

Bachelor-Thesis
im
Studiengang
Prozess-, Energie- und Umwelttechnik

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

Daniel Delgado Hernandez
Matrikelnummer 642291

Düsseldorf
Oktober 2019

Betreuender Professor (Erster Prüfer)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Becker-Schweitzer
Institute of Sound and Vibration Engineering
Fachbereich Medien
Münsterstraße 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

Aerodynamische 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 Aerodynamik in die Thematik eingestiegen werden. Ein aerodynamisches 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 Rotorschaukelsets, 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 Aufgabenstellung, 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 aerodynamischen Kenngrößen wie dem Wirkungsgrad und der statischen Druckerhöhung sowie stark instationären Messgrößen in Form von Wanddruckschwankungen in der Rotorebene. Gewonnene Zusammenhänge und Erkenntnisse werden mit experimentellen Messergebnissen sowie einer parallel laufenden Analyse aeroakustischer Zielgrößen abgeglichen und in Zusammenhang gebracht.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation und Leading Edge Serrations	2
1.2. Forschungslücke/Forschungsfrage	3
2. Theoretische Grundlagen und Stand der Technik.....	4
2.1. Ventilatoren	4
2.2. Kennzahlen Axialventilatoren	8
2.3. Kennlinien Axialventilatoren	9
2.4. Strömungsmechanik.....	11
3. Versuchsaufbau	17
3.1. Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136	17
3.2. Turbulenzerzeugung	18
4. Versuchsplanung	21
4.1. Statistische Versuchsplanung	21
4.2. Latin Hypercube	22
4.3. Künstliche neuronale Netze.....	24
4.4. Einflussgrößen	24
4.5. Zielgrößen	25
5. Praktische Durchführung.....	28
5.1. Re-Design in CAD.....	28
5.2. Aufbereitung und Montage der Tragflügel	29
5.3. Durchführung der Messungen	30
6. Analyse	32
6.1. Validierung ψ und η	32
6.2. Validierung der drei Testmessungen	33
6.3. Vergleich von Prognose und experimenteller Vorversuche mit aerodynamischen Zielgrößen Ψ und η	37

6.4.	Analyse des Versuchsraums mit aerodynamischen Zielgrößen Ψ und η	41
6.4.1.	Einfluss von λ auf ψ und η über ϕ in Versuchsraummitte.....	42
6.4.2.	Einfluss von ASerr auf ψ und η über ϕ in Versuchsraummitte	44
6.4.3.	Einfluss von Tu auf ψ und η über ϕ in Versuchsraummitte	46
6.4.4.	Einfluss von λ auf ψ und η über ASerr in Versuchsraummitte	48
6.4.5.	Einfluss von Tu auf ψ und η über ASerr in Versuchsraummitte	51
6.4.6.	Einfluss von ϕ auf ψ und η über ASerr in Versuchsraummitte	53
6.5.	Analyse Ψ und η mit unterschiedlichen Einflussgrößen.....	54
6.5.1.	Einfluss von λ auf ψ und λ über ϕ mit großem ASerr.....	54
6.5.2.	Einfluss von Tu auf ψ und λ über ϕ mit großem ASerr und großem λ	57
6.5.3.	Einfluss von ASerr auf ψ und λ über ϕ mit kleinem λ	58
6.6.	Analyse Wanddruckschwankungen im Zeit- und Spektralbereich.....	59
6.7.	Abgleich und Zusammenhang Aeroakustik	65
7.	Zusammenfassung und Ausblick	67
8.	Literaturverzeichnis.....	71
9.	Anhang.....	73
10.	Eidesstattliche Erklärung	80

Symbolverzeichnis

Latein

A	m ²	Oberfläche
A_{Serr}	mm	Amplitude
$A_{N,B}$	m ²	Kreisfläche Nabe mit Blades
A_{Orig}	m ²	Fläche pro Blade
A_{Rohr}	m ²	Rohrfläche
$A_{Rep,B}$	m ²	Repräsentative Fläche einer Blade
c	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
c_{Mittel}	m/s	Gemittelte Strömungsgeschwindigkeit
c_{fL}	-	Auftriebsbeiwert
d	m	Profildicke
d_{Euklid}	m	Euklidischer Abstand
d_{Str}	mm	Strebendicke Gitter
D	m	Durchmesser
D_{Rep}	m	Repräsentativer Durchmesser
$D_{N,B}$	m	Durchmesser Nabe mit Blades
f	Hz	Frequenz
f_m	Hz	Mittenfrequenz
f_o	Hz	Obere Grenzfrequenz
f_u	Hz	Untere Grenzfrequenz
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
l	m	Länge
L_P	dB	Schalldruckpegel
n_B	-	Anzahl Blades
n_f	-	Anzahl Faktoren
n_{Mess}	-	Anzahl Messungen

n	1/s	Drehzahl
p	Pa	Schalldruck
p_0	Pa	Hörschwelle
Tu	-	Turbulenzgrad
U	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
U_e	V	Elektrische Spannung
P_{el}	W	Elektrische Leistung
P_{Aero}	W	Aerodynamische Leistung
P_{Mech}	W	Mechanische Leistung
$\dot{V}$	m ³ /s	Volumenstrom
w	mm	Maschenweite
Y	m ² /s ²	Spezifische Stutzenarbeit
WLP	dB	Wandleistungspegel
WLP_{BB}	dB	Wandleistungspegel breitbandig
WLP_T	dB	Wandleistungspegel tonal

Griechisch

α	°	Anstellwinkel
β_∞	°	Profilanstellwinkel
Δp	Pa	Differenzdruck
η_{System}	-	Systemwirkungsgrad
η_{dyn}	Pa*s	Dynamische Viskosität
η_{Motor}	-	Wirkungsgrad Motor
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität
λ	mm	Wellenlänge
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	m/s	Standardabweichung

φ	-	Lieferzahl
φ_{abs}	-	Absolutwert Lieferzahl
ψ	-	Druckzahl
ω	1/s	Kreisfrequenz

Abkürzungsverzeichnis

DoE	D esign o f E xperiments
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung
EN	E uropäische N orm
ISO	I nternational O rganisation for S tandardization
NACA	N ational A dvisory C ommittee for A eronautics
KNN	K ünstliche n euronale N etze
Re	R eynoldszahl
Tu	T urbulenzgrad
STL	S urface T essellation L anguage
WLP	W andleistungs p egel

1. Einleitung

Ventilatoren sind in der heutigen Zeit kaum wegzudenken. Der von einem Ventilator erzeugte Luftstrom kann sehr unterschiedliche Aufgaben erledigen, dazu zählen z.B. das Anregen der Luftzirkulation, um den Menschen an heißen Sommertagen zu kühlen, die Luftversorgung in Lüftungsanlagen in Gebäuden oder sogar der Transport von schwebefähigen Stoffen in der Luft.

Axialventilatoren, wie in dieser Thesis untersucht wird, sind bei der Förderung von hohen Luftmengen bei vergleichsweise geringer Druckerhöhung gefragt. Diese fördern das Medium in axialer Richtung und haben einen geringen Platzbedarf.

Je nach Anwendungsgebiet gelten unterschiedliche Anforderungen an eine solche Strömungsmaschine, neben akustischen Parametern gehören natürlich auch die aerodynamischen dazu. Um die aerodynamischen Parameter eines Axialventilators für das gesamte technische Spektrum zu prognostizieren, werden in der Regel unterschiedliche dimensionslose Kennlinien erstellt. Anhand dieser Kennlinien ist es beispielsweise möglich, Aussagen zum Wirkungsgrad η , der Druckzahl ψ oder zur Lieferzahl φ zu treffen. Ebenfalls ist es möglich, den Bestpunkt bzw. Auslegungspunkt eines Axialventilators zu bestimmen.

Ein großes Potenzial, Axialventilatoren in aerodynamischer und aeroakustischer Hinsicht zu verbessern, bieten Leading Edge Serrations. Die sinusförmigen Modifikationen an Tragflügeln wurden von der Wissenschaft schon weitgehend untersucht mit der Feststellung, dass diese die Aerodynamik von Axialventilatoren teilweise und die Aeroakustik noch stärker verbessern. Die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) bietet die Möglichkeit, die zum Teil sehr kosten- und zeitintensiven Untersuchungen in einem Modell abzubilden, um den Zusammenhang aerodynamischer und aeroakustischer Parameter zu untersuchen, sowie Verbesserungspotentiale und eventuelle Gesetzmäßigkeiten ausfindig zu machen. Dieses wird mit einem Latin Hypercube Modell realisiert, mit welchem es möglich ist mehrere unterschiedliche Einflussparameter in einem Versuchsraum abzubilden. Der Versuchsraum, dessen Grenzen der verschiedenen Einflussparameter schon im Vorfeld definiert wurden, wird mit einem randomisiert erstellten Messplan abgefahren um eventuelle Störgrößen minimal zu halten und die Ergebnisse der Messungen werden an Dritte (Biedermann et al., 2018) weitergegeben, um diese von künstlichen neuronalen Netzen trainieren zu lassen.

Dazu werden Leading Edge Serrations aus Vorversuchen nach Maßen des Latin Hypercube Modells mit der Software PTC Creo Parametric re-parametrisiert. Im Anschluss an die Re-parametrisierung werden die Tragflügel mittels Rapid Prototyping (3D-Druck) gefertigt und per Hand zur Montage im Axialventilator aufbereitet.

Das trainierte Prognosemodell der künstlichen neuronalen Netze wird in Hinsicht auf die Aerodynamik und Wanddruckschwankungen in der Rotorebene untersucht und analysiert. Dazu zählen die Validierung der Druckzahl ψ und des Wirkungsgrads η sowie die Validierung von drei Testmessungen, ein Vergleich der Prognosewerte der künstlichen neuronalen Netze mit experimentellen Vorversuchen, die Analyse des Versuchsraums mit unterschiedlichen Variationen der Einflussgrößen, die Analyse der Wanddruckschwankungen und ein Abgleich mit der Aeroakustik.

1.1. Motivation und Leading Edge Serrations

Leading Edge Serrations sind Modifikationen an Tragflügeln, welche einen weitgehend sinusförmigen Verlauf besitzen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass diese Modifikationen den Schall reduzieren, zusätzlich dazu steigern sie auch den Wirkungsgrad.

Inspiriert wurden diese durch die Natur, genauer gesagt durch Buckelwale und Eulen: Buckelwale besitzen an den Vorderkanten ihrer Brustflossen sogenannte Tuberkel, welche den Auftrieb des Wals verbessern und ihm eine große Wendigkeit geben. Eulen können einen fast geräuschlosen Sturzflug vollziehen, da sie einen Kamm an der Vorderkante ihrer Federn besitzen. Die Forschung versucht, diese in einem weitgehend sinusförmigen Verlauf der Vorderkanten nachzuahmen.

In Abbildung 1.1.1 ist der Aufbau einer Leading Edge Serration dargestellt, diese wird definiert durch die Amplitude A_{serr} , welche die Höhe des sinusartigen Verlaufs darstellt, während die Wellenlänge λ für den Abstand des Spitze-Spitze-Werts steht.

Leading Edge Serrations wurden schon in genauer Hinsicht auf Aerodynamik und Aeroakustik untersucht. Corsini et al. untersuchten einen Axialventilator mit sinusförmigen Leading Edge Serrations und konventionellen Tragflügeln und verglichen diese. Sie stellten fest, dass der Axialventilator mit Leading Edge Serrations den Schallleistungspegel um bis zu 2,3dB reduzieren kann (Corsini et al., 2015). Biedermann et al. führten im Jahr 2018 ebenfalls Untersuchungen zur Geräuschminderung mit Leading Edge Serrations durch und kamen zu dem Ergebnis, dass hohe Amplituden A_{serr} und kleine Wellenlängen λ am akustisch vorteilhaftesten sind. Bei einer Amplitude $A_{serr} = 45mm$ und einer Wellenlänge $\lambda = 7,5mm$ stellten sie eine Geräuschminderung von bis zu 13,6dB fest. In aerodynamischer Hinsicht zeigte sich, dass hohe Amplituden A_{serr} mit großer Wellenlänge λ sich positiv auf den Auftrieb auswirken. Gegenteilig verhält es sich mit einer großen Amplitude A_{serr} und einer kleinen Wellenlänge λ , dort zeigt sich der schlechteste Auftrieb. (Biedermann et al., 2018) Ferner wurde festgestellt, dass die Verringerung des Auftriebs und des Luftwiderstands mit dem Anstellwinkel abnimmt (Chaitanya et al., 2015).

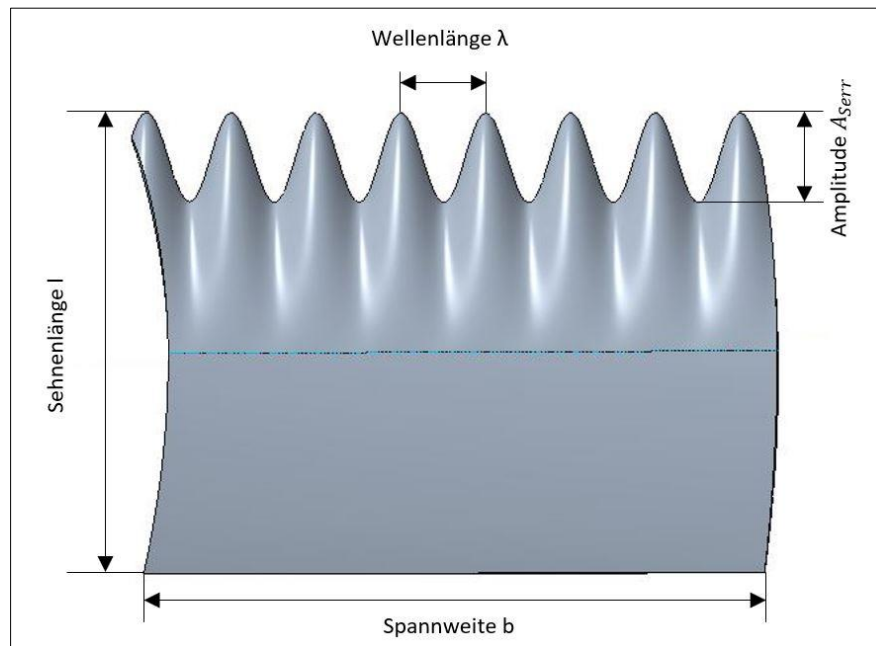


Abbildung 1.1.1: Maße der Leading Edge Serrations

1.2. Forschungslücke/Forschungsfrage

Sinusförmige Modifikationen an Vorderkanten von eben gelagerten Tragflügeln bieten vielversprechende Eigenschaften in Hinsicht auf Aerodynamik und Aeroakustik. Dieses Potential der Aerodynamik wurde schon eingehend bei radialen Strömungsmaschinen untersucht und soll nun bei axialen Strömungsmaschinen untersucht werden, jedoch sind die Möglichkeiten durch hohe Kosten und Fertigungsbeschränkungen limitiert.

Um diese aerodynamische Analyse von Leading Edge Serrations trotzdem durchzuführen wird ein Modell mittels eines Latin-Hypercube-Samplings gebildet, die Leading Edge Serrations re-designed, mittels 3D-Prototyping gefertigt, mit einem nach DIN EN ISO 5136 gebauten Rohrprüfstand messtechnisch erfasst und anschließend mittels künstlicher neuronaler Netze trainiert.

Es stellt sich die Frage: Wie ist der generelle Zusammenhang der verschiedenen Einflussparameter auf die aerodynamische Performance in Hinblick auf die Prognostizierbarkeit und Überführbarkeit vom ebenen ins rotierende System?

2. Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert, welche für das Verständnis dieser Thesis notwendig sind. Dies beinhaltet unter anderem den Aufbau von Ventilatoren, welche relevanten Messgrößen die Performance eines Ventilators beschreiben und wie ein Ventilator vermessen wird. Auf die Grundlagen der Strömungsmechanik wird ebenfalls eingegangen, da diese für die Aerodynamik von Ventilatoren der maßgebliche Faktor sind.

2.1. Ventilatoren

Ein Ventilator ist eine Strömungsmaschine, die zur Förderung von Luft und Gasen dient. (Weber 2019, S. 155). Es existieren unterschiedliche Arten von Ventilatoren, in Abbildung 2.1.1 sind diese beispielhaft zu sehen. Von links nach rechts sind diese Bauarten wie folgt: Axialventilator, Halbaxialventilator, Halbradialventilator, Radialventilator und Trommelventilator. Diese Bauarten unterscheiden sich, wie die Pfeile an den einzelnen Ventilatoren zeigen, in der Durchströmrichtung des zu fördernden Mediums. Welcher Ventilator für welchen Fall gewählt wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Diese sind unter anderem die Leistungsanforderungen, die Anschaffungskosten, die Einsatzbedingungen (z.B. die Umgebungstemperatur und ob dieser wenig Schallemissionen aussenden soll) und wie hoch der Platzbedarf ist (Schirmer 2006, S. 235). Axialventilatoren im Allgemeinen stehen für einen hohen Wirkungsgrad, ebenso für einen großen Betriebsbereich bei guten Teillastwirkungsgraden und für eine gute Regelbarkeit mit variablen Volumenströmen und variablem Druck (Weber 2019, S. 160).

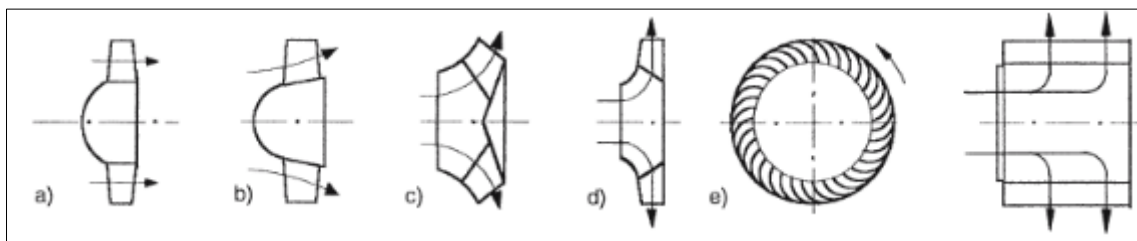


Abbildung 2.1.1: Bauarten von Ventilatoren (Schirmer 2006, S. 235)

In dieser Thesis wird ein Niederdruckaxialventilator verwendet, weswegen nun nur noch auf diesen eingegangen wird.

Bei Niederdruckaxialventilatoren stehen die Tragflügel weit auseinander, damit diese von den Nachbartragflügeln kaum beeinflusst werden und somit isoliert sind (Carolus 2013, S. 45). In Abbildung 2.1.2 ist die schematische Laufradart eines Niederdruckventilators zu sehen. Für die

Durchführung dieser Bachelorthesis wurde der Niederdruckaxialventilator mit insgesamt sechs Tragflügeln ausgestattet.

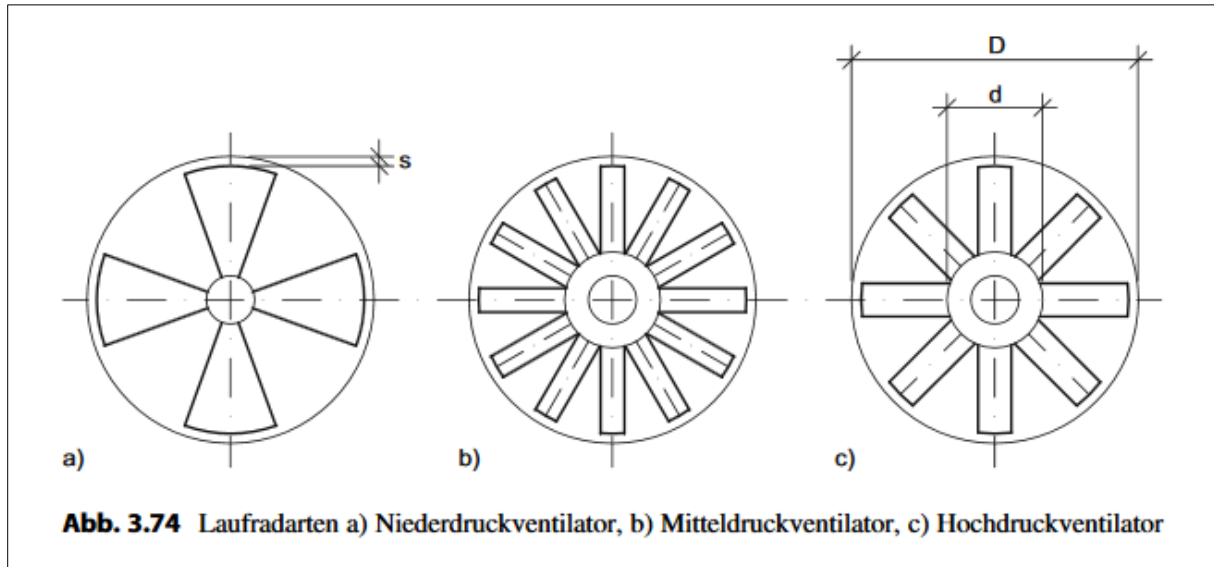


Abbildung 2.1.2: Laufradarten von Ventilatoren (Weber 2019, S. 162)

Abbildung 2.1.3 zeigt auf, mit welchem Nabenverhältnis, also das Verhältnis vom Nabendurchmesser zum Gehäusedurchmesser, ein Niederdruckventilator bis zu welcher Druckerhöhung betrieben werden kann.

Unter dem Nabenverhältnis versteht man: d/D		
	Nabenverhältnis	Drücke bis
Niederdruckventilator	0,25 bis 0,4	ca. 300 Pa
Mitteldruckventilator	0,4 bis 0,5	ca. 3000 Pa
Hochdruckventilator	0,5 bis 0,7	ca. 10000 Pa

Abbildung 2.1.3: Nabenverhältnis und Druckerhöhung Niederdruckventilator (Weber 2019, S. 162)

Ventilatoren arbeiten mit dem Prinzip der Druckerhöhung. Es gibt eine Saugseite, welche vor dem Rotor sitzt. Diese saugt das zu fördernde Medium, in dem Fall dieser Thesis die Luft, an. Nachdem diese den Rotor passiert, wird der Druck erhöht. Von dort an ist es die Druckseite. Dieser Aufbau der Druckverhältnisse ist in Abbildung 2.1.4 zu erkennen.

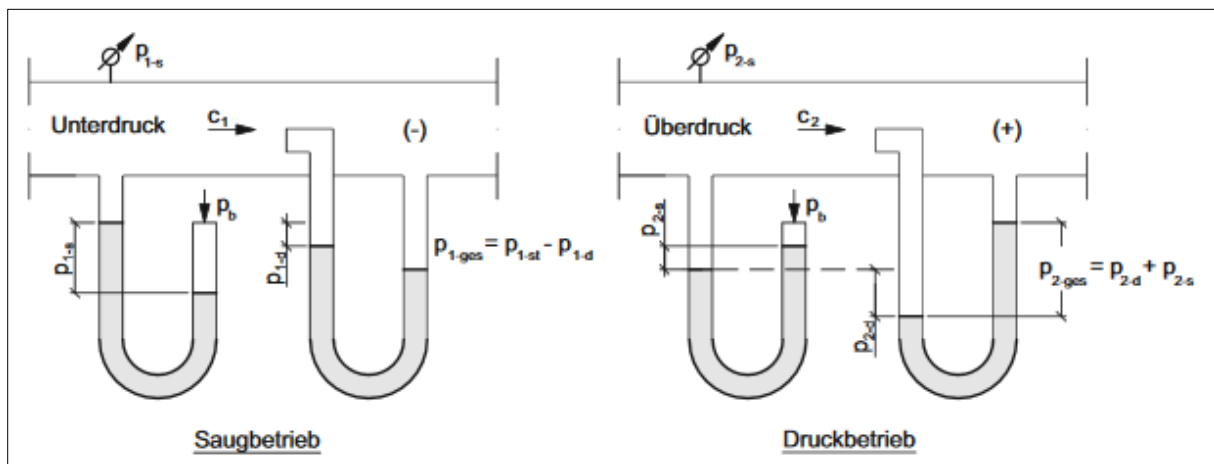


Abbildung 2.1.4: Saug- und Druckverhältnisse bei Strömungsmaschinen (Weber 2019, S. 166)

Für die Durchführung der Thesis wurde das NACA 65-(12)10 Profil aus der Profilgruppe NACA 65, welches in Abbildung 2.1.5 zu sehen ist, gewählt. Dieses ist für den Strömungsmaschinenbau maßgeblich, da es für systematische Gitteruntersuchungen entwickelt wurde (Carolus 2013, S. 54).

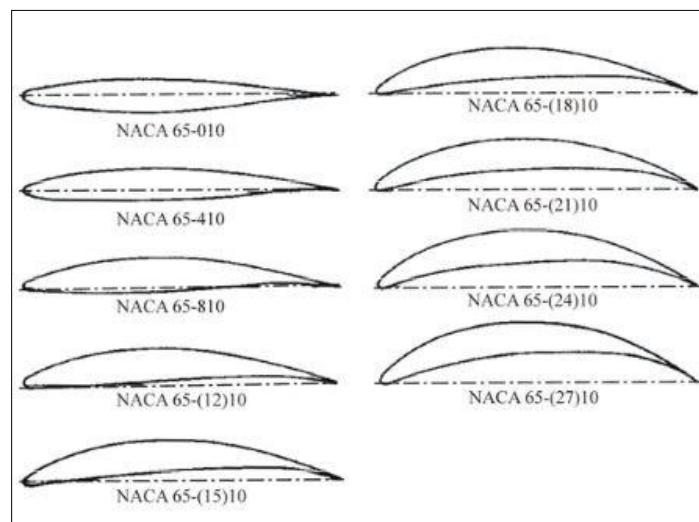


Abbildung 2.1.5: Verschiedene NACA 65 Profile (Carolus 2013, S. 56)

In Tabelle 2.1.1 sind die Profileigenschaften des NACA 65-(12)10 Profils erläutert. Das NACA 65-(12)10 besitzt somit den theoretischen Auftriebsbeiwert $c_{fL} = 1,2$ und eine maximale Profildicke von $d = 10\%$ der Länge l .

Tabelle 2.1.1: Indizes zur Charakterisierung und Eigenschaften des NACA 65-Profils (Carolus 2013, S. 55)

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

Abbildung 2.1.6 zeigt den Staffelungswinkel γ und den Anstellwinkel α für die Tragflügel eines Axialventilators. Dieser lässt sich, bei festgelegtem Profilanstellwinkel β_∞ mit folgender Formel berechnen:

$$\gamma = \beta_\infty + \alpha \quad \text{Formel 2.1.1}$$

Wobei

$\beta_\infty = \text{Profilanstellwinkel in } [^\circ]$

$\alpha = \text{Anstellwinkel in } [^\circ]$

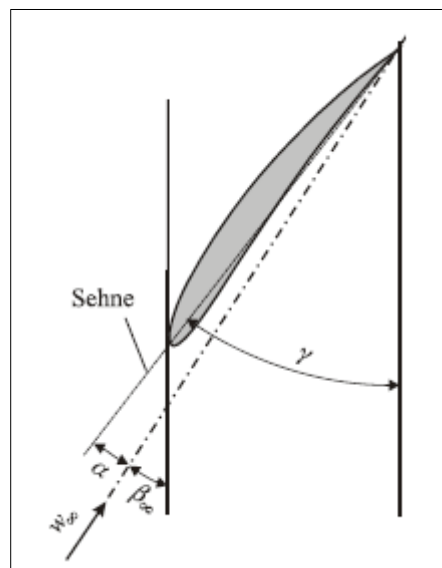


Abbildung 2.1.6: Staffelungs- und Anstellwinkel (Carolus 2013, S. 63)

Der Anstellwinkel α beträgt 7° und der Staffelungswinkel γ beträgt 24° .

2.2. Kennzahlen Axialventilatoren

In diesem Abschnitt werden wichtige Kennzahlen für Axialventilatoren erläutert. Diese sind dimensionslos damit sie drehzahlunabhängig sind und werden benötigt, um Entscheidungen zur Auslegung und zum Betrieb eines Axialventilators zu treffen.

Lieferzahl

Die Lieferzahl φ , welche bei der Auslegung von Strömungsmaschinen eine wichtige Kenngröße ist, stellt das Verhältnis vom Volumenstrom zur Umfangsgeschwindigkeit und des Durchmessers des Laufrades dar. Sie wird auch Volumenzahl oder Durchflusszahl genannt.

$$\varphi = \frac{\dot{V}}{UA} = \frac{\dot{V} \cdot 4}{\pi \cdot D_{Rep}^2 \cdot \pi \cdot D \cdot n} \quad \text{Formel 2.2.1}$$

Wobei

$\dot{V}$ = Volumenstrom in [m³/s]

U = Umfangsgeschwindigkeit in [m/s]

A = Oberfläche in [m²]

D_{Rep} = Repräsentativer Durchmesser in [m]

n = Drehzahl in [1/s]

Druckzahl

Die Druckzahl ψ , welche ebenfalls zur Auslegung von Strömungsmaschinen eine wichtige Kenngröße darstellt, beschreibt die spezifische Stutzenarbeit im Verhältnis zur quadrierten Umfangsgeschwindigkeit am Laufrad. Sie wird auch Arbeitszahl oder Leistungsahl genannt.

$$\psi = \frac{Y \cdot 2}{U^2} = \frac{Y \cdot 2}{\pi^2 D^2 n^2} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot U^2} \quad \text{Formel 2.2.2}$$

Wirkungsgrad

Der Systemwirkungsgrad, welcher Allgemein das Verhältnis vom Aufwand zum Nutzen ist, wird mittels dem Volumenstrom $\dot{V}$, der Druckdifferenz Δp und der elektrischen Leistung P_{el} gebildet. Die Formel ist folgende:

$$\eta_{System} = \frac{P_{Nutzen}}{P_{Aufwand}} = \frac{P_{Aero}}{P_{Mech}} = \frac{P_{Aero}}{\eta_{Motor} * P_{el}} = \frac{\dot{V} * \Delta p}{P_{el}} \quad \text{Formel 2.2.3}$$

2.3. Kennlinien Axialventilatoren

Mit Hilfe von Kennlinien ist es möglich, Aussagen zu möglichen Betriebspunkten und Wirkungsgraden zu treffen. Mit dimensionsbehafteten Kennzahlen wie dem Volumenstrom $\dot{V}$, der spezifischen Stutzenarbeit Y und einer konstanten Drehzahl n ist in Abbildung 2.3.1 eine sogenannte Drosselkennlinie zu sehen. Diese zeigt einen sogenannten stabilen Bereich, in welcher der Axialventilator seinen Auslegungspunkt besitzt. Der instabile Bereich beginnt, wenn der Strömungsabriss, der sogenannte Stallpunkt, Anwendung findet. In diesem Bereich fängt die Strömung an abzureißen, der Druck sinkt und somit herrscht in diesem Arbeitspunkt keine hohe Performance.

