

## Konzeption eines praxisnahen Versuchs- standes zur Untersuchung von Leading Edge Serrations als Proof-of-Concept

Till Biedermann  
und Frank Kameier

Berichte zu HSD-intern  
geförderten Forschungsprojekten  
Nr. 2

ISSN 2625-3690

DOI 10.20385/2625-3690/2018.2

URN urn:nbn:de:hbz:due62-opus-12300



# Konzeption eines praxisnahen Versuchsstandes zur Untersuchung von *Leading Edge Serrations* als *Proof-of-Concept*

Bericht zum HiFF-geförderten Projekt

05/2017 – 03/2018

September 2018

M.Sc. Till Biedermann (Autor), Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier

Institute of Sound and Vibration Engineering ISAVE, Fachbereich Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik, Hochschule Düsseldorf

## Zusammenfassung

Der Einsatz von *Leading Edge Serrations* (gezackte Tragflächenvorderkanten) als Schallminderungsmaßnahme bei hochturbulenter Anströmung wurde bisher maßgeblich in Form von eben im Windkanal gelagerten, modifizierten Tragflügeln untersucht. Diese Untersuchungen dienten der aeroakustischen Designoptimierung und der Identifikation von Wirkmechanismen anhand eines simplifizierten Systems. Das zukünftige Einsatzgebiet dieser neuartigen Modifikation wird im Bereich von Windenergieanlagen, Flugzeugtriebwerken und kontrarotierenden Rotoren der nächsten Generation aber auch bei gängigen Axialverdichtern gesehen. Der Transfer der im ebenen System erhaltenen Erkenntnisse in Richtung einer rotierenden Applikation erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl an zusätzlichen Einflussgrößen, welche die aerodynamische und aeroakustische Effizienz der *Leading Edge Serrations* in Form verstärkender oder auch hemmender Effekte signifikant beeinflussen können. Im durchgeführten Projekt wurde untersucht, inwieweit sich diese durch Buckelwale und Eulen inspirierten Tragflächen auf rotierende Systeme übertragen lassen, ohne Einbußen ihrer bereits bestätigten vorteilhaften aeroakustischen und aerodynamischen Eigenschaften zu erleiden. Von besonderem Interesse waren hier etwaige Einflüsse der mit dem Radius variierenden Umfangsgeschwindigkeit sowie der im Praxisfall stark variierenden Anströmrichtungen und –zustände.

In diesem Sinne wurde ein experimenteller Versuchsstand in Anlehnung an die DIN EN ISO 5136 zur simultanen Vermessungen der aeroakustischen und aerodynamischen Eigenschaften konzipiert. Ein eigens konzipierter Modellrotor in Form eines Axialverdichters ermöglichte einen flexiblen Austausch der Rotorblätter, was die Möglichkeit einer kosten- und zeitsparenden Variation der Rotorblattgeometrien bietet. Im Rahmen des Projektes konnten neben der Konzeption des Versuchsstandes im Rahmen einer experimentellen *Proof-of-Concept* Studie und einer umfangreichen Quantifizierung der Zuströmbedingungen auch das Schallreduktionspotential der untersuchten Applikation im rotierenden System nachgewiesen werden. Eine Variation verschiedener aerodynamischer und geometrischer Einflussgrößen lässt zudem allgemeingültige Aussagen bezüglich der zugrundeliegenden Abhängigkeiten zu. Zudem führten parallele Untersuchungen mittels *Array-Beamforming* mit dem Ziel der Schallquellenlokalisationen zu wertvollen Transfererkenntnissen bezüglich des Einsatzes von *Leading Edge Serrations* im rotierenden System. Eine erste Untersuchung zur möglichen Approximation der Wirkzusammenhänge von Einfluss- und Zielgrößen wies ein hohes Potential zur komplexen Modellbildung mittels neuronaler Netze aus.

Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zu einem tieferen Verständnis der zugrundeliegenden Wirkmechanismen von *Leading Edge Serrations* bei und unterstützten in der Definition weiterer verbleibender Forschungslücken, deren Erforschung im mittel- bis langfristigen

Kontext einen Beitrag zu einer industriellen Verwertung dieser Applikation und somit zu einer Reduktion der Lärmbelastung der Bevölkerung leistet.

## Summary

*Leading Edge Serrations* are well known for their superior performance in reducing aerofoil-gust-interaction noise as well as beneficial aerodynamic properties such as delayed stall effects and an increased post stall performance. However, up to now, *Leading Edge Serrations* were mainly analysed in a rigidly mounted setting in front of free jets or in cascade applications in order to investigate fundamental effects and to study the underlying aerodynamic and aeroacoustic principles. Eventually, these serrations are intended to be used in rotating systems such as turbomachines, counter rotating rotors or fans and blowers. Even wind energy turbines represent a possible field of application. The transfer of the rigidly well-analysed serration effects to the rotating frame, though, poses one of the main obstacles for successfully implementing *Leading Edge Serrations* as a passive noise reduction application as several additional parameters and varying boundary conditions might affect the aerodynamic and aeroacoustic efficiency of the serrations.

