

Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik Faculty of Mechanical and Process Engineering





Hochschule Düsseldorf

Bachelor-Thesis im Studiengang PEU

Aeroakustische Analyse von Leading Edge Serrations an Niederdruck Axialventilatoren unter Betrachtung des Zeit- und Frequenzbereiches

David Delgado Hernandez

Matrikelnummer 642308

Düsseldorf August 2019

Betreuender Professor (Erster Prüfer)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Becker-Schweitzer Institute of Sound and Vibration Engineering Fachbereich Medien Münsterstr. 156 40476 Düsseldorf Joerg.Becker-Schweitzer@hs-duesseldorf.de

Zweiter Prüfer

M. Sc. Till Biedermann Institute of Sound and Vibration Engineering Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik Münsterstraße 156 40476 Düsseldorf Till.Biedermann@hs-duesseldorf.de

Aeroakustische Analyse von Leading Edge Serrations an Niederdruck Axialventilatoren unter Betrachtung des Zeit- und Frequenzbereiches

Bioinspirierte Vorderkantenmodulationen an Tragflügeln, engl. *Leading Edge Serrations*, haben sich sowohl aerodynamisch als auch aeroakustisch als vorteilhaft zur Unterdrückung von turbulenzinduziertem Schall und zur Verzögerung des Strömungsabrisses erwiesen. Die zugrundeliegenden Mechanismen wurden bereits umfangreich an eben gelagerten Tragflügeln untersucht. Das praktische Anwendungsgebiet liegt jedoch vornehmlich im Bereich axialer und radialer Strömungsmaschinen. Aus diesem Grund sollen in aktuellen Forschungsprojekten die im ebenen gewonnenen Erkenntnisse auf deren Übertragbarkeit auf ein rotierendes System untersucht werden.

Erste experimentelle Untersuchungen mit axialen Modellrotoren zeigten einen positiven Effekt der Serrations hinsichtlich der aeroakustischen Abstrahlung, jedoch auch aerodynamische Einbußen in Effizienz und Druckerhöhung. Die starke Limitierung in der Anzahl untersuchbarer Serration-Designs aus Grund von Kosten- und Fertigungsbeschränkungen führt zu der Notwendigkeit einer Modellbildung mit dem Ziel einer zuverlässigen Prognose von Schallreduktionspotential und aerodynamischer Performance. Eine erste Konzeptstudie zeigte vielversprechende Ergebnisse bei der Modellierung mittels eines *Latin-Hypercube-Samplings* des Versuchsraumes und dem anschließenden Training künstlicher neuronaler Netzwerke.

Im Rahmen der durchzuführenden Abschlussarbeit soll an dieser Stelle mit einem Fokus auf die Aeroakustik in die Thematik eingestiegen werden. Ein aeroakustisches Modell wird erarbeitet und hinsichtlich der Prognosegüte und Generalisierbarkeit untersucht. Zudem werden Abhängigkeiten der Zielgrößen und Einflussparameter dezidiert erarbeitet, dargestellt.

Die Aufgabe umfasst eine intensive Einarbeitung in themenspezifische Literatur, die Grundlagen der statistischen Modellierung sowie in die bereits geleisteten Vorarbeiten. Im Rahmen der Abschlussarbeit wird ein Re-Design von Rotorschaufelsets, parametrisiert nach einem Latin-Hypercube-Design, durchgeführt. Diese werden mittels Rapid Prototyping gefertigt und händisch zum Einsatz an Modellrotoren aufbereitet. Im Anschluss werden die aerodynamischen und aeroakustischen Kenngrößen simultan mittels eines Rohrprüfstandes messtechnisch erfasst. Die gewonnenen Daten werden unter Zuhilfenahme der Messsoftware PAK sowie Matlab aufbereitet und ausgewertet. Auf Basis dieser Systeminformationen erfolgt von dritter Seite eine Modellbildung mittels künstlicher neuronaler Netzwerke. Im Rahmen dieser Ausgabenstellung wird dieses Modell als eine Art Blackbox zur anschließenden Validierung und Auswertung hinsichtlich der Wirkzusammenhänge der einzelnen Einflussparameter herangezogen. Der Fokus liegt hier auf globalen aeroakustischen Kenngrößen in Form von Summenpegeln sowie spektralen Zielgrößen, unterteilt in tonale und breitbandige Anteile. Gewonnene Zusammenhänge und Erkenntnisse werden mit einer parallel laufenden Analyse aerodynamischer Zielgrößen abgeglichen und in Zusammenhang gebracht.

Inhaltsverzeichnis

Inhalts	sverzeio	hnis	II
Symbo	olverzei	chnis	V
Abkür	zungsv	erzeichnis	VIII
1	Einleit	ung	1
	1.1	Leading Edge Serrations	3
	1.2	Motivation	4
	1.3	Forschungsfrage	5
2	Theor	etische Grundlagen und Stand der Wissenschaft	6
	2.1	Aeroakustische Grundlagen	6
	2.1.	1 Der menschliche Hörbereich und der Schall	6
	2.1.	2 Fast Fourier Transformation	9
	2.1.	3 Schallentstehung bei Ventilatoren	13
	2.1.	4 Spektrale Filter und ihre Funktionsweise	15
	2.2	Strömungsmechanische Grundlagen	17
	2.2.	1 Stromungsarten	17
	2.2.	Coomatria dar Datarblättar	20
	2.3		20
3	Experi	imenteller Versuchsaufbau	23
	3.1	Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136	23
	3.2	Mikrofonpositionierung und Messparameter	24
	3.3	Erzeugung hochturbulenter Zuströmung	25
4	Versu	chsplanung	28
	4.1	Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)	28
	4.2	Latin Hypercube Sampling	28
	4.3	Parameter der Leading Edge Serrations zur Validierung des Modells	31
	4.4	Randomisierung der Messpläne	32
	4.5	Künstliche neuronale Netze KNN	32
	4.6	Einflussgrößen	32
	4.7	Zwischengrößen	33
	4.8	Zielgrößen	36
5	CAD I	Re-Design und Vorbereitung der Messungen	37
	5.1	CAD Re-Design	37
	5.2	Aufbereitung der Rotorblätter und Vorbereitung der Messungen	38
6	Auswe	ertung und Analyse	39

6.1 V	alidierung
6.1.1	Bestimmtheitsmaß R ²
6.1.2	Vergleich zwischen Prognose und Beobachtung41
6.2 A	nalyse der Schallleistungspegel (OASPL)43
6.2.1	Analyse der Schallleistungspegel (Total) mit mittlerer Amplitude und mittlerer Wellenlänge bei Variation des Turbulenzgrades
6.2.2	Analyse der Schallleistungspegel (Breitband) mit mittlerer Amplitude und mittlerer Wellenlänge bei Variation des Turbulenzgrades45
6.2.3	Analyse der Schallleistungspegel (Tonal) mit mittlerer Amplitude und mittlerer Wellenlänge bei Variation des Turbulenzgrades
6.2.4	Analyse der Schallleistungspegel (BPF) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerer Amplitude bei Variation des Turbulenzgrades47
6.2.5	Analyse der Schallleistungspegel (Total) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude
6.2.6	Analyse der Schallleistungspegel (Breitband) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude
6.2.7	Analyse der Schallleistungspegel (Tonal) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude50
6.2.8	Analyse der Schallleistungspegel (BPF) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude
6.2.9	Analyse der Schallleistungspegel (Total) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge
6.2.10	Analyse der Schallleistungspegel (Breitband) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge53
6.2.11	Analyse der Schallleistungspegel (Tonal) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge
6.2.12	Analyse der Schallleistungspegel (BPF) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge
6.3 A	nalyse der spektralen Zielgrößen56
6.3.1	Analyse der spektralen Schallleistungspegel bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %
6.3.2	Analyse der spektralen Schallleistungspegel bei Variation von <i>Aserr</i> =6 mm bis 22 mm
6.3.3	Analyse der spektralen Schallleistungspegel bei Variation von $\lambda serr=4$ mm bis 22 mm
6.3.4	Analyse der spektralen Schallleistungspegel der Serration Aserr=22 mm $\lambda serr=4$ mm
6.4 A	bgleich und Zusammenhang Aerodynamik65
Zusamm	enfassung und Ausblick67
Literatur	verzeichnis70
Anhang A	A – Abbildungen72
Anhang	B - Tabellen73
10.1 M	lesspläne73
10.2 B	estimmtheitsmaße74

11	Eidesstattliche Erklärung	76	5
----	---------------------------	----	---

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Α	[mm ²]	Oberfläche
A _{orig}	[m²]	Originalfläche eines Blattes
A_R	[m²]	Projektionsfläche des sich drehenden Rotors
A _{rep}	[m²]	Repräsentative Fläche eine Blattes
A _{Rohr}	[m²]	Querschnittsfläche Rohrprüfstand
A _{serr}	[mm]	Amplitude der Serration
b_B	[m]	Breite eines Blattes
b_{rep}	[m]	Repräsentative Breite eines Blattes
С	[m/s]	Fluidgeschwindigkeit
C _{fL}	[-]	Theoretischer Auftriebsbeiwert des Profils in reibungsfreier Strö- mung
C _{Mittel}	[m/s]	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
C _{Schall}	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
dA	[m²]	Flächendifferenz zwischen A_{orig} und A_{rep}
d_G	[mm]	Durchmesser des Turbulenzgitters
d_N	[m]	Durchmesser der Nabe
d _{Strebe}	[mm]	Strebendicke des Gitters
d_{vent}	[m]	Durchmesser Ventilator
f	[Hz]	Frequenz
$f_{m,Tz}$	[Hz]	Mittelfrequenz Terzband
$f_{m,Okt}$	[Hz]	Mittelfrequenz Oktavband
f _{o,Okt}	[Hz]	Obere Grenzfrequenz Oktavband
$f_{o,Tz}$	[Hz]	Obere Grenzfrequenz Terzband
f _{u,0kt}	[Hz]	Untere Grenzfrequenz Oktavband
$f_{u,Tz}$	[Hz]	Untere Grenzfrequenz Terzband
h	[mm]	Maschenweite des Gitters
h_B	[m]	Spannweite eines Blattes

Ι	[A]	Stromstärke
l	[m]	Sehnenlänge
n	[1/s]	Drehzahl
n_B	[-]	Anzahl Blätter
\widetilde{p}	[Pa]	Effektivwert des Schalldrucks
р	[Pa]	Schalldruck
p_0	[Pa]	Hörschwelle
P _{aero}	[W]	Aerodynamische Leistung
p_{dyn}	[Pa]	Dynamische Druckdifferenz
P _{el}	[W]	Leistung des Elektromotors
P _{mech}	[W]	Mechanischer Wirkungsgrad
R²	-	Bestimmtheitsmaß
R _{Luft}	[J/kg·K]	Spezifische Gaskonstante Luft
Tu _{Mittel}	[-]	Mittlerer Turbulenzgrad des Turbulenzgitters
U	[M/s]	Umfangsgeschwindigkeit
U_{El}	[V]	Elektrische Spannung
<i>॑</i> V	[m³/s]	Volumenstrom
Y	[m²/s²]	Spezifische Stutzenarbeit

Griechische Symbole

α	[°]	Anstellwinkel
γ	[°]	Staffelungswinkel
ζ	[-]	Widerstandsbeiwert
η_{aero}	[-]	Aerodynamischer Wirkungsgrad
η_{motor}	[-]	Elektrische Aufnahmeleistung
κ	[-]	Isentropenexponent Luft
λ_{Serr}	[mm]	Wellenlänge
π	[-]	Kreiszahl
ρ	[kg/m³]	Dichte

- σ [m/s] Standardabweichung
- φ [- , °] Lieferzahl, Phasenwinkel
- Ψ [-] Druckzahl

Abkürzungsverzeichnis

BB	Broadband (Breitband)
BFF	Blattfolgefrequenz
BPF	Blade Passing Frequency
BSLN	Baseline
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
FFT	Fast Fourier Transformation
ISO	Internationen Organisation for Standardisation
LHD	Latin Hypercube Design
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
OASPL	Overall Sound Pressure Level (Summenpegel)
STL	Surface Tesselation Language

1 Einleitung

Das Thema Lärm spielt heutzutage in vielen Bereichen eine große Rolle, sei es im Privaten oder im arbeitstechnischen Bereich. Dieser kann bei dauerhafter Einwirkung sogar die Gesundheit gefährden. Deshalb ist es wichtig Lärm bzw. Schallemissionen zu reduzieren, um die Schallimmissionen zu minimieren. Axialventilatoren erzeugen bei laufenden Rotoren aeroakustischen Schall, indem die Zuströmung auf die Vorderkanten trifft. Besonders bei hochturbulenter Zuströmung entstehen durch den hohen Turbulenzgrad stochastische Verwirbelungen, die durch Auftreffen an der Vorderkante zusätzlich Schall emittieren [1]. Durch Leading Edge Serrations, also sinusförmige Verzahnungen an den Vorderkanten der Rotorblätter mit definierten Amplituden und Wellenlängen, ist es möglich diesen Vorderkantenschall zu reduzieren und teilweise sogar die Aerodynamik zu verbessern. Durch die Variation eben dieser Parameter ändern sich maßgeblich die aeroakustischen und aerodynamischen Eigenschaften, teils positiv und teils negativ. Einige Variationen dieser Parameter wurden bereits eingehend untersucht und einige Gesetzmäßigkeiten festgestellt, doch die Fertigung der vielen Variationen kostet viel Zeit und Geld. Diese werden anschließend noch in langwidrigen Messreihen eingehend durch das Abmessen und Abfahren der Drosselkennlinien an Prüfständen vermessen und ausgewertet. Durch die Bildung eines Modells zur Prognose der aeroakustischen und aerodynamischen Eigenschaften könnte man ohne große Kosten und langen Messreihen die verschiedenen Einflussparameter variieren und die Wirkparameter und Gesetzmäßigkeiten erkennen und diese, bei Bedarf, genauer untersuchen.

Eine Studie hat ermittelt, dass das Latin Hypercube Sampling (eine statistische Methode der Versuchsplanung) in Verbindung mit dem anschließenden Training von künstlicher neuronaler Netze eine vielversprechende Methode ist, dieses Problem durch ein Minimum an Parametervariationen und Messungen zu lösen. Die Einflussparameter beschränken sich hier auf die Amplitude und Wellenlänge der Vorderkanten, Lieferzahl und Turbulenzgrad. Diese Thesis beschäftigt sich hauptsächlich mit der Auswertung und Analyse der aeroakustischen Kenngrößen und beantwortet die Frage, ob es möglich ist durch die Bildung eines oben genannten Modells präzise Prognosen der aeroakustischen Kenngrößen zu schaffen.

Dazu werden im Vorfeld die positiven und negativen Grenzen des Versuchsraumes definiert und ein Messplan nach dem Latin Hypercube Sampling erstellt, nach dessen Anordnung der Versuchspunkte im Versuchsraum den größtmöglichen Informationsgehalt verspricht. Die ermittelten Parametervariationen gilt es anschließend mittels "PTC Creo Parametric 3.0" zu Re-Parametrisieren und per Rapid Prototyping fertigen zu lassen, um dann den generierten Messplan randomisiert zu messen und die ermittelten Daten den künstlichen neuronalen Netzwerken, die in dieser Thesis als eine Art "Blackbox" von Seiten Dritter herangezogen werden [27], zum Training zuzuführen.

