



Hitzdrahtuntersuchung der Nachlaufdynamik am D-förmigen Stumpfkörper mit Coanda Aktuation

Nicolai Flemming (4839640), Tilman Langhammer (4875138),
Ahmet Ugur Nergiz (4619022), Maike Wollschläger (4807931)

Projektarbeit

Betreuer: M.Sc Philipp Oswald

Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Rolf Radespiel

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung (T)	7
2 Theoretische Grundlagen	8
2.1 Stumpfkörperaerodynamik (T)	8
2.1.1 Definition stumpfer Körper	8
2.2 Widerstand stumpfer Körper	8
2.2.1 Kármánsche Wirbelstraße	11
2.3 Grundlagen der Spektralanalyse (T)	12
2.4 Coanda-Effekt (A)	12
2.4.1 Definition	12
2.4.2 Die Entstehung des Druckgradienten	13
2.4.3 Ablösung	14
2.4.4 Coanda-Effekt im Alltag	16
2.5 Hitzdrahtmessung (M)	16
2.5.1 Physikalisches Wirkprinzip	17
2.5.2 Kalibrierung	19
3 Kalibrierung (N)	21
3.1 Zielsetzung	21
3.2 Versuchsaufbau	21
3.3 Programmierung	22
3.3.1 LabVIEW Programm	22
3.3.2 Matlab Script	23
3.3.3 Ergebnis	25
3.4 Fehlerabschätzung	26
4 Versuchsaufbau	27
4.1 Windkanal LNB (M)	27
4.2 Halterung der Hitzdrahtsonde (T)	28
4.3 Modell (M)	28
4.4 Einstellung und Vorbereitung des Modells (A)	29
4.5 Verwendete Messtechnik (M)	31
4.6 Programmierung (N)	32
4.7 Testfälle mit zugehörigen Ausblaseparametern (M)	34
5 Auswertung	35
5.1 Umrechnen der Daten (N)	35
5.1.1 Temperaturkorrektur, Mittelwerte und Widerstände	35

INHALTSVERZEICHNIS

5.1.2	Standardabweichung	36
5.1.3	Spektra	37
5.2	Nachlaufdellen und ihre Widerstände (N, M)	38
5.3	Zustand ohne Ausblasung (T)	40
5.4	Konstante Ausblasung (T)	41
5.5	Gepulste Ausblasung	43
5.5.1	Zusammenhang der Auftretenden Frequenzen (N)	43
5.5.2	Minimaler Widerstand (M)	47
5.5.3	Maximaler Widerstand (M)	49
5.5.4	Standardabweichungen (A)	49
6	Fazit [T]	53

Abbildungsverzeichnis

1	Druck- und Reibungswiderstände verschiedener Körper nach [14]	9
2	Kontrollfläche K zur Ermittlung des Widerstandes mittels Impulssatz nach [1] . .	10
3	Kármánsche Wirbelstraße nach [14]	11
4	Strahlumlenkung und Druckgradient (Coanda-Effekt) nach [4]	13
5	Der Druckgradient bei gekrümmten Stromlinien nach [8]	14
6	Ablösungssillustration auf gekrümmten Flächen nach [14]	15
7	Ausblaseneffekt nach [6]	16
8	Ausführung einer einzelnen Hitzdrahtsonde nach [13]	17
9	Aufbau eines Konstant-Temperatur-Anemometers (CTA) nach [13]	18
10	Ausrichten der Hitzdrahtsonde am Kalibrierkanal	21
11	Messkarten Seite des LabVIEW Skripts	22
12	Messrechnerseite des LabVIEW Skripts	23
13	Einstellen des Modells	26
14	Windkanal LNB nach [7]	27
15	Bau der Halterung	28
16	D-förmiger Stumpfkörper im Windkanal	29
17	Einstellen des Modells	30
18	Druckverlauf am Spalt	31
19	Verwendete Messtechnik am LNB	32
20	LabVIEW auf der Messkarte	33
21	LabView Code Ausblasung	33
22	Berechnung der Nachlaufdellen	35
23	Nachlaufdellen im Vergleich	36
24	Beispiel Standardabweichungen	37
25	Verschiedene Spektra-Darstellungen	37
26	Nachlaufdellen 1 Bar	38
27	Nachlaufdellen 2 Bar	39
28	Nachlaufdellen ohne Ausblasung	40
29	Strouhal-Zahlen ohne Ausblasung	41
30	Nachlaufdellen im Vergleich	42
31	Strouhal-Zahlen im Vergleich	42
32	Frequenzen im Vergleich	43
33	Kontur Plots im Vergleich	44
34	Spektrum 1 Bar, 62 Hz Rand	44
35	Spektra im Vergleich	45
36	Contour 1 Bar, 72 Hz	45
37	Ausblasung 83 Hz 1 Bar	46

TABELLENVERZEICHNIS

38	Spektrum mit Frequenzen nahe Null	47
39	Nachlaufdellen 2 Bar	48
40	Standardabweichung mit konstanter Ausblasung 2 Bar	50
41	Nachlaufdelle konst. 2 Bar	52

Tabellenverzeichnis

1	Betriebszustände	34
2	Widerstände von hoch zu niedrig	40
3	Standardabweichung und Geschwindigkeitsdifferenz	50
4	Vergleich Geschwindigkeitsdifferenz und Standard Abweichung	51

Nomenklaturverzeichnis

<i>A</i>	Kalibrierkonstante
<i>B</i>	Kalibrierkonstante
<i>b</i>	Breite
<i>c</i>	Strömungsgeschwindigkeit
<i>c_w</i>	Widerstandsbeiwert
<i>d</i>	Dicke
<i>f</i>	Wirbelablösefrequenz
<i>f_a</i>	Abtastrate
<i>g</i>	Erdbeschleunigung
<i>L</i>	Charakteristische Länge
<i>l</i>	Länge
<i>n</i>	Kalibrierkonstante
<i>p</i>	Druck
<i>Q</i>	Volumenstrom
<i>R</i>	Radius
<i>s</i>	Strecke
<i>Sr</i>	Strouhal-Zahl
<i>T</i>	Periodendauer
<i>T_F</i>	Gegenwärtige Temperatur
<i>T_{F,0}</i>	Ausgangstemperatur
<i>T_S</i>	Sensortemperatur
<i>t</i>	Zeit
<i>U</i>	Heizspannung
<i>U_B</i>	Brückenspannung
<i>U_{B,0}</i>	Brückenspannung der Basiskalibrierung
<i>U_∞</i>	Ungestörte Geschwindigkeit
<i>u</i>	Strömungsgeschwindigkeit
<i>v</i>	Strömungsgeschwindigkeit
<i>W</i>	Widerstand
δ	Dickenverhältnis
λ	Schlankheitsgrad
ρ	Dichte
Ω	Normierte Kreisfrequenz
ω	Kreisfrequenz

1 Einleitung (T)

Die effiziente Nutzung von Energie steht im Mittelpunkt der Technologieentwicklung. Hierzu kann die Aerodynamik einen wichtigen Beitrag leisten, indem mit ihrer Hilfe versucht wird den Strömungswiderstand umströmter Körper zu verringern. Umströmte Körper lassen sich in aerodynamische und stumpfe Körpern aufteilen. Im Folgenden soll eine Betrachtung stumpfer Körper erfolgen.

Der Strömungswiderstand stumpfer Körper ist deutlich höher als derjenige aerodynamisch geformter Körper. Daher kann es zu großen Energieersparnissen kommen, wenn die Aerodynamik stumpfer Körper optimiert wird. Zum Beispiel kann der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs durch Reduktion seines Strömungswiderstandes gesenkt werden.

Besitzt ein stumpfer Körper eine Hinterkante, so ist ein Ansatz zur Verringerung des Widerstandes das Ausblasen von Luft an der Hinterkante des Körpers. Die Grundidee besteht in der Anhebung des Basisdrucks am stumpfen Körper und somit der Verringerung des Druckwiderstandes. Im Experiment, das in dieser Projektarbeit beschrieben wird, wird ein Luftstrahl über eine Coanda-Fläche ausgeblasen, wodurch die Luft hinter der Basis einwärts strömt. Hierdurch lässt sich laut Geropp der Widerstand eines Körpers mit stumpfem Heck um 40% verringern [14].

Ziel der Projektarbeit ist es nicht, erneut nachzuweisen, dass eine Verringerung des Widerstandes durch das Ausblasen von Luft möglich ist. Stattdessen geht es darum, die Dynamik des Nachlaufs mittels Hitzdrahtmessungen bei unterschiedlichen Ausblasefrequenzen zu charakterisieren und ggf. mit einer Widerstandsverminderung in Beziehung zu setzen. Dies verspricht einen Einblick in die verantwortlichen Wirkmechanismen.

Für das Experiment müssen umfangreiche Vorbereitungen wie die Planung einer Halterung mit Traversiermechanismus, die Kalibrierung der Hitzdrahtsonde und die Spalteinstellung am Modell getroffen werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Stumpfkörperaerodynamik (T)

2.1.1 Definition stumpfer Körper

Nach Hucho [14] fällt eine genaue Definition des Begriffes „stumpfer Körper“ schwer. Dies liegt auch daran, dass der Übergang von einem schlanken zu einem stumpfen Körper fließend ist. Qualitativ gelingt eine Abtrennung, wenn stumpfe Körper im Vergleich zu schlanken Körpern als „dick“ bezeichnet werden. „Dick“ bedeutet, dass ihre Querschnittsfläche senkrecht zur Anströmung vergleichbar zur Querschnittsfläche längs der Antströmung ist. Für eine quantitative Einschätzung wurde der sogenannte Schlankheitsgrad λ definiert, der das Verhältnis von Länge zu Dicke darstellt:

$$\lambda = \frac{l}{d} \quad (1)$$

Dessen Kehrwert ist das Dickenverhältnis δ .

2.2 Widerstand stumpfer Körper

Der Extremfall eines stumpfen Körpers ist die quer angeströmte Platte ($\delta \rightarrow \infty$), während die längs angeströmte Platte ($\lambda \rightarrow \infty$) umgekehrt einen maximal schlanken Körper repräsentiert. Die Strömung kann der Kontur einer längs angeströmten Platte problemlos folgen. Dagegen ist die Umströmung eines stumpfen Körpers von Ablösungen geprägt.

Hinter dem stumpfen Körper bildet sich Totwasser aus, in dem die Strömung verwirbelt und reibungsbehaftet ist. Dieses Totwasser wechselwirkt mit der umliegenden Strömung, die an der Hinterkante des stumpfen Körpers abreißt. Zwischen der Strömung und dem Totwasser bildet sich eine Scherschicht. An dieser Scherschicht setzt sich das Fluid im Totwasser in Bewegung, wodurch der Druck an der Basis des Stumpfkörpers abnimmt. Entsprechend überwiegt bei stumpfen Körpern der Druckwiderstand gegenüber dem Reibungswiderstand (vgl. Abbildung 1).

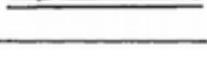
Körper	Widerstand	
	Druck	Reibung
	100%	0%
	90%	10%
	60%	40%
	10%	90%
	0%	100%

Abbildung 1: Druck- und Reibungswiderstände verschiedener Körper nach [14]

Maßnahmen zur Verringerung des Widerstandes

Um den Widerstand stumpfer Körper zu verringern, ist es also naheliegend, den Basisdruck hinter dem stumpfen Körper zu steigern. Hierzu werden in [14] zwei Ansätze vorgestellt. Der erste Ansatz besteht in der Veränderung der Geometrie des stumpfen Körpers. Der zweite Ansatz betrachtet die Beeinflussung der Struktur der Strömung im Totwasser. Dabei lässt sich die Beeinflussung der Struktur der Strömung in aktive und passive Maßnahmen unterscheiden. Bei aktiven Maßnahmen wird im Gegensatz zu passiven Maßnahmen zusätzlich Energie aufgewendet.

In dem Experiment, das in dieser Projektarbeit betrachtet wird, findet eine aktive Beeinflussung der Strömung statt. Hierbei wird ein dünner Luftstrahl an der Hinterkante über eine Coanda-Fläche ausgeblasen. Die Luft wird sowohl konstant, als auch mit verschiedenen Frequenzen ausgeblasen. Aufgrund des Coanda-Effektes wird der Luftstrahl abgelenkt und verkleinert das Totwasser hinter dem Modell. Hierdurch steigt der Basisdruck und der Widerstand des Körpers sinkt. Angesichts der Zielsetzung einer Energieersparnis muss berücksichtigt werden, dass das aktive Ausblasen von Luft Energie benötigt. Daher ist es erstrebenswert, die gewünschte Widerstandsverminderung mit so wenig Ausblasendruck wie möglich zu erreichen.

Berechnung des Widerstandes stumpfer Körper

Der Widerstand eines stumpfen Körpers lässt sich mithilfe des Impulssatzes aus der Form des Nachlaufs berechnen. Der Impulssatz besagt, dass die Impulsänderung aus der Durchströmung der Oberfläche eines Kontrollvolumens gleich der Änderung der an diesem Kontrollvolumen angreifenden Kräfte ist.

Für ein Kontrollvolumen (siehe Abbildung 2), auf dessen Oberfläche der Druck p_∞ der ungestörten Anströmung herrscht, ergibt sich für den Widerstand

$$W = -\rho \int_{(K)} u_1 dQ \quad (2)$$

u_1 ist die x-Komponente der Geschwindigkeit, ρ die Luftdichte und Q der Volumenstrom.

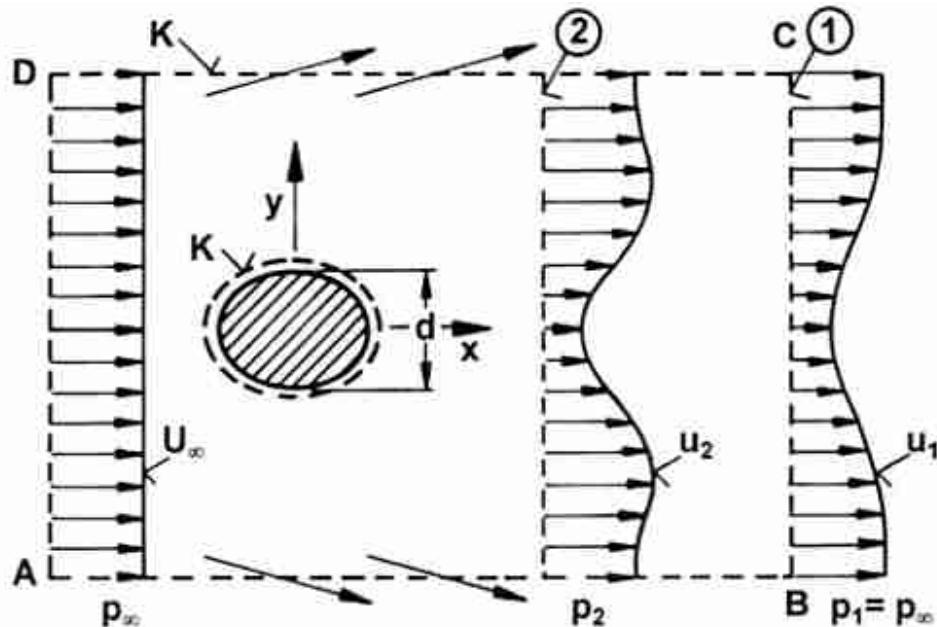


Abbildung 2: Kontrollfläche K zur Ermittlung des Widerstandes mittels Impulssatz nach [1]

Wertet man diese Gleichung für das gezeigte Kontrollvolumen aus, ergibt sich

$$W = -\rho b \int_{(l)} u_1 (U_\infty - u_1) dy \quad (3)$$

Dabei ist b die Breite des Körpers senkrecht zur Zeichenebene und l die Länge des Nachlaufes in y-Richtung.

Für den Widerstandsbeiwert des umströmten Körpers folgt

$$c_W = \frac{W}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 bd} = 2 \int_{(l)} \frac{u_1}{U_\infty} \left(1 - \frac{u_1}{U_\infty}\right) d \frac{y}{d} \quad (4)$$

[1]. Ist die Geschwindigkeitsverteilung $u_1(y)$ im Nachlauf bekannt, lässt sich der c_W -Wert des Körpers ermitteln.

2.2.1 Kármánsche Wirbelstraße

Bei höheren Reynoldszahlen bilden sich hinter einem Zylinder alternierende Wirbel aus, die als Kármánsche Wirbelstraße (Abbildung 3) bezeichnet werden [1]. Oswald et al. [9] haben am Modell, das in dieser Projektarbeit verwendet wird, entsprechende Druckschwankungen festgestellt, die auf eine solche Wirbelanordnung hindeuten.

Die Frequenz, mit der die Wirbel ablösen kann durch die dimensionslose Strouhal-Zahl beschrieben werden.

$$Sr = \frac{fL}{v} \quad (5)$$

Dabei ist f die Wirbelablösfrequenz, L die charakteristische Länge des umströmten Körpers und v die Strömungsgeschwindigkeit. Nach [14] liegt die natürliche Wirbelablösfrequenz stumpfer Körper zwischen 0,2 und 0,3.

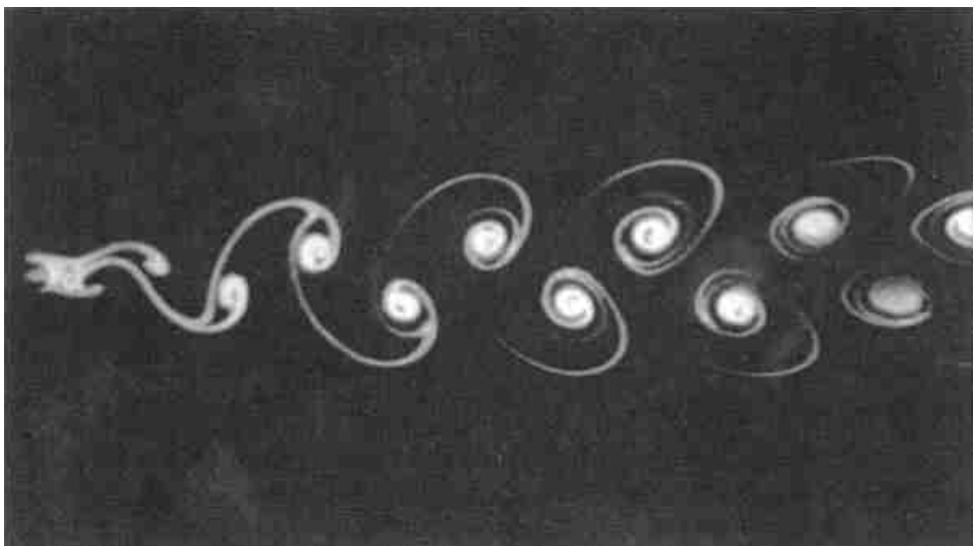


Abbildung 3: Kármánsche Wirbelstraße nach [14]

2.3 Grundlagen der Spektralanalyse (T)

Die Spektralanalyse, die auf der Fourier-Transformation basiert, hat das Ziel aus einem Originalsignal die Frequenzkomponenten zu bestimmen. Die Grundlage der Fourier-Transformation ist, dass sich jedes periodische Signal in eine sinusförmige Grundfrequenz und ihre Harmonischen zerlegen lässt. Die Harmonischen sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz [5].