The current project investigates on how these serrations, inspired by owls and humpback whales, can be transferred to the rotating system by avoiding losses in aeroacoustic and aerodynamic performance and taking into account the already acquired knowledge on the underlying effects. Of particular interest are effects of the circumferential velocity, which scales linearly with the rotor radius as well as effects of varying points of operation, leading to changes in the stagger angles or altering inflow conditions, respectively.

For the experimental study a test rig according to the ISO 5136 standard was realised, allowing a simultaneous measurement of both, aerodynamic and aeroacoustic properties. The rotor was self-designed according to the single aerofoil approach, featuring exchangeable fan blades to enable a time- and cost efficient variation of the serration parameters. Apart from realising the test rig and a detailed quantification of the inflow conditions, a *Proof-of-Concept* study was performed in order to confirm the aeroacoustic effect of *Leading Edge Serrations* in a rotating application and to carve out the noise reduction potential. Moreover, a variation of the geometric serration parameters as well as the aerodynamic inflow conditions already allows for drawing basic conclusions on the underlying scaling-laws and dependencies. A supplementary aeroacoustic study via array beamforming in the rigid frame provided information on the positions of main noise sources of aerofoils with and without serrations, which were of high value and facilitated a successful transfer to the rotating frame. Finally, by use of artificial neural networks, first steps were undertaken towards modelling the effect of the investigated parameters on the aerodynamic and aeroacoustic performance. A first developed

fundamental model already allows for a prediction of the noise radiation and offers multi-objective-optimisation by means of aerodynamic and aeroacoustic properties.

In summary, the finding and conclusion made contribute to a deepened understanding of the underlying noise reduction mechanisms of *Leading Edge Serrations* as well as help to highlight remaining academic voids. In the long-term, the research presented in this context is expected to reinforce the industrial pull, eventually leading to an establishment of *Leading Edge Serrations* as a standard for reducing aerofoil-gust-interaction noise and hence reducing the noise pollution of urban and rural areas.

1	Einleitung .....	6
2	Stand der Forschung.....	7
3	Projektziele .....	8
4	Durchführung und Ergebnisse.....	9
4.1	Konzipierung eines Versuchsstandes nach DIN EN ISO 5136.....	9
4.2	Quantifizierung von Zuströmbedingungen.....	11
4.3	Parameterstudie im rotierenden System.....	13
4.4	Schallquellenlokalisierung .....	15
4.5	Modellbildung .....	16
5	Entstandene Publikationen .....	18
6	Internationalisierung .....	19
7	Fazit .....	20
8	Ausblick .....	21
	Literaturverzeichnis .....	22
	Abkürzungsverzeichnis.....	24

# 1 Einleitung

Die intensiven Forschungstätigkeiten am ISAVE im Bereich der Strömungsakustik sollen durch den neuen Themenkomplex *Leading Edge Serrations* geeignet ergänzt werden, entsprechend ist dazu auch ein Promotionsvorhaben geplant. Es handelt sich um eine neue, innovative Technik, welche im jetzigen Status noch keinen ausreichenden Reiz auf die Industrie ausübt und noch nicht als Lärmreduktionsstandard anerkannt ist. Prinzipiell gibt es jedoch ein hohes Interesse im Bereich der Luft- und Raumfahrt, der Windenergieanlagenindustrie als auch der Ventilatorenindustrie, was in ersten Interessensbekundungen von Industriepartnern des ISAVE resultierte. Dies soll zukünftig zu einer umfangreichen Zusammenarbeit und zum Stellen eines Projektantrages führen. Hierzu sind jedoch entsprechende Vorarbeiten zu leisten, um grundlegende Problemstellungen präzise definieren zu können und ein erstes *Proof-of-Concept* vorzulegen. Durch den Beleg des praktischen Nutzens können somit Mittel zur tiefergehenden Analyse eingeworben werden. Ziel des Projektes ist die Konzeption eines Versuchsstandes zur experimentellen Untersuchung und Validierung dieser neuen Technologie in rotierenden Systemen, da der Transfer vom im ebenen System gewonnenen Erkenntnissen bezüglich der aerodynamischen und aeroakustischen Performance nur unter Berücksichtigung einer Vielzahl zusätzlicher Einflussgrößen möglich ist (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zu berücksichtigende Transferparameter vom ebenen in ein rotierendes System.