Die anschließende Validierung hinsichtlich der Prognosegüte der aeroakustischen Wirkparameter des Modells erfolgt durch drei randomisiert aus dem Messplan ermittelten und ausschließlich zur Validierung genutzten Versuchspunkte. Die weiterführende Analyse der generierten Prognosen umfasst eine Betrachtung des Zeit- und Frequenzbereichs und diskutiert, neben dem totalen Gesamtpegel, ebenfalls die breitbandigen, tonalen und BPF-Anteile der gemessenen Parametervariationen der Leading Edge Serrations. Diese werden eingehend diskutiert und auf Gesetzmäßigkeiten hin untersucht. Abschließend folgt ein Abgleich aerodynamischer Kenngrößen mit einer Voruntersuchung, da dort einige Variationsparameter (die im Versuchsraum liegen) mit dem Prognosemodell verglichen und validiert werden können.

1.1 Leading Edge Serrations

Bei Leading Edge Serrations handelt es sich um eine Verzahnung der Vorderkante von Tragflügeln bzw. Ventilatorblättern, die der Reduzierung des Vorderkantenschalls dienen. Da durch das Auftreffen der Strömung an der Vorderkante, der meiste Schall entsteht, ist dort auch das größte Schallreduktionspotential. Auf Abbildung 1-1 ist ein Rotorblatt mit Leading Edge Serrations, das unter anderem im Rahmen dieser Thesis vermessen wird, exemplarisch dargestellt. Wie zu erkennen ist haben die Rotorblätter an der Vorderkante sinusförmige Verzahnungen. Diese können unterschiedlichste Amplituden und Wellenlängen haben und somit auch verschiedenste aerodynamische und aeroakustische Eigenschaften.



Abbildung 1-1: Leading Edge Serrations

1.2 Motivation

Leading Edge Serrations sind Vorderkantenzacken an Tragflügeln bzw. Rotorblättern. Diese sind bioinspiriert, d.h. sie wurden den Tuberkeln von Blauwalen und Federn von Eulen nachempfunden (Abbildung 1-2). Da diese Tiere sich, dank der Evolution, in ihren Umgebungen sehr leise und effizient fortbewegen können hat man sich erhofft hier einen Nutzen für die Technik herausziehen zu können.



Abbildung 1-2: Federsaum einer Eulenfeder [17] und die Tuberkel eines Blauwals [18]

Diverse Vorversuche haben gezeigt, dass Ventilatorblätter mit Leading Edge Serrations bessere aeroakustische Eigenschaften haben als Ventilatorblätter ohne. Die Vorderkantenmodifikationen können durch eine Sinusfunktion beschrieben werden. Sie besitzen eine klar definierte Amplitude und Wellenlänge.

Dabei variieren die Parameter und Berandungen der Leading Edge Serrations. Im ISAVE der Hochschule Düsseldorf wurde, eigens zur Erforschung von Leading Edge Serrations, ein Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136 und DIN ISO 5801 erbaut.

An ruhenden Tragflächen hat es hierzu allgemein bereits einige Versuche im Windkanal gegeben. An Axialventilatoren sind die Leading Edge Serrations noch weitestgehend unerforscht. Chaitanya et al. hat herausgefunden, dass durch die Vorderkantenverzahnungen eine leichte Verringerung des Hinterkantenschalls stattfindet. Zudem findet auch ein Einfluss auf auf die Grenzschichtdicke statt [19]. Versuche von Corsini et al. haben gezeigt, dass der Schallleistungspegel um bis zu 2,3 dB gesenkt werden kann [20]. Biedermann et al. sind neben anderen durchgeführten Studien ebenfalls zu dem Entschluss gekommen, dass das größte Potential Vorderkantenschall zu reduzieren, bei hohen Amplituden in Verbindung mit kleinen Wellenlängen liegt [21].

1.3 Forschungsfrage

Alle möglichen Parametervariationen von Amplitude und Wellenlänge per Rapid Prototyping zu konstruieren und anschließend im Rohrprüfstand zu vermessen würde sehr viel Zeit und Geld kosten. Die Forschungsfrage lautet daher:

Ist es möglich, ein aeroakustisches Prognosemodell auf Basis experimenteller Vermessungen von Leading Edge Serrations zu generieren, welches unter anschließender Einspeisung der Messdaten in künstliche neuronale Netze eine spektrale und globale Prognose der Schallabstrahlung und -reduktion als auch der aeroakustischen Wirkzusammenhänge der Parametervariationen zulässt?

Hierfür werden mittels statistischer Versuchsplanung Parametervariationen festgelegt und im Rohrprüfstand vermessen, womit die künstlichen neuronalen Netzwerke trainiert werden. Anschließend werden die Ergebnisse des Modells mit drei randomisiert ausgewählten Versuchspunkten validiert und hinsichtlich der Prognosegüte und Generalisierbarkeit untersucht.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Das folgende Kapitel widmet sich dem menschlichen Gehör, dem Schall und den wichtigsten Grundlagen der Aeroakustik und Strömungsmechanik. Diese Thesis behandelt hauptsächlich das Gebiet der Aeroakustik. Da bei der Messreihe im Gesamten jedoch beide Aspekte gemessen und untersucht werden, wird hier ebenfalls auf die Grundlagen der Strömungsmechanik eingegangen.

2.1 Aeroakustische Grundlagen

Das folgende Kapitel widmet sich den Grundlagen der Aeroakustik und beinhaltet somit den menschlichen Hörbereich und erläutert wichtige Definitionen des Schalls. Es werden ebenfalls die FFT, die Schallentstehung bei Ventilatoren und die Funktionsweise von spektralen Filtern erläutert.

2.1.1 Der menschliche Hörbereich und der Schall

Das menschliche Gehör ist in der Lage Frequenzen von rund 16 - 16000 Hz wahrzunehmen [6]. Es hat damit einen hohen Dynamikbereich. Frequenzen, die unter 16 Hz liegen sind für den Menschen nicht wahrnehmbar und werden Infraschall genannt, während Frequenzen über 16 kHz Ultraschall bezeichnet werden und ebenfalls nicht wahrnehmbar sind. Die Hörschwelle, welche den Schalldruck des leisesten hörbaren Geräusches wiederspiegelt und sich im Laufe des menschlichen Lebens ändern kann, ist mathematisch bei $2 \cdot 10^{-5}$ Pa festgelegt.

Als Schall wird die sich wellenartig ausbreitende räumliche und zeitliche Druckänderung eines elastischen Mediums bezeichnet. Der Schall wird durch Schwingungen der Luftteilchen übertragen, wie auf Abbildung 2-1 zu sehen ist. Das dazugehörige Maß ist der Schalldruck in [Pa]. Die Schallgeschwindigkeit beträgt dabei $c_{Schall} = 343$ m/s. Dabei spielt die Frequenz aber ebenfalls eine wichtige Rolle. Sie ändert maßgeblich die Empfindung eines Tons.



Abbildung 2-1: Darstellung der Schallausbreitung [5]

In Abbildung 2-2 sind der Gleichanteil \overline{b} , der p_{amb} entspricht, und der Wechselanteil b, der den Druckschwankungen des Schalls entspricht, dargestellt. Ein Mikrofon kann die Druckschwankungen aufnehmen und in ein elektrisches Signal umwandeln. Der Gleichanteil wird dabei vom Mikrofon nicht aufgenommen, da ein Mikrofon nur die Druckschwankungen messtechnisch erfassen kann. Über die Jahrzehnte hinweg wurden viele verschiedene Mikrofontypen entwickelt, die alle ihre jeweiligen Vor- und Nachteile besitzen. Deshalb ist im Vorfeld einer Messreihe genau abzuwägen, welcher Mikrofontyp sich am besten für die jeweilige Messung eignet. Im Rahmen wieder Thesis wurden ¹/₄"-Kondensatormikrofone verwendet.



Abbildung 2-2: Schalldruckschwankungen [7]

Man behilft sich in der Akustik mit der logarithmischen Darstellung des Schalldruckpegels in [dB], da dieser sinnvoll auf den menschlichen Hörbereich angepasst ist.

Dieser bezieht sich auf den Effektivwert des Schalldrucks, der wie folgt definitert ist.

$$\tilde{p} = \frac{p}{\sqrt{2}}$$
 Formel 2-1

$$L_P = 20 \log \cdot \frac{\hat{p}}{p_0} = 10 \log \cdot (\frac{\hat{p}}{p_0})^2$$
 Formel 2-2

Wobei

 L_P = Schalldruckpegel in [dB] \tilde{p} = Effektivwert des Schalldrucks in [Pa] p_0 = Hörschwelle = 2 · 10⁻⁵ Pa

Die Hörschwelle, die bei $2 \cdot 10^{-5}$ Pa festgelegt ist, entspricht also 0 dB. Die Schmerzgrenze des menschlichen Gehörs liegt bei 20 Pa, also bei 120 dB. Ist der Mensch diesem Schalldruckpegel ausgesetzt, erleidet das Gehör schon nach kurzer Zeit irreparable Schäden. Eine Verdopplung des jeweiligen Schalldrucks erhält man bei +6 dB und eine Verzehnfachung bei +20 dB. Theoretisch kann man auch negative dB-Werte berechnen. Diese ergeben gegebenenfalls durchaus Sinn, sie sind nur nicht vom Menschen wahrnehmbar.

Ein ebenfalls wichtiges Maß in der Akustik ist der Schallleistungspegel. Dieser sagt aus, welche Leistung z.B. eine Maschine hat. Diese Größe ist, im Gegensatz zum Schalldruckpegel, ortsunabhängig und bezieht sich allein auf die Maschine. Also ist sie abstandsunabhängig. Sie verdoppelt sich bei einem Zuwachs von 3 dB und halbiert sich dementsprechend bei einer Minderung um 3 dB. Dieser wird wie folgt berechnet.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = L_P + 10 \log(\frac{A_{Kugel}}{A_0})$$
 Formel 2-3

Der Schallleistungspegel wird in dieser Thesis nach DIN EN ISO 5136 bestimmt und ist wie folgt definiert.

$$L_W = \overline{L_P} + (10\log\frac{s}{s_0} - 10\log\frac{\rho \cdot c_{Schall}}{(\rho \cdot c)_0}) \text{ dB}$$
 Formel 2-4

Wobei

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$
 die Querschnittsfläche des Messkanals in [m²]
 $s_0 = 1 m^2$
 $(\rho \cdot c)_0 = 400 N \cdot s/m^3$

Laut Norm muss die Messdauer für Terzbänder mit $f \le 160$ Hz mindestens 30 s betragen. Bei Terzbändern mit Mittenfrequenzen $f \ge 200$ Hz muss die Messdauert mindestens 10 s betragen. Die Messmikrofone (drei oder mehr) sind nach DIN EN ISO 5136 auf den Umfang verteilt gleichmäßig verteilt fest angebracht. Außerdem ist ein Strömungsgleichrichter auf der Auslassseite des Axialventilators erforderlich [28].

2.1.2 Fast Fourier Transformation

Möchte man eine Schallprobe untersuchen, um eventuelle Schallentstehungsmechanismen besser nachvollziehen zu können, macht es nicht viel Sinn das Zeitsignal zu betrachten. Man sollte die Schallprobe spektral betrachten und eine FFT durchführen. Hierzu wird das Signal in seine einzelnen signifikanten sinusförmigen Zeitfunktionen zerlegt. Auf der Abszisse wird die Frequenz aufgetragen, während auf der Ordinate die Amplitude (Schalldruckpegel) aufgetragen wird. Dies ist auf Abbildung 2-3 dargestellt. Theoretisch kann jedes periodische Signal durch eine unendliche Anzahl an Sinusfunktionen dargestellt werden.



Abbildung 2-3: Überführung in das Frequenzspektrum [11]

Die Definitionsgleichung der FFT lautet wie folgt.

$$h_1(\omega) = \int_{-T}^{T} h_1(t) e^{i\omega t} dt$$
 Formel 2-5

Das Parceval-Theorem besagt, dass die Energie einer Schwankungsgröße in der Zeit- und Frequenzebene gleich ist und ist wie folgt definiert.

$$\frac{1}{T}\int_0^T h(t)^2 dt = \frac{1}{\omega_{max}}\int_0^{\omega_{max}} h(\omega)^2 d\omega$$
 Formel 2-6

Der komplette hörbare Bereich von 16 Hz bis 16 kHz kann in 10 Oktaven oder 30 Terzen eingeteilt werden. Die 10 Oktavbereiche sind zehn Frequenzverdopplungen, also eine logarithmische Einheit, welche eine bessere Übersichtlichkeit bietet. Eine Oktave kann jedoch noch in drei gleiche Teile unterteilt werden. Dann spricht man von Terzen [8]. In Abbildung 2-4 ist beispielhaft ein Spektrum abgebildet, welches Oktaven, Terze und ein Schmalband exemplarisch darstellt. Dort kann man die klaren Unterschiede und Informationsgehalte erkennen, die die jeweilige Filterung mit sich bringt (wird in Kapitel 2.1.4 erläutert).



Abbildung 2-4: Darstellung von Oktaven, Terzen und Schmalband. [23]

Die unteren und oberen Grenzfrequenzen f_u und f_o der jeweiligen Frequenzbänder lassen sich bei Oktav- und Terzschritten berechnen. Die Mittenfrequenz hat die Variable f_m .

Die Grenzfrequenzen der jeweiligen Oktavbänder kann man mit folgenden Formeln berechnen.

$$f_{m,Okt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot f_{o,Okt}$$
 Formel 2-7

$$f_{m,Okt} = \sqrt{2} \cdot f_{u,Okt}$$
 Formel 2-8

Die Grenzfrequenzen der jeweiligen Terzbänder kann man mit folgenden Formeln berechnen.

$$f_{m,Tz} = \sqrt[6]{2} \cdot f_{u,Tz}$$
 Formel 2-9

 $f_{o,Tz} = \sqrt[3]{2} \cdot f_{u,Tz}$ Formel 2-10

Die Darstellung in diesen Spektren ist vorteilhaft gegenüber Einwertmessungen und ein Terzband kann bereits Informationen über tonale Komponenten bereitstellen. Ein weiterer positiver Aspekt der Oktav- und Terzspektren ist, dass diese nur wenige Datenpunkte aufweisen. Ein Schmalbandspektrum hingegen hat massenhaft Datenpunkte, liefert daher aber auch die meisten Informationen.

Um letztendlich den Gesamtpegel zu berechnen muss man die einzelnen Frequenzanteile energetisch summieren bzw. integrieren [12].

$$\left(\frac{p_i}{p_0}\right)^2 = 10^{\frac{L_i}{10}}$$
 Formel 2-11

$$LP_{Ges} = 10 \log(\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^2 + \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^2 + \dots + \left(\frac{p_n}{p_0}\right)^2)$$
 Formel 2-12

$$LP_{Ges} = 10 \log(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_1}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}})$$
 Formel 2-13

2.1.3 Schallentstehung bei Ventilatoren

Die aerodynamische Schallentstehung kann in drei Arten differenziert werden: Fluidverdrängung, wirkende Kräfte auf umströmte Flächen und die Turbulenz in der freien Strömung. Diese werden auch Monopol-, Dipol- und Quadrupolquellen bezeichnet [1], wie auf Abbildung 2-5 gegliedert dargestellt ist.



Abbildung 2-5: Arten der Schallentstehung [4]

Bei einem Ventilator dominieren bei der Schallentstehung die Dipolkräfte [4], welche die Wechselkräfte zwischen den Berandungen der Ventilatorblätter und der Strömung und umgekehrt sind. Der Faktor des Turbulenzgrades (Kapitel 3.3) spielt bei den Dipol-Schallquellen ebenfalls eine wichtige Rolle. Eine weitere Quelle für Dipolkräfte sind die stationären und instationären Kräfte an den Schaufeln des Laufrads, sowie die Profilnach-läufe und Sekundärströmungen [24].

