen oder die Zentrierung der Bauteile beeinflussen.

Damit das Verletzen der Kabel durch den Transport verhindert wird, müssen diese gut befestigt werden. Die Motorkabel können zusammengerollt mittels Kabelbindern am hinteren Flansch befestigt werden. Für die Druckschläuche eignet sich eine Schachtel, in welcher diese eingerollt werden.

Die Abbildung 4-78 stellt die vorbereitete Ringgitterkaskade für den Transport dar.

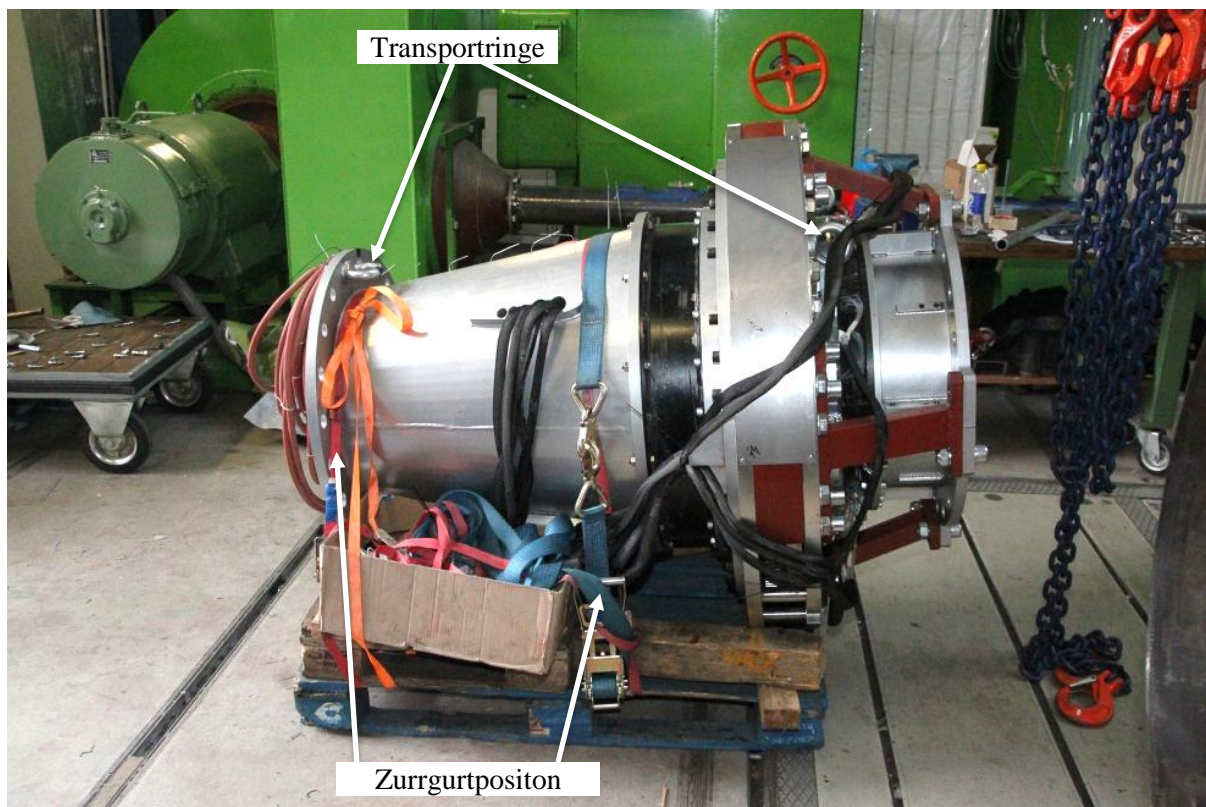


Abbildung 4-78: Transportfähige Ringgitterkaskade

## 4.4 EINBAU IN DIE BESTEHENDE WINDKANALLEITUNG

Der Einbau der Ringgitterkaskade erfolgt in das vorhandene Rohrsystem des Windkanals. Hierbei wurde die Länge der Ringgitterkaskade genau auf den bereits vorhandenen Ausschnitt der Rohre abgestimmt. An beiden Enden der Rohre befindet sich ein Flansch mit einem Teilkreisdurchmesser der Bohrungen von 650 mm, an welche die Ringgitterkaskade verschraubt wird. Da das Rohrsystem für die Aufnahme des Gewichtes in diesem Bereich nicht ausgelegt ist, muss die Ringgitterkaskade auf eigene im Schwerpunkt angreifende Stützen aufgestellt werden. Damit die Flansche der Rohre gegen die Kaskade dichten, bedient man sich zweier Klingerit Flachdichtungen, welche zwischen den Rohrflansch und den Kaskadenflansch geklemmt werden.

Der  $\lambda$ -Träger, welcher als Stütze dient, kann nach dem Einbau der Kaskade nur schwer eingehoben werden. Daher ist es sinnvoll, diesen vor dem Einbau gemäß der Abbildung 4-79 auf die Bodenträger zu stellen. Damit der  $\lambda$ -Träger den Einbau nicht behindert, wird er entsprechend Abbildung 4-80 zurückgesetzt und erst in späterer Folge in Position gebracht. Zusätzlich muss der  $\lambda$ -Träger in der Höhe angepasst werden muss. Dazu werden die oberen Endplatten zum Einpassen erst nach dem Einheben der Kaskade angebracht.

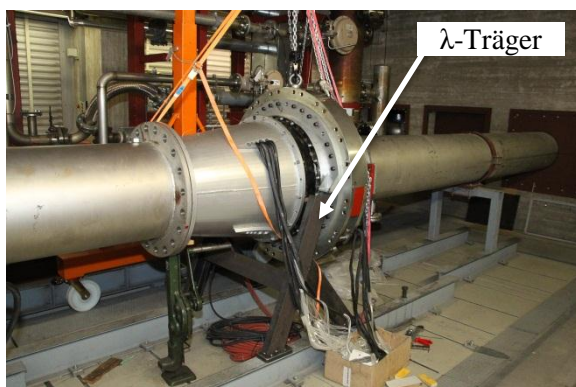


Abbildung 4-79: Einbaurichtung des  $\lambda$ -Trägers

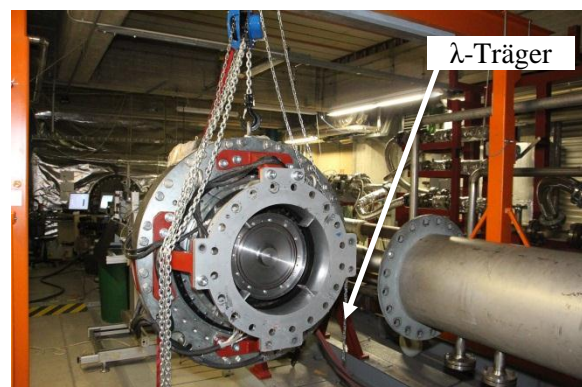


Abbildung 4-80: Einbausituation mit zurückgeschobenem  $\lambda$ -Träger

Vor dem Einbau der Ringgitterkaskade kommt die Halbkugel, gemäß Abbildung 4-81 in das zuströmende Rohr. Von dort wird sie in späterer Folge durch den Zugang im Einlauf aufgekipppt und auf den Einlaufstützen befestigt.



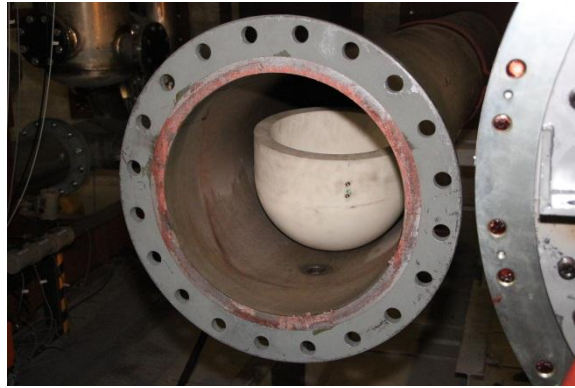


Abbildung 4-81: Einbausituation der Halbkugel

Die Druckschläuche sind soweit als möglich in der Transportschachtel zu belassen, damit sie beim Aufbau weder verschmutzt noch verletzt werden. Die Anschlusskabel des Motors werden über den an der Decke montierten U-Träger in die Steuerzentrale gezogen. Eine Kontrolle der Kanten des U-Trägers hinsichtlich eines Grates ist wichtig, um eine Verletzung der Motorkabel zu verhindern.

Der in Kapitel 4.1.4 beschriebene Kran soll für die weitere Bewegung der Ringgitterkaskade eingesetzt werden. Nach Abbildung 4-82 wird die Lastöse in die hintere Befestigungsplatte der Drehvorrichtung eingeschraubt und ermöglicht so ein Heben nahe des Schwerpunktes. Um die Kaskade für den Einbau waagrecht auszurichten, erfolgt ein Anhängen des hinteren Diffusorflansches mittels eines dünnen Zurrgurtes. Da die Rohrenden nicht weiter auseinander geschoben werden können, müssen einzelne M24 Schrauben, welche den Einlauf mit den Einlaufstützen verbinden, an der dem Rohr zugewandten Seite entfernt werden. Die Demontage der Schrauben wird in Abbildung 4-83 dargestellt. Die drei verbleibenden M24 Schrauben sollen aufgrund des ausgerichteten Einlaufes auf keinen Fall gelöst werden.



Abbildung 4-82: Position des Lasthaken und des Zurrgurtes

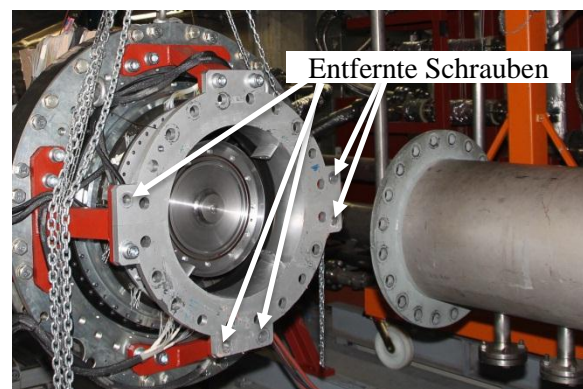


Abbildung 4-83: Entfernte Schrauben am Einlauf

Während des Einschlebens der Kaskade muss auf leichte Verklemmungen durch ein Schrägstellen der Kaskade Acht gegeben werden. Decken sich der Flansch vom Rohr mit dem Flansch des Einlaufes bzw. mit jenem des Diffusors kann dies vorerst als ausreichend angesehen werden.

Um die Kaskade absetzen zu können erfolgt ein Unterschieben des  $\lambda$ -Trägers. In der Deckplatte für den  $\lambda$ -Träger befinden sich Löcher, welche mit jenen des Befestigungsflansches der Kaskade zur Deckung gebracht werden müssen. Erleichtert wird dies durch das Einsetzen der Schrauben. Da die tatsächliche Position der Deckplatten mittels CAD nicht festgestellt werden kann, müssen diese vor Ort angerissen werden. Ein Ausbau des  $\lambda$ -Trägers lässt sich an dieser Stelle nicht vermeiden, da ein Schweißen im Turbolabor verboten ist. Nach dem Verschweißen wird der  $\lambda$ -Träger wieder eingebaut und wie in Abbildung 4-84 unter Verwendung der bereits vorhandenen Bohrungen am Bodenträger verschraubt.



Abbildung 4-84: Verschraubung des  $\lambda$ -Trägers

Zur Einstellung der Höhe der Ringgitterkaskade, werden Unterlegplatten zwischen  $\lambda$ -Träger und dem Befestigungsflansch der Kaskade beigelegt. Die Abbildung 4-85 verdeutlicht die Position der Unterlegplatten, welche ein Durchgangsloch von 28 mm aufweisen. Die Höhe dieser Scheiben wird so angepasst, dass die Einlaufachse mit der Rohrachse genau fluchtet. Um diesen Sachverhalt festzustellen, erfolgt ein Abheben des oberen Deckels des Einlaufes entsprechend Kapitel 4.4.1. An der Vorderseite wird ein Versatz zwischen Rohr und Einlauf sichtbar, welche an dieser Stelle zu vermessen ist. Wieder ist bei diesem Ausrichten der obere halbe Bereich wichtiger als der Untere. Der gemessene bzw. gemittelte Versatz gibt die Höhe für die Unterlegplatten an, welche überarbeitet und nach dem Einbau der Halbkugel sowie dem Verschließen des Einlaufes verschraubt werden können.



Abbildung 4-85: Unterlegscheiben für die Höheneinstellung am  $\lambda$ -Träger

Bei offenem vorderem Einlauf wird die Halbkugel von oben auf die beiden Einlaufrippen, in Form von Tragflügelprofilen, gezogen. Während die Halbkugel dort mit der Hinterseite gegen das Laufrad gedrückt wird, werden die vier M8x90 Passschrauben von unten durch die Einlaufrippen eingeschraubt. Da die Schrauben in ein Messinggewinde eingeschraubt werden, ist das Anzugsmoment niedrig zu wählen. Die vier Passschrauben sind ausreichend um die Halbkugel in der Position zu halten, bis der obere Einlauf eingehoben wird und auch dort die Verschraubung mit der Halbkugel erfolgt.

Bei der Befestigung gilt es die Wärmespannungen der Rohre zu berücksichtigen. Insbesondere ist bekannt, dass sich die Rohrwandtemperatur im Versuch auf etwa 70 °C aufheizen kann. Um diese Dehnung zu kompensieren, liegt das hintere Rohr ohne axiale Sicherung in der Rohrbefestigung und stellt so kein Problem dar. Das zuströmende Rohr ist ca. 5 m vor der Kaskade axial gesichert und muss sich in Richtung Kaskade axial ausdehnen können. Um dies zu gewährleisten, erfolgt ein Festschrauben der Kaskade am Federfundament, welches diesen Versatz ausgleichen kann.

Abschließend werden die M30x80 Sechskantschrauben welche die Rohrflansche mit der Kaskade verbinden bei einem Drehmoment von 1422 Nm eingeschraubt.

#### **4.4.1 DEMONTAGE UND MONTAGE DES VORDEREN EINLAUFES**

Die Demontage des vorderen oberen Einlaufes muss für etwaige Wartungsarbeiten oder dem Verbau der Halbkugel durchgeführt werden. Es ist dabei nicht notwendig, die Kaskade aus ihrer Befestigung zu heben, wodurch die Demontage wie auch die später folgende Montage erleichtert wird.

Zu Beginn der Demontage des vorderen Einlaufes erfolgt ein Entfernen alle Schrauben aus der oberen Halbschale, welche zur besseren Visualisierung in Abbildung 4-86 dargestellt werden. Dies betrifft explizit die Reihe der M30 Schrauben, die Reihe der M10x45 Schrauben zwischen dem Einlauf und der Außenkontur des Zwischendiffusers und die vier Zylinderkopfschrauben M24x75, welche die obere Halbschale des Einlaufes mit den Einlaufstützen verbinden. Des Weiteren befinden sich vier



Stück M12x45 Schrauben zur Verbindung der oberen und unteren Halbschale im Einlauf, welche gleich wie der dortige Passstift entfernt werden.

Da die Halbschale des Einlaufes nach oben abgehoben wird, muss die dort platzierte Einlaufstütze ausgebaut werden. Dazu erfolgt die Demontage der vier Stück M24 Zylinderkopfschrauben, welche diese mit der Drehvorrichtung verbinden. Die dadurch freigelegten Passhülsen sind herauszuziehen.

Die Einlaufstütze kann jedoch noch nicht entfernt werden, da die Schrauben der Drehvorrichtung dies seitlich verhindern. Dazu können vereinzelt Schrauben, ersichtlich in Abbildung 4-87, aus der Drehvorrichtung entnommen werden. Zur leichtgängigeren Bewegung der Einlaufstütze ist es sinnvoll, eine Gewindestange nach Abbildung 4-87 zwischen Einlauf und Drehvorrichtung zu spannen. Nach dem Entfernen der Stütze ist die Gewindestange wieder zu entfernen und eine Lastöse in den Einlauf einzudrehen.

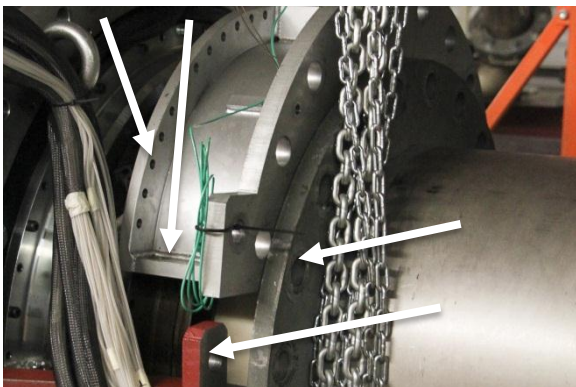


Abbildung 4-86: Kennzeichnung der zu entfernenden Schrauben für die Demontage des vorderen Einlaufes

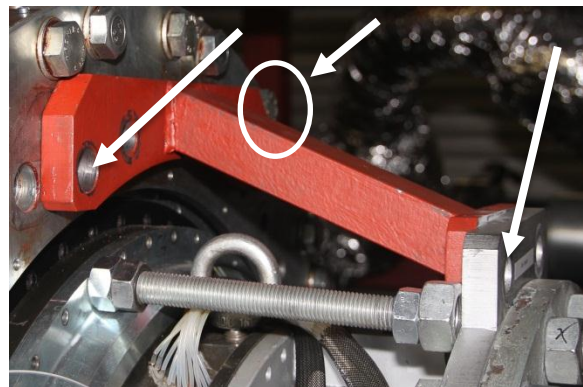


Abbildung 4-87: Darstellung der Demontage der Einlaufstütze mit Hilfe der Gewindestange und Kennzeichnung der zu entfernenden Schrauben

Zur Unterstützung beim Anheben befindet sich rechts und links in der Halbschale je ein Abdrückgewinde, welches an dieser Stelle genutzt wird. Nach dem Ausheben der Halbschale ist der Kanal in diesem Bereich zugänglich.

Der Zusammenbau des vorderen Einlaufes erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Demontage. Für das Einheben des Einlaufes darf auf keinen Fall die Gewindestange zwischen der Außenkontur des Zwischendiffusers und dem vorderen Rohrflansch gespannt werden. Der Grund liegt in der nur lose zentrierten Außenkontur des Zwischendiffusers, welcher axial lediglich über den vorderen Einlauf in Position gehalten wird. Wenn das Aufspreizen erforderlich wird, darf die Gewindestange nur zwischen Drehvorrichtung und Rohrflansch gespannt werden. Ebenso muss vor dem Einheben kontrolliert werden, ob sich die Abdruckschrauben komplett außerhalb der Trennebene befinden.

Bei der Verschraubung ist in folgender Reihenfolge vorzugehen:

1. Einsetzen des Einlaufes
2. Einbau der Passstifte.
3. Einschrauben der vier Stück M12x45 Zylinderkopfschrauben in der Trennebene mit einem Drehmoment von 87 Nm.
4. Einsetzen der Einlaufstütze unter eventueller Zuhilfenahme der Gewindestange
5. Verschrauben der Einlaufstütze hin zur Drehvorrichtung mittels vier Stück M24x55 Zylinderkopfschrauben. Das Drehmoment beträgt für die zwei inneren Schrauben 670 Nm, für die Schrauben, welche durch die Passhülsen gehen nur 300 Nm.
6. Verschrauben der vier Stück M24x75 Zylinderkopfschrauben zwischen Einlaufstütze und Einlauf mit einem Drehmoment von 670 Nm.
7. Verschrauben der M24x150 Schrauben der Drehvorrichtung
8. Einschrauben der M10x45 Zylinderkopfschrauben hin zur Außenkontur des Zwischendiffusors mit einem Drehmoment von 55 Nm.
9. Einschrauben der M30x80 Sechskantschrauben hin zum Rohrflansch mit einem Drehmoment von 1422 Nm.
10. Verschrauben der M8x90 Passschrauben zur Befestigung der Halbkugel.

#### **4.4.2 DEMONTAGE UND MONTAGE DER AUßENKONTUR DES ZWISCHENDIFFUSORS**

Die Demontage des Außenkontur erfolgt für etwaige Wartungsarbeiten wie auch für den Ölanstrich. Da für den Ölanstrichversuch die Arbeitszeit von bedeutender Rolle ist, kann von einer Ein-Mann Arbeitszeit von 2 Stunden für die Demontage und etwa weiteren 2 Stunden für die Montage ausgegangen werden.

Für die Demontage werden gemäß Abbildung 4-88 zuerst zwei Stück M24x150 Sechskantschrauben aus der Drehvorrichtung entfernt. Dadurch kann die obere Einlaufstütze nach dem Entfernen der sechs Stück M24 Schrauben nach rechts herausgezogen werden. Das entnehmen der Einlaufstütze mit Hilfe der Gewindestange sei der Abbildung 4-87 verdeutlicht.

Zum Anheben des Außenkontur des Zwischendiffusors sind einerseits die M10x45 Schraubenreihe und andererseits die M8x60 Schraubenreihe am zweigeteilten Zentrierring zu entfernen. Logischerweise hat dies nur an der oberen Halbschale zu geschehen. Die beiden M12x50 Schrauben, welche die zwei Halbschalen miteinander verbinden, sowie die beiden M8x25 Schrauben des Ringes dürfen nicht vergessen werden. Die Entfernung der beiden Passstifte des Ringes erfolgt mittels eines Durchschlages. Anschließend wird der Ring seitlich herausgenommen. Die beiden weiteren sich in der Außenkontur befindenden Passstifte müssen nicht herausgenommen werden, da die Außenkontur durch das Einschrauben der Abdrückschrauben abgezogen wird. Ist der Zwischenkanal mittels der

Abdrückschrauben von den Passstiften abgezogen, erfolgt nach dem Eindrehen der Lastöse an der Oberseite ein Abheben durch den Kran. Vorsicht ist mit dem O-Ring, welcher in der Nut der Außenkontur des Zwischendiffusers liegt, geboten. Dieser wird mittels eines Schraubenziehers aus der Nut gehoben und wie in Abbildung 4-89 nach hinten gelegt. Dies soll gleichzeitig mit dem Anheben passieren, damit die Dehnung des O-Ringes nicht zu sehr ausgenutzt wird.

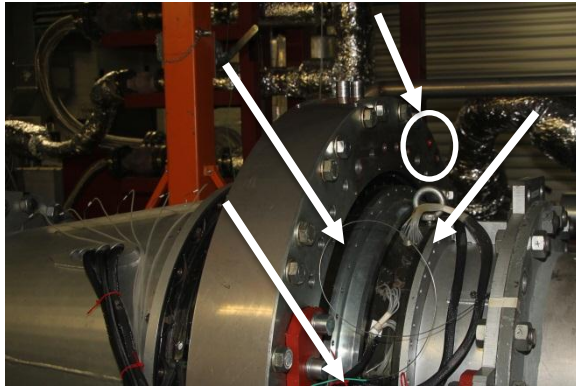


Abbildung 4-88: Kennzeichnung der zu entfernenden Schrauben für die Demontage der Außenkontur des Zwischendiffusers



Abbildung 4-89: Ausbau des O-Ringes

Der Zusammenbau geschieht in umgekehrter Reihenfolge, beginnend mit dem Einheben der Außenkontur. Besondere Vorsicht gilt dem O-Ring, welcher durch die scharfen Kanten des Kanales verletzt werden kann. Es ist hilfreich den O-Ring auf die Schaufelreihe zu stülpen während der Kanal nach unten gefahren wird. Sobald als möglich erfolgt ein Einfädeln in die Führungsnut.

Zum Aufziehen der Außenkontur auf die Passstifte werden an dieser Stelle die M12 Schrauben, welche die zwei Halbschalen verbinden angezogen. Des Weiteren wird der zweigeteilte Zentrierring eingehoben und zuerst mit den Passstiften und anschließend mit den beiden M8x25 Schrauben zusammengezogen. Nach hinten wird er mit den M8x60 Schrauben verschraubt. Dies ermöglicht eine Zentrierung für die Außenkontur des Zwischendiffusers. Für alle weiteren Schrauben gilt die Einhaltung der untenstehenden Reihenfolge:

1. Entfernen der Lastöse
2. Aufklemmen des Einlaufes mit der Gewindestange wie in Abbildung 4-87
3. Einsetzen der Einlaufstütze und verschrauben mit den zwei äußeren M24x55 Zylinderkopfschrauben mit einem Drehmoment von 300 Nm. Die inneren M24x55 Zylinderkopfschrauben, wie auch die vorderen M24x75 Zylinderkopfschrauben werden mit einem Drehmoment von 670 Nm angezogen.
4. Verschrauben der Außenkontur mit dem vorderen Einlauf durch die M10x45 Zylinderkopfschrauben mit einem Drehmoment von 55 Nm.

### **4.4.3 ANSCHLUSS DES ELEKTROMOTORS**

Der Anschluss des Elektromotors erfolgt an einen Frequenzumrichter der Type „Lenze L-Force Drives – State Line C 8400“ und ist von einem konzessionierten Elektrotechniker durchzuführen. Zwischen dem Frequenzumrichter und der Versorgungsleitung ist laut Hersteller ein Netzfilter zu schließen. Die Datenblätter für den Elektromotor wie auch für den Netzfilter sind im Anhang beigelegt.

Für das Programmieren und die Inbetriebnahme des Motors mittels der Keypadsteuerung des Frequenzumrichters, sei im Anhang eine Kurzanleitung gegeben. Da der Frequenzumrichter die Einstellungen nicht speichert, muss diese Anleitung vor jeder Inbetriebnahme Folge geleistet werden.

Die Kurzanleitung ersetzt keinesfalls das mitgelieferte Gerätehandbuch, welches unter anderem auf der CD eingesehen werden kann.

## **4.5 ABSCHLIESSENDE ARBEITEN**

Wurde die Ringgitterkaskade in das Rohrsystem der Verdichter-Anlage installiert, müssen vor Inbetriebnahme noch weitere Arbeiten abgeschlossen werden.

### **4.5.1 ZAHNRADBEFESTIGUNG**

Damit während des Betriebes die Drehvorrichtung nicht durch den Luftstrom, welcher an den Schaufeln anliegt, verdreht wird, muss diese dementsprechend gesichert werden. Hierbei ist zu gewährleisten, dass die Leitschaufeln bei stillstehender Anlage jederzeit verdreht werden können.

Die Realisierung erfolgt über eine Zahnradbefestigung im unteren Teil der Drehvorrichtung. Dafür wird eine Welle mit einem Klemmkonus und einem Zahnrad auf eine Platte verbaut. Zusätzlich besitzt die Welle wie in Abbildung 4-90 ersichtlich einen Vierkant mit dem die Drehvorrichtung mit Hilfe eines entsprechenden Gabelschlüssels weitergedreht werden kann. Werden die drei Stück M6x20 Zylinderkopfschrauben aus Abbildung 4-90 angezogen, klemmt der Klemmkonus unter dem Deckel die Welle gegen die Flanschhülse und die Position wird gehalten.