Eben	Transfer	Rotierend
Axiale Anströmgeschwindigkeit	→	Umfangsgeschwindigkeit =f(Radius)
Auftriebs-/ Widerstandsbeiwerte		statische Druckerhöhung/ Volumenstrom der Strömungsmaschine
Anstellwinkel der Tragflügel		Zuströmbedingungen in Abhängigkeit des Drosselzustandes sowie des Auslegungspunktes ( <i>Stall</i> -Bereich)
Informationen über die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Schallreduktionspotentials		Effektive Modellierung des Blattspitzenbereichs hinsichtlich <i>Serration</i> -Amplituden und -Wellenlängen
Spektrale Energiedichteverteilung der generierten Wirbelstrukturen		Rückschlüsse auf maßgebliches Frequenzband zur Schallreduktion
Über den Spann konstante Geometrie der Tragflächen		Schaufelsichelung, -anstellung und -verdrehung (aerodynamischer/ aeroakustischer Einfluss?)
Freie Anströmung der Tragflügel		Einfluss Rotor/Stator-Interaktion, Wechselwirkungen der einzelnen rotierenden Schaufeln

Durch die austauschbaren Rotoren des Versuchsstandes können Tragflügel unterschiedlicher Art untersucht und analysiert sowie neue Erkenntnisse im Bereich des Transfers von ebenen in rotierende Systeme gewonnen werden. Das ISAVE wird im Designprozess sowie bei der Definition der Randbedingungen durch die *Brunel University London* unterstützt, welche bereits seit ca. 5 Jahren an dieser Technologie forscht. Der gute Kontakt zur *Brunel University* trägt somit zur Internationalisierung der HSD bei, welche auch über das Projektende hinaus

zum Tragen kommt. Der entwickelte Versuchsstand stellt neben seinem primären Zweck auch ein interessantes Objekt zur Einbindung in die Lehre dar. Gerade in der Master-Lehrveranstaltung *Luftreinhaltung und Lärmschutz* sowie im Wahlpflichtfach *Low Noise Design* kann hier weitergeforscht werden. Darüber hinaus könnten grundlegende Schallreduktionsmechanismen praxisnah und auf einem hohen zeitgemäßen Niveau vermittelt werden.

## 2 Stand der Forschung

Durch das von der europäischen Kommission festgesetzte Ziel, Fluglärm bis 2020 um 10dB zu reduzieren (Europ. Commission 2015), ist das Interesse an effektiven Reduktionsmechanismen in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Gerade das durch die EU finanzierte Großprojekt FLOCON (2007 – 2013) (Europ. Commission 2015), welches durch ein starkes internationales Konsortium aus u.a. dem DLR, Snecma, Rolly-Royce, ONERA und der University of Southampton bearbeitet wurde, und sich der Reduktion von breitbandigem Schall von Flugzeugtriebwerken widmete, sind *Leading Edge Serrations* erneut in den Fokus gerückt. Von allen in diesem Projekt untersuchten Applikationen wurden *Leading Edge Serrations* als besonders effektiv hervorgehoben. Dementsprechend ist das aktuelle Interesse an *Leading Edge Serrations* groß und durchgehend Thema auf nationalen und internationalen strömungsakustischen Konferenzen der letzten Jahre.

In den letzten fünf Jahren wurden fundierte Grundlagenstudien numerischer und experimenteller Natur zur aeroakustischen und aerodynamischen Analyse von *Leading Edge Serrations* sowie zur Identifizierung der Geräuschenstehung- und Reduktionsmechanismen durchgeführt. Stellvertretend sind hier Roger et al. (2013), Chong et al. (2015), Narayanan et al. (2014), Lau et al. (2013), Polacsek et al. (2011), Clair et al. (2013) und (Chaitanya et al. 2015) zu nennen. Diese beschränkten sich jedoch ausschließlich auf Untersuchungen eben gelagerter Tragflügel im Windkanal oder auf Kaskadenanordnungen von Tragflügelprofilen. Der Schritt hin zu rotierenden Systemen wurde bisher nicht gemacht und könnte der HSD folglich einen Wissensvorsprung und ein gesteigertes Interesse anderer Forscher einbringen. Im Hinblick auf rotierende Systeme mit *Serrations* zur Reduktion breitbandigen Schalls in turbulenter Anströmung existieren bislang keine bekannten Studien. Finez (2012) untersuchte eine Tragflügelkaskade im Freistrahle eines Windkanals, um den Einfluss von Schallreflexionen mehrerer Tragflächen untereinander sowie Einflüsse der Resonanz und Schallausbreitung zu bestimmen. Hierbei wurden Hinterkantenzacken als Mittel der Schallreduktion analysiert. Sabah (2001) untersuchte die Emission von Vorderkantenschall in einer linearen Kaskadenanordnung, jedoch ohne deren Modifikation. Hersh et al. (1974) führten eine erste Studie zum Effekt von *Serrations* auf die Schallreduktion rotierender Propeller durch. Die durch

Wirbelablösungen induzierten Schallemissionen (Self-Noise) konnten durch diese Applikation deutlich reduziert werden.