Grundsätzlich hängen die Entstehung und Ausbreitung von Schall davon ab, ob eine laminare oder turbulente Strömung vorliegen. In diesem Versuch liegt jedoch nur turbulente Strömung vor, weshalb in dieser Thesis nicht auf die laminare Strömung eingegangen wird.



Abbildung 2-6: Angeströmtes Tragflügelprofil mit Kennzeichnung des Grenzschichtverlaufes und Nachlaufdellen [1].

Bei Anströmung entsteht, je nach Turbulenzgrad, eine laminare oder turbulente Grenzschicht, die in Abbildung 2-6 exemplarisch turbulent dargestellt ist. Diese emittiert breitbandigen Schall. Die Schallabstrahlung wird zur Hinterkante hin jedoch größer. Vorderkantenschall ist niederfrequent, während der Hinterkantenschall hochfrequent ist [1].

In Abbildung 2-7 ist ein typisches Spektrum zu sehen, das ein Veniltator erzeugt. Der Wirbellärm der turbulenten Zuströmung erstreckt sich über eine breitbandige Frequenz mit gemäßigtem Pegel im niedrigen Frequenzbereich, während sich der Wirbellärm der turbulenten Abströmung über einen mittleren bis hohen Frequenzbereich erstreckt. Der Drehklang erzeugt dabei eine tonale Frequenzkomponente im niedrigen Frequenzbereich. Über den mittleren Frequenzbereich erstrecken sich die Interferenzklänge, die durch die Blattfolgefrequenz (BPF) ausgelöst wird.



Abbildung 2-7: Frequenzspektrum eines Ventilatorgeräuschs [4]

2.1.4 Spektrale Filter und ihre Funktionsweise

Mit Filtern kann man die jeweiligen Schallpegelanteile bewerten und im Spektralbereich in definierten Bandbreiten darstellen. Sie funktionieren, indem sie das Spektrum des Ausgangssignals mittels einer Übertragungsfunktion neu berechnen. Um z.B. tonale Komponenten zu ermitteln und im spektralen Bereich gut sichtbar im Diagramm darzustellen ist es notwendig einen Schmalbandfilter (Terzbereich) zu nutzen, da die tonalen Komponenten auf Grund von zu breiten Frequenzdarstellungen sonst nicht dargestellt werden. Der Bandpassfilter z.B. lässt nur eine definierte Bandbreite durch seinen Durchlassbereich und die Frequenzen außerhalb des Durchlassbereichs sperrt er, wie auf Abbildung 2-8 zu erkennen ist [14]. Dieses Filter wird häufig als Oktav- oder Terzfilter eingesetzt.



Abbildung 2-8: Funktionsweise eines Bandpassfilters [14]

Die Bandbreite eines Filters ist über die Verringerung von 3 dB beidseitig zur Mittenfrequenz f_m definiert (Abbildung 2-9), während die Filtergüte in dB/Okt die Filterflankensteilheit darstellt. Je höher die Steigung der Filterflanke, desto höher die Filtergüte [14]. Breitbandfilter haben dabei eine relativ hohe Bandbreite und Schmalbandfilter eine dementsprechend kleine Bandbreite. Breitbandfilter eignen sich dabei gut für instationäre Messgrößen [15].



Abbildung 2-9: Darstellung der Dämpfung eines Filters [14]

Ein weiterer wichtiger Filter ist der Medianfilter. Dieser ordnet die Werte erst in steigender oder fallender Ordnung und liefert anschließend den Wert, der in der Mitte dieser Reihenfolge liegt. Der Vorteil liegt darin, dass starke Abweichungen herausgefiltert werden [25].

Die im Rahmen dieser Thesis gemessenen Daten wurden im Vorfeld der Auswertung in Matlab mit einem Medianfilter bearbeitet, um alle tonalen Komponenten zu entfernen. Aus dem Originalsignal wurden die Anteile der Blattfolgefrequenz entfernt und durch die Medianfilter-Anteile ersetzt.

2.2 Strömungsmechanische Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert die für diese Thesis wichtigen Grundlagen der Strömungsmechanik. Dies beinhaltet die Strömungsarten, wobei hauptsächlich auf die turbulente Strömung eingegangen wird. Zusätzlich werden die wichtigsten Kennzahlen erläutert und auf die Rotorblattgeometrie wird erläutert.

2.2.1 Strömungsarten

Es gibt zwei Arten von Strömungen von Fluiden in einem Rohr, welche sich von Grund auf unterscheiden: die laminare und die turbulente Strömung. Bei der laminaren Strömung strömt das Fluid in geordneten Schichten, während bei der turbulenten Strömung eine unregelmäßige Schwankungsbewegung diese überlagert. Dadurch wird die Strömung verstärkt vermischt [3]. Die dimensionslose Reynoldszahl, die nach dem Physiker Osborne Reynolds benannt wurde, sagt aus, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist.

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot d}{\eta} = \frac{c \cdot d}{\nu}$$
 Formel 2-14

Wobei

 ρ = Dichte des Fluids in [kg/m³]

c =Strömungsgeschwindigkeit in [m/s]

d =Charakteristischer Durchmesser/Länge des Körpers in [m]

 η = Dynamische Viskosität des Fluids in [Pa·s]

 ν = Kinematische Viskosität des Fluids in [m²/s]

Bis zu der kritischen Reynoldszahl $Re_{krit} = 2300$ sind Strömungen normalerweise laminar. Ab einem Wert von Re > 2300 sind die Strömungen turbulent.



Bei der laminaren Strömung liegt das Geschwindigkeitsprofil parabolisch vor, während dies bei der turbulenten nicht der Fall ist, wie auf Abbildung 2-10 dargestellt. Die maximale Geschwindigkeit bei der laminaren Strömung ist in der Rohrachse doppelt so groß wie die mittlere Geschwindigkeit. Bei der turbulenten Strömung ist die Geschwindigkeit in der Rohrachse nur um den Faktor 1,25 größer als die mittlere Geschwindigkeit [3].

Abbildung 2-10: Darstellung der Geschwindigkeitsprofile von laminaren und turbulenten Strömungen [3]

2.2.2 Dimensionsanalyse - Kennzahlen der Strömungsmechanik

In der Strömungsmechanik gibt es neben der Reynoldszahl noch einige andere Kennzahlen, die eine wichtige Rolle spielen. Diese Kennzahlen werden entwickelt um physikalische Größen allgemeingültig zu bestimmen und die Anzahl der Einflussparameter zu reduzieren. Beispielsweise ist die Reynoldszahl unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und die Druckzahl unabhängig von der Drehzahl.

Durch die verschiedenen geometrischen Eigenschaften der Turbulenzgitter (Kapitel 3.3) entstehen jeweils unterschiedliche Druckverluste, die größtenteils durch Reibung an den Streben resultieren. Der einheitenlose Widerstandsbeiwert ζ ist dadurch für jedes Turbulenzgitter unterschiedlich und wurde im Rahmen von Voruntersuchungen empirisch bestimmt. Diese Werte sind in Tabelle 2-1 dargelegt.

$$p_{verl} = \zeta \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho$$
 Formel 2-15

	G00	G01	G02	G03	G04	G05
ζ	0	1,322	1,546	1,499	1,311	1,278

Tabelle 2-1: Empirisch ermittelte Widerstandsbeiwerte G00-G05.

Die dimensionslose Kennzahl Druckzahl beschreibt das Verhältnis der spezifischen Stutzenarbeit zur Umfangsgeschwindigkeit der Strömungsmaschine. Diese kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\Psi = \frac{2 \cdot Y}{U^2} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot U^2}$$
 Formel 2-16

Der aerodynamische Wirkungsgrad ist das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, also die aerodynamische Leistung zur elektrischen Leistung. Definiert ist dieser durch folgende Formel:

$$\eta_{aero} = \frac{P_{aero}}{P_{mech}} = \frac{P_{aero}}{\eta_{motor} \cdot P_{el}} = \frac{\Delta p_{fan} \cdot \dot{v}}{U_{el} \cdot I}$$
 Formel 2-17

Die Lieferzahl, in der Literatur auch Durchflusszahl oder Volumenzahl genannt, beschreibt das Verhältnis vom Volumenstrom zum Querschnitt einer Strömungsmaschine. Diese kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\varphi = \frac{\dot{v}}{A \cdot U} = \frac{4 \cdot \dot{v}}{\pi \cdot D_{rep}^2 \cdot \pi \cdot n \cdot d_{vent}}$$
 Formel 2-18

In Abbildung 2-11 und Abbildung 2-12 sind exemplarisch eine Wirkungsgradkennlinie und eine Drosselkennlinie zu sehen. Der hier gemessene Rotor hat am Punkt mit dem höchsten Wirkungsgrad seinen aerodynamischen Bestpunkt, in diesem exemplarischen Fall η =0,453. Er hat somit einen Wirkungsgrad von 45,3 %. Das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand besitzt in diesem aerodynamischen Bestpunkt die größte Effizienz. Anhand diesem Auslegungs- bzw. Betriebspunkt des Rotors können nun Aussagen über die Strömungs- und Druckverhältnisse bei entsprechender Lieferzahl gemacht werden. Der Stall-Bereich (Strömungsabriss), der auf Abbildung 2-12 dargestellt ist gibt den Lieferzahlbereich an, bei dem der Druck von großer zu kleiner Lieferzahl im Verlauf abnimmt und sprunghaft abfällt.



Abbildung 2-11: Darstellung einer Wirkungsgradkennlinie Wirkungsgrad η über Lieferzahl φ



Abbildung 2-12: Darstellung einer Drosselkennlinie Druckzahl Ψ über Lieferzahl ϕ

2.3 Geometrie der Rotorblätter

Die Geometrie der Rotoren bzw. Tragflügeln spielt generell eine sehr große Rolle, da sie die Aeroakustik und Aerodynamik maßgeblich mitbestimmt. Daher ist es unabdingbar sich im Vorfeld darüber Gedanken zu machen welches Profil man für seinen Blätter wählt. Dabei gibt es einige gängige Tragflügelprofilfamilien, wie z.B. die Göttinger Profile oder die C-Profile. Für diesen Versuch wurde, wie bei den vorangegangenen Arbeiten, das NACA-Blattprofil gewählt. Diese sind eines von mehreren numerisch entwickelten Profilen [1]. Die Dimensionierung der Axialventilatorblätter sind in Tabelle 2-2 dargestellt.

Einflussgröße	Wert	Dimension	
Blattprofil	NACA65-(12)10	[-]	
Gesamtdurchmesser	394	[mm]	
Nabendurchmesser	200	[mm]	
Sehnenlänge	73	[mm]	
Spannweite	97	[mm]	

Tabelle 2-2: Dimensionierung des Rotors und der Rotorblätter.

Auf Abbildung 2-13 ist das Profil eines Rotorblattes exemplarisch dargestellt. Die Aufschlüsselung der Indizes der Rotorblattbezeichnung sind in Tabelle 2-3 dargestellt. Der Profilanstellwinkel α der Blätter beträgt 7° und der Staffelungswinkel γ beträgt 24° (Abbildung 2-14).



Abbildung 2-13: NACA 65(12)-10 Rotorblattprofil



Abbildung 2-14: Profilanstell- und Staffelungswinkel α und γ [1]

Bezeichnung: NACA 65-(WX)YZ	Bedeutung		
WX	$10 \cdot c_{fL}$		
YZ	Maximale Profildicke d in % von l		

Tabelle 2-3: Bezeichnung des NACA 65-Profils [1].

3 Experimenteller Versuchsaufbau

Für die aeroakustische und aerodynamische Vermessung von Leading Edge Serrations hat es sich als vorteilhaft erwiesen die Messungen mit einem Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136 und DIN ISO 5801 durchzuführen, da man mit diesem die aeroakustischen und aerodynamischen Messdaten simultan messen kann. In diesem Kapitel wird der Rohrprüfstand mit seinen Einbauten erläutert, es wird auf die Mikrofonpositionierung und Messparameter eingegangen und die Erzeugung hochturbulenter Strömung wird definiert.

3.1 Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136

Folgend ist der schematische Aufbau des Rohrprüfstandes abgebildet. Dieser ist an die Normen DIN EN ISO 5136 und DIN ISO 5801 angelehnt.



Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau des Rohrprüfstandes [2]

Mittels des Rohrprüfstandes nach DIN EN ISO 5136 und DIN ISO 5801 ist es möglich simultan aeroakustische und aerodynamische Messgrößen zu erfassen. Die Luft wird auf Abbildung 3-1 linksseitig an der Einlaufdüse eingesogen. Der Schalldämpfer sorgt dafür, dass Störgeräusche, die durch Ansaugung entstehen könnten, vermieden werden. Das Prandtl'sche Staurohr misst die Geschwindigkeit der Luft, um auf den Volumenstrom schließen zu können. Anschließend werden die akustischen Messgrößen saugseitig über ein Mikrofonarray erfasst. Dieses besteht aus drei äquidistant angeordneten ¹/4" Kondensatormikrofonen. Über eine Druckringleitung wird die statische Druckdifferenz einmal saugseitig und druckseitig gemessen. Dazu sind jeweils sechs Bohrungen integriert, die über den Umfang in gleichem Abstand angeordnet sind. Vor dem Ventilator ist eines der Turbulenz-Gitter installiert (300 mm vor dem Rotor), um eine hochturbulente Anströmung zu gewährleisten. Die Drehzahl des Ventilators wird mittels eines triaxialen Beschleunigungssensors bestimmt, die während der Messung konstant gehalten wird. Damit der Drall in Druckenergie umgewandelt werden kann ist hinter dem Ventilator ein sternförmiger Gleichrichter installiert. Vor dem reflexionsarmen Abschluss ist eine Schlitzrohrsonde nach DIN ISO 5136 installiert, die aus einem Turbulenzschirm mit Mikrofon besteht, welcher Akustikmessungen für Validierungszwecke misst [2]. Die Drossel hinter dem reflexionsarmen Abschluss dient zum Herbeileiten von verschiedenen Lastzuständen und ist stufenlos elektrisch verfahrbar.

3.2 Mikrofonpositionierung und Messparameter

Auf Abbildung 3-2 sind die drei äquidistant angeordneten ¹/4"-Messmikrofone zu sehen (rot eingekreist). Diese sind wandbündig installiert, um Verfälschungen der Messergebnisse vorzubeugen. Dabei handelt es sich saug- sowieso druckseitig um Kondensatormikrofone des Typs Mk 301.



Abbildung 3-2: Äquidistant angeordnete Messmikrofone (exemplarisch)

Die Drehzahl wird während der Messung konstant bei 2000/min gehalten, während mit einer Abtastrate von 44,1 kHz und einer Blockgröße von 32768 gemessen wird. Der zu untersuchende Frequenzbereich liegt dabei zwischen 10 bis 10000 Hz und spektrale Messdaten bis 17 kHz können mit einer Frequenzauflösung von $\Delta f = 1,3$ Hz analysiert werden. Die anschließende FFT wird mit einem Hanning Fenster und einem Overlap von 66% durchgeführt, wobei die die Messungen 300 mal gemittelt und anschließend gespeichert werden.

$$\Delta f = \frac{1}{Blocklänge} = \frac{Abtastrate}{Blockgröße}$$
 Formel 3-1

3.3 Erzeugung hochturbulenter Zuströmung

Die Turbulenzgitter G01-G05 (Abbildung 3-3 bis Abbildung 3-7) sind im Rohrprüfstand 300 mm vor dem Rotor installiert und sollen eine hochturbulente Zuströmung zum Axialventilator gewährleisten. G00 entspricht einer Messung ohne Turbulenzgitter. G01-G04 sind aus Holz gefertigt, während G05 auf Grund seiner feineren Maschenstruktur aus Kunststoff gefertigt ist. Diese wurden bereits in diversen Vorversuchen genutzt und ihre Parameter sind in Tabelle 3-1 dargelegt.