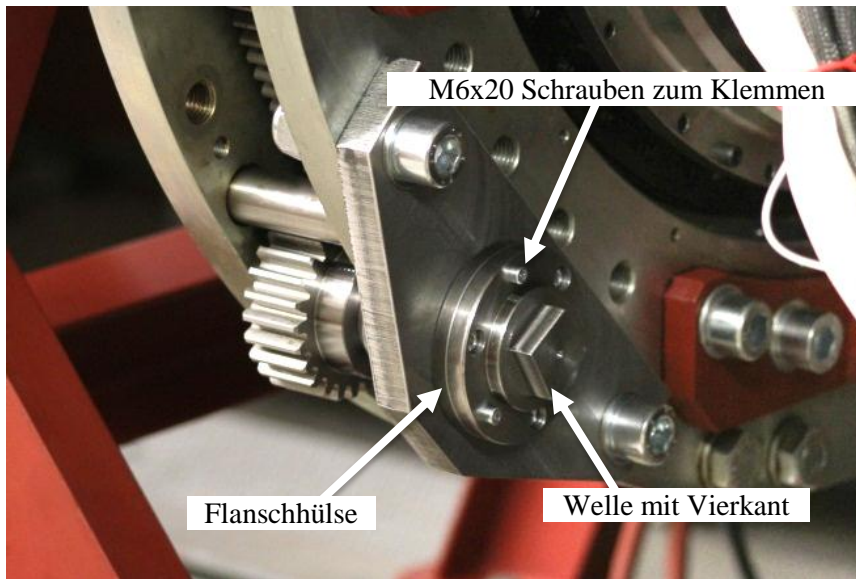


Abbildung 4-90: Zahnradbefestigung mit Klemmwelle

#### 4.5.2 SCHLAUCHMANAGEMENT

Wie aus den bisherigen Kapiteln hervorgeht, sind ungefähr 160 Schläuche verlegt worden. Damit dies übersichtlich gestaltet werden kann, wurde eine Schablone welche in Abbildung 4-91 ersichtlich ist, angefertigt. Nach der mit Buchstaben gekennzeichneten Reihenfolge in welcher die Druckschläuche in der Innen- und Außenkontur des Zwischendiffusers angeschlossen sind, werden sie durch die einzelnen Löcher gezogen. In der oberen Lochreihe befinden sich die Schläuche der Innenkontur, in der unteren jene der Außenkontur.



Abbildung 4-91: Durchführung der Druckmessschläuche

Die Verbindung mit dem Druckmesskasten, in welchem sich sechs PSI-Module befinden, erfolgt über sogenannte Connectoren der Firma Scanivalve, wovon einer in Abbildung 4-92 dargestellt ist. An der Unterseite befindet sich ein rotes Dichtungsblatt, welches die einzelnen Leitungen voneinander trennt. Jede Leitung in diesem Connector ist wie in Abbildung 4-93 ersichtlich nummeriert. Dabei sind ungerade Zahlen immer in der hinteren (hohen) Reihe und die geraden Zahlen in den vorderen (niedrige) Reihe angeordnet. Die Teilstriche zählen somit nur die geraden Zahlen, beginnend mit 0.



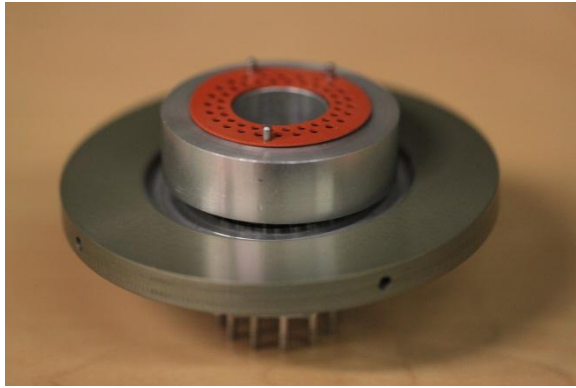


Abbildung 4-92: Connector von oben mit Dichtungsblatt

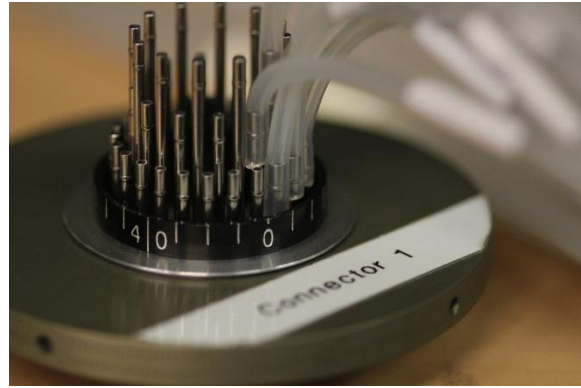


Abbildung 4-93: Connector von unten mit Nummerierung

Im Druckmesskasten befindet sich das Gegenstück zum abgebildeten Connector, welcher nach einem im Messkasten befindlichen Anschlussplan mit den PSI Modulen verbunden ist. Vorsicht sei hier bei der Zahl 0 geboten, da diese am PSI Modul an letzter Stelle (Stelle 48) angeschlossen ist. Um die Übersicht zu wahren, wird jeder angeschlossene Druckschlauch mit seiner zugehörigen Nummer in eine Tabelle, welche sich im Anhang befindet, eingetragen. Aus dem Sachverhalt, dass mehr Druckschläuche als Anschlüsse an den PSI-Modulen vorhanden sind, werden insgesamt vier solcher Connectoren verwendet, wobei immer zwei gleichzeitig verbunden sein können.

Aus dieser Überlegung heraus wurden auf dem Connector 1, welcher immer verbunden bleiben muss, alle für die Betriebsparameter wichtigen Druckmessschläuche angeschlossen. Die beiden Connectoren 3 und 4 werden im Betrieb für die Messung während dem Betrieb mit dem Connector 2 ausgewechselt. Bei der Auswertung ist darauf zu achten, welcher Connector zu welchem Zeitpunkt angeschlossen war.

Am Connector 2 befinden sich jene für die statischen Wanddruckbohrungen aussagekräftigen Reihen. Dadurch ergibt sich, dass generell beim Versuch nur mit den Connectoren 1 und 2 genügend Messdaten gesammelt werden, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu bekommen. Auf Connector 3 und 4 befinden sich in weiterer Folge Druckmessreihen, mit welchen eine Aussage über Umfangssymmetrie der Strömung getroffen werden können bzw. befinden sich dort die übrigen Anschlüsse für die Grenzschichtzäune.

Für den Anschlussplan sowie für die Positionen und die Reihenzuordnung der Druckmessbohrungen sei auf den Anhang verwiesen.

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Schläuche hin zur Ringgitterkaskade mittels Kabelbinder gebündelt und befestigt werden, so dass sie weder am Boden ankommen, noch unter dem Eigengewicht durchhängen.



### 4.5.3 WUCHTEN DES LAUFRADES

Vor der Inbetriebnahme des Laufrades, muss dieses gewuchtet werden. Dies erfolgt nach der VDI 2056 „Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen“. Da der Motor, an dem die Schwingungen zu messen wäre, nicht zugänglich ist, wird die Messung an einer Einlaufstütze durchgeführt. Als Messgerät findet das Bently Nevada TK 81 gemäß Abbildung 4-94 Anwendung.

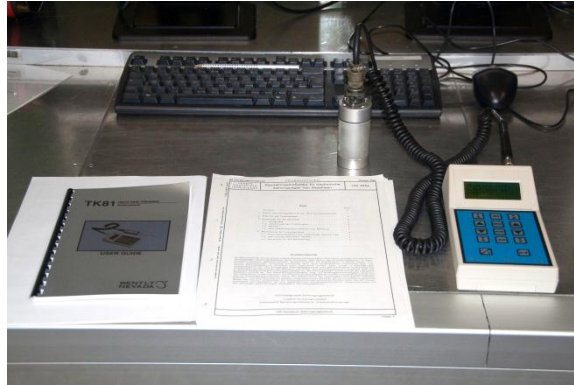


Abbildung 4-94: Bently Nevada TK 81 Schwingungsmessgerät

Gemäß der Norm VDI 2056 wurde der Prüfstand der Gruppe K zugeordnet und der angeführte kleinste Grenzwert von 0,71 mm/s eingehalten. Aufgrund des Schwingungseinflusses durch den gesamten Prüfstand, wird für einen längeren Betrieb mit einer Drehzahl von 5500 U/min eine ständige Wellenschwingsüberwachung, welches nur die Relativbewegung zwischen Laufrad und Gehäuse misst empfohlen.

# 5 MESSTECHNIK

Dieses Kapitel beschreibt die relevante Messtechnik, die im Rahmen dieser Arbeit für die durchgeführten Messungen verwendet wird. Diese ist die Druckmessung der Wanddruckbohrungen zur Ermittlung der Druckverläufe entlang der Innen- und Außenkontur des Zwischendiffusors. Die Sondenmessung mit Hilfe einer Fünf-Loch-Sonde zur Bestimmung des Betriebspunktes, sowie der Ölanstrich zur Bestimmung der Ablösekante im Zwischendiffusor.

## 5.1 DRUCKMESSUNG

Für die Druckmessung werden sechs Stück PSI-Module aus dem Messschrank „2“ des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der TU Graz verwendet. Konkret handelt es sich hierbei um die Module mit der vergebenen Nummer: 2103, 2105, 2106, 2107, 2111 und 1096. Bis auf das Modul 1096, welches in einem Bereich von  $\pm 3,5$  bar misst, ist der Messbereich der Module auf einen Druckbereich von  $\pm 2,1$  bar beschränkt. Da generell nur Drücke nahe dem Umgebungsdruck erwartet werden, ist dieser Messbereich ausreichend. Alle Druckmodule sind für eine Relativdruckmessung angeschlossen und werden mit einer softwaremäßigen Abtastfrequenz von 200ms ausgelesen. Die Messabweichung der PSI-Module beläuft sich auf 0,05% des maximalen Messbereiches. Die Messunsicherheit der statischen Wanddruckbohrungen belaufen sich auf  $\pm 1$ mbar.

Zum Auslesen der PSI Module, welche über das Netzwerk mit dem Messcomputer verbunden sind, wird das Softwarepaket LabVIEW 7.1 von National Instruments verwendet. Hierbei sind in vorgegebener Reihenfolge die Auswertungsprogramme, welche sich auf der CD im Anhang befinden, am Messcomputer zu starten:

- **Data Acquisition PSI\_2:** Bei diesem Programm handelt es sich um die Messdatenerfassung. Wenn nach dem Drücken der Starttaste alle Felder der Druckmodule beginnen von 0 aus zu zählen, kann von einer korrekten Verbindung und einem Einlesen der aktuellen Messdaten ausgegangen werden. Die Abtastfrequenz ist hier einstellbar, soll jedoch wenn nicht anders benötigt auf 200ms belassen werden. Die erhöhten Datenmengen bei geringerer Abtastfrequenz können zu eventuellen Netzwerkproblemen führen.

- **MesswerterfassungNew:** Dieses Programm liest die Daten aus dem Programm „Data Acquisition PSI\_2“ ein und gibt sie zur weiteren Verwendung durch andere Programme frei.
- **AnCa\_MainDisplay:** Dieses Programm wurde eigens für die Anzeige der laufenden Messdaten für die Ringgitterkaskade entwickelt. Die Programmbeschreibung ist dem nachfolgenden Text zu entnehmen.
- **four\_Axis\_PTP\_Vers\_ANNULAR\_7\_2:** Dieses Programm wird verwendet, um die Messdaten aufzuzeichnen. Dabei gilt es eine Anzahl der aufzunehmenden Werte einzustellen. In den folgenden Versuchen erfolgt immer eine Aufzeichnung von zehn Werten, für eine Mittelwertbildung. Zusätzlich wird mit diesem Programm die Traversierung der Sonde angesteuert. Die durch dieses Programm aufgezeichneten Werte werden in Dateien abgelegt und können mit Hilfe der beigelegten Programme auf der CD durch die Software „Matlab“ ausgewertet werden.

„AnCa\_MainDisplay“ **Programm:** Das Programm wurde zur Realisierung der Online-Datenanzeige der Ringgitterkaskade entwickelt. Die Programmoberfläche wird in Abbildung 5-1 dargestellt.

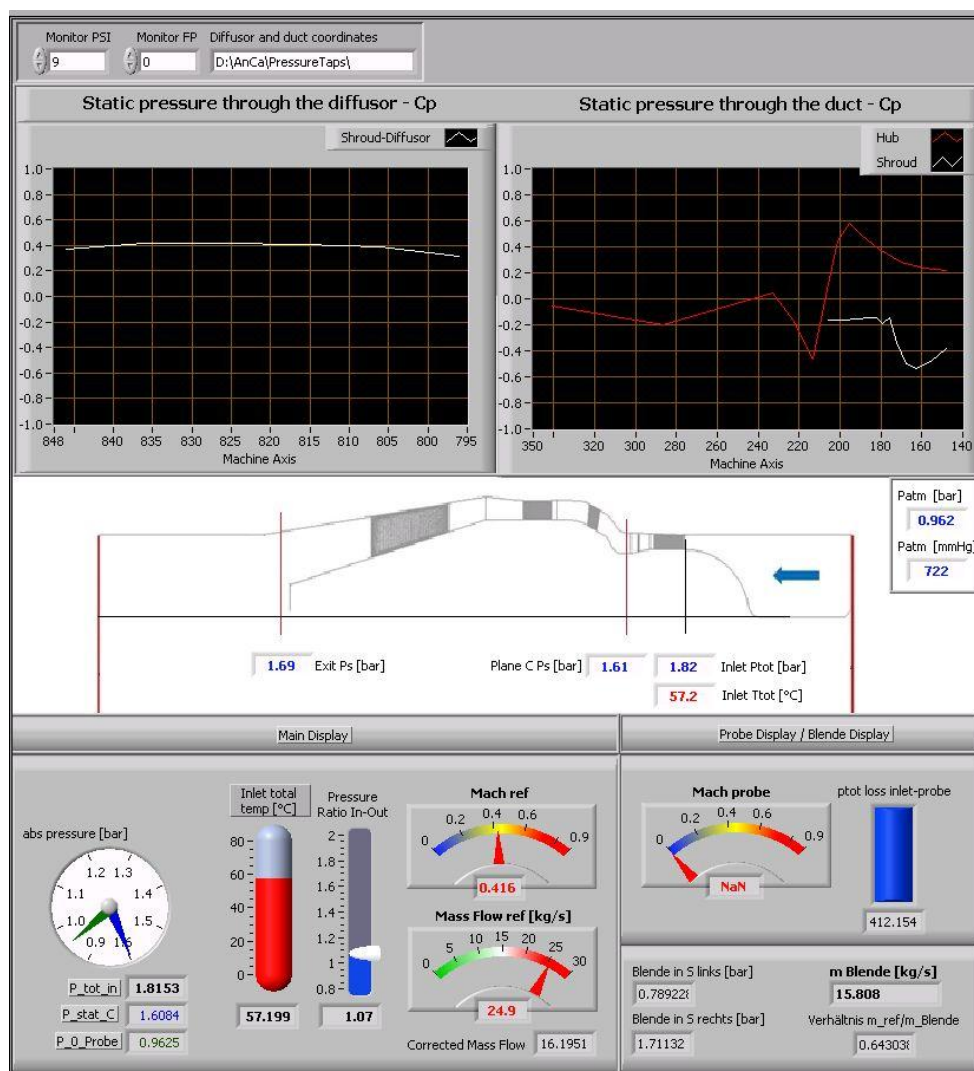


Abbildung 5-1: Display des Programms "AnCa MainDisplay"

Im obersten Bereich besteht die Möglichkeit den Datenstrom bzw. den Messschrank auszuwählen. Des Weiteren ist der Ordner für die Koordinaten der Druckmessbohrungen anzugeben. Die Werte haben sich in Text (\*.txt) Dateien im angegebenen Verzeichnis zu befinden.

Die beiden Diagramme zeigen den Verlauf des Druckbeiwertes  $C_p$  (5.1) über die Kanallänge an. Hierbei stellt das rechte Diagramm den Zwischendiffusor und das linke den Diffusor im hinteren Bereich dar. Aufgrund der Einbaurichtung der Ringgitterkaskade sind diese Diagramme zum leichteren Ablesen während des Versuchs von rechts nach links zu lesen.

Im mittleren Bereich können neben dem Querschnitt der Maschine auch die aktuell gemessenen Druck- und Temperaturwerte entnommen werden. Alle Drücke werden als Absolutdrücke ausgegeben.

Im Main Display kann neben den Drücken auch das Druckverhältnis zwischen Einlauf und Diffusorausgang (5.2) abgelesen werden. Zusätzlich wird die Machzahl (5.3), ermittelt aus dem Druckverhältnis, angegeben. Der Massenstrom (5.6) wird ebenso ausgegeben. Dieser weist aufgrund der unterschiedlichen Positionen der totalen und statischen Druckmessung einen konstanten Fehler auf. Ein weiterer Fehler ist der nicht konstanten Geschwindigkeitsverteilung über die Kanalhöhe zuzuschreiben, welche in der Gleichung nicht berücksichtigt wird. Für die Einstellung des Betriebspunktes haben diese konstanten Abweichungen keinen Einfluss. Für eine bessere Approximation des Massenstroms wird er deshalb noch ein zweites Mal mit Hilfe einer stromabwärts liegenden Blende (5.7) ermittelt.

Im „Probe Display“ sind nur Werte abzulesen, wenn die Sonde installiert ist und sich im Kanal befindet. Diese zeigt anhand der Formel (5.4) die Machzahl im aktuellen Messpunkt an. Ein weiterer relevanter Faktor ist der „Pressure Loss“ Faktor (5.5), welcher zwischen dem Totaldruck am Einlauf und jenem, ermittelt durch die Sonde angegeben wird. Er ist repräsentativ für die Einlaufverluste. Für den mittleren statischen Druck wird eine Mittelung aus den Wandbohrungen in der Ebene C durchgeführt. Konkret werden hierfür die Bohrungen AC8, AD8, AH15, AF8, B13, D13, E9 herangezogen.

Druckbeiwert  $C_p$  
$$C_p = \frac{p_x - p_{stat,C}}{p_{tot,in} - p_{stat,C}} \quad (5.1)$$

Pressure Ratio IN-OUT 
$$P. R. = \frac{p_{tot,in}}{p_{stat,Diffusor,aus}} \quad (5.2)$$

Mach Ref 
$$M_{ref} = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} * \left( \left( \frac{p_{tot,in}}{p_{stat,C}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)} \quad (5.3)$$

Mach Probe 
$$M_{Sonde} = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} * \left( \left( \frac{p_{tot,sonde}}{p_{stat,C}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)} \quad (5.4)$$

$P_{tot,loss}$  inlet-probe 
$$p_{tot,loss} = \frac{p_{tot,in} - p_{tot,Sonde}}{p_{tot,in} - p_{stat,C}} \quad (5.5)$$

Massenstrom  $m_{ref}$  [kg/s] 
$$m_{ref} = \rho_r * c_r * A_c$$

$$m_{ref} = \left( \frac{p_{tot,in}}{R * T_{tot,in}} \right) * (M_{ref} * \sqrt{\kappa * R * T_{tot,in}}) * A_c \quad (5.6)$$

Massenstrom Blende  $m_{Blende}$  [kg/s] 
$$\text{nach DIN 1952} \quad (5.7)$$

## 5.2 SONDENMESSUNG

Die Sondenmessung findet in wie in Abbildung 5-2 verdeutlicht in der Messebene C statt.

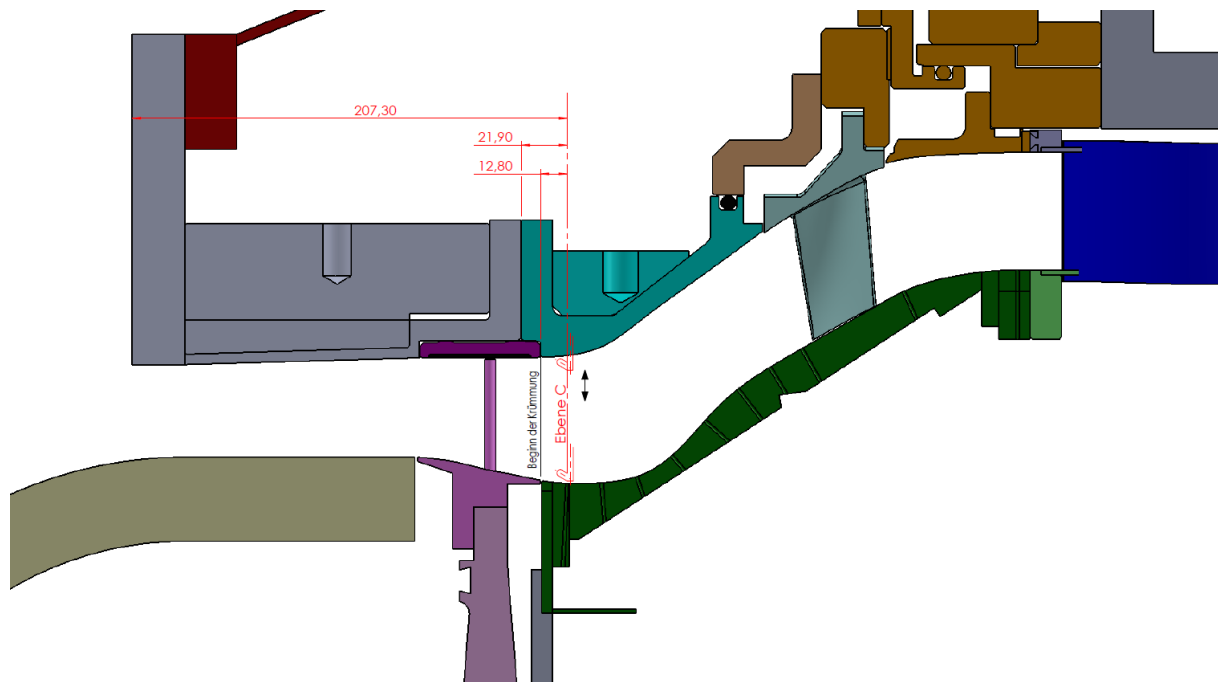


Abbildung 5-2: Sondenmessebene C

Um die Genauigkeit der Messung vor allem an der Innenkontur zu erhöhen, wird eine gekröpfte Messsonde verwendet. Daher findet eine Fünf-Loch-Sonde mit einem Kröpfungswinkel von 15 Grad Anwendung.

Grundsätzlich soll mit der Fünf-Loch-Sondenmessung der statische und totale Druck, die statische und totale Temperatur, die Machzahl, Yaw und Pitch Winkel über die Kanalhöhe ermittelt werden.

Für die Messung wird die Sonde mit einer Traversiervorrichtung über der Höhe des Kanals verfahren. Die Position der Messpunkte gemessen vom unteren Kanal weg ist dem Anhang zu entnehmen. In jedem Messpunkt erfolgt durch eine weitere spezielle radiale Traversierung ein Drehen der Sonde genau in die Strömung. Somit kann sichergestellt werden, dass sich die Sonde immer in ihrem Kalibrierbereich befindet und nicht durch schräge Anströmung hinausfällt. Der Kalibrierbereich der Sonde kann der nachstehenden Tabelle 5-1 entnommen werden.

Tabelle 5-1: Kalibrierbereich der gekröpfen Fünf-Loch-Sonde

Mach Number	$0,1 \leq Ma \leq 0,8$
Yaw angle	$-20 \leq \alpha \leq 20$
Pitch angle	$-16 \leq \gamma \leq 16$



Der Anschluss der fünf Druckmesspunkte der Sonde erfolgt über Silikonschläuche mit einem Innendurchmesser von 0,8 mm am Connector 1. Darüber hinaus sind sie mit dem PSI-Modul 2106 mit einem Messbereich von  $\pm 2,1$  bar verbunden. Die genaue Anschlussposition kann dem Anschlussplan im Anhang entnommen werden. Die Messdatenübertragung erfolgt via Ethernet und kann mit dem Programm „four\_Axis\_PTP\_Vers\_ANNULAR\_7\_2\_michi“ in Labview 7.1 ausgelesen werden.

Die Temperaturmessung der Sonde wird über sogenannte Field Point Module von National Instruments via einem RS-485 Interface ausgelesen und ebenso im Programm „four\_Axis\_PTP\_Vers\_ANNULAR\_7\_2“ in Labview 7.1 angezeigt.

Die einzelnen Messpunkte an der Sonde sowie die Darstellung des Pitch ( $\gamma$ ) – und Yaw ( $\alpha$ ) Winkels sind folgender Abbildung 5-3 zu entnehmen.

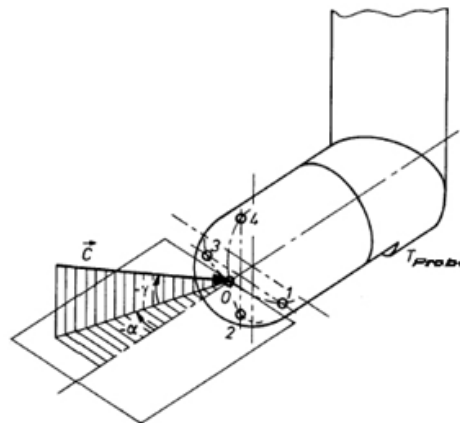


Abbildung 5-3: Prinzipskizze einer Fünf-Loch-Sonde  
[Marn 2008, S. 29]

### 5.2.1 ERMITTLUNG DER MESSWERTE<sup>32</sup>

Um aus den fünf erhaltenen Drücken und der Temperatur zu einem statischen und totalen Druck, einer statischen und totalen Temperatur sowie zu einer Machzahl, einem Yaw und einem Pitch Winkel zu gelangen, behilft man sich folgender Formeln.

$$\text{Machzahl Parameter} \quad k_{Ma} = \frac{\Delta p}{p_0} \quad (5.8)$$

$$\text{Yaw Winkel Parameter} \quad k_{\alpha} = \frac{p_3 - p_1}{\Delta p} \quad (5.9)$$

$$\text{Pitch Winkel Parameter} \quad k_{\gamma} = \frac{p_4 - p_2}{\Delta p} \quad (5.10)$$

$$\text{mit:} \quad \Delta p = p_0 - \frac{p_1 + p_3}{2} \quad (5.11)$$

<sup>32</sup> Vgl. Marn 2008, S. 29f.

Mit Hilfe von Kalibrierwerten, welche für die verwendete Sonde der CD im Anhang zu entnehmen sind und einem mehrparametrischen Approximationsverfahren nach Bohn D. (1975) können Werte für die Machzahl, den Recoveryfaktor, den Totaldruck Parameter und den Yaw- und Pitch Winkel gefunden werden. Aus diesen können mit den Gleichungen (5.12) bis (5.17) die restlichen Parameter ermittelt werden. Der Wert für den Isotropenexponenten  $\kappa$  wird konstant mit 1,402 angenommen.

$$\text{Totaldruck Parameter} \quad k_{pt} = \frac{p_t - p_0}{\Delta p} \quad (5.12)$$

$$\text{Statischer Druck} \quad p = \frac{p_t}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} * Ma^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} \quad (5.13)$$

$$\text{Recovery Faktor} \quad r = \frac{T_{Sonde} - T}{T_t - T} \quad (5.14)$$

$$\text{Totaltemperatur} \quad T_t = T_{Sonde} * \left( \frac{1 + \frac{\kappa - 1}{2} * Ma^2}{1 + r * \frac{\kappa - 1}{2} * Ma^2} \right) \quad (5.15)$$

$$\text{Statische Temperatur} \quad T = \frac{T_{Sonde}}{1 + r * \frac{\kappa - 1}{2} * Ma^2} \quad (5.16)$$

$$\text{Absolute Geschwindigkeit} \quad c = Ma * \sqrt{\kappa * R * T} \quad (5.17)$$

Die gesamte Auswertung für die Sondenmessung der Ringgitterkaskade findet sich in der Matlab Datei „FHP\_ANCA\_1.m“ auf der beigelegten CD wieder und kann dort für eine Messdatenauswertung ausgeführt werden.