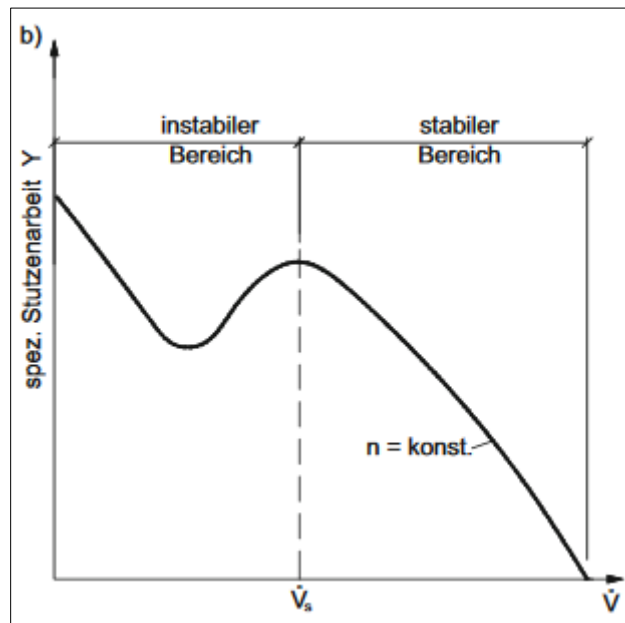


Abbildung 2.3.1: Drosselkennlinie für einen Axialventilator (Weber 2019, S. 183)

In Abbildung 2.3.2 ist eine beispielhafte dimensionslose Wirkungsgradkennlinie, aus Vorversuchen, für einen Axialventilator zu sehen. Mit dimensionslosen Kennzahlen wie die

Lieferzahl φ und der Druckzahl ψ ist es möglich, auf eine beliebige Drehzahl zu schließen. Es ist die höchste Stelle des Verlaufs festzustellen, dieser steht für den maximal möglichen Wirkungsgrad dieses Ventilators und ist somit der Bestpunkt. Im Fall des Beispiels liegt dieser bei einer Lieferzahl $\varphi = 0,19$.

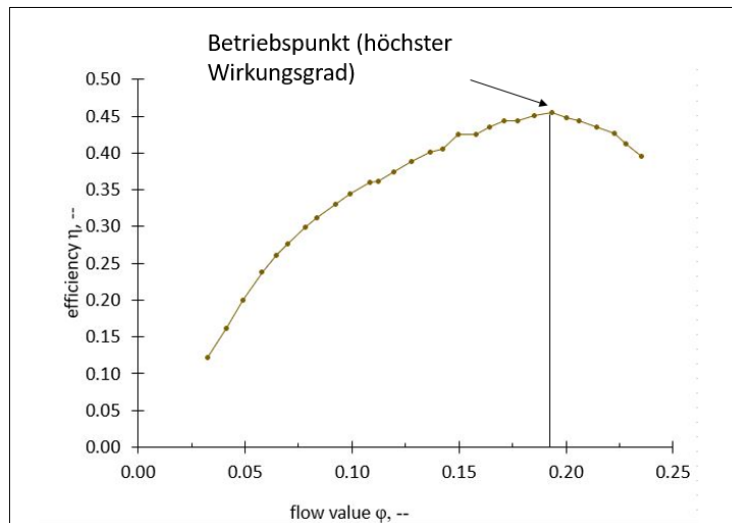


Abbildung 2.3.2: Beispielhafte Wirkungsgradkennlinie η über Lieferzahl φ

Anhand der Lieferzahl $\varphi = 0,19$ lässt sich anschließend in Abbildung 2.3.3 die Druckzahl für diesen Betriebspunkt bestimmen. Dieser liegt im Beispiel bei der Druckzahl $\psi = 0,19$. Nachdem der Axialventilator den Sattelpunkt erreicht und diesen wieder verlässt, erfolgt ein Strömungsabriss.

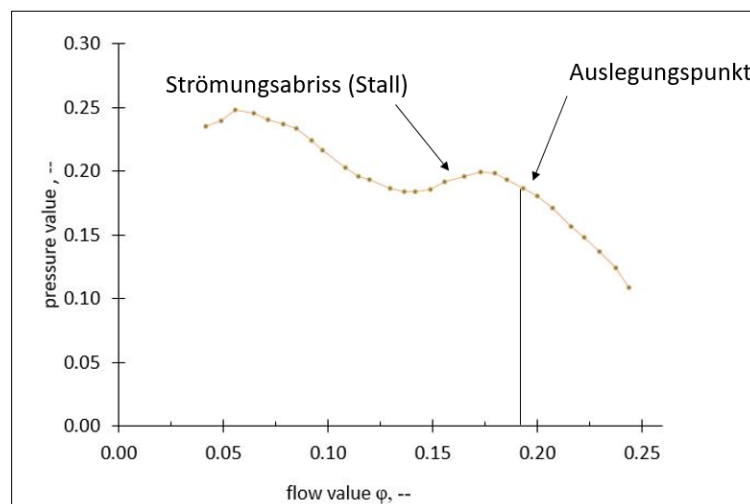


Abbildung 2.3.3: Beispielhafte Druckzahl ψ über Lieferzahl φ

2.4. Strömungsmechanik

In diesem Abschnitt werden die notwendigen Grundlagen der Strömungsmechanik, welche für die Bearbeitung dieser Thesis benötigt werden, erläutert. Dazu zählen der Volumenstrom $\dot{V}$, die Strömungsgeschwindigkeit c , der Satz von Bernoulli mit statischem Druck p_{stat} und dynamischen Druck p_{dyn} , die Reynoldszahl Re , der Turbulenzgrad Tu und Wanddruckschwankungen.

Volumenstrom

Der Volumenstrom, welcher das geförderte Volumen eines Mediums pro Zeit darstellt, setzt sich aus der durchströmten Fläche A und der Geschwindigkeit c dieser zusammen:

$$\dot{V} = A * c = \varphi_{abs} * (n * \pi * D_{N,B}) * (A_{N,B} - n_B * A_{Orig} - A_{Re,B}) \quad \text{Formel 2.4.1}$$

Wobei

$\varphi_{abs} = \text{Absolutwert Lieferzahl } [-]$

$n = \text{Drehzahl in } [1/s]$

$D_{N,B} = \text{Durchmesser Nabe mit Blades in } [m]$

$A_{N,B} = \text{Kreisfläche Nabe mit Blades in } [m^2]$

$n_B = \text{Anzahl Blades } [-]$

$A_{Orig} = \text{Fläche pro Blade in } [m^2]$

$A_{Rep,B} = \text{Repräsentative Fläche einer Blade } [m^2]$

Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit gibt an, mit welcher Geschwindigkeit ein Medium z. B. durch ein Rohr strömt. Die Formel für diese ist folgende:

$$c = \frac{\dot{V}}{A_{Rohr}} \quad \text{Formel 2.4.2}$$

Wobei

$\dot{V}$ = Volumenstrom in $[m^3/s]$

A_{Rohr} = Rohrfläche in $[m^2]$

Bernoulli-Gleichung, Gesamtdruck, statischer Druck, dynamischer Druck

Der Satz von Bernoulli ist einer der wichtigsten Gleichungen der Strömungsmechanik und handelt im Wesentlichen von eindimensionalen Strömungen entlang eines Stromfadens. (Böswirth und Bschorer 2012, S. 25) Anhand dieser ist es möglich, wichtige Berechnungen zur Aero- und Hydrodynamik durchzuführen. Der Satz von Bernoulli ist folgender:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} * c_1^2 + g * h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} * c_2^2 + g * h_2 \quad \text{Formel 2.4.3}$$

Wobei

p_1 = Druck am Messort 1 in $[Pa]$

p_2 = Druck am Messort 2 in $[Pa]$

c_1 = Strömungsgeschwindigkeit am Messort 1 in $[m/s]$

c_2 = Strömungsgeschwindigkeit am Messort 2 in $[m/s]$

g = Erdbeschleunigung in $[m/s^2]$

h_1 = Höhe des Messorts 1 in $[m]$

h_2 = Höhe des Messorts 2 in $[m]$

Der statische Druck p_{stat} ist der Druck, der z.B. auf ein Kügelchen, welches in einer Strömung ohne Relativbewegung mitschwimmt, herrscht. Laut Pascal'schem Gesetz herrscht auf dieses Kügelchen von allen Seiten der gleiche Druck, da es in dem strömenden Medium ruht. Dieser Druck p_{stat} ist auch jener, welcher in der Bernoulli-Gleichung vorkommt (Böswirth und Bschorer 2012, S. 31 f.).

Der Gesamtdruck p_{ges} in einer Strömung kann mit einem Pitotrohr gemessen werden. An der Spitze eines umströmten Körpers, so wie diese Spitze auch an einem Pitotrohr zu finden ist, herrscht die Strömungsgeschwindigkeit $c = 0m/s$. Dort bildet sich ein Staupunkt (Böswirth und Bschorer 2012, S. 32). Dieser Staupunkt am Pitotrohr ist in Abbildung 2.4.1 zu sehen.

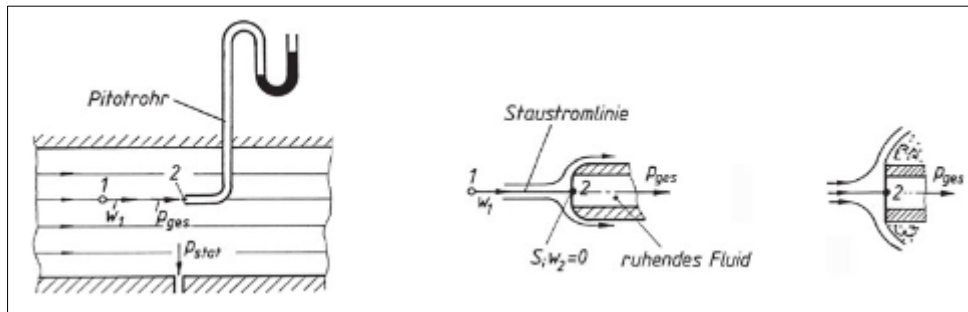


Abbildung 2.4.1: Staupunkt am Pitotrohr (Böswirth und Bschorer, S. 33)

Betrachtet man Punkt 1 und Punkt 2 in Abbildung 2.4.1 und setzt diese Punkte in die Bernoulli-Gleichung ein, so ergibt sich folgendes:

$$p_2 = p_{ges} = p_1 + \frac{1}{2} * \rho * c_1^2 \quad \text{Formel 2.4.4}$$

Daraus ergibt sich für den dynamischen Druck p_{dyn} folgende Formel:

$$p_{ges} = p_{stat} + p_{dyn} \quad \text{Formel 2.4.5}$$

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} * \rho * c^2 \quad \text{Formel 2.4.6}$$

Der dynamische Druck p_{dyn} ist ebenfalls für die Geschwindigkeitsmessung geeignet. Falls dieser und die Dichte ρ bekannt ist, lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit mit folgender Formel berechnen:

$$c = \sqrt{\frac{2 * p_{dyn}}{\rho}} \quad \text{Formel 2.4.7}$$

Der dynamische Druck p_{dyn} , auch Staudruck genannt, kann sehr leicht mit einem Prandtlrohr ermittelt werden, da dieses den Gesamtdruck p_{ges} und den statischen Druck p_{stat} misst (Böswirth und Bschorer, S. 34). Somit kann p_{dyn} über die Differenz derer berechnet werden. Bei den Messungen am Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136, auf welchen später noch eingegangen wird, wird ebenfalls mit einem Prandtlrohr der dynamische Druck p_{dyn} gemessen.

Reynoldszahl

Die Reynoldszahl ist dimensionslos und gibt an, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist (Schade et al., 2013, S. 99). Die Formel ist folgende:

$$Re = \frac{cD}{\nu} = \frac{cD\rho}{\eta_{dyn}} \quad \text{Formel 2.4.8}$$

Wobei

c = Strömungsgeschwindigkeit in [m/s]

D = Durchmesser in [m]

ρ = Dichte in [kg/m³]

ν = Kinematische Viskosität in [m²/s]

η_{dyn} = Dynamische Viskosität in [Pa * s]

Strömungen, die unter der kritischen Reynoldszahl von $Re_{krit} = 2300$ liegen, können laminar sein. Besitzt eine Strömung eine Reynoldszahl $Re > 2300$, ist diese mit hoher Wahrscheinlichkeit turbulent. Die Reynoldszahl ermöglicht außerdem, Vergleiche zwischen anderen Strömungsgeschwindigkeiten und Fluiden unterschiedlicher Viskositäten durchzuführen. In Abbildung 2.4.2 sind die Geschwindigkeitsprofile einer laminaren und turbulenten Strömung zu sehen, bei einer laminaren Strömung liegt diese parabolisch vor. Bei der turbulenten Strömung treten Verwirbelungen in der Strömung auf, dessen Fliessrichtungen sich in allen drei Raumrichtungen räumlich und zeitlich ausbreiten können. Im Rahmen dieser Thesis liegen jedoch nur turbulente Strömungen vor, weswegen die laminare Strömung von nun an in der weiteren Thesis vernachlässigt wird.

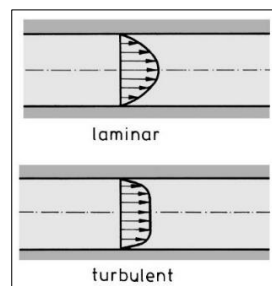


Abbildung 2.4.2: Geschwindigkeitsprofile laminare und turbulente Strömung (Schade et al., 2013, S. 99)

Turbulenzgrad

Der dimensionslose Turbulenzgrad, welcher die Stärke einer Turbulenz beschreibt, bildet sich aus dem Quadrat der Schwankungsgeschwindigkeit und dem Betrag der mittleren Geschwindigkeit über der Zeit.

Wird ein geringer Turbulenzgrad erzeugt, kann dies die kritische Reynoldszahl Re_{krit} beeinflussen indem diese nach oben versetzt wird (Schlichting und Gersten 2006, S. 418). Folglich wird der Umschlagspunkt von laminarer zu turbulenter Strömung erhöht.

Der Turbulenzgrad Tu wird durch folgende Formel definiert:

$$Tu = \frac{1}{\sqrt{3}} * \frac{|\bar{c'}|}{\bar{c}} = \sqrt{\frac{\overline{c'^2_u + c'^2_v + c'^2_w}}{3(\overline{c^2_u + c^2_v + c^2_w})}} \quad \text{Formel 2.4.9}$$

Da die mittleren Geschwindigkeitsschwankungen durch die Turbulenzgitter in allen drei Raumrichtungen gleich groß sind, ist der Turbulenzgrad isotrop:

$$\overline{c'^2_u} = \overline{c'^2_v} = \overline{c'^2_w} \quad \text{Formel 2.4.10}$$

Somit kann die Gleichung vereinfacht dargestellt werden:

$$Tu_{isotrop} = \frac{\sqrt{\overline{c'^2_u}}}{c_\infty} \quad \text{Formel 2.4.11}$$

Wanddruckschwankungen

Wanddruckschwankungen sind hohe Wechseldrücke, die entlang einer turbulenten Strömung an der Wand in der Grenzschicht dieser herrschen. Diese Turbulenzballen, die in etwa so groß wie die Grenzschicht selbst sind, laufen an der Wand entlang, zerfallen und bilden sich ständig neu. Die Geschwindigkeit der Turbulenzballen ist circa 60-80% der freien Strömungsgeschwindigkeit (Müller und Möser 2017, S. 17 f.). Normalerweise ist die Geräuscentstehung in Rohrleitungen vernachlässigbar, jedoch entstehen durch verschiedene Einbauten, wie z.B. einem Ventilator samt Tragflügeln Schallquellen. Diese am Schlitz zwischen rotierenden Tragflügeln und Rohrwand entstehende Druckschwankung breitet sich anschließend im Rohr aus und regt die Wand des Rohrs zu Körperschallschwingungen an, welche teilweise als Luftschall an die Umgebung abgegeben werden können.

Wanddruckschwankungen, welche aus Strömungsturbulenzen resultieren, lassen sich mit wandbündig eingebauten Sensoren bzw. Mikrofonen messen. Diese Sensoren müssen jedoch so eingebaut sein, dass sie die Wandkontur nicht verändern. Dadurch gibt es keine Wechselwirkungen, welche Störsignale beim Aufnehmen dieser Messwerte verursachen. (Möser 2009, S. 649)

In Abbildung 2.4.3 ist ein beispielhafter Aufbau eines 1/4“-Sondenmikrofons zur Messung von Wanddruckschwankungen zu sehen.

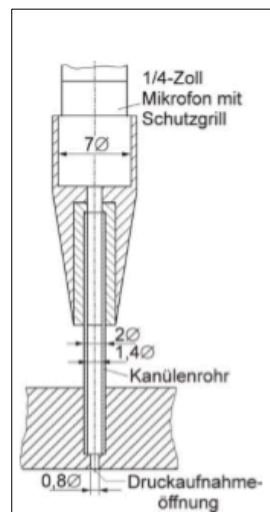


Abbildung 2.4.3: Beispielhafter Mikrofonaufbau zur Wanddruckschwankungsaufnahme (Möser 2009, S. 652)

In der Rohrwand befindet sich eine Bohrung, in welche ein Kanülenrohr mit dem Durchmesser $d_{\text{Kanüle}} = 2\text{ mm}$ eingelassen ist. Damit keine verfälschten Messwerte aufgenommen werden, ist sicherzustellen, dass die Bohrungen keinen Grat aufweisen. Am oberen Ende des Kanülenrohrs befindet sich ein Kuppler, an dem ein 1/4“-Sondenmikrofon angeschlossen ist, welches die Messwerte der Druckschwankungen aufnimmt. Je kürzer das Sondenrohr und das damit verbundene Luftvolumen ist, desto genauer werden die Amplituden der Wanddruckschwankungen aufgenommen. Vor und hinter der Mikrofonmembran ist außerdem darauf zu achten, dass diese nicht statisch ausgelenkt wird und somit die Mikrofonempfindlichkeit verändert wird. (Möser 2009, S. 651 f.) Im Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136, welcher im nächsten Kapitel näher erläutert wird, befindet sich die Messaufnahme unmittelbar vor dem Rotor.

3. Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau für die Durchführung der Messkampagne erläutert. Dazu zählt der Aufbau des Rohrprüfstandes nach DIN EN ISO 5136, die Erzeugung von hochturbulenten Strömungen mittels der Gitter und die Kalibrierung für die Aufnahme der physikalischen Größen.

3.1. Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136

Mit dem Rohrprüfstand, welcher in Abbildung 3.1.1 schematisch dargestellt ist, ist es möglich, aerodynamische und aeroakustische Messungen angelehnt an die DIN EN ISO 5136 und DIN ISO 5801 simultan durchzuführen. Die Luft wird in die Einlaufdüse gesaugt und der daran installierte Schalldämpfer bewirkt, dass diese angesaugte Luft und Rückgeräusche aus dem Rohrprüfstand unterdrückt werden. Das dahinter befestigte Prandtlsche Staurohr misst den dynamischen Druck der Strömung, an Hand dessen kann auf die Geschwindigkeit geschlossen werden. Das Mikrofonarray (1/4“-Kondensatormikrofone) dahinter ist in gleichen Abständen bündig an der Rohrwand verteilt, damit diese die akustischen Messwerte auch gleichmäßig aufnehmen können. Der saug- und der druckseitige Druck wird jeweils über eine Druckringleitung gemessen, welche sechs gleichmäßig über den Umfang verteilte Bohrungen besitzt. Vor dem Ventilator wird jeweils eines der fünf Gitter eingebaut, welche für die unterschiedlichen Turbulenzen in der Strömung sorgen. Die Drehzahl wird mittels eines Triaxial-Beschleunigungsaufnehmers bestimmt, welcher Schwingungsmessungen in drei Achsenrichtungen gleichzeitig aufnehmen kann. Dahinter befindet sich ein Strömungsgleichrichter nach DIN ISO 5801, welcher den Drall verhindert und eine ungleichmäßige Strömung aufheben soll. Dort hinter befindet sich wieder ein Mikrofonarray, welches wie bereits oben beschrieben, in gleichen Abständen bündig an der Rohrwand verteilt die akustischen Messwerte aufnimmt. Die Schlitzrohrsonde, die hinter dem Mikrofonarray sitzt, ist zur Messung der Schallleistung da. Am Ende des Rohrprüfstandes ist ein reflexionsarmer Abschluss mit einer Drossel. Mit der Drossel kann ein beliebiger Lastzustand stufenlos angefahren werden (Biedermann et al. 2018).

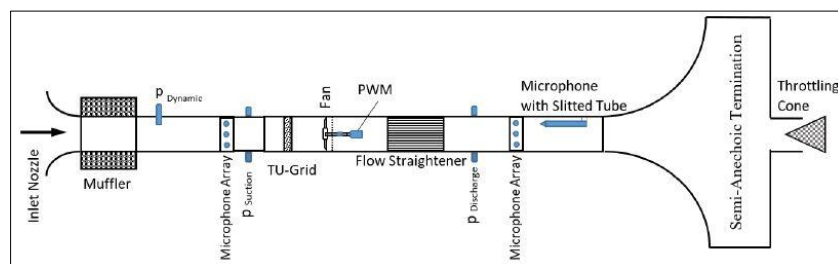


Abbildung 3.1.1: Schematischer Aufbau Rohrprüfstand (Biedermann 2018, S. 5)

Die Messgrößenaufnahme, welche unterteilt ist in langsame Messgrößen, wie z.B. die Temperatur und der Umgebungsdruck (geringe Änderungsrate) und schnelle Messgrößen wie z.B. die Stromstärke und die Drehzahl (hohe Änderungsrate) erfolgt über das Frontend MKII.

Die mittels der Software eingestellte Abtastrate der Mikrofone beträgt $AR = 44100\text{Hz}$ und die Blockgröße von $BG = 32768$. Damit ist es möglich, die Ergebnisse spektral mit einer Frequenzauflösung von $\Delta f = 1,3\text{Hz}$ mit einer Grenzfrequenz von 17kHz zu analysieren. Die Signale werden mittels einer Fast Fourier Transformation mit einem Hanning-Fenster und einem Overlap von 66% bearbeitet und 300-mal gemittelt und gespeichert (Biedermann 2018, S. 5).

3.2. Turbulenzerzeugung

Die fünf in ihren Eigenschaften unterschiedlichen (in Abbildung 3.2.1 aufgeführten), jeweils 400mm im Durchmesser und auswechselbaren Gitter dienen dazu eine hochturbulente Strömung zu erzeugen. Jedes der Gitter besitzt eine andere Maschenweite und erzeugt somit einen anderen Turbulenzgrad.

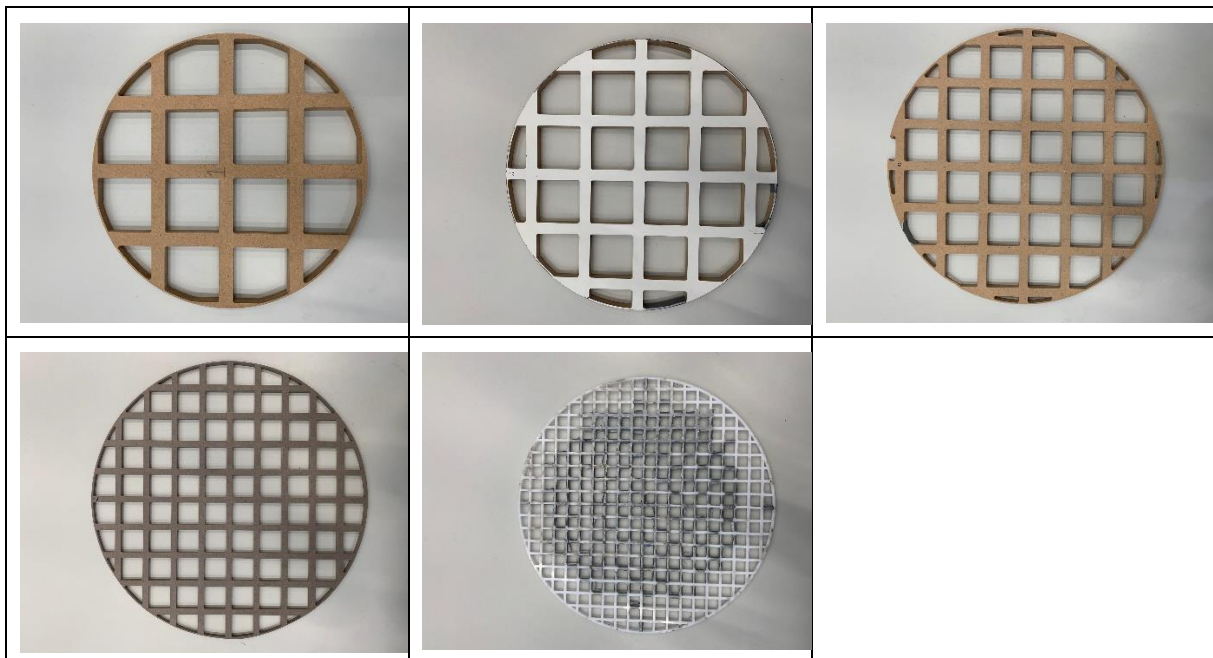


Abbildung 3.2.1: Unterschiedliche verwendete Gitter01-05

Die Gitter werden jeweils 300mm vor dem Axialventilator eingesetzt. Dies ist in Abbildung 3.2.2 zu sehen, dort ist Gitter04 eingebaut. Das Gitter00 entspricht einer Messung im Rohrprüfstand ohne Gitter, während das Nutzen eines Gitters zu einem höheren Turbulenzgrad führt. Die Parameter jedes einzelnen Gitters, zu welchen die Maschenweite w , die Strebendicke d_{Str} , das Verhältnis w/d_{Str} derer, der Turbulenzgrad Tu , die Standardabweichung σ und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit c_{Mittel} zählen, sind in Tabelle 3.2.1 aufgeführt.



Abbildung 3.2.2: Eingebautes Gitter04 im Rohrprüfstand

Tabelle 3.2.1: Unterschiedliche Parameter der einzelnen Gitter (Biedermann 2018, S. 3)

Gitter	w [mm]	d_{Str} [mm]	w/d_{Str}	Tu [-]	σ [m/s]	c_{Mittel} [m/s]
G00	-	-	-	0,026	0,35	13,32
G05	20	4	5	0,036	0,43	12,19
G04	40	8	5	0,053	0,67	11,58
G03	60	12	5	0,075	0,90	11,77
G02	80	16	5	0,096	1,15	11,97
G01	100	20	5	0,121	1,36	11,27

In Abbildung 3.2.3 ist die Regressionskurve des Turbulenzgrads und der Maschenweite dargestellt. Die Regressionskurve ist eine Überprüfung des Zusammenhangs zwischen zwei Parametern. Es lässt sich erkennen, dass die Regressionskurve (gestrichelte Linie) sehr dicht auf dem Kurvenverlauf (TU-Verlauf) liegt und ein Bestimmtheitsmaß $R^2 = 99,24\%$ besitzt. Damit ist sichergestellt, dass ein sehr hoher Zusammenhang zwischen den Turbulenzgraden und der Maschenweite der einzelnen Gitter existiert.

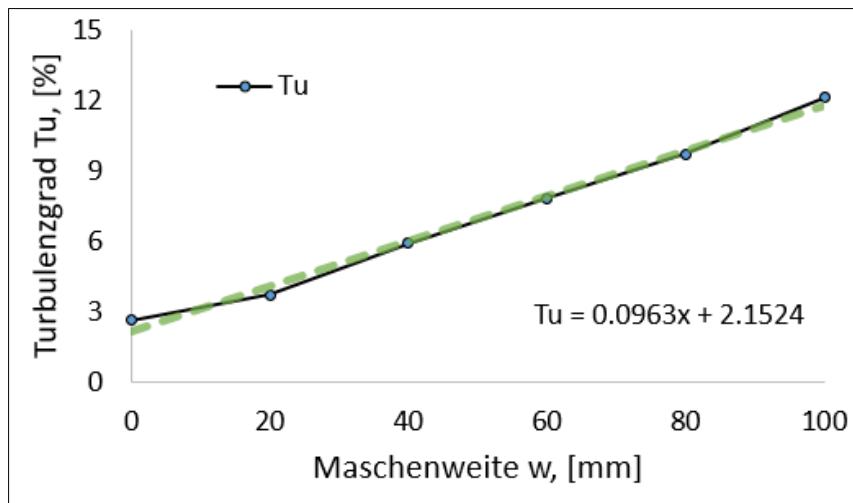


Abbildung 3.2.3: Regressionskurve für Turbulenzgrad und Maschenweite

4. Versuchsplanung

Es folgt das Kapitel der Versuchsplanung. Es werden kurz die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung erläutert, im Anschluss wird auf das Latin Hypercube Modell eingegangen, welches für die Durchführung des Versuchs gewählt wurde. Ebenfalls werden kurz künstliche neuronale Netze, die immer mehr Verwendung in der heutigen Zeit finden, erläutert. Abschließend werden die Einflussgrößen erklärt und die Zielgrößen definiert.