Gitter	d _G	C _{mittel}	Tu _{mittel}	σ	d _{Strebe}	h	h/d
	[mm]	[m/s]	[%]	[m/s]	[mm]	[mm]	[-]
G00	-	13,32	2,60	0,35	-	-	-
G01	400	11,27	12,1	1,36	20	100	5
G02	400	11,97	9,60	1,15	16	80	5
G03	400	11,77	7,50	0,90	12	60	5
G04	400	11,58	5,30	0,67	8	40	5
G05	400	12,19	3,60	0,43	4	20	5

 Tabelle 3-1: Experimentell bestimmte Parameter G00-G05 [26].

Der Turbulenzgrad drückt die Intensität einer turbulenten Strömung aus.

$$Tu = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{c_x^2} + \overline{c_y^2} + \overline{c_z^2})}}{c_{\infty}}$$
 Formel 3-2

Die Turbulenzgitter sorgen dafür, dass die Geschwindigkeitsschwankungen der Turbulenz in allen Raumachsen gleich sind und keine dominanter als die andere ist. Die Turbulenz ist somit isotropisch.

Die isotrope Turbulenz ist wie folgt definiert.

$$Tu = \frac{\sqrt{c^2}}{\bar{c}}$$
 Formel 3-3

$$u' = v' = w'$$

Formel 3-4



Ohne Einbau eines Turbulenzgitters ist der Turbulenzgrad zur Rohrmitte hin niedriger als in den Randbereichen, wo man den Einfluss der Grenzschicht gut erkennen kann. Auf Abbildung 3-8 ist erkennbar, dass der Einbau eines Turbulenzgitters den Turbulenzgrad essentiell erhöht und dabei für einen, über den Querschnitt größtenteils gleichmäßigen Turbulenzgrad sorgt, was hier anhand von G00 und G01 exemplarisch dargestellt wird. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit \overline{U}_0 hingegen sinkt bei Einbau von G01 in der Mitte des Querschnitts ab, sodass eine relativ gleichmäßige Verteilung von \overline{U}_0 auftritt (Abbildung 3-9).



Abbildung 3-8: Änderung von Tu durch Installation von G01 [16]



Abbildung 3-9: Änderung von \overline{U}_0 durch Installation von G01 [16]
4 Versuchsplanung

Das folgende Kapitel erläutert die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung, des Latin Hypercube Samplings und zeigt ebenfalls die Maße der Parametervariationen und die Versuchspunkte zur Validierung der Leading Edge Serrations auf. Außerdem wird die Randomisierung der Messpläne erläutert, künstliche neuronale Netze werden kurz erläutert und die Einfluss-, Zwischen- und Zielgrößen werden definiert.

4.1 Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)

Die statistische Versuchsplanung gewinnt immer mehr an Bedeutung. Sie besteht aus Methoden, um Versuchsreihen und Experimente effizient zu planen. Dabei spielen natürlich auch Computersimulationen, die heutzutage sehr wichtig sind, eine große Rolle [13]. Dabei wird u.a. Latin Hypercube Sampling (LHS) genutzt, um den Versuchsraum unter maximaler Informationsausbeute abzutasten und anschließend in Form von Modellen zu beschreiben. Der Vorteil des LHS liegt da drin, dass keine Pseudowiederholungen einzelner Parametervariationen vorkommen, weil jeder Punkt für alle Parameter individuelle Einstellungen besitzt. Daher eigtnet sich das LHS für das Training von KNN.

4.2 Latin Hypercube Sampling

In dieser Thesis wird der Versuch nach dem LHD durchgeführt. Hierfür werden von Beginn an Maximalwerte der Parameter festgelegt, um die Eckpunkte für einen Versuchsraum zu schaffen. Diese sind als Absolutwerte in Tabelle 4-1 dargestellt.

	A _{serr}	λ	φ	Tu
	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Minimum	6	4	0,13	2,6
Maximum	22	22	0,21	12,1

Tabelle 4-1: Absolutwerte der Eckpunkte der Modifikationsparameter.

Jeder definierte Punkt in diesem System existiert nur einmal und liegt entweder auf den Grenzpunkten oder dazwischen, um ein Maximum an Informationen zu gewährleisten. Die Messdaten, die mittels des LHS ermittelt und aufgenommen werden, bilden letztenendes die Grundlagen für das Training der KNN.

Es gibt verschiedene Kriterien, nach denen eine Bewertung der Versuchspunktverteilung möglich ist, wie z.B. die Spaltenkorrelation oder das MaxiMin-Kriterium. In dieser Versuchsreihe wurden per Zufallskombination 15.000 verschiedene LHS Versuchsplänse generiert, aus denen mittels MaxiMin-Kriterium das Optimum gewählt wurde, das die größte Informationsausbeute voraussagt. Das MaxiMin-Kriterium ist ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Versuchspunkte im Versuchsraum [9].

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_f} (x_i - y_i)^2}$$
 Formel 4-1

Wobei

d zwischen zwei Versuchspunkten x, y x_i und y_i = Koordinaten der Versuchspunkte x, y *f*= Anzahl der Faktoren, Dimension des Versuchsraums

Um die Eckpunkte des Versuchsraumes ebenfalls abzudecken, wurde ein faktorieller Kern eines fünfstufigen DoE-Plans hinzugefügt. Diese beiden Versuchspläne ergeben den in dieser Thesis verwendeten Versuchsplan.

Die Parameter, die beim LHD einer Variation unterzogen werden sind Amplitude, Wellenlänge, Lieferzahl und Turbulenzgrad. Die daraus resultierenden Versuchspunkte sind auf Abbildung 4-1 dargestellt.

Der Turbulenzgrad wurde mittels G00-G05 variiert. Die Messpläne dieser Thesis befinden sich im Anhang.



Abbildung 4-1: Darstellung der Versuchspunkte im LHD

Mittels Interpolation ergeben sich die folgenden 18 verschiedenen Vorderkantenparameter der Leading Edge Serrations, die per Rapid Prototyping erstellt werden (Tabelle 4-2). Zu den Leading Edge Serrations wird ebenfalls eine BSLN konstruiert, um die Messwerte der Serrations aeroakustisch in Bezug setzen zu können.

 Tabelle 4-2: Vorderkantenparameter der Leading Edge Serrations.

A _{serr}	mm	22	8	20	22	22	6	12	6	16	6	10	18	14
λ	mm	6,25	4	22	22	4	22	8,5	4	17,5	19,75	15,25	10,75	13

A _{serr}	mm	17,68	7,52	20,72	10,64	15,28
λ	mm	21,91	4,63	11,74	17,77	9,94

4.3 Parameter der Leading Edge Serrations zur Validierung des Modells

Zur Validierung des Modells wurden drei der Versuchspunkte randomisiert bestimmt. Die ermittelten Messdaten werden nicht zum Training der KNN verwendet, sondern dienen lediglich zur Validierung der Prognose. Die Validierungspunkte im Versuchsraum sind auf Abbildung 4-2 dargestellt, während die Parameter der Leading Edge Serrations in Tabelle 4-3 dargestellt sind.



Abbildung 4-2: Darstellung der randomisiert bestimmten Validierungspunkte im LHD

A _{serr}	mm	17,68	18,00	22
λ	mm	21,91	10,75	22
φ	-	0,190	0,130	0,210
Tu	%	9,6	7,5	12,1

 Tabelle 4-3: Parameter der randomisiert bestimmten Validierungspunkte.

4.4 Randomisierung der Messpläne

Durch das Durchführen einer Messung in z.B einer Reihenfolge mit den geringsten Rüstzeiten des Prüstands, kann es u.a. durch Temperatur- oder Luftdruckschwankungen zu systematischen Fehlerfaktoren kommen. Dieser Fehlerfaktor würde im Laufe einer nicht randomisierten Messgröße theoretisch immer erheblicher, vor allem wenn mehrere Faktoren auftreten. Um den Fehlerfaktor unkontrollierbarer Störgrößen möglichst gering zu halten wird der Versuchsplan randomisiert abgefahren [13]. Dazu wurde per Microsoft Excel ein Zufallszahlengenerator genutzt, der den Messplan des LHS randomisiert ausgibt. Die Messungen benötigen mit Randomisierung erheblich höhere Rüstzeiten, jedoch ist der statistische Fehlerfaktor dadurch minimiert.

4.5 Künstliche neuronale Netze KNN

Im menschlichen Gehirn befinden sich Millarden von Neuronen. Diese sind durch Synapsen miteinander verbunden und arbeiten zusammen. Die Funktionsweise von KNN sind an das menschliche Gehirn angelehntund somit biosinspiriert. Die Neuronen der KNN, die das Hauptelement der KNN bilden, approximieren durch einen ständigen Informationsaustausch untereinander ihnen gestellte komplexe Problemstellungen [13]. Grundsätzlich lassen sich mit KNN Problemstellungen aus vielen Bereichen lösen, wie z.B. Wirtschaftswissenschaften, Statistik, aber auch technischer Herkunft. Sie zeichnen sich durch eine hohe Lernfähigkeit und einer großer Anzahl an Freiheitsgraden aus [10].

Das Training der KNN geschieht durch eine Fehlerrückführung und so findet eine Approximation der zu trainierenden Parameter statt. Die in dieser Thesis verwendeten KNN werden von Seiten Dritter [27] als Blackbox herangezogen und die Funktionsweise nicht genauer erläutert.

4.6 Einflussgrößen

Die Einflussgrößen, die in den KNN trainiert werden und in der Messreihe untersucht werden sind, wie im voran gegangenen Kapitel bereits erläutert, Amplitude und Wellenlänge der Leading Edge Serrations, sowie die Lieferzahl und der Turbulenzgrad.

Die Amplitude und Wellenlänge werden über die Sinusfunktion beschrieben. Die Amplitude der Leading Edge Serrations entspricht der doppelten Amplitude A (peak to peak-Wert) und die Wellenlänge der Periodendauer T.

$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot x + \varphi)$	Formel 4-2
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	Formel 4-3
$f = \frac{1}{T}$	Formel 4-4

Die Lieferzahl wurde bereits in Kapitel 2.2.2 und der Turbulenzgrad in Kapitel 3.3 definiert und erläutert.

4.7 Zwischengrößen

Folgend sind einige Zwischengrößen definiert, die zur Berechnung der benötigten Größen von Bedeutung sind.

Die repräsentative Breite eines Blattes ergibt sich durch das Abziehen der halben Amplitude von der Breite eines Blattes.

$$b_{rep} = b_B - \frac{A_{abs}}{2}$$
 Formel 4-5

Die repräsentative Fläche eines Blattes ist das Produkt aus der Spannweite eines Blattes und der repräsentativen Breite eines Blattes.

$$A_{rep} = h_B \cdot b_{rep}$$
 Formel 4-6

Die Flächendifferenz ergibt sich durch Abzug der repräsentativen Fläche eines Blattes von der originalen Fläche eines Blattes.

$$dA = A_{orig} - A_{rep}$$
 Formel 4-7

Die repräsentative Spannbreite eines Blattes ergibt sich durch die Division der repräsentativen Fläche eines Blattes durch die Spannweite eines Blattes.

$$h_{rep} = \frac{A_rep}{b_B}$$
Formel 4-8

Der repräsentative Durchmesser des komplettes Rotors berechnet sich durch die doppelte repräsentative Spannweite eines Blattes, wozu der Durchmesser der Nabe hinzuaddiert wird.

$$d_{Rep} = 2 \cdot h_{rep} + d_N \qquad \qquad \text{Formel 4-9}$$

Der Volumenstrom ergibt sich aus dem Produkt aus Lieferzahl, Fläche und Umfangsgeschwindigkeit des Rotors.

$$\dot{V} = \varphi_{abs} \cdot (\pi \cdot d_{N,orig} \cdot n) \cdot (A_R - n_B \cdot dA)$$
 Formel 4-10

Die Luftdichte ρ , die aussagt, wie viel Masse ein Kubikmeter Luft besitzt, wird wie folgt berechnet.

$$\rho = \frac{p_{amb}}{R_{Luft} \cdot (273, 15 \, K + T_{amb})}$$
Formel 4-11

Wobei

$$R_{Luft} = 287,1 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

Die dynamische Druckdifferenz ist wie folgt definiert.

$$p_{dyn} = \frac{c^2_{Mittel} \cdot \rho}{2 \cdot 1,05}$$
 Formel 4-12

Durch den Einbau eines Turbulenzgitters findet ein Druckverlust statt. Der ζ -Wert ist dabei, wie bereits erwähnt, turbulenzgitterspezifisch. Bei Turbulenzgitter G00 (also bei einer Messung ohne Turbulenzgitter) entspricht $\zeta = 0$.

$$\Delta p_{Verl} = \frac{\zeta \cdot (\sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn}}{\rho}})^2}{2 \cdot \rho}$$
 Formel 4-13

Die mittlere Umfangsgeschwindigkeit ist folgend definiert.

$$U'^2 = \pi \cdot n \cdot d_{rep}$$
 Formel 4-14

Die Schallgeschwindigkeit ist wie folgt definiert.

$$c_{Schall} = \sqrt{\kappa \cdot R_{Luft} \cdot T_{amb}}$$
 Formel 4-15

Wobei

$$\kappa = 1,402$$
$$R_{Luft} = 287,1 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

4.8 Zielgrößen

Die Zielgrößen zur Ermittlung der Aeroakustik sind der Schallleistungspegel $OASPL_{Total}$, dessen breitbandiger Anteil $OASPL_{BB}$ und dessen tonalen Anteilen $OASPL_{Tonal}$ zusammen. Diese beiden breitbandigen und tonalen Anteile setzen sich wiederrum aus den Pegeln der Terze zusammen, während sich der $OASPL_{BPF}$ aus den Schallpegeln von 200, 400, 600, 800, 1000 und 1200 Hz zusammensetzt.

Die Zielgrößen berechnen sich nach den Formeln 2-11 bis 2-13.

Die Zielgrößen und deren Frequenzbereiche sind in Tabelle 4-4 dargestellt.

Art des Schallleistungspegels	Frequenzbereich in [Hz]
$OASPL_{Total}$	10 - 10000
OASPL _{BB}	10 - 10000
OASPL _{Tonal}	10 - 10000
OASPL _{BPF}	200 - 1200

 Tabelle 4-4:
 Summenpegel als Zielgrößen zur Analyse des betrachteten Versuchsraums.

Die breitbandigen und tonalen Zielgrößen sind in Terzbändern definiert, während die spektralen BPF-Zielgrößen den Bereich von 200 - 1200 Hz abdecken. Die Frequenzbereiche sind nochmal gesondert in Tabelle 4-5 dargestellt.

 Tabelle 4-5: Spektrale Zielgrößen zur Analyse des betrachteten Versuchsraums.