Das von der kanadischen *Whale Power Corporation* eingetragene Markenzeichen *Tubercle Technology™* stützt sich auf ein in 2008 eingereichtes Patent, welches das grundlegende Wirkprinzip von Vorderkantenmanipulationen zur strömungstechnischen und strömungsakustischen Optimierung von Turbinen und Kompressoren umfasst (Dewar et al. 2008). Daran angelehnt setzt das kanadische Unternehmen *Envira-North Systems Ltd* die *TubercleTechnology™* als Applikation an großskaligen Deckenventilatoren ein und beschreibt eine erhebliche aerodynamische als auch eine akustische Verbesserung der Performance im Vergleich zu herkömmlichen Geräten (Wood 2016). Auch die *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) hat die durch Buckelwale inspirierte Vorderkantenmanipulation von Tragflügeln als Methode der Verringerung von Widerstandskräften bei Windenergieanlagen im Blick. Hier stehen aeroakustische Vorteile jedoch bisher nicht im Fokus (Locke 2016). Bisherige Patente und Anwendungen weisen kein tiefes Verständnis der Wirkmechanismen bzw. des optimalen Profildesigns auf, sondern beziehen sich maßgeblich auf die Generierung einer Marktfähigkeit dieser Applikation.

### 3 Projektziele

Primäres Ziel des Forschungsprojektes ist der Transfer von *Leading Edge Serrations* in ein rotierendes System. Hierzu werden im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen gewonnene Erkenntnisse aufbereitet und unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen auf ein rotierendes System skaliert bzw. übertragen. Besonderer Fokus liegt auf einem *Proof-of-Concept*, welches als nötig erachtet wird, um industrielle Partner für über das Projektziel hinausgehende Kooperationen zu gewinnen. Weiter ist geplant, auf Basis der in diesem Projekt und in vorangegangenen Grundlagenstudien gewonnenen Erkenntnisse einen Wettbewerbsvorteil zur Stellung eines umfangreichen Projektantrages zu generieren. Dies wird insbesondere angestrebt, da mit dem Projektthema ebenfalls eine Promotionsabsicht einhergeht.

Zusammengefasst kann die Forschungsfrage bzw. können die Ziele wie folgt definiert werden:

Wie lassen sich die anhand eines eben gelagerten Systems gewonnenen Erkenntnisse zur Reduktion von Breitbandschall durch <i>Leading Edge Serrations</i> auf ein rotierendes System übertragen?
--

- Untersuchung des Einflusses von rotationsspezifischen Randbedingungen,
- Analyse des Einflusses von Wechselwirkungen zwischen multiplen rotierenden Körpern,
- experimentelle Validierung des Lärminderungspotentials bei axialen Strömungsmaschinen.