Nach [10] liegt das Originalsignal häufig in Form eines zeitlich diskreten Signals vor. Dies ist auch in dieser Projektarbeit der Fall, in der die kontinuierliche Spannung an einer Hitzdrahtsonde abgetastet wurde. Hieraus ergibt sich eine Zahlenfolge von Spannungswerten $(x_i)_{(i=1; \dots; n)}$ für jede Position der Hitzdrahtsonde. Um die hauptsächlich vorkommenden Frequenzen dieses zeitdiskreten Signals herauszufinden, wird die im Zeitbereich vorliegende Folge $(x_i)_{(i=1; \dots; n)}$ in die kontinuierliche Spektralfunktion $X(e^{j\Omega})$ transformiert. Diese Transformation ist mathematisch folgendermaßen definiert:

$$X(e^{j\Omega}) = \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} x_i e^{-j\Omega k} \quad (6)$$

ω ist die Kreisfrequenz. Ω ist die durch die Abtastrate $f_a = 1/T$ normierte Kreisfrequenz.

$$\Omega = \frac{\omega}{f_a} = \omega T \quad (7)$$

Für Transformation eines zeitdiskreten Signals mit einem Digitalrechner, muss eine mit einem Digitalrechner auswertbare Transformation definiert werden. Diese Transformation wird als diskrete Fourier-Transformation (DFT) bezeichnet. Für die DFT gibt es eine Vielzahl an Algorithmen, die sich in einen Rechner implementieren lassen. Beispiele sind der Winograd-Algorithmus oder der Primfaktor-Algorithmus. In Matlab wird die DFT mittels einer Fast Fourier Transform (FFT) Algorithmus‘ ausgeführt. Der genaue Aufbau des Algorithmus wird hier nicht weiter besprochen. Siehe dazu Kammeyer et al. [10, Kapitel 6.4].

2.4 Coanda-Effekt (A)

2.4.1 Definition

Der Coanda-Effekt beschreibt das Phänomen, dass ein ausströmender Freistrahl dazu neigt an nahen Wänden zu haften und sogar konvexen Oberflächen zu folgen [4]. Der Strahl besitzt diese Eigenschaft, solange die durch den Druckgradient erzeugte, auf sich wirkende Druckkraft, die Zentripetalkraft, die Zentrifugalkraft kompensieren kann [8].

2.4.2 Die Entstehung des Druckgradienten

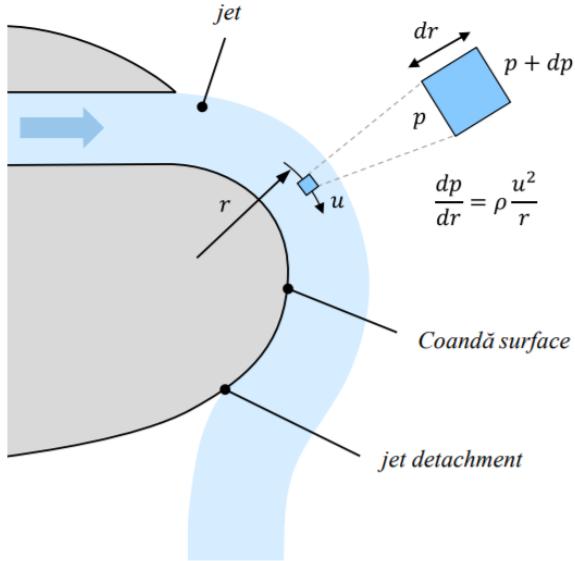


Abbildung 4: Strahlumlenkung und Druckgradient (Coanda-Effekt) nach [4]

Der Druckgradient wird durch den sog. Entrainment-Effekt erzeugt. Der Entrainment-Effekt kann als das Beschleunigen der ruhenden Luft am Randbereich eines Freistrahls bezeichnet werden. Grund hierfür ist der turbulente Impulsaustausch mit den energiereichen Strahlteilchen. Das bedeutet bildlich, dass die Luftteilchen vom Freistahl mitgerissen werden. Wenn eine gerade Wand in den Randbereich eines Freistahl parallel zu diesem gelegt würde, werden die Luftteilchen zwischen dieser Wand und dem Strahl mitgerissen werden. Die Wand verhindert das Nachströmen des Umgebungsmediums, wodurch eine Unterdruckzone zwischen Wand und Freistahl entsteht. Der Strahl wird durch den Unterdruck an die Wand angesaugt. Das ist der Grund weshalb ein Freistahl entlang einer Fläche mit geeigneten gekrümmter Kontur durch ein solches stetige Ansaugen umlenken kann (Abbildung 4)[3].

Die Beziehung zwischen Zentrifugalkraft und Druckkraft kann durch die Eulersche Bewegungsgleichung in Stromlinienkoordinaten beschrieben werden [8].

Die Eulersche Bewegungsgleichung in Bahnkoordinaten lautet [8]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial c}{\partial s} = -g \frac{\partial z}{\partial s} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} \quad (8)$$

Wird im stationären Fall der Einfluss der Schwerkraft vernachlässigt, so lautet die sog. radiale Druckgleichung [8]:

$$\frac{c^2}{R} = -\frac{1}{\rho} \frac{p}{n} \quad (9)$$

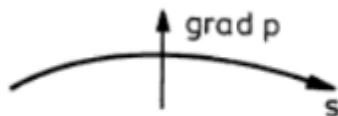


Abbildung 5: Der Druckgradient bei gekrümmten Stromlinien nach [8]

In Abbildung 5 wird veranschaulicht, dass entlang einer Bahnlinie ein positiver von einem konkaven auf ein konvexes Profil gerichteter Druckgradient entsteht. Da die Druckkraft in entgegengesetzte Richtung von der Druckgradient herrscht, ist die Zentripetalkraft gleich nach der Gleichung 9 die negative vorgezeichnete Druckgradient [8].

2.4.3 Ablösung

Um den Effekt der Ausblasung in diesem Projekt zu erläutern, muss zuerst die Ablösung der Grenzschicht erklärt werden. Die Ablösung der Grenzschichten tritt bei längs angeströmten schlanken Körpern nur durch den Reibungswiderstand auf. Der durch die Geometrie gegebene Vorteil von schlanken Körpern führt dazu, dass der Druckanstieg am Heck sehr gering ist. Bei stumpfen Körpern hingegen besteht die Ablösungsgefahr der Grenzschicht, wenn längs der angeströmten Körperkontur der Druckanstieg zu groß ist [6].

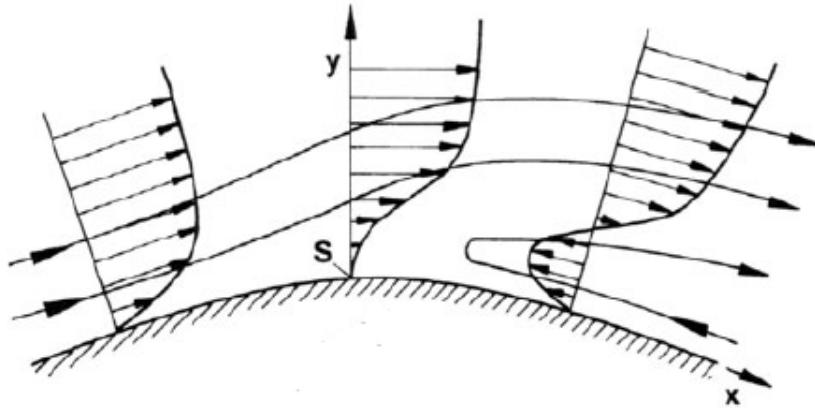


Abbildung 6: Ablösungssillustration auf gekrümmten Flächen nach [14]

An Coanda-Flächen tritt die Ablösung durch den Druckanstieg in Strömungsrichtung entlang der gekrümmten Kontur auf. Hierbei wird die kinetische Energie von diesen Teilchen in Wandnähe infolge von Reibung dissipiert. Aufgrund dessen reicht die kinetische Energie des Fluidteilchens, welches sich in unmittelbaren Wandnähe befindet, nicht mehr aus, um gegen den von der Außenströmung aufgeprägten Druckanstieg entlang der gekrümmten Wand anzuströmen. An einem bestimmten Punkt kommt dieses Teilchen zum Stillstand. Aufgrund der Druckverteilung der Strömung der Grenzschicht, fängt es langsam damit an seine Strömungsrichtung umzukehren (Abbildung 6). An diesem Punkt löst sich die Grenzschicht von der Oberfläche ab [14].

Der Effekt der Ausblasung auf die Ablösung

Die Ausblasung ist eine Möglichkeit der energieschwachen Strömung in Wandnähe Energie zuzuführen. Diese Maßnahme wirkt der Ablösung entgegen. Durch einen Schlitz wird ein Luftstrahl an der Coanda-Fläche parallel zur Hauptströmung eingeblasen. Die von der Profiloberfläche anströmende Grenzschicht von Hauptströmung bildet mit dem zugeführten Strahl eine Scherschicht aus. Damit wird die Scherschicht mit genügend kinetische Energie beladen, um die Ablösung der Strömung zu verhindern (Abbildung 7) [6].

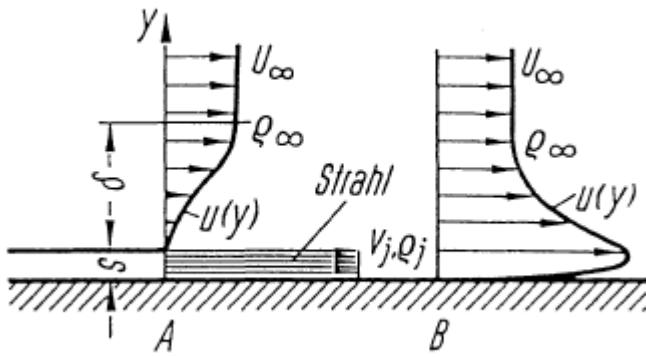


Abbildung 7: Ausblaseneffekt nach [6]

2.4.4 Coanda-Effekt im Alltag

Der Coanda-Effekt ist auch im Alltag zu beobachten, beispielsweise wenn Tee aus einer Teekanne ausgegossen wird. Dabei ist zu erkennen, dass der Tee bei niedrigeren Ausgießwinkeln von der Tülle aus die Kannenoberfläche hinunter bis zur Unterseite der Kanne fließt und sich nicht von der Oberfläche der Kanne ablöst. Sobald der Ausgießwinkel allmählich vergrößert wird, löst sich der Flüssigkeitsstrahl zuerst nur teilweise von der Oberfläche. Wenn sich der Strahl vollständig ablöst, ist eine Umlenkung des Strahles aus der Senkrechten zu beobachten. Wird die Teekanne weiter nach unten gekippt, sodass sich der Durchfluss noch weiter erhöht, erhält man schließlich den erwarteten Fließweg. Hierbei wird diese Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Oberfläche als Coanda-Effekt bezeichnet [2]. Der Coanda-Effekt kann in jeder Art von Flüssigkeiten beobachtet werden und ist zudem für einen Gasstrom ebenfalls wirksam wie für Wasser. Um diesen Effekt bei einem Gasstrom zu sehen, kann ein sich drehender Tischtennisball in einem diagonalen Luftstrahl (wie z.B. ein Föhnstrahl) betrachtet werden. Durch den Coanda-Effekt kann der Ball in der Luft schweben gelassen werden. Hierbei hängt der Ball am unteren Luftstrahl. Durch diesen Effekt wird verhindert, dass der Ball runter fällt. Die entgegen wirkende Gravitationskraft hingegen führt dazu, dass der Ball nicht weggeblasen wird. Außerdem ist der Coanda-Effekt in der Praxis im Flugzeugbau zur Erhöhung des Auftriebes von besonderer Bedeutung.

2.5 Hitzdrahtmessung (M)

Nach „Grundlagen der Strömungsmechanik“ von Franz Durst [13] gehört die Hitzdrahtanemometrie der Gruppe der thermoelektrischen Geschwindigkeitsmessverfahren an. Sie ist eine indirekte Messmethodik, da nicht die Strömungsgeschwindigkeit, sondern die Wärmeabgabe eines erhitzen Drahtes gegenüber dem Strömungsmedium gemessen wird. Mit Hitzdrahtsonden werden schnell veränderliche Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt. Daher sind sie ein

geeignetes Messinstrument, um die Turbulenzen in einer Strömung zu ermitteln.

2.5.1 Physikalisches Wirkprinzip

Der Hitzdraht besteht nach [13] in der Regel aus einem platinierten Wolframdraht, der zwischen zwei Spitzen von zwei Haltestiften aufgespannt wird. Dieser ist mit einem Durchmesser von $5 \mu\text{m}$ und einer Länge von 1-2 mm für seine kurze Reaktionszeit bekannt. Die Drahtenden werden auf die Haltestifte, die in den Keramikkörper eingefügt werden, geschweißt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit den Hitzdraht an den Enden zu verkupfern, beziehungsweise zu vergolden, um die Wärmeleitung zwischen den Haltestiften und dem Draht zu verringern. Eine Darstellung einer einfachen Hitzdrahtsonde zeigt Abbildung 8.

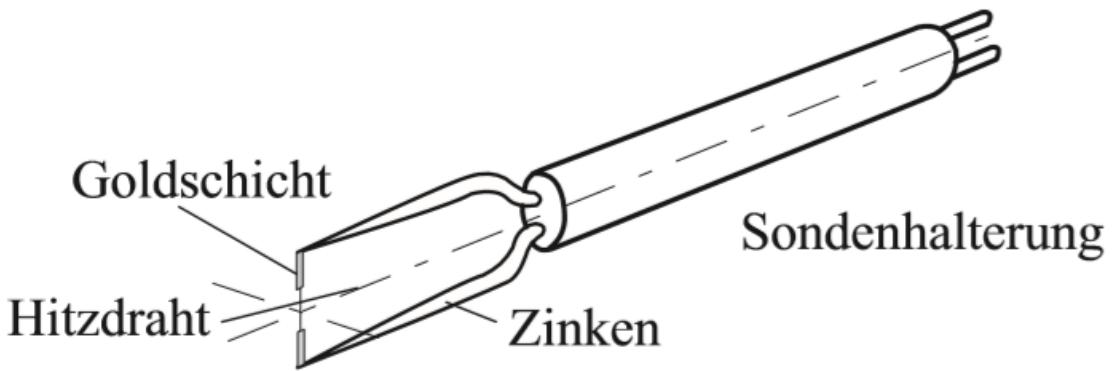


Abbildung 8: Ausführung einer einzelnen Hitzdrahtsonde nach [13]

Die Funktionsweise der Hitzdrahtanemometrie besteht darin, einen kontrolliert erhitzten Draht mittels einer elektrischen Brückenschaltung auf eine Temperatur zu erhitzen, die merklich über der Temperatur des vorliegenden Strömungsmediums liegt. Dadurch wird eine starke Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Geschwindigkeit und eine Verringerung des Einflusses der Temperaturschwankungen des Strömungsmediums erzielt. Als Brückenschaltung wird hierbei meistens die Wheatstone-Brücke verwendet. Diese registriert die durch Geschwindigkeitsänderungen verursachten Temperatur- und damit auch Widerstandsänderungen, wobei Widerstand und Temperatur nahezu linear voneinander abhängen. Es gibt zwei Möglichkeiten die Geschwindigkeit zu messen. Entweder wird der Heizstrom durch den Hitzdraht (CCA, Constant-Current-Anemometer) oder die Temperatur (CTA, Constant-Temperature-Anemometer) konstant gehalten. In unserer Projektarbeit wird die Methode des Konstant-Temperatur Anemometers angewendet. Hierbei stellt die notwendige elektrische Heizspannung, um die Temperatur der Sonde konstant zu halten, ein Maß für die Geschwindigkeit dar.

Die Konstant-Temperatur-Regelung erfolgt unter Ausnutzung einer schnellen elektronischen Signalrückführung, die die Wärmeträgheit der Hitzdrahtsonde ausgleichen soll, siehe Abbildung 9. Für die abgeglichene Wheatstone-Brücke liegt am Eingang des Servoverstärkers keine Differenz-Spannung an. Die Temperatur- und somit Widerstandsänderungen der Sonde verursachen hingegen diese Differenz-Spannungen am Servoverstärkereingang. Durch die Rückkopplung des Servoverstärkerausgangs mit dem Brückenoberteil wird die Brücke selbsttätig abgeglichen. Ein Signal wird erzeugt, das kaum von der Wärmeträgheit der Sonde abhängt. Dabei wird die Grenzfrequenz hauptsächlich durch den Frequenzgang des Rückführungsverstärkers angegeben.

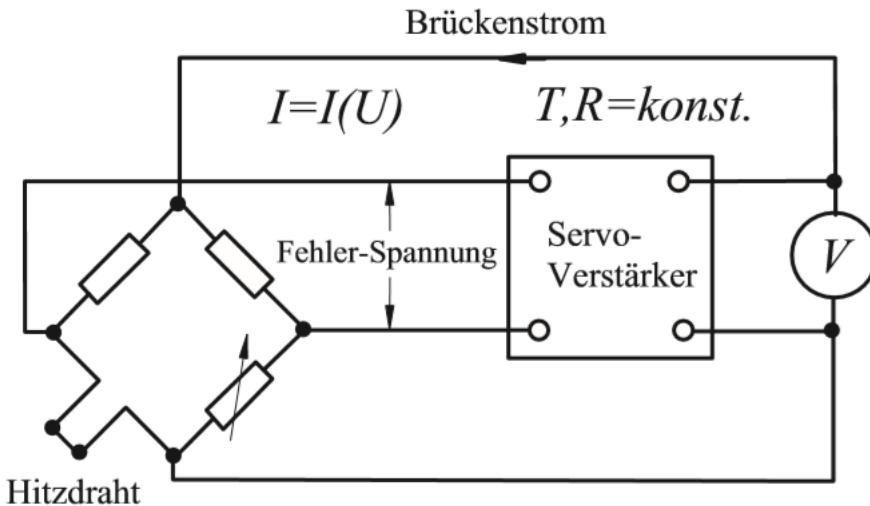


Abbildung 9: Aufbau eines Konstant-Temperatur-Anemometers (CTA) nach [13]

Die Wärmeabgabe des Drahtes hängt nicht nur von der Geschwindigkeit des Strömungsmediums, sondern auch von der Differenz der Strömungs- und Hitzdrahttemperaturen ab. Zur Korrektur dieses Temperatureinflusses wendet man laut [12] folgende Korrekturformel an, die durch die anfallende Brückenspannung U_B , der Sensortemperatur T_S , der Basiskalibrierung $U_{B,0}$ und einer Ausgangstemperatur $T_{F,0}$ die gegenwärtige Temperatur T_F berechnet:

$$U_B^2 = U_{B,0}^2 \times \frac{T_S - T_F}{T_S - T_{F,0}} \quad (10)$$

Ferner beeinflussen nach [13] die physikalischen Eigenschaften, die Abmessungen des Drahtes und die Gestaltung der Hitzdrahthalterungen den Wärmehaushalt. Insofern die eben aufgeführ-

ten Parameter konstant gehalten werden, steht die erforderliche Heizspannung direkt in Verbindung mit der am Draht anliegenden Strömungsgeschwindigkeit.