Art des spektralen Zielgröße	Frequenzbereich in [Hz]
Breitband	10 - 10000
Tonal	10 - 10000
BPF	200 - 1200

5 CAD Re-Design und Vorbereitung der Messungen

In diesem Kapitel wird das Re-Design der Leading Edge Serrations beschrieben, sowie die Aufbereitung der Rotorblätter und die Vorbereitungen der Messungen.

5.1 CAD Re-Design

Das Re-Design der Serrations wird mittels der Computer-Software "PTC Creo Parametric 3.0" durchgeführt. Hierzu wurde auf ein vorhandenes 3D-CAD-Modell aus diversen Vorversuchen zurückgegriffen, womit die geforderten Amplituden und Wellenlängen erstellt wurden, wie auf Abbildung 5-1 exemplarisch zu sehen ist.



Abbildung 5-1: Mittels PTC Creo Parametric 3.0 re-designtes Ventilatorblatt (exemplarisch)

Die jeweiligen Ventilatorblätter sind aus zwei einzelnen Teilen modelliert: Front, die Vorderkante mit den Leading Edge Serrations, und Back, die Hinterkante, die bei allen Variationen unverändert bleibt. Da die Ausläufe der Wellenlängen an Blattspitze und - wurzel eine große Rolle bei der Aeroakustik und Aerodynamik spielen, war hier besonders drauf zu achten, sodass dies bei den meisten Ventilatorblättern angepasst werden musste. Die zwei Hälften der Leading Edge Serrations wurden zu guter letzt mittels "PTC Creo Parametric 3.0" zusammengefügt, in das STL-Dateiformat überführt und als ein einzelnes Teil per Rapid Prototyping in sechsfacher Ausführung angefertigt.

5.2 Aufbereitung der Rotorblätter und Vorbereitung der Messungen

Rapid Prototyping ist ein 3D-Druck-Verfahren, das neben der eigentlich gewünschten Konstruktion Stützstellen druckt, die nicht nur Stabilität verleihen, sondern auch erforderlich sind, um bestimmte Konstruktionen überhaupt fertigen zu können. Diese sind exemplarisch auf Abbildung 5-2 zu sehen. Diese Stützstrukturen waren mittels geeignetem Werkzeug zu entfernen und die Berührungspunkte zwischen Stützstruktur und Ventilatorblatt sind vorsichtig mit feinem Sandpapier zu bearbeiten, um eine glatte Oberfläche zu erzielen, da eine kantige Oberfläche ungewünschte Effekte auf die Messergebnisse haben könnten.



Abbildung 5-2: Stützstrukturen des Rapid Prototyping Verfahrens (exemplarisch)

6 Auswertung und Analyse

Die künstlichen neuronalen Netze (KNN) wurden in Matlab initialisiert und zum Training wurden die Daten auch dort importiert und verarbeitet. Für weitere Informationen bezüglich der Netzwerkstruktur, des Trainings, des Trainingsalgorithmus, sowie der Wahl der dazu benötigten Hyperparameter wird an dieser Stelle auf die Arbeit von Biedermann et al. [27] sowie Biedermann [29] verwiesen. Die trainierten KNN werden anschließend genutzt, um die Einflussparameter zu variieren und somit prognostizierte Daten zu generieren, die es zu analysieren, interpretieren und auch validieren gilt. Dies beinhaltet neben einer Validierung des Modells sowohl eine Analyse der Summenpegel, als auch der spektralen Zielgrößen. Zunächst wird die Validierung der Ergebnisse diskutiert und dann folgt die eigentliche Analyse im Zeit- und Spektralbereich.

6.1 Validierung

In diesem Abschnitt werden die Bestimmtheitsmaße der Summenpegel bestimmt und es werden die drei randomisiert ermittelten Testpunkte validiert. Zur Validierung der Testpunkte werden die jeweiligen Terzbänder der breitbandigen und tonalen Anteile der Prognosen und beobachteten Werte direkt verglichen. Die Frequenzen der BPF-Anteile werden ebenfalls direkt verglichen. Die aerodynamische Kennlinien des Modells und Messdaten einer Voruntersuchung werden verglichen und diskutiert.

6.1.1 Bestimmtheitsmaß R²

Das Bestimmtheitsmaß ist ein Gütemaß von Modellen, das Prognosen mit Beobachtungen vergleicht und aussagt wie genau diese Prognosen sind. Abbildung 6-1 zeigt diesen Vergleich anhand Beobachtung und Prognose aus dieser Versuchsreihe und zeigt, dass das Modell im aeroakustischen Bereich sehr gute Ergebnisse liefert. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei R²=99,71 % und liefert somit sehr genaue Prognosen.

$$R^{2} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^{2} \sum (y - \bar{y})^{2}}}$$

Formel 6-1

Wobei

x und y = beobachtete und prognostizierte Werte

 \bar{x} und \bar{y} = arithmetische Mittel der beobachteten und prognostizierten Werte





In Tabelle 6-1 sind folgend die Bestimmtheitsmaße der Summenpegel aufgelistet. Diese ergeben sehr gute Ergebnisse. Der $OASPL_{BPF}$ liegt mit 0,9623 zwar ca. 3 % unter den Ergebnissen der anderen Summenpegel und liefert eine leicht erhöhte Streuung der Prognosen, liefert dabei aber trotzdem auf die Prognosegüte bezogen gute Ergebnisse.

Die Bestimmtheitsmaße der kompletten breitbandigen und tonalen Terzbänder, sowie der BPF-Anteile befinden sich im Anhang.

Summenpegel	R²
OASPL Total	0,9971
OASPL BB	0,9931
OASPL Tonal	0,995
OASPL BPF	0,9623

 Tabelle 6-1: Bestimmtheitsmaße der Summenpegel

6.1.2 Vergleich zwischen Prognose und Beobachtung

Die folgenden Diagramme dienen der Analyse von Prognose und Beobachtung im spektralen Bereich der drei randomisiert bestimmten Validierungspunkte. Diese sind unterteilt in breitbandige, tonale und BPF-Anteile. Wie auf Abbildung 6-2 zu erkennen ist, liefert das Modell im breitbandigen Anteil eine gute Prognose. Die Serration mit der Amplitude A_{serr} =22 mm liefert hier leichte Abweichungen über den gesamten Breitbandbereich, siginifikant sind diese jedoch nicht. Ebenso wie die Abweichungen im hochfrequenten Bereich bei den anderen bei den Serrations A_{serr} =18 mm und A_{serr} =17,68 mm.

Die tonalen Anteile des spektralen Bereichs sind auf Abbildung 6-3 dargestellt. Die Serration der Amplitude A_{serr} =22 mm zeigt, bis auf den niederfrequenten Bereich, leicht ausgeprägtere Abweichungen. Hier könnte jedoch damit argumentiert werden, dass dieser Punkt im Modell am positiven Maximum aller Einflussgrößen liegt. Der hohe Turbulenzgrad bringt eine große stochastische Strömung mit sich, die sich offensichtlich im tonalen Spektrum schwer exakt modellieren lässt. Die Serrations A_{serr} =18 mm und A_{serr} =17,68 mm zeigen, bis auf den hochfrequenten Bereich, eine gute Prognose. Dieser hat in beiden Fällen starke Abweichungen.

Die BPF-Anteile zeigen eine gute Prognose (Abbildung 6-4). Im niederfrequenten Bereich gibt es bei A_{serr} =22 mm und A_{serr} =17,68 mm leicht erhöhte Differenzen, signifikant sind diese jedoch nicht. A_{serr} =22 mm zeigt im mittleren Frequenzbereich ebenfalls leicht erhöhte Abweichungen, hier ist jedoch wieder darauf hinzuweisen, dass es sich bei allen vier Einflussgrößen um das Maximum des Versuchsraums (+1) handelt.

Abschließend kann gesagt werden, dass das Modell sehr gut prognostiziert. Im hochfrequenten Bereich, vorallem tonal, erzielt das Modell einige erhöhte Abweichungen, die aber gesamt betrachtet nicht signifikant sind.



Abbildung 6-2: Spektraler Vergleich OASPL_{BB}-Validierungspunkte



Abbildung 6-3: Spektraler Vergleich OASPL_{Tonal}-Validierungspunkte



Abbildung 6-4: Spektraler Vergleich OASPL_{BPF}-Validierungspunkte

6.2 Analyse der Schallleistungspegel (OASPL)

Zunächst werden die verschiedenen Summenpegel diskutiert, bestehend aus dem $OASPL_{Total}$ und seinen Anteilen $OASPL_{BB}$, $OASPL_{Tonal}$ und dem $OASPL_{BPF}$. Dazu werden Trends und Tendenzen der Parametervariationen diskutiert. Um Modellwerte des kompletten Versuchsraumes abzudecken, wird um den Mittelpunkt des Versuchsraums in alle drei Raumachsen bis zur Modellgrenze variiert. Zu Beginn werden Amplitude und Wellenlänge im Zentrum des Versuchsraumes konstant gehalten und der Turbulenzgrad wird den negativen (-1) und positiven (+1) Versuchsraumgrenzen angenähert. Nachfolgend werden Wellenlänge und Turbulenzgrad im Zentrum des Versuchsraumes konstant gehalten, während die Amplitude variiert wird und zu guter letzt werden Amplitude und Turbulenzgrad konstant gehalten, während die Werte sind in den Diagrammen in Absolutwerten angegeben. $\Delta OASPL$ ergibt sich aus der Differenz der jeweiligen BSLN und Serration, die jeweils unter gleichen Parameter gemessen wurden und sind zur besseren Darstellung der Schallreduktionen und Tendenzen mit abgebildet.

6.2.1 Analyse der Schallleistungspegel (Total) mit mittlerer Amplitude und mittlerer Wellenlänge bei Variation des Turbulenzgrades

Bei Betrachtung von Abbildung 6-5 rechts ist substantiell, dass bei einem niedrigen Turbulenzgrad von Tu=2,6 % die größte Schallreduzierung von 4 dB (bei φ =0,177) stattfindet und diese in Richtung steigendem Turbulenzgrad skaliert. Das liegt daran, dass bei einem niedrigen Turbulenzgrad in der Regel weniger Schall erzeugt wird, da die Serrations mit einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit angestrahlt werden. Ein hoher Turbulenzgrad erzeugt durch das stochastische Auftreffen von Turbulenzen (Druckfluktuationen) an den Vorderkanten der Rotorblätter eine größere Schallabstrahlung. Dies spiegelt sich auch auf Abbildung 6-5 links wieder. Je höher der Turbulenzgrad ist, desto höher ist der $OASPL_{Total}$ in ungedrosseltem Zustand (φ =0,21). Lediglich Tu=2,6 % hebt sich davon ab; dieser Turbulenzgrad ist minimal lauter, als die Serration mit Tu=4.98 %. Mit ein größerer Lastzustand. Der Stall-Punkt, an dem die Strömung abreißt und der OASPL_{Total} wieder steigt, schiebt sich bei höherem Turbulenzgrad leicht nach links zur stärkeren Drosselung hin. Bei Tu=2,6 % geschieht dies bei einer Lieferzahl von φ =0,195, während bei Tu=12,10 % dies bei einer Lieferzahl von φ =0,189 der Fall ist. Im ungedrosselten Zustand liegt zwischen den OASPL_{Total} von Tu=4,98 % (die leiseste Serration) und Tu=12,10 % eine Differenz von 6,32 dB.



Abbildung 6-5: $OASPL_{Total}$ und $\triangle OASPL_{Total}$ über φ mit A_{serr} =14 mm und λ_{serr} =13 mm bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %

6.2.2 Analyse der Schallleistungspegel (Breitband) mit mittlerer Amplitude und mittlerer Wellenlänge bei Variation des Turbulenzgrades

Bei der Betrachtung von Abbildung 6-6 rechts fällt auf, dass sich bei steigendem Turbulenzgrad der Punkt der höchsten Schallreduktion im Breitbandbereich der jeweiligen Serration immer weiter in Richtung stärkerer Drosselung zu niedrigen Lieferzahlen hin bewegt. Der Turbulenzgrad Tu=12,1 % hat dabei die höchste Schallreduktion im Breitbandbereich mit einer Reduktion von 3,2 dB bei einer Lieferzahl $\varphi=0,141$. Je höher der Turbulenzgrad ist, desto höher ist der $\Delta OASPL_{BB}$ im Gebiet der hohen Lieferzahlen, da hier die Serrations gemäß des Dekorrelationsmechanismus arbeiten und den Breitbandschall reduzieren. Im Stall-Bereich verzögern die Serrations den Stall-Eintritt, indem Wirbelstrukturen an den Serrations generiert werden, welche die Strömung an den Rotorschaufeln halten und so einen Strömungsabriss verzögern bzw. unterbinden. Interessant ist der Punkt bei $\varphi=0,148$. Dort treffen alle Kurven der Serrations zusammen und über diesen Punkt hinaus werden die breitbandigen Anteile der Serrations mit den niedrigeren Turbulenzgraden lauter und umgekehrt. Hier kommen aerodynamische Effekte zum Vorschein, die die breitbandigen Anteile bei geringerem Turbulenzgrad lauter werden lassen.



Abbildung 6-6: $OASPL_{BB}$ und $\triangle OASPL_{BB}$ über φ mit $A_{serr}=14$ mm und $\lambda_{serr}=13$ mm bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %

6.2.3 Analyse der Schallleistungspegel (Tonal) mit mittlerer Amplitude und mittlerer Wellenlänge bei Variation des Turbulenzgrades

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur die positiven und negativen Grenzen des Versuchsraumes (Tu=-1 und Tu=+1) dargestellt. Auf Abbildung 6-7 rechts fällt auf, dass die tonalen Anteile mit Tu=2,60 % eine maximale Schallreduktion von 2,4 dB bei φ =0,166 mit sich bringt. Bei hohem Turbulenzgrad ist die Schallreduktion geringer (0,8 dB bei φ =0,167). Jedoch bringen beide Serrations Bereiche mit sich, bei denen die Serrations höhere Pegel in den tonalen Anteilen haben, als die BSLN. Eine spektrale Darstellung könnte Aufschluss über die Gründe dafür liefern. Diese Bereiche erstrecken sich bei Tu=2,60 % von φ =0,21 bis φ =0,192 und bei Tu=12,10 % von φ =0,19 bis φ =0,177.



Abbildung 6-7: *OASPL*_{Tonal} und $\triangle OASPL_{Tonal}$ über φ mit A_{serr} =14 mm und λ_{serr} =13 mm bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %

6.2.4 Analyse der Schallleistungspegel (BPF) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerer Amplitude bei Variation des Turbulenzgrades

Abbildung 6-8 beschränkt sich ebenfalls, auf Grund von Übersichtlichkeit, auf die positive und negativen Grenzen des Versuchsraumes (Tu=-1 und Tu=+1). Hier ist zu erkennen, dass die Anteile des $OASPL_{BPF}$, bis auf einen kleinen Bereich bei $\varphi=0,2$, stark abgesenkt werden können. In diesen beiden Fällen liegt die Schallreduktion bei 3,7 dB. Beim hohen Turbulenzgrad Tu=12,1 % bei $\varphi=0,19$ und beim geringeren Tu=2,6 % bei 0,162. Anzumerken ist noch, dass alle Kurven in höheren Lastzuständen sehr stark abfallen. Wahrscheinlich treten hier Maskierungseffekte auf, die die $OASPL_{BPF}$ -Anteile im Diagramm abfallen lassen, weil die tonalen und breitbandigen Anteile dort sehr stark ansteigen.