4.1. Statistische Versuchsplanung

Es existieren meist viele Einflussfaktoren, die die Eigenschaften eines Realisierungsprozesses beeinflussen. Um diesen Realisierungsprozess weiterzuentwickeln bzw. diesen zu verbessern, muss mit einer systematisch entwickelten Methode vorgegangen werden. Die statistische Versuchsplanung (DoE) ist ein mittlerweile häufig eingesetztes Mittel, um mit möglichst wenig Aufwand ein Maximum an Informationen aus Experimenten herauszuholen. Durch gezielte Veränderung der Einflussfaktoren und den Einsatz statistischer Analysemethoden wird die Einzelwirkung der Einflussfaktoren auf die Zielgröße ermittelt. (Geiger und Kotte, S. 457)

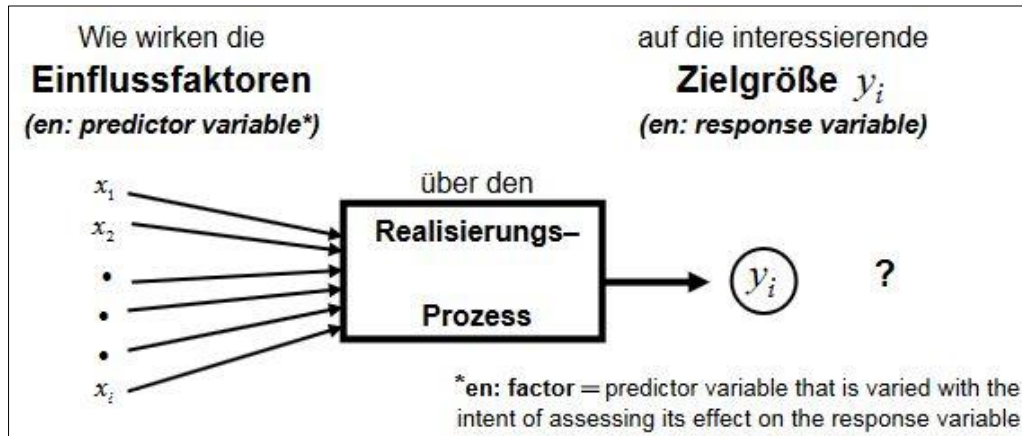


Abbildung 4.1.1: Schema der statistischen Versuchsplanung (Geiger und Kotte, S. 457)

Auf der unteren Abbildung, Abbildung 4.1.2, ist die konventionelle statistische Versuchsplanung für zwei Einflussparameter zu sehen. Bei den Einfaktor-Methoden in der unteren Hälfte der Abbildung, wird jeweils ein Parameter variiert, während der andere konstant gehalten wird. Bei dieser Methode kann man jedoch nicht die Wechselwirkungen zwischen beiden Parametern feststellen. Bei der Methode oben links, die Zufalls-Methode werden zufällige Ergebniswerte gemessen und es ist eine hohe Anzahl von Versuchen notwendig. Die Gitterlinien-Methode im Oberen rechten Bereich hingegen bietet ein präzises Verfahren,

welches jedoch mit einem sehr hohen Versuchsaufwand verbunden ist. Bei dieser Methode besteht die Möglichkeit eine Interpolation und eine Regressionskurve zu bilden.

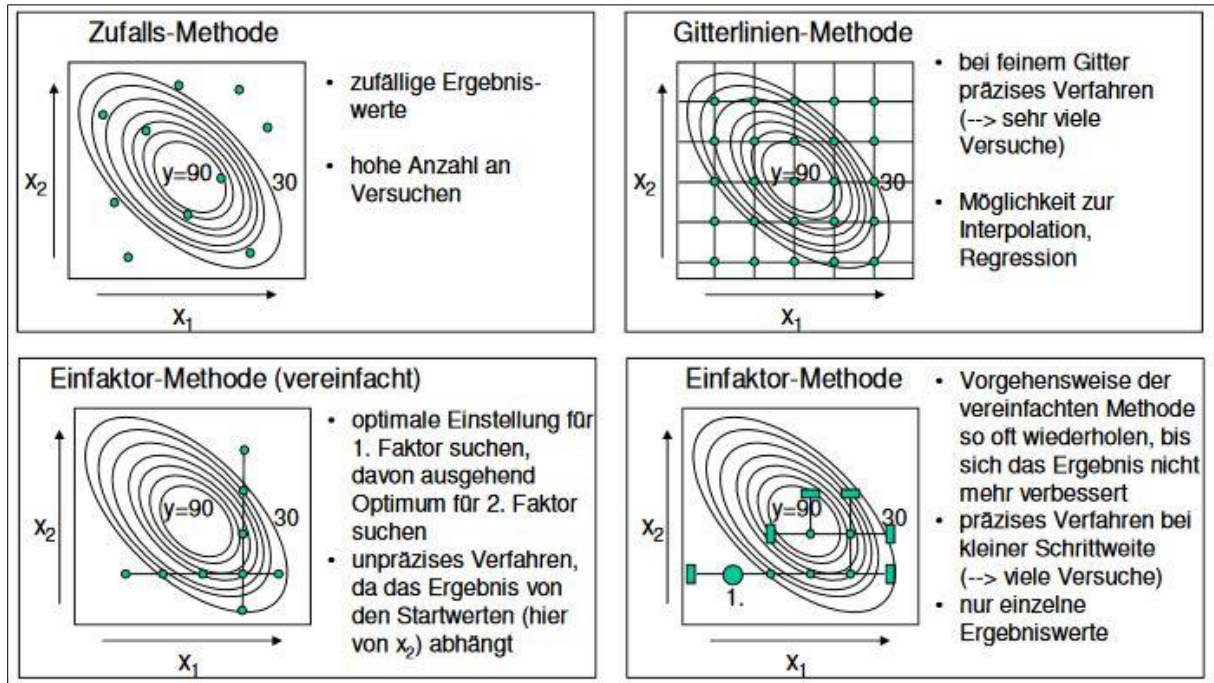


Abbildung 4.1.2: Konventionelle statistische Versuchsplanung (Mario Adam 2017, S. 6)

4.2. Latin Hypercube

Mit dem Latin Hypercube ist es möglich ein Modell zu bilden, in welchem der gesamte Versuchsraum nach anschließendem Training der gewonnen Messdaten von künstlichen neuronalen Netzen, auf welche in diesem Kapitel auch kurz eingegangen wird, vorhergesagt werden kann. So kann im Anschluss der gesamte Versuchsraum analysiert werden.

Das Latin Hypercube-Modell findet normalerweise Anwendung in Computersimulationen und besteht aus einer quadratischen Matrix. Dieses Modell folgt dem Schema, dass jede Stufe einer Einflussgröße mit gleichem Abstand zueinander nur einmal im Versuchsplan vorkommt. Dies ist vor allem wichtig an Stellen mit hoher Dynamik der Zielgrößen. (Mario Adam 2017)

Um einen Versuchsraum optimal zu erzeugen, gibt es verschiedene Beurteilungskriterien. In dieser Arbeit wurde die MaxiMin-Methode mit 15.000 möglichen Versuchspunkten gewählt. Diese maximiert das Minimum mittels des euklidischen Abstands (Abstand zwischen zwei Punkten im Raum) zwischen den Versuchspunkten.

Die Formel für den euklidischen Abstand ist folgende:

$$d_{Euklid} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_f} (x_i - y_i)^2} \quad \text{Formel 4.2.1}$$

Wobei

$n_f = \text{Anzahl Faktoren}$

$x_i = \text{Koordinate } x \text{ des Versuchspunktes}$

$y_i = \text{Koordinate } y \text{ des Versuchspunktes}$

Tabelle 9.1: Aufstellung des Latin-Hypercube-Modells, welche sich im Anhang befindet, zeigt die Grundaufstellung des Latin-Hypercube-Modells. Jeder Punkt im Raum existiert nur einmal, so ist, wie vorher schon beschrieben, sichergestellt, dass jeder Messpunkt in der Messreihe nur einmal vorkommt.

Im Anschluss daran werden, wie Tabelle 4.2.2 im Anhang zeigt, die Stufen des Latin-Hypercube-Modells mittels Interpolation der Grundvariation der vier Einflussgrößen (Tabelle 4.4.1) und der Aufstellung des Latin-Hypercube-Modells gebildet. Anhand dieser Tabelle lässt sich feststellen, dass 18 unterschiedliche Leading Edge Serration Sets (plus eine Baseline) re-designed bzw. gefertigt werden müssen. Da die Messergebnisse abschließend validiert werden müssen, werden drei zufällig ausgewählte Messpunkte, auf welche später eingegangen wird, nicht mittels künstlicher neuronaler Netze trainiert.

In Abbildung 4.2.1 ist der Aufbau der Versuchspunkte zu sehen. Jeder Punkt im Diagramm wird mit dem dazu gehörigen Leading Edge Serration Set und jedem Gitter vermessen, in der Summe macht dies 162 Messungen.

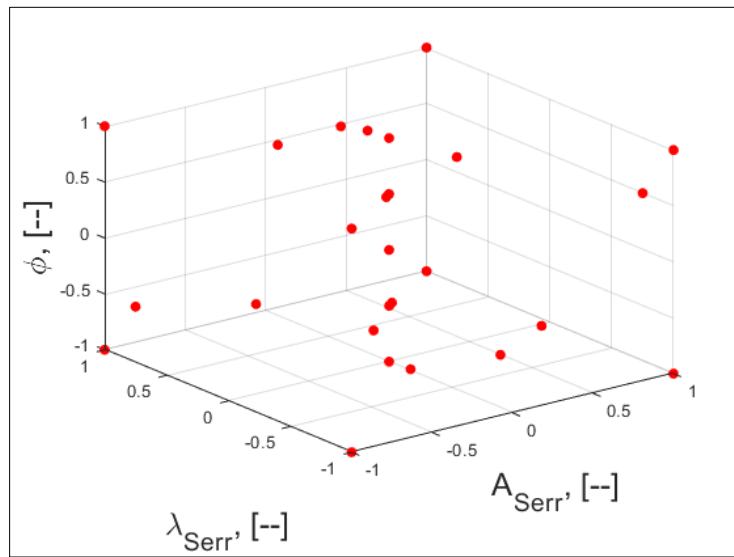


Abbildung 4.2.1: Aufbau der Versuchspunkte im Latin Hypercube

4.3. Künstliche neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze sind computergestützte Metamodelle, das heißt, diese nehmen originale Versuchswerte als Grundlage und bilden aus diesen ein Modell, indem die Versuchswerte wiederholt durch Fehlerrückführung trainiert werden. Inspiriert sind diese durch die Neuronen des menschlichen Gehirns (Siebertz, van Bebbber und Hochkirchen 2017, S. 302). Ziel des wiederholten Trainierens der künstlichen neuronalen Netzwerke ist es, ein zuverlässiges Modell zu bilden, welches auf die Generalisierbarkeit und die Prognosegüte in Bezug auf die Aerodynamik untersucht werden kann.

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit werden die künstlichen neuronalen Netze vonseiten dritter in MATLAB erstellt und die während der Messkampagne gewonnen Daten an diese zum Training weitergegeben. (Biedermann et al., 2018)

4.4. Einflussgrößen

In folgenden Abschnitt werden die Einflussgrößen der Leading Edge Serrations, die Berücksichtigung im Latin Hypercube-Modell gefunden haben, erläutert.

Es existieren zwei Einflussgrößen, welche geometrisch bestimmt sind und zwei, die aerodynamischen Ursprungs sind. Die Amplitude A_{Serr} ist definiert als Spitze-Tal-Wert und dient für die Höhe der einzelnen Schaufeln. Die Wellenlänge λ hingegen, ist der Abstand zwischen zwei Spitzen.

Die zwei aerodynamischen Einflussgrößen sind zum einen die Lieferzahl, welche, wie bereits am Anfang der Thesis erwähnt, das Verhältnis vom Volumenstrom zur Umfangsgeschwindigkeit und des Durchmessers des Laufrades wiedergibt und zum anderen der Turbulenzgrad, welcher zur Charakterisierung turbulenter Strömungen dient. In Tabelle 4.4.1 ist die Gesamtvariation der vier Einflussgrößen dargestellt. Diese ist die Grundlage zur Umwandlung im Latin-Hypercube-Modell und für die Zielgrößen.

Tabelle 4.4.1: Variation der vier unterschiedlichen Einflussgrößen

A [mm]	λ [mm]	φ [-]	Tu [-]
6,00	4,00	0,13	0,026
22,00	22,00	0,21	0,121

4.5. Zielgrößen

Es werden pro Messung drei Zielgrößen berechnet, welche der Aerodynamik zugeordnet werden und insgesamt 57 akustische Werte der Wanddruckschwankungen, die sich aus drei unterschiedlichen Summenpegeln (tonaler, breitbandiger und Wandleistungspegel), 29 Messwerten für das breitbandige Terzband bei einer Frequenzweite von 12,5-8000Hz und 25 Messwerten für das tonale Terzband ebenfalls von 12,5Hz-8000Hz zusammensetzen.

Die aerodynamischen Zielgrößen, welche die Lieferzahl φ , die Druckzahl ψ und der Wirkungsgrad η_{System} sind, wurden bereits im Kapitel Strömungsmechanik definiert, weswegen an dieser Stelle darauf verzichtet wird, diese nochmals zu beschreiben.

Es folgen die Definitionen der instationären aerodynamischen Zielgrößen die notwendig sind, um die Wanddruckschwankungen zu analysieren:

Wandleistungspegel (Schallleistungspegel)

Der Schallleistungspegel ist eine vom Schallfeld unabhängige Größe, welche die Schallenergie beschreibt, die von einer Maschine, wie z.B. einem Ventilator, ausgeht. In dieser Thesis ist dies der Wandleistungspegel, welcher das Äquivalent zum Schallleistungspegel ist. Dieser ist wie folgt definiert:

$$L_W = 10 * \log \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

Formel 4.5.1

Wobei

W = Schallleistung in [W]

W_0 = Bezugsschallleistung in [W]

Der Schallleistungspegel des Rohrprüfstands wird nach DIN EN 5136 bestimmt. Die Formel ist folgende:

$$L_W = \bar{L}_P + (10 * \log \frac{S}{S_0} - 10 * \log \frac{\rho c}{(\rho c)_0}) \quad \text{Formel 4.5.2}$$

Wobei

$\bar{L}_P$ = gemittelter Schalldruckpegel in dB

S = Querschnittsfläche des Messkanals in [m²]

$S_0 = 1\text{m}^2$

$(\rho c)_0 = 400\text{Ns/m}^3$

Terz- und Oktavfilter

Ein akustisches Signal, wie z.B. Schall von einer Schallquelle, kann mittels Terz- und Oktavfilterung in seine Einzelteile (im menschlich hörbaren Bereich von ca. 20Hz-20kHz) zerlegt und untersucht werden. Eine Oktave besteht aus drei nebeneinander liegenden Terzen.

Für alle Filter gilt:

$$f_m = \sqrt{f_u * f_o} \quad \text{Formel 4.5.3}$$

Wobei

f_m = Mittenfrequenz in [Hz]

f_u = Untere Grenzfrequenz in [Hz]

$f_o = \text{Obere Grenzfrequenz in [Hz]}$

Für Oktavfilter gilt:

$$f_o = 2 * f_u \quad \text{Formel 4.5.4}$$

$$f_m = \sqrt{2} * f_u \quad \text{Formel 4.5.5}$$

$$\Delta f = f_u - f_o = f_u = \frac{f_m}{\sqrt{2}} \quad \text{Formel 4.5.6}$$

Für Terzfilter gilt:

$$f_o = \sqrt[3]{2} * f_u = 1,26 * f_u \quad \text{Formel 4.5.7}$$

$$f_m = \sqrt[6]{2} * f_u = 1,12 * f_u \quad \text{Formel 4.5.8}$$

$$\Delta f = 0,26 * f_u \quad \text{Formel 4.5.9}$$

Tonalität und Breitband

Bei einem tonalen Geräusch ist eine Frequenz am dominantesten, sodass ein Peak in diesem vorhanden ist, während ein breitbandiges Geräusch keine dominierende Frequenz besitzt.

Eine genaue Aufstellung aller Zielgrößen, welche in dieser Thesis analysiert werden, findet sich in Tabelle 4.5.1.

Tabelle 4.5.1: Aufstellung der Zielgrößen pro Messung

Aerodynamik			Instationäre Aerodynamik (Wanddruckschwankungen)		
Φ [-]	Ψ [-]	η_{System} [-]	Summenpegel (Tonal, Breitband, Wandleistungspegel) [dB]	Terz breitbandig [2,5- 8000 Hz]	Terz tonal [2,5- 8000 Hz]
1	1	1	Jeweils 1	29	25

5. Praktische Durchführung

In diesem Kapitel wird die praktische Durchführung erläutert. Dazu zählt die kurze Erläuterung der Herangehensweise mit der CAD-Software PTC Creo Parametric 4.0 bis zur Montage der Nabe samt Tragflügel und die Durchführung der Messkampagne im Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136.

5.1. Re-Design in CAD

Die Re-Parametrisierung wurde mit der CAD-Software Creo Parametric 4.0 der Firma PTC, mit welcher es möglich ist, komplexe technische Zeichnungen anzufertigen, durchgeführt. In Abbildung 5.1.1 ist die Front einer Leading Edge Serration aus Vorversuchen abgebildet, welche re-parametrisiert wird. Die unterschiedlichen Parameter der Amplituden A_{serr} und Wellenlängen λ werden für das jeweilige Tragflügelset editiert, separat gespeichert und im Anschluss daran in STL-Files umgewandelt, um diese im Rapid Prototyping fertigen zu lassen. Ebenfalls müssen die zwei Löcher der Bohrungen der Tragflügel mitangepasst bzw. versetzt werden, da diese sich sonst nicht mehr auf Höhe der Plättchenbohrungen befinden.

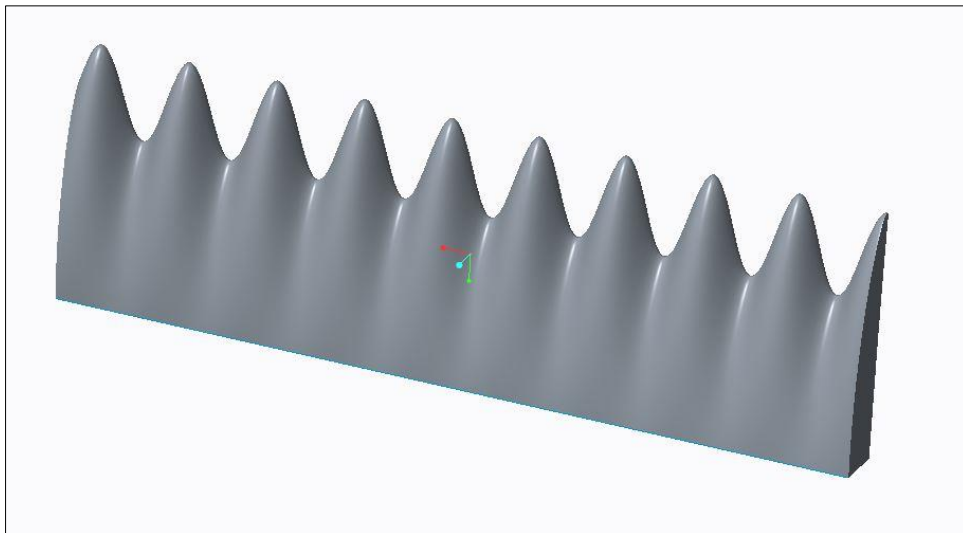


Abbildung 5.1.1: Front einer Leading Edge Serration in Creo

In Tabelle 5.1.1 sind die zu re-parametrisierenden Leading Edge Serrations abgebildet. Dort ist zu sehen, dass, wie im Kapitel Latin Hypercube bereits kurz erwähnt, 18 unterschiedliche Leading Edge Serration Variationen gefertigt werden, plus eine Baseline. Die Baseline ist ein konventioneller Tragflügel ohne Leading Edge Serration.

Tabelle 5.1.1: Zu Re-parametrisierende Leading Edge Serrations

A [mm]	22,00	8,00	20,00	22,00	22,00	6,00	12,00	6,00	16,00	6,00	10,00	18,00	14,00	BSLN
λ [mm]	6,25	4,00	22,00	22,00	4,00	22,00	8,50	4,00	17,50	19,75	15,25	10,75	13,00	BSLN
A [mm]	17,68	7,52	20,72	10,64	15,28									
λ [mm]	21,91	4,63	11,74	17,77	9,94									

5.2. Aufbereitung und Montage der Tragflügel

Die Tragflügel müssen nach dem Rapid Prototyping aufbereitet werden. Der 3D-Drucker in der Hochschule Düsseldorf war zum Zeitpunkt der Fertigung defekt, sodass größtenteils auf eine externe Firma zurückgegriffen werden musste. Die einzigen Leading Edge Serrations, die in der Hochschule gefertigt wurden, sind die Testpunkte. Im Anhang sind die genauen Abmaße dieser zu finden. In Abbildung 5.2.1 ist zu sehen, welchen Zustand die einzelnen Blades nach der Fertigung aus dem 3D-Drucker besitzen. Um die zu fertigende Form der Leading Edge Serrations mit einem Flüssigharz aufzubauen, sind spezielle Gitterstrukturen vonnöten. Diese Gitterstruktur härtet jedoch mit aus und muss entfernt werden, dazu eignet sich zum Beispiel ein Seitenschneider. Im Anschluss daran werden diese mit Schleifpapier bearbeitet, da sich feine Spitzen den Vorderkanten der Blades befinden, die die Messungen negativ beeinflussen können.

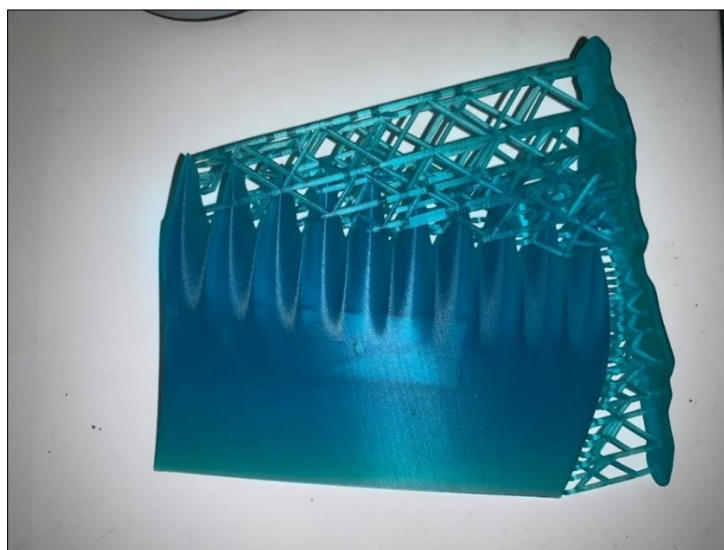


Abbildung 5.2.1: Unbearbeiteter Tragflügel nach Rapid Prototyping

Nachdem die Blades mit Schleifpapier bearbeitet wurden, werden diese auf Metallplättchen gesteckt in welche vorher jeweils zwei Gewinde geschnitten wurden und danach fest verschraubt. In Abbildung 5.2.2 ist ein beispielhafter Satz montierter Tragflügel zu sehen. Dies ist notwendig, da die Tragflügel sonst bei hohen Drehzahlen von der Nabe abrutschen und den Rohrprüfstand beschädigen könnten. Als letzter Schritt werden die Blades mit jeweils drei Schrauben auf der Nabe verschraubt.

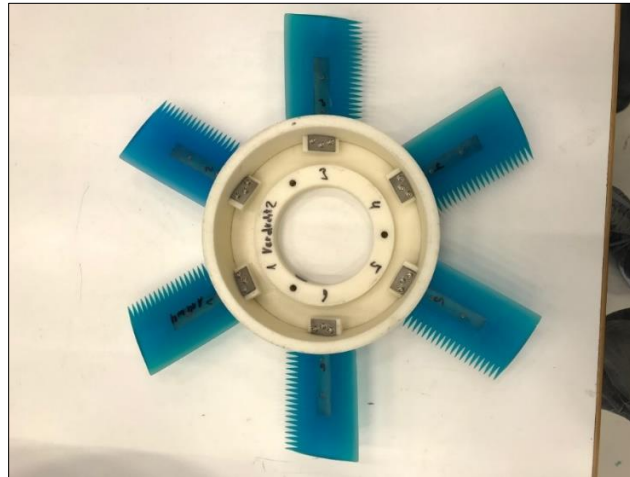


Abbildung 5.2.2: Beispielhafte auf Nabe montierte Tragflügel mit Leading Edge Serrations

5.3. Durchführung der Messungen

Die vorher mit dem Latin Hypercube Modell bestimmten Versuchspunkte im Raum sollen mit so wenig Störquellen wie möglich gemessen werden. Um ein Hochspielen von aerodynamischen und aeroakustischen Messverfälschungen zu unterbinden, werden die Messungen randomisiert gefahren, so werden diese zumindest zufällig gestreut und gleichen sich teilweise aus. Für die Messung wurde ein faktorieller Kern mit fünf Stufen gewählt, die Berechnung dazu ist folgende:

$$n_{Mess} = 2^1 * 3^4 = 162 \text{ Messungen}$$

Da sich aus Gründen von Lieferverzögerungen die Vollständigkeit der unterschiedlichen Tragflügelsets hinauszögerte, wurde anstatt eines gesamten einzelnen Messplans für alle Tragflügel, mittels Blockbildung im Latin Hypercube Modell, vier unterschiedliche Messpläne erstellt. Diese Messpläne sind in Tabelle 9.2, Tabelle 9.3, Tabelle 9.4 und Tabelle 9.5 im Anhang zu finden. Aufgrund von hohen Umbauzeiten nach bzw. vor jeder Messung, wurde vor

Versuchsbeginn eine zweite Nabe gefertigt, die es möglich macht, parallel zur Durchführung der Messungen einen zweiten Satz Tragflügel zu montieren, damit die Umbauzeiten geringer blieben. Ebenfalls wurde nach jeder Messung der Messpunkt nochmals angefahren und die Messung einmal wiederholt. Aus diesen wurde dann der arithmetische Mittelwert gebildet.

6. Analyse

In diesem Kapitel werden die zuvor am Rohrprüfstand nach den Messplänen des Latin Hypercube Modells gemessenen, berechneten und im Anschluss daran an die künstlichen neuronalen Netze trainierten Größen am Rohrprüfstand analysiert. Dazu zählt die Validierung der Druckzahl ψ und dem Wirkungsgrad η , die Validierung der drei Testmessungen, ein Vergleich mit experimentellen Vorversuchen, die ebenfalls mit Leading Edge Serrations durchgeführt wurden, die Analyse der Ventilator Kennlinien der Druckzahl ψ und des Wirkungsgrads η über der Lieferzahl ϕ und der Amplitude A_{Serr} von der Versuchsraummitte ausgehend in die drei Raumrichtungen, eine Analyse mit großen und kleinen Einflussgrößen, eine Analyse der Wanddruckschwankungen und ein Abgleich mit der Aeroakustik.

6.1. Validierung ψ und η

Es folgt eine Validierung der Messpunkte und Prognose der Druckzahl ψ und dem Wirkungsgrad η . Das Bilden der Bestimmtheitsmaße ist notwendig, um die Güte der Prognose der künstlichen neuronalen Netze zu kennen. Zu sehen sind diese in Abbildung 6.1.1. Die Bestimmtheitsmaße der Druckzahl ψ und des Wirkungsgrads η betragen $R^2_{\psi} = 93,46\%$ und $R^2_{\eta} = 94,07\%$. Die Ergebnisse sind zwar nicht sehr hoch, sind jedoch ausreichend, um die Prognose zu analysieren.

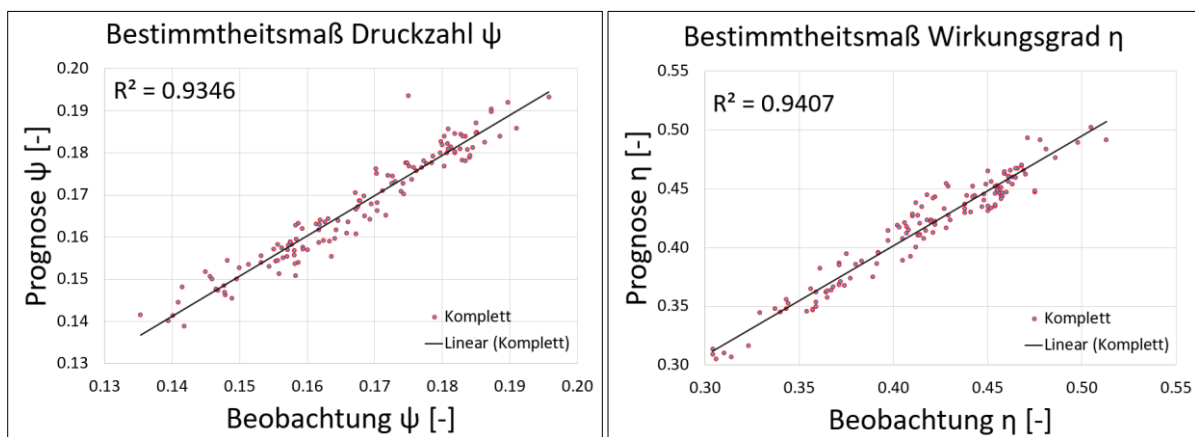


Abbildung 6.1.1: Bestimmtheitsmaß R^2 der Druckzahl ψ (links) und des Wirkungsgrads η (rechts)

6.2. Validierung der drei Testmessungen

Zur Validierung der Analyse wurden drei zufällige Messpunkte gewählt. Um zu überprüfen, wie prognostizierbar diese sind, wurden sie nicht ins Training der KNN aufgenommen. In Abbildung 6.2.1 ist zu sehen, wo sich diese im Raum befinden.