Als Vorteile der Konstant-Temperatur-Regelung sind die vielfältigen Einsatzbereiche und die hohen Arbeitstemperaturen des Hitzdrahtes zu nennen, wodurch eine hohe zeitliche Auflösung von Geschwindigkeitsveränderungen erreicht wird. Im Vergleich zur CCA lassen sich nach [11] weitere Vorteile der CTA herausstellen. Zum einen ist die Empfindlichkeit des Messwertes gegenüber Veränderungen der Geschwindigkeit des Strömungsmediums größer und die Trägheit der Hitzdrahtsonde wird durch die Rückkopplung vereinzelt besser ausgeglichen. Zum anderen kann die CTA auch bei instationären Strömungen mit großen Geschwindigkeitsschwankungen angewandt werden. Bei einer plötzlichen Verringerung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit besteht zudem nicht die Gefahr, dass der Hitzdraht durchbrennt.

Ein Nachteil der CTA im Vergleich zum CCA besteht in der höheren relativen Rauschläutstärke. Dieser schränkt das Auflösungsvermögen der Amplitude stark ein. Ebenfalls ist der messtechnische Aufbau wesentlich anspruchsvoller und bei falscher Bedienung können freie gedämpfte oder auch freie ungedämpfte Schwingungen auftreten. Diese Schwingungen können Messfehler hervorrufen und für die freie ungedämpfte Schwingung besteht die Möglichkeit des Durchbrennens der Hitzdrahtsonde. Nach [13] lässt sich für Konstant-Temperatur-Regelung noch der Nachteil des instabilen Verhaltens des Servoverstärkers in Grenzfällen festhalten. Des Weiteren ist bei der Verwendung von einfachen Hitzdrahtsonden eine Unterscheidung der Strömungsrichtung nicht möglich.

2.5.2 Kalibrierung

Es besteht nach [13] die Möglichkeit durch die Bestimmung des Wärmeverlustes bei Hitzdrähten den Geschwindigkeitsverlauf aus den Messdaten ohne Eichung zu folgern. Dazu ist eine genaue Angabe der geometrischen Abmessungen des Messfühlers und der Betriebswerte des Messapparats erforderlich. Da die Genauigkeit der Kenntnisse der Einflussgrößen von Hitzdrahtsonden nur unzureichend ist, wird eine Kalibrierung im Eichkanal bevorzugt.

Die Sonde wird hierfür in einem Luftstrom niedrigen Turbulenzgrades mit bekannter und veränderlicher Geschwindigkeit positioniert und die Anemometer Ausgangsspannung mit der zugehörigen Geschwindigkeit dokumentiert. Dabei ist zu beachten, dass die Sonde unmittelbar oder kurz hinter der Öffnung des Eichkanals entgegen der Strömungsrichtung ausgerichtet wird. Für den entsprechenden Geschwindigkeitsbereich wird anschließend die Kalibrierung bei möglichst vielen Geschwindigkeitspunkten vorgenommen.

In „Strömungsmesstechnik 2“ von Nitsche und Brunn [12] wird ein Ansatz für die Bestimmung der statischen Eichkurve vorgestellt. Durch das Auftragen der Anemometer Ausgangsspannung über die Geschwindigkeit erhält man die statische Eichkurve, die einen nicht-linearen Zusammenhang aufweist. Diese Abhängigkeit kann für den vorgesehenen Geschwindigkeitsbereich durch das Kingsche Gesetz abgebildet werden:

$$U^2 = A + B * u^n \quad (11)$$

Das Kingsche Gesetz stellt einen einfachen Zusammenhang zwischen der Heizspannung U und der Strömungsgeschwindigkeit u dar, wobei A, B und n Kalibrierkonstanten sind und durch die abgenommenen Messdaten bestimmt werden können. Die Kalibrierkonstante n beträgt dabei in Näherung $n=0,5$.

Die Werte für die Kalibrierkonstanten können numerisch ermittelt werden, indem diese statischen Eichkurven durch eine Polynomapproximation dargestellt werden. Die Polynomapproximation liefert über den gesamten Messbereich eine recht zuverlässige Genauigkeit. Die gleichbleibend gute Genauigkeit ist insbesondere bei der Kalibrierung von Hitzdrähten von großer Bedeutung, damit in den nachfolgenden Experimenten keine deutlichen Abweichungen zwischen tatsächlicher und gemessener Strömungsgeschwindigkeit auftreten.

3 Kalibrierung (N)

3.1 Zielsetzung

Das Ziel der Kalibrierung ist es zwei unterschiedliche Hitzdrahtsonden, eine mit $3,35\Omega$ und eine mit $3,5\Omega$ Widerstand zu kalibrieren. Um die Kalibrierfunktion zu bestimmen, wird jeweils eine Messreihe im Kalibrierkanal aufgenommen, bei der die Spannung der Messbrücke bei bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten gemessen wird. Auf diesen Datensatz soll dann eine Funktion gefittet und so eine Kalibrierfunktion erstellt werden. Das fitting soll so genau wie möglich den Datensatz darstellen. Kalibriert wird zwischen 5 m/s und 40 m/s, da für das Experiment im Windkanal mit Geschwindigkeiten in dieser Größenordnung zu rechnen ist. Die Abtastrate der Aufnahmeprogramme soll bei ca 1 kHz liegen, da im Messbetrieb mit Frequenzen von ca 70-80 Hz zu rechnen ist.

3.2 Versuchsaufbau

Die 2 Messreihen werden nacheinander am Kalibrierwindkanal des IFAS gemessen. Hierzu wird die Sonde in eine Hitzdrahtsondenhalterung eingespannt und mittels einer Aluprofil Konstruktion im Kernstrahl des Kanals platziert.



Abbildung 10: Ausrichten der Hitzdrahtsonde am Kalibrierkanal

Die Hitzdrahtsonde wird mittig und schlüssig mit dem Kanalausgang platziert um eine möglichst konstante Anströmung zu erreichen (siehe Kapitel 2.5.2). Zur genauen Ausrichtung wird ein Laser verwendet, zu sehen in Abbildung 10.

Bei den Hitzdrahtsonden handelt es sich um 2 Sonden der Firma Dantec Dynamics.

Die Hitzdrahtsonde wird mit einer passenden Messbrücke verbunden, welche mittels einer Wheatstoneschen Brücke, die Widerstandsänderungen am Hitzdraht aufgrund des konvektiven Wärmetransports in ein messbare Spannung umwandelt (siehe 2.5.1). Die Messbrücke wird vor der Kalibrierung mit den Kabelwiderständen und Hitzdrahtwiderständen ausbalanciert. Die von der Messbrücke ausgegebenen Spannungen werden dann an ein Compact Reconfigurable Input/Output Modul (cRIO), dem cRIO NI9067 von National Instruments, weitergegeben und dort mit einem LabVIEW Programm aufgenommen. Die Daten werden von dort aus dann an den Messrechner weitergegeben und abgespeichert.

3.3 Programmierung

Das Programm zur Kalibrierung der Hitzdrahtsonde ist in zwei Einzelprogramme unterteilt. Ein LabVIEW Programm, das nur die Spannungen, Geschwindigkeiten und Parameter aufnehmen soll und ein Matlab Skript, das die aufgenommenen Daten zur Kalibrierfunktion verarbeitet.

3.3.1 LabVIEW Programm

Das LabVIEW Programm ist in 2 Virtual Instruments (VI) unterteilt. Das erste VI läuft auf dem cRIO und das zweite auf dem Messrechner. Die Aufgabe des Programms auf der cRIO Seite (Abbildung 11) ist es die von der Messbrücke ausgegebenen Spannungen mit einer Abtastrate von 1 kHz für jeweils 10 Sekunden aufzunehmen und in einem Array abzulegen. Die gezeigte Schleife, die dafür benutzt wird ist Null basiert, liefert über die 10 Sekunden also 10 001 Werte. Nach Ablauf der 10 Sekunden zeigt das Skript die gemessenen Daten als Waveform Chart zur optischen Überprüfung an und schickt das Array per LAN-Verbindung an den Messrechner. Eine Echtzeit-Übertragung an den Messrechner ist wegen einer zu geringen Datenrate nicht möglich.

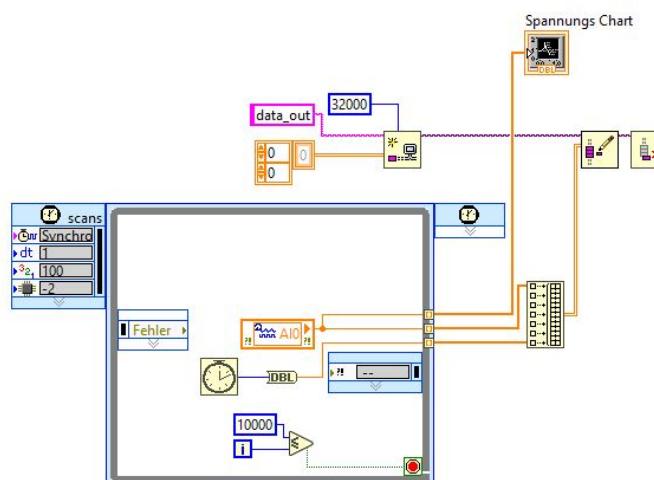


Abbildung 11: Messkarten Seite des LabVIEW Skripts

Das VI auf der Messrechnerseite (Abbildung 12) empfängt das Array und bietet die Möglichkeit, die für die Kalibrierung erforderliche Raumtemperatur und Kanalgeschwindigkeit einzugeben. Das Overheat-Ratio wird direkt im Skript als Konstante verankert, da sie während der Kalibrierung nicht variabel ist. Zusätzlich kann ein Speicherpfad und ein Name für den gerade gemessenen Datensatz eingegeben werden. Alle eingegebenen Variablen und Konstanten werden dann zusammen von einem integrierten Matlab Skript-Block in ein Matlab (.mat) Dateiformat formatiert und abgespeichert. So soll sichergestellt werden, dass alle benötigten Daten und Parameter in einem Format zentral gesichert sind.

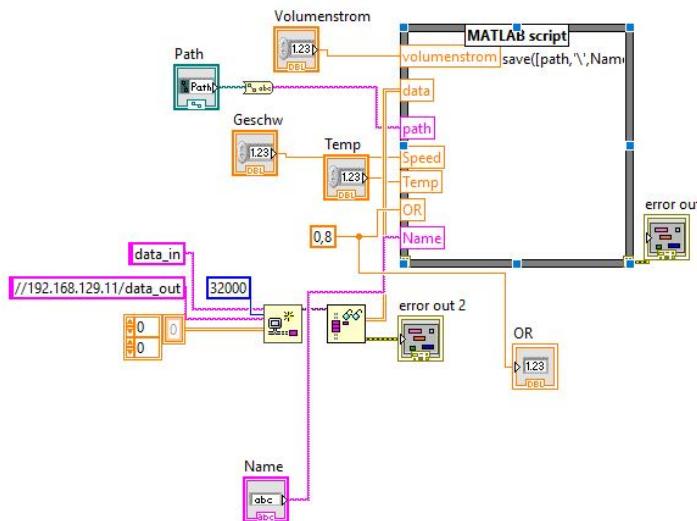


Abbildung 12: Messrechnerseite des LabVIEW Skripts

3.3.2 Matlab Script

Das Matlab Skript (siehe Anhang) soll die von dem LabVIEW Skript bereitgestellten Daten einlesen, verarbeiten und die Kalibrierkurve auf den entstandenen Datensatz anpassen. Dazu erstellt es eine Liste mit allen Dateien in dem ausgewählten Ordner und reserviert Speicherplatz, um später die Daten einzulesen.

```

1 folder = uigetdir(); % Auswahl Datenschreiberort
2 files = dir([folder, '\*.mat']); % Struct mit file-Namen
3 Values = zeros(180,3); % Speicherzuweisung
4 ydata = zeros(36,1); % Speicherzuweisung
5 xdata = zeros(36,1); % Speicherzuweisung
6

```

Listing 1: Laden des Speicherorts

Dann öffnet es alle Dateien nacheinander und speichert die gemittelten Spannungen, Raumtemperatur und zugehörige Geschwindigkeit in einem Array ab. Dieses Array (Values) wird

dann aufsteigend nach den Geschwindigkeiten sortiert und die Spannungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit als rote Kreise geplottet.

```

1  for i=1: length(files)
2    load([folder, '\', files(i).name]) % Lädt files
3    Values(i,1) = mean(data(1,:)); % schreibt Spannungen
4    Values(i,2) = Speed; % Schreibt Geschwindigkeit
5    Values(i,3) = Temp; % Schreibt Temperatur
6  end
7
8  [~, idx] = sort(Values(:,2)); % Erstellt Indizes
9  Sorted = Values(idx,:); % Sortiert nach Indizes
10
11 plot(Sorted(:,2), Sorted(:,1), 'ro') % Plottet Sorted
12 axis([0 45 1.7 2.6]) % Achsenbemaßung
13

```

Listing 2: Speichern, sortieren und visualisieren

Da immer 5 Werte bei gleicher Geschwindigkeit vorhanden sind, bildet das Skript als nächstes den Mittelwert aller bei einer Geschwindigkeit gemessenen Spannungen und speichert sie in einem neuen Array ab (ydata). Zusätzlich wird jeder Geschwindigkeitswert einmal in einem 2. Array abgespeichert (xdata). Zur Überprüfung werden xdata und ydata nochmal in das schon vorhandene Plot als blaue Punkte gezeichnet.

```

1  for i=1 : 36 % Mittelwert 5 Spannungen
2    if i == 1
3      ydata(i) = mean(Sorted(1:5,1));
4    else
5      ydata(i) = mean(Sorted((i-1)*5+1:i*5,1));
6    end
7  end
8
9  for i=1 : 36 % Geschwindigkeiten in xdata
10   xdata(i) = Sorted(i*5,2);
11 end
12
13 plot(xdata, ydata, 'b.') % Plottet xdata und ydata
14

```

Listing 3: Mittelwertbildung

Um die Kalibrierfunktion auf die Daten anzupassen, wird die lsqcurvefit Funktion der Matlab Optimization Toolbox verwendet. Diese nimmt eine auf dem King'schen Gesetz basierende Funktion (siehe Kapitel 2.5.2) mit eingepassten Parametern, ein Array mit vermuteten Anfangsparametern (param0) und unsere x (xdata) und y (ydata) Daten entgegen. Die Parameter

werden dann mittels linearer Regression so optimiert, dass die Abweichung zu unserem vorhandenen Datensatz minimiert wird. Nach der Optimierung gibt die Funktion ein Array mit den optimierten Parametern aus (param).

```

1 param0 = [0, 0, 0.45]; % Array mit vermuteten Anfangsparametern
2 fun = @(param, x) sqrt(param(1) + param(2) * x.^param(3)); % Funktion
3 param = lsqcurvefit(fun, param0, xdata, ydata); % Optimieren
4

```

Listing 4: Curvefitting

Diese werden dann in eine Funktion (voltage) eingesetzt, die wieder das King'sche Gesetz als Grundlage nimmt und so eine Funktion entsteht, die die Volt Zahlen bei bestimmten Geschwindigkeiten errechnen kann. Zur optischen Überprüfung wird diese Funktion mit den schon gemessenen Geschwindigkeiten (xdata) in das schon vorhandene Plot gezeichnet.

```

1 function v = voltage(param, x) % Funktion V(u)
2 v = sqrt(param(1) + param(2)*x.^ param(3));
3 end
4
5 Volt = voltage(param, xdata); % Berechnen der Spannungen anhand der
       % neuen Funktion mit den berechneten Parametern
6 plot(xdata, Volt, 'r')
7

```

Listing 5: Funktion erstellen und Testen

Die Inverse dieser Funktion ist die eigentlich gesuchte Kalibrierfunktion (speed), die die Geschwindigkeit bei gegebenen Spannungen berechnet. Diese wird als eigene Funktion abgespeichert und später zu Berechnung der Geschwindigkeiten am Modell verwendet. Als letztes wird die Inverse nochmal in ein neues Plot gezeichnet.

```

1 function u = speed(param, x) % Funktion u(V)
2 u = ((x.^2) + (-1)* param(1))/param(2).^(1/param(3));
3 end
4
5 speed_calc = speed(param, ydata); % Berechnen der Geschwindigkeiten
       % aus den gemessenen Spannungen mithilfe der invertierten Funktion
6 plot(ydata, speed_calc)
7

```

Listing 6: Inverse Funktion

3.3.3 Ergebnis

Nachdem alle oben beschriebenen Programme ausgeführt wurden erhält man zwei Funktionen. Die erste Funktion gibt die Voltzahlen für bestimmte Geschwindigkeiten wieder ($V(u)$) und ist

das Ergebnis des ersten fittings über den Kalibrierdatensatz (siehe Abbildung 13a). Die zweite Funktion ist wie oben schon erwähnt die Inverse dieser Funktion und gibt die eigentliche Kalibrierfunktion wieder. Sie kann für mit dem Hitzdraht gemessene Spannungen einen Geschwindigkeitswert wiedergeben($u(V)$) (siehe Abbildung 13b).