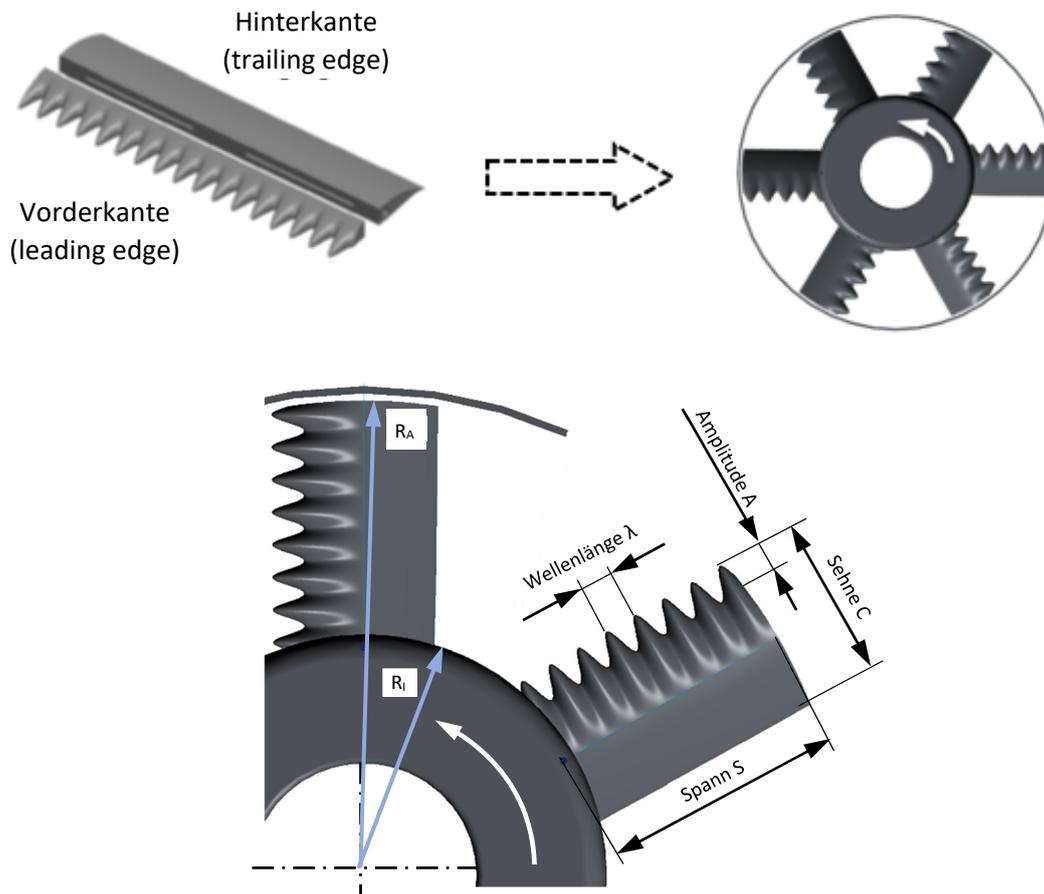


Abbildung 1: Oben: Transfer der Leading Edge Serrations vom eben gelagerten Tragflügel in eine rotierende Applikation. Unten: Parametrisierung der Serrations sowie des Rotors. Adaptiert aus (Biedermann et al. 2018c; Biedermann et al. 2018a).

## 4 Durchführung und Ergebnisse

Im Rahmen der hochschulinternen Forschungsförderung wurden während des Förderzeitraumes parallel mehrere Forschungsziele verfolgt, welche sich jedoch in das Gesamtziel einbetten.

### 4.1 Konzipierung eines Versuchsstandes nach DIN EN ISO 5136

Zunächst wurde ein konzeptionelles Design eines Rohrprüfstandes gemäß DIN EN ISO 5136 erarbeitet. Im Anschluss folgte ein Rotordesign gemäß des Tragflügelverfahrens sowie die Erstellung eines 3D-CAD Modelles. Unter Zusammenarbeit mit Austauschstudenten aus Frankreich wurde ein erstes Set an Tragflügeln (Abb. 2 links/ mitte) mit und ohne sinusförmigen

Vorderkanten (*Leading Edge Serrations*) definiert und außer Haus mittels Rapid Prototyping aus Alumide, einem Amalgam aus Polyamid und Aluminiumpulver, gefertigt. Dieser Werkstoff verspricht eine bessere Zerspanbarkeit als alternative Materialien sowie gute Festigkeitseigenschaften. Zudem konnte eine erste numerische Validierung des Rotors durchgeführt werden, indem der zuvor definierte Rotor mittels eines numerischen CFD-Lösers (Computational Fluid Dynamics) aerodynamisch im Designpunkt simuliert wurde. Abbildung 2 (rechts) zeigt exemplarisch eine Schaufelpassage des simulierten Rotors mit Wirbeln hoher Energiedichte im Blattspitzenbereich, welche mit der Blattvorderkante (und somit den *Leading Edge Serrations*) interagieren. Eingefärbt wurden die Wirbel mit der lokalen Strömungsgeschwindigkeit im Blattspitzenbereich. Bei einer anschließenden aeroakustischen Vermessung im definierten Versuchsstand konnte eine signifikante Schallreduktion nachgewiesen werden (Biedermann et al. 2018c). Ergebnis ist jedoch auch die Identifikation einer Reihe von Limitierungen sowie ein weiteres Verbesserungspotential des Versuchsstandes.



Abbildung 2: Prototypen des definierten Rotors ohne (links) und mit (mitte) *Leading Edge Serrations*, gefertigt aus Alumide. Rechts: Exemplarische Abbildung der numerischen Validierung mit Hilfe des Q-Kriteriums, koloriert über die Strömungsgeschwindigkeit. Entnommen aus (Biedermann et al. 2018c).