Abbildung 6-8: $OASPL_{BPF}$ und $\triangle OASPL_{BPF}$ über φ mit A_{serr} =14 mm und λ_{serr} =13 mm bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %

6.2.5 Analyse der Schallleistungspegel (Total) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude

Auf Abbildung 6-9 rechts sticht hervor, dass bei einer Amplitude A_{serr} =22 mm im Gegensatz zu den kleineren Amplituden eine sehr große Schallreduktion von 6,3 dB bei φ =0,17 hat. Diese skaliert im Bereich von φ =0,193 bis φ =0,17 mit größer werdenden Amplitude. Auf der linken Seite sieht man deutlich, dass alle Amplituden der Serrations bei jeder Lieferzahl im Diagramm einen geringeren $OASPL_{Total}$ als die BSLN besitzen, also bei allen Lieferzahlen leiser als diese sind. Der Bereich bei hohen Lieferzahlen (φ =0,21 bis φ =0,195) ist zu erwähnen. Der Stall-Bereich skaliert mit kleiner werdenden Amplitude immer mehr zur stärkeren Drosselung hin, sodass diese bei A_{serr} =6 mm und A_{serr} =10 mm zu keiner Lieferzahl im Versuchsraum richtig anliegt.



Abbildung 6-9: $OASPL_{Total}$ und $\triangle OASPL_{Total}$ über φ mit λ_{serr} =13 mm und Tu=7,35 % bei Variation von A_{serr} =6 mm bis 22 mm

6.2.6 Analyse der Schallleistungspegel (Breitband) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude

Bei Betrachtung der breitbandigen Anteile der Summenpegel auf Abbildung 6-10 rechts fällt auf, dass diese ziemlich große Unterschiede über die gesamte Lieferzahlen haben. Bei genauerer Betrachtung fällt aber auf, dass die Schallreduktionen trotzdem skalieren, dabei aber über den kompletten Lieferzahlbereich verteilt sind. Die höchste Schallreduktion von 3,8 dB ist bei A_{serr} =22mm mit φ =0,202. Auf Abbildung 6-10 links kann ist ersichtlich, dass bei hoher Lieferzahl die großen Amplituden einen kleineren $OASPL_{BB}$ haben. A_{serr} =6 mm und A_{serr} =8 mm liegen im Bereich der Lieferzahl φ =0,21 bei einem ziemlich gleichen $OASPL_{BB}$ -Wert wie die BSLN und im Bereich von φ =0,195 bis φ =0,18 sind die breitbandigen Anteile sogar höher als bei der BSLN. Ab φ =0,15 werden A_{serr} =6 mm und A_{serr} =22 mm beide lauter als die BSLN, wobei A_{serr} =22 mm ab φ =0,137 wieder leiser als die BSLN wird. Dies kann mit der Stochastik der Turbulenz des höheren Lastzustands erklärt werden, der bei niedriger Lieferzahl vorherrscht.



Abbildung 6-10: $OASPL_{BB}$ und $\triangle OASPL_{BB}$ über φ mit λ_{serr} =13 mm und Tu=7.35 % bei Variation von A_{serr} =6 mm bis 22 mm

6.2.7 Analyse der Schallleistungspegel (Tonal) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude

Die tonalen Anteile bei Variation der Amplitude sind auf Abbildung 6-11 dargestellt. Auf der rechten Seite ist abzuleiten, dass die Schallreduktion umso größer ist, je größer die Amplitude ist. Das Maximum befindet sich hier bei einer Amplitude von A_{serr} =22 mm mit einer maximalen Schallreduktion von 5,5 dB bei einer Lieferzahl von φ =0,172. Die Amplitude A_{serr} =6 mm sticht im linken Diagramm hervor, da sie im Bereich von φ =0,197 bis φ =0,176 einen höheren tonalen Anteil, als die BSLN besitzt. Diese Serration ist also in diesem Betriebsbereich, von tonalen Aspekten her gesehen, ungünstig. Diese lauteren tonalen Anteile könnten durch abgelöste Wirbel entstehen. Ab einem hohen Lastzustand von φ =0,145 werden die tonalen Summenpegel aller Serrations lauter als die BSLN. Da dort aber höchstwahrscheinlich kein sinnvoller Betriebspunkt ist, ist dieser Effekt irrelevant. Jedoch ist zu erwähnen, dass im Bereich von φ =0,175 bis φ =0,15 bei allen Serrations eine signifikante Reduktion der tonalen Anteile stattfindet.



Abbildung 6-11: $OASPL_{Tonal}$ und $\triangle OASPL_{Tonal}$ über φ mit λ_{serr} =13 mm und Tu=7.35 % bei Variation von A_{serr} =6 mm bis 22 mm

6.2.8 Analyse der Schallleistungspegel (BPF) mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Amplitude

Die Analyse von Abbildung 6-12 zeigt, dass die Anteile des $OASPL_{BPF}$ der BSLN über den gesamten Wertebereich von φ drei mal stark angeregt werden. Hier könnte wieder eine spektrale Darstellung weiteren Aufschluss über die Ursachen bieten. Jedoch ist auch erkennbar, dass in den Bereichen von $\varphi=0,21$ bis $\varphi=0,188$ und $\varphi=0,185$ und $\varphi=0,13$ charakteristische Schallreduktionen der $OASPL_{BPF}$ -Anteile der Serrations stattfinden. Lediglich die Serrations der Amplituden $A_{serr}=6$ mm und $A_{serr}=10$ mm liegen im Bereich von $\varphi=0,164$ bis $\varphi=0,15$ leicht über denen der BSLN, aber im Wertebereich unter $\varphi=0,15$ wieder unter der BSLN. Der Spitzenwert der Schallreduktion liegt hier bei 3,5 dB bei $\varphi=0,14$. Zu erwähnen ist ebenfalls der Bereich um $\varphi=0,181$. Hier treffen sich die Kurvenverläufe aller Serrations und die Tendenz, dass die größeren Amplituden größere $OASPL_{BPF}$ -Anteile haben dreht sich ab $\varphi=0,181$ um, wo die verschiedenen Amplituden wieder stark skalieren. Hier ist wieder auffällig, wie bei der Variation von Tu auf Abbildung 6-8, dass bei starker Drosselung ab $\varphi=0,15$ höchstwahrscheinlich Maskierungseffekte auftauchen, die bei zunehmender Drosselung immer höher werden.



Abbildung 6-12: $OASPL_{BPF}$ und $\triangle OASPL_{BPF}$ über φ mit λ_{serr} =13 mm und Tu=7.35 % bei Variation von A_{serr} =6 mm bis 22 mm

6.2.9 Analyse der Schallleistungspegel (Total) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge

Bei der Betrachtung von Abbildung 6-13 ist unverkennbar, dass bei der Variation der Wellenlänge der Wert λ_{serr} =22 mm bis auf einen kleinen Bereich von φ =0,207 bis ϕ =0,192 lauter als die BSLN ist. Die aeroakustischen Eigenschaften dieser Serration sind ungünstig, aber ein, für die Serrations, positiver Trend ist trotzdem gut erkennbar. $\lambda_{serr}=4$ mm ist im Bereich von $\varphi=0,19$ bis $\varphi=0,15$ die leiseste Serration. Dies bestätigt Voruntersuchungen, dass eine (größere) Amplitude in Verbindung mit mit kleinen Wellenlängen die besten aeroakustischen Eigenschaften besitzt [21]. Dabei ist aber nicht außer Acht zu lassen, diese Serration ab einer Lieferzahl von $\varphi=0,138$ den höchsten $OASPL_{Total}$ besitzt. Bei diesem Betriebszustand scheint eine kleine Wellenlänge ungünstig zu sein, jedoch ist dies wahrscheinlich kein günstiger Betriebspunkt. Ebenfalls ist anzumerken, dass bei kleiner werdender Wellenlänge λ_{serr} der Stall-Punkt kontinuierlich in Richtung kleinerer Lieferzahlen verschoben wird. Die Wellenlänge hat augenscheinlich großen Einfluss darauf. Auffällig ist außerdem auf dem rechten Diagramm der Bereich von $\varphi=0,2$ bis φ =0,16. Dort sinkt die Schallreduktion in Richtung hoher zu niedriger Schallreduktion stark ab und dann wieder stark an. Dies liegt an den tonalen Anteilen der BSLN (Abbildung 6-14). Dort fällt bei Betrachtung dieses Bereiches auf, dass sich die Strömung an die BSLN anlegt und der Pegel leicht abfällt. Bei den Serrations ist dies nicht der Fall, weshalb durch die Differenzen diese Verläufe der *AOASPL* entstehen.



Abbildung 6-13: $OASPL_{Total}$ und $\Delta OASPL_{Total}$ über φ mit A_{serr} =14 mm und Tu=7.35 % bei Variation von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm

6.2.10 Analyse der Schallleistungspegel (Breitband) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge

Die breitbandigen Summenpegel auf Abbildung 6-14 links zeigen, dass alle Serrations, bis auf λ_{serr} =4 mm und λ_{serr} =8,5 mm ab φ =0,138, leisere breitbandige Anteile abstrahlen als die BSLN. Die Serration mit dem höchsten Schallreduktion im breitbandigen Anteil ($\Delta OASPL_{BB}$ =3,8 dB bei φ =0,165) ist bis zur Lieferzahl φ =0,138 die Wellenlänge λ_{serr} =4 mm. Auffällig sind die vielen Schnittpunkte der Serrations im Bereich von φ =0,194 bis φ =0,13. Die breitbandigen Anteile scheinen bei den verschiedenen Lastzuständen verschieden starke Rollen zu spielen, sodass die Wellenlängen mal positivere und mal negativere Eigenschaften untereinander besitzen. Da die Serrations jedoch bis auf einen kleinen Bereich größtenteils leiser, und somit positiver aeroakustischer Natur sind, sind diese Effekte sekundär. Die Tendenz geht dazu, dass die breitbandigen Anteile umso aeroakustisch positiver ausfallen, desto kleiner die Wellenlänge bei dieser Amplitude A_{serr} =14 mm ist.



Abbildung 6-14: $OASPL_{BB}$ und $\triangle OASPL_{BB}$ über φ mit A_{serr} =14 mm und Tu=7.35 % bei Variation von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm

6.2.11 Analyse der Schallleistungspegel (Tonal) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge

Die tonalen Anteile sind auf Abbildung 6-15 dargestellt. Diese werden, bei Betrachung des rechten Diagramms, bei λ_{serr} =14 mm um 5,6 dB bei φ =0,171 gesenkt. Hier ist ebenfalls eine Tendenz zu erkennen; je kleiner die Wellenlänge bei vorhandener Amplitude, desto größer die Schallreduktion im höchsten Punkt. Die tonalen Anteile der Serrations sind hier ebenfalls, bis auf einen kleinen Bereich ab φ =0,142, leiser. Vermutlich sorgen gerade die Verzahnungen für einen höheren tonalen Anteil bei diesem hohen Lastzustand, indem die Strömung schlechter dort anlegen kann. Jedoch ist die BSLN in dem Bereich von φ =0,175 bezeichnend höher, sodass man im Gesamten sagen kann, dass die Serrations mit allen Variationen der hier dargestellten Wellenlängen aeroakustisch günstigere tonale Anteile als die BSLN besitzen.



Abbildung 6-15: $OASPL_{Tonal}$ und $\triangle OASPL_{Tonal}$ über φ mit A_{serr} =14 mm und Tu=7.35 % bei Variation von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm

6.2.12 Analyse der Schallleistungspegel (BPF) mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad bei Variation der Wellenlänge

Die Anteile des $OASPL_{BPF}$ bei einer Variation der Wellenlänge λ_{serr} sind auf Abbildung 6-16 dargestellt. Unverkennbar ist hier ebenfalls der Verlauf der BSLN, welcher über den kompletten Bereich der Abszisse drei mal angeregt wird. Hier könnte wieder eine spektrale Darstellung mehr Aufschluss über die Ursachen bieten. Die höchste Schallreduktion liegt bei der kleinsten Wellenlänge $\lambda_{serr}=4$ mm bei einer Lieferzahl von $\varphi=0,14$ vor. Die Verläufe der Serrations sind hier recht ähnlich, während diese einmal im Bereich von $\varphi=0,21$ bis $\varphi=0,19$ skalieren und einmal im Bereich von $\varphi=0,18$ bis 0,14. Im Bereich von $\varphi=0,175$ bis $\varphi=0,14$ nehmen die Anteile des $OASPL_{BPF}$ der Serrations einen recht unterschiedlichen Verlauf. Die BPF-Anteile von $\lambda_{serr}=22$ mm werden in diesem Bereich relevant lauter (0,8 dB) als die der BSLN, während $\lambda_{serr}=17,5$ mm ebenfalls leicht lauter wird. Dieses Phänomen findet ebenfalls bei einer Lieferzahl von $\varphi=0,19$ bis $\varphi=0,185$ statt, wo dies jedoch $\lambda_{serr}=4$ mm und $\lambda_{serr}=22$ mm sind. Bei hoher Drosselung ist hier wieder, wie bei den vorangegangenen Diagrammen der $OASPL_{BPF}$ -Anteile bemerkt, auf die Maskierungseffekte hinzuweisen.



Abbildung 6-16: $OASPL_{BPF}$ und $\Delta OASPL_{BPF}$ über φ mit A_{serr} =14 mm und Tu=7.35 % bei Variation von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm

6.3 Analyse der spektralen Zielgrößen

Es folgt eine Diskussion der spektralen Zielgrößen. Diese sind in breitbandige, tonale und BPF-Anteile aufgeteilt. Um Modellwerte des kompletten Versuchsraumes abzudecken wird wie bei der vorangegangenen um den Mittelpunkt des Versuchsraums in alle drei Raumachsen bis zur Modellgrenze variiert. Die Lieferzahl φ variiert dabei jeweils an das Minimum des Versuchsraums (entspr. dem maximalen Lastzustand $\varphi=0,13$), an die Mitte (mittlerer Lastzustand $\varphi=0,17$) und an das Maximum (minimaler Lastzustand $\varphi=0,21$) des Versuchraumes herangebracht. So sollten etwaige Tendenzen und Gesetzmäßigkeiten der Parametervariationen der Leading Edge Serrations erkennbar sein.