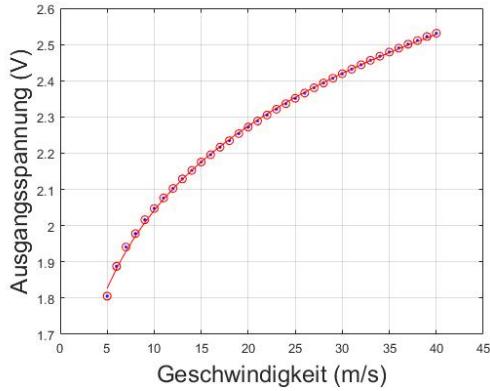
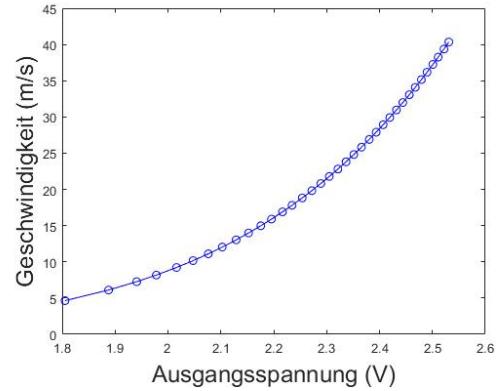

 (a) Kalibrierkurven Fit $V(u)$

 (b) Kalibrierkurve $u(V)$

Abbildung 13: Einstellen des Modells

3.4 Fehlerabschätzung

Verschiebungen von 10 cm in den Kanal, gemessen vom Kanalausgang, sowie 10 cm aus dem Kanal heraus ergeben nur kleine Änderungen der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit von weniger als 1%. Daher wurde beschlossen den Hitzdraht direkt am Kanalausgang zu positionieren. Kleine Änderungen des Anströmwinkels ($<1^\circ$) ergaben Änderungen kleiner 1%. Es wurde darauf geachtet die Sonde immer möglichst im rechten Winkel zur Strömung zu platzieren.

Um die Qualität der gefitteten Kurve einschätzen zu können, wurde die Standardabweichung zwischen gefitterter Kurve und tatsächlichem Geschwindigkeitsverlauf ermittelt. Hierzu wird die Differenz der von der kalibrierten Funktion errechneten Geschwindigkeit und der im Kalibrierungs Datensatz festgesetzten Geschwindigkeit berechnet und die Standardabweichung dieser Differenzen gebildet. Für die von uns verwendete Kurve erreicht so einen Wert von 0,1804, was als ausreichend bewertet wird.

4 Versuchsaufbau

4.1 Windkanal LNB (M)

Das Experiment am D-förmigen Stumpfkörper für die Projektarbeit wird im Leiser Niedergeschwindigkeits Windkanal Braunschweig (LNB) am Institut für Strömungsmechanik durchgeführt. Die Abbildung 14 zeigt einen schematischen Aufbau des Windkanals.

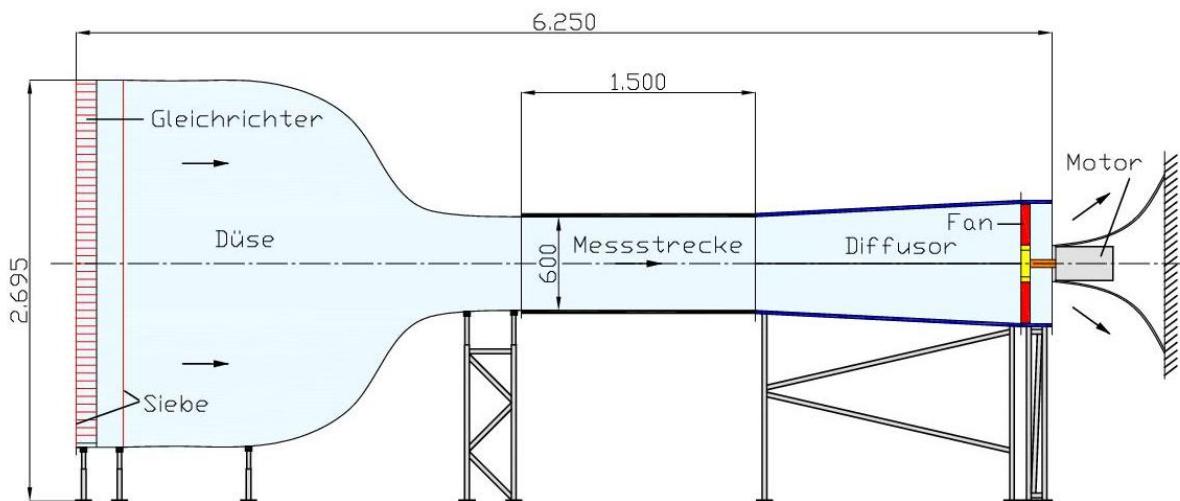


Abbildung 14: Windkanal LNB nach [7]

Der LNB ist nach [7] ein kontinuierlicher, atmosphärischer Windkanal nach Eiffel-Bauart mit einer geschlossenen Messstrecke, wobei eine Raumrückführung der Luft ermöglicht wird. Dieser besitzt eine Lagerung aus Gummiklötzten auf einem Stahlgestell, damit Vibrationen reduziert werden können. Motor und Fan sind dabei vom übrigen Teil des Windkanals abgesondert. Der Windkanal wird mit einer Leistung von 3 kW angetrieben und erreicht eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 19 m/s. Die Düse, der Diffusor und die Motoraufhängung bestehen aus einer glasfaserverstärkten Kunststoffbauweise.

Die Düse nach Börger-Bauart hat eine rechteckige Form und besitzt ein Kontraktionsverhältnis von 16:1. Die Luft strömt zunächst durch eine 30 mm dicke Vliesmatte und durch Aluminiumwaben mit einer Tiefe von 133 mm und einem mittleren Durchmesser der Waben von 14 mm. Um Turbulenzen zu minimieren, fließt die Luft anschließend noch durch ein engmaschiges Sieb. Der Turbulenzgrad liegt unter 0,1% bei 10 m/s.

Die Messtrecke besitzt eine Länge von 1500 mm, eine Breite von 400 mm und eine Höhe von 600 mm. Mit einem Flügelradanemometer werden die Geschwindigkeiten in diesem Abschnitt ermittelt, wobei sich die Abweichungen bezüglich der Geschwindigkeit in der Messstrecke hierbei auf 1% bei 10 m/s belaufen.

4.2 Halterung der Hitzdrahtsonde (T)

Während die Halterung für die Hitzdrahtsonde am Kalibrierwindkanal bereits vorhanden war, musste die Halterung am LNB noch gebaut werden. Sie soll gewährleisten, dass die Hitzdrahtsonde im Windkanal vertikal traversiert werden kann. Bei einer vorherigen Messung mittels eines Nachlaufrechens wurden etwa 200 mm Breite der Nachlaufdelle gemessen. Dabei war der Nachlaufrechen wenige Zentimeter stromabwärts hinter dem Modell platziert. Die zur Verfügung stehende Traverse erreicht einen Verfahrweg von 184 mm. Die Halterung wird auf dem Windkanal montiert. Durch ein Loch in der Deckenplatte des Windkanals ist die Hitzdrahtsonde über eine Stange mit der Traverse verbunden.

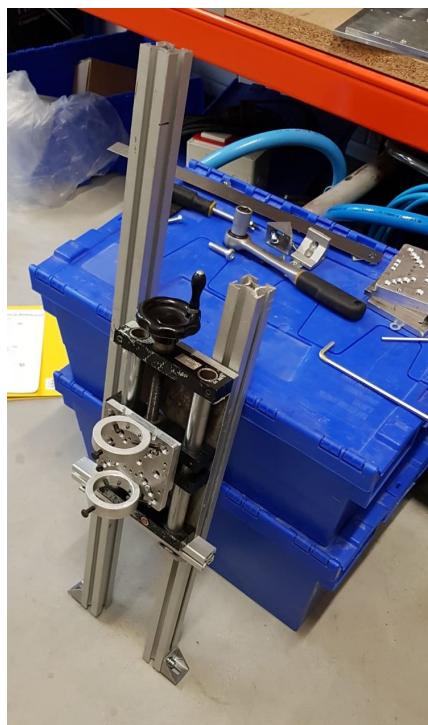


Abbildung 15: Bau der Halterung

4.3 Modell (M)

Der für diese Projektarbeit verwendete D-förmige Stumpfkörper mit einer stumpfen Hinterkante ist nach [9] 190,6 mm lang, 390 mm breit und 53,4 mm hoch. Am stumpfen Teil des Modells sind Coanda-Flächen mit einer runden Form und einem Radius von 9,4 mm befestigt. Der

Stumpfkörper wird horizontal im Windkanal positioniert. Dieser erstreckt sich über die gesamte Breite der Messstrecke und wird von einem Stahlrohr auf jeder Seite festgehalten. Dabei wird die Strömung im Bereich der Kanalmitte als zweidimensional angenommen. Die Abbildung 16 zeigt den D-förmigen Stumpfkörper im Windkanal sowie die Hitzdrahtsonde in ihrer Halterung.



Abbildung 16: D-förmiger Stumpfkörper im Windkanal

An der Hinterkante verfügt der Stumpfkörper über zwei Ausblaseschlitze. Über Schnellschaltventile wird die Ausblasung ein- und ausgeschaltet. Eine Schlitzhöhe von 0,2 mm wird mit einer Fühlerlehre vorab geprüft und mit Hilfe einer Fischmaulsonde wird der Schlitz auf gleichmäßige Ausblasung hin überprüft, siehe Abschnitt 4.4.

Zur genauen Ausrichtung des eingebauten Modells im Kanal werden mit eingeschaltetem Windkanal die statischen Drücke von der Ober- und Unterseite über Druckbohrungen abgenommen und miteinander verglichen. Gegebenenfalls wird anschließend die Modellnase neu ausgerichtet.

4.4 Einstellung und Vorbereitung des Modells (A)

Vor dem Einbau des Modells im Windkanal wurde es für das Experiment vorbereitet. Zuerst wurden die Coanda-Flächen und die Luftschlitzte gereinigt. Anschließend wurde die Druckver-

teilung entlang der Coanda-Flächen, die sich an der Ober- und Unterkante der Modellrückseite befinden, möglichst konstant und gleichmäßig eingestellt. Zur Messung der dynamischen Druckverteilung entlang der Coanda-Flächen wurde eine Fischmaulsonde verwendet. Durch eine gleichmäßige Druckverteilung wird hier ein gleichförmiger Luftstrahl aus den Schlitten und in deren Folge möglichst zweidimensionale Strömung erzeugt. Um die empfindliche Einstellung bestmöglich durchzuführen, wurde das Modell im Vorbereitungsraum des ISM mit einem festen Tisch und einer Traverse verbunden. Die aufgebaute Einrichtung ist in Abbildung 17a zu sehen.

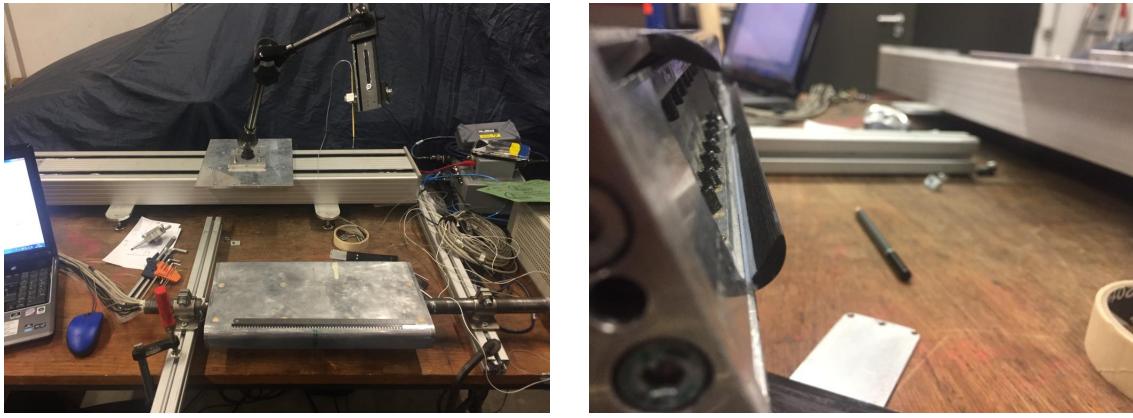


Abbildung 17: Einstellen des Modells

Für eine optimale Messgenauigkeit der Fischmaulsonde wurde die Parallelität zwischen dem Modell und der Traverse entlang der Querachse mit einer empfindlichen Messuhr überprüft und eingestellt. Abgesehen davon bleibt der Abstand zwischen Fischmaulsonde und Schlitz während des ganzen Messprozesses nicht gleich und die Messwerte könnten kontinuierlich abweichen. Die unerwünschten Ausreißer im Druckverlauf wurden anschließend durch eine erneute Justierung der 16 Einstellschrauben im Inneren der Modellhinterseite korrigiert und schließlich beseitigt (siehe Abbildung 17b). Hierbei waren insbesondere zwei Punkte zu beachten: Zum einen sind im Modell für jeden Schlitz insgesamt vier Luftpäckchen vorhanden, von denen die erste und die dritte bzw. die zweite und die vierte Kammer jeweils miteinander verbunden sind. Das bedeutet aus einer Druckminderung in einer Kammer resultiert eine Druckerhöhung in der mit ihr verbundenen. Zum anderen müssen die Maße der beiden Schlitte sehr ähnlich sein, damit der Volumenstrom durch beide Schlitte möglichst gleich ist. Für die angestrebte Breite der Spalte wurde ein Wert von 0,2 mm festgelegt. Auf den Coanda-Flächen wurde für 31 verschiedene Punkte der dynamische Druck gemessen und für jeden Punkt wurden 2000 Werte aus der Fischmaulsonde im Rechner abgespeichert. Die Durchschnittswerte dieser Messdaten wurden zudem geplottet. Die Zielsetzung der Messung war es die Schlitte so einzustellen, dass alle Durchschnittswerte nicht mehr als 10% vom Mittelwert der Messreihe abweichen. Beispielsweise ist der Endzustand des Druckverlaufes für den Oberschlitz in Abbildung 18 zu sehen.

Obwohl die Werte an den Seitenkanten vom 10%-Toleranzbereich etwas abweichen, bleiben die Werte im relevanten Mittelteil der Coanda-Fläche, bis auf eine Ausnahme, in dem angestrebt 10%-Toleranzbereich. Mithilfe der Plenumsdrücke in den Luftkammern des Modells wurde die Einstellung der Spalte final überprüft.

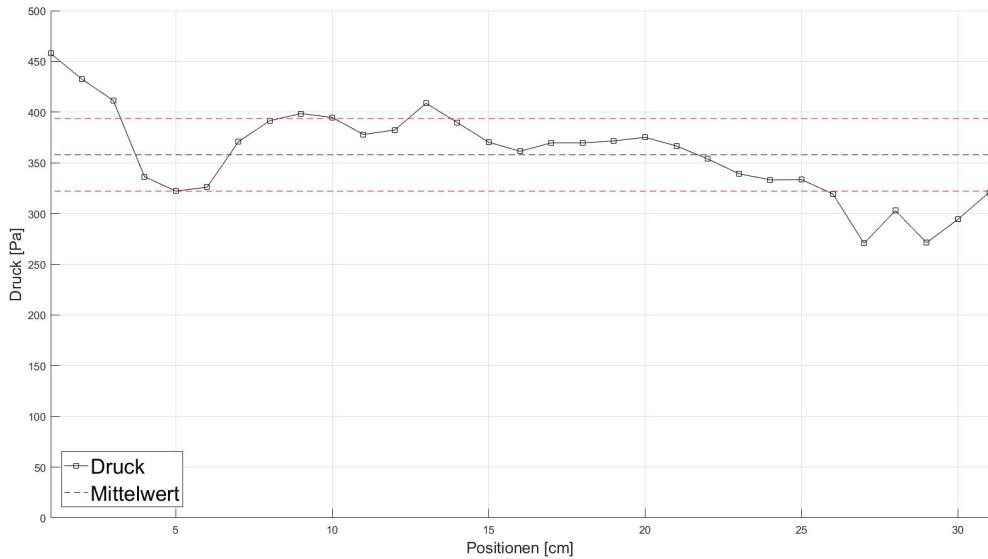


Abbildung 18: Druckverlauf am Spalt

Nachdem das Modell im Windkanal platziert wurde, musste der Druck an der oberen und unteren Seite des Modells möglichst gleich eingestellt werden, um im Windkanal eine gleichmäßige Strömung um das Modell herum sicher zu stellen. Dafür wurden die statischen Drücke von beiden Seiten betrachtet. Durch das Kippen der Modellnase im Windkanal unter genügender Windstärke wurden die statischen Drücke angeglichen. Nach diesen Einstellungen kann angenommen werden, dass der Einfluss der Einstellungsabweichungen auf die Geschwindigkeitsmessung mit Hitzdrahtsonde gering sein wird. Trotzdem müssen sie weiterhin als Messfehler berücksichtigt werden.

4.5 Verwendete Messtechnik (M)

Zur Aufnahme der Messungen wird der D-förmige Stumpfkörper und die Hitzdrahtsonde in den Windkanal eingebaut. Die Hitzdrahtsonde wird im Windkanal mit einem Abstand von ungefähr 250 mm stromabwärts zum Stumpfkörper platziert.

Der D-förmige Stumpfkörper wird über einen Drucktank und über ein Volumenstrommessgerät an die Luftruckleitung angeschlossen. Der Druck an der Ober- und Unterseite des Modells wird bei der Ausrichtung des Modells über Druckbohrungen durch ein DTC Initium Druckmesssystem mit einem ESP-32HD Druckscanner gemessen, der über 32 Kanäle verfügt. Ebenfalls sind TOM-1545P-R Mikrofone an der Messkarte des cRIOS angeschlossen, die sich ent-

lang der vertikalen Mittellinie auf der Rückseite des Stumpfkörpers befinden. Die Ausblasung von der Ober- und Unterkante des Modells kann über das cRIO von einem Messrechner angesteuert werden (siehe Kapitel 3.3.1). Die Hitzdrahtsonde wird hierbei mit der Wheatstoneschen Messbrücke verbunden, siehe Kapitel 2.5.1. Anschließend werden die ausgegebenen Spannungen über ein Compact Reconfigureable Input/Output Modul an das LabVIEW Programm weitergeleitet und zur weiteren Analyse gespeichert (siehe Kapitel 3.3.1). In Abbildung 19 ist der verwendete messtechnische Aufbau am Windkanal zu sehen.