Aus diesem Grund folgt ein iterativer Prozess zur Verbesserung des experimentellen Aufbaus, welcher unter anderem in der Implementierung eines 8-pfadigen Ultraschall Messsystems zur akkuraten Aufnahme des Volumenstromes sowie der Verwendung einer elastischen Lagerung des Rotorantriebs zur Vermeidung von Körperschallemissionen resultiert. Zur Verfeinerung der akustischen Messaufnahme wurde in einer studentischen Projektarbeit ein Konzept zur Verwendung zweier Mikrofonarrays für die saug- und druckseitige aeroakustische Überwachung der Schallabstrahlung erarbeitet, gefertigt und getestet. Da eine alternative Messmethodik als in der DIN EN ISO 5136 beschrieben verwendet wurde, wurden Unterschiede der Messmethodik sowie Verbesserungsansätze umfangreich in einer anschließenden Master-Abschlussarbeit erarbeitet.

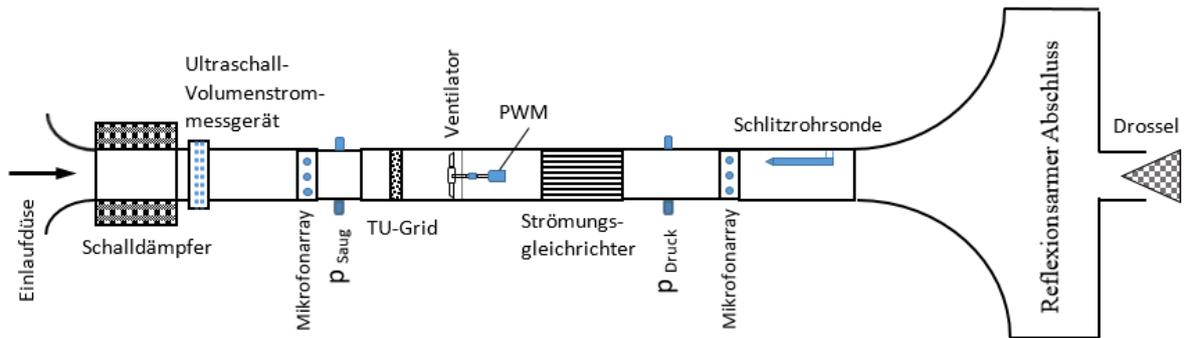


Abbildung 3: Versuchsstand in Anlehnung an DIN EN ISO 5136 zur simultanen aerodynamischen und aeroakustischen Vermessung von Axialventilatoren. ©ISAVE

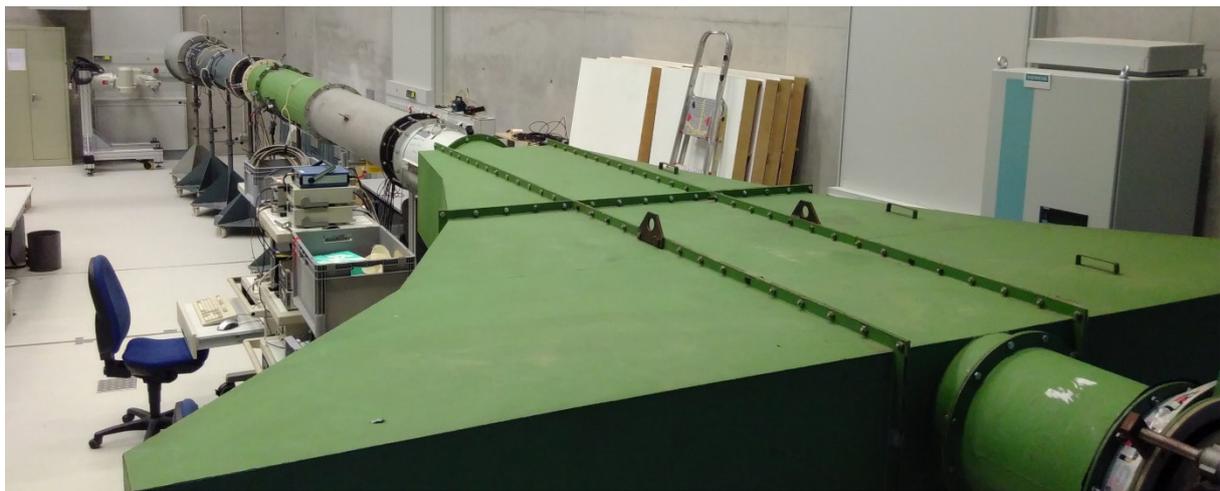


Abbildung 4: Adaptierter Rohrprüfstand des ISAVE in Anlehnung an DIN ISO 5136. ©ISAVE

Der finalen Definition des Versuchstandes folgend wurden aus Effizienz- und Kostengründen nach In-Haus Kooperationspartnern zur Fertigung der zu testenden Tragflügelprofile gesucht. In Person von Professor Nachtrodt (Anlagen- und Visualisierungstechnik) sowie Herrn Stefan Jahr vom HSD Institut FMDauto wurden Experten im Bereich des Rapid Prototyping gefunden, welche die Fertigung der Rotornaben sowie der einzelnen Rotorscheufeln übernahmen. Von Letzteren wurden im Laufe des Projektes über 100 Stück von hoher Qualität und insbesondere hoher Oberflächengüte gefertigt.