### 5.2.2 EINFLÜSSE AUF DIE MESSUNG MIT FÜNF-LOCH-SONDEN

Bei der Interpretation der Messergebnisse aus Fünf-Loch-Sonden-Messungen muss Vorsicht geboten sein. Im Falle der Ringgitterkaskade muss mit den nachfolgenden Unsicherheiten gerechnet werden:

Ein starker Geschwindigkeitsgradient in der Strömung, selbst bei paralleler Zuströmung, führt zu einem falschen Ergebnis hinsichtlich der Strömungsrichtung. Ebenso verfälschen auch Reynoldszahlen außerhalb von  $10^2$  bis  $10^5$  das Messergebnis und es muss bei instationärer Zuströmung und bei einem Turbulenzgrad von 20% mit einem Totaldruckfehler von 2% gerechnet werden.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> Vgl Marn 2008, S. 31.

## 5.3 ÖLANSTRICH

Beim Ölanstrich handelt es sich um ein prinzipiell einfaches Verfahren zur Visualisierung von wandnahen Strömungen. Genau genommen bilden sich durch die Viskosität des Öles nur die mittleren Schubspannungen im Ölanstrich ab. Die hierbei zu erkennenden Linien zeigen die Richtung der Schubspannungen (Trajektorien) im Öl an. Durch eine Videoaufnahme des Ölanstriches während der Beaufschlagung mit der Strömung ist eine qualitative Beurteilung der Strömungsrichtung anhand der Bewegung von einzelnen Tropfen möglich.

In weiterer Folge kann das Öl zur besseren Darstellung zweifärbig aufgetragen werden. Die Bewegungsrichtungen vor allem in Mischungszonen werden so noch deutlicher dargestellt.

Durch das Erkennen von Wirbel und Bewegungsrichtungen sind indirekte Rückschlüsse auf eine drei dimensionale Strömung durchaus möglich. Sie schließen jedoch weitere Untersuchungen durch z.B. Lasermessverfahren nicht aus.

Wenn im Ölanstrich eine Ablösung stattfindet, bedeutet dies im Ablösepunkt einen gegen Null gehenden Geschwindigkeitsgradienten und somit eine gegen Null gehende Schubspannung. Nach der Ablöselinie entsteht ein Rückströmgebiet mit einem gegenläufigen Geschwindigkeitsgradienten und demnach auch einer entgegen gerichteten Schubspannung. Diese Tatsache führt zu einer Anhäufung des Öles an der Ablöselinie, wodurch diese gut dargestellt wird.

Weitere Anhäufungen entstehen aus demselben Grund in Bereichen mit niedriger Schubspannung im Ölanstrich.

Zum Herstellen des Ölanstriches wird ein herkömmliches Motoröl mit Titanoxid ( $\text{TiO}_2$ ) verrührt. Das Mischungsverhältnis muss so eingestellt werden, dass die Viskosität die später beaufschlagte Strömung mit deren Schubspannungen gut abbildet. Die Masse muss solange verrührt werden, bis alle Klümpchen in Lösung gegangen sind. Ein Hinzugeben von Pulverfarbe verfärbt das Gemisch entsprechend.

Wie ersichtlich ist die Viskosität des Ölanstriches ein wichtiger Parameter und es ist daher beim Einstellen besondere Vorsicht geboten. Das Gemisch aus Motoröl und Titanoxid zieht schnell Wasser aus der Umgebungsluft an, wodurch sich die Viskosität verändert. Eine Mengenangabe zum Mischungsverhältnis müsste somit die Zeit bis zum Aufbringen der Strömung und die Luftfeuchtigkeit mit berücksichtigen. Des Weiteren fließen die Parameter der Strömung in die erforderliche Viskosität des Ölanstriches mit ein. Da diese oft noch nicht genau bekannt sind, wird das Mengenverhältnis iterativ auf einer Probefläche ermittelt. Bei einer zu niedrigen Viskosität würde der Ölanstrich aufgrund der vorherrschenden Strömung sofort abgetragen werden. Eine zu hoch eingestellte Viskosität stellt die Schubspannungen schlecht bis gar nicht dar.

# 6 MESSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Initialmessungen beschrieben und Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Konfigurationen hinsichtlich der Wirbelgeneratoren und der Stäbchen gezogen.

Da die Messungen an unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden, müssen zum Ausschluss der variierenden Umgebungszustände die gemessenen Drücke normiert werden. Im Falle der statischen Druckbohrungen entlang der Zwischendiffusorkontur wird der Druckbeiwert  $C_p$  nach Gleichung (6.1) herangezogen. Hierbei repräsentiert  $p_{(n)}$  den statischen Druck an der jeweiligen Position  $n$ ,  $p_{stat,C}$  den mittleren statischen Druck in der Ebene C und  $p_{tot,in}$  den Totaldruck im Einlauf.

$$\text{Druckbeiwert } C_p \qquad C_p = \frac{p_{(n)} - p_{stat,C}}{p_{tot,in} - p_{stat,C}} \qquad (6.1)$$

Für die Darstellung des Totaldruckverlaufes sowie des statischen Druckverlaufes wird der auf der Abszisse aufgetragene Druck zum Ausblenden von Umgebungseinflüssen ins Verhältnis mit dem Totaldruck am Einlauf gestellt. Analog geschieht dies für die Darstellung der Totaltemperatur und der statischen Temperatur, welche in Bezug zur Totaltemperatur am Einlauf gestellt werden.

Um die Druckmessbohrungen übersichtlicher darzustellen werden zwei schematische Kreise verwendet. Der Kreis aus Abbildung 6-1 repräsentiert die Außenkontur des Zwischendiffusers, wobei die farbigen Linien den Druckreihen der nebenstehenden Legende entsprechen. Analoges gilt für den Positionskreis aus Abbildung 6-2 für die Innenkontur des Zwischendiffusers.

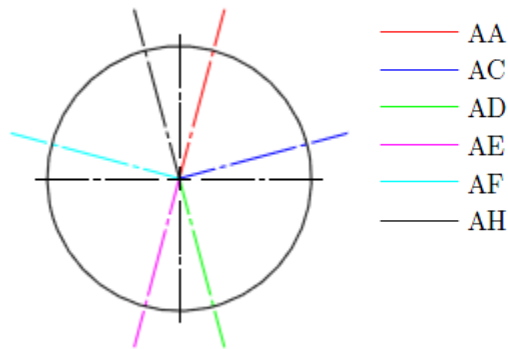


Abbildung 6-1: Positionskreis für Außenkontur des Zwischendiffusers

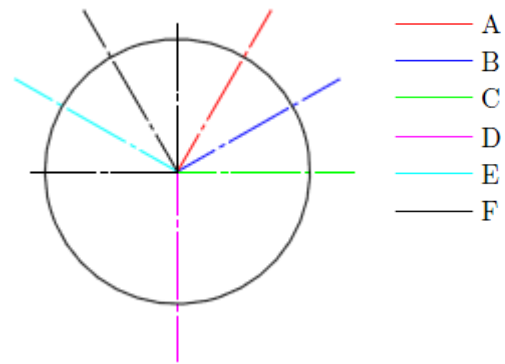


Abbildung 6-2: Positionskreis für Innenkontur des Zwischendiffusers

## 6.1 BETRIEBSPUNKT

Unter dem Betriebspunkt versteht man einen definierten Zustand, in dem die Anlage betrieben wird. Dieser Punkt kann prinzipiell willkürlich gewählt werden. Es ist allerdings sinnvoll ihn so zu wählen, dass eine Vergleichbarkeit mit anderen Maschinen hergestellt werden kann. Bei den in dieser Arbeit herangezogenen Vergleichsmaschinen handelt es sich um die am Institut für thermischen Turbomaschinen und Maschinendynamik befindliche Versuchsturbine und dem ebenso dort vorzufindenden transsonischen 2D-Windkanal. Die Betriebspunkte der beiden Prüfstände sei in der Tabelle 6-1 gegenübergestellt.

Tabelle 6-1: Betriebsparameter der Vergleichsmaschinen

Betriebspunkt		Versuchsturbine im Auslegungspunkt 1	Transsonischer Windkanal
Massenstrom	[kg/s]	15,9	1,2
Total Temperatur Einlauf	[K]	332	317
Total Druck Einlauf	[bar]	3,4	1,2
Machzahl Einlauf	[-]	0,6	0,6

Des Weiteren wurde von Dotti D. (2012) im Rahmen seiner Diplomarbeit unter anderem der Betriebspunkt für den Prüfstand mittels einer numerischen Simulation ermittelt. Dazu wurden die Strömungsparameter bei einer konstanten totalen Eintrittstemperatur von 330 [K] solange variiert, bis entsprechend der Abbildung 6-3 die maximale Machzahl in etwa jener der Versuchsturbine im Auslegungspunkt 1 entspricht.

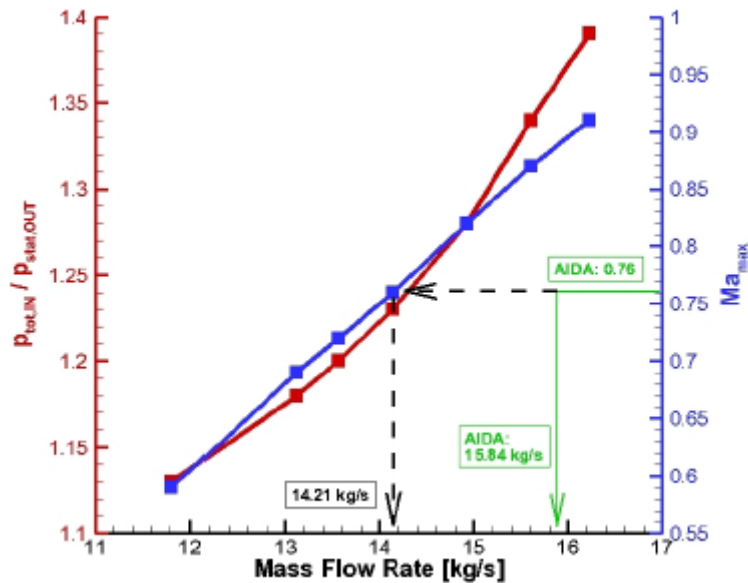


Abbildung 6-3: Vergleich der numerischen Machzahl mit jener der Versuchsturbine (AIDA) im Auslegungspunkt I [Dotti 2012, S. 47]

Hierbei stellt die in blau dargestellte Linie die maximale Machzahl der Ringgitterkaskade dar. In Grün ist der Betriebspunkt der Versuchsturbine eingetragen. Die rote Linie stellt den Totaldruck am Einlauf in Abhängigkeit des statischen Drucks am Ende des Diffusors über den Massenstrom dar. Es ist zu erkennen, dass für die gleiche maximale Machzahl von 0,76 in der Ringgitterkaskade ein Massenstrom von 14,21 kg/s bei einem  $p_{tot,in}/p_{stat,out}$  von 1,23 benötigt wird.

Für die Ringgitterkaskade muss eine Unterscheidung hinsichtlich der Versperrung des Einlaufkanales durch die applizierten Stäbchen gemacht werden. Daher findet sich im Folgenden der Betriebspunkt einmal für die Konfiguration ohne Stäbchen und einmal mit Stäbchen. Die Abbildung 6-3 ist für die Konfiguration mit Stäbchen repräsentativ.

Für beide Konfigurationen wurden mit Hilfe der Fünf-Loch-Sonde in der Ebene C der Druckverlauf, der Temperaturverlauf sowie die Machzahl und die absolute Geschwindigkeit über die Kanalhöhe, bei Veränderung des Massenstroms der Verdichteranlage gemessen. Der angegebene Massenstrom in den Diagrammen wurde durch eine Blende hinter dem Prüfstand ermittelt.

Für den besseren Vergleich wird die relative Kanalhöhe herangezogen. Dabei repräsentiert eine relative Kanalhöhe von „0“ die Innenkontur und „1“ die Außenkontur des Zwischendifusors in der Ebene C. Die durch die Sonde angefahren radialen Punkte sind der Tabelle A-4 im Anhang zu entnehmen.



### 6.1.1 BETRIEBSPUNKT OHNE STÄBCHEN

Für die Ermittlung des Betriebspunkt ohne Stäbchen wird gemäß Abbildung 6-4 die Machzahl in der Ebene C über die relative Kanalhöhe aufgetragen.

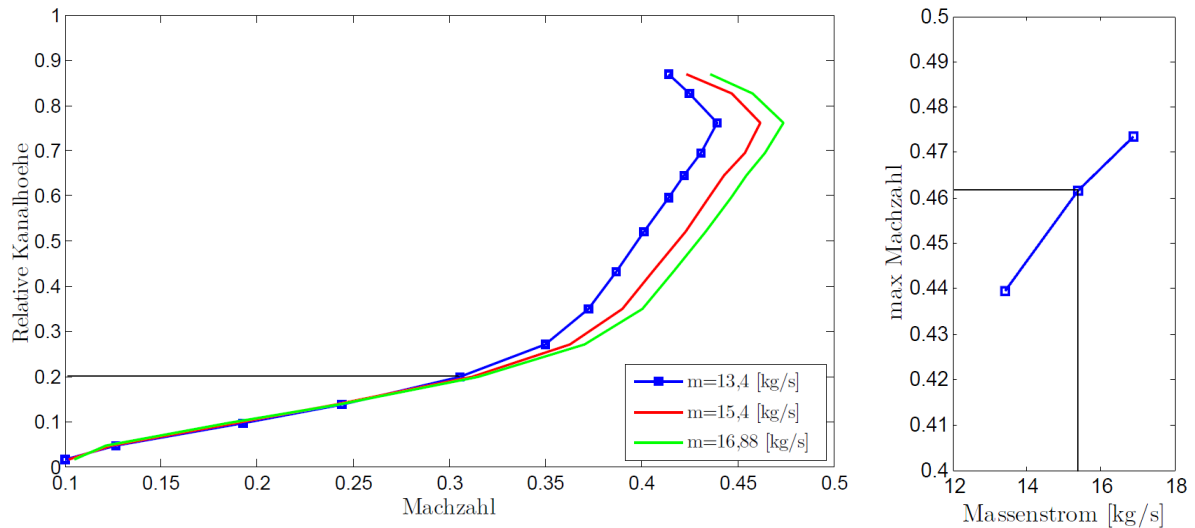


Abbildung 6-4: Machzahlverteilung (links) und die massenstromabhängige maximale Machzahl (rechts), ohne Stäbchen

Bei einer Variation des Massenstromes in einem Bereich von 13,4 kg/s bis 16,88 kg/s (das Maximum für die Verdichteranlage) ist eine Parallelverschiebung des Mach – Verlaufes deutlich ersichtlich.

Die dafür aussagekräftige Anlagencharakteristik (siehe rechte Abbildung) stellt die maximale Machzahl gegenüber der Variation des Massenstrom dar. Dabei ist eine nahezu lineare Abhängigkeit um den für den Betriebspunkt relevanten Bereich zu erkennen.

Wie des Weiteren ersichtlich ist, reicht die maximale Machzahl von 0,474 bei einem Massenstrom von 16,88 kg/s nicht an jene der transsonischen Versuchsturbine mit einer Machzahl von 0,6 heran. Dies ist begründet durch den deutlich größeren Querschnitt, welcher sich aufgrund der fehlenden Versperrung durch die Laufschaufeln einstellt. Im Bereich der relativen Kanalhöhe zwischen 0 und 0,25 ist eine steil abfallende Machzahl zu sehen. Die absolute Geschwindigkeit in diesem Bereich (Abbildung A-6 im Anhang) beträgt nahe der Innenkontur nur mehr 40 m/s. Durch den Druckgradienten, welcher sich stromabwärts durch die Kontur einstellt, kann davon ausgegangen werden, dass die Strömung in dieser Ebene bereits nahe einer Ablösung ist. Dies ist unter anderem dem Einfluss der Absenkung der Innenkontur, welche an ca. dieser Ebene C ein Maximum erreicht, zuzuschreiben (siehe Abbildung 5-2). Schön zu sehen ist auch, dass die Strömung in dieser Ausbuchtung der Innenkontur bis zu einer relativen Kanalhöhe von 0,2 unbeeinflusst von der Variation des Massenstromes, bzw. der Veränderung der Machzahl im Hauptstrom ist.

Aufgrund der Tatsache, dass durch diese Konfiguration der Machzustand der Versuchsturbine nicht eingestellt werden kann, wird der Betriebspunkt auf den Massenstrom von 15,9 kg/s in der Blende fixiert. Dies entspricht jenem Massenstrom welcher in der Versuchsturbine bei dem Auslegungspunkt 1 eingestellt wurde. Die maximale Machzahl bei diesem Massenstrom beträgt 0,462 bei diesem Prüfstand in der Ebene C.

Die nachstehende Tabelle 6-2 stellt für den Betriebspunkt die repräsentativen Werte, welche ohne die Messung der Sonde ermittelt werden können, zusammen. Somit kann sichergestellt werden, dass ohne Sondenmessung immer der gleiche Machverlauf im Eintrittsbereich des Zwischendiffusers erreicht werden kann. Die Machzahl „Machzahl ref“ in dieser Tabelle wurde nach Gleichung (5.3) ermittelt.

Tabelle 6-2: Betriebspunkt ohne Stäbchen

Betriebspunkt		Ringgitterkaskade ohne Stäbchen
Massenstrom Blende	[kg/s]	15,9
Total Temperatur Einlauf	[K] (°C)	328,15 (55)
Total Druck Einlauf	[bar]	1,83
Statischer Druck in Ebene C	[bar]	1,63
Pressure Ratio	[-]	1,07
Machzahl ref	[-]	0,408

Für den in Tabelle 6-2 definierten Betriebspunkt sei in Abbildung 6-5 der Totaldruckverlauf (blau) sowie der statische Druckverlauf (rot) über die Kanalhöhe gegeben.

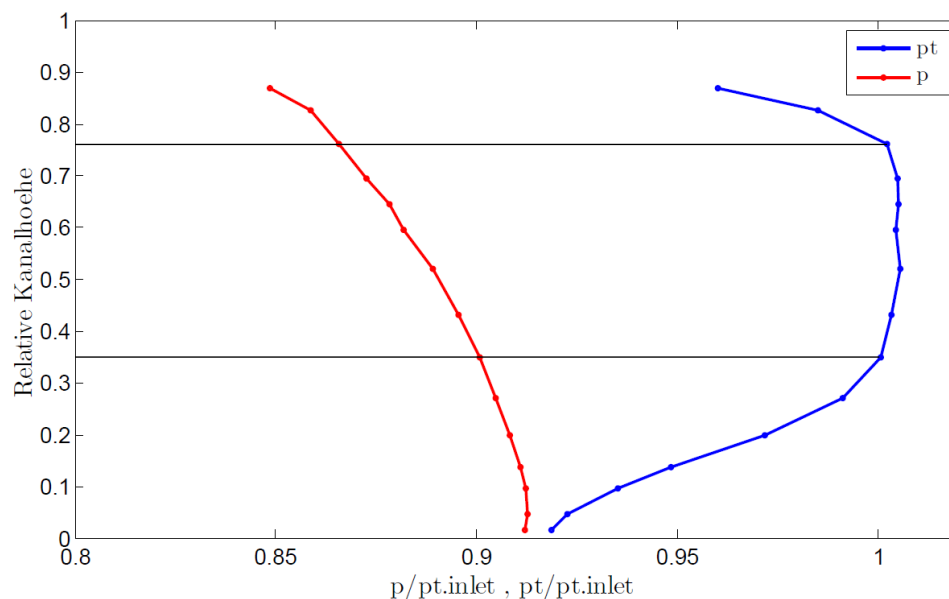


Abbildung 6-5: Totaldruckverlauf (links) und statischer Druckverlauf (rechts), ohne Stäbchen, in der Ebene C

Im statischen Druckverlauf ist eine deutliche Abnahme über die Kanalhöhe zu verzeichnen. Diese ist auf den in den theoretischen Grundlagen diskutierten Druckgradienten aus Kapitel 2.6 zurückzuführen. Im Vergleich kann im Bereich eines in etwa konstanten Totaldruckes zwischen der relativen Kanalhöhe von 0,35 bis 0,76 eine lineare Verringerung des statischen Druckes festgestellt werden. Dies bedeutet für die Geschwindigkeit einen linearen Anstieg über die relative Kanalhöhe in diesem Bereich.

Der Geschwindigkeitsverlauf und der Verlauf der Totaltemperatur sowie der statischen Temperatur über die Kanalhöhe sind dem Anhang beigelegt.

### 6.1.2 BETRIEBSPUNKT MIT STÄBCHEN

Bei der Betriebspunktermittlung mit Stäbchen wird gleich wie bei der Betriebspunktfindung ohne Stäbchen, die Machverteilung in der Ebene C gemäß Abbildung 6-6 bei unterschiedlichen Massenströmen aufgenommen. Dies geschieht mit Hilfe einer Fünf-Loch-Sonde welche über dieselben radialen Punkte traversiert wird. Um zu verhindern, dass eine Messung im Nachlauf eines Stabes erfolgt, dreht das Laufrad während der gesamten Messung mit konstanter Drehzahl.

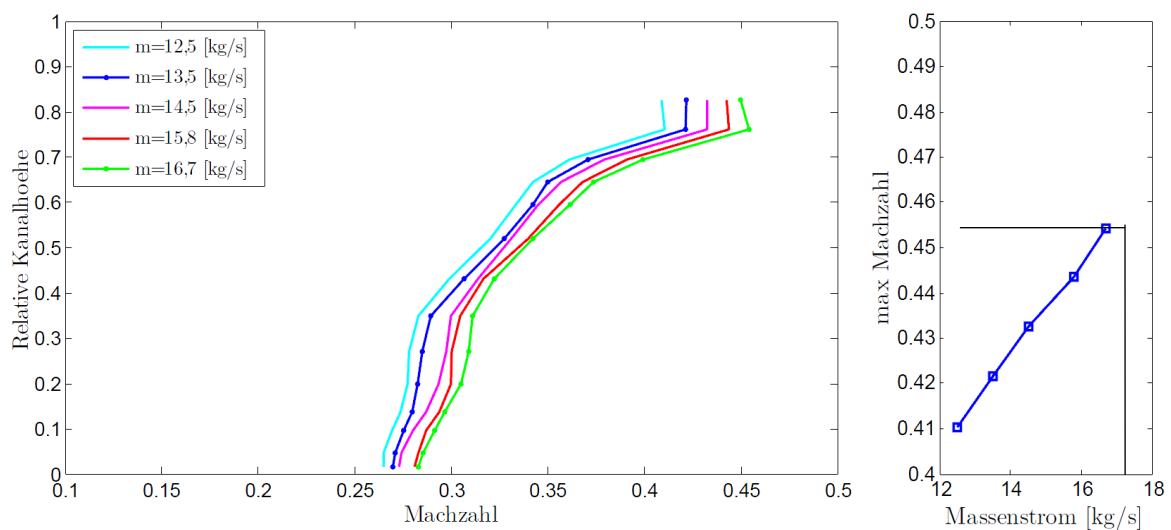


Abbildung 6-6: Machzahlverteilung (links) und die massenstromabhängige maximale Machzahl (rechts), mit Stäbchen

Bei der Variation des Massenstromes ist wieder zu erkennen, dass alle Machzahl - Verläufe in etwa parallel verlaufen. In der Anlagencharakteristik (rechte Abbildung), welche die maximale Machzahl dem Massenstrom gegenüberstellt, ist wieder ein nahezu linearer Zusammenhang bei dem für den Betriebsbereich relevanten Massenstrom zu erkennen. Im Vergleich zum Betriebspunkt ohne Stäbchen ist hier das Geschwindigkeitsmaximum nach außen gedrückt worden. An der Innenkontur des Zwischendiffusors ist die Machzahl gestiegen und weist nicht mehr diesen steilen Abfall auf.

Da die maximale Machzahl bei gleichem Massenstrom gesunken ist, muss für den Betriebspunkt der Anlage mit Stäbchen ein höherer Massenstrom eingestellt werden. So kann beim Massenstrom von

16,7 kg/s eine maximale Machzahl von 0,454 erreicht werden. Da eine weitere Steigerung des Massenstroms der Verdichteranlage nicht möglich ist, wird aufgrund der gewünschten maximalen Machzahlähnlichkeit in dieser Arbeit der neue Betriebspunkt für diese Arbeit nach Tabelle 6-3 definiert. Zusätzlich kann für diesen Betriebspunkt eine gewünschte ähnliche absolute Geschwindigkeit an der Außenkontur eingestellt werden, welche für den Vergleich der Wirbelgeneratoren von Bedeutung ist.

Tabelle 6-3: Betriebspunkt ohne Stäbchen

Betriebspunkt		Ringgitterkaskade mit Stäbchen
Massenstrom Blende	[kg/s]	16,7
Total Temperatur Einlauf	[K] (°C)	328,15 (55)
Total Druck Einlauf	[bar]	1,93
Statischer Druck in Ebene C	[bar]	1,69
Pressure Ratio	[-]	1,1
Machzahl ref	[-]	0,433

In Abbildung 6-7 sind der für den Betriebspunkt bei einem Massenstrom von 16,7 kg/s statische Druckverlauf (rot) sowie der Totaldruckverlauf (blau) dargestellt.