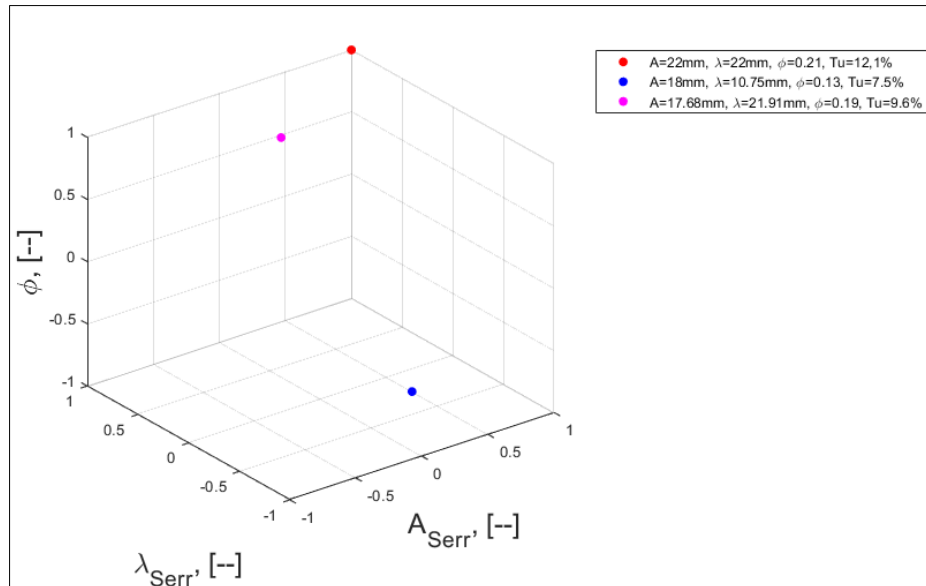


Abbildung 6.2.1: Validierungspunkte im Latin Hypercube

Um diese nun auf die Genauigkeit der Prognose hin zu überprüfen, werden die aerodynamischen Zielgrößen der messtechnisch erfassten Validierungspunkte (die Druckzahl ψ und der Wirkungsgrad η), welche jeweils nur einen Wert als Zielgröße besitzen, in Bezug zu der Prognose der künstlichen neuronalen Netze gesetzt.

Tabelle 6.2.1: Werte der Validierungspunkte

	Absolutwerte				Werte im Raum			
	A_Serr [mm]	λ [mm]	ϕ [-]	Tu [-]	A_Serr [-]	λ [-]	ϕ [-]	Tu [-]
1	22	22	0,21	12,1	1	1	1	1
2	18	10,75	0,13	7,5	0,5	-0,25	-1	0,09
3	17,68	21,91	0,19	9,6	0,46	0,99	0,5	0,49

In Tabelle 6.2.2 ist die Abweichung der Prognose zu den Messdaten zu sehen. Die größte Abweichung bei der Druckzahl ψ besitzt Validierungspunkt 1 mit 10,6%. Die größte Abweichung beim Wirkungsgrad η besitzt ebenfalls Validierungspunkt 1 mit 5,69%. Hier kann damit argumentiert werden, dass dieser Versuchspunkt sich insgesamt am äußersten Rand des

Versuchsraums befindet, welcher bei allen vier Einflussgrößen den höchstmöglichen Werten entspricht. Die anderen beiden Validierungspunkte besitzen eine höhere Genauigkeit, Validierungspunkt 2 besitzt beim Wirkungsgrad η sogar nur eine Abweichung von 1,91% zur Prognose. Allgemein kann in Bezug auf die Druckzahl ψ und den Wirkungsgrad η von einer relativ starken Prognose ausgegangen werden.

Tabelle 6.2.2: Abweichung der aerodynamischen Zielgrößen

	Messung		Prognose		Abweichung	
	ψ [-]	η [-]	ψ [-]	η [-]	ψ [%]	η [%]
1	0,175	0,475	0,194	0,448	10,60	-5,69
2	0,150	0,329	0,153	0,345	1,91	4,93
3	0,183	0,457	0,178	0,442	-3,22	-3,42

Bei den instationären aerodynamischen Zielgrößen im Zeitbereich ist es anders. Zwei der neun Vergleichspunkte weichen etwas stärker ab (Validierungspunkt 2 besitzt breitbandig eine Abweichung BB=9,36% und Validierungspunkt 3 tonal eine Abweichung T=11,96%), die Gesamtwandleistungspegel besitzen allesamt eine Abweichung von circa 3,5%. Auffällig ist hier, dass Validierungsmessung 1, welche sich am äußersten Rand des Versuchsraums befindet, in diesem Fall die geringste Abweichung besitzt. Beim Vergleich der Validierungspunkte von Messung und Prognose im Zeitbereich kann teilweise von einer starken Prognose ausgegangen werden, jedoch sollte berücksichtigt werden, dass die Einheit Dezibel eine logarithmische Einheit ist. Sämtliche Abweichungen sind in Tabelle 6.2.3 aufgeführt.

Tabelle 6.2.3: Abweichung der instationären aerodynamischen Zielgrößen im Zeitbereich

	Wandleistungspegel								
	Messung			Prognose			Abweichung		
	Gesamt [dB]	BB [dB]	T [dB]	Gesamt [dB]	BB [dB]	T [dB]	Gesamt [% _{dB}]	BB [% _{dB}]	T [% _{dB}]
1	68.25	60.83	67.79	65.58	59.59	68.38	-3.92	-2.03	-0.86
2	66.03	61.65	64.98	68.43	67.42	64.29	3.64	9.36	1.07
3	76.39	67.13	76.10	78.77	64.91	67.97	3.11	-3.31	11.96

Der Vergleich der Messwerte der drei Validierungspunkte und der Prognose der breitbandigen Terze ist in Abbildung 6.2.2 dargestellt. Auffällig ist, dass bei Validierungspunkt 1 die Messergebnisse meist über der Prognose liegen. Dies ist damit zu begründen, dass beim Maximum aller vier Einflussgrößen der Versuchsraumrand zu hoch prognostiziert wird. Die zwei aufeinanderfolgenden Frequenzen $f = 158\text{Hz}$ und $f = 200\text{Hz}$ von Validierungspunkt 1

weichen jedoch stärker ab. Da die Einheit dB eine bekanntermaßen logarithmische Einheit ist, sind diese stärkeren Abweichungen signifikant, beispielsweise liegt die Abweichung von Prognose und Messung $f = 158Hz$ bei $\Delta WLP_{BB} = 9,43dB$. Bei Validierungspunkt 2 ist dies genau umgekehrt, dort liegt die Prognose meist höher als die Messergebnisse. Bei dieser Validierungsmessung liegt die Lieferzahl mit $\varphi = 0,13$ am Minimum, während die anderen Einflussgrößen sich in Richtung der Raummitte orientieren. Im Gesamten fällt dieser Vergleich jedoch relativ genau aus, lediglich vier Prognosefrequenzen weichen etwas stärker nach oben ab ($f = 40Hz, f = 200Hz, f = 316Hz$ und $f = 631Hz$). Bei Validierungspunkt 3 sind die Spitzenwerte zwischen Prognose und Messung mäßig. Dort gibt es höhere Prognosewerte als Messwerte und umgekehrt. Im Bereich von $f = 396Hz$ bis $f = 794Hz$ liegen die Messwerte des WLP_{BB} allesamt etwas stärker über der Prognose, im Bereich von $f = 1259Hz$ bis zur höchsten Frequenz $f = 7943Hz$ schlägt dies jedoch um, hier liegen alle Prognosewerte teilweise sogar deutlich über den Messwerten. Durch eine Erhöhung der Koeffizienten in der Berechnung der Prognosewerte und ein Latin Hypercube Modell mit Fokus auf den Spektralbereich der Wandleistungspegel könnten eventuell bessere Werte prognostiziert werden.

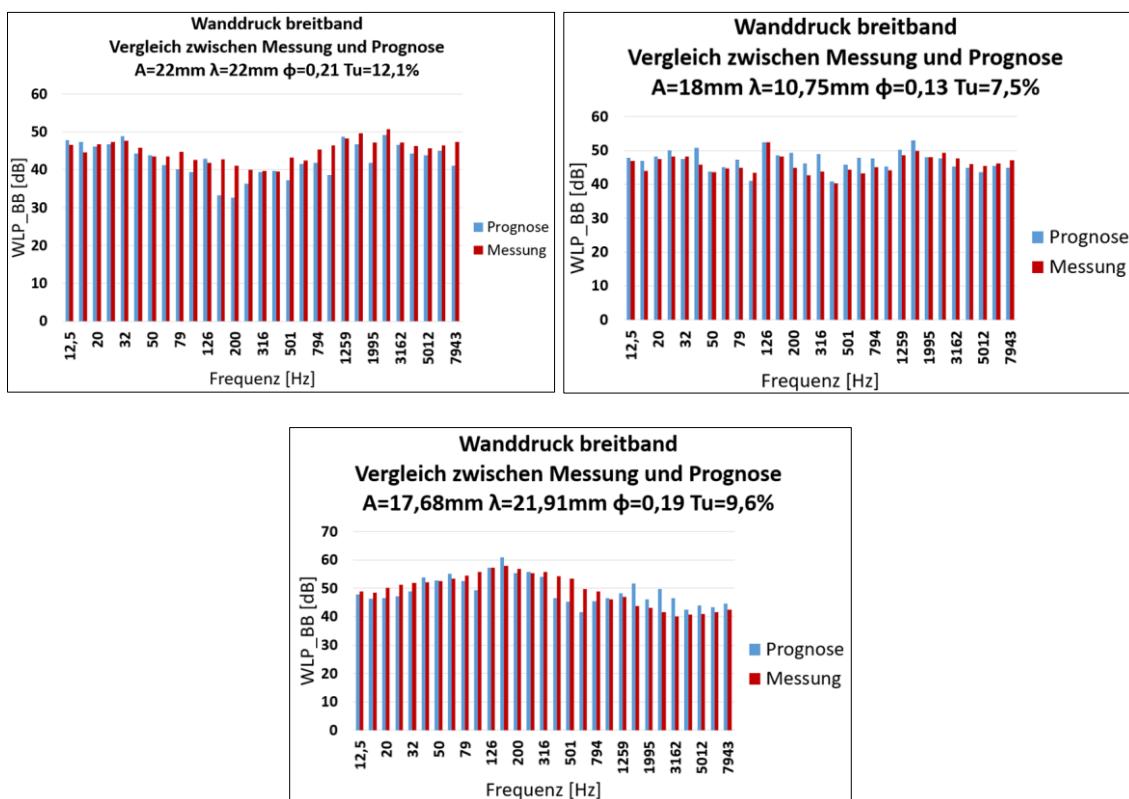


Abbildung 6.2.2: Wanddruck des breitbandigen Terzbandes prognostiziert und experimentell ermittelt (Messpunkt 1 oben links, Messpunkt 2 oben rechts, Messpunkt 3 unten)

Bei Validierungsmessung 1 sind im tonalen niederfrequenten Bereich, in welchem sich vorzugsweise Wanddruckschwankungen abspielen, die Ergebnisse der Prognose sehr ungenau. Dort geht bei einer Frequenz von $f = 100\text{Hz}$ der Wandleistungspegel des tonalen Anteils WLP_{BB} in einen negativen Bereich, welcher natürlich unrealistisch ist. Aber auch bei anderen Frequenzen sind teils starke Abweichungen zu sehen, die größte ist bei einer Frequenz von $f = 200\text{Hz}$. Dort beträgt die Abweichung des tonalen Wandleistungspegels $WLP_T = 54,44\text{dB}$. Lediglich im höherfrequenten Bereich, ab einer Frequenz von $f = 1259\text{Hz}$ sind Prognose und Messung genauer. Bei Validierungsmessung 2 liegen die Prognosewerte meist höher als die Messwerte. Im niederfrequenten Bereich sind jedoch auch starke Abweichungen zu sehen, am stärksten ausgeprägt ist diese bei einer Frequenz $f = 100\text{Hz}$. Dort besitzt die Prognose einen Wandleistungspegel $WLP_T = 72,35\text{dB}$, welcher $28,35\text{dB}$ höher als die Messung liegt. Im mittleren Bereich des Diagramms liegt die Prognose meist höher als die Messung, im höherfrequenten Bereich gleicht sich dies jedoch wieder auf ein ähnliches Niveau an. Validierungspunkt 3 zeigt den solidesten Vergleich. Dort sind die Unterschiede der Prognose- und Messwerte nicht sehr groß. Dort werden sogar stark abweichende Wandleistungspegel, wie beispielweise bei $f = 200\text{Hz}$ relativ genau prognostiziert. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass der Vergleich von tonalen Anteilen im Frequenzbereich keine genaueren Ergebnisse liefert, dafür sind die Abweichungen von Prognose und Messung zu groß.

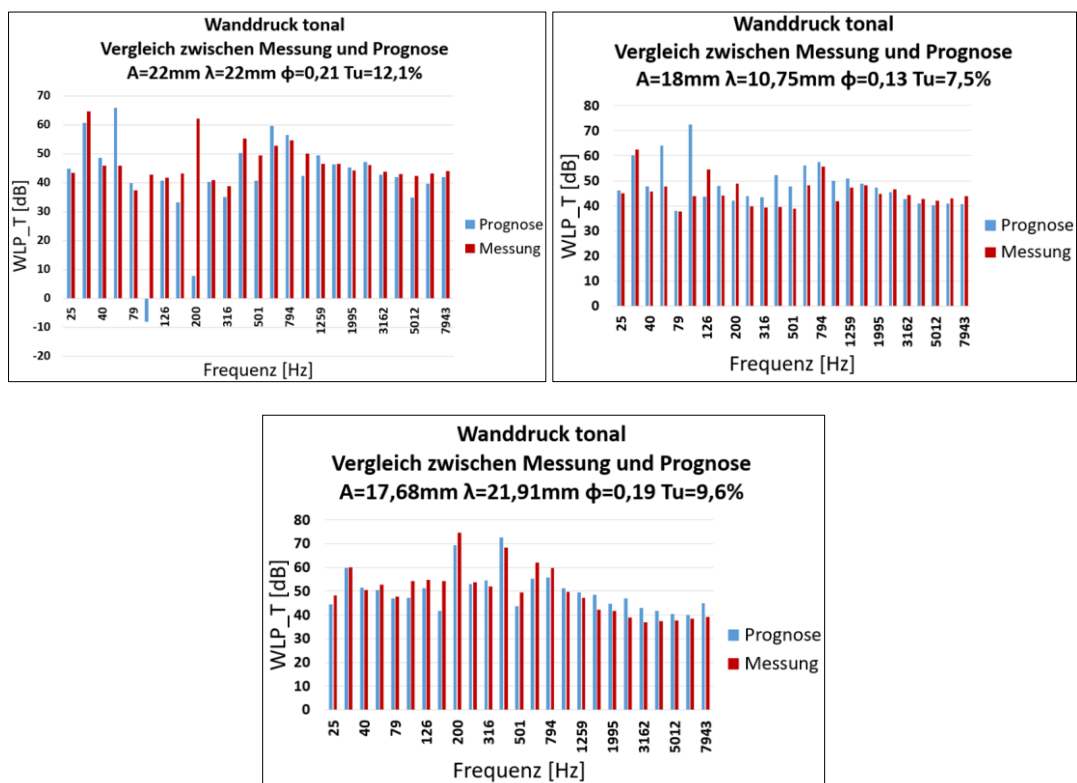


Abbildung 6.2.3: Wanddruck des tonalen Terzbandes prognostiziert und experimentell ermittelt (Messpunkt 1 oben links, Messpunkt 2 oben rechts, Messpunkt 3 unten)

6.3. Vergleich von Prognose und experimenteller Vorversuche mit aerodynamischen Zielgrößen Ψ und η

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der künstlichen neuronalen Netze (Prognose), mit experimentellen Voruntersuchungen, die im Vorfeld gelaufen sind, verglichen. Aus den Voruntersuchungen gibt es fünf unterschiedlichen Leading Edge Serrations (plus Baseline), die sich mit denen in dieser Thesis untersuchten Serrations im Versuchsraum decken. Die Vorversuche wurden mit den Turbulenzgraden $Tu = 2,6\%$ (Gitter 0) und $Tu = 5,3\%$ (Gitter 4) durchgeführt und wurden nicht randomisiert gefahren. Aus Gründen der Überschaubarkeit wird sich hier auf zwei Leading Edge Serrations und Baseline beschränkt, dessen Kurvenverläufe am vielversprechendsten Verlaufen. Außerdem werden die Diagramme im oberen Bereich der Abbildungen auf der Y-Achse unskaliert gezeigt, um den Gesamtverlauf besser zu sehen. Im unteren Bereich ist der skalierte Verlauf aufgetragen, um diesen genauer analysieren zu können.

Es ist in Abbildung 6.3.1 zu erkennen, dass die Baseline Experimentell das höchste Druckniveau ($\Psi = 0,2$) erreicht. Die Prognose liefert zwar nicht exakt dasselbe Ergebnis (Maximalpunkt bei $\varphi = 0,188$), jedoch ähnelt der Kurvenverlauf diesem stark. Der Strömungsabriss (Stallpunkt) findet bei beiden am selben Punkt statt ($\varphi = 0,17$). Die Prognose des Wirkungsgrads η der Baseline liegt zwar höher, aber die Kurvenverläufe ähneln sich auch hier sonst stark. Die Leading Edge Serrations mit den Maßen A14 λ 13 Prognose und Experimentell verlaufen immerhin im Auslegungspunkt sehr ähnlich ($\varphi = 0,16$). Beim Wirkungsgrad dieser ist eine Abweichung von 2% festzustellen, welches für ein relativ genaues Ergebnis spricht. Die Serration mit den Maßen A14 λ 4 verlaufen anfangs sehr ähnlich, jedoch beginnen diese ab einer Lieferzahl $\varphi = 0,16$, nach dem experimentellen Auslegungspunkt, stark auseinanderzudriften. Hier lässt sich außerdem erkennen, dass bei den Messungen der Voruntersuchung eine Tendenz zu sehen ist, je kleiner die Wellenlänge, desto kleiner die Druckzahl Ψ . Es ist davon auszugehen, dass bei einer randomisierten Voruntersuchung präzisere Ergebnisse zustande gekommen wären, da Prognose und Experimentell der einzelnen Blades teilweise stark auseinanderliegen.

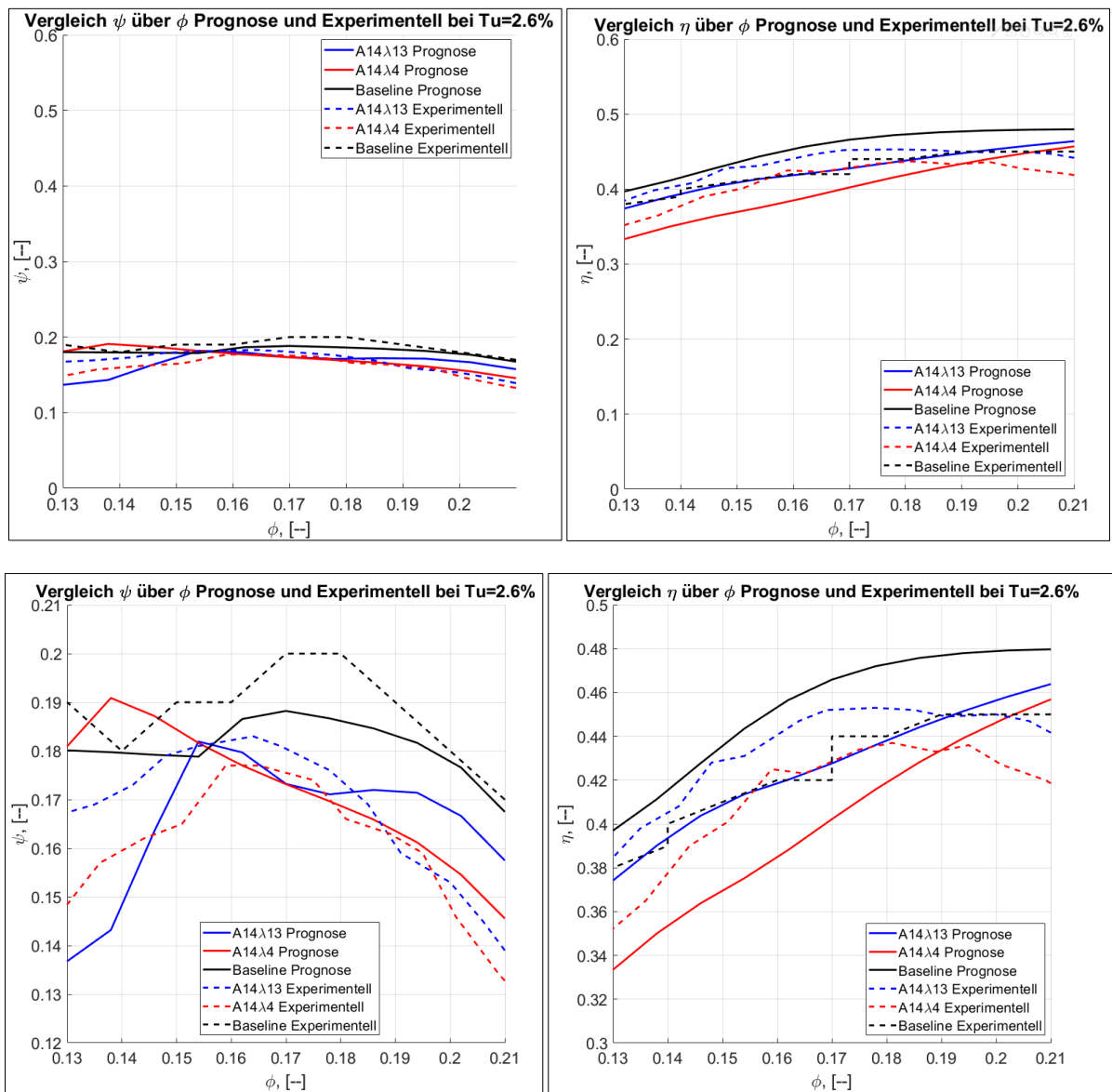


Abbildung 6.3.1: Druckzahl ψ (oben und unten links) und Wirkungsgrad η (oben und unten rechts) über der Lieferzahl ϕ Prognose und Experimentell bei $Tu = 2,6\%$

In Abbildung 6.3.2 ist die Druckzahl ψ und der Wirkungsgrad η von prognostizierten und experimentell ermittelten Größen mit einem Turbulenzgrad $Tu = 5.3\%$ abgebildet, welcher Gitter 04 entspricht. Die prognostizierten und experimentell ermittelten Werte der Baseline laufen stark auseinander, jedoch haben beide den Maximalwert der Lieferzahl bei etwa $\phi = 0,17$, dies spricht im Allgemeinen für eine genauere Vorhersage. Bei A14λ13 ist dies ähnlich, ebenfalls bei beiden Blades liegt die Lieferzahl mit ihrem Maximalpunkt in einem sehr ähnlichen Bereich ($\phi = 0,16$). Die Übereinstimmung der Blades mit den Maßen A14λ4 ist nicht hoch. Die Stallpunkte liegen weit auseinander, der Anstieg der Lieferzahlen verläuft bis zu einem $\phi = 0,16$ jedoch ähnlich. Die prognostizierte Verlauf steigt jedoch noch bis zu einer

Lieferzahl $\phi = 0,1375$ weiter an, bevor dieser einen Strömungsabriss durchläuft. Bei A14 λ 4 findet dieser jedoch schon bei einer Lieferzahl $\phi = 0,152$ statt. Die Wirkungsgradverläufe bei einem Turbulenzgrad von $Tu = 5,3\%$ laufen in ungedrosseltem Zustand weit auseinander. Erst im stark gedrosselten Zustand, ab einer Lieferzahl von $\phi = 0,15$, ähneln sich alle Verläufe. Alle experimentell ermittelten Ergebnisse liegen jedoch unter ihrer jeweiligen Prognose.

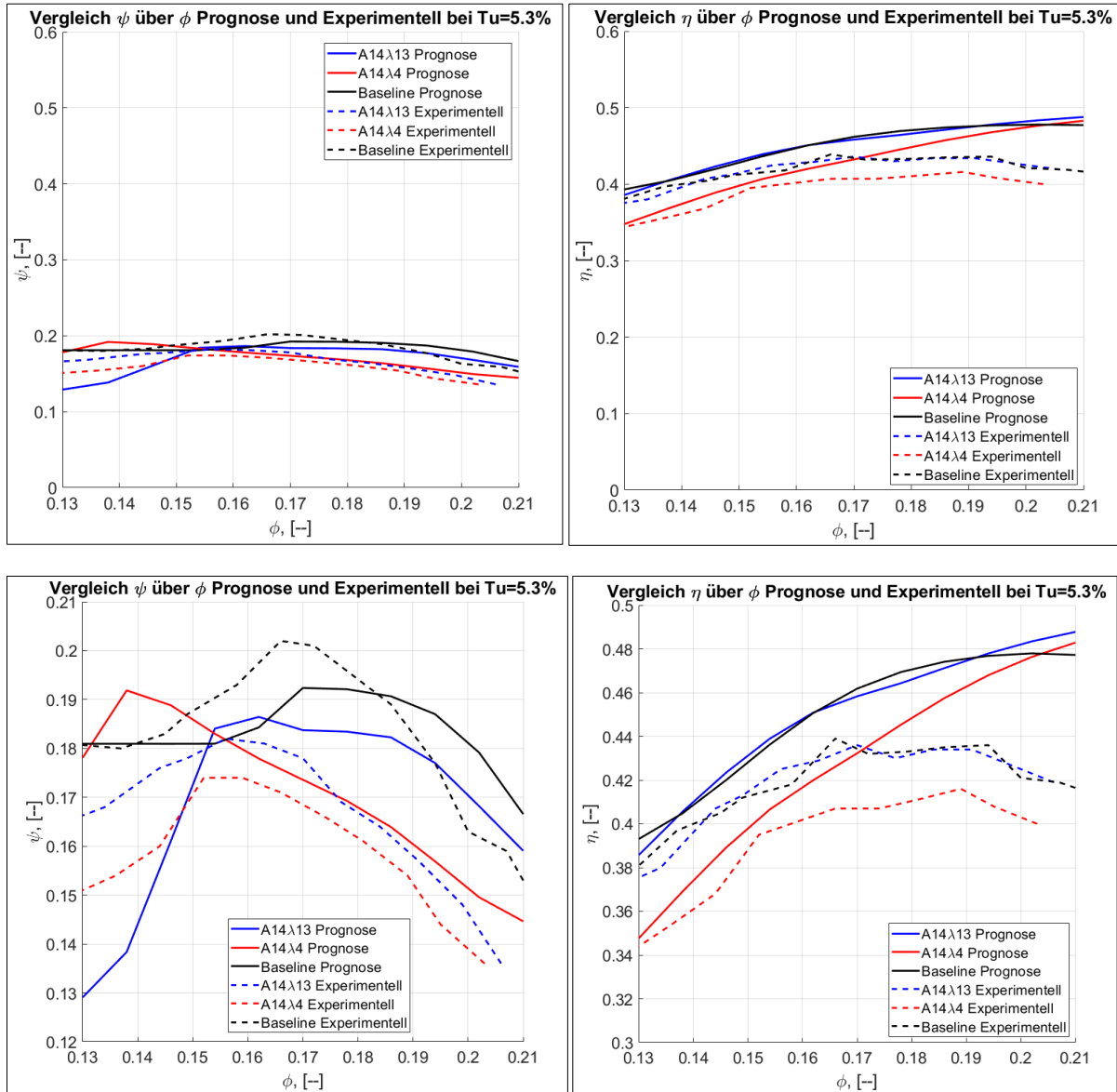


Abbildung 6.3.2: Druckzahl ψ (oben und unten links) und Wirkungsgrad η (oben und unten rechts) über der Lieferzahl ϕ Prognose und Experimentell bei $Tu = 5.3\%$

Um den Kurvenverlauf zwischen Prognose und experimentellen Vorversuchen zu quantifizieren, wurde die mittlere absolute Abweichung der einzelnen Kurvenverläufe gebildet. Diese sind in Tabelle 6.3.1 zu sehen. Dort ist zu erkennen, dass die Prognose des Turbulenzgrads $Tu = 2,6\%$ oft etwas unter den realen Werten liegt, jedoch in einem sehr geringen Maß. Die größte Abweichung besitzt bei diesem Turbulenzgrad die Baseline beim Wirkungsgrad mit einer Abweichung von 7,21%. Die geringste Abweichung liegt bei -0,31% für die Lieferzahl φ bei den Serrations mit den Maßen A14λ13, welche der Versuchsraummitte entsprechen. Bei dem Turbulenzgrad $Tu = 5,3\%$ werden ebenfalls geringe Abweichungen erzielt. Die geringste Abweichung besitzt in diesem Fall die Baseline bei der Druckzahl ψ mit einer Abweichung von -0,3%, die höchste Abweichung liegt beim Wirkungsgrad η der Serrations A14λ4 mit 8,7%. Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass die Lieferzahl φ und die Druckzahl ψ der Versuchsraummitte bei beiden Turbulenzgraden sehr genau prognostiziert wird. Ebenfalls besitzen die Lieferzahlen in Betrachtung des Gesamtbildes eine sehr genaue Prognose.