## 4.2 Quantifizierung von Zuströmbedingungen

Parallel zur Optimierung des Versuchstandes wurden im Rahmen einer umfangreichen studentischen Projektarbeit experimentelle Analysen zur Quantifizierung turbulenter Zuströmbedingungen verschiedener durchströmter Turbulenzgeneratoren mittels eindimensionaler Hitzdrahtmesstechnik (*Constant Temperature Anemometry*) durchgeführt. Die Erfassung aerodynamischer Daten mittels Hitzdrähten stellt eine zeitlich hochaufgelöste Messmethodik dar, welche, durch entsprechendes signalanalytisches *Post-Processing*, auch Aussagen über die spektrale Zusammensetzung der erfassten Signale erlaubt. Gemessen wird die notwendige Regelspannung um einen erhitzten Draht in einer Strömung auf

konstanter Temperatur (hier: 320°C) zu halten. Die gemessene Spannung ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Hier wurde insbesondere die räumliche Verteilung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit (Abb. 5, links) sowie des Turbulenzgrades (Abb. 5, rechts) betrachtet. Zudem trugen spektrale Analysen zu Aussagen über den Grad der Isotropie der erzeugten Turbulenz bei, wie in Abb. 6 ersichtlich. Hier wurden die lokal ermittelten Spektren der Energiedichte mit dem Modell einer ideal isotropen longitudinalen Turbulenz abgeglichen (vgl. Biedermann et al. 2018c). So konnten fünf verschiedene Turbulenzgitter unter Zuhilfenahme eines Drehkanals detailliert untersucht und die Zuströmbedingungen eindeutig quantifiziert werden (Biedermann et al. 2018c; Biedermann et al. 2018a). Die ermittelte hohe isotrope Güte der Turbulenz erlaubt somit auch im rotierenden System Aussagen über die auf die *Leading Edge Serrations* auftreffende turbulente Energie.