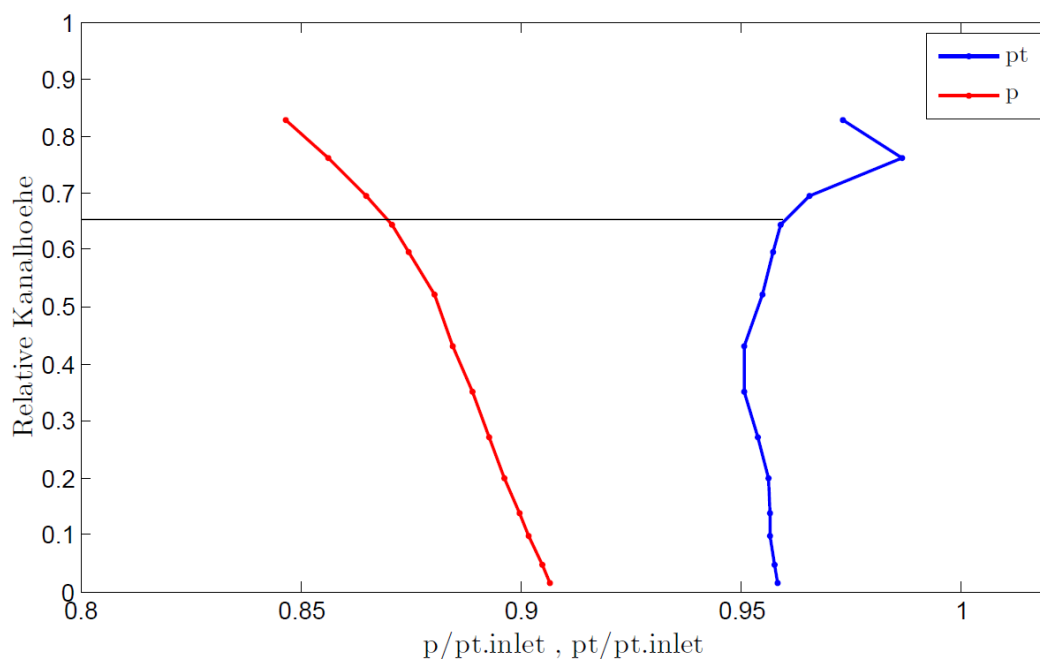


Abbildung 6-7: Totaldruckverlauf (links) und statische Druckverlauf (rechts), mit Stäbchen, in der Ebene C

Es ist eine deutliche Veränderung zu den Verläufen in Abbildung 6-5 zu erkennen. Der Totaldruckverlauf verläuft bis zu einer Kanalhöhe von 0,65 nahezu konstant. Die Spreizung zwischen dem Totaldruck und dem statischen Druck ist im Vergleich nahe der Innenkontur relativ groß. Dies bedeutet eine hohe Strömungsgeschwindigkeit auch im Bereich nahe der Innenkontur. Bei der Kanalhöhe von 0,76 ist ein deutlicher Anstieg im Totaldruckverlauf zu sehen. Es kann vermutet werden, dass dieser Anstieg durch eine Spaltströmung zwischen Stäbchen und der Außenkontur hervorgerufen wird.

Der Geschwindigkeitsverlauf und der Verlauf der Totaltemperatur sowie der statischen Temperatur über die Kanalhöhe sind dem Anhang beigelegt.

## 6.2 UMFANGSSYMMETRIE

Die Umfangssymmetrie zeigt die Druckverläufe in Form des Druckbeiwertes über die relative Kanallänge und vergleicht diese über den Umfang. Zur besseren Orientierung wird in den folgenden Abbildungen neben der Legende die radiale Position der Druckmessreihen angeben. Für die axialen Positionen der Druckmessbohrungen sei auf die Abbildung A-1 im Anhang verwiesen.

Die Abbildung 6-8 stellt die Druckbeiwerte der Außenkontur dar.

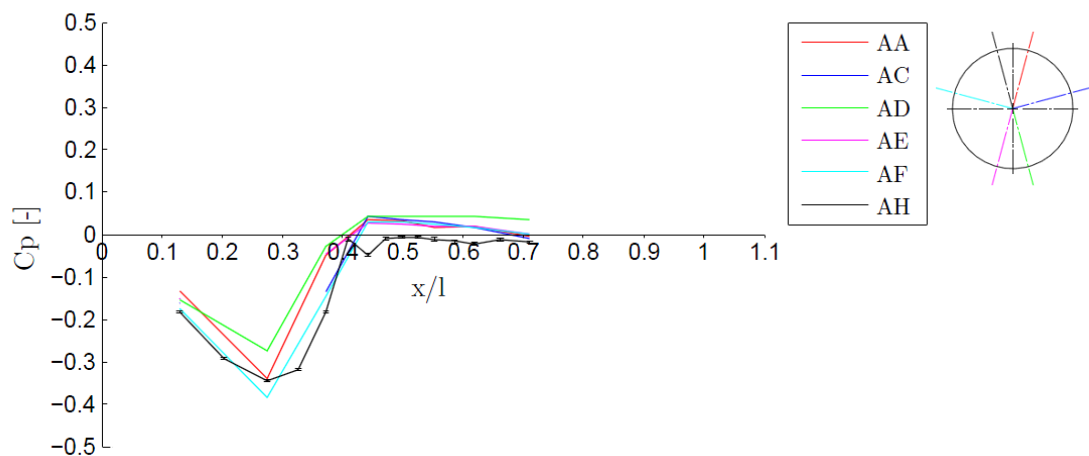


Abbildung 6-8: Umfangssymmetrie an der Außenkontur des Zwischendiffusors ohne Stäbchen

Da an der Außenkontur die Druckmessreihe „AH“ mehrere Druckmessbohrungen besitzt, ist die bessere Auflösung deutlich erkennbar. Beim Vergleich der gegenüberliegenden Druckmessreihen „AD“ und „AH“ erkennt man ein maximales  $\Delta C_p$  von 0,07 im Punkt  $x/l = 0,28$ . Für die Linie „AH“ ist die Standardabweichung in den einzelnen Messpunkten aufgetragen. Diese kann als vernachlässigbar klein angesehen werden.

Für die Innenkontur des Zwischendiffusors ist der Druckbeiwert gemäß der Abbildung 6-9 aufgetragen.

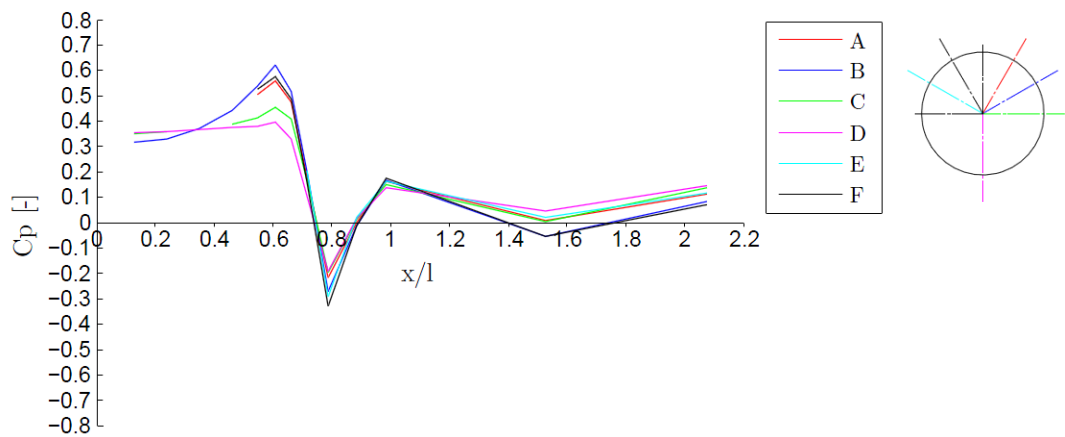


Abbildung 6-9: Umfangssymmetrie an der Innenkontur des Zwischendiffusors ohne Stäbchen

Wie im Kapitel 4.2.3 erklärt, werden an der Innenkontur nicht alle Druckmessreihen bis nach vorne geführt. So sind in diesem Diagramm nur die Druckmessreihen „B“, „D“ und „C“ im Bereich von  $x/l = 0,12$  bis  $0,55$  ersichtlich. Für diesen Bereich wurde beim Vergleich von „B“ und „D“ die Umfangssymmetrie gut eingehalten. Hingegen steigt die Abweichung zwischen „B“ und „D“ im Punkt des größten Druckes ( $x/l = 0,6$ ), kurz nach dem ersten Bug des Zwischendiffusors, auf einen  $\Delta C_p$  Wert von  $0,23$  an. In den Bereichen der steilen Druckgradienten sind die Druckreihen nahezu deckungsgleich.

Daraus kann vermutet werden, dass die Ursache für die Abweichung in der Umfangssymmetrie durch die geringe absolute Geschwindigkeit an der Innenkontur im Zusammenwirken mit leichten Störungen in der Zuströmung zustande kommt. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen wird für den Betriebspunkt mit Stäbchen, welcher eine höhere Geschwindigkeit an der Innenkontur aufweist, ein weiteres Mal die Umfangssymmetrie untersucht und in Abbildung 6-11 dargestellt.



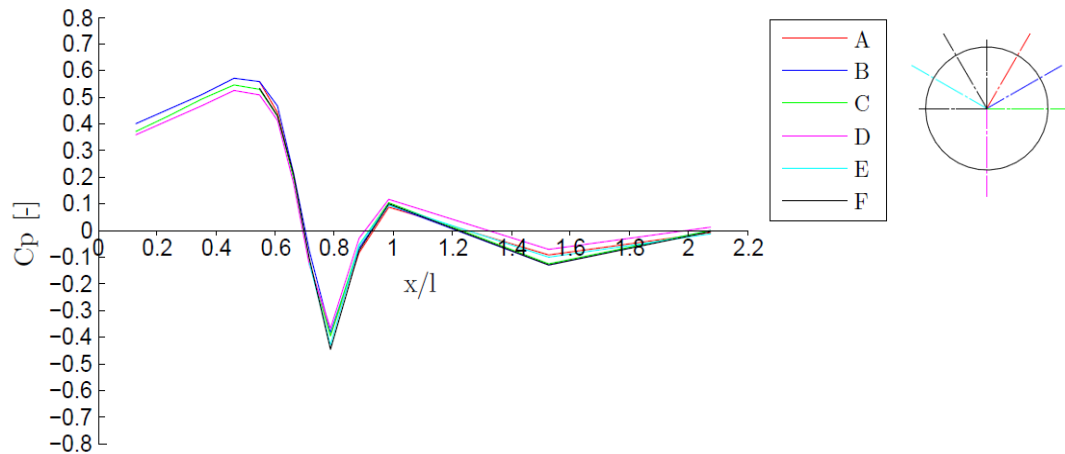


Abbildung 6-10: Umfangssymmetrie an der Innenkontur des Zwischendiffusors mit Stäbchen

Hierbei ist ersichtlich, dass die Abweichung im Bereich um  $x/l = 0,5$  deutlich verringert ist und sich der statische Druck in den Druckmessreihen nahezu deckt.

### 6.3 DISKUSSION DER ERGEBNISSE FÜR UNTERSCHIEDLICHE KONFIGURATIONEN

Um die Strömungsuntersuchung im Zwischendiffusor mittels der Ringgitterkaskade durchzuführen, werden drei Betriebsarten unterschieden. Einerseits kann der Kanal ohne Stäbchen untersucht werden, wobei der Kanal nicht versperrt ist und der Betriebspunkt dementsprechend für diesen Fall eingestellt wird. Andererseits kann durch die Applikation von Stäbchen der Nachlauf von Turbinenschaufeln simuliert werden. Hier ergibt sich hinsichtlich der Versperrung des Kanals durch die Stäbchen ein veränderter Strömungszustand bei gleichzeitigem Einfluss von Nachläufen. Für die Abströmung der Nachläufe ist es der Theorie nach entscheidend ob die Stäbchen bewegt werden, oder ob sie still stehen. Allerdings ist im Übergangskanal fraglich, ob der Einfluss nur örtlich oder gesamt ersichtlich ist.

Aus diesem Sachverhalt stellen sich für die Initialmessungen drei zu untersuchende Konfigurationen ein:

- ohne Stäbchen
- mit Stäbchen und stillstehendem Laufrad
- mit Stäbchen und drehendem Laufrad.

Werden die zu untersuchenden Wirbelgeneratoren für jede Konfiguration hinzugezogen ergibt sich für jede Konfiguration eine zusätzliche Unterscheidung. Demzufolge werden in den nachfolgenden Kapiteln sechs Konfigurationen untersucht.

Für jede dieser Konfigurationen werden der statische Druckverlauf und die Strömungsvisualisierung durch den Ölanstrich angegeben. Die Messwerte für die dargestellten Ergebnisse werden im Folgenden immer nur der oberen Hälfte des Prüfstandes entnommen. Für die Positionsbestimmung der Ablösung wird immer die Referenzebene wie sie im Anhang in Abbildung A-1 dargestellt ist, verwendet.

Für die zwei geforderten Positionen der Wirbelgeneratoren findet die Definition gemäß folgendem Kapitel 6.3.2 statt. Vorweggenommen sind dies die Positionen 35 mm sowie 40 mm stromabwärts der Beginn der Krümmung der Außenkontur des Zwischendiffusers.

### 6.3.1 MESSUNG OHNE STÄBCHEN UND OHNE WIRBELGENERATOREN

Bei dieser Messung gilt es, den Kanal ohne Einfluss von Wirbelgeneratoren und Stäbchen zu untersuchen. Dadurch kann die Charakteristik des Strömungskanales identifiziert und die Position der Ablösung, welche als Basis für die weiteren Untersuchungen zu sehen ist, bestimmt werden.

Die nachstehende Abbildung 6-11 zeigt den Druckbeiwert entlang der relativen Kanalachse ( $x/l$ ) bei ungestörter Zuströmung für die obere Hälfte des Prüfstandes. Für die Außenkontur wird dazu die feiner aufgelöste Druckmessreihe „AH“ herangezogen, für die Innenkontur die bis nach vorne gehende Reihe „B“. An der Position  $x/l = 1$  beginnt die Leitschaufelreihe der Niederdruckturbine. Diese wird durch die fehlenden Hochdruckschaufeln nicht über die ganze Kanalhöhe korrekt angeströmt und kann das Messergebnis verfälschen. Daher ist die Leitschaufelreihe durch einen blauen Balken in der Abbildung markiert.

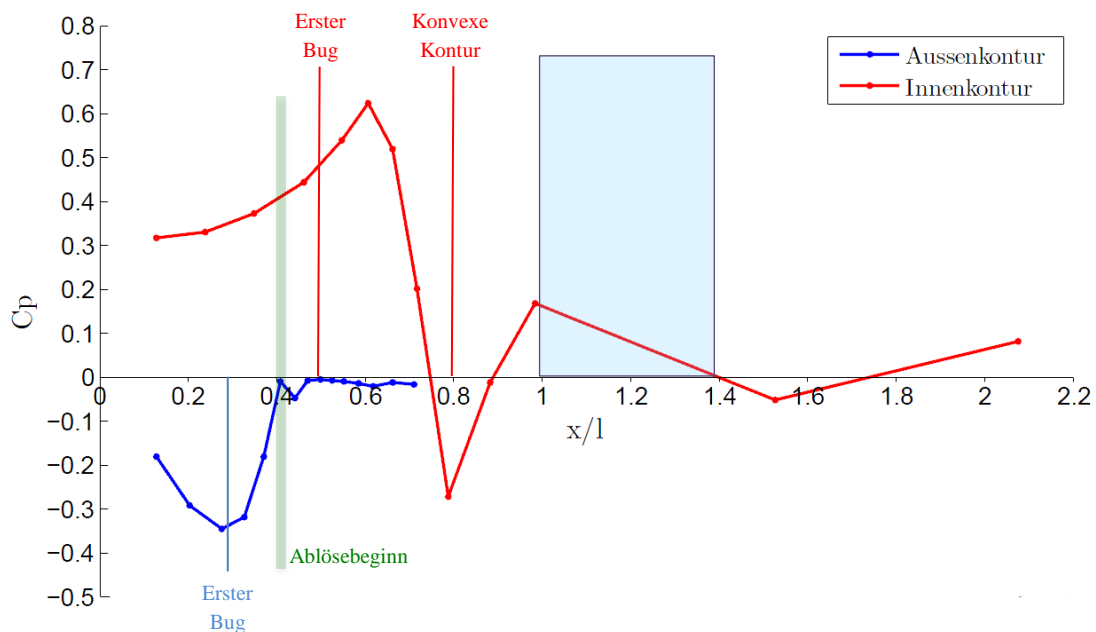


Abbildung 6-11: Statischer Druckverlauf ohne Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren

Im Vergleich zur Theorie ist für den gerade durchströmten Übergangskanal ein sehr ähnlicher Druckverlauf speziell an der Innenkontur zu sehen. Der Druckanstieg hin zum ersten Bug zeichnet sich etwas nach hinten versetzt aus. Durch die Ausbildung des Kanals als Düse nach dem ersten Bug kommt es zu einem starken Druckabfall, welcher das Druckminimum bei  $x/l = 0,8$ , also genau an der konvexen Krümmung der Innenkontur besitzt. Danach folgt durch die Flächenzunahme eine Drucksteigerung bis  $x/l = 1$ . Im Punkt  $x/l = 1,53$  kommt es zu einem weiteren lokalem Druckminimum durch die erneute konvexe Biegung der Innenkontur hin zu einer axialen Abströmung, die aber nicht mehr von Interesse ist.

Die Strömung an der Außenkontur folgt ebenso dem Beispiel der Theorie in das Minimum an der Stelle des ersten Buges. Danach steigt der Druck, zurückzuführen auf die Flächenvergrößerung stark an und wird durch die konvexe Biegung der Innenkontur verstärkt. Ab einer gewissen Position löst die sich Strömung ab und es zeichnet sich ein ungefähr konstanter Druck an der restlichen Länge der Außenkontur ab. Dieses Ablösen zeichnet sich deutlich im Ölanstrich an der Außenkontur gemäß Abbildung 6-12 an der rot markierten Position ab, die sich in diesem Fall genau 40 mm nach dem Beginn der Krümmung befindet. Umgerechnet auf die relative Länge  $x/l$  tritt die Ablösung bei einer Position von 0,4 ein. Dies ist auch deutlich im Knick des Druckverlaufes zu sehen.

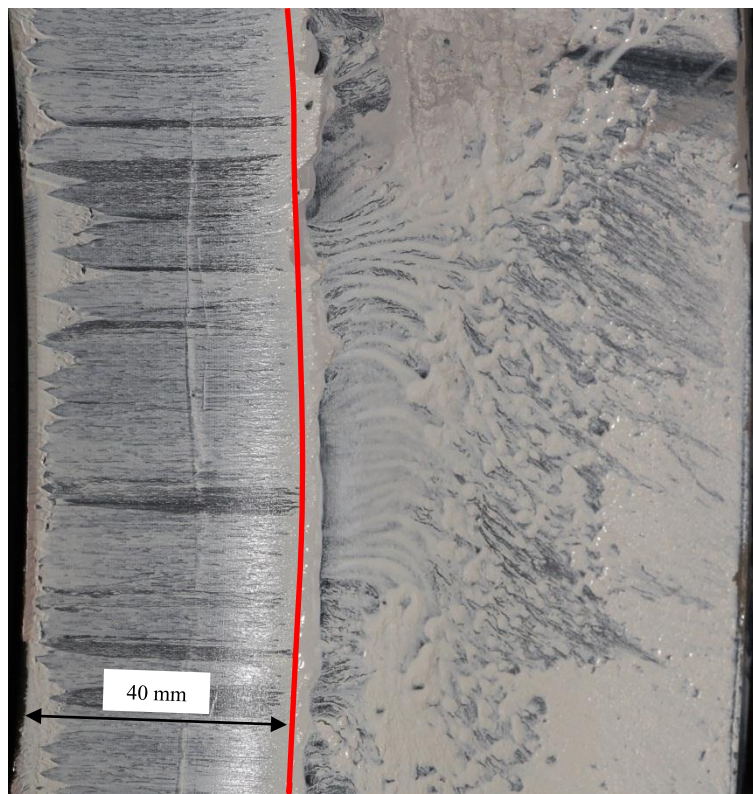


Abbildung 6-12: Ölanstrich ohne Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren

### 6.3.2 MESSUNG OHNE STÄBCHEN UND MIT WIRBELGENERATOREN

Durch die zuvor ermittelte Position der Strömungsablösung an der Außenkontur des Zwischendiffusers werden die Wirbelgeneratoren in einer ersten Version mit ihrer Hinterkante genau 5 mm stromaufwärts geklebt. In der zweiten Version wird der Einfluss der Wirbelgeneratoren genau an der Ablösekannte untersucht. Gemessen von dem Beginn der Krümmung an der Außenkontur (Referenz nach Abbildung A-1 im Anhang) bedeutet dies eine Position von 35 mm (40 mm) für die 5 mm (0 mm) stromaufwärts der Ablösung geklebten Wirbelgeneratoren.

Die Abbildung 6-13 verdeutlicht den Druckverlauf mit Wirbelgeneratoren an der Position 35 mm. Wieder wird der Druckbeiwert der Druckmessreihen „AH“ für die Außenkontur der Druckmessreihe „B“ an der Innenkontur gegenübergestellt.

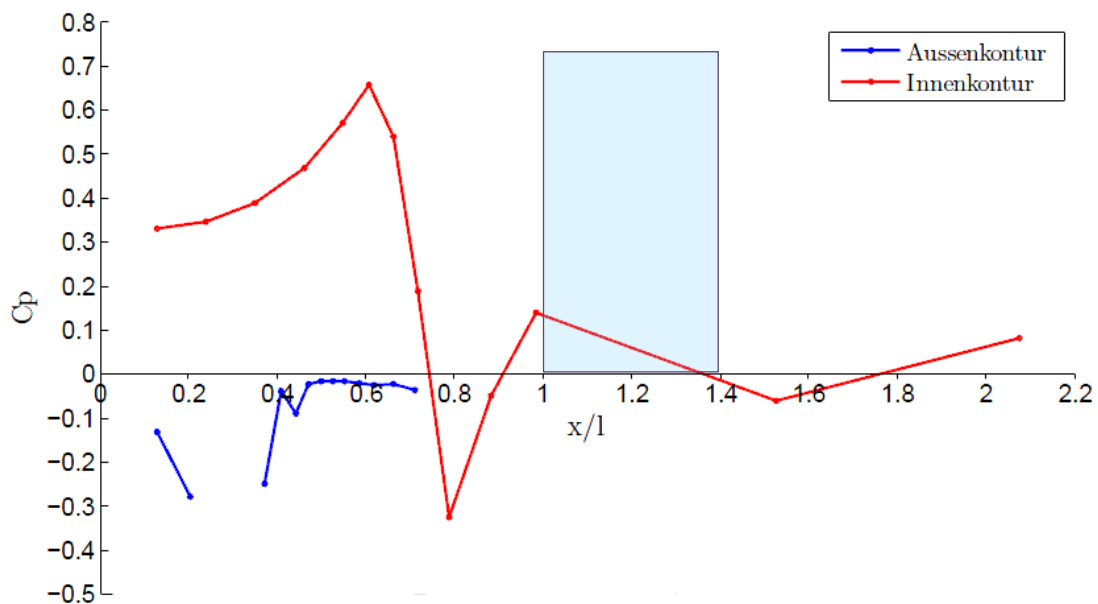


Abbildung 6-13: Statischer Druckverlauf ohne Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren

In der Außenkontur sind aufgrund der Montage der Wirbelgeneratoren über die Druckmessbohrungen hinweg zwei Druckmesspunkte ausgefallen. Dies zeichnet sich durch eine unterbrochene Linie in der Außenkontur ab.

Gemäß Abbildung 6-14 wird der Ölanstrich mit den Wirbelgeneratoren an der Position 35 mm dargestellt.

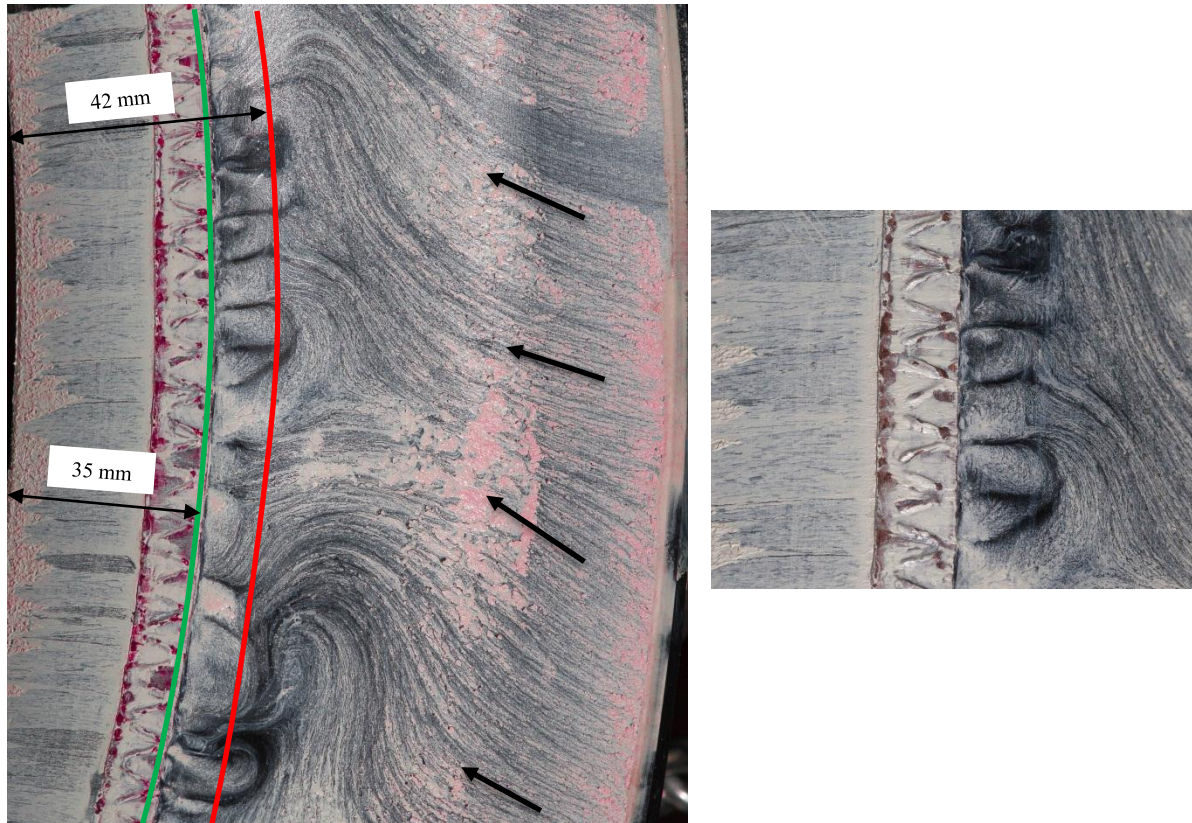


Abbildung 6-14: Ölanstrich ohne Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 35 mm

Durch die Wirbelgeneratoren ist ein deutlicher Einfluss der Schubspannungen im Ölanstrich zu sehen. Die grüne Linie markiert die Hinterkante der Wirbelgeneratoren, während die rote Linie in etwa die Ablöselinie zeigt. Diese ist durch die Verwirbelung im wandnahen Bereich nicht mehr so deutlich ausgeprägt wie ohne Wirbelgeneratoren. Es können jedoch die Wirbel der Wirbelgeneratoren im Bereich zwischen der grünen und der roten Linie gut erkannt werden. Die Vergrößerung des Ausschnittes um die Wirbelgeneratoren zeigt nach jedem Paar in Düsenform ein klares Muster in dem das Öl abtransportiert wurde. Das Ende der Reichweite der Wirbel wird als Ablösekannte definiert und befindet sich 42 mm nach Beginn der Krümmung. Dies bedeutet eine Verschiebung der Ablösekannte stromabwärts um 2 mm.