6.3.1 Analyse der spektralen Schallleistungspegel bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %

Die Ergebnisse der spektralen breitbandigen Anteile in Abbildung 6-17 sind eindeutig. Durch Anströmung der Leading Edge Serrations $A_{serr}=14$ mm und $\lambda_{serr}=13$ mm bei niedrigem Lastzustand mit erhöhter Turbulenz zeigen in einem breiten Frequenzbereich von 13-1259 Hz eine klare Skalierung des Pegels um bis zu 10 dB. Die mittlere Last bringt über den Bereich von 10-251 Hz eine Skalierung um 7 dB mit sich, während die erhöhte Turbulenz im hohen Lastzustand kaum Änderung mit sich bringt, lediglich im tieferfrequenten Bereich von 300-600 Hz steigt mit erhöhter Turbulenz. Diese breitbandige Erhöhung des Schallleistungspegels entsteht durch den erhöhten Turbulenzgrad. Dieser erhöht die Druckfluktuationen der turbulenten Grenzschicht und erhöht somit den abgestrahlten Schall. Der Zuströmturbulenzschall spielt dabei ebenfalls eine große Rolle [1]. Eine skalierende Pegelerhöhung bei erhöhter Turbulenz im niedrigen Lastzustand ist ebenfalls tonal zu erkennen. Der Turbulenzgrad scheint die breitbandigen und tonalen Anteile im jeweiligen Lastzustand über einen ziemlich ähnlichen Frequenzbereich skalieren zu lassen (ϕ =0,21 der Frequenzbereich von 13-794 Hz bei max. $\Delta OASPL_{BB}$ =10 dB und bei φ =0,17 der Frequenzbereich von 794 bei max. $\Delta OASPL_{BB}$ =8 dB). Bei hohem Lastzustand dominiert tonal bei allen Turbulenzgraden die Mittenfrequenz des 125 Hz Terzbandes ($f_{u,Tz} = 112 Hz$, $f_{o,Tz} = 140 Hz$), die einen Pegel von 92 dB hat, während bei niedrigem Lastzustand ein Peak bei 33 Hz dominiert und einen Schallleistungspegel von ca. 80 dB hat. Dieser Peak bei 33 Hz entsteht durch die Schaufelumlauffrequenz n/60 (n=2000 /min=33 /s=33 Hz), da die Schaufel bei jeder Umdrehung durch eine Störung läuft und somit breitbandige und tonale Geräusche erzeugen [4]. Diese Peaks bei 33 Hz, die durch den Drehklang entstehen, fallen natürlich bei allen hier variierten Parametern an selber Frequenz und Lastzustand auf. Es sei noch zu erwähnen, dass bei einer Frequenz von 398 Hz bei mittlerer Drosselung im tonalen Bereich eine leiche Skalierung stattfindet. Da dieser Punkt aber ohnehin einen, im Vergleich zum Rest des Spektrums, niedrigen Pegel hat, wird dies nicht signifikant sein. Der Einfluss der Turbulenz auf die Anteile der Blattfolgefrequenz (engl. Abk. BPF) ist im niedrigen Lastzustand deutlich höher, als bei hoher Drosselung. Bei hohem Lastzustand ändern sich die BPF-Anteile über die kompletten Frequenzbereiche nur jeweils um wenige dB, während bei niedrigem bis mittleren Lastzustand gerade bei 800 – 1200 Hz die Pegel stark von dem Turbulenzgrad abhängig sind. Ein hoher Turbulenzgrad sorgt in diesem Bereich für konstant ziemlich gleich hohe Pegel.



Abbildung 6-17: Spektraler Vergleich der $OASPL_{BB}$ -Anteile über f mit A_{serr} =14 mm, λ_{serr} =13 mm und φ =0,13 bis 0,21 bei Variaton von Tu=2,6 % bis 12,1 %



Abbildung 6-18: Spektraler Vergleich der $OASPL_{Tonal}$ -Anteile über f mit A_{serr} =14 mm, λ_{serr} =13 mm und φ =0,13 bis 0,21 bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %



Abbildung 6-19: Spektraler Vergleich der $OASPL_{BPF}$ -Anteile über f mit A_{serr} =14 mm, λ_{serr} =13 mm und φ =0,13 bis 0,21 bei Variation von Tu=2,6 % bis 12,1 %

6.3.2 Analyse der spektralen Schallleistungspegel bei Variation von A_{serr}=6 mm bis 22 mm

Bei der Variation der Amplitude Aserr ist auffällig, dass die breitbandigen Pegel bei niedrigem und mittlerem Lastzustand im höherfrequenten in Abbildung 6-20 im Bereich ab 500 Hz – 10000 Hz über bestimmte negative Frequenzspitzen zu skalieren, sodass höhere Amplituden in diesem Frequenzbereich günstigere Pegel abstrahlen und kleinere Amplituden teilweise sogar höhere Pegel als die BSLN abstrahlen. Die Variation der Amplitude hat in diesem Bereich einen starken Einfluss. Bei $\varphi=0,21$ ist ein Peak bei 3162 Hz auffällig, der bei den Serrations Aserr=14 mm, Aserr=18 mm und Aserr=22 mm vorhanden ist und ebenfalls ein Peak bei 1600 Hz der Amplitude Aserr=18 mm. Dies ist wahrscheinlich die 16. BPF. Im Frequenzbereich von 400 - 1000 Hz hat $A_{serr}=22$ einen deutlich niedrigeren Pegel im Gegensatz zu den anderen Amplituden. Der niederfrequente Bereich von 10 – 200 Hz zeigt bei den breitbandigen Pegeln keine signifikanten Unterschiede. Tonal sieht dies jedoch anders aus. Die tonalen Drehklänge bei 33 Hz zeigen deutliche Unterschiede bei allen Lastzuständen auf, die verschiedenen Amplituden scheinen hier Einfluss auf den Pegel zu haben, während die Frequenzbereiche von 79 -158 Hz bei den Amplituden, bis auf die leicht niedrigeren Pegel bei $A_{serr}=22$ mm und Aserr=18 mm beim mittlerer Drosselung, keine deutlichen Unterschiede aufzeigen. Beim Lastzustand von $\varphi=0,21$ sind 2 Peaks bei 1585 Hz bei $A_{serr}=18$ mm und 5102 Hz bei A_{serr} =22mm und A_{serr} =18 mm. Diese haben in diesem Frequenzbereich stark erhöhte Pegel. Bemerkenswert ist der Frequenzbereich 800 – 1600 Hz im mittleren Lastzustand von $\varphi=0,17$. Hier sind tonal sehr starke Unterschiede zu erkennen, die gesamt eine Differenz von ca. 20 dB ausmachen. Tonal scheinen niedrige Amplituden mit mittlerer Wellenlänge in diesem Frequenzbereich stark negative Eigenschaften zu haben, während man von den hohen Amplituden vom genauen Gegenteil sprechen kann. Die Amplitude scheint auf die spektralen BPF-Anteile keine größeren Einflüsse zu haben. Es kann zwar gesagt, dass Leading Edge Serrations die Pegel der BPF-Anteile senken (hier mit λ_{serr} =13 mm), aber in diesem Fall sind keine besonderen Tendenzen erkennbar. Generell kann aber gesagt werden, dass die Amplituden im Zusammspiel mit der Drosselung im Frequenzbereich von 250 – 1600 Hz für starke Unterschiede bei den tonalen Anteilen sorgt (besonders beim vermutlichen aerodynamischen Betriebspunkt bei mittlerer Drosselung).



Abbildung 6-20: Spektraler Vergleich der $OASPL_{BB}$ -Anteile über f mit λ_{serr} =13 mm, φ =0,13 bis 0,21 und Tu=7,5% bei Variaton von A_{serr} =6 mm bis 22 mm



Abbildung 6-21: Spektraler Vergleich der $OASPL_{Tonal}$ -Anteile über f mit λ_{serr} =13 mm, φ =0,13 bis 0,21 und Tu=7,5 % bei Variation von A_{Serr} = 6 mm bis 22 mm



Abbildung 6-22: Spektraler Vergleich der $OASPL_{BPF}$ -Anteile über f mit λ_{serr} =13 mm, φ =0,13 bis 0,21 und Tu =7,5 % bei Variation von A_{serr} =6 mm bis 22 mm

6.3.3 Analyse der spektralen Schallleistungspegel bei Variation von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm

Die Variation der Wellenlängen bei der Amplitude A_{serr} =14 mm im niedrigen Lastzustand ergibt im Frequenzbereich von 200 – 5000 Hz deutliche Unterschiede zur BSLN. Vorallem die Wellenlänge λ_{serr} =4, die sich in Vorversuchen in Verbindung mit großen Amplituden als aeroakustisch sehr günstig erwiesen hat, hat bei 794-3981 Hz gute Pegelreduktionen im Breitbandbereich. Bei mittlerer Last zeigt sich dieser Effekt ebenfalls in einem Bereich von 200-1259 Hz. Der Drehklang bei 33 Hz sieht bei allen Serrations und bei der BSLN bei allen Lastzuständen relativ ähnlich aus, wobei die kleineren Wellenlängen dort einen leicht reduzierten Pegel im breitbandingen Anteil haben und die höheren Lastzustände natürlich generell erhöhte Pegel besitzen. Hervorzuheben ist bei dem hohen Lastzustand von φ =0,13 der Frequenzbereich bei 250 Hz, bei dem die Wellenlängen λ_{serr} =22 und λ_{serr} =17,5 bedeutende Pegelreduktionen haben (12,3 dB und 4,4 dB zur BSLN). Die Wellenlänge λ_{serr} =4 mm hat solch einen Effekt bei 1000 Hz (8,5 dB zur BSLN). Bei einer Frequenz von 3150 Hz hat die Wellenlänge λ_{serr} =13 mm im breitbandigen Anteil ebenfalls eine Reduktion des Schallleistungspegels um 6,4 dB. Die tonalen Anteile bei $\varphi=0,21$ streuen im Frequenzbereich 250 – 10000 Hz sehr stark, wobei die Wellenlängen $\lambda_{serr}=22$ mm und $\lambda_{serr}=4$ mm bei 400 Hz und $\lambda_{serr}=8,5$ mm beim 630 Hz Terzband sehr stark abweichen und die $\lambda_{serr}=4$ mm bei 400 Hz sogar um 4,4 dB und bei 1995 Hz um 3 dB in diesem Frequenzbereich einen erhöhten Pegel hat. Das Bestimmtheitsmaß für dieses KNN ist R^2_{tonal} (f=630 Hz)=0,9854. Dies zeigt, dass die Prognose sehr genau sind und dieser Wert keine Fehlprognosen sind, trotz der wenigen (aber als ausreichend prognostizierten) Datenpunkte im Training der KNN. Die Variation der Wellenlänge hat einen Einfluss auf den Drehklang bei 33 Hz in allen Lastzuständen, der jedoch keiner Tendenz zu folgen scheint. Bei niedriger und hoher Last hat die Wellenlänge $\lambda_{serr}=13$ mm einen höheren Drehklang (33 Hz) als die BSLN und bei niedriger Last $\lambda_{serr}=22$ mm ebenfalls. Der Einfluss der Wellenlänge auf die BPF-Anteile ist eindeutig. Bei 1000 Hz hat $\lambda_{serr}=4$ mm einen positiven Effekt auf den Pegel bei allen Lastzuständen. Im tieffrequenten Bereich bei 200 und 400 Hz ist dies ebenfalls bei mittlerer Last der Fall. Bei hoher Drosselung sind die Unterschiede bei 200 Hz und 1000 Hz signifikant.



Abbildung 6-23: Spektraler Vergleich der $OASPL_{BB}$ -Anteile über f mit A_{Serr} =14 mm und φ =0,13 bis 0,21 bei Variaton von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm



Abbildung 6-24: Abbildung 6-25: Spektraler Vergleich der $OASPL_{Tonal}$ -Anteile über f mit A_{serr} =14 mm und φ =0,13 bis 0,21 bei Variation von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm



Abbildung 6-26: Spektraler Vergleich der $OASPL_{BPF}$ -Anteile über f mit A_{Serr} =14 mm und φ =0,13 bis 0,21 bei Variation von λ_{serr} =4 mm bis 22 mm
6.3.4 Analyse der spektralen Schallleistungspegel der Serration $A_{serr}=22 \text{ mm } \lambda_{serr}=4 \text{ mm}$

Da einer hohen Amplitude in Verbindung mit einer kleinen Wellenlänge in Vorversuchen eine gute Schallreduktion bestätigt wurde, wird dies nochmal gesondert mit der BSLN verglichen. Dazu werden die breitbandigen, tonalen und BPF-Anteile im spektralen Bereich mit der BSLN bei mittlerer Lieferzahl $\varphi=0,17$ untersucht. Die mittlere Lieferzahl spiegelt in etwa den aerodynamischen Bestpunkt wieder und ist deshalb interessant für die Analyse. Der Turbulenzgrad von Tu=12,1 % ist die positive Turbulenzgradgrenze des Versuchsraums.

Es ist gut zu erkennen, dass die Serration im breitbandigen Anteil über einen großen spektralen Bereich (10 - 5000 Hz) niedrigere Pegel abstrahlt. Die Drehfrequenz ist hier im breitbandigen Bereich um 2,1 dB gesenkt, während sie im tonalen Bereich jedoch nicht absinkt. Gesamtgesehen jedoch ist Reduktion bei den tonalen Anteilen noch deutlicher. Bei 400 Hz liegt hier eine Reduktion von 12,7 dB vor und bei 1260 Hz eine Reduktion des Pegels von 10,4 dB. Die BPF-Anteile sind über alle Frequenzen gesenkt, wobei die höheren Frequenzen stärker reduziert sind.



Abbildung 6-27: Spektraler Vergleich $OASPL_{BB}$, $OASPL_{Tonal}$ und $OASPL_{BPF}$ von BSLN und $A_{serr}=22 \text{ mm } \lambda_{serr}=4 \text{ mm mit Tu}=12,1 \%$ nahe des aerodynamischen Bestpunkts

6.4 Abgleich und Zusammenhang Aerodynamik

Mittels des erstellten Modells wurden nun die aerodynamischen Kennzahlen Lieferzahl φ und Wirkungsgrad η eines Vorversuchs prognostiziert und mit Kennlinien abgeglichen, die aus gemessenen Daten dieses Vorversuchs erstellt wurden, um Rückschlüsse ziehen zu können. Dazu wurden alle mit diesem Modell modellierbaren (im Versuchsraum liegenden) Parametervariationen dieses Vorversuchs genutzt, welche in Tabelle 6-2 dargestellt sind. Der Turbulenzgrad beschränkt sich hier auf Tu=2,6 %.

	A _{serr}	λ_{serr}
	[mm]	[mm]
1	14	4
2	22	13
3	6	13
4	14	13
5	14	22

Tabelle 6-2: Vorderkantenparameter der Leading Edge Serrations aus Vorversuch.

Bei Betrachtung der Diagramme fällt auf, die Wirkungsgrade teilweise signifikante Unterschiede haben. Lediglich $A_{serr}=6$ mm mit $\lambda_{serr}=13$ mm und $A_{serr}=14$ mm mit $\lambda_{serr}=22$ mm hat recht genaue Prognosen. Die Serrations $A_{serr}=22$ mit $\lambda_{serr}=13$ mm generiert bei schwacher Drosselung zu hohe Prognosen und ab $\varphi=0,188$ wird der tatsächlich gemessene Wirkungsgrad signifikant höher bis zu einem Unterschied von 4 % bei höchstem Lastzustand, während bei der BSLN z.B. die Beobachtung über den gesamten Messbereich zwischen 2-3 % kleiner ist. Diese Unterschiede liegen wahrscheinlich nicht am Modell, sondern die Messmethodik in dieser Thesis unterscheidet sich grundsätzlich von der Messmethodik des vorigen Versuchs. Dort wurden die Wirkungsgradkennlinien systematisch am Prüfstand von schwacher Drosselung bis starker Drosselung gemessen. Der Prüfstand wurde zwischen den Messungen nicht ausgeschaltet und der Lastzustand auch nicht genullt, während das LHS einzelne Versuchspunkte eines LHS misst und zwischen jeder Messung der Prüfstand ausgeschaltet und komplett neue Rotoren verbaut wurden und die Gitter (in den meisten Fällen) gewechselt wurden. Der Lastzustand wurde währenddessen ebenfalls genullt und komplett neu eingestellt. Diese Faktoren könnten die Ungenauigkeiten erklären und es sei auf die Randomisierung von Messplänen verwiesen, die solch eine eventuelle Aufsummierung von Messfehlern vermeiden soll.

Eine (zeitaufwendige) Wiederholung des Vorversuchs mit randomisierten Messplänen würde hier evtl. bessere Ergebnisse liefern.