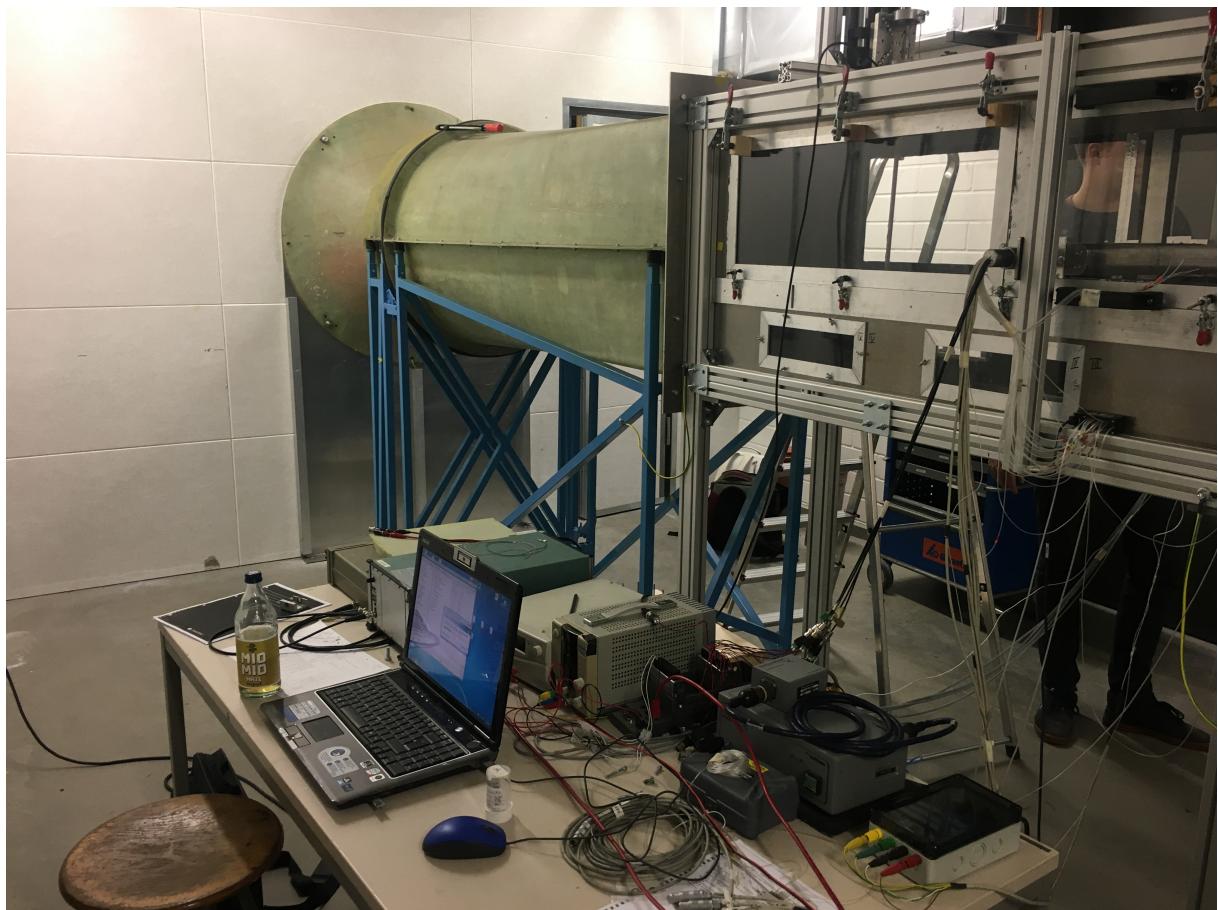


Abbildung 19: Verwendete Messtechnik am LNB

4.6 Programmierung (N)

Wie schon bei der Kalibrierung (Kapitel 3.3.1) wird auch bei der Datenaufnahme im Kanal ein zweigeteiltes LabVIEW Programm verwendet. Das schon bestehende LabVIEW Programm wurde auf der Messkartenseite um fünf Datenkanäle erweitert, um die Spannungen des Hitzdrahts sowie die Signale der Mikrofone auf der Rückseite des Modells aufzunehmen (zu sehen in Abbildung 20).

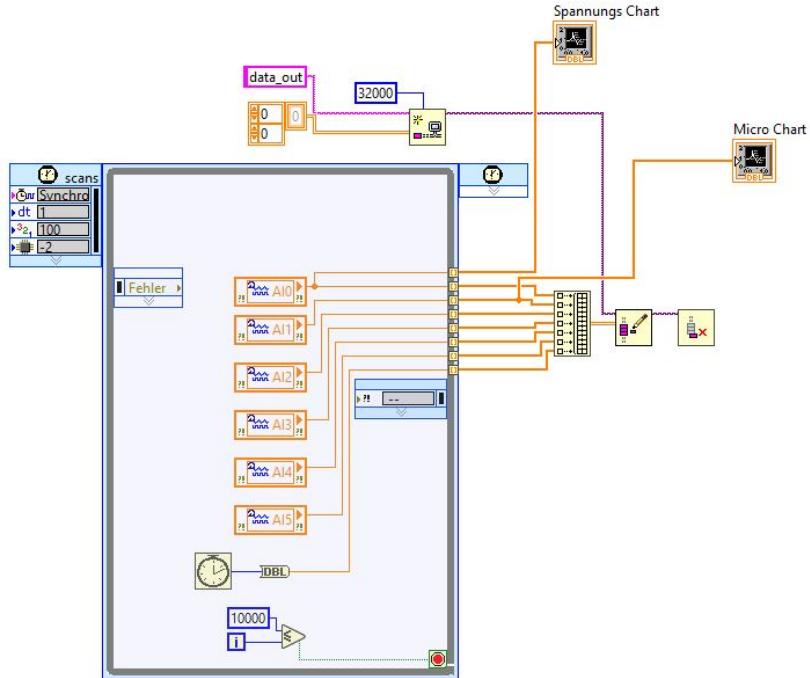


Abbildung 20: LabVIEW auf der Messkarte

Auf der Messrechnerseite ändert sich nichts und die Daten werden wieder über ein integriertes Matlab Skript in ein .mat Format gebracht und abgespeichert.(siehe Kapitel: Messrechnerseite des LabVIEW Skripts, Abbildung 12)

Zur Steuerung der aktuierten Ausblasung über die Coandafläche wird ein 2. LabVIEW Programm genutzt, das die Ventile über eine gezeitete Schleife steuert. Die Frequenz kann so über die Periode (T) der angepeilten Schwingung eingestellt werden. Dabei entstehen Probleme, weil die einstellbaren Frequenzen sich auf solche mit ganzzahligen Millisekundenwerten als Periode beschränken. Aus diesem Grund konnten nur die Frequenzen 62 Hz, 72 Hz und 83 Hz angesteuert werden.

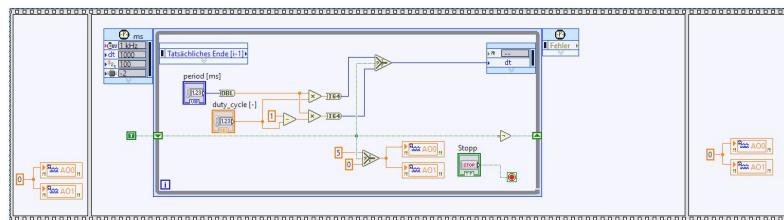


Abbildung 21: LabView Code Ausblasung

4.7 Testfälle mit zugehörigen Ausblaseparametern (M)

Es werden am LNB für die Projektarbeit Messungen von einem Schnitt stromabwärts bei zehn Betriebsbedingungen vorgenommen. Pro Betriebsbedingung werden jeweils 24 Punkte angefahren, was einem Verfahrweg von 184 mm entspricht. Die Druckdaten werden dabei über einen Zeitraum von 10 Sekunden gemittelt.

Hierbei werden bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 16 m/s verschiedene Betriebszustände eingestellt. Es wird zunächst ohne Ausblasung, daraufhin mit konstanter Ausblasung bei 1 und 2 Bar Versorgungsdruck und abschließend mit gepulster Ausblasung gemessen. Bei der gepulsten Ausblasung werden die Frequenzen 62 Hz, 72 Hz und 83 Hz, die bereits in vorherigen Versuchen ermittelt wurden, angesteuert (Kapitel 4.6). Die Tabelle 1 listet die verschiedenen Betriebszustände mit den zugehörigen Ausblaseparametern auf.

1Bar		2Bar
ohne		
konstant		
62 Hz		
72 Hz		
83 Hz		

Tabelle 1: Betriebszustände

5 Auswertung

5.1 Umrechnen der Daten (N)

5.1.1 Temperaturkorrektur, Mittelwerte und Widerstände

Da die Messungen bei anderen Raumtemperaturen stattfinden können als die Kalibrierung des Hitzdrahts, müssen die im Kanal gemessenen Spannungswerte erst temperaturkorrigiert werden. Dafür wird wie in Abschnitt (2.5.2) die Formel Nr. (10) genutzt. Die Korrektur geschieht direkt beim Einlesen der Daten in das Matlab Skript. Zusätzlich werden noch die nicht korrigierten Daten abgespeichert, um später einen Vergleich ziehen zu können.

Um die Geschwindigkeit aus den eingelesenen Daten zu berechnen, werden die eingelesenen Spannungsdaten in die kalibrierte Geschwindigkeitsfunktion aus Kapitel 3 (Kalibrierung (N)) eingesetzt und als neuer Datensatz gespeichert. Diese Daten werden später noch zur Berechnung der Frequenzen verwendet (siehe Sektion 5.1.3). Um die Nachlaufdelle abzubilden, müssen zunächst die Mittelwerte der einzelnen Positionen gebildet werden. Dies geschieht mit der „mean“ Funktion im Matlab Skript. Wenn man die gemittelten Geschwindigkeiten über die Positionen aufträgt, erhält man die Nachlaufdelle (siehe Abbildung 22a).

Die Ermittlung der Widerstände erfolgt über eine Matlab Funktion (siehe Anhang). Diese füttet eine Funktion mittels linearer Regression (lsqcurvefit) auf die bereits ermittelten Geschwindigkeitswerte der Nachlaufdelle. Wie in Abschnitt 2.1.1 schon besprochen kann der Widerstand mit dem Impulssatz berechnet werden (siehe Formel 2). Die Formel wird dann mit der im Fit ermittelten Funktion, der vorherrschenden Kanalgeschwindigkeit und der charakteristischen Länge unseres Körpers in Matlab implementiert und dann integriert. Das Ergebnis ist der c_W -Wert.

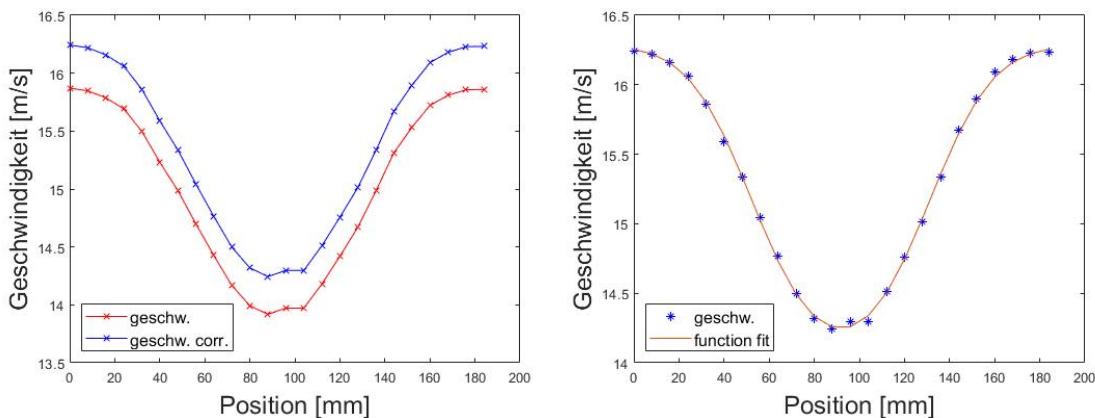


Abbildung 22: Berechnung der Nachlaufdellen

Wenn man alle Nachlaufdellen einer Reihe in ein Diagramm plottet wird klar, dass diese durch unsere Messungen nicht vollständig abgedeckt wurden (siehe Abbildung 23). Es ist keine einheitliche Geschwindigkeit u_∞ an den Rändern zu erkennen. Dies macht die Berechnung der c_W -Werte unzuverlässig.

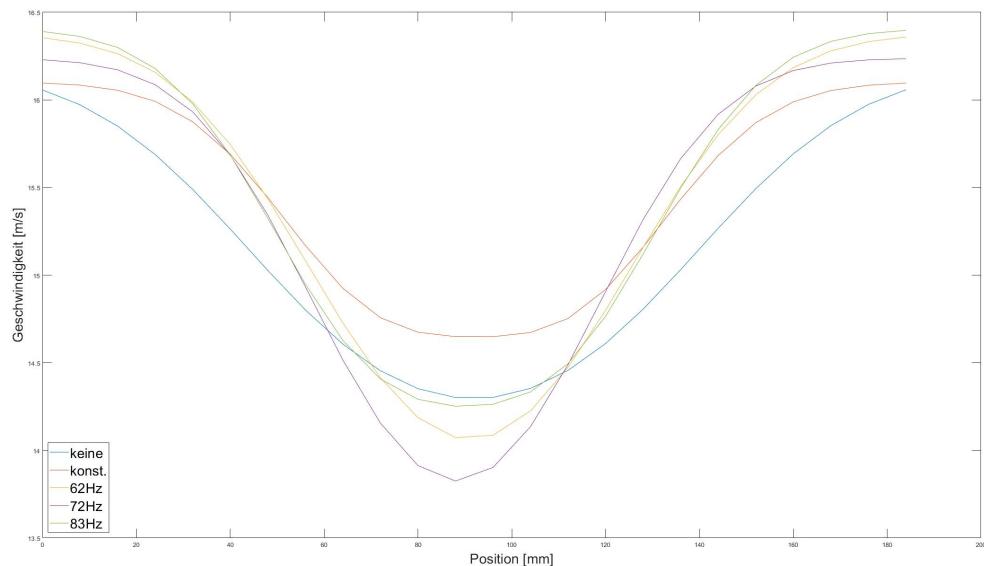


Abbildung 23: Nachlaufdellen im Vergleich

5.1.2 Standardabweichung

Um die Turbulenzen an den Messstellen abschätzen zu können, wird für jeden Messpunkt einer Reihe die Standardabweichung der Geschwindigkeit gebildet (siehe Matlabskript Anhang). Mit der Annahme, dass eine höhere Standardabweichung auch einen höheren Turbulenzgrad zufolge hat, kann man so die räumlich auftretenden Turbulenzgrade gut darstellen. Um eine visuelle Darstellung zu erhalten, werden die Standardabweichungen über die dazugehörigen Messpositionen geplottet.

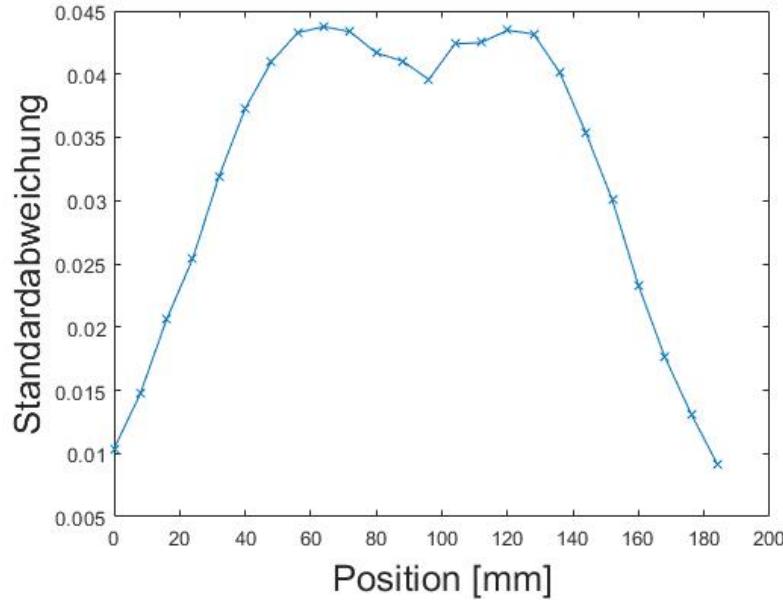


Abbildung 24: Beispiel Standardabweichungen

5.1.3 Spektren

Die im Nachlauf auftretenden Frequenzen werden mittels einer Spektralanalyse (Kapitel 2.3) aufgelöst. Die einzelnen zeitabhängigen Geschwindigkeiten werden hierfür mit einer Fast Fourier Transformation (FFT) in ihre Frequenzanteile zerlegt und als Spektrum geplottet. Da immer nur eine Messposition in der Nachlaufdelle als Spektrum in einem Graphen dargestellt werden kann, muss man die Position, die man betrachten möchte, manuell im Skript anpassen. Um einen besseren Überblick über die verschiedenen auftretenden Frequenzen zu bekommen, wird die gesamte FFT als Contourplot dargestellt.

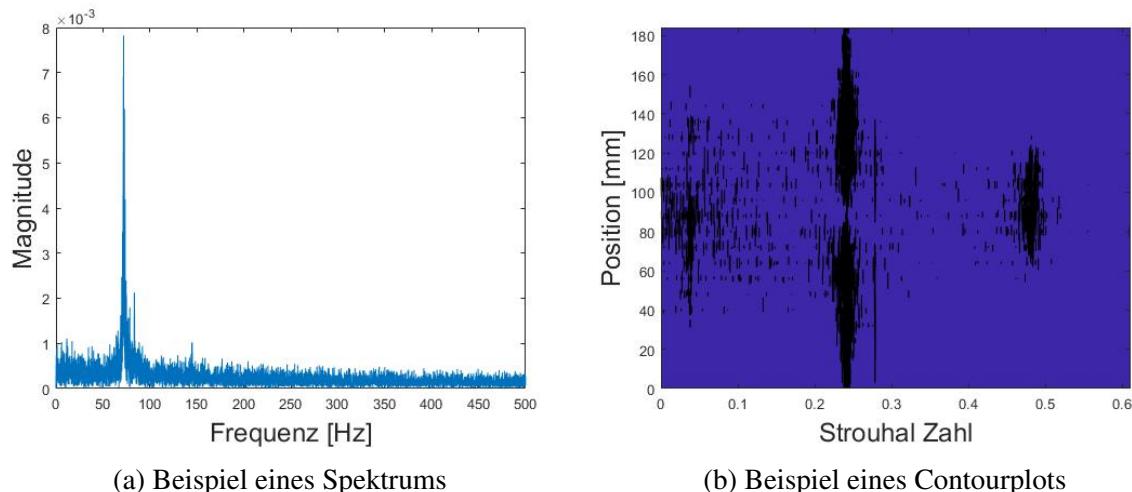


Abbildung 25: Verschiedene Spektren-Darstellungen

Wie in Abbildung 25a kann man in dem Spektrum stark auftretende Frequenzen gut erkennen.

Das Contourplot bietet allerdings wie in Abbildung 25b die Möglichkeit alle über den Messbereich auftretenden Frequenzen einzusehen.