Der Ölanstrich wurde zusätzlich zweifärbig ausgeführt. Dazu wurde am letzten Zentimeter der Außenkontur ein roter Ölanstrich aufgetragen, womit die Strömungsrichtung im wandnahen Bereich deutlich gemacht werden kann. In diesem Fall handelt es sich um eine Rückströmung, da die rote Farbe deutlich stromaufwärts transportiert wurde. Weiters ist zu sehen, dass die Rückströmung nicht Achsparallel sondern in einem Winkel erfolgt. Der Grund dafür scheinen leichte Unregelmäßigkeiten in der Zuströmung zu sein, die das verzögernde Fluid in eine Richtung abdrängen. Dieser dabei entstehende Drall bildet sich am ganzen Umfang aus.



Der zweite Fall, in welchem die Wirbelgeneratoren genau an die Ablösekante geklebt wurden, ist der Abbildung 6-15 zu entnehmen. Die durch die Wirbelgeneratoren erzeugte Wirbellänge ist deutlich kürzer geworden. Dadurch hebt sich der erhoffte Vorteil der späteren Ablösung durch die weiter stromabwärts positionierten Wirbelgeneratoren auf. Die Ablösekante stellt sich leicht stromabwärts bei etwa 43 mm ein, was eine weitere Verschiebung um 1 mm stromabwärts bedeutet.

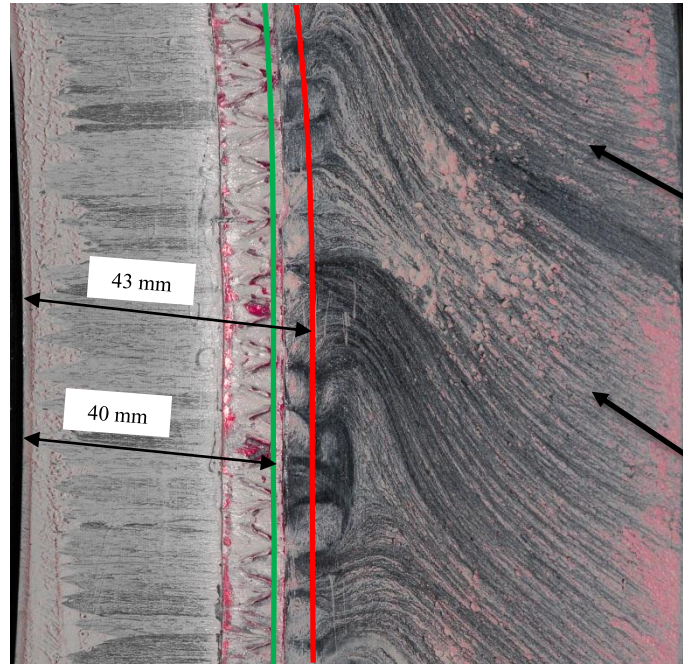


Abbildung 6-15: Ölstrich ohne Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 40 mm



### 6.3.3 MESSUNG MIT STEHEDEM LAUFRAD UND OHNE WIRBELGENERATOREN

Bei der Konfiguration mit stehenden Stäbchen wurde das Laufrad so fixiert, dass es keinesfalls losdrehen kann. Durch die Versperrung stellt sich der oben beschriebene neue Betriebspunkt mit einem unterschiedlichen Machprofil im Kanal ein. Diese Veränderung zeigt sich auch deutlich im statischen Druckverlauf in Abbildung 6-16, die mit Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren aufgenommen wurde.

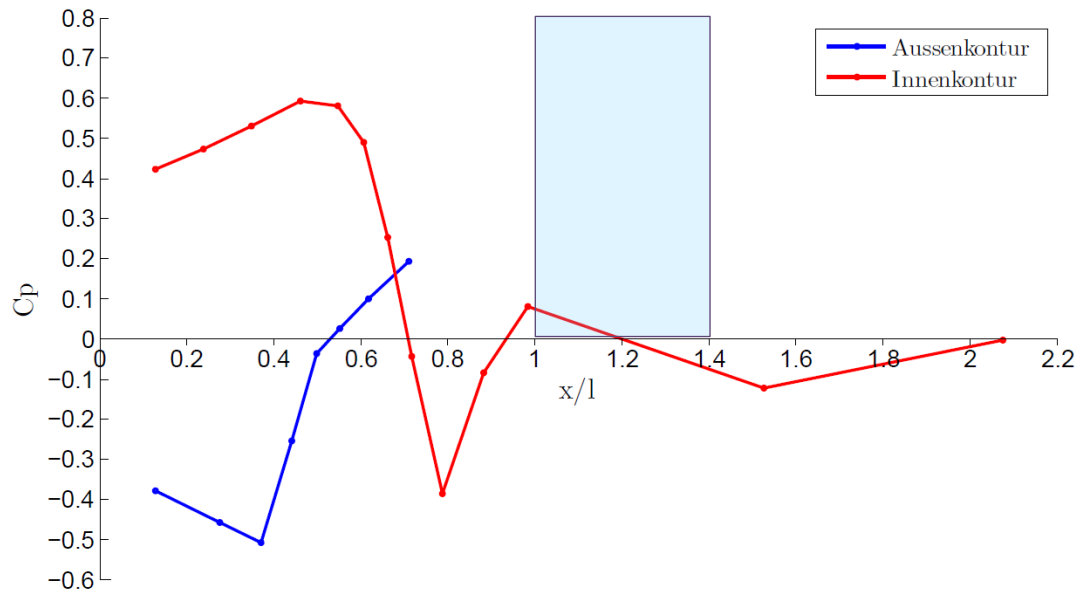


Abbildung 6-16: Statischer Druckverlauf mit Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren

Deutlich zu vernehmen ist ein weiterhin steilerer Anstieg im Verlauf des Druckbeiwertes in der Außenkontur nach der Stelle  $x/l = 0,49$ . Dieser Druckanstieg schließt nicht aus, dass es zu einer Ablösung kommen kann. Im Gegenteil ist in Abbildung 6-17 die Ablöselinie deutlich zu erkennen. Der Druckverlauf an der Innenkontur hat sich ebenfalls leicht verändert. Die Druckspitze, welche zuvor an der Position  $x/l = 0,6$  zu verzeichnen war, hat sich nun an die Position  $x/l = 0,46$  verschoben. Das bedeutet, dass sich das Druckmaximum am Innenkanal stromaufwärts zum Beginn des ersten Buges hin verschoben hat. Das Druckminimum ist bei der Position  $x/l = 0,8$  verblieben.

Des Weiteren werden stehende Nachläufe produziert, welche in Abbildung 6-17 durch die Visualisierung mittels Ölanstrich deutlich zu erkennen sind.

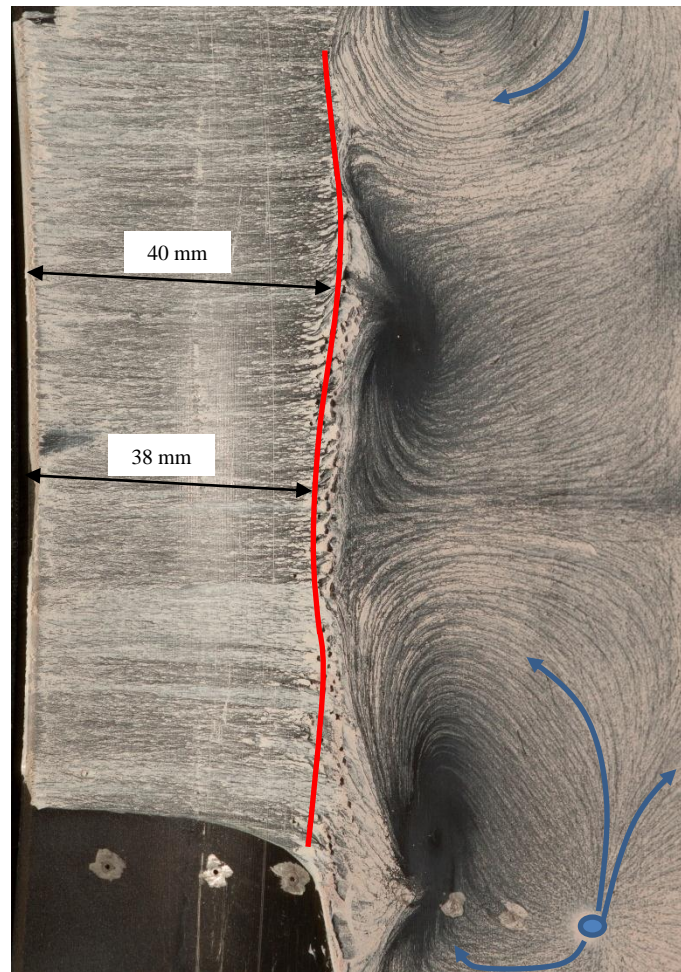


Abbildung 6-17: Ölanstrich mit stehenden Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren

Hierbei sieht man den Einfluss durch die Nachläufe als eine leicht wellige Ablöselinie. Diese wird in einem Bereich des Nachlaufes um 2 mm stromaufwärts verschoben und ist bei einer Länge von 38 mm ( $x/l = 0,38$ ) zu identifizieren. Zwischen den Nachläufen geht sie auf ihre ursprünglichen 40 mm zurück.

Der Abströmbereich rechts in der Abbildung erfolgt durch die Richtungsvorgabe der Stäbchen achsparallel.

Durch die von den Stäbchen aufgeprägte Periodizität ist in diesem Bildausschnitt eine Wiederholung der Wirbel deutlich erkennbar. Zusätzlich können Quellpunkte (blaue Punkte) erkannt werden, von denen sich die Strömung in alle Richtungen ausbreitet. Diese Punkte sind vor jeder zweiten Leitschaufel zu erkennen.

### 6.3.4 MESSUNG MIT STEHEDEM LAUFRAD UND MIT WIRBELGENERATOREN

Bei dieser Konfiguration ist das Laufrad weiterhin fixiert, damit es nicht durch die Strömung angetrieben wird. Die Wirbelgeneratoren werden in dieser Konfiguration an der üblichen Position von 35 mm bzw. 40 mm belassen.

Im statischen Druckverlauf aus Abbildung 6-18 ist wieder eine abgesetzte Linie der Außenkontur zu erkennen. Diese Druckbohrungen sind aufgrund der Applikation der Wirbelgeneratoren ausgefallen.

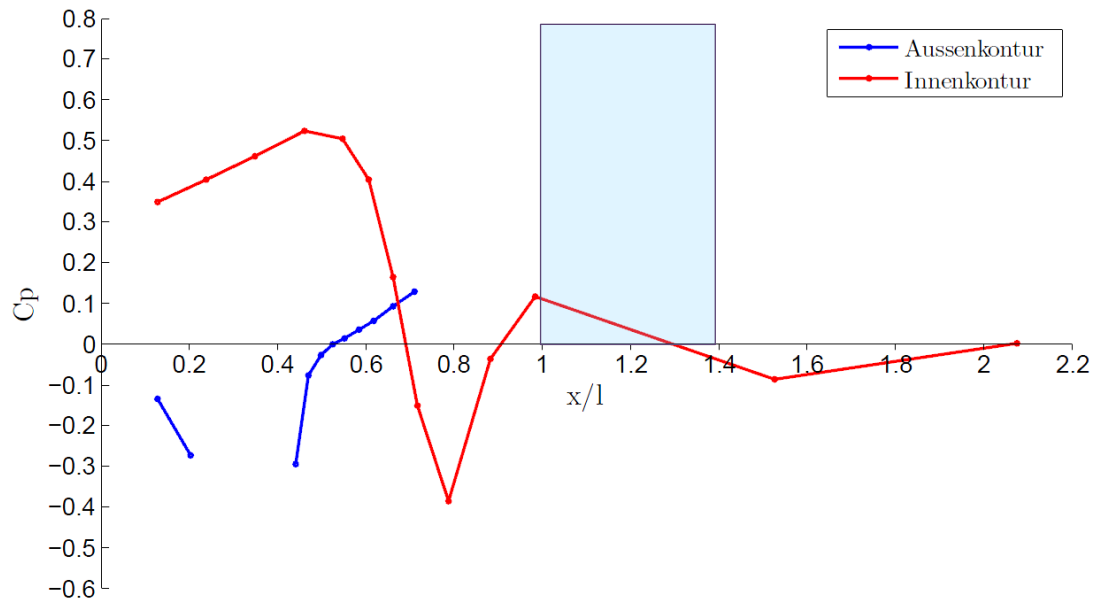


Abbildung 6-18: Statischer Druckverlauf mit Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren

Im statischen Druckverlauf der Außenkontur ist gefolgt von einem starken Druckanstieg ein Knick an der Position  $x/l = 0,47$  mit einem danach weiterhin geraden Anstieg zu erkennen. Dies bedeutet auch hier, dass der Druck am Ende des Zwischendiffusers leicht höher ausfällt wie jener in der Konfiguration ohne Stäbchen.

Die Visualisierung mit stehendem Laufrad und Wirbelgeneratoren durch den Ölanstrich ist in Abbildung 6-19 zu erkennen. Hierbei sind die Wirbelgeneratoren an der Position 35 mm angebracht und in grün markiert.

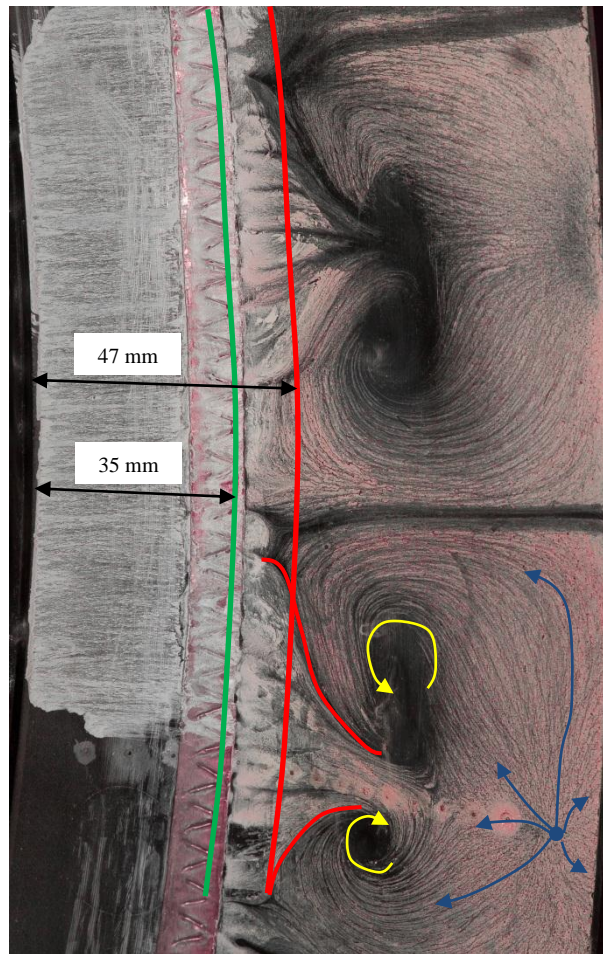


Abbildung 6-19: Ölanstrich mit stehenden Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 35 mm

Ganz deutlich zu erkennen ist die Periodizität durch die Stäbchen. Es bildet sich förmlich ein exakt wiederholender Bereich im Umfang aus. Die Begrenzung findet sich durch eine scharfe Linie hinter jedem zweiten Stäbchen. Dazwischen befinden sich zwei gegenläufige Wirbel, die in der Abbildung gelb markiert sind. Es sieht so aus, als würden diese zwei gegenläufigen Wirbel die Strömung zwischen den beiden begrenzenden Stäbchennachläufen trichterförmig (rot markiert) zusammenziehen. Die zu sehende Abbildung weist eine Ähnlichkeit mit dem Ölanstrich der Abbildung A-11 (im Anhang) auf, welcher durch Santner C. (2008) im 2D-Kanal aufgenommen wurde.<sup>34</sup> Dort fungieren die Seitenwände in ähnlicher Weise wie hier die Stäbchennachläufe. Im blauen Quellpunkt strömt die Strömung in alle Richtungen aus. Da dieser Punkt im Bereich des ursprünglich roten Ölanstriches liegt, ist zusätzlich die Rotfärbung des gesamten Bereiches gut sichtbar.

---

<sup>34</sup> Vgl. Santner 2008, S. 57.



Für die Bestimmung der Ablösung ist zu erkennen, dass im Bereich der gelb markierten Wirbel die Nachläufe der Wirbelgeneratoren weit stromabwärts gezogen werden. In den Bereichen dazwischen scheinen nur geringe Wirbelgeneratornachläufe auf. Der Beginn der Ablösung ist somit im Mittel bei der Position 47 mm ( $x/l = 0,47$ ) nach dem Beginn der Krümmung ersichtlich.

Werden die Wirbelgeneratoren nach vorne genau an die Ablösekante (Position 40 mm) verschoben verschwinden gemäß der Abbildung 6-20 die deutlich ausgeprägten gegenläufigen Wirbel und scharf abgeteilte Periodizität. Sehr wohl kann noch ein Wirbelgebiet ausgemacht werden. Da es sich im Bereich der Wirbel um ein Rückströmgebiet handelt kann die Wirbelrichtung erkannt werden und wurde gelb eingezeichnet. Zusätzlich fällt auf, dass die Nachlaufspitzen der Wirbelgeneratoren zur Gänze verschwunden sind. Dies lässt drauf rückschließen dass die Ablöselöselinie mit der Hinterkante der Wirbelgeneratoren zusammenfällt.

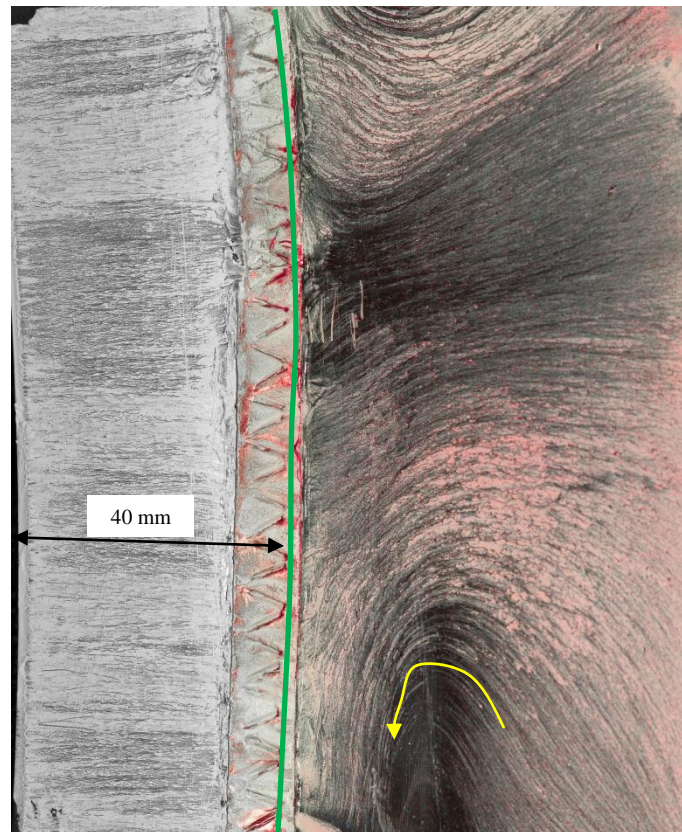


Abbildung 6-20: Ölstrich mit stehenden Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 40 mm

### 6.3.5 MESSUNG MIT DREHENDEM LAUFRAD UND OHNE WIRBELGENERATOREN

Für die Initialmessung mit dem drehenden Laufrad wurde eine Drehzahl von 2250 U/min eingestellt. Dies entspricht umgerechnet der halben Rotordrehzahl der transsonischen Versuchsturbine.

In Abbildung 6-21 ist bei dieser Konfiguration nach der relativen Länge von  $x/l = 0,38$  ein weiterhin starker Anstieg des Druckes in der Außenkontur zu sehen. Dieser Druckanstieg schließt nicht aus, dass es zu einer Ablösung kommen kann.

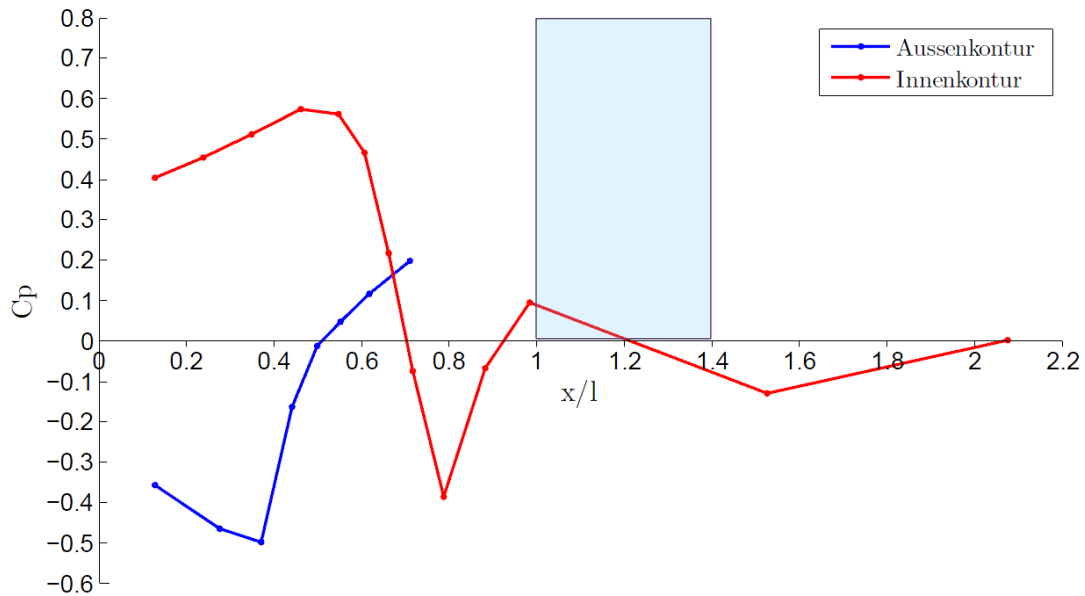


Abbildung 6-21: Statischer Druckverlauf mit drehenden Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren

Im Gegenteil ist auch in dieser Konfiguration die Ablösekante deutlich in Abbildung 6-22 zu erkennen. Gegenüber dem stehenden Rotor bildet sich die Ablösekante gerade aus. Die Ablösekante kann wie ohne Laufrad identifiziert wurde bei einem Abstand von 40 mm ( $x/l = 0,4$ ) ausgemacht werden. Durch den zweifärbigen Ölanstrich ist deutlich die rötliche Färbung im ganzen Bereich rechts nach der Ablösekante zu erkennen. Dies lässt auf eine Rückströmung in diesem Bereich schließen.



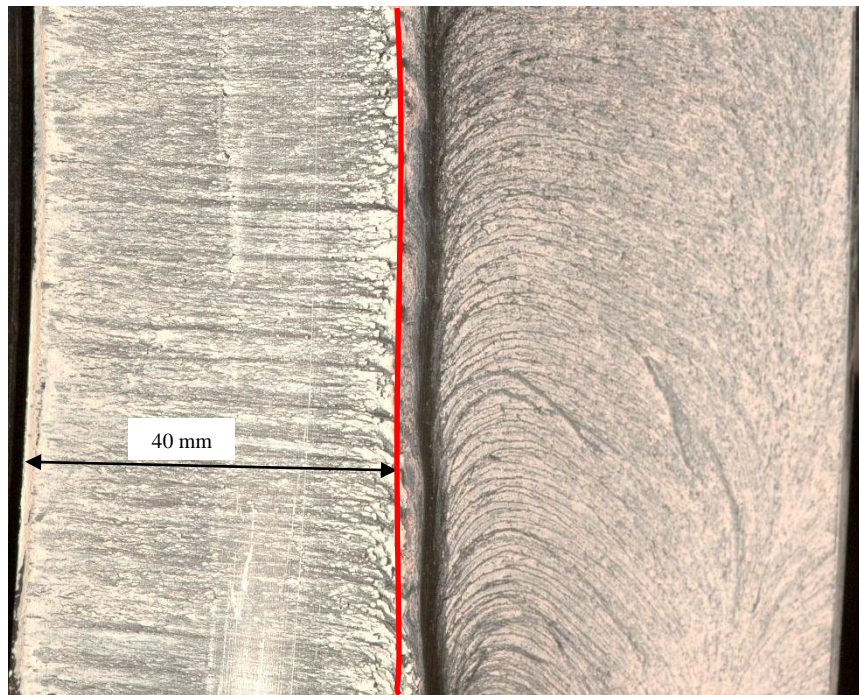


Abbildung 6-22: Ölanstrich mit drehenden Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren

### 6.3.6 MESSUNG MIT DREHENDEM LAUFRAD UND MIT WIRBELGENERATOREN

Um den Einfluss der Wirbelgeneratoren auch bei drehendem Laufrad zu erheben, wurde das Laufrad gemäß jener Konfiguration ohne Wirbelgenerator mit der identen Drehzahl von 2250 U/min betrieben.

In der Abbildung 6-23 ist hierfür wieder der statische Druckverlauf über die relative Kanallänge angegeben. Für die Außenkontur ist ab der Position  $x/l = 0,43$  ein deutlicher Druckanstieg mit einem in Folge starkem Knick bei der Position  $x/l = 0,47$  zu verzeichnen. Gegenüber der Messung ohne Wirbelgenerator zeichnet sich der Knick deutlich schärfer ab.

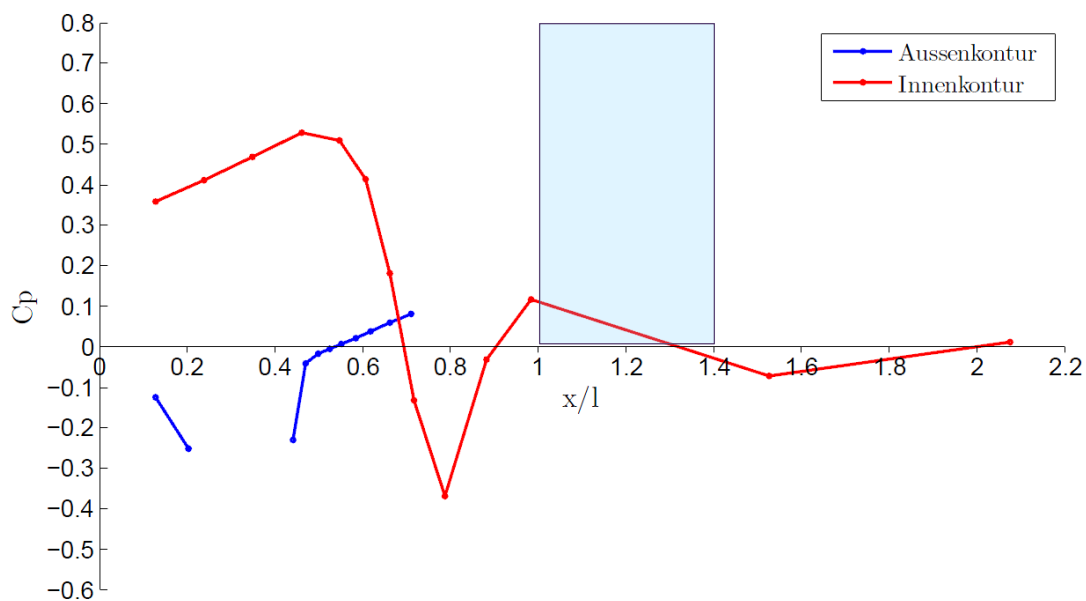


Abbildung 6-23: Ölanstrich mit drehenden Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren 5 mm stromaufwärts

In Abbildung 6-24 wird der Ölanstrich für die Konfiguration mit Stäbchen und Wirbelgeneratoren an der Position 40 mm dargestellt.