Tabelle 6.3.1: Mittlere Absolute prozentuale Abweichung zwischen der Prognose und experimentellen Vorversuchen

G00 ($Tu=2,6\%$)	Mittlere absolute Abweichung [%]	G04 ($Tu=5,3\%$)	Mittlere absolute Abweichung [%]
φ BSLN	-4.34	φ BSLN	-1.47
ψ BSLN	-2.43	ψ BSLN	-0.30
φ A14W13	-0.31	φ A14W13	-0.40
ψ A14W13	-2.38	ψ A14W13	1.48
φ A14W4	-2.04	φ A14W4	2.11
ψ A14W4	6.95	ψ A14W4	7.77
G00 ($Tu=2,6\%$)	Mittlere absolute Abweichung [%]	G04 ($Tu=5,3\%$)	Mittlere absolute Abweichung [%]
φ BSLN	1.63	φ BSLN	-1.47
η BSLN	7.21	η BSLN	6.28
φ A14W13	4.02	φ A14W13	-0.40
η A14W13	-1.44	η A14W13	6.71
φ A14W4	2.34	φ A14W4	2.11
η A14W4	-2.77	η A14W4	8.70

Es zeigt sich, dass sich die Prognose der künstlichen neuronalen Netze mit der experimentellen Voruntersuchung in vielerlei Punkten hoch deckt. Bei der Voruntersuchung ist der Fokus der Messreihe auf die Erstellung von Drosselkennlinien von Leading Edge Serrations gesetzt worden. Diese sind nicht randomisiert gefahren worden, sondern es wurden im Laufe der Messung immer wieder bestimmte Druckunterschiede (Messpunkte) angefahren, ohne den Rohrprüfstand nach jedem Messpunkt auszuschalten. Die Messzeiten der einzelnen Messpunkte in den Vorversuchen waren ebenfalls geringer, welches für kleinere Ungenauigkeiten sorgen könnte. Es könnten sich also Störgrößen in die Messergebnisse eingebracht haben, welche sich im Laufe der Messung kumulieren. Die Wiederholung der Messungen mit randomisierter Messweise, längerer Messzeiten und das Neuanfahren des Rohrprüfstands nach jeder Messung könnte eventuell ähnlichere Ergebnisse zwischen der Prognose und dem Experimentellem liefern.

6.4. Analyse des Versuchsraums mit aerodynamischen Zielgrößen Ψ und η

Im folgenden Abschnitt wird der gesamte Versuchsraum der vorher trainierten künstlichen neuronalen Netze in allen drei Raumrichtungen (X-, Y- und Z-Achse) vom Anfangs- bis zum Endpunkt (-1 bis +1) in einer Schrittweite von 0.5 abgefahren und jeweils eine Einflussgröße variiert. Die Einflussgrößen, welche nicht variiert werden, werden in der Versuchsraummitte (Nullpunkt) gehalten. So lässt sich analysieren, wie sich eine einzelne Einflussgröße auf die Aerodynamik auswirkt. In Abbildung 6.4.1 ist dieses, im Versuchsraum aufgespannte Kreuz, abgebildet. Der schwarze Punkt stellt die Mitte des Versuchsraums dar und entspricht in Absolutwerten der Amplitude $A_{Serr} = 14mm$, der Wellenlänge $\lambda = 13mm$ und dem Turbulenzgrad $Tu = 7,35\%$. Die Lieferzahl φ ist auf der Abszissenachse der Diagramme aufgetragen und wird somit ebenfalls berücksichtigt.

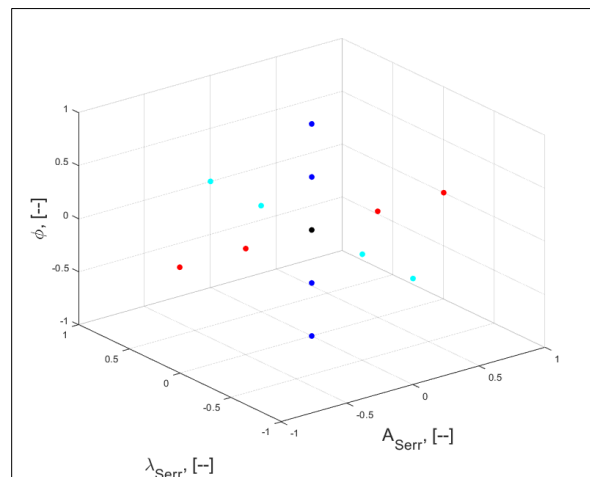


Abbildung 6.4.1: Schrittweite der Prognosepunkte im Versuchsraum

6.4.1. Einfluss von λ auf ψ und η über ϕ in Versuchsraummitte

Bei Betrachtung von Abbildung 6.4.1.1 im oberen Bereich lässt sich erkennen, dass die Baseline am Höchstpunkt nur eine Druckzahl von $\Psi = 0,19$ aufweist und sich somit im mittleren Bereich der Serrations bewegt. Die Serration mit der Wellenlänge $\lambda = 17,5\text{mm}$ weist die höchste Druckzahl von etwa $\Psi = 0,205$ auf. Diese wird dicht gefolgt von der Serration mit der Wellenlänge $\lambda = 22\text{mm}$, diese liegt bei etwa $\Psi = 0,202$. Signifikant ist außerdem, dass sich die Stallpunkte, an welchen die Strömung abreißt, mit sinkender Lieferzahl ϕ und sinkender Wellenlänge λ in konstanter Reihenfolge der Wellenlänge auf der X-Achse verschieben und geringer werden. Dies ist damit zu begründen, dass Allgemein bei geringer Wellenlänge λ und größerer Amplitude A_{serr} ein geringeres Druckniveau herrscht, weil weniger Luft umgesetzt wird und somit ein schlechterer Auftrieb herrscht (Biedermann et al., 2018). Wiederfinden lässt sich dies auch in den Wirkungsgraden der einzelnen Serrations. Die Baseline weist den höchsten Wirkungsgrad mit $\eta = 0,475$ auf. Die Wellenlänge $\lambda = 22\text{mm}$ besitzt den durchgehend höchsten Wirkungsgrad η , von größer zu kleiner Wellenlänge λ ist dieser geringer. Es lässt sich hier ebenfalls, wie auch im vorherigen und in den nachfolgenden Diagrammen des Wirkungsgrads η über der Lieferzahl ϕ , kein Auslegungspunkt über den Wirkungsgrad η bestimmen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei hohen Lieferzahlen ϕ der Wirkungsgrad η nicht ausreichend prognostiziert wird. Ein weiteres Trainieren der KNN bzw. mehr Messungen bei höheren Lieferzahlen ϕ könnte ein genaueres Ergebnis erreichen. Der untere Bereich zeigt die Auftragung der Unterschiede der Druckzahl ψ (unten links) und dem Wirkungsgrad η (unten rechts) in Bezug auf auf die Baseline. Alle Serrations besitzen einen Bereich, in welchem sie den Nullpunkt der Baseline ins Negative durchlaufen und auch wieder ins positive gelangen. Die Serrations A22 λ 22 sind die Tragflügel, welche sich auf den Gesamtverlauf bezogen am nächsten an der Baseline bewegen. Zu geringeren Lieferzahlen ϕ hin werden die Unterschiede der Serrations zur Baseline immer größer. Die Wirkungsgrade η zeigen, dass die Serrations A22 λ 22 durchgehend den geringsten Unterschied zur Baseline besitzen. Diese verlaufen bei hohen Lieferzahlen ϕ noch sehr ähnlich, jedoch bei sinkender Lieferzahl ϕ werden die Unterschiede immer größer. Dieses Diagramm zeigt, dass sobald das Maxima eines Serrationssets durchlaufen ist, dieses bei absinkender Wellenlänge λ weiter weg von der Baseline verläuft. Somit steht eine größere Wellenlänge λ für einen größeren Wirkungsgrad η .

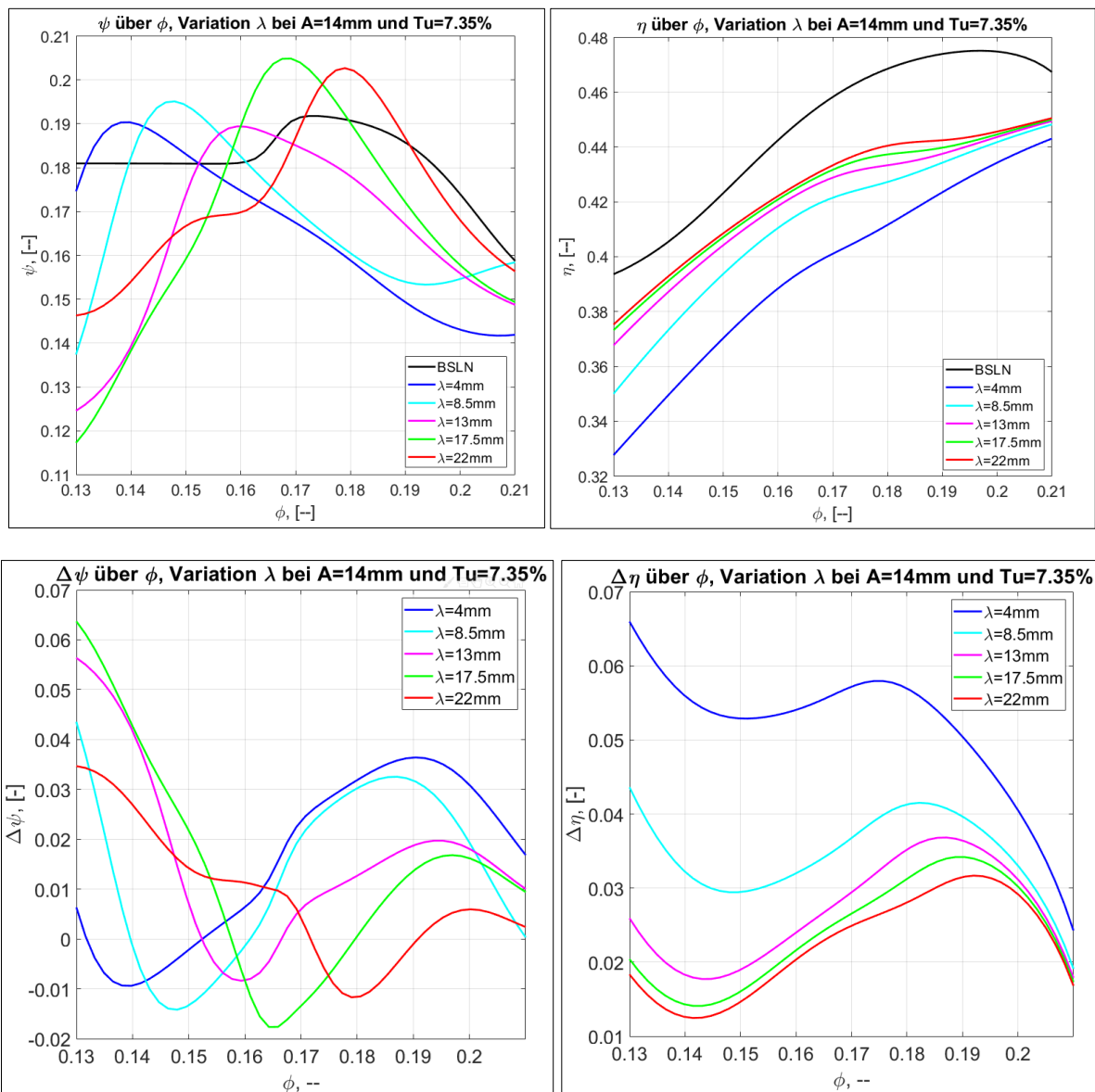


Abbildung 6.4.1.1: Druckzahl Ψ (links oben) und $\Delta\Psi$ (links unten) über der Lieferzahl ϕ und dem Wirkungsgrad η (unten links) sowie $\Delta\eta$ (unten rechts) über der Lieferzahl ϕ für die Variation der Wellenlänge mit mittlerer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad

6.4.2. Einfluss von A_{Serr} auf ψ und η über ϕ in Versuchsraummitte

Im oberen Bereich von Abbildung 6.4.2.1 lässt sich erkennen, dass die Baseline und die Serration mit einer Amplitude von $A_{Serr} = 10mm$ die höchste Druckzahl $\Psi = 0,192$ besitzen, diese unterscheiden sich jedoch in ihrer Lieferzahl. Bei der Baseline liegt diese bei $\phi = 0,1725$, während sich bei der Serration $A_{Serr} = 10mm$ die maximale Lieferzahl bei $\phi = 0,176$ befindet. Bei der Serration mit einer Amplitude $A_{Serr} = 6mm$ findet schon bei einer Lieferzahl $\phi = 0,197$ der Strömungsabriss statt, diese besitzt mit einer Druckzahl $\Psi = 0,178$ ebenfalls das geringste Druckniveau. $A_{Serr} = 14mm$ besitzt ebenfalls eine nahezu der Baseline entsprechende Lieferzahl, der Auslegungspunkt dieser ist jedoch bei einer Lieferzahl $\phi = 0,16$. Auffällig ist außerdem, dass die Amplituden $A_{Serr} = 14mm$ und $A_{Serr} = 18mm$ ihren Stallpunkt nahezu bei der gleichen Lieferzahl ($\phi = 0,16$) besitzen, das gleiche gilt für die Serration $A_{Serr} = 10mm$ und $A_{Serr} = 22mm$, dessen Stallpunkt bei $0,176$ liegt. Der Kurvenverlauf der Wirkungsgrade η der einzelnen Serrations besitzen einen ähnlichen Verlauf, jedoch lässt sich anhand dieser Verläufe kein Auslegungspunkt bestimmen. Die Wirkungsgrade η besitzen im Startbereich (also bei hohen Lieferzahlen ϕ) einen zu hohen Wert. Ein realistischer Verlauf wäre beispielsweise eine parabelförmige Kurve, zu sehen in Abbildung 2.3.2 in Kapitel 2.3. Die Baseline weist mit $\eta = 0,475$ den höchsten Wirkungsgrad auf, während die anderen gestaffelt von kleiner zu größerer Amplitude darunterliegen. Die Amplitude A_{Serr} besitzt bei mittleren Lieferzahlen ϕ einen größeren Einfluss auf den Wirkungsgrad η , wie an den größeren Abständen der Wirkungsgrade η zu sehen ist. Im unteren Bereich der Abbildung lässt sich erkennen, dass alle Serrations sehr unterschiedlich zur Baseline verlaufen. Die Amplitude $A_{Serr} = 6mm$ besitzt im mittleren Lieferzahlenbereich einen sehr hohen Unterschied zur Baseline. Beim Wirkungsgrad η ist auffällig, dass die Amplituden A_{Serr} im gesamten Lieferzahlenbereich (Ausgenommen der Startpunkt) einen sehr ähnlichen Verlauf haben, welcher sich zum Ende im geringeren Bereich der Lieferzahlen weiter auseinander geht. Dieses Diagramm zeigt somit, dass, je größer die Amplitude A_{Serr} und kleiner die Lieferzahl ϕ , desto weiter sinkt der Wirkungsgrad η .

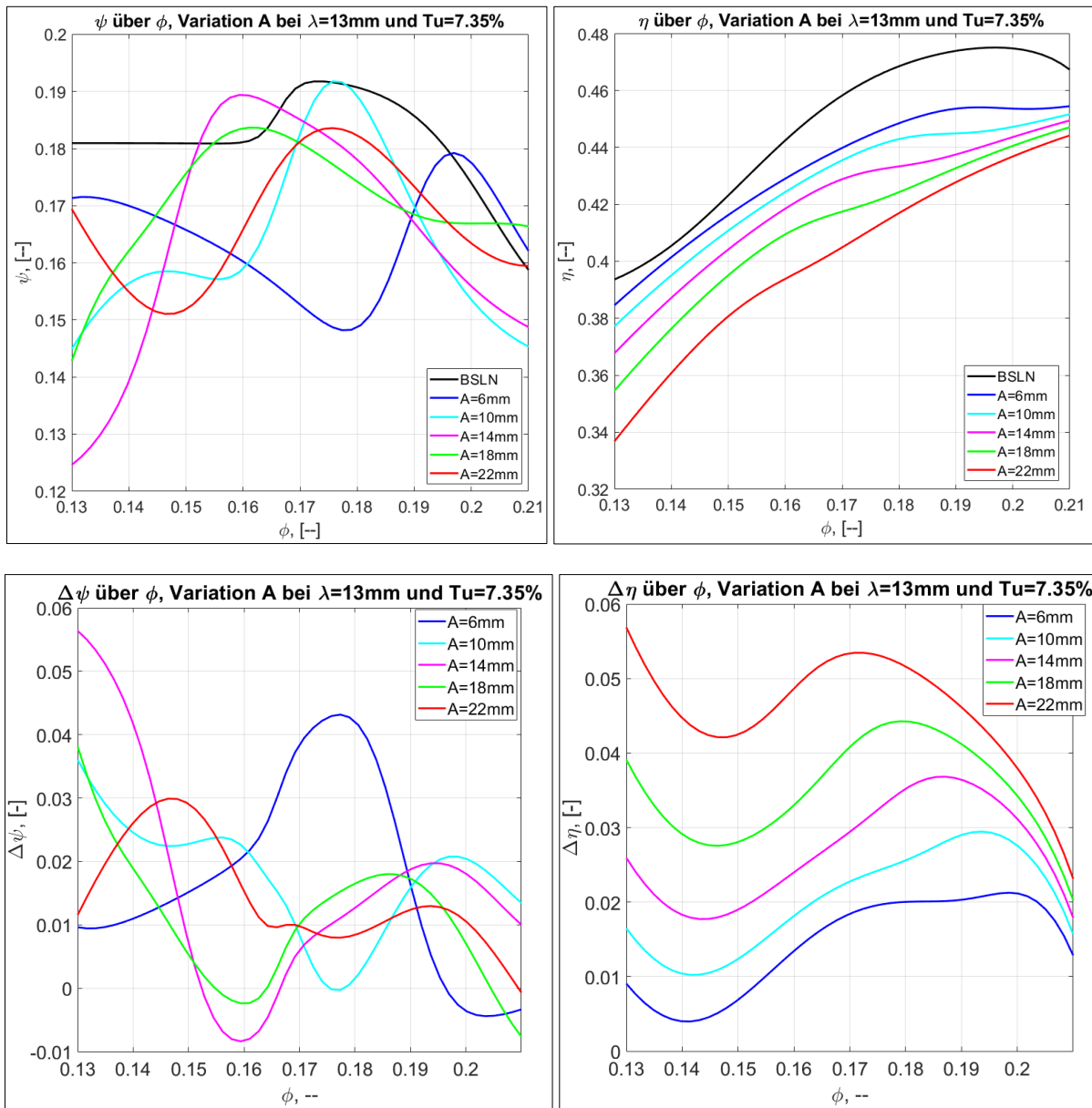


Abbildung 6.4.2.1: Druckzahl Ψ (links oben) und $\Delta\psi$ (links unten) über der Lieferzahl ϕ und dem Wirkungsgrad η (unten links) sowie $\Delta\eta$ (unten rechts) über der Lieferzahl ϕ für die Variation der Amplitude mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad

6.4.3. Einfluss von Tu auf ψ und η über ϕ in Versuchsraummitte

In Abbildung 6.4.3.1 ist im rechten oberen und unteren Bereich zu sehen, dass die Baseline mit dem Turbulenzgrad $Tu = 12,1\%$, welcher sich am Rand des Versuchsraums befindet, einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Dieser Wert stellt sich somit als unrealistisch heraus. Der Grund ist sehr wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Kurve der Baseline mit $Tu = 12,1\%$ nicht mit ausreichend Koeffizienten interpoliert wurde und der Verlauf somit nicht realistisch iteriert werden kann. Eine Erhöhung der Koeffizienten der KNN könnte eventuell eine bessere Prognose erreichen. Einen unerwarteten Kurvenverlauf zeigt auch die Druckzahl der Baseline. Dieser ist ebenfalls signifikant hoch. Aus diesem Grund wird auf diese nicht weiter eingegangen.

Es ist auffällig, dass alle Serrations einen sehr ähnlichen Beginn des Strömungsabrisses bei einer Lieferzahl $\phi = 0,156$ besitzen. Dieser verschiebt sich jeweils ein wenig nach links von hoher zu geringerer Turbulenz. Bei den Baselines mit variierender Turbulenz lässt sich feststellen, dass diese, mit sinkendem Turbulenzgrad, ihren Stallpunkt von rechts nach links ebenfalls in einem ähnlichen Bereich befinden. Die einzelnen Wirkungsgrade η sehen ähnlich aus, die Serrations laufen in einem ähnlichen Bereich und die Baselines auch. Einzig die Serration A14 λ 13 mit dem Turbulenzgrad $Tu = 4,975\%$ sticht hervor, indem sie den höchsten Verlauf des Wirkungsgrads aufweist. Der untere Bereich, welcher den Unterschied der Serrations zu ihrem jeweils zugehörigen Turbulenzgrad Tu aufweist, zeigt, dass die Turbulenzgrade bei hohen Lieferzahlen ϕ noch kleinere Unterschiede zu ihrer Baseline besitzen. Im Bereich ihres Hochpunkts, wo der Stallbereich beginnt, laufen die Kurven sehr nah beieinander. Zum Ende hin werden die Unterschiede zur Baseline mit steigendem Turbulenzgrad Tu jedoch wieder größer. Der Verlauf der Unterschiede des Wirkungsgrads η zeigt auf, dass der Turbulenzgrad $Tu = 4,975\%$ den ähnlichsten Verlauf zur Baseline besitzt. Die anderen drei Turbulenzgrade $Tu = 2,6\%$, $Tu = 7,35\%$ und $Tu = 9,725\%$ verlaufen alle sehr ähnlich, diese besitzen lediglich ein nicht ausgeprägtes Maxima von großer zu kleiner Lieferzahl ϕ in absinkender Reihenfolge des Turbulenzgrads Tu .

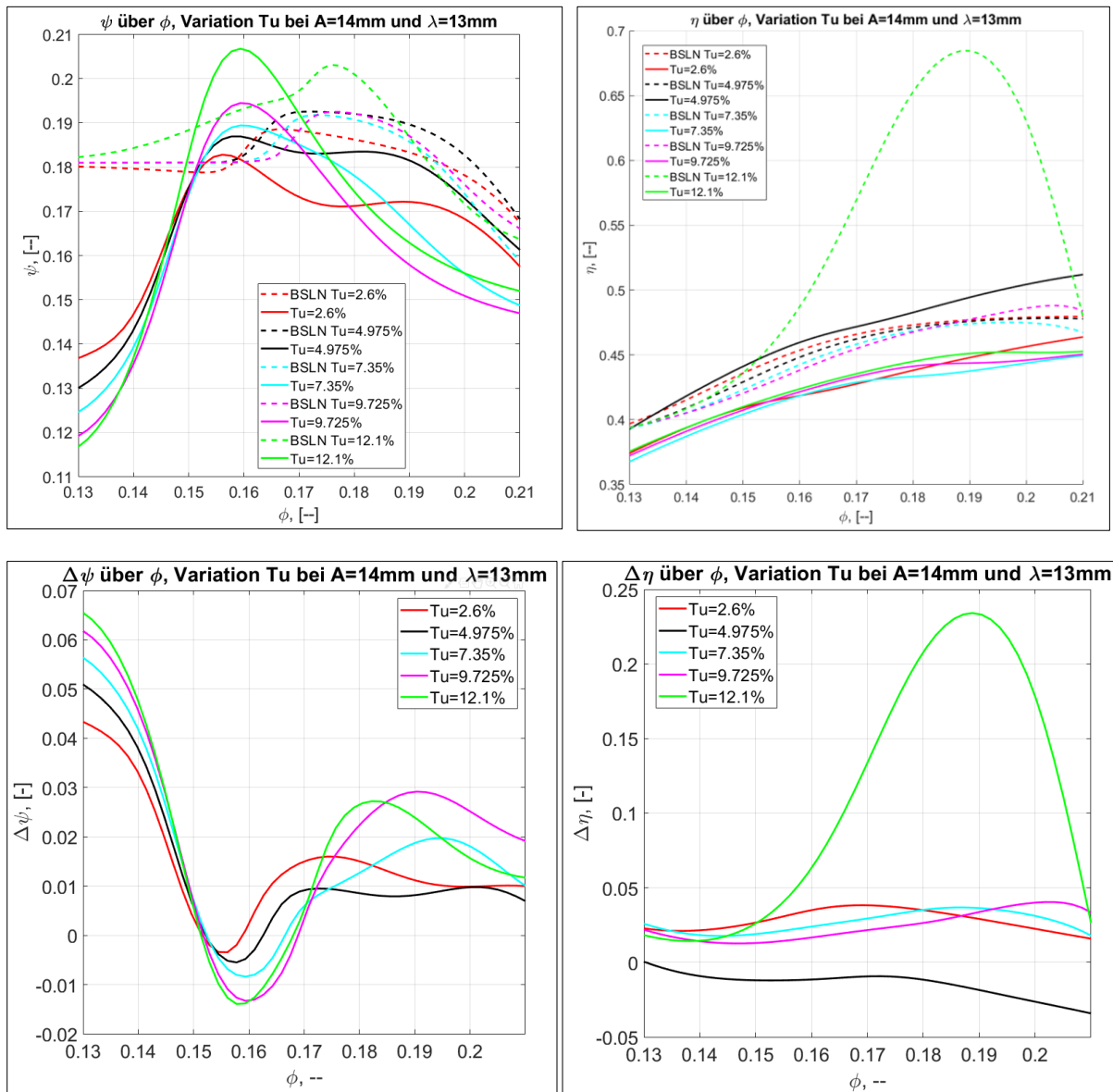


Abbildung 6.4.3.1: Druckzahl Ψ (links oben) und $\Delta\Psi$ (links unten) über der Lieferzahl ϕ und Wirkungsgrad η (oben rechts) sowie $\Delta\eta$ (unten rechts) über der Lieferzahl ϕ (rechts) für die Variation des Turbulenzgrads Tu mit mittlerer Amplitude und mittlerer Wellenlänge

6.4.4. Einfluss von λ auf ψ und η über A_{Serr} in Versuchsraummitte

Es wurde in diesem Teil die Druckzahl ψ und der Wirkungsgrad η über der Amplitude A_{Serr} aufgetragen. Die Lieferzahl ϕ und der Turbulenzgrad Tu sind in diesem Fall auf dem Nullpunkt (Versuchsraummitte) des Latin Hypercube Modells. Die beiden Diagramme sind in Abbildung 6.4.4.1 zu sehen. Die Baseline verläuft in diesem Diagramm als Gerade, weil sie eine konventionelle Form besitzt und somit natürlich die Wellenlänge λ nicht variiert wird. Auffällig ist, dass die Wellenlängen $\lambda = 22mm$, $\lambda = 13mm$ und $\lambda = 8,5mm$ bei der Amplitude $A_{Serr} = 22mm$ exakt die gleiche Druckzahl $\psi = 0,181$ besitzen, dieser Punkt sich jedoch am Versuchsraumrand befindet. Die Wellenlänge $\lambda = 22mm$ besitzt mit einer Druckzahl $\psi = 0,209$ das höchste Druckniveau. Gestaffelt nach abfallender Wellenlänge λ sinken die Maximalpunkte der Druckzahl ψ kontinuierlich bei geringer werdender Amplitude A_{Serr} ab, wobei die Wellenlängen $\lambda = 17,5mm$ und $\lambda = 13mm$ noch eine höhere Druckzahl ψ als die Baseline besitzen, dessen Druckzahl bei $\psi = 0,191$ liegt. Die Wirkungsgrade η zeigen, dass die Baseline mit einem Wirkungsgrad $\eta = 0,458$ den mit Abstand höchsten besitzt. Die Serrations mit hohen Amplituden A_{Serr} laufen weit auseinander, während diese mit schrumpfender Amplitude A_{Serr} immer weiter zusammenlaufen, sodass die Wellenlängen $\lambda = 22mm$, $\lambda = 17,5mm$ und $\lambda = 13mm$ sogar fast zusammenlaufen bei der kleinsten Amplitude $A_{Serr} = 6mm$. Generell lässt sich erkennen, dass die Wirkungsgrade η von kleiner zu großer Wellenlänge λ jeweils enger zusammen verlaufen. Somit lässt sich also feststellen, dass je größer die Amplitude A_{Serr} , desto mehr Einfluss besitzt diese auf den Wirkungsgrad η , da die Steigung des Wirkungsgrads η zu kleiner werdender Amplitude A_{Serr} abnimmt.

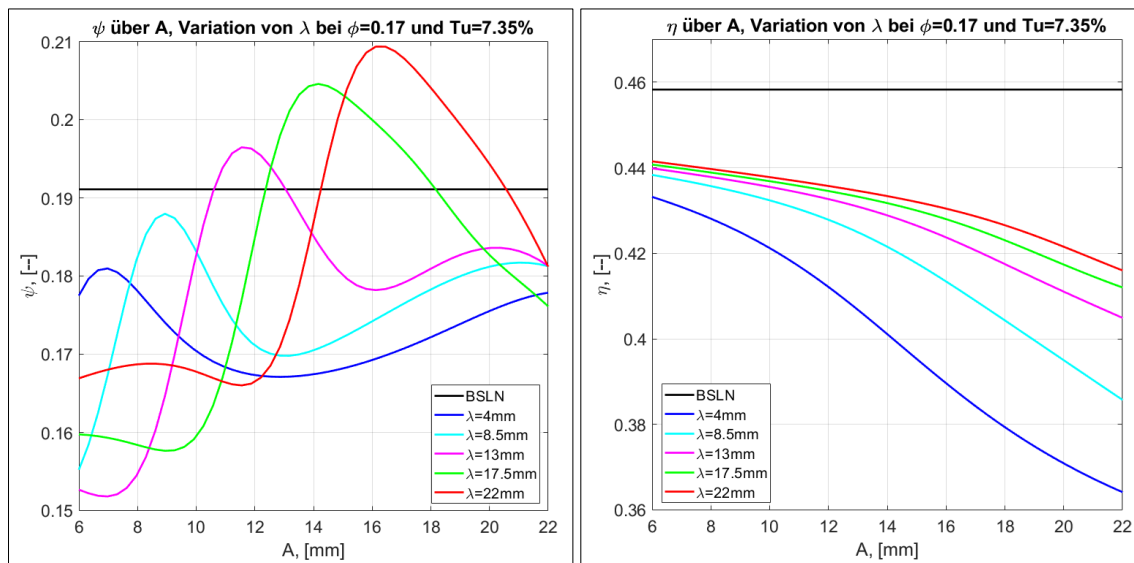


Abbildung 6.4.4.1: Druckzahl ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über der Amplitude A_{Serr} für die Variation der Wellenlänge λ mit mittlerer Lieferzahl und mittlerem Turbulenzgrad

Zwischen der Druckzahl ψ und der Amplitude A_{Serr} könnte eine lineare Abhängigkeit bestehen, da deren Maxima der Kurven optisch konstant von großer zu kleiner Wellenlänge λ abfallen. Um dies zu überprüfen, wurde eine Regressionskurve mit Bestimmtheitsmaß R^2 gebildet. Diese ist in Abbildung 6.4.4.2 zu sehen. Gebildet wurde das Verhältnis A/λ über den Maximalwerten der Druckzahl ψ , damit die Amplitude A_{Serr} ebenfalls miteinbezogen und berücksichtigt wird. Aufgetragen wurde diese über der Druckzahl ψ .