5.2 Nachlaufdellen und ihre Widerstände (N, M)

Wie in Kapitel 5.1.1 (Temperaturkorrektur, Mittelwerte und Widerstände) beschrieben sind die errechneten Widerstandswerte unzuverlässig. Um die Widerstände trotzdem abschätzen zu können, kann die Breite und Tiefe der Nachlaufdellen qualitativ verglichen werden (siehe Kapitel 2.2). Je breiter und tiefer eine Nachlaufdelle ist, desto größer ist der Impulsverlust in der Strömung. Der Widerstand erhöht sich mit zunehmendem Impulsverlust.

Um die Nachlaufdellen vergleichen zu können, wird jeweils die 1 Bar und die 2 Bar Messreihe in einem Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 26 und Abbildung 27).

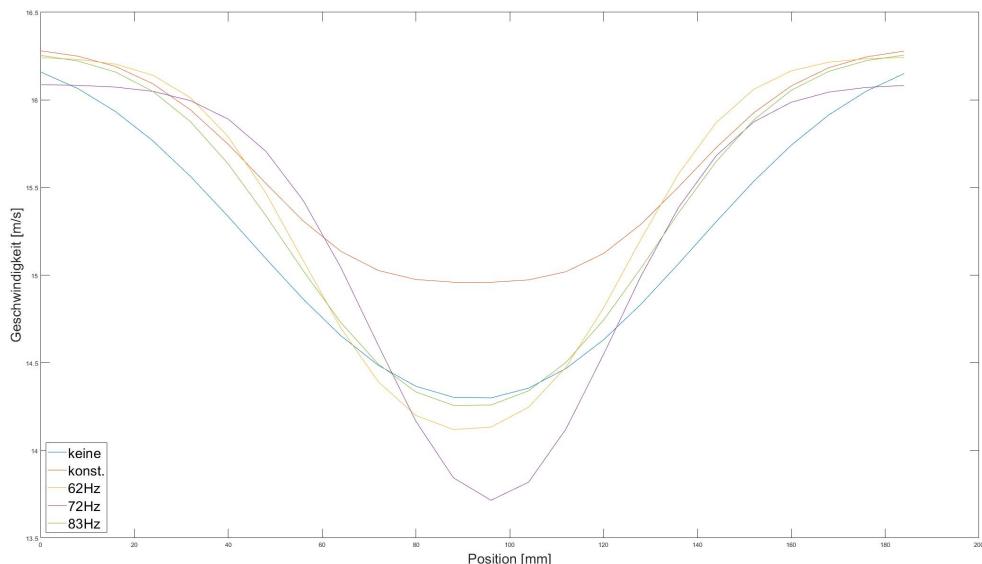


Abbildung 26: Nachlaufdellen 1 Bar

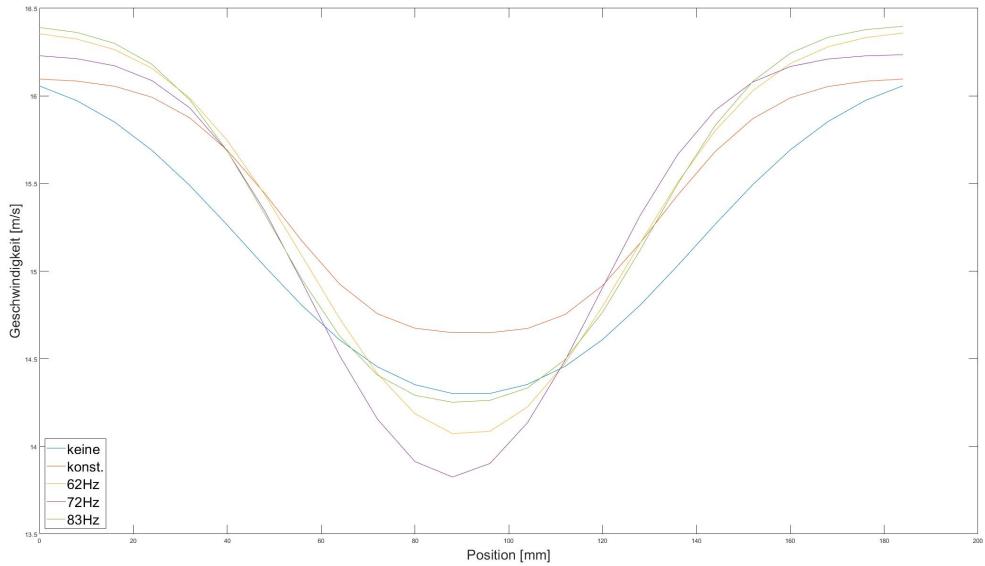


Abbildung 27: Nachlaufdellen 2 Bar

Klar zu erkennen ist, dass die Nachlaufdelle ohne Ausblasung in beiden Fällen am breitesten ist. Es kann also angenommen werden, dass in diesen Fällen die höchsten Widerstandswerte auftauchen.

Auch kann beobachtet werden, dass beide Nachlaufdellen bei konstanter Ausblasung im Vergleich zu den anderen Betriebszuständen deutlich kürzer und leicht schmäler sind. Dies deutet darauf hin, dass die Widerstandswerte hier besonders gering sind.

In beiden Abbildungen kann man zudem erkennen, dass sich 62 Hz und 83 Hz ähnlich sehen. Beide liegen ungefähr mittig im Längenspektrum, sind allerdings schon deutlich schmäler als die Nachlaufdelle ohne Ausblasung. Die Widerstandswerte hier sollten somit schon geringer sein als bei dem Betriebspunkt ohne Ausblasung, jedoch nicht so niedrig wie bei konstanter Ausblasung.

Die Nachlaufdellen bei 72 Hz Ausblasung sind zwar beide länger als die anderen Kurven, allerdings auch deutlich schmäler. Hier werden sich Widerstandswerte im niedrigen Bereich zwischen konstanter Ausblasung und den anderen gepulsten Zuständen finden.

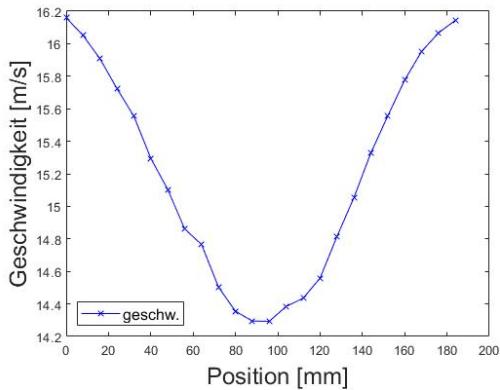
Um einen Überblick über die verschiedenen Widerstände zu schaffen, wird die Reihenfolge der Betriebszustände nach Widerstand in der folgenden Tabelle aufgelistet von hohem zu niedrigem Widerstand.

	Betriebszustände
Widerstand	ohne Ausblasung
	62 Hz, 83 Hz
	72 Hz
	konstante Ausblasung

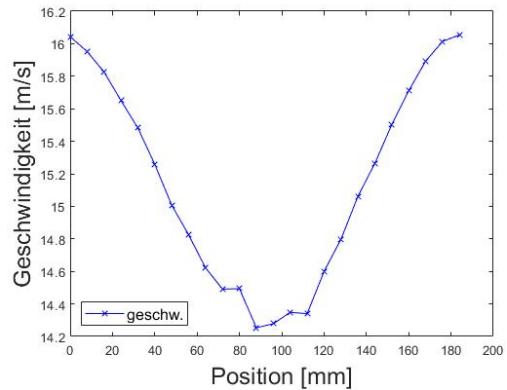
Tabelle 2: Widerstände von hoch zu niedrig

5.3 Zustand ohne Ausblasung (T)

Zunächst soll der Zustand des Nachlaufs, der ohne Ausblasung entsteht, anhand der Messdaten beschrieben werden. Dies dient als Ausgangspunkt, um den Einfluss der unterschiedlichen Aktuationsparameter auf die Strömung einzuschätzen. Ohne Ausblasung wurden zwei Messungen durchgeführt. Die dabei entstandenen Nachlaufdellen sind in Abbildung 28 gezeigt.



(a) Nachlaufdelle ohne Ausblasung, 1. Messung



(b) Nachlaufdelle ohne Ausblasung, 2. Messung

Abbildung 28: Nachlaufdellen ohne Ausblasung

Beide Nachlaufdellen besitzen die gleiche Tiefe. Die Nachlaufdelle der ersten Messung ist allerdings schmäler als die Nachlaufdelle der zweiten Messung. Dies spiegelt sich auch in den berechneten Widerstandsbeiwerten von $c_w = 0,3690$ für die erste und $c_w = 0,3878$ für die zweite Messung wieder.

Diese Widerstandsbeiwerte sind im Vergleich zu allen anderen Zuständen der Ausblasung am größten. Dies deckt sich mit der Theorie, dass die Ausblasung von Luft an der Hinterkannte den Druckwiderstand des Körpers verringert. Außerdem bedeutet das, dass die gepulste Ausblasung die Strömung nicht nachteilig in Bezug auf den Widerstand beeinflusst hat.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zweiten Messung betrachtet.

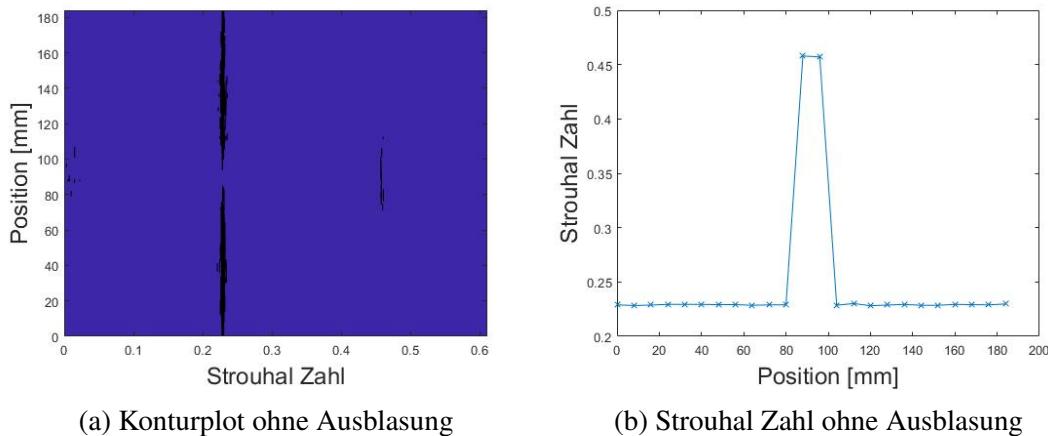


Abbildung 29: Strouhal-Zahlen ohne Ausblasung

Der Konturplot zeigt, dass beim Zustand ohne Ausblasung hauptsächlich zwei verschiedene Strouhal-Zahlen im Nachlauf auftreten (vgl. Abbildung 29a). Auffällig ist, dass die größere Strouhal-Zahl in der Mitte ($Sr=0,46$) doppelt so groß ist wie die kleinere Strouhal-Zahl am Rand ($Sr=0,23$) (vgl. Abbildung 29b). Die zugehörigen Frequenzen sind 137,4 Hz und 68,7 Hz. Die in den Randbereichen bestimmte Strouhal-Zahl von ($Sr=0,23$) liegt im Bereich der natürlichen Wirbelablösfrequenz stumpfer Körper (vgl. Kapitel 2.2.1).

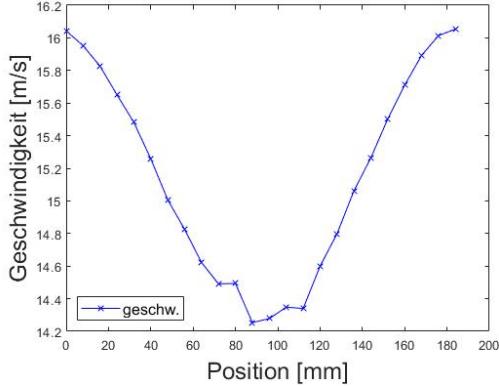
Anhand Abbildung 3 kann man vermuten, dass der Hitzdraht in den äußeren Bereichen des Nachlaufs nur die Geschwindigkeitsänderungen erfasst, die durch die äußeren Wirbel hervorgerufen werden. In der Mitte des Nachlaufs erfasst er dagegen die Geschwindigkeitsänderungen, die durch die oberen und unteren Wirbel hervorgerufen werden. Da die Wirbel alternieren, folgen die Geschwindigkeitsänderungen in der Mitte doppelt so schnell aufeinander wie außen. Das erklärt, warum die Strouhal-Zahlen in der Mitte doppelt so groß sind wie am Rand.

Außerdem erkennt man an Abbildung 29a, dass es an den Positionen 70 mm und 110 mm zu einer Überlagerung der dominanten Strouhal-Zahlen kommt.

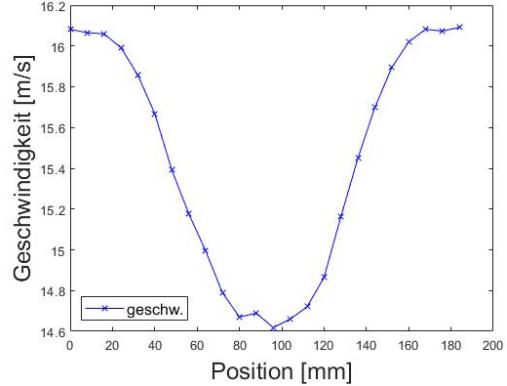
Der Grund dafür könnte sein, dass die Wirbel an diesen Positionen noch nicht zu jeder Zeit alternierend vorkommen, sondern zeitweise nur die oberen bzw. unteren Wirbel die Hitzdrahtsonde erreichen.

5.4 Konstante Ausblasung (T)

Vergleicht man die Nachlaufdelle aus der zweiten Messung ohne Ausblasung mit der Nachlaufdelle bei konstanter Ausblasung, so fällt auf, dass die Nachlaufdelle bei konstanter Ausblasung schmäler und weniger tief ist (vgl. Abbildung 30). Dies deckt sich mit dem geringeren berechneten Widerstandsbeiwert $c_W = 0,2670$ des Zustandes bei konstanter Ausblasung.



(a) Nachlaufdelle ohne Ausblasung 2 Bar

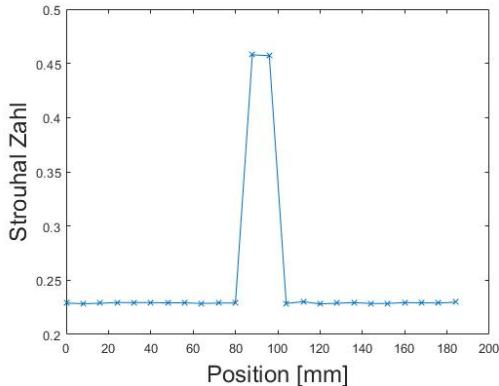


(b) Nachlaufdelle konstante Ausblasung 2 Bar

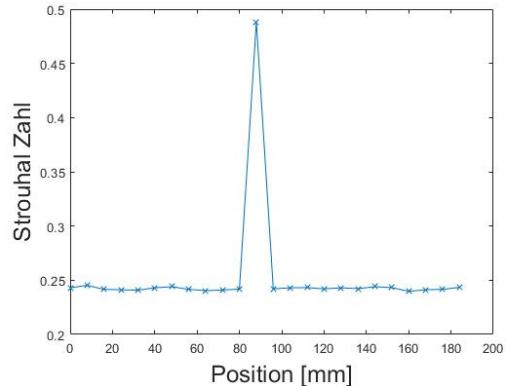
Abbildung 30: Nachlaufdellen im Vergleich

Genau wie beim Zustand ohne Ausblasung ist die dominante Strouhal-Zahl in der Mitte des Nachlaufs doppelt so groß wie an den Rändern (vgl. Abbildung 31b).

Allerdings ist dominante Strouhal-Zahl sowohl an den Rändern als auch in der Mitte des Nachlaufs bei konstanter Ausblasung erhöht (Rand: $Sr=0,24$, Mitte: $Sr=0,5$). Das bedeutet, dass die konstante Ausblasung zu einer erhöhten Wirbelablösfrequenz an der Hinterkante des Modells führt.



(a) Strouhal ohne Ausblasung



(b) Strouhal konstante Ausblasung 2 Bar

Abbildung 31: Strouhal-Zahlen im Vergleich

Der Konturplot für die beiden Zustände (Abbildung 32) zeigt ein detaillierteres Bild der auftretenden Strouhal-Zahlen im Nachlauf als die Auftragung der dominanten Strouhal-Zahlen.

Genau wie beim Zustand ohne Ausblasung kommt es bei den Positionen 70 mm und 110 mm zu einer Überlagerung der dominanten Strouhal-Zahlen (vgl. Abbildung 32b).

Allerdings treten bei konstanter Ausblasung zwischen Position 40 mm und 140 mm neben den beiden häufigsten Strouhal-Zahlen 0,24 und 0,5 weitere Werte auf, die beim Zustand ohne Ausblasung nicht aufgetreten sind.

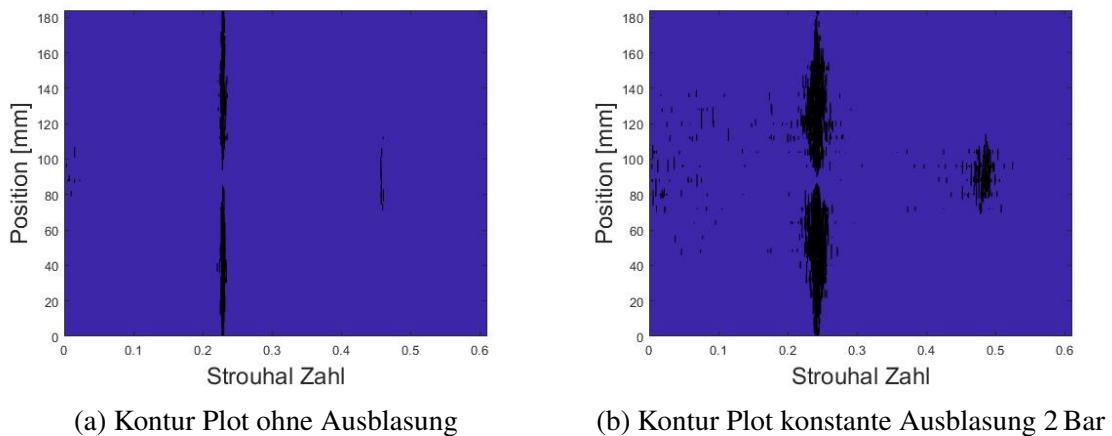


Abbildung 32: Frequenzen im Vergleich

Aufgrund der erhöhten dominanten Strouhal-Zahlen konnte darauf geschlossen werden, dass die konstante Ausblasung die Wirbelablösefrequenz an der Hinterkante des Modells erhöht. Der Konturplot zeigt, dass eine konstante Ausblasung zusätzlich dazu führt, dass die Wirbel mit weiteren Frequenzen im Nachlauf auftreten (siehe Abbildung 32b).