Es ist in dieser Abbildung im unteren Bereich ein Wirbel zu erkennen. Allerdings ist der Ölanstrich für diese Konfiguration nicht schlüssig. Dies ist auf die nur in einem Teilbereich beklebten Wirbelgeneratoren zurückzuführen. Dadurch ist der Einfluss der Randzone der Wirbelgeneratoren durch den drehenden Rotor zu groß, um eine Aussage treffen zu können. Somit ist es für eine Untersuchung dieser Konfiguration erforderlich die Wirbelgeneratoren am gesamten Umfang der Außenkontur aufzukleben.

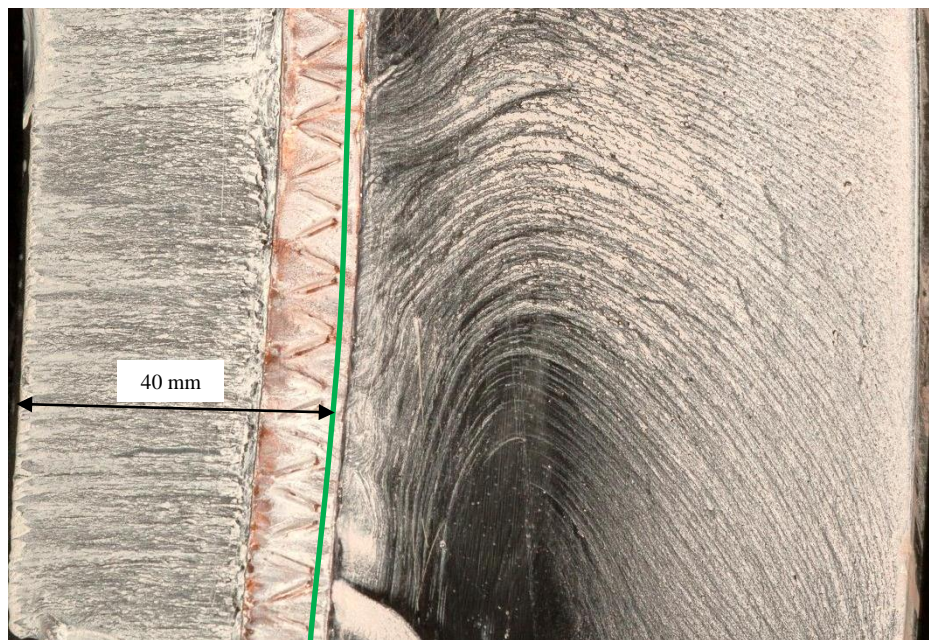


Abbildung 6-24: Ölanstrich mit Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 40 mm

## 6.4 VERGLEICH ZWISCHEN DEN KONFIGURATIONEN

Um die Einflüsse von Wirbelgeneratoren und von Stäbchen aufzuzeigen, werden die unterschiedlichen Ergebnisse aus den obigen Konfigurationen gegenübergestellt und diskutiert.

In der Konfiguration ohne Stäbchen kann der reine Einfluss der Wirbelgeneratoren ohne Nachläufe aufgezeigt werden.

Für den Vergleich wird die Abbildung 6-25 herangezogen. Diese stellt für den Außenkanal den Druckbeiwert ohne Wirbelgeneratoren denjenigen mit Wirbelgeneratoren an der Position 5 mm stromaufwärts der Ablöselinie und jenen mit Wirbelgeneratoren an der Ablöselinie gegenüber. An der Abszisse sei zum besseren Vergleich die relative Lauflänge des Kanals bis  $x/l$  aufgetragen. Da durch die Wirbelgeneratoren einzelne Druckmessbohrungen verschlossen sind, sind die Linien im Diagramm in einem Bereich von  $x/l$  zwischen 0,2 und 0,4 unterbrochen.

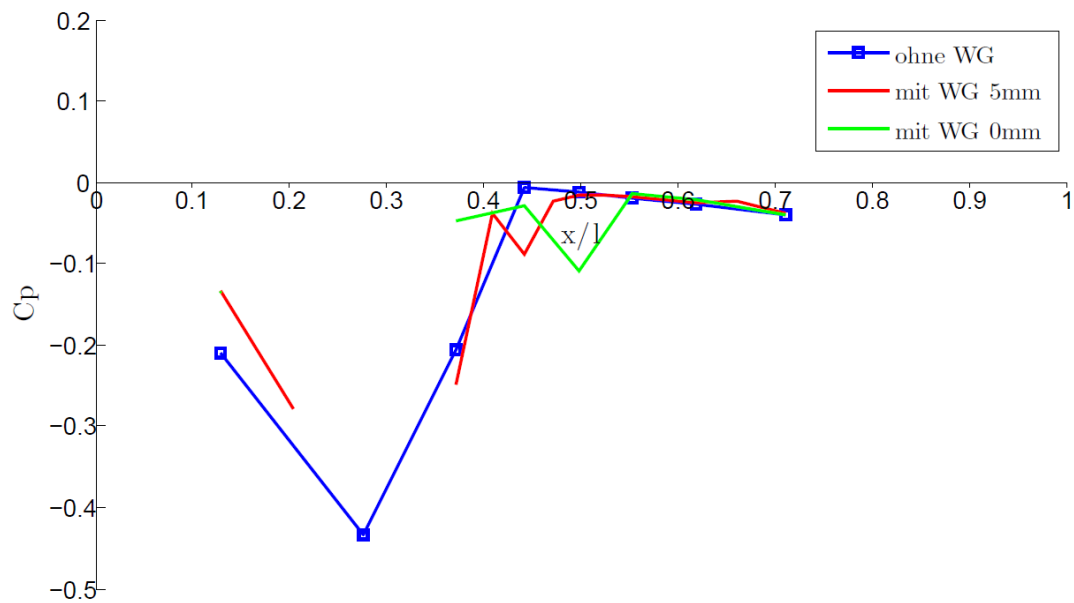


Abbildung 6-25: Vergleich des statischen Druckverlaufes an der Außenkontur ohne Stäbchen und mit/ohne Wirbelgeneratoren

Aus der Abbildung 6-25 geht hervor, dass der Einfluss der Wirbelgeneratoren in den statischen Wanddruckbohrungen nicht zu sehen ist. Der Bereich ab  $x/l = 0,45$  zeigt einen nahezu identen Druckverlauf entlang der Außenwand des Zwischendiffusers. Wahrscheinlich ist bei diesem Vergleich der Einfluss der Wirbelgeneratoren aufgrund deren Applikation nur in einem Bereich der oberen Halbschale nicht in dem statischen Druck sichtbar.

Sehr wohl kann beim Vergleich zwischen den Abbildung 6-12, Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15 ein lokaler Unterschied in der Schubspannung im Ölanstrich ausgemacht werden. Es scheint daher, dass für einen Einfluss der Wirbelgeneratoren im statischen Druckverlauf ein Bekleben des gesamten Umfanges erforderlich ist.

Da die Viskosität des Ölanstriches bei den unterschiedlichen Abbildungen exakt gleich ist, bedeutet das deutlichere Erkennen der Linien im Öl einen relativen Anstieg in den Schubspannungen. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Höhe der Ablösung bzw. des Rückströmgebietes abgenommen hat.

Vergleicht man nur den Einfluss der Stäbchen ohne Wirbelgeneratoren auf den Übergangskanal, ist im Verlauf der Druckbeiwerte entlang der Kanalachse in Abbildung 6-26 ein deutlicher Unterschied zu verzeichnen.

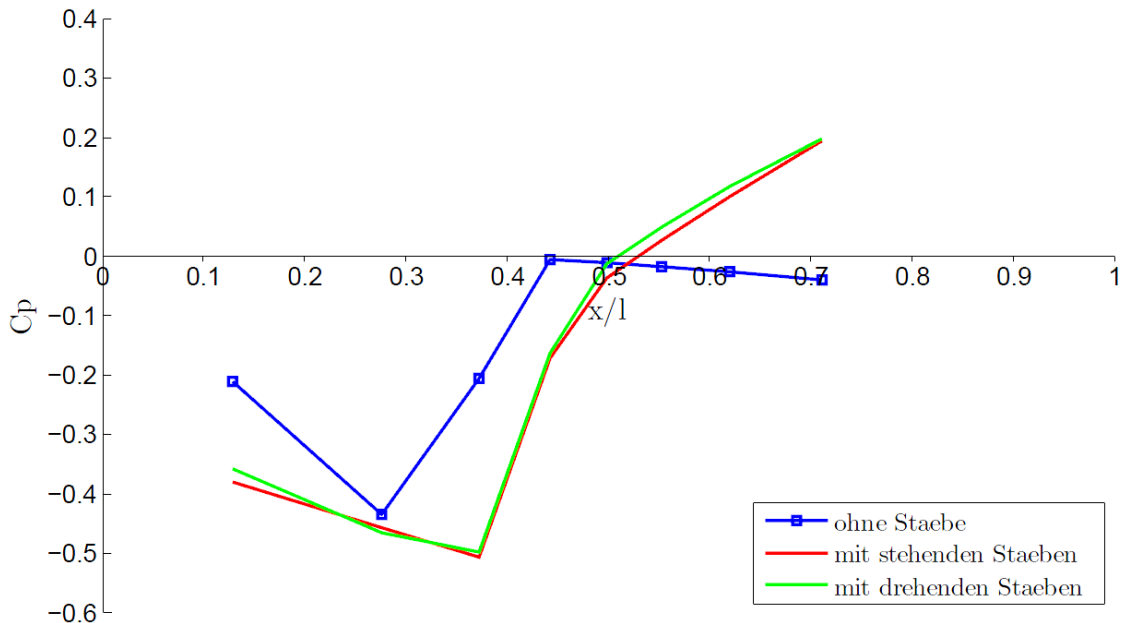


Abbildung 6-26: Vergleich des statischen Druckverlaufes mit und ohne Stäbchen, ohne Wirbelgeneratoren

Es ist zu erkennen, dass durch die Stäbchen der Druck ab dem Punkt  $x/l = 0,44$  deutlich weiter ansteigt, während er für den Fall ohne Stäbchen sogar abfällt. Da beim Vergleich des Ölanstriches zwischen der Abbildung 6-12 und Abbildung 6-22 im Hinblick auf die Ablöselinie kein Unterschied erkennbar ist, würde dies bei der Konfiguration mit den Stäbchen nur eine geringere Höhe der Ablösung bedeuten, was zum Druckanstieg führt. Für die Ursache der Differenz im Druckanstieg können an dieser Stelle nur Vermutungen abgegeben werden.

So kann einerseits vermutet werden, dass durch die Stäbchenüberströmung (Spaltströmung) die Geschwindigkeit im wandnahen Bereich um etliches angehoben wird. Dies führt zu einer höher energetisierten Grenzschicht und somit zu einem niedrigeren Ablösegebiet.

Prinzipiell kann auch der unterschiedliche Abstand der Stäbchen zwischen Außen- und Innendurchmesser als Ursache vermutet werden. So ist prozentuell gesehen der Abstand zwischen den Stäbchen am Innendurchmesser kleiner als jener am Außendurchmesser. Dadurch stellt sich eine ungleiche Versperrung am Innendurchmesser und am Außendurchmesser ein. Dieser Sachverhalt führt beim kleinen Stäbchenabstand zu einer größeren Geschwindigkeit und somit zu einem erhöhten Massentransport an der Innenkontur des Zwischendiffusors.

Wie aus Abbildung 6-26 ersichtlich, stellt sich zwischen drehenden und stehenden Stäbchen in Hinblick auf die statische Druckverteilung kein großer Unterschied dar. Aufgrund dieser Tatsache

wird der Vergleich mit den Wirbelgeneratoren in Abbildung 6-27 für stehende Stäbchen durchgeführt. Die Position der Wirbelgeneratoren bleibt im Vergleich zu der Konfiguration ohne Stäbchen gleich.

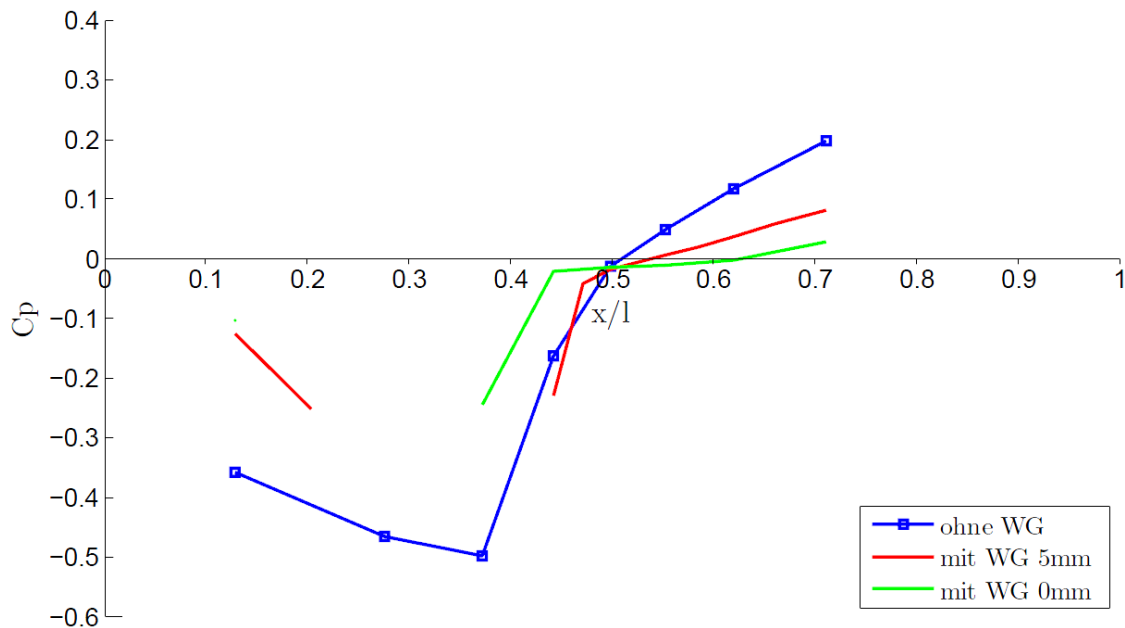


Abbildung 6-27: Vergleich des statischen Druckverlaufes an der Außenkontur mit Stäbchen und mit/ohne Wirbelgeneratoren

Dieser Vergleich zeigt, dass durch den Wirbelgenerator der statische Druck am Ende der Außenkontur um ein  $\Delta C_p$  von 0,17 fällt. Dies bedeutet, dass der Wirbelgenerator die Situation leicht verschlechtert.

Ebenso muss auch hier angenommen werden, dass die Applikation der Wirbelgeneratoren in nur einem Bereich der oberen Halbschale nicht ausreichend ist, um eine Aussage über die Wirbelgeneratoren in Hinblick auf die statischen Wanddruckbohrungen zu treffen.



## ***7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK***

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Prüfstand voll funktionsfähig ist. Der Zugang zum Applizieren des Ölanstriches erweist sich als einfach, so dass auch mehrere Messungen hintereinander vorgenommen werden können. Dies ermöglicht das Messen bei konstanter Viskosität des Ölanstriches sowie bei nahezu gleichbleibendem Umgebungszustand. Der Vorteil liegt darin, dass die Messergebnisse untereinander besser vergleichbar und interpretierbar sind.

Für die Messung bei drehenden Stäbchen empfiehlt sich für die Zukunft ein Drehzahlmesssystem um die exakte Drehzahl des Laufrades ablesen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Wuchtung des Laufrades durchgeführt. Für einen kontinuierlichen Betrieb mit der Höchstdrehzahl von 5500 U/min wäre eine ständige Wellenschwingungsüberwachung des Laufrades, welches nur die Relativbewegung zwischen Rotor und Gehäuse misst vorteilhaft.

Für die zu untersuchenden Wirbelgeneratoren konnte kein signifikanter Unterschied im Vergleich zum Übergangskanal ohne passive Strömungsbeeinflussung festgestellt werden. Im Gegenteil tritt bei der Gegenüberstellung der Wirbelgeneratoren mit Stäbchen sogar eine tendenziell leichte Verschlechterung ein. Es kann daher vermutet werden, dass der durch die Wirbelgeneratoren abgedeckte obere Viertelkreis nicht ausreicht um die Wirkung in den statischen Druckmessbohrungen zu erkennen. Daher wird für die nachfolgenden Messungen mit Wirbelgeneratoren empfohlen, diese am ganzen Umfang zu applizieren.

Um den Einfluss der Nachläufe der Stäbchen auf die Wirbelgeneratoren genauer zu untersuchen empfiehlt sich auch eine Variation der Wirbelgeneratorgeometrie.

Somit wird der Prüfstand für weitere Projekte bei der Untersuchung der Strömung in einem Turbinen-Zwischen-Diffusor gute Dienste leisten.



## **8 LITERATURVERZEICHNIS**

Bohn, D. / Simon, H. 1975: Mehrparametrische Approximation der Eichräume und Eichflächen von Unterschall- bzw. Überschall-5-Loch-Sonden, in: ATM Meßtechnische Praxis, Lieferung 470, 1975 (3), Seite 31-37.

Bräunling W.J.G. 2009: Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme, 3. Auflage, Springer-Verlag, Hamburg.

Breitbach C. 2002: Numerische Berechnung transistionaler Grenzschicht-Strömungen in axialen Turbinengittern, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) 2007: BMU Homepage - Flugverkehr, <http://www.bmu.de/verkehr/flugverkehr/doc/40189.php>, 07.05.2012

Canepa, E. et al. 2006: Boundary Layer Separation on a Flat Plate With Adverse Pressure Gradients Using Vortex Generators, in: ASME Conference Proceedings, 2006 (3), Seite 1211-1220.

Dotti, D. 2012: Numerical investigation on a super-aggressive inter-turbine diffuser, Diplomarbeit, Politecnico di Milano.

Engine Alliance 2012: Engine Alliance Homepage – Media Center – Photos, [http://www.enginealliance.com/images/mc03\\_lg.png](http://www.enginealliance.com/images/mc03_lg.png), 07.05.2012

Erhard, J. 2002: Design, Construction and Commissioning of a Transonic Test-Turbine Facility, Dissertation, Technische Universität Graz.

- European Commission for Research and Innovation 2012: Aggressive Intermediate Duct Aerodynamics for Competitive and Environmentally Friendly Jet Engines (AIDA) [http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/aida\\_en.htm](http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/aida_en.htm), 02.05.2012
- Gad-el-Hak M. 2000: Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management, Cambridge University Press, Notre Dame (India).
- Göttlich E. et al. 2009: On flow separation in a super-aggressive intermediate turbine duct, in: Heitmeir F. et al. (Hrsg.): Proceedings of 8<sup>th</sup> European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Seite 1389-1404.
- Göttlich E. 2011: Research on the aerodynamics of intermediate turbine diffusers, in: Progress in Aerospace Science, 47 (4), Seite 249-279.
- Klomp E.D. / Sovran G. 1967: Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular Conical or Annular Cross Section, in: Sovran G. (Hrsg.): Fluid Mechanics of Internal Flow, Elsevier Verlag, Amsterdam, Seite 270-319.
- Kurzke J. 2009: Fundamental differences between conventional and geared turbofans, in: ASME Conference Proceedings, 2009 (1), Seite 145-153.
- Lin J.C. 2002: Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation, in: Progress in Aerospace Science, 38 (4-5), Seite 389-420.
- Marn A. 2008: On the Aerodynamics of Aggressive Intermediate Turbine Ducts for Competitive and Environmentally Friendly Jet Engines, Dissertation, Technische Universität Graz.
- Pan J. 2008: Konstruktion einer ringförmigen Schaufelgitterkaskade mit Nachlaufgenerator, Diplomarbeit, Technische Universität Graz.

Pratt / Whitney 2012: Pratt&Whitney Homepage – Products – Commercial – GP7200, [http://www.pw.utc.com/media\\_center/assets/commercial\\_gp7200.pdf](http://www.pw.utc.com/media_center/assets/commercial_gp7200.pdf), 07.05.2012

Santner C. 2008: Experimentelle Untersuchung des Einflusses von Wirbelgeneratoren auf ablösende Diffusorströmungen, Diplomarbeit, Technische Universität Graz.

Santner C. et al. 2012: The Application of Low-Profile Vortex Generators in an Intermediate Turbine Diffusor, in: Journal of Turbomachinery, 134 (1), Seite 011023–1-8.

Schlichting H. 1964: Grenzschicht Theorie, 5. Auflage, Verlag G. Braun Karlsruhe, Göttingen.

Schwarze M. 2012: Numerische Simulation hochbelasteter Niederdruckturbinen unter besonderer Berücksichtigung periodisch instationärer Zuströmung, Dissertation, Universität der Bundeswehr München.

Sigloch H. 2007: Technische Fluidmechanik, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

The Japan Society of mechanical engineers (Hrsg.) 1988: Visualized Flow, Fluid motion in basic and engineering situations revealed by flow visualization, Pergamon Press, Oxford.

## 9 *ABBILDUNGSVERZEICHNIS*

Abbildung 1-1: Fan-Triebwerk GP7200 von Engine Alliance.....	3
Abbildung 1-2: Vergleich zweier Turbofan-Triebwerke mit Nebenstrom-Verhältnis von 6 und 10.....	5
Abbildung 1-3: Ausschnitt aus Versuchsturbine mit den verschiedenen Übergangskanälen (rot umrandet) .....	6
Abbildung 1-4: Wirbelgeneratoren im 2D Kanal (links oben), in der transsonischen Versuchsturbine (rechts oben ) und in der Ringgitterkaskade mittig unten .....	8
Abbildung 2-1: Grenzschichtdicke und Verdrängungsdicke.....	11
Abbildung 2-2: Geschwindigkeitsprofilunterschied zwischen laminarer und turbulenter Grenzschicht.....	13
Abbildung 2-3: Grenzschichtausbildung an einer ebenen Platte.....	13
Abbildung 2-4: Geschwindigkeitsprofile bei Druckabfall (Bereich B) und Druckanstieg (Bereich V).....	14
Abbildung 2-5: Strömung in einem stark erweiternden Kanal mit Ablösung .....	16
Abbildung 2-6: Strömung in einem stark erweiternden Kanal mit Absaugung der Grenzschicht an beiden Kanalwänden .....	16
Abbildung 2-7: Wirbelgenerator .....	17
Abbildung 2-8: Ausformung der Wirbelgeneratoren .....	17
Abbildung 2-9: Wirbelgenerator Geometrie mit seinen Hauptparametern und dargestelltem Wirbel .....	18
Abbildung 2-10: Prinzipskizze eines Diffusors.....	19
Abbildung 2-11: Einordnung der Übergangskanäle im Diagramm von Sovran und Klomp .....	20
Abbildung 2-12: Ablösung der Grenzschicht und Wirbelbildung am Kreiszyylinder (Schematisch).....	21
Abbildung 2-13: Rückströmung im hinteren Bereich des Kreiszyinders bei $Re=1,2 \cdot 10^3$ (Aufgenommen 2 sec nach Bewegungsstart, Wasser, Strömungsgeschwindigkeit 2 cm/s, Zylinderdurchmesser 7cm).....	21
Abbildung 2-14: Kármánsche Wirbelstraße hinter einem Kreiszyylinder bei $Re=140$ (Wasser, Strömungsgeschwindigkeit 1,5cm/s, Zylinderdurchmesser 1cm).....	22

Abbildung 2-15: Kármánsche Wirbelstraße mit Geschwindigkeitsverlauf .....	22
Abbildung 2-16: Nachlauf mehrerer Stäbchen.....	22
Abbildung 2-17: Geschwindigkeitsdreieck bei einem bewegten Stab .....	23
Abbildung 2-18: Fehlanströmung der Wirbelgeneratoren .....	24
Abbildung 2-19: Machverteilung durch einen Zwischendiffusor .....	25
Abbildung 2-20: Statische Druckverteilung an der Außen- und Innenkontur des Zwischendiffusors .....	26
Abbildung 2-21: Druckgetriebene Sekundärströmungen hervorgerufen durch die S-Form und stationäre Nachläufe.....	27
Abbildung 2-22: Kontur und Flächenverlauf des Übergangskanals C5.....	28
Abbildung 3-1: Schaltplan der Verdichteranlage .....	30
Abbildung 3-2: Fahrweise 6 der Verdichteranlage .....	30
Abbildung 3-3: Schnittdarstellung der Ringgitterkaskade .....	31
Abbildung 4-1: Darstellung des Abluftgehäuses.....	34
Abbildung 4-2: Darstellung der Drehvorrichtung .....	34
Abbildung 4-3: Darstellung des Anhebens der Drehvorrichtung .....	35
Abbildung 4-4: Abheben der Deckplatte der Drehvorrichtung .....	35
Abbildung 4-5: Darstellung des kombinierten Lagers mit Verzahnung.....	36
Abbildung 4-6: Darstellung des unteren Teiles der Drehvorrichtung .....	36
Abbildung 4-7: Aufstellen des Diffusors auf das Abluftgehäuse.....	37
Abbildung 4-8: Angelieferter Kran .....	38
Abbildung 4-9: Aufstellen des Vertikalträgers.....	38
Abbildung 4-10: Befestigung der Vertikalträger zum Drehen des Horizontalträgers .....	39
Abbildung 4-11: Stahlträger als Laufbahn des Krans .....	40
Abbildung 4-12: Verschraubung der Vertikalträger.....	40
Abbildung 4-13: Portalkran.....	40
Abbildung 4-14: Bereiche in denen die Messtechnik installiert wird .....	41
Abbildung 4-15: Einlauf mit Druck - und Temperaturmesspunkt .....	42
Abbildung 4-16: Querschnitt durch die Einlaufschaufel mit gesetzten Bohrungen .....	43
Abbildung 4-17: Darstellung der Temperaturkalibrierung.....	44
Abbildung 4-18: Anschluss der Druckmessschläuche an der Innenkontur des Zwischendiffusors .....	46
Abbildung 4-19: Positionskreisbestimmung an der Innenkontur des Zwischendiffusors .....	46
Abbildung 4-20: Druckmessreihen an der Innenkontur des Zwischendiffusors .....	47
Abbildung 4-21: Etikettierung der Druckmessschläuche .....	48
Abbildung 4-22: Einbau der Plexiglasscheibe .....	49
Abbildung 4-23: Distanzen für Einbau des Fensters.....	49
Abbildung 4-24: Anlenkung des Kameraträgers .....	49