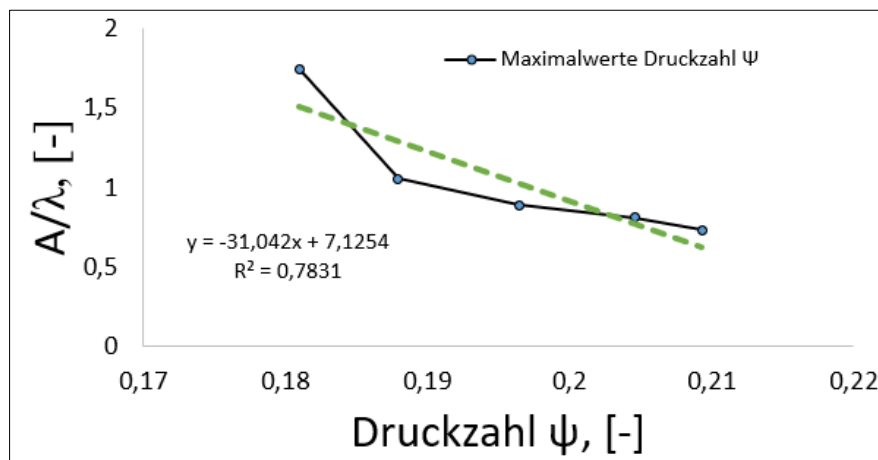


Abbildung 6.4.4.2: Regressionskurve (gestrichelt) der Druckzahlenmaximalwerte der Serrations der Variation Wellenlänge λ

Das Bestimmtheitsmaß dieser Beziehung liegt jedoch nur bei $R^2 = 0,783$, welches einer linearen Abhängigkeit von 78,3% spricht. Somit liegt wohl keine lineare Abhängigkeit der Faktoren vor. Es ist jedoch auffällig, dass bei größeren Druckzahlen die Punkte näher an der Regressionslinie liegen. Es kann also sein, dass für diese durchaus eine lineare Abhängigkeit vorliegt. Um dies zu überprüfen wird die Regressionskurve nochmals gebildet, jedoch ohne den letzten Messpunkt. Zu sehen ist diese in Abbildung 6.4.4.3. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieser Funktion beträgt $R^2 = 0,9815$. Dies entspricht einer linearen Abhängigkeit von 98,15% und es kann von dieser ausgegangen werden. Die Feststellung kann in weiteren Untersuchungen weiter erforscht werden.

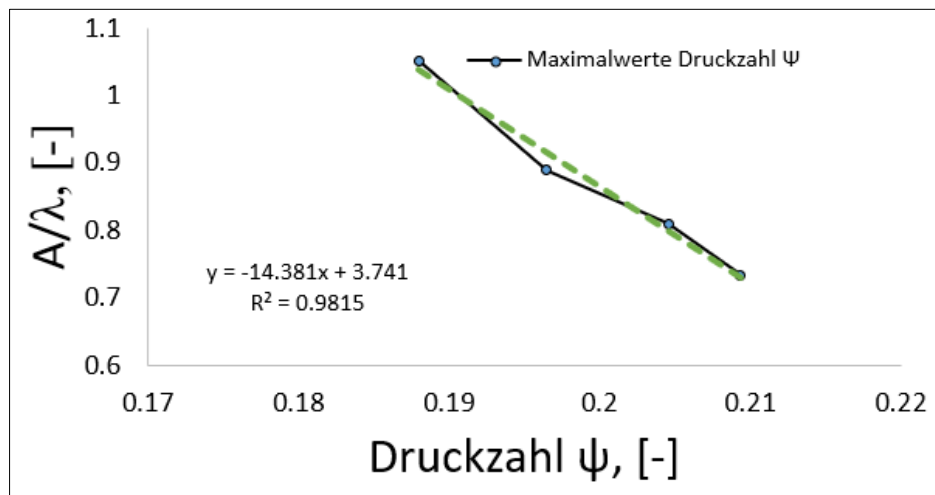


Abbildung 6.4.4.3: Regressionsgerade (gestrichelt) der Druckzahlenmaximalwerte der Serrations der Variation Wellenlänge λ hoher Druckzahlbereich

6.4.5. Einfluss von Tu auf ψ und η über A_{Serr} in Versuchsraummitte

Es wird die Druckzahl ψ und der Wirkungsgrad η über der Amplitude A_{Serr} in aufgetragen, zu sehen ist dies in Abbildung 6.4.5.1. Variiert wird der Turbulenzgrad Tu , während die Wellenlänge λ und die Lieferzahl φ konstant auf dem Wert 0 des Versuchsraums gehalten wird, welches einer Wellenlänge $\lambda = 13mm$ und einer Lieferzahl $\varphi = 0,17$ entspricht. Die Gerade der Baseline mit dem Turbulenzgrad $Tu = 2,6\%$ liegt auf der gleichen Höhe (gleiche Druckzahl $\psi = 0,1882$) wie die Gerade der Baseline mit dem Turbulenzgrad $Tu = 9,725\%$ und wird somit überlagert. Es ist festzustellen, dass alle Druckzahlen ψ ihren Maximalwert um die Amplitude $A_{Serr} = 11,5mm$ besitzen. Die höchste Druckzahl ψ wird bei Turbulenzgrad $Tu = 12,1\%$ erreicht (Druckzahl $\psi = 0,1992$), welches gleichzeitig auch dem höchsten Turbulenzgrad Tu entspricht. Somit hat eine Serration mit den Abmaßen A11,5λ13 die beste Performance bei der Lieferzahl $\varphi = 0,17$. Auffällig ist außerdem, dass alle Serrations mit den Wellenlängen $\lambda = 13mm$ eine höhere Druckzahl ψ als ihre zugehörige Baseline besitzen, nur für den Turbulenzgrad $Tu = 2,6\%$, welches Gitter00 (also keinem Gitter) entspricht, ist dies nicht der Fall. Somit lässt sich feststellen, dass eine Serration ohne Gitter nicht genug Druck aufbauen kann, um eine höhere Druckzahl ψ als seine entsprechende Baseline bei gleichem Turbulenzgrad Tu zu erreichen. Die einzelnen Wirkungsgrade η der unterschiedlichen Baselines überlagern sich alle bei $\eta = 0,57$. Die Turbulenzgrade $Tu = 12,1\%$, $Tu = 9,725\%$ und $Tu = 7,35\%$ der Wellenlänge $\lambda = 13mm$ erstrecken sich in einem dichten Bereich bei $\eta = 0,44$. Der Turbulenzgrad $Tu = 4,975\%$ liegt mit kleinem Abstand etwas unter den drei größeren Turbulenzgraden Tu , in einem noch größeren Abstand darunter liegt $Tu = 2,6\%$. Dort lässt sich die Tendenz erkennen, dass je kleiner der Turbulenzgrad Tu , desto geringer der Wirkungsgrad η bei Wellenlänge $\lambda = 13mm$ und Lieferzahl $\varphi = 0,17$. Für die Amplitude A_{Serr} lässt sich erkennen, je kleiner diese, desto höher ist der Wirkungsgrad η bei höherem Turbulenzgrad Tu .

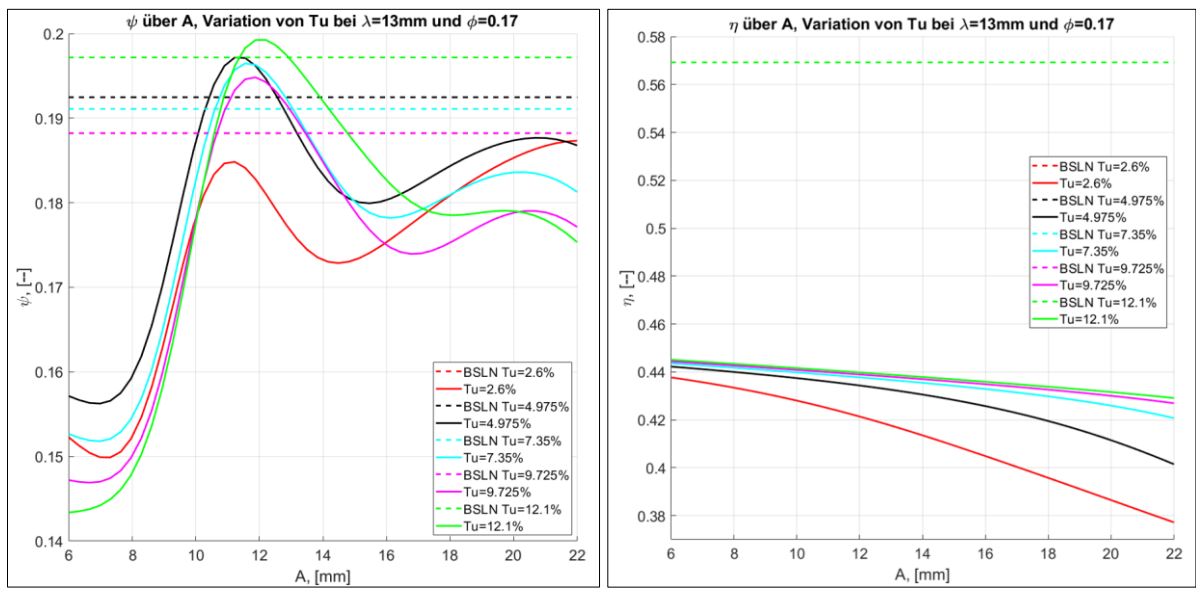


Abbildung 6.4.5.1: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über der Amplitude A_{serr} für die Variation des Turbulenzgrads Tu mit mittlerer Lieferzahl und mittlerer Wellenlänge

6.4.6. Einfluss von ϕ auf ψ und η über A_{Serr} in Versuchsraummitte

In Abbildung 6.4.6.1 wird die Lieferzahl ϕ variiert, während die Wellenlänge λ und der Turbulenzgrad Tu konstant auf dem Wert 0 im Versuchsraum gehalten wird. Die höchsten Druckzahlen werden bei einer Lieferzahl $\phi = 0,15 - 0,17$ erreicht. Die signifikant geringste Druckzahl ψ wird bei der Amplitude $A_{Serr} = 15,8mm$ erreicht, dort entspricht diese nur $\psi = 0,116$. Bei geringer Erhöhung der Lieferzahl auf $\phi = 0,15$, wird jedoch schon ein sehr hohes Druckniveau mit $\psi = 0,1884$ erreicht. Das höchste Druckniveau wird bei der Lieferzahl $\phi = 0,17$ und einer Amplitude $A_{Serr} = 11,55mm$ erreicht mit einer Druckzahl $\psi = 0,196$. Generell lässt sich sagen, dass die Druckzahl ϕ eine starke Abhängigkeit von der Amplitude A_{Serr} besitzt, da diese in allen Bereichen komplett unterschiedliche Ergebnisse aufweist. Die unterschiedlichen Lieferzahlen ϕ der Baselines befinden sich alle auf hohem Druckniveau, nur die Baseline mit der Lieferzahl $\phi = 0,21$ fällt mit geringer Druckzahl $\psi = 0,158$ auf. Alle Serrations bis auf die Lieferzahlen $\phi = 0,13$ und $\phi = 0,19$, also die geringste und die höchste Lieferzahl, schaffen es an einer Stelle im Kurvenverlauf mit einer Amplitude A_{Serr} über die Druckzahl ψ ihrer zugehörigen Baseline hinaus zu kommen. Bei dem Wirkungsgrad η spricht eine höhere Lieferzahl ϕ der Serrations für einen höheren Wirkungsgrad. Die Wirkungsgrade der Baselines η überlagern sich alle an dem Punkt $\eta = 0,458$, welche weit über denen der einzelnen Serrations liegen. Diese erstrecken sich geordnet von großer Lieferzahl ϕ und höherem Wirkungsgrad η bis zu geringerer Lieferzahl ϕ und geringerem Wirkungsgrad η darunter. Die Abstände der einzelnen Verläufe der Wirkungsgrade η der Serrations vergrößern sich ebenfalls von größerer zu geringerer Lieferzahl ϕ und laufen von hoher Amplitude zu kleinerer Amplitude A_{Serr} immer weiter zusammen. Generell lässt sich sagen, dass eine geringere Amplitude A_{Serr} für einen höheren Wirkungsgrad η spricht.

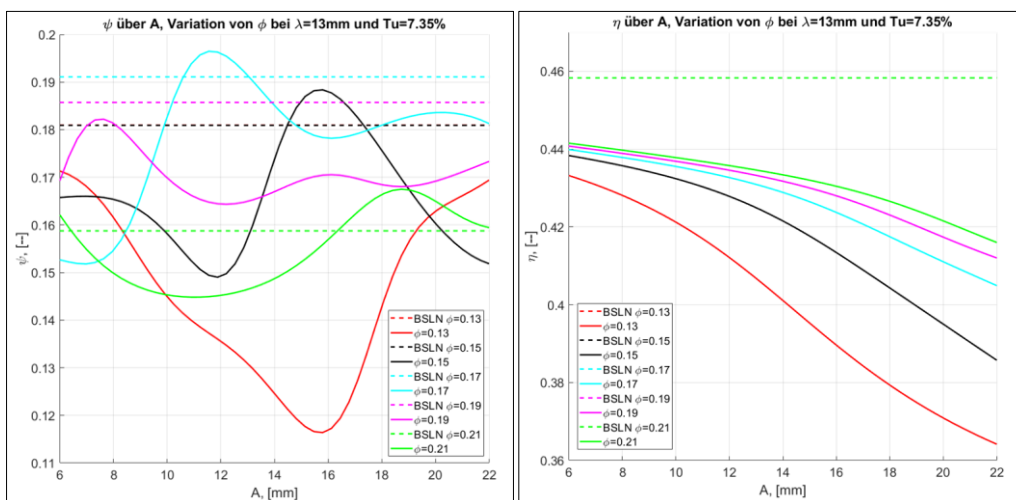


Abbildung 6.4.6.1: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über der Amplitude A_{Serr} für die Variation der Lieferzahl ϕ mit mittlerer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad

6.5. Analyse Ψ und η mit unterschiedlichen Einflussgrößen

Im folgenden Abschnitt werden unterschiedliche Variationen von Amplitude A_{serr} , Wellenlänge λ und Turbulenzgrad Tu untersucht.

6.5.1. Einfluss von λ auf ψ und λ über ϕ mit großem A_{serr}

Hier wird die Amplitude am maximalen Versuchsraumrand konstant gehalten, während die Wellenlänge variiert wird. Abgebildet ist dies in Abbildung 6.5.1.1. Die Wellenlänge $\lambda = 22mm$ erreicht das signifikant höchste Druckniveau, sogar höher als die Baseline. Die Kurvenverläufe der Serrations mit den Wellenlängen $\lambda = 13mm$, $\lambda = 8,5mm$ und $\lambda = 4mm$ ähneln sich sehr stark im Bereich ihrer Druckzahlmaxima, sie unterscheiden sich jedoch leicht im Wert ihrer Druckzahl Ψ sowie in X-Richtung der Lieferzahl ϕ . Diese besitzen von großer zu kleiner Wellenlänge λ eine leicht geringere Lieferzahl ϕ sowie ein geringeres Druckniveau. Auffällig sind im Kurvenverlauf der Serrations die Minima der Strömungsabriss, also der Punkt, an dem der Strömungsaufriß endet und wieder ein höherer Druck aufgebaut wird. Es könnte optisch eine lineare Abhängigkeit an den Wendepunkten des Strömungsabrisse von der Druckzahl Ψ sowie der Lieferzahl ϕ bestehen, weswegen diese im nächsten Abschnitt näher untersucht wird. Die Wirkungsgrade η der größeren Wellenlängen $\lambda = 22mm$, $\lambda = 17,5mm$ und $\lambda = 13mm$ laufen bei hohen Lieferzahlen ϕ in einem sehr ähnlichen Bereich. Bei kleineren Lieferzahlen ϕ sinken die kleineren Wellenlängen λ etwas nach unten. Hier ist im Allgemeinen zu sehen, dass eine kleinere Wellenlänge λ für einen geringeren Wirkungsgrad η bei der Amplitude $A_{serr} = 22mm$ spricht. Ebenfalls ist festzustellen, wie in Kapitel 5 schon erwähnt, dass eine große Amplitude A_{serr} und eine kleine Wellenlänge λ für einen geringeren Auftrieb sorgen.

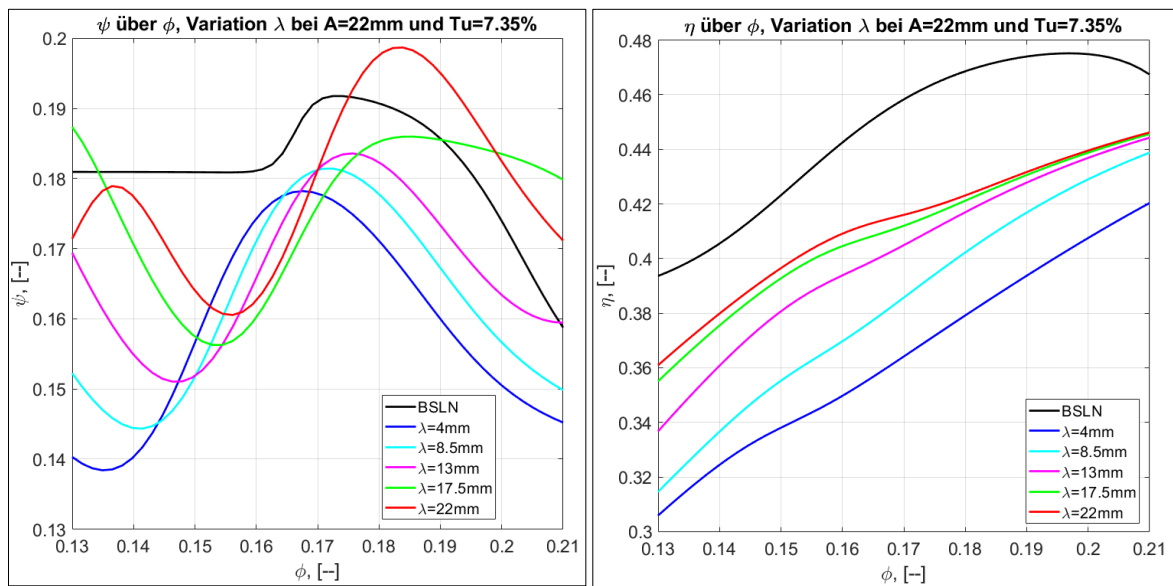


Abbildung 6.5.1.1: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über der Lieferzahl ϕ für die Variation der Wellenlänge λ bei großer Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad

Im Diagramm der Druckzahl ϕ über der Lieferzahl ϕ ist ebenfalls auffällig, dass die Druckzahlenminimalwerte, also der Punkt in der Kurve an dem die der Strömungsabriss endet, optisch in konstant Abständen ihren Wendepunkt haben. Es wurde eine Regressionskurve gebildet um die lineare Abhängigkeit zwischen Druckzahl ψ und der Lieferzahl ϕ mit Einfluss der Wellenlänge λ zu überprüfen. In Abbildung 6.5.1.2 ist das Verhältnis der Lieferzahl ϕ zur Wellenlänge λ über der Druckzahl Ψ aufgetragen. Die lineare Abhängigkeit beträgt 83,76%. Hier ist ebenfalls auffällig, dass die Druckzahlenminimalwerte in Bereichen höherer Druckzahlen näher an der Regressionsgeraden liegen. Aus diesem Grund wird ebenfalls eine zweite Regressionsgerade ohne den Punkt mit dem geringsten Druckniveau gebildet.

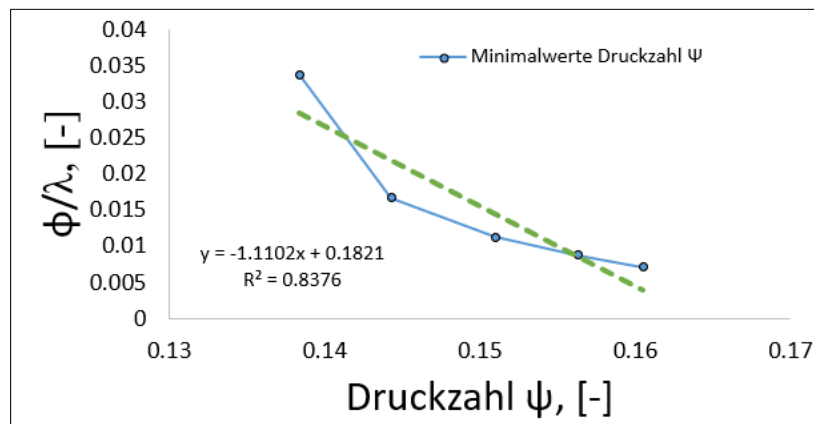


Abbildung 6.5.1.2: Regressionsgerade (gestrichelt) der Druckzahlenminimalwerte der Serrations der Variation Wellenlänge λ

Das Bestimmtheitsmaß dieser Beziehung beträgt $R^2 = 0.9719$. Dies entspricht einer linearen Abhängigkeit von 97,19% und somit kann von eben dieser ausgegangen werden. Dieser Ansatz kann ebenfalls in Zukunft weiter erforscht werden.

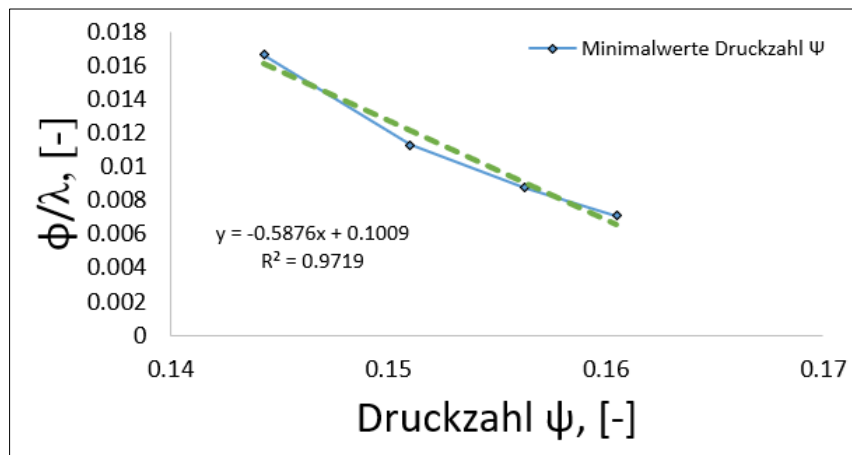


Abbildung 6.5.1.3: Regressionsgerade (gestrichelt) der Druckzahlenminimalwerte der Variation Wellenlänge λ im höheren Druckzahlbereich

6.5.2. Einfluss von Tu auf ψ und λ über ϕ mit großem A_{serr} und großem λ

Es zeigt sich ebenfalls, wie in Kapitel 6.4.3 bereits beschrieben, dass die Baseline mit dem Turbulenzgrad $Tu = 12,1\%$, unrealistisch hohe Werte bei der Druckzahl ψ und im Wirkungsgrad η besitzt. Auf diesen wird aus diesem Grund ebenfalls nicht weiter eingegangen. Die Serrations, welche allesamt die Abmaße A22 λ 22 besitzen, bauen unter allen Turbulenzgraden eine höhere Druckzahl ψ als die Baselines auf. Im Gegensatz zu der Versuchsraummitte der vorherigen Analyse in Kapitel 6.4.3 und 6.4.5, wird hier das größte Druckniveau schon bei höheren Lieferzahlen erreicht. Von hohem zu geringerem Turbulenzgrad Tu verschiebt sich das Maximum jedoch leicht von großen zu kleineren Lieferzahlen ϕ . Bei geringeren Lieferzahlen besitzen alle Serrations jedoch nochmals einen Bereich, in dem der Strömungsabriss endet und wieder ein Maximum (jedoch ein geringeres als bei höheren Lieferzahlen) aufgebaut wird. Die Minima der einzelnen Serrations befinden sich alle exakt bei der gleichen Lieferzahl $\phi = 0,156$, nur die Serration mit dem höchsten Turbulenzgrad $Tu=12,1\%$ ist bei einer anderen Lieferzahl, nämlich bei $\phi = 0,162$. Es zeigt sich, dass bei einem höheren Turbulenzgrad Tu auch eine höhere Druckzahl ψ erreicht wird. Die Wirkungsgrade η der Baseline liegen alle höher als die der Serrations. Einzig die Serration A22 λ 22 mit dem Turbulenzgrad $Tu = 4.975\%$ besitzt einen ähnlich hohen Verlauf wie diese. Die Serrations liegen ca. 4% darunter in weiten Punkten des Verlaufs. Diese nähern sich bei kleineren Lieferzahlen ϕ jedoch etwas an.

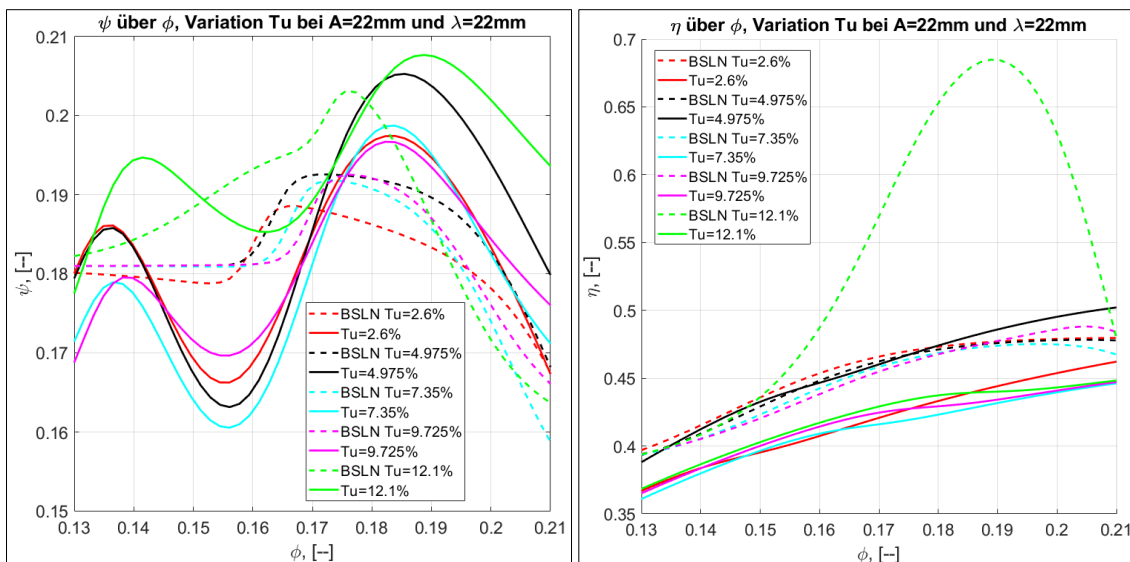


Abbildung 6.5.2.1: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über der Lieferzahl ϕ für die Variation des Turbulenzgrads Tu bei großer Amplitude und großer Wellenlänge

6.5.3. Einfluss von A_{Serr} auf ψ und λ über ϕ mit kleinem λ

In Abbildung 6.5.3.1 lässt sich erkennen, dass die Amplituden $A_{Serr} = 6mm$, $A_{Serr} = 10mm$ und $A_{Serr} = 14mm$ eine höhere Druckzahl ψ als die größeren Amplituden $A_{Serr} = 18mm$ und $A_{Serr} = 22mm$ erreichen. Zwischen den Amplituden $A_{Serr} = 14mm$ und $A_{Serr} = 18mm$ wird es wohl einen Punkt geben, an dem die Druckzahl beginnt, anstatt höher, geringer zu werden. Auffällig ist jedoch, dass die Serrations mit den Amplituden $A_{Serr} = 18mm$ und $A_{Serr} = 22mm$ die gleiche Druckzahl $\psi = 0,1782$ besitzen. Ihr Kurvenverlauf ist im Allgemeinen ebenfalls sehr ähnlich, die höhere Amplitude $A_{Serr} = 22mm$ sorgt hier jedoch für ein früheres Erreichen des Hochpunkts (bei $\phi = 0,167$ der Druckzahl ψ (bei $\phi = 0,167$) und somit auch einen früheren Stallpunkt. Die Baseline besitzt den höchsten Verlauf des Wirkungsgrads η in jedem Punkt des Diagramms. Hier lässt sich die Tendenz erkennen, dass im Allgemeinen eine größere Amplitude A_{Serr} für einen geringeren Wirkungsgrad η spricht. Den höchsten Wirkungsgrad der Serrations besitzt die Amplitude $A_{Serr} = 6mm$. Die Abstände der Verläufe zwischen den Wirkungsgradkennlinien sind verhältnismäßig groß. Dies lässt darauf schließen, dass bei einer geringen Wellenlänge λ (in diesem Fall $\lambda = 4mm$) der Einfluss auf den Wirkungsgrad η groß ist.