Bisher wurden nur die Fälle keine Ausblasung und konstante Ausblasung betrachtet. Im nächsten Abschnitt wird auf die gepulste Ausblasung genauer eingegangen.

5.5 Gepulste Ausblasung

5.5.1 Zusammenhang der Auftretenden Frequenzen (N)

Wie schon in Sektion 5.3 beschrieben löst sich die Strömung am Ende unseres Stumpfkörpers über die Coanda-Fläche wirbelförmig ab. Dies geschieht bei einer Anströmung von 16 m/s und keiner Ausblasung, mit der natürlichen Wirbelablösefrequenz von 68,7 Hz. Dies entspricht bei unserer charakteristischen Länge von 0,0534 m einer Strouhal Zahl von $Sr=0,23$. In der Mitte des Messbereichs verdoppelt sich die Frequenz dann noch einmal auf 137,4 Hz ($Sr=0,46$) (siehe Contour Plot Abbildung 32a). Dies kann durch die Überlagerung der sich am Körper ablösenden Wirbel erklärt werden (siehe 5.3).

Bei konstanter Ausblasung steigt die Frequenz auf 72,2 Hz ($Sr=0,24$) bei 2 Bar und 74,1 Hz ($Sr=0,24$) bei 1 Bar Versorgungsdruck. Gleich bleibt jedoch, dass in der Mitte des Messbereichs die doppelte Frequenz der Ablösefrequenz auftritt ($Sr=0,5$) (siehe Contour Plot Abbildung 32b).

Bei gepulster Ausblasung von 62 Hz und 2 Bar fällt auf, dass zunächst eine Ablösefrequenz nahe der gepulsten Frequenz im Nachlauf auftritt ($Sr=0,206$). In der Mitte des Messbereichs kann wieder eine Verdoppelung der am Rand auftretenden Frequenz beobachtet werden (siehe Abbildung 33b). Bei 1 Bar Ausblasung mit 62 Hz tritt hingegen hauptsächlich eine Frequenz

von 71 - 72 Hz ($Sr=0,236$) auf, ähnlich der Frequenz bei konstanter Ausblasung (siehe Abbildung 33a). Die 62 Hz ($Sr=0,21$) sind im Spektrum am Rand des Messbereichs zwar noch zu erkennen, scheinen aber keinen besonders großen Einfluss mehr zu nehmen. Stattdessen ist ein großer Peak bei 71-72 Hz zu erkennen (siehe Abbildung 34). Wahrscheinlich liegt dies daran, dass 1 Bar Druckversorgung einfach zu gering sind um einen Unterschied im Nachlauf zu erzeugen.

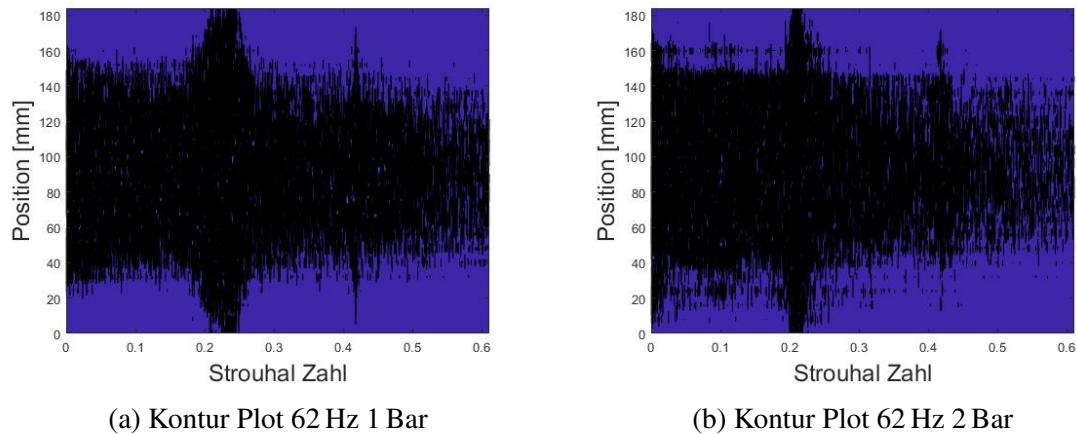


Abbildung 33: Kontur Plots im Vergleich

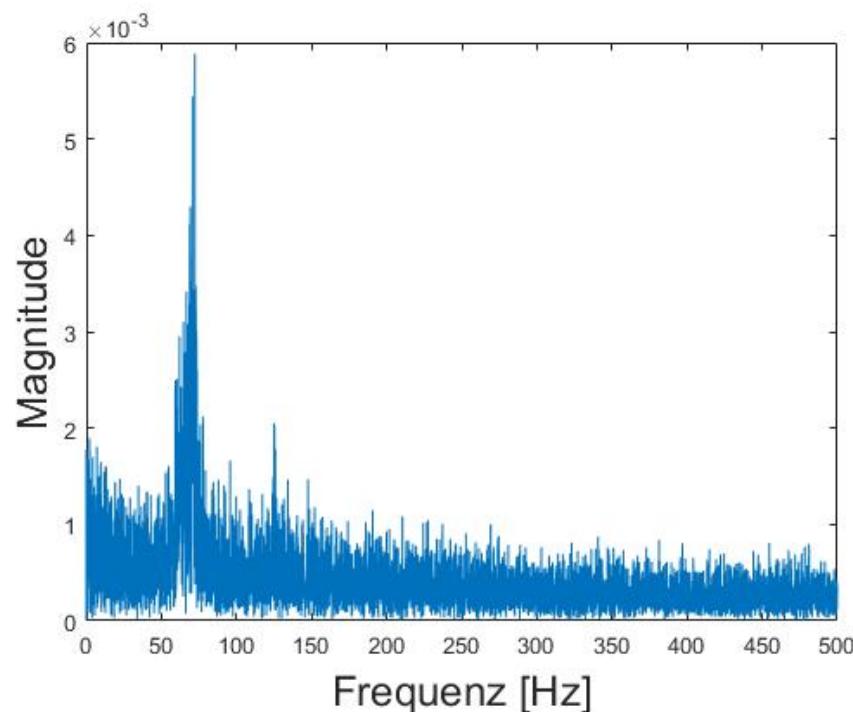


Abbildung 34: Spektrum 1 Bar, 62 Hz Rand

Bei einer Pulsfrequenz von 72 Hz und 2 Bar Druck bildet sich wie bei der konstanten Ausblasung eine Frequenz von 72 Hz ($Sr=0,236$) im Nachlauf aus (siehe Abbildung 35b). Bei der

gepulsten Ausblasung mit 1 Bar ist das Verhalten auch zu beobachten. Dies ist auch zu erwarten, weil wir synchron mit der natürlichen Ablösefrequenz bei konstanter Ausblasung pulsieren. Auffällig ist jedoch, dass bei 1 Bar Versorgungsdruck scheinbar kaum andere Frequenzen auftreten (siehe Abbildung 35a). Bei beiden Zuständen bildet sich in der Mitte des Messbereichs die doppelte Frequenz aus ($Sr=0,24$) (siehe Abbildung 36).

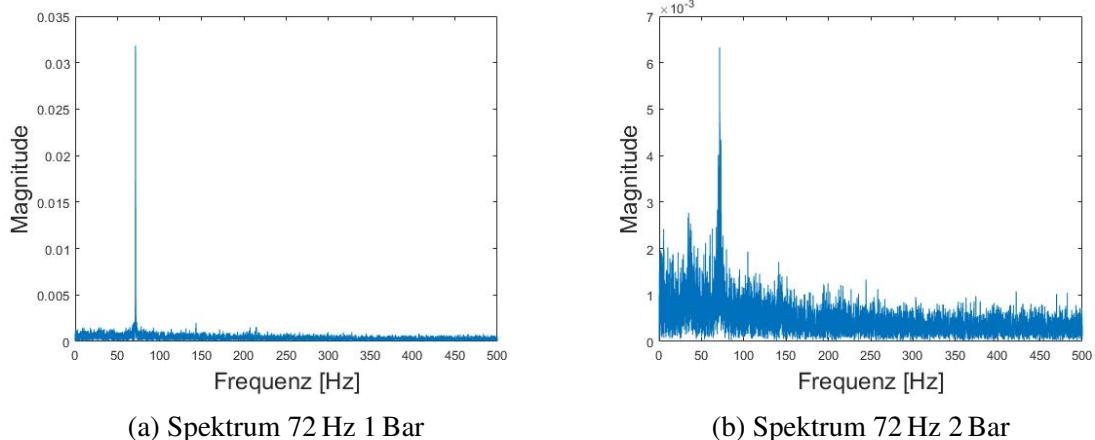


Abbildung 35: Spektren im Vergleich

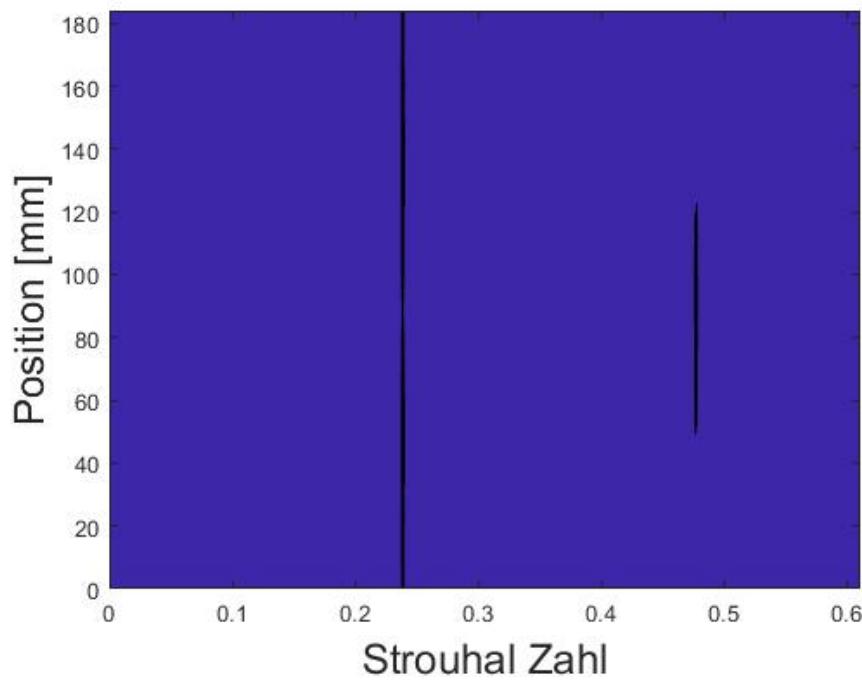


Abbildung 36: Konturen 1 Bar, 72 Hz

Bei 83 Hz Pulsung wiederholen sich die Erkenntnisse, die bereits bei 62 Hz gewonnen wurden. Die 2 Bar Ausblasung passt die Frequenz im Nachlauf an die gepulste Frequenz an, während die 1 Bar Ausblasung wieder eine Frequenz von 72 Hz erzeugt. Die Frequenz der 1 Bar

Ausblasung ist im Spektrum am Rand des Messbereichs noch zu erkennen, spielt aber bei der Ausbildung von Frequenzen im Nachlauf kaum eine Rolle (siehe Abbildung 37). Wie bei allen anderen Messungen verdoppelt sich die Ablösefrequenz, wenn man die Mitte des Messbereichs betrachtet.

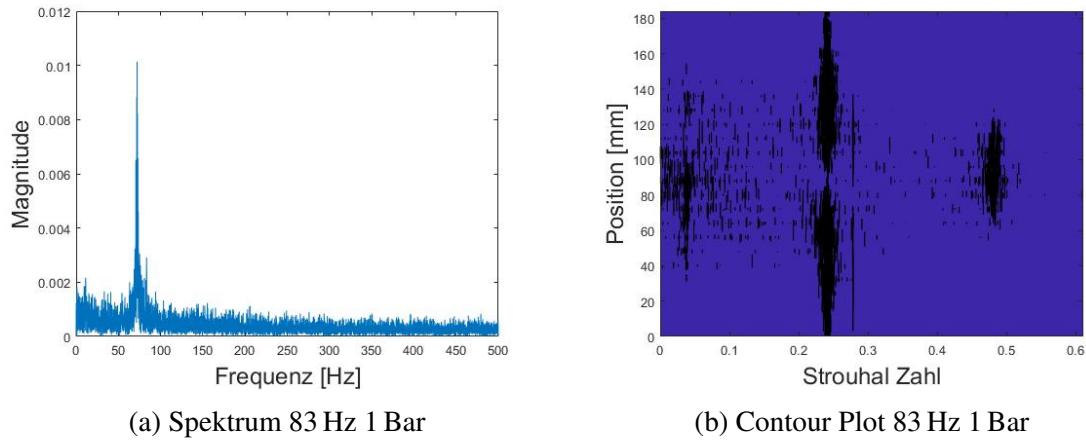


Abbildung 37: Ausblasung 83 Hz 1 Bar

Für die weitere Betrachtung werden wir die 2 Bar Messreihe sowie den 1 Bar /2 Hz Betriebszustand verwenden, da sie als einzige der beiden Messreihen eine wirkliche Veränderung im Nachlauf erzeugt haben.

Auffällig sind auch die immer wieder auftretenden Frequenzen nahe 0 Hz ($Sr=0$) (siehe Abbildung 38). Wie diese zu erklären sind ist nicht ganz klar, eine Vermutung ist aber, dass diese die Regelung vom Kanal erfassen. Der Kanal wird seine Geschwindigkeit aufgrund der PID-Steuerung nur mit sehr langsamem aber kontinuierlichen Schwingungen ausgleichen und so, sehr niedrige Frequenzen in das Spektrum mit einbringen.

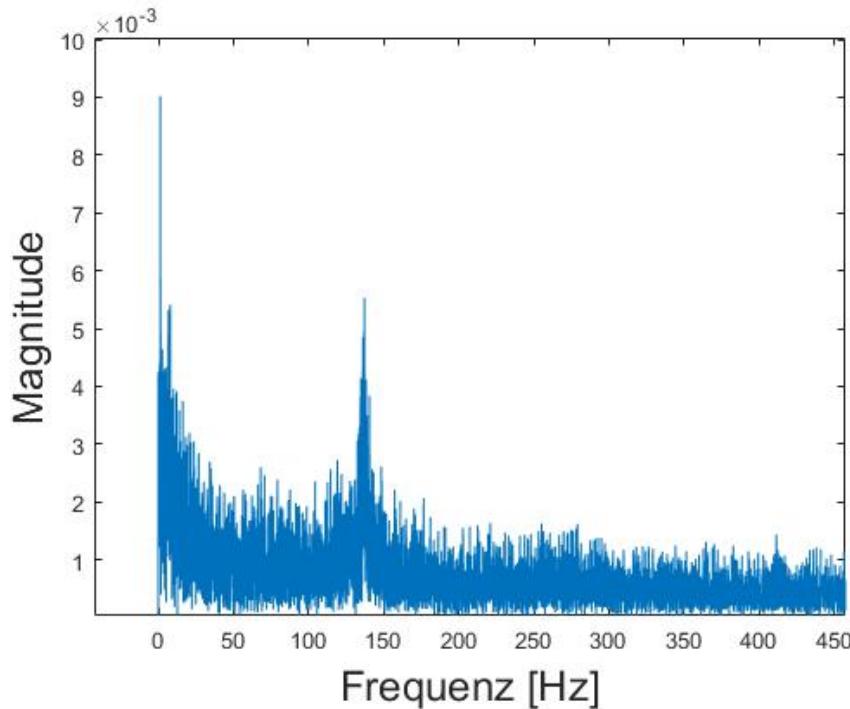


Abbildung 38: Spektrum mit Frequenzen nahe Null

5.5.2 Minimaler Widerstand (M)

Im Folgenden wird die Nachlaufdelle mit dem laut Kapitel 5.2 niedrigsten Widerstand der gepulsten Ausblasung zunächst mit den Messergebnissen ohne Ausblasung verglichen. Wir nehmen den Zustand ohne Ausblasung als Referenzpunkt an und setzen alle weiteren Messergebnisse mit diesem in Beziehung. Des Weiteren wird diese Nachlaufdelle der gepulsten Ausblasung noch mit der Nachlaufdelle verglichen, die laut Kapitel 5.2 den geringsten Widerstand aufweist. Die Nachlaufdelle mit dem geringsten Widerstand aller Messdaten liegt bei konstanter Ausblasung und einem Druck von 2 Bar. Es wird ein Vergleich mit der konstanten Ausblasung angestrebt, damit ein direkter Bezug zu dieser Nachlaufdelle herausgestellt werden kann. Ebenfalls kann damit beurteilt werden, ob die gepulste gegenüber der konstanten Ausblasung den Druckwiderstand an der Hinterkante von dem D-förmigen Stumpfkörper verändert.

Vergleich der Nachlaufdellen mit dem Zustand ohne Ausblasung

In dem folgenden Diagramm (Abbildung 39) sind jeweils alle Nachlaufdellen für die Messungen bei einem Versorgungsdruck von 2 Bar dargestellt. Es wird die Geschwindigkeit über der Position der Hitzdrahtsonde im Windkanal aufgetragen.

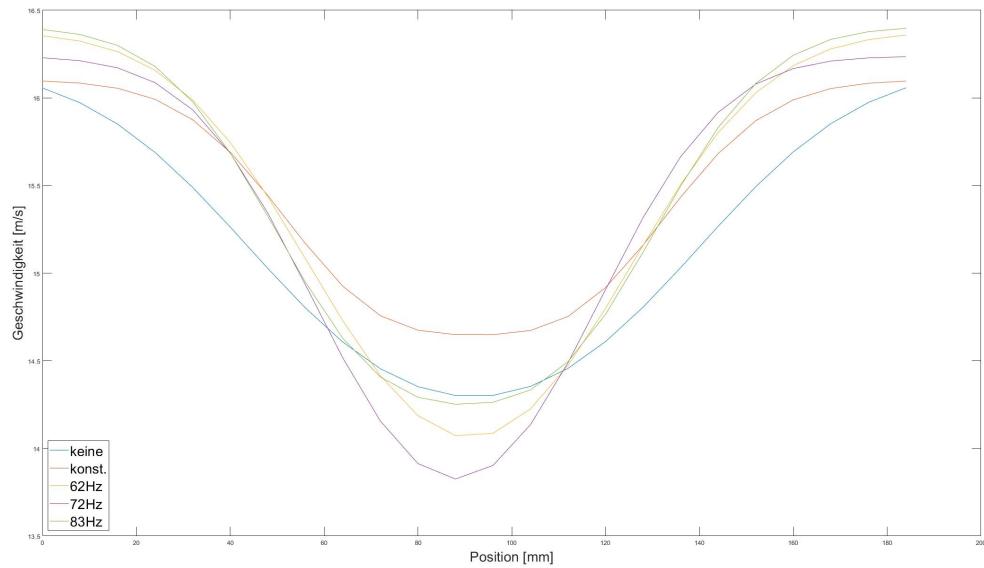


Abbildung 39: Nachlaufdellen 2 Bar

Anhand der Darstellung lässt sich erkennen, dass die Nachlaufdelle bei einem Versorgungsdruck von 2 Bar mit einer Ausblasefrequenz von 72 Hz den schmalsten sowie zugleich auch tiefsten Verlauf besitzen. Im Vergleich dazu ist die Nachlaufdelle bei dem Betriebspunkt ohne Ausblasung breiter. Demnach ist der Widerstand durch die gepulste Ausblasung reduziert worden. Dieses Verhalten deckt sich auch mit unseren Widerstandsbeiwerten, die für den Fall der gepulsten Ausblasung bei $c_w = 0,3546$ und für den Zustand ohne Ausblasung zwischen $c_w = 0,3690$ und $c_w = 0,3878$ liegen. Die Verringerung des Widerstandsbeiwertes bei gepulster Ausblasung entspricht somit unseren Erwartungen, dass die gepulste Ausblasung von Luft den Druckwiderstand des Stumpfkörpers an der Hinterkante reduziert.