Abbildung 4-25: Bewegungsstudie des Kameraträgers .....	50
Abbildung 4-26: Einbau des Kameraträgers .....	51
Abbildung 4-27: Vormontierter Kameraträger.....	51
Abbildung 4-28: Logitech - Webkamera Software .....	52
Abbildung 4-29: Positionierung der LED-Streifen .....	53
Abbildung 4-30: Helligkeitsunterschied zwischen 6 V und 12 V .....	53
Abbildung 4-31: Druckmessreihen an der Außenkontur des Zwischendiffusers.....	54
Abbildung 4-32: Bereiche der Ringgitterkaskade .....	55
Abbildung 4-33: Bereich Diffusor .....	56
Abbildung 4-34: Einziehen der Druckschläuche.....	57
Abbildung 4-35: Darstellung der Stufe zwischen Innenkontur und Diffusor in der Ansicht von innen.....	57
Abbildung 4-36: Druckschläuche und Verschraubung von Innenkontur und Diffusor in der Ansicht von innen .....	58
Abbildung 4-37: Motorträgersverschraubung.....	58
Abbildung 4-38: Messuhrenanordnung zur Einrichtung des Motors .....	59
Abbildung 4-39: Position der Unterlegplättchen zur Einrichtung des Motors .....	59
Abbildung 4-40: Aufgesetzter äußerer Ring über die Innenkontur des Zwischendiffusers .....	60
Abbildung 4-41: Bereich Mittelteil (Drehvorrichtung).....	61
Abbildung 4-42: Befestigungsflansch auf Diffusor aufgesetzt .....	62
Abbildung 4-43: Hintere Befestigungsplatte der Drehvorrichtung .....	62
Abbildung 4-44: Zentrierung der hinteren Befestigungsplatte gegenüber dem Motor .....	62
Abbildung 4-45: Lauffläche für O-Ring-Dichtung .....	63
Abbildung 4-46: Eingebautes Lager.....	63
Abbildung 4-47: Zentrierung der Lauffläche für die O-Ring-Dichtung.....	63
Abbildung 4-48: Distanzring und Ringkontur innerhalb der Lauffläche .....	64
Abbildung 4-49: Befestigung der Messuhr zum Einrichten der Ringkontur.....	64
Abbildung 4-50: Befestigung der Messuhr in der Ansicht von oben.....	64
Abbildung 4-51: Verbaute Leitschaufeleinheit .....	65
Abbildung 4-52: Einsetzen der Passhülsen und aufsetzen der Deckplatte .....	65
Abbildung 4-53: Darstellung der fertig aufgebauten Drehvorrichtung mit den eingesetzten Lastösen zum Anheben .....	66
Abbildung 4-54: Bereich Mittelteil (Laufрад).....	67
Abbildung 4-55: Explosionsdarstellung des Laufrades.....	68
Abbildung 4-56: Variation der Stäbchenposition am Laufрад .....	68
Abbildung 4-57: Verschraubung des Laufrades.....	69
Abbildung 4-58: Dichtungsdeckel mit Darstellung der Einbaurichtung für Wellendichtung .....	69



Abbildung 4-59: Einbau des Dichtungsdeckels .....	69
Abbildung 4-60: Montage des Laufrades .....	70
Abbildung 4-61: Demontage des Laufrades .....	70
Abbildung 4-62: Spezialwerkzeug zum Anziehen der Stäbchen .....	71
Abbildung 4-63: Montierte Stäbchen am Laufrad.....	71
Abbildung 4-64: Bereich Einlauf .....	72
Abbildung 4-65: Einlauf.....	73
Abbildung 4-66: Schnittdarstellung Einlauf.....	73
Abbildung 4-67: Für Einlauf vorbereitete Ringgitterkaskade .....	74
Abbildung 4-68: Distanzmessung zwischen Drehvorrichtung und Einlauf .....	74
Abbildung 4-69: Abheben der oberen Einlaufhalbschale und Montage der Halbkugel.....	75
Abbildung 4-70: Distanzmessung zwischen Halbkugel und Laufrad .....	75
Abbildung 4-71: Spalt zwischen der Innenkontur, dem Laufrad und der Halbkugel bei waagrechter Maschinenachse .....	76
Abbildung 4-72: Messuhrensetup für Motorachsversetzung im Betrieb.....	77
Abbildung 4-73: Schnittdarstellung des aufgebauten Laufrades am Motor .....	77
Abbildung 4-74: Position des O-Ringes .....	78
Abbildung 4-75: Zentrierung des Einlaufes .....	78
Abbildung 4-76: Einsetzen des hinteren Kegels .....	79
Abbildung 4-77: Bildfolge beim Umkippen der Ringgitterkaskade .....	79
Abbildung 4-78: Transportfähige Ringgitterkaskade .....	80
Abbildung 4-79: Einbaurichtung des $\lambda$ -Trägers .....	81
Abbildung 4-80: Einbausituation mit zurückgeschobenem $\lambda$ -Träger.....	81
Abbildung 4-81: Einbausituation der Halbkugel.....	82
Abbildung 4-82: Position des Lasthaken und des Zurrgurtes.....	82
Abbildung 4-83: Entfernte Schrauben am Einlauf .....	82
Abbildung 4-84: Verschraubung des $\lambda$ -Trägers .....	83
Abbildung 4-85: Unterlegscheiben für die Höheneinstellung am $\lambda$ -Träger .....	84
Abbildung 4-86: Kennzeichnung der zu entfernenden Schrauben für die Demontage des vorderen Einlaufes .....	85
Abbildung 4-87: Darstellung der Demontage der Einlaufstütze mit Hilfe der Gewindestange und Kennzeichnung der zu entfernenden Schrauben .....	85
Abbildung 4-88: Kennzeichnung der zu entfernenden Schrauben für die Demontage der Außenkontur des Zwischendiffusors.....	87
Abbildung 4-89: Ausbau des O-Ringes.....	87
Abbildung 4-90: Zahnradbefestigung mit Klemmwelle.....	89
Abbildung 4-91: Durchführung der Druckmessschläuche .....	89

Abbildung 4-92: Connector von oben mit Dichtungsblatt .....	90
Abbildung 4-93: Connector von unten mit Nummerierung .....	90
Abbildung 4-94: Bently Nevada TK 81 Schwingungsmessgerät .....	91
Abbildung 5-1: Display des Programms "AnCa MainDisplay" .....	93
Abbildung 5-2: Sondenmessebene C.....	96
Abbildung 5-3: Prinzipskizze einer Fünf-Loch-Sonde.....	97
Abbildung 6-1: Positionskreis für Außenkontur des Zwischendiffusers .....	101
Abbildung 6-2: Positionskreis für Innenkontur des Zwischendiffusers .....	101
Abbildung 6-3: Vergleich der numerischen Machzahl mit jener der Versuchsturbine (AIDA) im Auslegungspunkt 1 .....	102
Abbildung 6-4: Machzahlverteilung (links) und die massenstromabhängige maximale Machzahl (recht), ohne Stäbchen.....	103
Abbildung 6-5: Totaldruckverlauf (links) und statischer Druckverlauf (rechts), ohne Stäbchen, in der Ebene C.....	104
Abbildung 6-6: Machzahlverteilung (links) und die massenstromabhängige maximale Machzahl (recht), mit Stäbchen .....	105
Abbildung 6-7: Totaldruckverlauf (links) und statischer Druckverlauf (rechts), mit Stäbchen, in der Ebene C.....	106
Abbildung 6-8: Umfangssymmetrie an der Außenkontur des Zwischendiffusers ohne Stäbchen.....	107
Abbildung 6-9: Umfangssymmetrie an der Innenkontur des Zwischendiffusers ohne Stäbchen .....	108
Abbildung 6-10: Umfangssymmetrie an der Innenkontur des Zwischendiffusers mit Stäbchen.....	109
Abbildung 6-11: Statischer Druckverlauf ohne Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren .....	110
Abbildung 6-12: Ölanstrich ohne Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren.....	111
Abbildung 6-13: Statischer Druckverlauf ohne Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren.....	112
Abbildung 6-14: Ölanstrich ohne Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 35 mm .....	113
Abbildung 6-15: Ölanstrich ohne Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 40 mm .....	114
Abbildung 6-16: Statischer Druckverlauf mit Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren.....	115
Abbildung 6-17: Ölanstrich mit stehenden Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren .....	116
Abbildung 6-18: Statischer Druckverlauf mit Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren .....	117
Abbildung 6-19: Ölanstrich mit stehenden Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 35 mm .....	118
Abbildung 6-20: Ölanstrich mit stehenden Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 40 mm .....	119
Abbildung 6-21: Statischer Druckverlauf mit drehenden Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren .....	120
Abbildung 6-22: Ölanstrich mit drehenden Stäbchen und ohne Wirbelgeneratoren.....	121
Abbildung 6-23: Ölanstrich mit drehenden Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren 5 mm stromaufwärts.....	121

Abbildung 6-24: Ölanstrich mit Stäbchen und mit Wirbelgeneratoren an der Position 40 mm.....	122
Abbildung 6-25: Vergleich des statischen Druckverlaufes an der Außenkontur ohne Stäbchen und mit/ohne Wirbelgeneratoren.....	123
Abbildung 6-26: Vergleich des statischen Druckverlaufes mit und ohne Stäbchen, ohne Wirbelgeneratoren.....	124
Abbildung 6-27: Vergleich des statischen Druckverlaufes an der Außenkontur mit Stäbchen und mit/ohne Wirbelgeneratoren.....	125
Abbildung A-1: Schnittbild – Druckbohrungen .....	A-I
Abbildung A-2: Positionskreis für Außenkontur des Zwischendiffusors .....	A-II
Abbildung A-3: Positionskreis für Innenkontur des Zwischendiffusors .....	A-II
Abbildung A-4: Schnittbild – Definition der Zwischendiffusorlänge l.....	A-II
Abbildung A-5: Anschlussplan der Druckschläuche im Messkasten.....	A-III
Abbildung A-6: Geschwindigkeitsverlauf über die relative Kanalhöhe, ohne Stäbchen .....	A-IV
Abbildung A-7: Totaltemperaturverlauf und statischer Temperaturverlauf über die relative Kanalhöhe, ohne Stäbchen.....	A-V
Abbildung A-8: Geschwindigkeitsverlauf über die relative Kanalhöhe, mit Stäbchen.....	A-V
Abbildung A-9: Totaltemperaturverlauf und statischer Temperaturverlauf über die relative Kanalhöhe, mit Stäbchen .....	A-VI
Abbildung A-10: Transsonischer 2D-Windkanal.....	A-IX
Abbildung A-11: Ölanstrich im 2D-Versuchskanal .....	A-IX
Abbildung A-12: Transsonische Versuchsturbine in der Konfiguration C5 .....	A-X
Abbildung A-13: Ölanstrich an der Außenkontur der transsonischen Versuchsturbine in der Konfiguration C5 .....	A-X

## ***10 TABELLENVERZEICHNIS***

Tabelle 2-1: Abmessungen der in dieser Arbeit verwendeten Wirbelgeneratoren.....	18
Tabelle 3-1: Eckdaten der Verdichter.....	29
Tabelle 4-1: Temperaturkalibrierung .....	44
Tabelle 5-1: Kalibrierbereich der gekröpften Fünf-Loch-Sonde.....	96
Tabelle 6-1: Betriebsparameter der Vergleichsmaschinen.....	101
Tabelle 6-2: Betriebspunkt ohne Stäbchen.....	104
Tabelle 6-3: Betriebspunkt ohne Stäbchen.....	106
Tabelle A-1: Koordinaten der Druckmessbohrungen an der Innenkontur des Zwischendiffusors .....	A-I
Tabelle A-2: Koordinaten der Druckmessbohrungen an der Außenkontur des Zwischendiffusors mit 15 Bohrungen.....	A-I
Tabelle A-3: Koordinaten der Druckmessbohrungen an der Außenkontur des Zwischendiffusors mit sieben Bohrungen .....	A-I
Tabelle A-4: Messkoordinaten der Fünf-Loch-Sondenmessung.....	A-IV
Tabelle A-5: Einzustellende Daten für Frequenzumrichter.....	A-VII
Tabelle A-6: Datenblatt des Elektromotors.....	A-VIII
Tabelle A-7: Datenblatt des Netzfilters.....	A-IX

# A. ANHANG

## A.1 DRUCKMESSBOHRUNGEN IM ÜBERGANGSKANAL C5

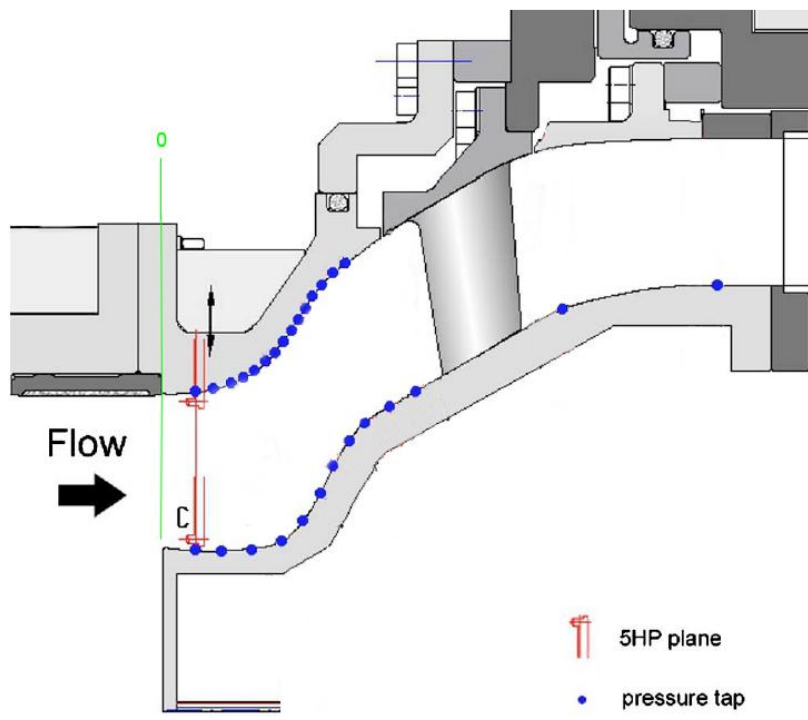


Abbildung A-1: Schnittbild – Druckbohrungen

Tabelle A-1: Koordinaten der Druckmessbohrungen an der Innenkontur des Zwischendiffusers

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Abstand	205,6	151,3	97,5	87,6	78,1	71	65,7	60,2	54,2	45,7	34,7	23,7	12,7

Tabelle A-2: Koordinaten der Druckmessbohrungen an der Außenkontur des Zwischendiffusers mit 15 Bohrungen

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Abstand	70,4	65,6	61,3	58,1	54,7	52,1	49,4	46,7	43,9	40,6	36,9	32,3	27,3	20,2	12,8

Tabelle A-3: Koordinaten der Druckmessbohrungen an der Außenkontur des Zwischendiffusers mit sieben Bohrungen

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8
Abstand	70,4	61,3	54,7	49,4	43,9	36,9	27,3	12,8

Die Reihenanzordnung in Strömungsrichtung blickend für die Außen – und Innenkontur des Zwischendiffusors.

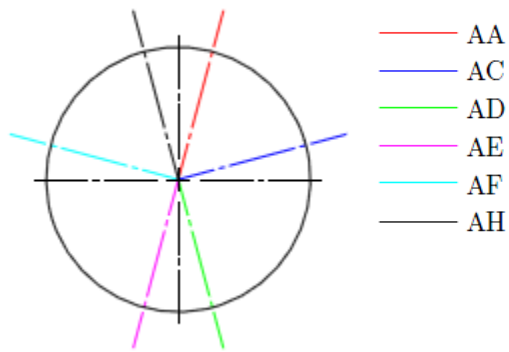


Abbildung A-2: Positionskreis für Außenkontur des Zwischendiffusors

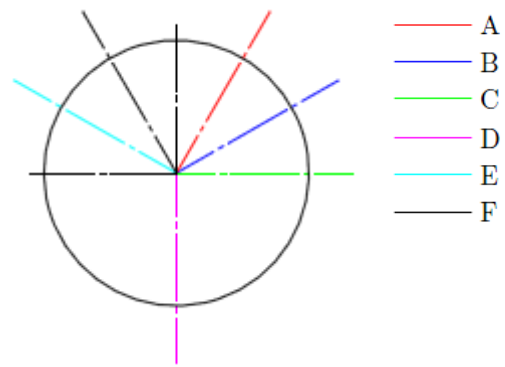
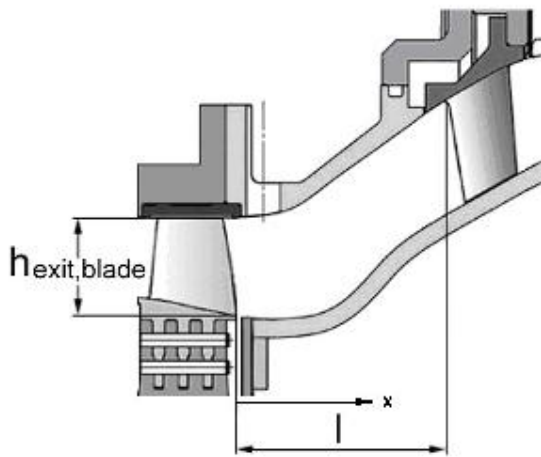


Abbildung A-3: Positionskreis für Innenkontur des Zwischendiffusors



Duct length l C5	99.1	mm
------------------	------	----

Abbildung A-4: Schnittbild – Definition der Zwischendiffusorlänge  $l$



A.2 ANSCHLUSSPLAN DER DRUCKSCHLÄUCHE

PSI 2103 +/-2,1 bar				PSI 2105 +/-2,1 bar				PSI 2106 +/-2,1 bar				PSI 2107 +/-2,1 bar				PSI 2111 +/-2,1 bar				PSI 1096 +/-3,5 bar				
Channel	Labview	Conn. Nr.	Positionnr.	Channel	Labview	Conn. Nr.	Positionnr.	Channel	Labview	Conn. Nr.	Positionnr.	Channel	Labview	Conn. Nr.	Positionnr.	Channel	Labview	Conn. Nr.	Positionnr.	Channel	Labview	Conn. Nr.	Positionnr.	
1	0	1	1,1	B1	1	16	17	1,17	E1	1	32	33	1,33	E7	1	48	49	2,1	AC1	1	64	65	2,17	AH3
2	1	2	1,2	B2	2	17	18	1,18	D5	2	33	34	1,34	E8	2	49	50	2,2	AC2	2	65	66	2,18	AH4
3	2	3	1,3	B3	3	18	19	1,19	D6	3	34	35	1,35	E9	3	50	51	2,3	AC3	3	66	67	2,19	AH5
4	3	4	1,4	B4	4	19	20	1,20	D7	4	35	36	1,36	Sonde 0	4	51	52	2,4	AC4	4	67	68	2,20	AH6
5	4	5	1,5	B5	5	20	21	1,21	D8	5	36	37	1,37	Sonde 1	5	52	53	2,5	AC5	5	68	69	2,21	AH7
6	5	6	1,6	B6	6	21	22	1,22	D9	6	37	38	1,38	Sonde 2	6	53	54	2,6	AC6	6	69	70	2,22	AH8
7	6	7	1,7	B7	7	22	23	1,23	D10	7	38	39	1,39	Sonde 3	7	54	55	2,7	AC7	7	70	71	2,23	AH9
8	7	8	1,8	B8	8	23	24	1,24	D11	8	39	40	1,40	Sonde 4	8	55	56	2,8	AD1	8	71	72	2,24	AH10
9	8	9	1,9	B9	9	24	25	1,25	D12	9	40	41	1,41	REF. Druck	9	56	57	2,9	AD2	9	72	73	2,25	AH11
10	9	10	1,10	B10	10	25	26	1,26	D13	10	41	42	1,42	Blende 1	10	57	58	2,10	AD3	10	73	74	2,26	AH12
11	10	11	1,11	B11	11	26	27	1,27	E1	11	42	43	1,43	AC 8	11	58	59	2,11	AD4	11	74	75	2,27	AH13
12	11	12	1,12	B12	12	27	28	1,28	E2	12	43	44	1,44	AD 8	12	59	60	2,12	AD5	12	75	76	2,28	AH14
13	12	13	1,13	B13	13	28	29	1,29	E3	13	44	45	1,45	AH15	13	60	61	2,13	AD6	13	76	77	2,29	AF1
14	13	14	1,14	D1	14	29	30	1,30	E4	14	45	46	1,46	AF 8	14	61	62	2,14	AD7	14	77	78	2,30	AF2
15	14	15	1,15	D2	15	30	31	1,31	E5	15	46	47	1,47	Blende 2	15	62	63	2,15	AH1	15	78	79	2,31	AF3
16	15	16	1,16	D3	16	31	32	1,32	E6	16	47	48	1,0	Diffusor 6	16	63	64	2,16	AH2	16	79	80	2,32	AF4
17	16	17	1,17	C8	17	32	33	1,33	F1	17	48	49	4,1	AGS21 r	17	64	65	4,17	AGS21 r	17	80	81	4,33	AA2
18	17	18	1,18	C9	18	33	34	1,34	F2	18	49	50	4,2	AGS21 b	18	65	66	4,18	AGS21 b	18	81	82	4,34	AA3
19	18	19	1,19	C10	19	34	35	1,35	F3	19	50	51	4,3	AGS21 w	19	66	67	4,19	AGS21 w	19	82	83	4,35	AA4
20	19	20	1,20	C11	20	35	36	1,36	F4	20	51	52	4,4	AGS21 g	20	67	68	4,20	AGS21 g	20	83	84	4,36	AA5
21	20	21	1,21	C12	21	36	37	1,37	F5	21	52	53	4,5	AGS21 r	21	68	69	4,21	AGS21 r	21	84	85	4,37	AA6
22	21	22	1,22	C13	22	37	38	1,38	F6	22	53	54	4,6	AGS21 b	22	69	70	4,22	AGS21 b	22	85	86	4,38	AA7
23	22	23	1,23	C14	23	38	39	1,39	F7	23	54	55	4,7	AGS21 w	23	70	71	4,23	AGS21 w	23	86	87	4,39	AA8
24	23	24	1,24	C15	24	39	40	1,40	F8	24	55	56	4,8	AGS21 g	24	71	72	4,24	AGS21 g	24	87	88	4,40	AA9
25	24	25	1,25	C16	25	40	41	1,41	F9	25	56	57	4,9	AGS21 r	25	72	73	4,25	AGS21 r	25	88	89	4,41	AA10
26	25	26	1,26	C17	26	41	42	1,42	F10	26	57	58	4,10	AGS21 b	26	73	74	4,26	AGS21 b	26	89	90	4,42	AA11
27	26	27	1,27	C18	27	42	43	1,43	F11	27	58	59	4,11	AGS21 w	27	74	75	4,27	AGS21 w	27	90	91	4,43	AA12
28	27	28	1,28	C19	28	43	44	1,44	F12	28	59	60	4,12	AGS21 g	28	75	76	4,28	AGS21 g	28	91	92	4,44	AA13
29	28	29	1,29	C20	29	44	45	1,45	F13	29	60	61	4,13	AGS21 r	29	76	77	4,29	AGS21 r	29	92	93	4,45	AA14
30	29	30	1,30	C21	30	45	46	1,46	F14	30	61	62	4,14	AGS21 b	30	77	78	4,30	AGS21 b	30	93	94	4,46	AA15
31	30	31	1,31	C22	31	46	47	1,47	F15	31	62	63	4,15	AGS21 w	31	78	79	4,31	AGS21 w	31	94	95	4,47	AA16
32	31	32	1,32	C23	32	47	48	1,48	F16	32	63	64	4,16	AGS21 g	32	79	80	4,32	AGS21 g	32	95	96	4,48	AA17
33	32	33	1,33	C24	33	48	49	1,49	F17	33	64	65	4,17	AGS21 r	33	80	81	4,33	AGS21 r	33	96	97	4,49	AA18
34	33	34	1,34	C25	34	49	50	1,50	F18	34	65	66	4,18	AGS21 b	34	81	82	4,34	AGS21 b	34	97	98	4,50	AA19
35	34	35	1,35	C26	35	50	51	1,51	F19	35	66	67	4,19	AGS21 w	35	82	83	4,35	AGS21 w	35	98	99	4,51	AA20
36	35	36	1,36	C27	36	51	52	1,52	F20	36	67	68	4,20	AGS21 g	36	83	84	4,36	AGS21 g	36	99	100	4,52	AA21
37	36	37	1,37	C28	37	52	53	1,53	F21	37	68	69	4,21	AGS21 r	37	84	85	4,37	AGS21 r	37	100	101	4,53	AA22
38	37	38	1,38	C29	38	53	54	1,54	F22	38	69	70	4,22	AGS21 b	38	85	86	4,38	AGS21 b	38	101	102	4,54	AA23
39	38	39	1,39	C30	39	54	55	1,55	F23	39	70	71	4,23	AGS21 w	39	86	87	4,39	AGS21 w	39	102	103	4,55	AA24
40	39	40	1,40	C31	40	55	56	1,56	F24	40	71	72	4,24	AGS21 g	40	87	88	4,40	AGS21 g	40	103	104	4,56	AA25
41	40	41	1,41	C32	41	56	57	1,57	F25	41	72	73	4,25	AGS21 r	41	88	89	4,41	AGS21 r	41	104	105	4,57	AA26
42	41	42	1,42	C33	42	57	58	1,58	F26	42	73	74	4,26	AGS21 b	42	89	90	4,42	AGS21 b	42	105	106	4,58	AA27
43	42	43	1,43	C34	43	58	59	1,59	F27	43	74	75	4,27	AGS21 w	43	90	91	4,43	AGS21 w	43	106	107	4,59	AA28
44	43	44	1,44	C35	44	59	60	1,60	F28	44	75	76	4,28	AGS21 g	44	91	92	4,44	AGS21 g	44	107	108	4,60	AA29
45	44	45	1,45	C36	45	60	61	1,61	F29	45	76	77	4,29	AGS21 r	45	92	93	4,45	AGS21 r	45	108	109	4,61	AA30
46	45	46	1,46	C37	46	61	62	1,62	F30	46	77	78	4,30	AGS21 b	46	93	94	4,46	AGS21 b	46	109	110	4,62	AA31
47	46	47	1,47	C38	47	62	63	1,63	F31	47	78	79	4,31	AGS21 w	47	94	95	4,47	AGS21 w	47	110	111	4,63	AA32
48	47	48	1,48	C39	48	63	64	1,64	F32	48	79	80	4,32	AGS21 g	48	95	96	4,48	AGS21 g	48	111	112	4,64	AA33
49	48	49	1,49	C40	49	64	65	1,65	F33	49	80	81	4,33	AGS21 r	49	96	97	4,49	AGS21 r	49	112	113	4,65	AA34
50	49	50	1,50	C41	50	65	66	1,66	F34	50	81	82	4,34	AGS21 b	50	97	98	4,50	AGS21 b	50	113	114	4,66	AA35
51	50	51	1,51	C42	51	66	67	1,67	F35	51	82	83	4,35	AGS21 w	51	98	99	4,51	AGS21 w	51	114	115	4,67	AA36
52	51	52	1,52	C43	52	67	68	1,68	F36	52	83	84	4,36	AGS21 g	52	99	100	4,52	AGS21 g	52	115	116	4,68	AA37
53	52	53	1,53	C44	53	68	69	1,69	F37	53	84	85	4,37	AGS21 r	53	100	101	4,53	AGS21 r	53	116	117	4,69	AA38
54	53	54	1,54	C45	54	69	70	1,70	F38	54	85	86	4,38	AGS21 b	54	101	102	4,54	AGS21 b	54	117	118	4,70	AA39
55	54	55	1,55	C46	55	70	71	1,71	F39	55	86	87	4,39	AGS21 w	55	102	103	4,55	AGS21 w	55	118	119	4,71	AA40
56	55	56	1,56	C47	56	71	72	1,72	F40	56	87	88	4,40	AGS21 g	56	103	104	4,56	AGS21 g	56	119	120	4,72	AA41
57	56	57	1,57	C48	57	72	73	1,73	F41	57	88	89	4,41	AGS21 r	57	104	105	4,57	AGS21 r	57	120	121	4,73	AA42
58	57	58	1,58	C49	58	73	74	1,74	F42	58	89	90	4,42	AGS21 b	58	105	106	4,58	AGS21 b	58	121	122	4,74	AA43
59	58	59	1,59	C50	59	74	75	1,75	F43	59	90	91	4,43	AGS21 w	59	106	107	4,59	AGS21 w	59	122	123	4,75	AA44
60	59	60	1,60	C51	60	75	76	1,76	F44	60	91	92	4,44	AGS21 g	60	107	108	4,60	AGS21 g	60	123	124	4,76	AA45
61	60	61	1,61	C52	61	76	77	1,77	F45	61	92	93	4,45	AGS21 r	61	108	109	4,61	AGS21 r	61	124	125	4,77	AA46
62	61	62	1,62	C53</																				