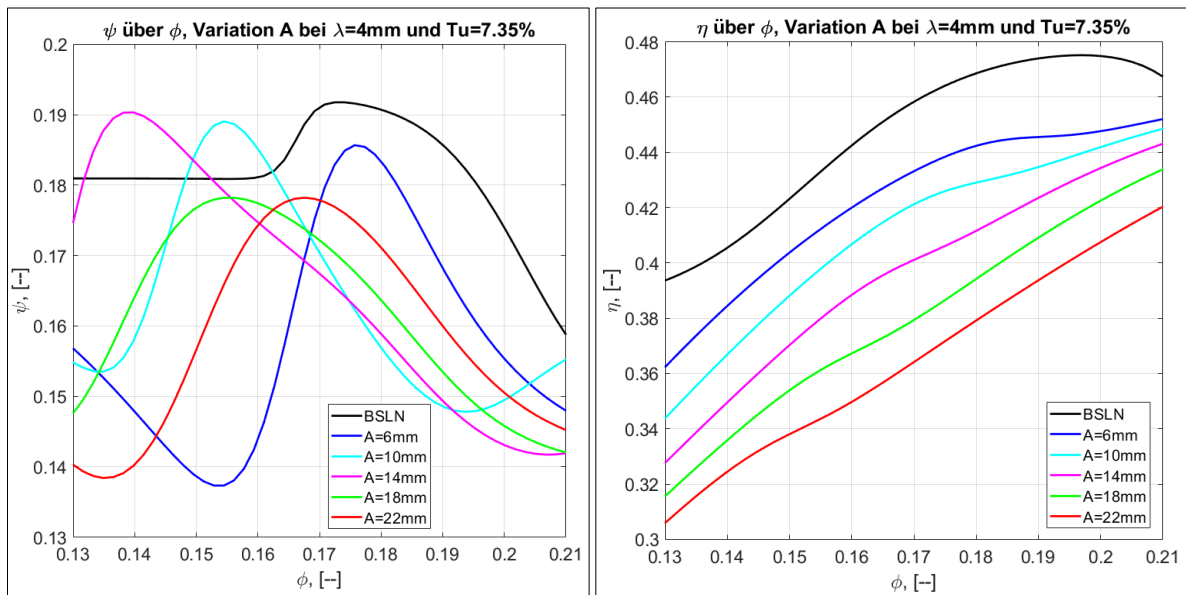


Abbildung 6.5.3.1: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über der Lieferzahl ϕ für die Variation der Amplitude A_{Serr} bei kleiner Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad

6.6. Analyse Wanddruckschwankungen im Zeit- und Spektralbereich

In diesem Kapitel werden die Wanddruckschwankungen in der Rotorebene des Zeit- und Spektralbereichs analysiert. Wie bereits in Kapitel 6.2 die Validierung der drei Testpunkte zeigt, werden keine hohen Prognosen für die künstlichen neuronalen Netze erreicht. In Abbildung 6.6.1 sind die Bestimmtheitsmaße der einzelnen Wandleistungspegel zu sehen. Diese bestätigen die Validierung der drei Testpunkte, indem sie ebenfalls geringe Ergebnisse aufweisen. Die höchste Güte besitzen die tonalen Anteile des Schallleistungspegel mit $R_T^2 = 79,47\%$, das niedrigste Güte beträgt sogar nur $R_{BB}^2 = 31,1\%$. In Tabelle 6.6.1 und Tabelle 6.6.2 sind die Bestimmtheitsmaße der Wanddruckschwankungen im Frequenzbereich der Prognose zu sehen. Alle drei Wandleistungspegel befinden sich vermehrt an ähnlichen Bereichen im Diagramm. Diese zeigen ebenfalls, dass die Wanddruckschwankungen in den einzelnen Frequenzbereichen nicht analysierbar sind, da die Bestimmtheitsmaße des Spektralbereichs keine genauen Ergebnisse liefern.

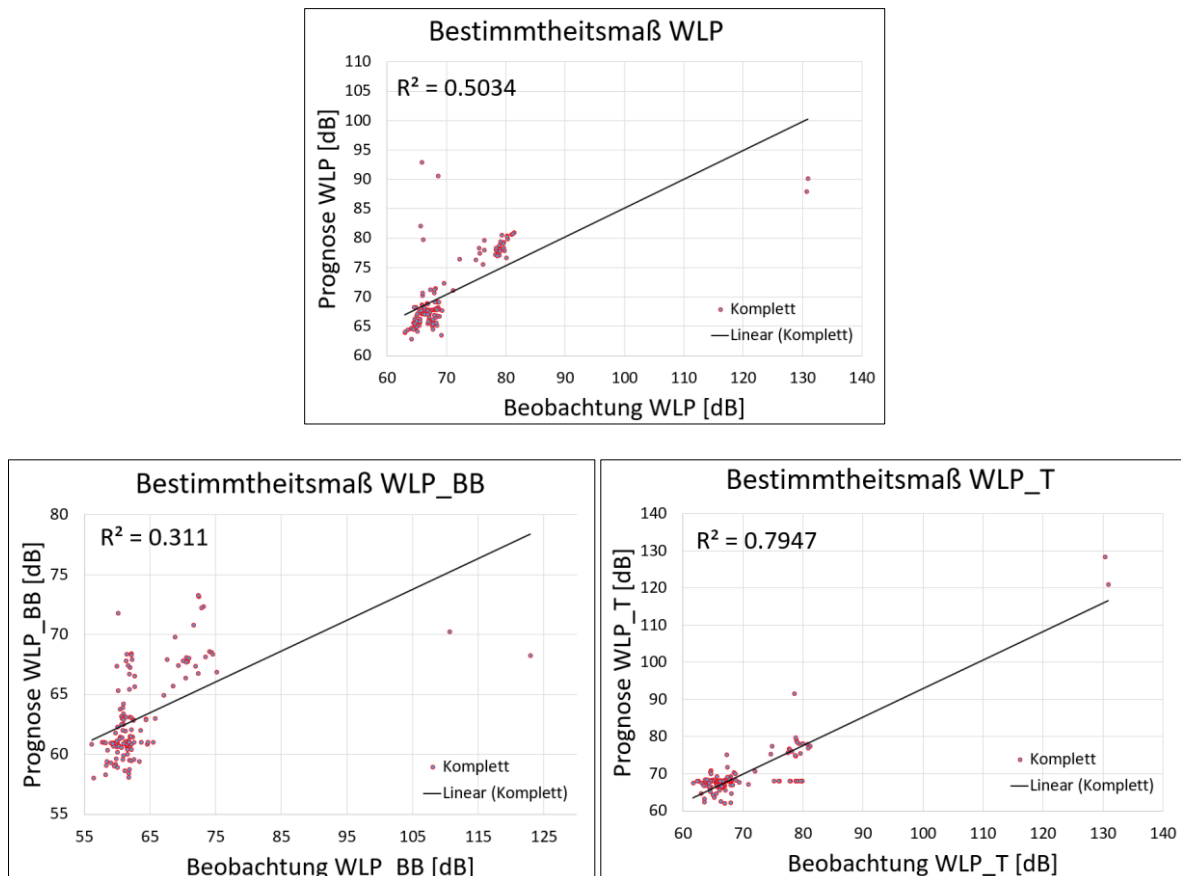


Abbildung 6.6.1: Bestimmtheitsmaß R^2 des Wandleistungspegels (oben) und breitbandiger (unten links) sowie tonaler (unten rechts) Anteile im Zeitbereich

Tabelle 6.6.1: Bestimmtheitsmaße R^2 im Spektralbereich der breitbandigen Prognose (Wanddruck)

Terz-Mittenfrequenz [Hz]	12,5	16	20	25	32	40	50	63	79	100
Breitband R^2 [%]	34.3	39.9	31.6	29.3	30.8	42.4	86.4	66.7	51.8	67.9
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	126	158	200	251	316	398	501	631	794	1000
Breitband R^2 [%]	66.3	60.9	86.5	59.3	59.8	57.6	36.4	85.5	78.9	40.7
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	1259	1585	1995	2512	3162	3981	5012	6310	7943	
Breitband R^2 [%]	80.1	41.1	36.8	88.7	60.6	72.1	41.4	46.1	55.4	

Tabelle 6.6.2: Bestimmtheitsmaße R^2 im Spektralbereich der tonalen Prognose (Wanddruck)

Terz-Mittenfrequenz [Hz]	25	32	40	63	79	100	126	158	200	251
Tonal R^2 [%]	23.0	39.7	50.3	57.8	62.9	44.2	61.3	60.5	64.8	56.3
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	316	398	501	631	794	1000	1259	1585	1995	2512
Tonal R^2 [%]	45.8	64.5	38.7	52.5	36.9	38.1	20.9	29.2	50.7	79.0
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	3162	3981	5012	6310	7943					
Tonal R^2 [%]	35.2	70.1	70.1	42.7	68.2					

Aus diesem Grund wird auf die Analyse verzichtet und stattdessen werden die Messergebnisse der Gesamtschallleistungspegel sowie deren breitbandiger und tonaler Anteile über verschiedenen Einflussgrößen aufgetragen und auf Auffälligkeiten untersucht. Im oberen Bereich der Diagramme befinden sich zwei Messpunkte, welche aufgrund von eventuellen Messfehlern als Ausreißer zu betrachten sind. Auf diese wird folglich nicht weiter eingegangen.

In Abbildung 6.6.2 sind die Wandleistungspegel der Wanddruckschwankungen WLP , WLP_{BB} und WLP_T über der Amplitude A_{Serr} und der Wellenlänge λ aufgetragen. Es ist deutlich zu sehen, dass es Amplituden A_{Serr} gibt, in denen stärkere Wanddruckschwankungen in der Rotorebene auftreten als in anderen. Auffällig an diesen ist, dass die Wandleistungspegel der Testpunkte allesamt ein höheres Niveau besitzen als die anderen Leading Edge Serrations. Zu erklären ist dies sehr wahrscheinlich damit, dass die Testpunkte mit einem anderen 3D-Drucker gedruckt wurden, ein anderes Material besitzen und somit eine leicht abweichende Oberflächenbeschaffenheit in Kombination mit geringfügig abweichender Geometrie vorweisen. In Bezug auf die Wanddruckschwankungen ist dies wohl signifikant, wie im nächsten Kapitel, Kapitel 0 deutlich wird. Die abweichenden Ergebnisse der Testpunkte reichen aus, um eine geringe Validierung in Bezug der Wanddruckschwankungen und dessen Wandleistungspegel zu erreichen. Um diese zu verbessern und somit eventuell analysierbar zu

machen, sollten die Messungen mit Blades aus der gleichen Fertigung mit Fokus auf Wanddruckschwankungen wiederholt werden.

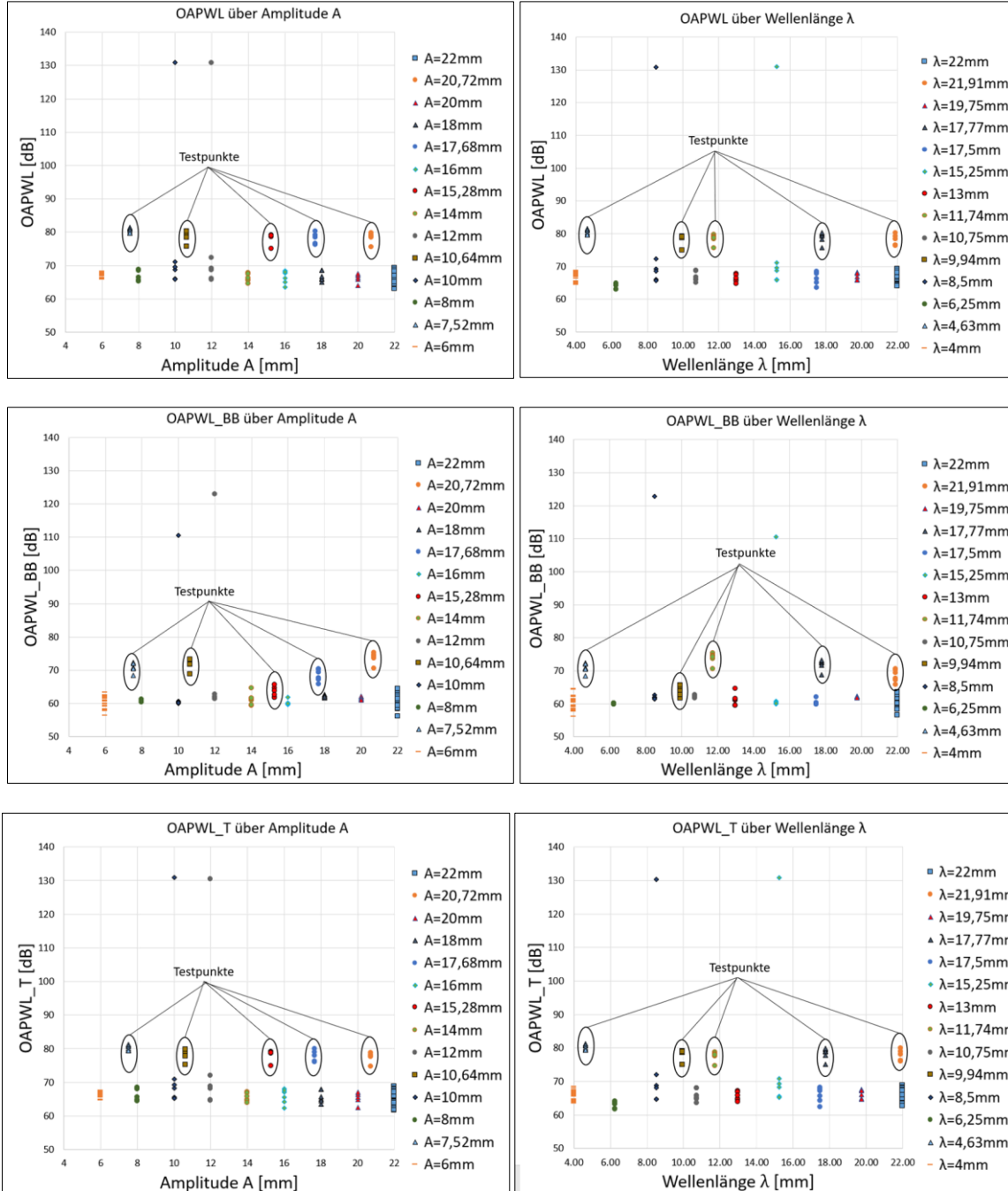


Abbildung 6.6.2: Messungen der unterschiedlichen WLP über der Amplitude A_{Serr} (links) und der Wellenlänge λ (rechts)

Da der Zeitbereich der Wanddruckschwankungen zeigt, dass die Messungen der Testpunkte einen höheren Wandleistungspegel besitzen und ebenfalls die Validierungspunkte der drei Wandleistungspegel sich vermehrt in denselben Bereichen befinden, wird der Spektralbereich betrachtet. Dies könnte zeigen, auf welche Frequenzbänder der Anstieg der Wandleistungspegel und das Clustern zurückzuführen ist. Zu sehen ist diese Auftragung in Abbildung 6.6.3. Dort ist deutlich zu erkennen, dass der breitbandige Anteil der Testpunkte im niederfrequenten Bereich deutlich über den restlichen Messpunkten liegt. In diesem Bereich liegt der Pegel der Wanddruckschwankungen in den meisten Frequenzen circa 10dB über den restlichen Messwerten. Ab einer Frequenz von $f = 200\text{Hz}$, beginnt der Wandleistungspegel der Testpunkte sich anzugleichen. Bei der Frequenz $f = 1585\text{Hz}$ beginnen die Messungen, welche keine Testpunkte sind, teilweise einen höheren Wandleistungspegel zu besitzen. Diese sinken bei steigender Frequenz weiter ab, sodass sie in hochfrequenten Bereichen höhere Wandleistungspegel besitzen. Die Betrachtung der breitbandigen Terzbänder zeigt somit, dass die Wanddruckschwankungen verursacht durch die Testpunkte, aufgrund des niederfrequenten Bereichs die höheren Wandleistungspegel besitzen. Wanddruckschwankungen im Allgemeinen treten verstärkt in niederfrequenten Bereichen auf. Im tonalen Terzband sind zwei Messpunkte, welche aufgrund von Fehlmessungen unrealistisch hohe Messwerte aufweisen. Auf diese wird nicht weiter eingegangen. Die Frequenz $f = 200\text{Hz}$ weist die höchsten Wandleistungspegel der Testpunkte auf. Diese sind in Bezug auf die anderen Messwerte dieser Frequenz stark erhöht. Der niederfrequente Bereich im Allgemeinen weist einen erhöhten Wandleistungspegel der Testpunkte auf. Einzig die Frequenz $f = 32\text{Hz}$ besitzt keinen höheren Wandleistungspegel der Testpunkte in diesem Bereich. Im höherfrequenten Bereich beginnt der Wandleistungspegel der Testpunkte sich mit steigender Frequenz anzugleichen, bis diese ab einer Frequenz $f = 2512\text{Hz}$ unter denen der restlichen Messwerte liegen. Auch hier zeigt sich im Allgemeinen, dass der niederfrequente Bereich stärkere Wandleistungspegel aufweist. In Bezug auf das Clustern lässt sich anhand dieser Auftragung im Diagramm nichts ableiten. Für die höheren Wandleistungspegel der Testpunkte lässt sich jedoch feststellen, dass die Terzbänder der Testpunkte stärkere Wanddruckschwankungen verursachen. Eine Messkampagne mit Tragflügeln aus gleichen 3D-Druckern könnte sehr wahrscheinlich das Ergebnis der Testpunkte verbessern.

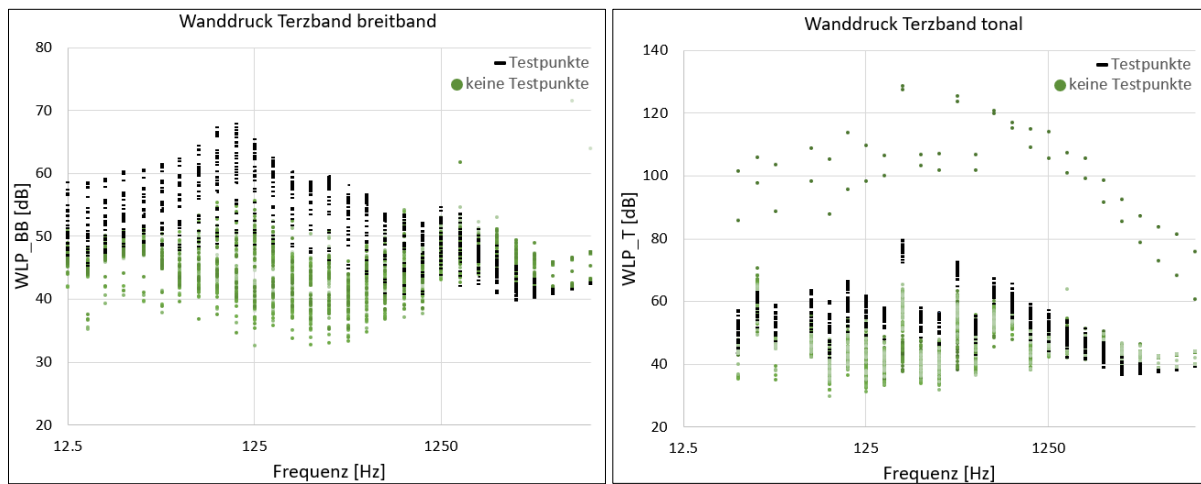


Abbildung 6.6.3: Breitbandige- (links) und tonale Wandleistungspegel (rechts) des Spektralbereichs, Darstellung Testpunkte und keine Testpunkte

Bei der Auftragung der einzelnen Wandleistungspegeln $OAPWL$, $OAPWL_{BB}$ und $OAPWL_T$ über dem Turbulenzgrad Tu in Abbildung 6.6.4 lässt sich erkennen, dass die einzelnen vermessenen Turbulenzgrade $Tu = 3,693\%$ bis einschließlich $Tu = 9,678\%$ allesamt ähnlich starke Wanddruckschwankungen in Bezug auf den Gesamtwandleistungspegel $OAPWL$ aufweisen. Der Turbulenzgrad $Tu = 2,6$, ebenso wie der größte Turbulenzgrad, $Tu = 12,1\%$, weisen ähnlich geringe Wanddruckschwankungen auf. Alle Turbulenzgrade weisen ausgeprägtere Wanddruckschwankungen im Breitbandbereich als im tonalen Bereich auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Wanddruckschwankungen eher im Spalt zwischen Laufrad und Gehäuse entstehen, als an festen Einbauten.

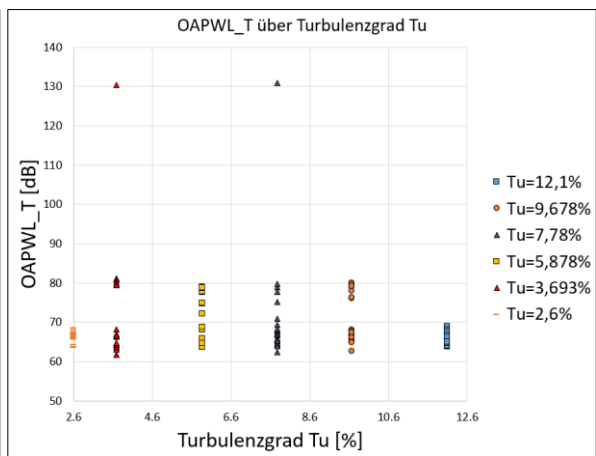
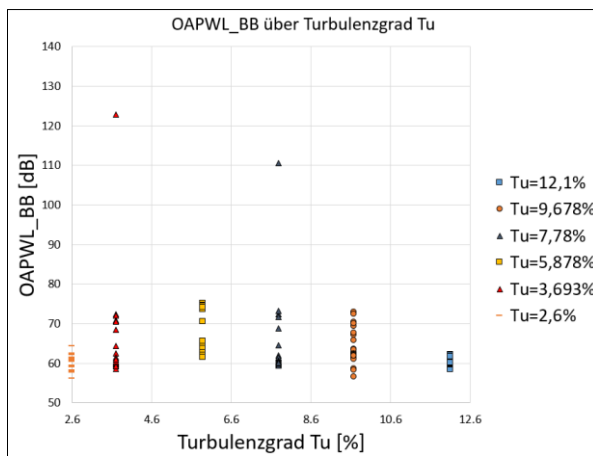
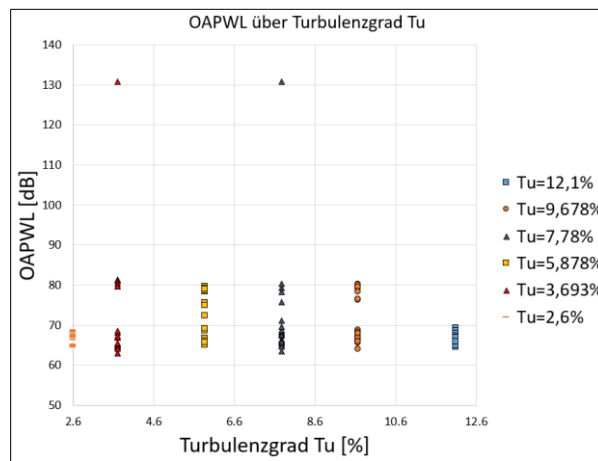


Abbildung 6.6.4: Gesamtwandleistungspegel (oben) und deren breitbandiger (unten links) sowie tonaler Anteil (unten rechts) über dem Turbulenzgrad Tu

6.7. Abgleich und Zusammenhang Aeroakustik

Neben dieser Bachelorthesis, in welcher die Aerodynamik und Wanddruckschwankungen in der Rotorebene untersucht wird, befasst sich eine parallellaufende Bachelorthesis mit der Prognose der Aeroakustik. Um Bezug zu dieser Thesis zu haben, werden die Bestimmtheitsmaße der akustischen Messergebnisse und Prognosen aufgezeigt.

Untersucht wurde der Gesamtschallleistungspegel $OAPWL$ sowie dessen tonaler und breitbandiger Anteil und die Blattfolgefrequenz BPF . Diese erreichen sehr hohe Bestimmtheitsmaße, am geringsten ist die Prognose der Blattfolgefrequenz mit $R_{BPF}^2 = 96,2\%$, welche mit diesem Wert jedoch auch ein hohes Bestimmtheitsmaß erreicht.

Tabelle 6.7.1: Bestimmtheitsmaße R^2 der akustischen Gesamtschallleistungspegel im Zeitbereich

	BB	T	BPF	WLP
R^2 [%]	99.3	99.5	96.2	99.7

Ebenfalls wurde die Blattfolgefrequenz in mehrere Frequenzspektren aufgeteilt, um deren Anteile genauer zu untersuchen. Diese erreichen ebenfalls eine hohe Validierung. Das geringste Ergebnis wird bei einer Frequenz $f_{BPF} = 200Hz$ erreicht, dort beträgt das Bestimmtheitsmaß $R_{BPF}^2 = 91.7\%$, das höchste bei einer Frequenz von $f_{BPF} = 1000Hz$ (mit $R_{BPF}^2 = 98.8\%$).

Tabelle 6.7.2: Bestimmtheitsmaße R^2 der Frequenzanteile der akustischen Blattfolgefrequenz

Frequenz [Hz]	200	400	600	800	1000	1200
Tonal R^2 BPF [%]	91.7	96.3	92.6	93.2	98.8	93.7

Ferner liefern die breitbandigen und tonalen Terzbänder der akustischen Anteile ebenfalls hohe Validierungswerte. Viele der einzelnen Frequenzbereiche liefern Ergebnisse, welche höher als 99% sind, welche für eine sehr starke Prognose dieser sprechen. Das geringste R^2 der breitbandigen Anteile wird bei einer Frequenz von $f_{BPF} = 1259Hz$ erreicht mit einem Bestimmtheitsmaß $R_{BPF}^2 = 97,2\%$, welches trotzdem relativ hoch ist. In der Aufteilung der einzelnen Frequenzen im tonalen Bereich ist das geringste Bestimmtheitsmaß bei einer Frequenz von $f_T = 3981Hz$ mit $R_T^2 = 79,1\%$. Dieser ist wohl ein Ausreißer, da alle anderen relativ hohe Prognosen erreichen. Es sollte an dieser Stelle auch erwähnt werden, dass der Fokus des Trainierens der künstlichen neuronalen Netze bei der Aeroakustik lag, da die Messergebnisse für eine Dissertation genutzt werden. Die aerodynamischen Bestimmtheitsmaße und die der instationären aerodynamischen Wanddruckschwankungen,

welche bereits in Kapitel 6.1 und 6.6 aufgezeigt wurden, zeigen insgesamt geringere Ergebnisse als die der Aeroakustik.

Tabelle 6.7.3: Bestimmtheitsmaße R^2 der Schallleistungspegel breitbandiges Terzband

Terz-Mittenfrequenz [Hz]	12,5	16	20	25	32	40	50	63	79	100
Breitband R^2 [%]	99.2	99.3	99.2	99.4	99.6	99.6	99.8	99.8	99.8	99.7
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	126	158	200	251	316	398	501	631	794	1000
Breitband R^2 [%]	99.9	99.6	99.2	99.5	99.5	99.2	99.3	99.1	99.1	99.3
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	1259	1585	1995	2512	3162	3981	5012	6310	7943	
Breitband R^2 [%]	97.2	99.4	99.1	99.0	98.9	98.8	99.3	99.0	99.3	

Tabelle 6.7.4: Bestimmtheitsmaße R^2 der Schallleistungspegel tonales Terzband

Terz-Mittenfrequenz [Hz]	25	32	40	63	79	100	126	158	251	316
Tonal R^2 [%]	99.3	97.6	99.6	99.8	99.7	99.8	99.7	98.8	99.6	99.5
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	398	501	631	794	1000	1259	1585	1995	2512	3162
Tonal R^2 [%]	95.5	99.1	98.5	96.3	99.1	98.9	99.2	91.8	99.2	98.8
Terz-Mittenfrequenz [Hz]	3981	5012	6310	7943						
Breitband R^2 [%]	79.1	99.4	99.2	99.4						

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Thesis war es zu untersuchen, wie der generelle Zusammenhang der verschiedenen Einflussparameter auf die aerodynamische Performance im Hinblick auf die Prognostizierbarkeit und Überführbarkeit vom ebenen ins rotierende System ist.

Um die aerodynamische Analyse durchzuführen, wurde ein Latin Hypercube Modell unter Berücksichtigung der vier Einflussgrößen gebildet, dessen Grenzen vorher festgelegt wurden. Die Einflussgrößen, von denen zwei geometrischen Ursprungs sind, (Amplitude A_{Serr} und Wellenlänge λ) wurden anschließend in CAD re-designed und im Rapid-Prototyping-Verfahren gefertigt. Die Testpunkte des Latin Hypercube Modells wurden jedoch von einem abweichenden 3D-Drucker als die anderen Leading Edge Serrations gefertigt. Nach händischer Aufbereitung der Tragflügel wurden diese randomisiert doppelt gefahren, um im Anschluss daran den Mittelwert aus den Messungen zu bilden.

Die Validierung der Druckzahl ψ und des Wirkungsgrads η zeigt ein relativ hohes Bestimmtheitsmaß zwischen Prognose und Beobachtung. Dieses macht es im generellen möglich, Aussagen über die Performance dieser zwei aerodynamischen Kenngrößen zu treffen.

Die Validierung der drei Testpunkte, welche nicht ins Training der künstlichen neuronalen Netze aufgenommen wurden und allesamt sich am Rand des Versuchsraums befinden, zeigen in Bezug auf die aerodynamischen Größen gute Ergebnisse. Es wurden teilweise Abweichungen von Druckzahl ψ und Wirkungsgrad η der Testmessungen von unter 5% erreicht. Die instationären aerodynamischen Zielgrößen im Zeitbereich, welche die unterschiedlichen Wandleistungspegel darstellen, zeigen ebenfalls gute Ergebnisse. Hier wurde beim tonalen Wandleistungspegel sogar eine Abweichung von unter 1% erzielt. Die anderen Wandleistungspegel zeigen mit Abweichungen von unter 4% ebenfalls gute Ergebnisse an. Die instationären Zielgrößen im Spektralbereich, welcher der Prognose der Terzbänder entspricht, zeigen jedoch keine hohen Übereinstimmungen von Prognose und Messung. Das breitbandige Terzband erreicht eine bessere Prognose als das tonale Terzband, jedoch sind beide nicht hoch. Das tonale Terzband des Wandleistungspegel im Spektralbereich zeigt sogar einen negativen Wert auf, welcher unrealistisch ist. Eine Erhöhung der Koeffizienten bei der Berechnung der Prognosewerte sowie ein Latin Hypercube Modell, welches den Fokus auf die aerodynamischen Zielgrößen im Zeit- und Spektralbereich besitzt, könnte wahrscheinlich eine Verbesserung der Prognose erreichen.