Abbildung 6-28 : Wirkungsgradkennlinien der Prognosen und gemessenen Daten aus der Voruntersuchung

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Thesis war die Frage zu beantworten, ob es möglich sei, ein aeroakustisches Prognosemodell auf Basis experimenteller Vermessungen von Leading Edge Serrations zu generieren, welches unter anschließender Einspeisung der Messdaten in künstliche neuronale Netze eine spektrale und globale Prognose der Schallabstrahlung und -reduktion als auch der aeroakustischen Wirkzusammenänge der Parametervariationen zulässt.

Aufgrund von Voruntersuchungen wurde das NACA65(12)-10 Profil gewählt. Nach Festlegung der Grenzen und Einflussparameter (A_{serr} =6 mm bis 22 mm, λ_{serr} =4 mm bis 22 mm, φ =0,13 bis 0,21 und Tu=2,6 % bis 12,1 %) des Versuchsraumes wurde ein Messplan nach dem Latin Hypercube Sampling erstellt, der den höchsten Informationsgehalt prognostizierte, wonach die Parametervariationen festgelegt und anschließend per CAD Re-Design konstruiert und per Rapid Prototyping gefertigt wurden. Der Messplan wurde zur Fehlerminimierung randomisiert abgefahren.

Bereits die Bestimmtheitsmaße der Summenpegel der Breitband-, Tonal- und BPF-Anteile, sowie dem Gesamtpegel, der sich aus der energetischen Aufsummierung dieser drei zusammensetzt, zeigten, dass das Modell sehr gut prognostiziert, sowohl im Zeitbereich, im spektralen Bereich, als auch die einzelnen Terzbänder.

Die drei randomisiert bestimmten Validierungspunkte bestätigten die sehr gute Prognose. Die Serration A_{serr} =22 mm mit λ_{serr} =22 mm, φ =0,21 und Tu=12,1 % zeigte hier, bis auf den niederfrequenten Bereich, leicht erhöhte Abweichungen, die aber höchstwahrscheinlich daraus resultieren, dass die Einflussparameter alle an der positiven Grenze des Versuchsraums liegen (+1). Leicht erhöhte Abweichungen waren ebenfalls bei allen drei Validierungspunkte im hohen Frequenzbereich zu sehen. Die BPF-Anteile zeigten bis auf leichte Abweichungen, die nicht signifikant sind, sehr gute Prognosen.

Die Analyse der totalen-, breitbandingen-, tonalen- und BPF-Summenpegel zeigte ebenfalls vielversprechende Ergebnisse. Hierzu wurde im Versuchsraum vom Nullpunkt aus gesehen in alle Raumdimensionen hin variiert, um die wichtigsten Tendenzen und Gesetzmäßigkeiten aufzeigen zu können, und es konnten diverse im Vorfeld ermittelte Skalierungen der Parametervariationen bestätigt werden, die nun mittels Modell simuliert werden können. Es wurde gezeigt, dass die Schallreduktion und der Stall-Bereich beim Gesamtsummenpegel bei größere werdenden Amplitude mit $\lambda_{serr}=13$ mm sich immer mehr zur niedrigen Lieferzahl bewegt. Die tonalen Anteile bestätigten dies ebenfalls. Eine weitere Skalierung der Schallreduktion und des Stall-Bereichs zu kleineren Lieferzahlen hin bei kleiner werdender Wellenlänge λ_{serr} konnte ebenfalls mittels Prognosen aufgezeigt werden (Gesamtsummenpegel und Breitbandsummenpegel). Die $\lambda_{serr}=22$ mm in Verbindung mit $A_{serr}=14$ mm als aeroakustisch sehr ungünstig, da sie über den größten Lieferzahlbereich höhere Pegel, als die Baseline abstrahlt. Eine spektrale Darstellung der Ergenisse, die ebenfalls im Versuchsraum vom Nullpunkt aus variiert wurde, brachte hier auch Aufschluss über die Tendenzen und Gesetzmäßigkeiten im Frequenzbereich. So konnte gezeigt werden, bei welcher Lieferzahl (φ =0,13) über welchen Frequenzbereich (13-1259 Hz) die Pegel wie hoch (bis zu 10 dB) bei Variation des Turbulenzgrades (2,6 % bis 12,1 %) skalieren. Bei φ =0,17 war diese Skalierung noch über den Frequenzbereich von 13-251 Hz zu erkennen mit einer maximalen Pegeländerung von 7 dB, während bei einer Lieferzahl von $\varphi=0,13$ keine signifikante Änderung mehr einstellte. Solch eine Skalierung war im tonalen Anteil ebenfalls zu erkennen (bei φ =0,21 skaliert $\Delta OASPL_{BB}$ mit max. 10 dB im Frequenzbereich von 25-1259 Hz und bei φ =0,17 mit max. 5 dB im Frequenzbereich von 25-501 Hz) und auch im BPF-Bereich bei niedriger und mittlerer Drosselung von 800-1200 Hz. Die Variation der Amplitude zeigte im spektralen Bereich bei niedriger und mittlerer Last Skalierungen von hoher Amplitude mit niedrigeren negativen Frequenzspitzen zu höheren Pegeln bei niedrigerer Amplitude. Diese Effekte spiegelten sich tonal ebenfalls über einen ähnlichen Frequenzbereich wieder. Die Variation von λ_{serr} zeigte im breitbandigen Spektralbereich positive Eigenschaften zur Schallreduktion für $\lambda_{serr}=4$ mm im Frequenzbereich von 794-3981 Hz (2,5 dB max.) bei geringer Last und im Frequenzbereich von 200-1259 Hz (11 dB max.) bei mittlerer Last. Hier waren tonal bei niedriger Last sehr große Unterschiede ($\lambda_{serr}=8,5 \text{ mm}$, $\lambda_{serr}=22 \text{ mm}$ und $\lambda_{serr}=4 \text{ mm}$) im mittelfrequenten Bereich festzustellen, die sich so direkt nicht erklären ließen.

Gesondert wurde die Serration A_{Serr} =22 mm mit λ_{serr} =4 mm mit der Baseline vergleichen, da hier im Vorfeld schon hohe Schallreduktionen bestätigt wurden, die das Modell über den kompletten Breitband- und BPF-Bereich und größtenteils tonal auch so auch prognostiziert hat. Der Spitzenwert der Schallreduktion lag hier tonal bei 400 Hz mit 12,7 dB vor.

Zu guter letzt wurden die Wirkungsgrade des Modells mit denen einer vorigen Untersuchung verglichen. Hier fielen teilweise signifikante Unterschiede von Prognose zu Beobachtung auf, die aber keineswegs an der Ungenauigkeit des Modells, sondern an den von Grund auf verschiedenen Messprinzipien liegt und nochmal verdeutlicht wie wichtig ein randomisierter Ablauf der Messung ist.

Abschließend kann also gesagt werden, dass das Modell sehr gut prognostiziert und die Forschungsfrage klar positiv beantwortet werdet kann.

Da in dieser Thesis ausschließlich über die gesamte Spannweite verdrehte Leading Edge Serrations aeroakustisch (und aerodynamisch) vermessen wurden könnten in Zukunft auch von anderen, bereits getesteten und neuartigen Serrations, Modelle anhand von Latin Hypercube Sampling erstellt werden. So ist es möglich kostengünstig mit relativ wenig Zeitaufwand eventuelle positive (oder auch negative) Aspekte und Tendenzen zu erforschen. Ebenfalls könnten unter Umständen die Einflussparameter erhöht werden. Hier könnte z.B. die Sehnenlänge hinzugenommen werden, die wiederrum komplett andere aeroakustische und aerodynamische Eigenschaften mit sich bringen würde.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Carolus, T.: Ventilatoren. Aerodynamischer Entwurf, Schallvorhersage, Konstruktion. 3. überarb. und erw. Aufl. s.l.: Springer Vieweg, 2013
- [2] Biedermann, T., Reich, M., Kameier, F., Adam, M., Paschereit, C.O.: Assessment of Statistical Sampling Methods and Approximation Models Applied to Aeroacoustic and Vibracoustic Problems
- [3] Schade, H., Kunz, E., Kameier, F., Paschereit, C.O.: Strömungslehre. 4. neu bearb. Aufl. Berlin: de Gruyter Studium. Online verfügbar unter https://www.degruyter.com.ezp.hs-duesseldorf.de/viewbooktoc/product/184158
- [4] Schirmer, W.: Technischer Lärmschutz. 2., bearb. und erw. Aufl., Dresden: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 2006
- [5] ISAVE (2015): Lärmschutz2_LKE.pdf
- [6] Möser, M.: Technische Akustik. 9. aktual. Aufl., Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, 2012
- [7] Laermschutz_Praktikum_I_SS2017.pptx
- [8] Henn, H., Reza Sinambari, Gh., Fallen, M.: Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. 4. überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2008
- [9] Mario Adam (2019): Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments). Skript Vorlesung. Düsseldorf
- [10] http://www.neuronalesnetz.de/downloads/neuronalesnetz_de.pdf
- [11] ISAVE (2017): Laermschutz_Pruefungsvorbereitung_PCz_20170704.pdf
- [12] ISAVE (2016): Laermschutz_Praktikum_IV_SS2016_neu.pptx
- [13] Siebertz, K., van Bebber, D., Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE), 2. Aufl., Berlin: Springer-Verlag 2010, 2017
- [14] http://www.netaudio.de/psychoakustik/Daten/filter/filterbegriffe.htm
- [15] <u>https://www.cl.uni-heidelberg.de/~mujdricz/referate/Referate/AkustikdesSpre-</u> <u>chens.pdf</u>
- [16] Biedermann, T., Kameier, F., Paschereit, C.O.: Successive aeroacoustic transfer of leading edge serrations from single airfoil to low-pressure fan application. Proceedings of ASME Turbo Expo 2019 (2019)
- [17] <u>https://biophilesblog.files.wordpress.com/2015/06/450px-feather_of_long_ear_owl.jpg?w=340&h=453</u>

- [18] <u>http://www.geotimes.org/july08/Rossiter1crop.jpg</u>
- [19] Chaitanya, P., Narayanan, S., Joseph, P., Vanderwel, C., Turner, J., Kim, J. W., Ganapathisubramani, B.: Broadband noise reduction through leading edge serrations on realistic aerofoils. AIAA Aviation (2015)
- [20] Corsini, A., Delibra, G., Rispoli, F., Sheard, A. G.: Aeroacoustic Assessment Of Leading Edge Bumps In Industrial Fans. FAN2015 (2015)
- [21] Biedermann, T. M., Czeckay, P., Geyer, T. F., Kameier, F., Paschereit, C. O.: Effect of Inflow Conditions on the Noise Reduction Through Leading Edge Serrations.
- [22] Grieb, H.: Verdichter f
 ür Turbo-Flugtriebwerke. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [23] Reza Sinambari, Gh.: Konstruktionsakustik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- [24] <u>http://stroemungsakustik.de/old.mv.fh-duesseldorf.de/d_pers/Ka-</u> meier_Frank/c_veroeffentlichungen/Dissertation_kameier220405d.pdf
- [25] Werner, M.: Signale und Systeme, 3. vollständig überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2008
- [26] Biedermann, T. M., Kameier, F., Paschereit, C. O.: Optimised Test Rig For Measurements Of Aerodynamic And Aeroacoustic Performance Of Leading Edge Serrations In Low-Speed Fan Application. Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 (2018)
- [27] Biedermann, T. M., Reich, M., Kameier, F., Adam, M., Paschereit, C.O.: Assessment of Statistical Sampling Methods and Approximation Models Applied to Aeroacoustic and Vibroacoustic Problems
- [28] DIN EN ISO 5136: Akustik Bestimmung der von Ventilatoren und anderen Strömungsmaschinen abgestrahlten Schallleistung – Kanalverfahren (ISO 5136:2003); Deutsche Fassung EN ISO 5136:2009
- [29] Biedermann, T. M.: Aeroacoustic Transfer of Leading Edge Serrations from Single Aerofoils to Low-Pressure Fan Applications, eingereichte Dissertation, TU Berlin, 2019





Abbildung 9-1: Wirkungsgradkennlinien der Prognosen und gemessenen Daten aus der Voruntersuchung

10 Anhang B - Tabellen

10.1 Messpläne

No.	Amplitude	Wellenlänge	Lieferzahl	Turbulenz
	A _{serr}	λ_{serr}	φ	Tu
1	1	-0,75	0,5	*
2	-0,75	-1	0,25	*
3	0,75	1	-0,25	*
4	-0,25	-0,5	-0,75	*
5	0,25	0,5	0,75	*
6	-1	0,75	-0,5	*
7	-0,5	0,25	1	*
8	0,5	-0,25	-1	*
9	0,46	0,99	0,49	*
10	-0,81	-0,93	-0,01	*
11	0,84	-0,14	-0,91	*
12	-0,42	0,53	-0,58	*
13	0,16	-0,34	0,93	*

Tabelle 10-1: Normierter Versuchsplan LHD

Tabelle 10-2: Normierter Versuchsplan LHD Starpoints

No.	Amplitude	Wellenlänge	Lieferzahl	Turbulenz
	A _{serr}	λ_{serr}	φ	Tu
1	1	1	-1	*
2	1	-1	-1	*
3	-1	1	-1	*
4	-1	-1	-1	*
5	1	-1	1	*
6	1	1	1	*
7	-1	1	1	*
8	0	0	0	*
9	-1	-1	1	*

No.	Amplitude	Wellenlänge	Lieferzahl	Turbulenz
	A _{serr}	λ_{serr}	φ	Tu
1	0	0	-1	*
2	0	0	-0,5	*
3	0	0	0	*
4	0	0	0,5	*
5	0	0	1	*

 Tabelle 10-3:
 Normierter
 Versuchsplan
 LHD
 BSLN

10.2 Bestimmtheitsmaße

Tabelle 10-4: Bestimmtheitsmaße der Terzbänder der Breitbandanteile

f_m	12,5	16	20	25	32	40	50	63	79	100
R²	0,9918	0,9933	0,9922	0,994	0,9962	0,9964	0,9978	0,998	0,9984	0,9973

f _m	126	158	200	251	316	398	501	631	794	1000
R²	0,9986	0,9961	0,9916	0,9946	0,9954	0,9921	0,9931	0,9913	0,9912	0,9928

f _m	1259	1585	1995	2512	3162	3981	5012	6310	7932
R²	0,9723	0,9944	0,9911	0,9904	0,9895	0,9885	0,9926	0,9903	0,993

Tabelle 10-5: Bestimmtheitsmaße der Terzbänder der tonalen Anteile

f_m	25	32	40	63	79	100	126	158	251	316
R²	0,9931	0,9756	0,9959	0,9979	0,9974	0,998	0,9971	0,9876	0,9964	0,995

f _m	398	501	631	794	1000	1259	1585	1995	2512	3162
R²	0,9551	0,9906	0,9854	0,9629	0,9911	0,9893	0,992	0,9183	0,9917	0,9879

f_m	3981	5012	6310	7943
R²	0,7906	0,9938	0,9918	0,9938

f _m	200	400	600	800	1000	1200
R²	0,9167	0,9631	0,9263	0,9324	0,9884	0,9369

Tabelle 10-6: Bestimmtheitsmaße der Terzbänder der BPF-Anteile

Tabelle 10-7: Bestimmtheitsmaße aerodynamischen Kenngrößen Ψ und η

	Ψ	η
R²	0,9346	0,947

11 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, David Delgado Hernandez, an Eides statt, die vorliegende Bachelor-Thesis selbständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben.

Dies ist die von der Hochschule Düsseldorf zu bewertende Version.

Ort, Datum ______ Unterschrift _____