## A.3 WEITERE AUSWERTUNG DER FÜNF-LOCH-SONDENMESSUNG

Tabelle A-4: Messkoordinaten der Fünf-Loch-Sondenmessung

Messpunkt	x [mm]	r [mm]	Rel. Kanalhöhe ·100 [%]	Rel. Kanalhöhe [mm]
Innenkontur	12,80	191,47	0,00	0
1	12,80	192,47	0,02	1,00
2	12,80	194,36	0,05	2,89
3	12,80	197,37	0,10	5,90
4	12,80	199,76	0,14	8,29
5	12,80	203,55	0,20	12,08
6	12,80	207,89	0,27	16,42
7	12,80	212,64	0,35	21,17
8	12,80	217,60	0,43	26,13
9	12,80	222,97	0,52	31,50
10	12,80	227,47	0,60	36,00
11	12,80	230,47	0,65	39,00
12	12,80	233,47	0,70	42,00
13	12,80	237,47	0,76	46,00
14	12,80	241,47	0,83	50,00
15	12,80	243,97	0,87	52,50
Außenkontur	12,80	251,87	1,00	60,40

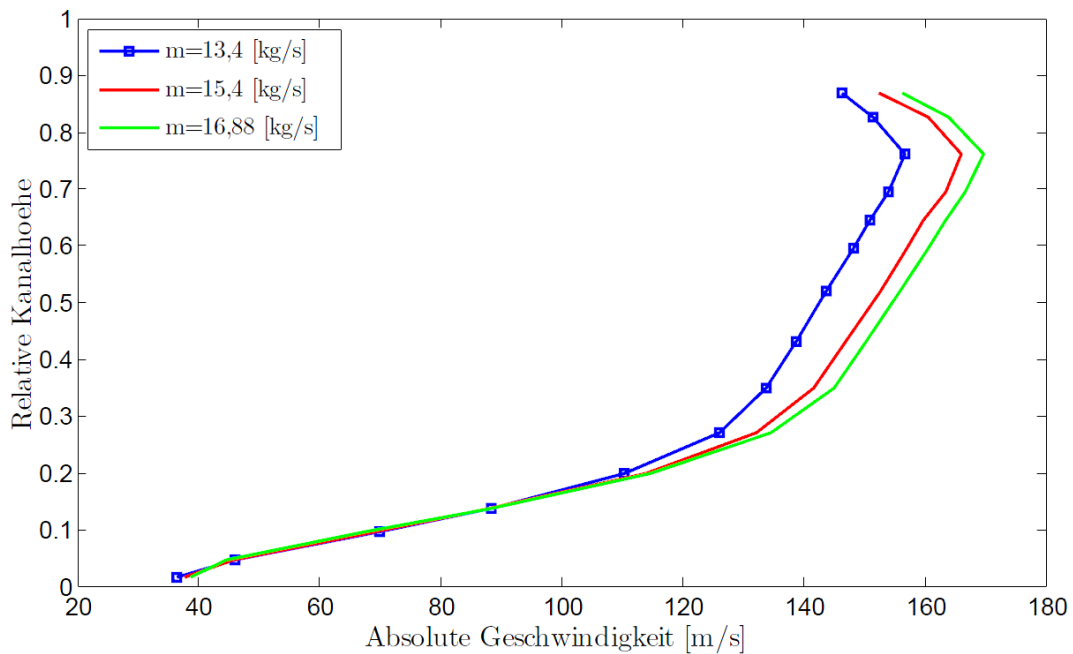


Abbildung A-6: Geschwindigkeitsverlauf über die relative Kanalhöhe, ohne Stäbchen

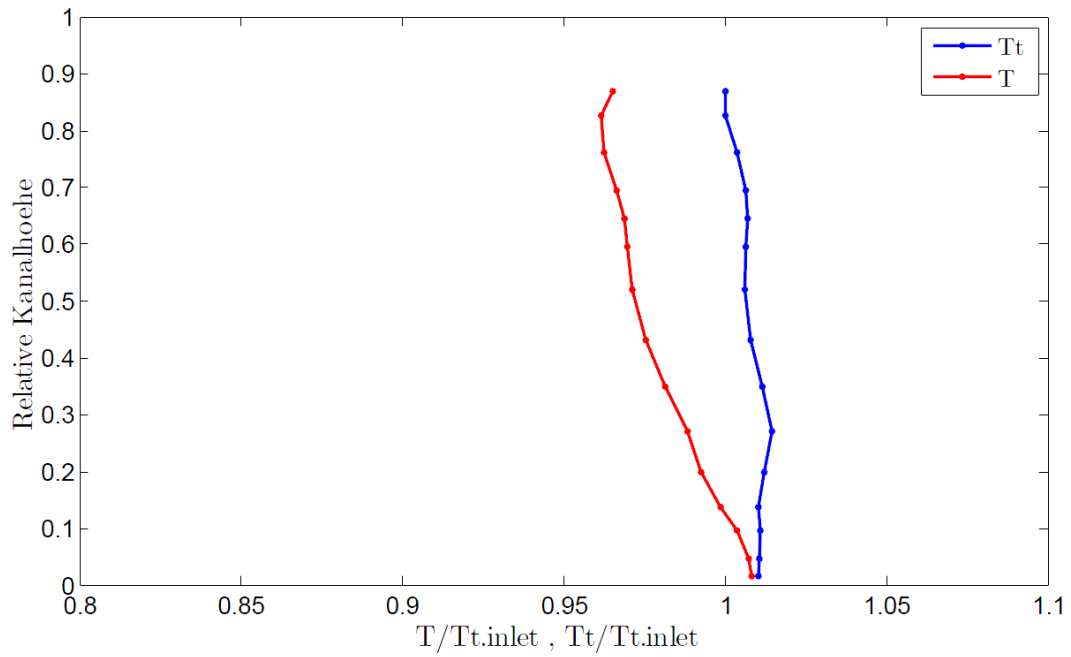


Abbildung A-7: Totaltemperaturverlauf und statischer Temperaturverlauf über die relative Kanalhöhe, ohne Stäbchen

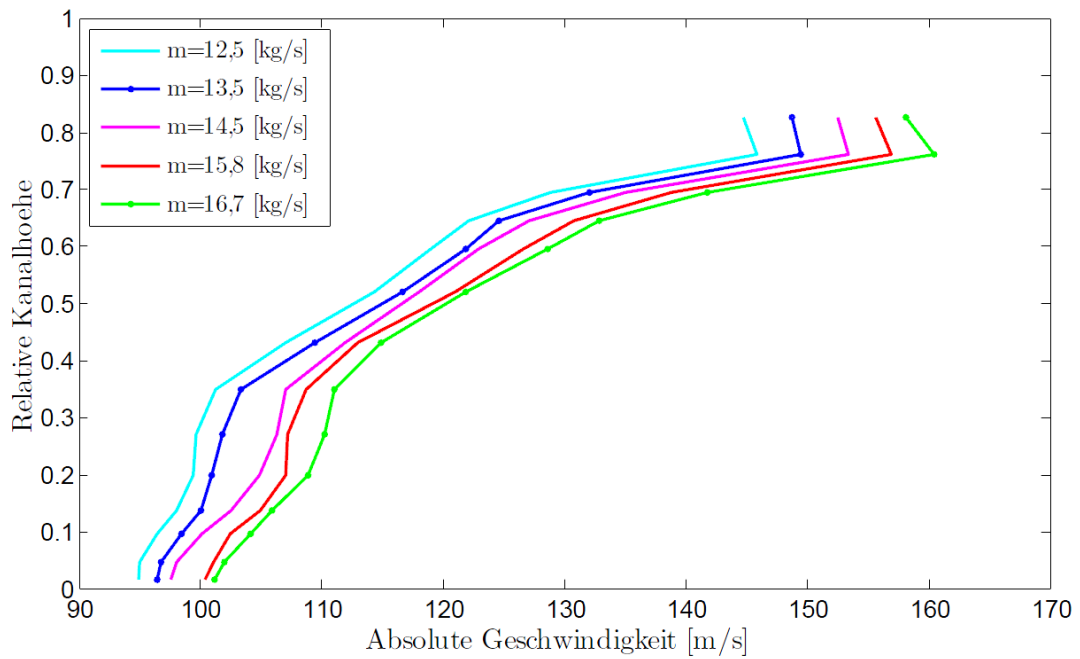


Abbildung A-8: Geschwindigkeitsverlauf über die relative Kanalhöhe, mit Stäbchen

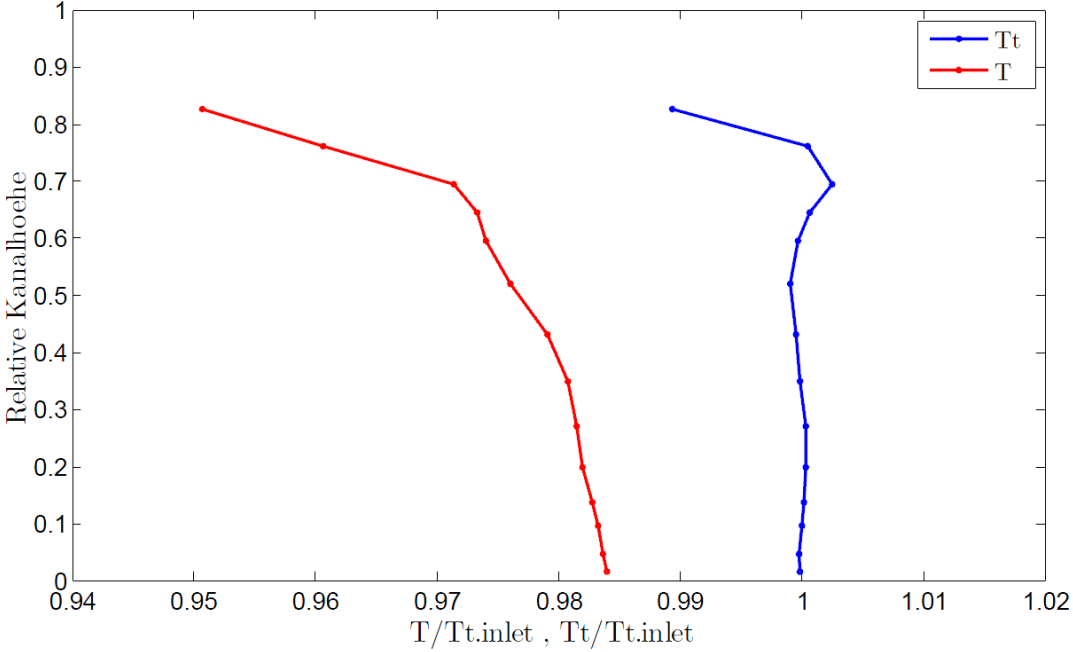


Abbildung A-9: Totaltemperaturverlauf und statischer Temperaturverlauf über die relative Kanalhöhe, mit Stäbchen

#### A.4 INBETRIEBNAHME UND DATENBLATT DES ELEKTROMOTORS

Anleitung zum Programmieren und Inbetriebnehmen des Motors mit Hilfe der Keypadsteuerung des Frequenzumrichters.

1. Leistungsanschlüsse verdrahten bzw. unter Spannung setzen.
2. Abnehmen des Keypads.
3. Die Steckerleiste der Steueranschlüsse „X4“ abziehen.
4. Aufstecken des Keypads: Es erfolgt ein Verbindungsaufbau, welcher abgeschlossen ist, wenn die Codestelle C00051 im Display angezeigt wird.
5. Mit der „linken Funktionstaste“ gelangt man in das Hauptmenü, von wo aus durch die Taste „↓“ bis zum Feld „Quick commissioning“ gescrollt wird.
6. Mit der Taste „→“ gelangt man in das „Quick commissioning“ Menü, wo man zum Menüpunkt „Keypad“ scrollt und dieses mit Hilfe der Taste „→“ auswählt.
7. Mit der Taste „↓“ wird die Codestelle C00002/1 „Load Lenze Settings“ angewählt und mit der Taste „edit“ parametrieren. Hier ist der Wert „1“ einzustellen und mit „OK“ zu bestätigen.
8. Das Display erlischt kurzzeitig und es erfolgt ein erneuter Verbindungsaufbau.
9. Zum Einstieg in das Hauptmenü wird die „linke Funktionstaste“ gedrückt, von wo aus durch die Taste „↓“ bis zum Feld „Code list“ gescrollt wird.
10. Mit der Taste „→“ gelangt man in das „Code list“ Menü, in welchem durch die Pfeiltasten die Codes aus Tabelle A-5 einzeln eingetragen werden. Zum Parametrieren des jeweiligen Codes wird die Taste „edit“ gedrückt. Zurück zu dem „Code list“ Menü gelangt man mittels der Taste „←“.

*Tabelle A-5: Einzustellende Daten für Frequenzumrichter*

Benennung	Code Nr.	Wert
O1U gain	C00434/001	50%
Reference speed	C00011	5500 U/min
Acceleration time	C00012	10s
Deceleration time	C00013	10s
V/f base frequency	C00015	93 Hz
Imax (motor Mode)	C00022	35,5A
Rated motor speed	C00087	5500 U/min
Rated motor freq.	C00089	93 Hz

11. Wurden alle Code Nummern entsprechend eingestellt, gelangt man über die Taste „←“ wieder zurück in das Hauptmenü.
12. Dort wird der Menüpunkt „Quick commissioning“ angewählt. Mit der Taste „→“ gelangt man zur Auswahl des „Keypads“, welche mit der Taste „→“ bestätigt wird.
13. Für die Motorsteuerung über das Keypad wird mit der Taste „↓“ bis zur Codestelle C00007 gescrollt und diese mit der „edit“ Taste bestätigt.

14. In diesem Untermenü muss der Wert „20 Keypad“ über die Taste „OK“ parametrieren werden.
15. Durch das Aufstecken der Steckerleiste für die Steueranschlüsse „X4“ wird der Anschlussregler freigegeben.
16. Über das Menü „Quick commissioning“ → „Keypad“ → gelangt man in das „Keypad“ Menü, worin zur Codestelle C00011 gescrollt wird. Über die Taste „edit“ kann die Höchstdrehzahl eingestellt werden. Diese ist wichtig, da im Folgenden die Drehzahl nur in Prozent der Höchstdrehzahl verstellt werden kann.
17. Wurde die Höchstdrehzahl gesetzt, gelangt man mit der Taste „OK“ wieder zurück in das „Keypad“ Menü, von wo aus man mittels der Pfeiltasten die Codestelle C00728 anwählt.
18. Durch die Taste „edit“ kann nun die Drehzahl in %-Form eingestellt werden. Vorsicht ist geboten, da der Antriebsregler bereits freigegeben ist. Das heißt der Motor wird bereits während des Einstellens der Werte anlaufen!
19. Zum Einstellen der Drehzahl wird mittels der Pfeiltasten die gewünschte Zahlenstelle ausgewählt und mit der Taste „↑“ nach oben korrigiert. Der Regler springt automatisch nach zum Beispiel 9 % durch erneutes drücken auf 10%. Da der Antriebsregler freigegeben ist empfiehlt sich ein langsames Hochfahren in 1 % Schritten.
20. Zum Stoppen des Motors ohne Bremswirkung wird der „Stopp“ Knopf gedrückt. Diese sperrt den Antriebsregler unverzüglich und der Motor läuft aus.
21. Zum Entriegeln des Antriebsreglers nach dem Drücken des „Stopp“ Kopfes, wird der „Run“ Knopf gedrückt. Der Motorregler bestätigt durch das Einblenden einer Information, dass die Steuerung wieder über die Codestelle C00728 erfolgen kann.

Tabelle A-6: Datenblatt des Elektromotors

Leistung	19,3kW
Betriebsart	S1 Dauerbetrieb
Bemessungsmoment	33,5 Nm im Bereich 2500-5500 min <sup>-1</sup>
Frequenz	0-95 Hz
Drehzahl	0-5500 min <sup>-1</sup> über Umrichter gesteuert
Wärmeklasse	F
Kaltleiterfühler Öffner	3X130°C
Mechanischer Befestigung	<b>siehe Zeichnung</b>
Geometrische Abmessungen	<b>siehe Zeichnung</b>
Welle	Durchmesser 42mm, 110mm lang
Axiale Kraft auf das Wellenende	Maximal 720N
Radialkraft auf das Wellenende	Maximal 2000N
Schutzart	IP55
Kühlung	Eigenlüfter
Umgebungstemperaturbereich	-20- +60°C
Explosionsschutz	3G nach EN 60034-1 für Betrieb am Frequenzumrichter
Zündschutzart	Zone 2 nach Richtlinie 94/9/EG EN60079-0/ EN 60079-15 (ATEX)
Kennzeichnung	<b>CE EX II 3G nA II T3</b>
Klemmkasten	<b>ohne</b> aus Platzgründen
Kabelanschluss (Leistung)	2x (4x4mm <sup>2</sup> ) Länge 10 Meter
Kabelanschluss (Kaltleiter)	2x0,75mm <sup>2</sup> Länge 10 Meter
Farbe STD	RAL 7031
Gewicht	ca. 170 kg



Tabelle A-7: Datenblatt des Netzfilters

Bemessungsstrom	42A
Betriebsart	S1 Dauerbetrieb
Bemessungsspannung	3X500V
Induktivität	0,7mH
Gewicht	13kg

### A.5 TRANSSONISCHER 2D – WINDKANAL

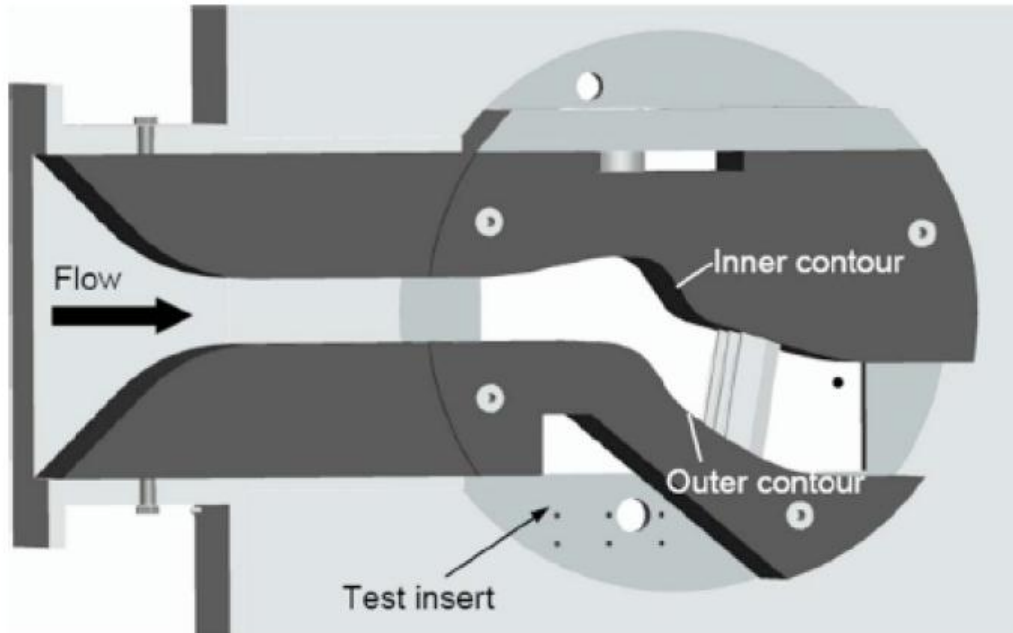


Abbildung A-10: Transsonischer 2D-Windkanal

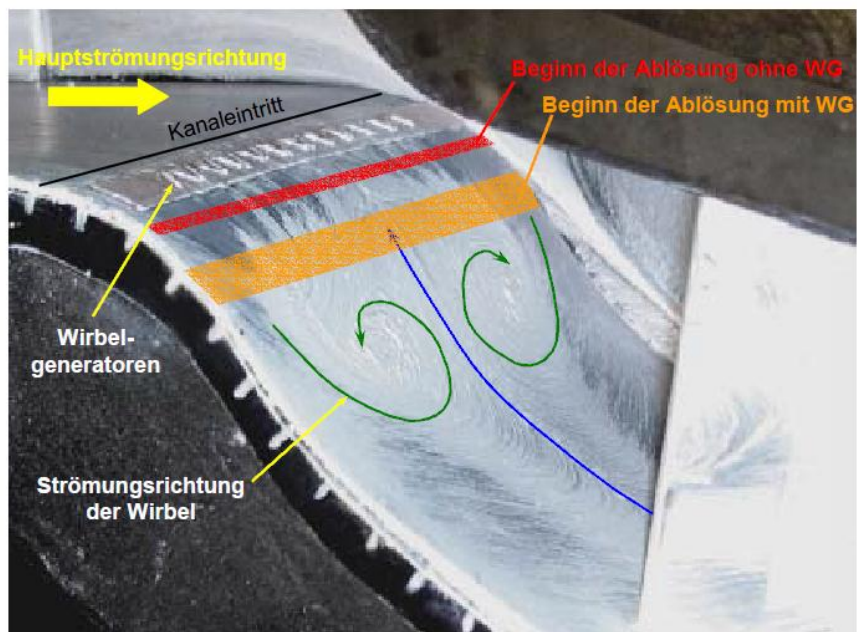


Abbildung A-11: Ölanstrich im 2D-Versuchskanal

A.6 TRANSSONISCHE VERSUCHSTURBINE

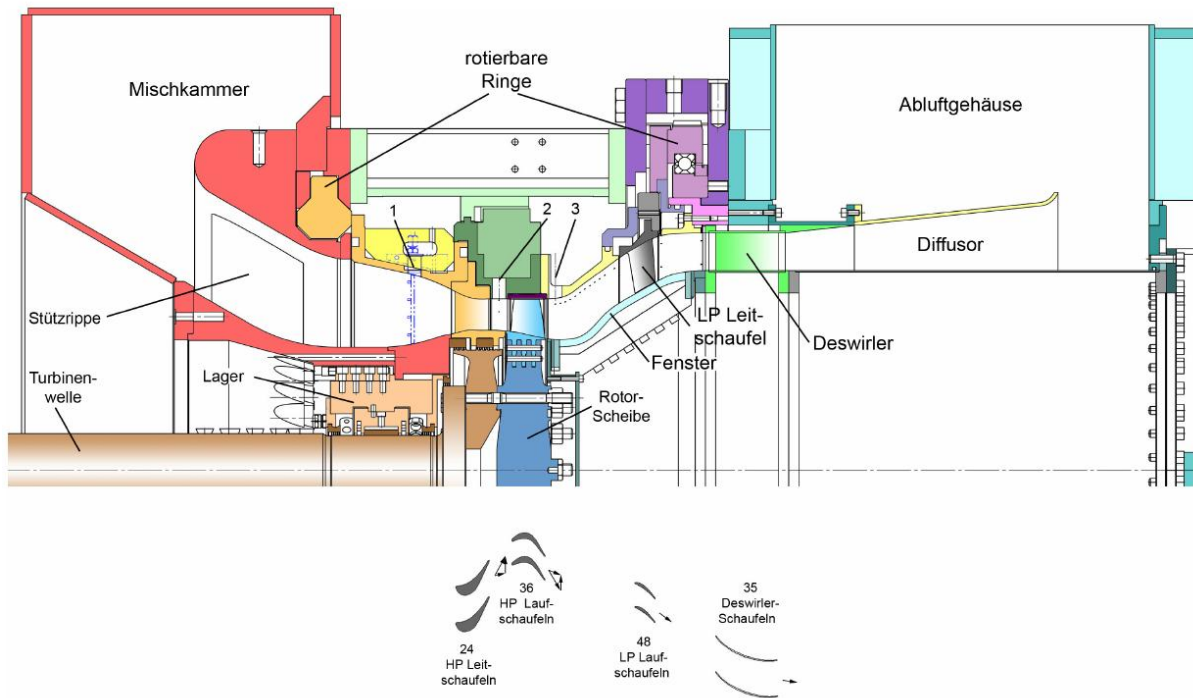


Abbildung A-12: Transsonische Versuchsturbine in der Konfiguration C5  
 [Pan 2008, S. 6]

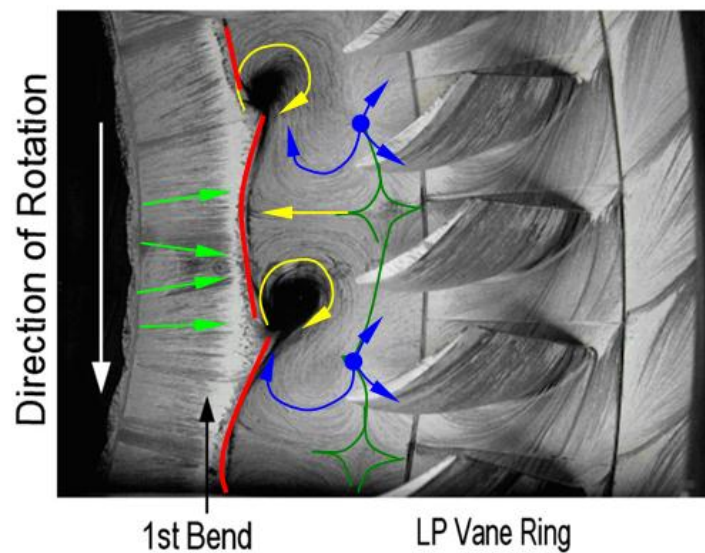


Abbildung A-13: Ölanstrich an der Außenkontur der transsonischen Versuchsturbine in der Konfiguration C5  
 [Marn 2008, S. 138]