Vergleich der Nachlaufdellen mit dem Zustand konstanter Ausblasung

Vergleicht man die Nachlaufdellen (Abbildung 39) der konstanten Ausblasung und der gepulst ausgeblasenen Luft mit 72 Hz fällt auf, dass sich die beiden Verläufe widersprechen. Die Nachlaufdelle der konstanten Ausblasung ist kürzer und schmäler gegenüber dem gepulst ausgeblasenen Zustand.

Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass der Luftfluss bei gepulster Ausblasung durch die Ausblaseschlitze geringer ist. Der verwendete Volumenstrom liegt bei der konstanter Ausblasung bei $22,9 \text{ m}^3/\text{min}$ und bei gepulster Ausblasung bei $13,2 \text{ m}^3/\text{min}$. Gegebenenfalls hätte der Volumenstrom bei konstanter Ausblasung oder bei gepulster Ausblasung jeweils vor Beginn der Messungen angepasst werden müssen. Des Weiteren sind in den Versuchen die Nachlaufdellen nicht vollständig abgedeckt worden (siehe Kapitel 5.1.1 Temperaturkorrektur, Mittelwerte und

Widerstände). Aufgrund dessen gestaltet sich dieser Vergleich als schwierig und wird daher aus der Wertung herausgenommen.

5.5.3 Maximaler Widerstand (M)

Bei der gepulsten Ausblasung ist der Widerstand laut Kapitel 5.2 bei 62 Hz bzw. 83 Hz und 2 Bar Versorgungsdruck am größten. Im Weiteren werden diese Nachlaufdellen der gepulsten Ausblasung mit dem vorab definierten Referenzzustand verglichen.

Die Nachlaufdelle des Referenzzustandes weist wie bereits erwähnt eine sehr breite Form auf. Die Nachlaufdellen bei 62 Hz und 83 Hz sind im Vergleich etwas schmäler und weniger ausgebildet. Demzufolge ist der Druckwiderstand an der Hinterkante des D-förmigen Stumpfkörpers bei diesen Zuständen geringer als bei der Messung ohne Ausblasung. Dieses Verhalten entspricht unseren Erwartungen, denn je schmäler und kürzer die Nachlaufdelle ist, desto geringer ist auch der Widerstand.

5.5.4 Standardabweichungen (A)

Die zeitlich schwankende Strömungsgeschwindigkeit ist die charakteristische Eigenschaft einer turbulenten Strömung [15]. Die Schwankung der Geschwindigkeit muss in allen Richtungskomponenten berücksichtigt werden, damit die Turbulenz genauer gemessen werden kann. Der Hitzdraht, der zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit genutzt wurde, ermöglicht es die Geschwindigkeitsschwankungen lediglich in Strömungsrichtung aufzunehmen. Trotzdem wird dieser Wert im weiteren Verlauf als ein Maß für die Turbulenz angenommen. In der Tabelle 3 wird die Standardabweichung der Strömungsgeschwindigkeit an den äußeren Positionen (pos. 1 und pos. 24) und an der mittleren Position im Strömungsquerschnitt (pos. 12) für alle Aktuationsparameter aufgeführt. Hierbei sind die Messdaten in der Mitte entscheidender, da an dieser Position das Modell einen größeren Einfluss auf die Strömung hat. Die Standardabweichung der Strömungsgeschwindigkeit ist ein Maß für die Turbulenz der Strömung.

Datensatz	Std. dev. 1	Std. dev. 12	Std. dev. 24	Speed diff.
1 Bar ohne	0.0199	0.0464	0.0171	1.8664
2 Bar ohne	0.0204	0.0416	0.0178	1.8000
1 Bar konstant	0.0108	0.0342	0.0098	1.3326
2 Bar konstant	0.0087	0.0333	0.0072	1.4735
1 Bar 62 Hz	0.0086	0.0504	0.0082	2.1976
2 Bar 62 Hz	0.0134	0.0454	0.0111	2.3093
1 Bar 72 Hz	0.0185	0.0450	0.0171	2.5581
2 Bar 72 Hz	0.0112	0.0465	0.0099	2.4524
1 Bar 83 Hz	0.0104	0.0410	0.0092	1.9992
2 Bar 83 Hz	0.0099	0.0459	0.0103	2.1298

Tabelle 3: Standardabweichung und Geschwindigkeitsdifferenz

Trägt man die Standardabweichung der Strömungsgeschwindigkeit für jede Position in einem Diagramm auf, so wird bestätigt, dass die Turbulenz im mittleren Bereich des Strömungsquerschnittes größer ist als am Rand. Dies gilt für alle Aktuationsparameter. In Abbildung 40 fällt auf, dass neben der mittleren Position Bereiche mit höherer Standardabweichung, also größerer Turbulenz, existieren. Der Grund dafür könnte sein, dass das Aufeinandertreffen der äußeren Wirbel die Turbulenz der Strömung verringert.

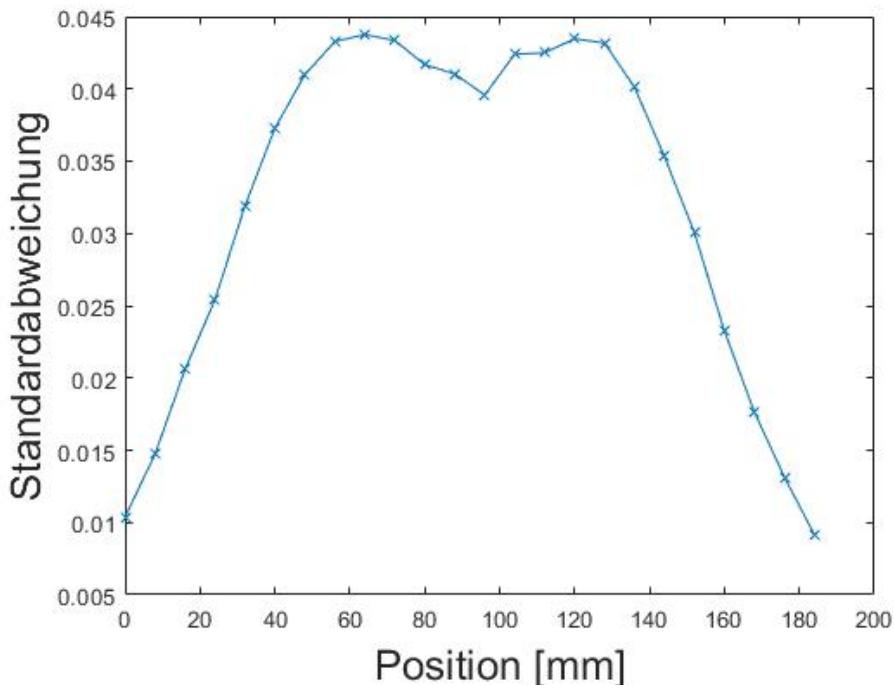


Abbildung 40: Standardabweichung mit konstanter Ausblasung 2 Bar

Wie im ersten Blick auf die Tabelle 3 zu erkennen ist, ist die Standardabweichung in der Mitte

deutlich größer als außen. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, wenn man sich vor Augen führt, dass hinter dem Modell eine Wirbelstraße entsteht. In dieser Wirbelstraße ist die Turbulenz der Strömung größer als im äußeren Bereich der Strömung.

Aus der Tabelle 3 ist es zu entnehmen, dass sich die Standardabweichung in der Mitte des Nachlaufes bei den Messungen mit konstanter Ausblasung deutlich von den anderen Messungen unterscheiden. Die Standardabweichung bei den Messungen mit gepulster Ausblasung ändert sich an dieser Position im Vergleich zu den Messungen ohne Ausblasung nicht mehr als 10%, während bei der Messung mit konstanter Ausblasung diese Differenz bei mehr als 25% liegt. Die im Kapitel 5.5.2 bei den Messungen mit gepulster Ausblasung erwähnte Stromvolumendifferenz könnte für die Entstehung dieses Unterschiedes verantwortlich sein. Laut dieses Kapitels ist das Stromvolumen bei der konstanten Ausblasung doppelt so groß wie bei den anderen Messungen mit der gepulsten Ausblasung. Infolgedessen kann man die Standardabweichungen bei der Messungen mit gepulsten Ausblasung und konstanten Ausblasung nicht vergleichen.

Datensatz	Std. Dev. diff.	Speed diff.
1 Bar ohne	0.0293	1.8664
2 Bar ohne	0.0238	1.8000
1 Bar konstant	0.0244	1.3326
2 Bar konstant	0.0261	1.4735
2 Bar 62 Hz	0.0343	2.3093
2 Bar 72 Hz	0.0366	2.4524
2 Bar 83 Hz	0.0360	2.1298

Tabelle 4: Vergleich Geschwindigkeitsdifferenz und Standard Abweichung

Mit dem Wert „Speed diff.“ werden die Differenz zwischen der maximalen Geschwindigkeit und der minimalen Geschwindigkeit bezeichnet. Bei der Abbildung 41 fällt auf, dass im Gegensatz zu Standardabweichung die maximale Geschwindigkeit an den äußeren Positionen und die minimale Geschwindigkeit in der Mitte existieren. In der Tabelle 4 wird die Differenz zwischen der Standardabweichung an der mittleren Position und der kleinste Standardabweichung an der äußeren Positionen für alle Aktuationsparameter aufgeführt. Diese Tabelle ermöglicht die Korrelation zwischen Standardabweichungsdifferenz und Geschwindigkeitsdifferenz zu sehen. Bei der Messung mit Aktuationsparameter von 72 Hz treten sowohl die maximale Standardabweichungsdifferenz als auch die maximale Geschwindigkeitsdifferenz auf, während die zweitkleinste Standardabweichungsdifferenz und die minimale Geschwindigkeitsdifferenz sich bei der Messung mit 1 Bar konstanter Ausblasung sehen lassen. Das bedeutet, dass steigende Turbulenz Unterschied zu Erhöhung der Geschwindigkeitsdifferenz führt.

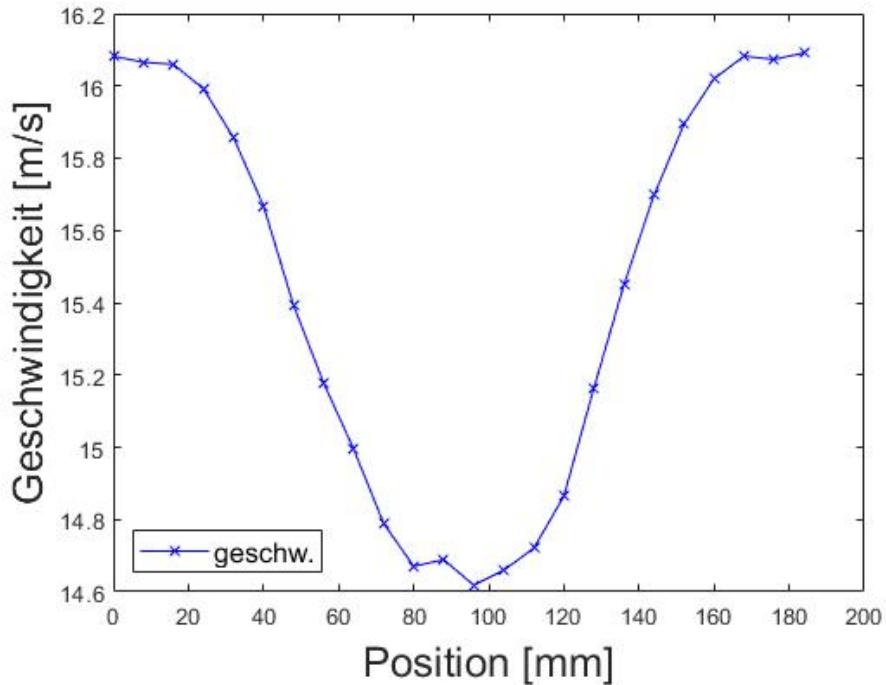


Abbildung 41: Nachlaufdelle konst. 2 Bar

Es ist nach Tabelle 3 weiterhin zu sagen, dass jede Art von Ausblasung die Turbulenz im Außen vermindert. Bei der vielen Messungen mit Ausblasung betragen sich die Standardabweichung, also Turbulenz, im Vergleich zu der Zustände ohne Ausblasung circa 40% weniger. Dieses Verhalten kann mit der verkleinerten Verwirbelungen erklärt werden. In gewissem Sinne wird es verhindert die Wirbelstraße nach außen auszubreiten. Diese Verminderung der Turbulenz am Rand ist dafür von Bedeutung, der Einfluss von Ausblasung auf die Strömungsbewegung möglichst klar zu sehen. Darüber hinaus unterscheiden sich die Standardabweichung bei der Position 1 und 24. Auch wenn die vernachlässigte 1 Bar gepulste Messungen berücksichtigt werden, ist der Turbulenz stets höher bei der Position 1 als bei der Position 24. Obwohl der Unterschied nicht dramatisch ist, führen die Daten zu der Schlussfolgerung, dass bei der Einstellungsprozess ein geringfügiger Fehler aufgetreten sein kann, infolgedessen eine ungleichförmige Strömung um das Modell herum vorkommt. Es ist aber auch möglich, dass dieser Unterschied auftritt, da die Messpunkte nicht perfekt symmetrisch um Mitte der Nachlaufdelle liegen.

6 Fazit [T]

Ziel der Projektarbeit ist die Charakterisierung der Dynamik des Nachlaufs bei unterschiedlichen Aktuationsparametern der Ausblasung. Im Folgenden sollen die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst werden.

Bei der Diskussion der Nachlaufdellen wurde deutlich, dass bei den unterschiedlichen Messungen keine einheitliche Geschwindigkeit U_∞ am Rand der Nachlaufdellen gemessen werden konnte. Dies deutet darauf hin, dass der Verfahrweg der verwendeten Traverse zu gering ist, um die Nachlaufdellen vollständig abzudecken. Da die Widerstandsbeiwerte auf Grundlage der Nachlaufdelle berechnet wurden, müssen diese mit Vorsicht betrachtet werden.

Eine Abschätzung des Widerstandes bei den unterschiedlichen Aktuationsparametern wurde daher qualitativ anhand der Form der Nachlaufdellen vorgenommen. Hiernach kam der größte Widerstand beim Zustand ohne Ausblasung vor. Der geringste dagegen beim Zustand konstanter Ausblasung mit 2 Bar. Dies entspricht nicht der Erwartung, dass der geringste Widerstand bei einem Zustand mit gepulster Ausblasung auftreten würde. Als Grund für dieses abweichende Verhalten kann der deutlich geringere Volumenstrom bei der gepulsten Ausblasung in Betracht gezogen werden.

Neben der Betrachtung der Widerstände, wurde eine ausführliche Betrachtung der Frequenzen im Nachlauf durchgeführt. Anhand des Zustandes ohne Ausblasung konnte dabei festgestellt werden, dass an den Rändern des Nachlaufs die natürliche Wirbelablösefrequenz von 68,7 Hz ($Sr=0,23$) auftritt. In der Mitte des Nachlaufs ist die Frequenz doppelt so groß, was mit der Struktur der Wirbelstraße erklärt werden konnte. Außerdem überlagern sich in Teilen der Mitte des Nachlaufs die Strouhal-Zahlen.

Anhand des Zustandes bei konstanter Ausblasung, der zu einer deutlichen Widerstandsverminde rung geführt hat, wurde deutlich, dass die konstante Ausblasung zu einer höheren natürlichen Wirbelablösefrequenz von 72,2 Hz ($Sr=0,24$) geführt hat.

In Bezug auf die gepulste Ausblasung konnte beobachtet werden, dass bei 2 Bar Versorgungsdruck die gepulste Frequenz bzw. deren doppelter Wert auch im Nachlauf auftrat. Bei 1 Bar Versorgungsdruck konnte diese Beobachtung nur bei einer Ausblasefrequenz von 72,2 Hz gemacht werden, weil diese Frequenz bereits der natürlichen Wirbelablösefrequenz bei konstanter Ausblasung entspricht. Die Ausblasung mit 72,2 Hz und 1 Bar führte auch zu einer deutlichen Widerstandsverminderung. Um Energie zu sparen, ist diese Ausblasung, unter Ausnutzung der natürlichen Wirbelablösefrequenz, im Vergleich zur Ausblasung mit 2 Bar vorzuziehen.

Zuletzt wurden die Standardabweichungen der Strömungsgeschwindigkeit betrachtet, um ein Maß für die Turbulenz der Strömung zu erhalten. Die Turbulenz in der Mitte des Nachlaufs ist größer als an dessen Rand. Jede Form der Ausblasung führte zusätzlich zu einer Verringerung

der Turbulenz am Rand des Nachlaufs. In der Mitte konnte die Turbulenz durch die konstante Ausblasung verringert werden. Die gepulste Ausblasung zeigte einen geringeren Effekt. Der Grund hierfür ist der oben bereits erwähnte, geringere Volumenstrom der gepulsten Ausblasung.

Abschließend lässt sich sagen, dass mithilfe des durchgeföhrten Experimentes vielfältige Beobachtungen des Nachlaufs angestellt werden konnten. Als hervorhebenswert scheint die Erkenntnis, dass mit 1 Bar Versorgungsdruck und unter Ausnutzung der natürlichen Wirbelablösefrequenz bei konstanter Ausblasung besonders energiesparend eine Widerstandsverminderung erreicht werden kann.