Ebenso wurde ein Vergleich zwischen der Prognose und experimenteller Vorversuche mit der Druckzahl ψ und dem Wirkungsgrad η durchgeführt. Die Voruntersuchungen dienten zur Bildung von Kennlinien und wurden nicht randomisiert gefahren. Ausgewählt wurden für den Vergleich in dieser Thesis die drei von fünf vielversprechendsten Leading Edge Serrations. Diese zeigen ebenfalls, dass die Prognose gute Ergebnisse liefert. Ebenfalls wurde die mittlere

absolute prozentuale Abweichung der der Messpunkte der experimentellen Vorversuche in Bezug zur Prognose gesetzt. Diese erreichen ebenfalls teilweise sehr gute Ergebnisse, es wurden sogar Abweichungen von unter 1% erreicht. Die größte Abweichung lag bei 8,7%. Die Ungenauigkeiten der Prognose könnten sich durch Störgrößen eingebracht haben, welche sich durch eine randomisierte Messweise, längerer Messzeiten und dem Neuanfahren des Rohrprüfstandes nach jeder Messung wahrscheinlich verbessern könnten.

Analysiert wurde ebenfalls die Prognose der Druckzahl ψ und des Wirkungsgrads η im Versuchsraum. Der Versuchsraum wurde in einer Schrittweite von 0,5 von -1 bis +1 in unterschiedlichen Konstellationen abgefahren, welcher somit pro Analyse fünf Tragflügelsets umfasste. Es zeigte sich beim Wirkungsgrad η , dass dieser trotz einer relativ guten Prognose bei hohen Lieferzahlen ϕ immer zu hoch prognostiziert wird. Dies macht es schwer, einen Auslegungspunkt über das Diagramm des Wirkungsgrad η zu finden.

Die Analyse der Variation der Wellenlänge λ in der Versuchsraummitte zeigte, dass große Wellenlängen und eine mittlere Amplitude A_{Serr} eine höhere Druckzahl ψ als die Baseline erreichen.

Bei der Analyse der Variation der Amplitude A_{Serr} stellte sich heraus, dass eine geringere Amplitude für einen höheren Wirkungsgrad spricht, dieser erreicht jedoch nicht das Niveau der Baseline. Lediglich die Serration A10 λ 13 erreicht nahezu dieselbe Druckzahl ψ wie die Baseline.

Die Variation des Turbulenzgrads in der Versuchsraummitte prognostiziert, dass die Serrations mit den Maßen A14 λ 13 bei hohen Turbulenzgraden Tu höhere Druckzahlen ψ als die Baseline erreichen. Dies sollte in Zukunft weiter erforscht werden. Ebenfalls zeigte sich bei dem Turbulenzgrad $Tu = 4,975\%$, dass die Serration einen signifikant höheren Wirkungsgrad η besitzt.

Der Versuchsraum mit der Auftragung der Druckzahl ψ über der Amplitude A_{Serr} zeigt, dass eine lineare Abhängigkeit zwischen der Druckzahl und der Amplitude bestehen könnte. Nachdem diese Überprüfung nur eine geringe lineare Abhängigkeit zeigte, wurde eine erneute Überprüfung auf hohe Druckzahlen begrenzt, welche im Anschluss ein Bestimmtheitsmaß von 98,15% erreicht. Diese vielversprechende Erkenntnis sollte in Zukunft weiter untersucht werden.

Es wurde festgestellt, dass Bereiche der Amplitude A_{Serr} bei der Auftragung der Druckzahl ψ über der Amplitude bei der Variation des Turbulenzgrads höhere Druckzahlen als die der Baseline aufweisen. Dort ist jedoch der Wirkungsgrad η signifikant geringer.

Die Variation der Wellenlänge mit der Amplitude A_{Serr} hat herausgestellt, dass bei den Druckzahlenminima, also in den Bereichen, wo der Strömungsabriss endet und wieder ein höherer Druck aufgebaut wird, eine lineare Abhängigkeit zwischen der Druck- und der

Lieferzahl bestehen könnte. Nach Bildung des Bestimmtheitsmaßes dieser Beziehung wurde lediglich eine lineare Abhängigkeit von 83,76% festgestellt. Da sich in dem Diagramm zeigte, dass in Bereichen hoher Lieferzahlen die Druckzahlenminima sich näher an der Regressionsgeraden befinden, wurde die lineare Abhängigkeit für Bereiche hoher Lieferzahlen untersucht. Dieses zeigt eine lineare Abhängigkeit mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 97,19\%$. Dieser Ansatz sollte weiter untersucht werden.

Das Variieren der Amplitude A_{serr} bei einer kleinen Wellenlänge λ prognostiziert, dass der Einfluss der Amplitude auf den Wirkungsgrad η im gesamten Lieferzahlenbereich sehr stark ist. Dort wird jedoch nie das Niveau der Baseline erreicht.

Ebenfalls wurden die Wanddruckschwankungen im Zeit- und Spektralbereich analysiert. Der Zeitbereich dieser zeigt jedoch keine hohe Validierung. Die höchste Güte besitzt der tonale Wandleistungspegel mit einem Bestimmtheitsmaß $R_T^2 = 79,47\%$, der Gesamtwandleistungspegel und der tonale Wandleistungspegel liegen signifikant darunter. Die Terzbänder des Spektralbereichs zeigen ebenfalls keine hohen Prognosen. Aus diesem Grund wurde auf eine Analyse verzichtet und die Messergebnisse wurden untersucht. Dies zeigte, dass die Testpunkte, welche mit einem anderen 3D-Drucker hergestellt wurden, stark erhöhte Pegel aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Testpunkte eine leicht abweichende Oberflächenbeschaffenheit und eine geringfügig abweichende Geometrie besitzen, welche ausreicht, um die Wanddruckschwankungen stark zu beeinflussen. Erneute Messungen mit Tragflügeln aus gleicher Fertigung könnten sehr wahrscheinlich bessere Ergebnisse erreichen, welche es möglich machen, diese zu analysieren. Die Terzbänder der Messergebnisse zeigen ebenfalls, dass die Testpunkte in vielen Bereichen der Frequenzen stark erhöhte Pegel aufweisen.

Als letztes wurde ein Abgleich mit einer parallellaufenden Bachelorthesis durchgeführt, in welcher die Prognose der Aeroakustik untersucht wird. Die Bestimmtheitsmaße der unterschiedlichen Schallleistungspegel im Zeitbereich erreichen sehr hohe Prognosen, die Bestimmtheitsmaße dieser liegen größtenteils über 99%. Die Bestimmtheitsmaße der Blattfolgefrequenzen im Frequenzbereich erreichen gute Ergebnisse. Diese liegen im Gesamten bei über 90%, die höchste Prognose wird bei der Frequenz $f = 1000\text{Hz}$ erreicht, dort liegt das Bestimmtheitsmaß bei 98,8%. Die Terzbänder der breitbandigen und tonalen Schallleistungspegel zeigen ebenfalls sehr gute Ergebnisse. Die meisten der Frequenzen zeigen ein Bestimmtheitsmaß von über 99%. Das Geringste liegt beim tonalen Terzband bei der Frequenz $f = 3981\text{Hz}$ mit einem Bestimmtheitsmaß $R_T^2 = 79,1\%$.

Die Ergebnisse der Analyse dieser Bachelorthesis zeigen, dass die Prognostizierbarkeit der Aerodynamik für die Druckzahl ψ , die Lieferzahl φ und den Wirkungsgrad η klar gegeben ist und hohe Ergebnisse erreicht. Die Validierung der Bestimmtheitsmaße, die Validierung der drei Testmessungen und der Vergleich der Untersuchungen aus Vorversuchen bestätigen dies. Die

Untersuchung des Versuchsraums mit unterschiedlichen Auftragungen der Einflussgrößen zeigt vielversprechende Erkenntnisse, welche in weiteren Untersuchungen weiter analysiert werden können. Dort sei nochmal auf die linearen Abhängigkeiten verwiesen, welche neue Erkenntnisse bringen könnten. Lediglich die Analyse der Wanddruckschwankungen im Zeit- und Spektralbereich kann nicht durchgeführt werden, da aufgrund der unterschiedlichen Materialien die Unterschiede der Geometrie und Oberfläche zu groß sind. Eine neue Messkampagne kann die Ergebnisse sehr wahrscheinlich analysierbar machen.

Im Bereich der Leading Edge Serrations kann noch eine Vielzahl von Parametervariationen weiterhin erforscht werden. So könnte der Versuchsraum vergrößert werden indem die Einflussgrößen vergrößert werden oder die Leading Edge Serrations noch weiter positiv oder negativ verdreht werden. Ebenfalls könnten unterschiedlichste neue Formen der Vorderkante in Hinblick auf die Aerodynamik getestet werden und der Turbulenzgrad könnten ebenfalls weiter variiert werden.

8. Literaturverzeichnis

Weber (2019): Strömungs- und Kolbenmaschinen im Anlagenbau. 1. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg

Böswirth und Bschorer (2012): Technische Strömungslehre. 9., überarbeitete Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag

Müller und Möser (2017): Strömungsgeräusche. 1. Aufl., Berlin: Springer Vieweg

Schlichting und Gersten (2006): Grenzschicht-Theorie. 10., überarbeitete Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer

Schirmer (2006): Technischer Lärmschutz. 2., bearbeitete und erweiterte Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer

Schade et al. (2013): Strömungslehre. 4., neu bearbeitete Aufl., Berlin: De Gruyter

Henn et al. (2008): Ingenieurakustik. 4., überarbeitete und erweiterte Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner

Siebertz, van Bebber und Hochkirchen (2017): Statistische Versuchsplanung. 2. Aufl., Berlin: Springer Vieweg

Michael Möser (2009): Messtechnik der Akustik, Berlin, Heidelberg: Springer

Thomas Carolus (2013): Ventilatoren. 3., überarbeitete und erweiterte Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner

Michael Möser (2018): Wandler für Luftschallmessungen. 1. Aufl., Berlin: Springer Vieweg

Kollmann et al. (2006): Praktische Maschinenakustik. 1. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer

Geiger und Kotte (2008): Handbuch Qualität. 5. Aufl., Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag

Mario Adam (2017): Versuchsplanung und Auswertung. Skript Vorlesung. Düsseldorf.

Biedermann, T., Kameier, F., and Paschereit, O. (2018): Optimised Test Rig for

Measurement of Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of Leading Edge Serrations in Low-Speed Fan Application. Proceedings of ASME Turbo Expo

Biedermann et al. (2018): Assessment of Statistical Sampling Methods and Approximation Models Applied to Aeroacoustic and Vibroacoustic Problems

Corsini et al. (2015): Aeroacoustic Assessment of Leading Edge Bumps in Industrial Fans

Biedermann et al. (2018): Effect of Inflow Conditions on the Noise Reduction Through Leading Edge Serrations

Chaitanya et al. (2015): Broadband noise reduction through leading edge serrations on realistic aerofoils

9. Anhang

Tabelle 9.1: Aufstellung des Latin-Hypercube-Modells mit dessen Absolutwerten

A [mm]	λ [mm]	φ [-]	Tu [-]	A_{Abs} [mm]	λ_{Abs} [mm]	φ_{Abs} [-]	Tu_{Abs} [-]
1	-0,75	0,5	-1	22,00	6,25	0,19	2,6
-0,75	1	0,25	-1	8,00	4,00	0,18	2,6
0,75	1	-0,25	-1	20,00	22,00	0,16	2,6
1	1	-1	-1	22,00	22,00	0,13	2,6
1	-1	-1	-1	22,00	4,00	0,13	2,6
-1	1	-1	-1	6,00	22,00	0,13	2,6
-0,25	-0,5	-0,75	-1	12,00	8,5	0,14	2,6
-1	-1	-1	-1	6,00	4,00	0,13	2,6
0,25	0,5	0,75	-1	16,00	17,5	0,20	2,6
1	-1	1	-1	22,00	4,00	0,21	2,6
1	1	1	-1	22,00	22,00	0,21	2,6
-1	0,75	-0,5	-1	6,00	19,75	0,15	2,6
-1	1	1	-1	6,00	22,00	0,21	2,6
-0,5	0,25	1	-1	10,00	15,25	0,21	2,6
0,5	-0,25	-1	-1	18,00	10,75	0,13	2,6
0	0	0	-1	14,00	13,00	0,17	2,6
-1	-1	1	-1	6,00	4,00	0,21	2,6
0,46	0,99	0,49	-1	17,68	21,91	0,19	2,6
-0,81	-0,93	-0,01	-1	7,52	4,63	0,17	2,6
0,84	-0,14	-0,91	-1	20,72	11,74	0,134	2,6
-0,42	0,53	-0,58	-1	10,64	17,77	0,147	2,6
0,16	-0,34	0,93	-1	15,28	9,94	0,207	2,6

Messpläne

Tabelle 9.2: Messplan LHS

LHS				Randomisierung	
A_abs	λ _abs	ϕ _abs	Tu_abs	No	Random
22.00	6.25	0.190	G00	12	0.003
8.00	4.00	0.180	G00	15	0.023
20.00	22.00	0.160	G00	14	0.052
12.00	8.50	0.140	G00	48	0.077
16.00	17.50	0.200	G00	18	0.082
6.00	19.75	0.150	G00	21	0.083
10.00	15.25	0.210	G00	10	0.099
18.00	10.75	0.130	G00	38	0.107
22.00	6.25	0.190	G05	40	0.108
8.00	4.00	0.180	G05	20	0.125
20.00	22.00	0.160	G05	30	0.156
12.00	8.50	0.140	G05	44	0.169
16.00	17.50	0.200	G05	31	0.175
6.00	19.75	0.150	G05	47	0.180
10.00	15.25	0.210	G05	8	0.187
18.00	10.75	0.130	G05	23	0.198
22.00	6.25	0.190	G04	11	0.234
8.00	4.00	0.180	G04	45	0.262
20.00	22.00	0.160	G04	24	0.278
12.00	8.50	0.140	G04	37	0.286
16.00	17.50	0.200	G04	36	0.370
6.00	19.75	0.150	G04	7	0.394
10.00	15.25	0.210	G04	28	0.436
18.00	10.75	0.130	G04	2	0.453
22.00	6.25	0.190	G03	25	0.459
8.00	4.00	0.180	G03	29	0.485
20.00	22.00	0.160	G03	17	0.547
12.00	8.50	0.140	G03	4	0.569
16.00	17.50	0.200	G03	43	0.632
6.00	19.75	0.150	G03	6	0.636
10.00	15.25	0.210	G03	46	0.674
18.00	10.75	0.130	G03	35	0.712
22.00	6.25	0.190	G02	41	0.714
8.00	4.00	0.180	G02	16	0.725
20.00	22.00	0.160	G02	3	0.742
12.00	8.50	0.140	G02	9	0.749
16.00	17.50	0.200	G02	32	0.793
6.00	19.75	0.150	G02	33	0.813
10.00	15.25	0.210	G02	26	0.828
18.00	10.75	0.130	G02	1	0.829
22.00	6.25	0.190	G01	13	0.831
8.00	4.00	0.180	G01	34	0.838
20.00	22.00	0.160	G01	22	0.847
12.00	8.50	0.140	G01	42	0.884
16.00	17.50	0.200	G01	5	0.902
6.00	19.75	0.150	G01	19	0.907
10.00	15.25	0.210	G01	39	0.918
18.00	10.75	0.130	G01	27	0.937

Tabelle 9.3: Messplan Sternpunkte

StarPoints				Randomisierung	
A_abs	λ _abs	ϕ _abs	Tu_abs	No	Random
22.00	22.00	0.130	G00	3	0.010
22.00	4.00	0.130	G00	51	0.030
6.00	22.00	0.130	G00	1	0.046
6.00	4.00	0.130	G00	38	0.047
22.00	4.00	0.210	G00	43	0.059
22.00	22.00	0.210	G00	20	0.130
6.00	22.00	0.210	G00	12	0.131
14.00	13.00	0.170	G00	36	0.136
6.00	4.00	0.210	G00	34	0.141
22.00	22.00	0.130	G05	54	0.167
22.00	4.00	0.130	G05	13	0.168
6.00	22.00	0.130	G05	11	0.175
6.00	4.00	0.130	G05	9	0.231
22.00	4.00	0.210	G05	28	0.287
22.00	22.00	0.210	G05	40	0.290
6.00	22.00	0.210	G05	16	0.300
14.00	13.00	0.170	G05	25	0.334
6.00	4.00	0.210	G05	48	0.346
22.00	22.00	0.130	G04	52	0.370
22.00	4.00	0.130	G04	35	0.415
6.00	22.00	0.130	G04	41	0.462
6.00	4.00	0.130	G04	44	0.467
22.00	4.00	0.210	G04	5	0.477
22.00	22.00	0.210	G04	2	0.481
6.00	22.00	0.210	G04	21	0.507
14.00	13.00	0.170	G04	24	0.513
6.00	4.00	0.210	G04	4	0.545
22.00	22.00	0.130	G03	15	0.548
22.00	4.00	0.130	G03	45	0.557
6.00	22.00	0.130	G03	47	0.577
6.00	4.00	0.130	G03	33	0.579
22.00	4.00	0.210	G03	23	0.586
22.00	22.00	0.210	G03	6	0.641
6.00	22.00	0.210	G03	19	0.682
14.00	13.00	0.170	G03	18	0.705
6.00	4.00	0.210	G03	14	0.709
22.00	22.00	0.130	G02	53	0.735
22.00	4.00	0.130	G02	39	0.755
6.00	22.00	0.130	G02	30	0.771
6.00	4.00	0.130	G02	26	0.781
22.00	4.00	0.210	G02	10	0.787
22.00	22.00	0.210	G02	42	0.825
6.00	22.00	0.210	G02	49	0.863
14.00	13.00	0.170	G02	50	0.867
6.00	4.00	0.210	G02	46	0.878
22.00	22.00	0.130	G01	29	0.902
22.00	4.00	0.130	G01	7	0.927
6.00	22.00	0.130	G01	32	0.957
6.00	4.00	0.130	G01	37	0.959
22.00	4.00	0.210	G01	31	0.981
22.00	22.00	0.210	G01	8	0.982
6.00	22.00	0.210	G01	17	0.984
14.00	13.00	0.170	G01	22	0.990
6.00	4.00	0.210	G01	27	0.997

Tabelle 9.4: Messplan Baseline

BSLN				Randomisierung	
A_abs	λ_{abs}	ϕ_{abs}	Tu_abs	No	Random
0.00	0.00	0.130	G00	3	0.0320
0.00	0.00	0.150	G00	27	0.0530
0.00	0.00	0.170	G00	9	0.0637
0.00	0.00	0.190	G00	2	0.0682
0.00	0.00	0.210	G00	19	0.1038
0.00	0.00	0.130	G05	17	0.1251
0.00	0.00	0.150	G05	14	0.1732
0.00	0.00	0.170	G05	1	0.1975
0.00	0.00	0.190	G05	18	0.2834
0.00	0.00	0.210	G05	10	0.3440
0.00	0.00	0.130	G04	16	0.4206
0.00	0.00	0.150	G04	8	0.4300
0.00	0.00	0.170	G04	29	0.4301
0.00	0.00	0.190	G04	23	0.4683
0.00	0.00	0.210	G04	11	0.4835
0.00	0.00	0.130	G03	12	0.4946
0.00	0.00	0.150	G03	20	0.5924
0.00	0.00	0.170	G03	26	0.6239
0.00	0.00	0.190	G03	5	0.6350
0.00	0.00	0.210	G03	21	0.6357
0.00	0.00	0.130	G02	30	0.6738
0.00	0.00	0.150	G02	24	0.6795
0.00	0.00	0.170	G02	13	0.7857
0.00	0.00	0.190	G02	6	0.8075
0.00	0.00	0.210	G02	28	0.8308
0.00	0.00	0.130	G01	25	0.8616
0.00	0.00	0.150	G01	15	0.8967
0.00	0.00	0.170	G01	7	0.9057
0.00	0.00	0.190	G01	22	0.9529
0.00	0.00	0.210	G01	4	0.9796

Tabelle 9.5: Messplan Testpunkte

TestPoints				Randomisierung	
A_abs	λ _abs	ϕ _abs	Tu_abs	No	Random
17.68	21.91	0.190	G00	30	0.009
7.52	4.63	0.170	G00	26	0.045
20.72	11.74	0.134	G00	23	0.078
10.64	17.77	0.147	G00	4	0.116
15.28	9.94	0.207	G00	6	0.117
17.68	21.91	0.190	G05	21	0.125
7.52	4.63	0.170	G05	9	0.157
20.72	11.74	0.134	G05	2	0.194
10.64	17.77	0.147	G05	27	0.287
15.28	9.94	0.207	G05	18	0.341
17.68	21.91	0.190	G04	1	0.348
7.52	4.63	0.170	G04	20	0.356
20.72	11.74	0.134	G04	3	0.377
10.64	17.77	0.147	G04	19	0.379
15.28	9.94	0.207	G04	13	0.386
17.68	21.91	0.190	G03	29	0.450
7.52	4.63	0.170	G03	8	0.519
20.72	11.74	0.134	G03	11	0.528
10.64	17.77	0.147	G03	25	0.544
15.28	9.94	0.207	G03	5	0.617
17.68	21.91	0.190	G02	22	0.639
7.52	4.63	0.170	G02	17	0.649
20.72	11.74	0.134	G02	14	0.675
10.64	17.77	0.147	G02	28	0.707
15.28	9.94	0.207	G02	15	0.739
17.68	21.91	0.190	G01	10	0.846
7.52	4.63	0.170	G01	12	0.870
20.72	11.74	0.134	G01	24	0.891
10.64	17.77	0.147	G01	7	0.902
15.28	9.94	0.207	G01	16	0.921

Abbildungen

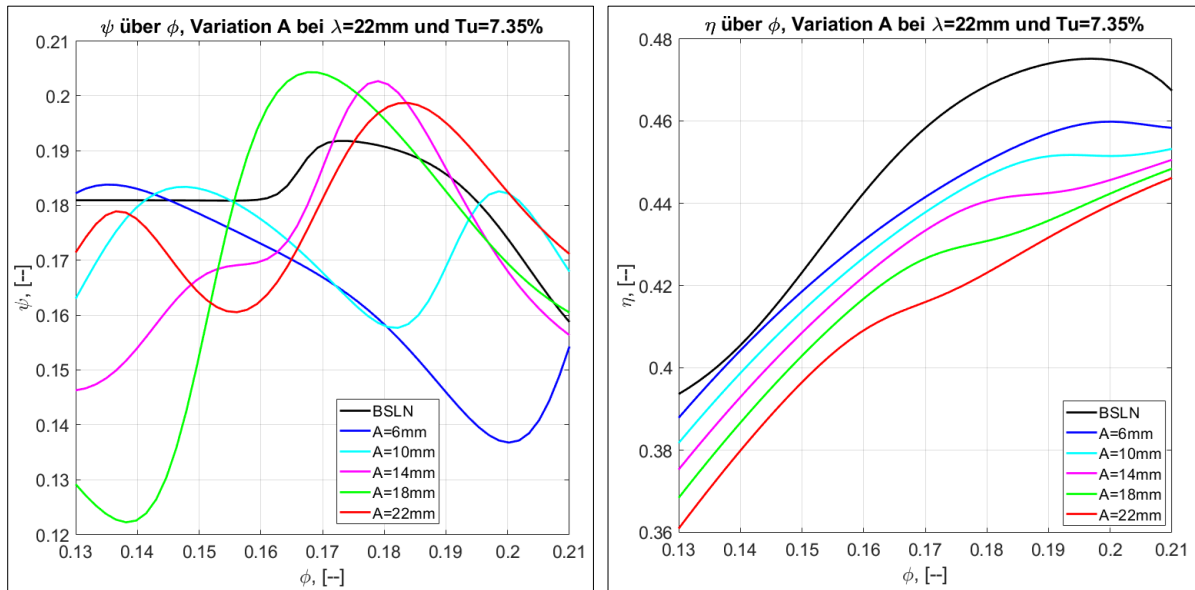


Abbildung 9.1: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über Lieferzahl ϕ für Variation Amplitude A_{serr} bei großer Wellenlänge und mittlerem Turbulenzgrad

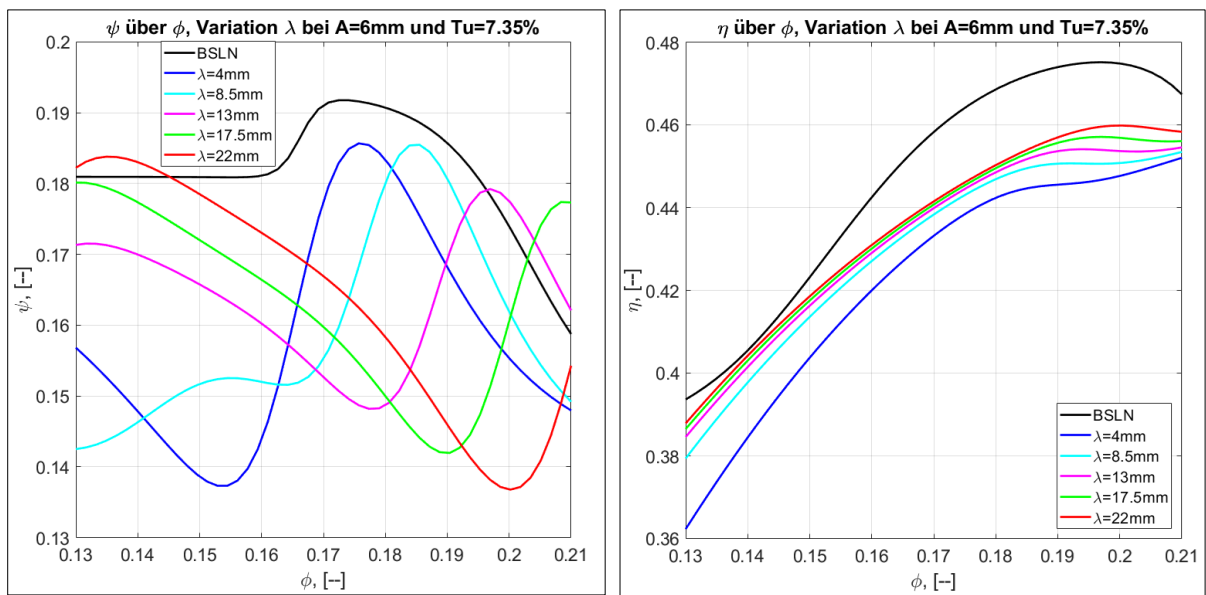


Abbildung 9.2: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über Lieferzahl ϕ für Variation Wellenlänge λ bei kleiner Amplitude und mittlerem Turbulenzgrad

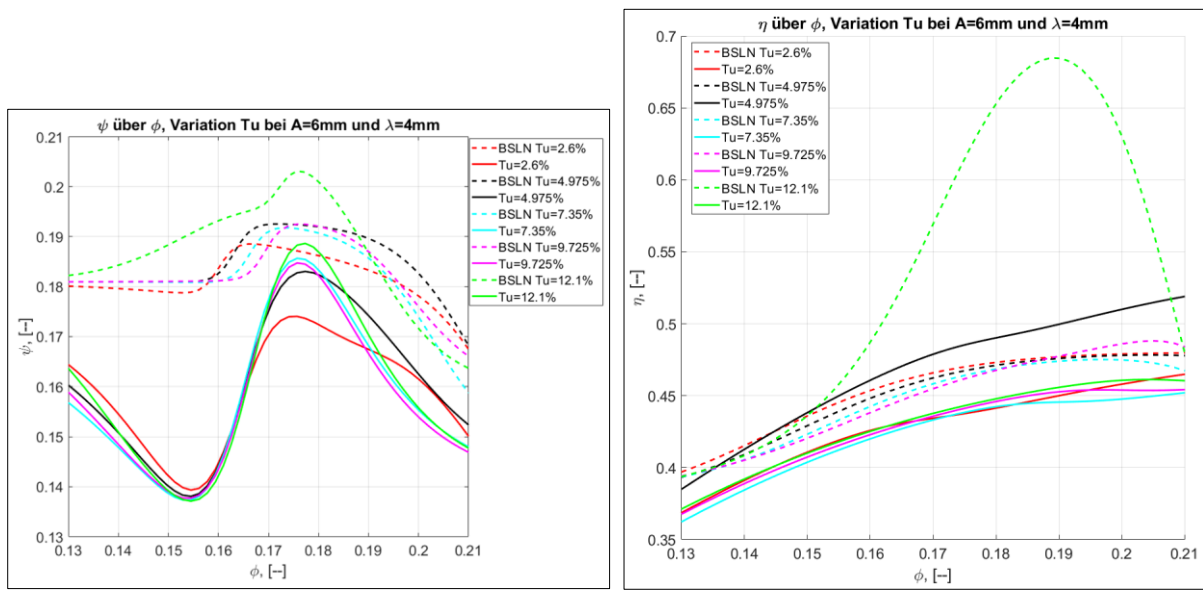


Abbildung 9.3: Druckzahl Ψ (links) und Wirkungsgrad η (rechts) über Lieferzahl ϕ für Variation Turbulenzgrad Tu bei kleiner Amplitude und kleiner Wellenlänge

10.Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Daniel Delgado Hernandez, an Eides statt, die vorliegende Bachelor-
Thesis selbstständig 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 _____