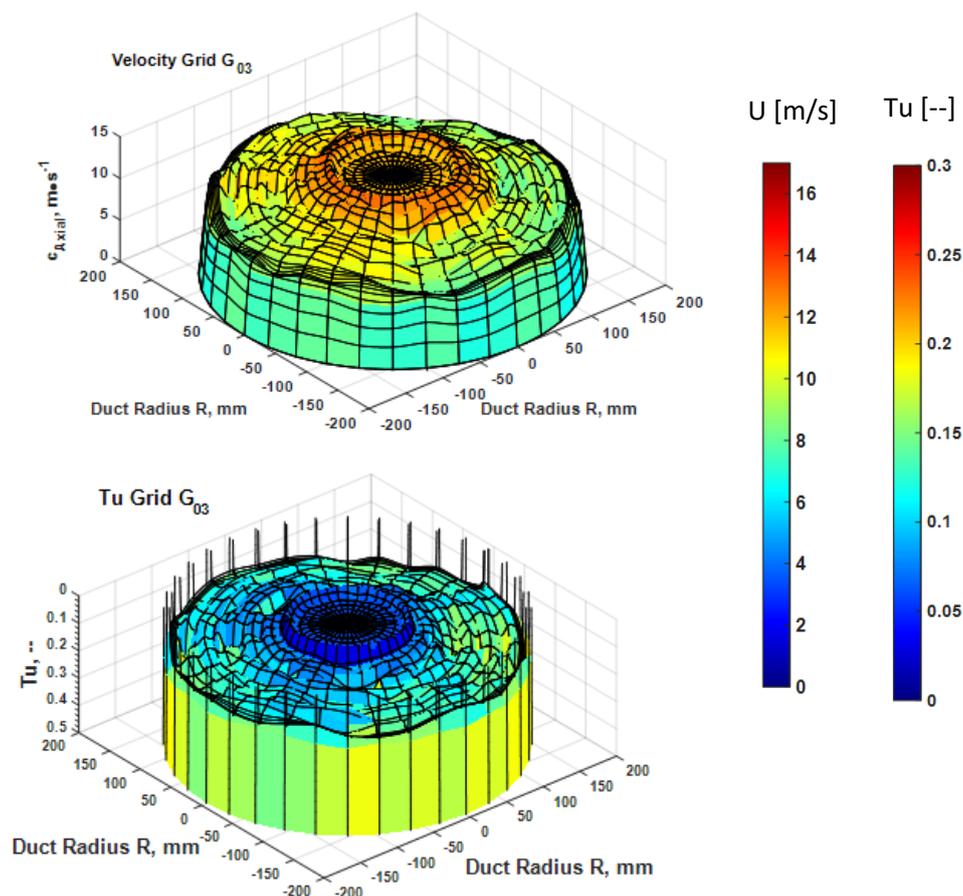


Abbildung 5: Exemplarisches Profil der Strömungsgeschwindigkeit  $U$  (oben) sowie des Turbulenzgrades  $Tu$  (unten) unter Verwendung eines Turbulenzgitters stromauf. Messung in Hauptströmungsrichtung innerhalb des Rohrprüfstandes an der imaginären Position des zu untersuchenden Axialventilators. Entnommen aus (Biedermann et al. 2018a).

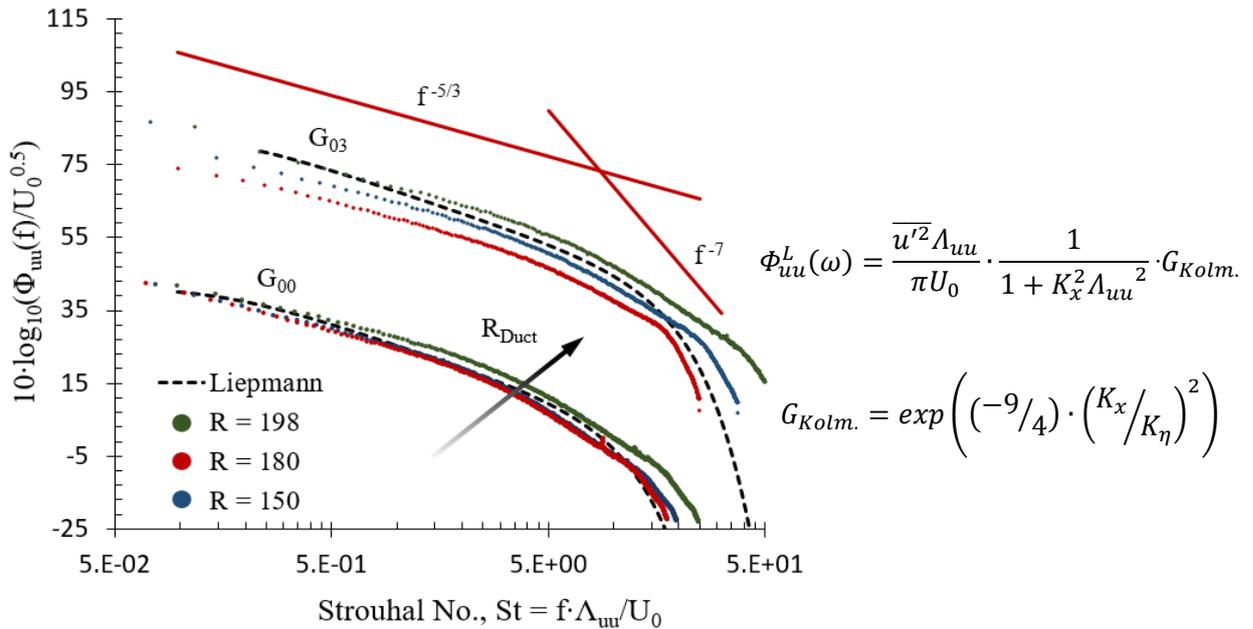


Abbildung 6: Energiedichte vs. dimensionslose Frequenz (Strouhal-Zahl). Energiedichtespektrum der Geschwindigkeitsfluktuationen an verschiedenen radialen Positionen in der Rohrstrecke sowie Vergleich zum Modell longitudinaler isotroper Turbulenz nach Liepmann (gestrichelt). Entnommen aus (Biedermann et al. 2018c; Biedermann et al. 2018a)

### 4.3 Parameterstudie im rotierenden System

Nach umfangreicher Optimierung des Versuchssetups in einem mehrzyklischen iterativen Prozess wurde sich der eingehenden Untersuchung des aeroakustischen und aerodynamischen Einflusses von *Leading Edge Serrations* gewidmet. Zur weiteren systematischen Analyse des Effektes von *Leading Edge Serrations* auf die Schallabstrahlung wurden sechs Einflussgrößen (Tabelle 2) definiert, welche im Rahmen einer Parametervariation variiert wurden. Der Einfluss dieser Parameter wurde in Form der in Tabelle 3 definierten Zielgrößen beschrieben und analysiert. Im Rahmen einer Master-Abschlussarbeit wurden hier 16 Sets an Rotorblättern entworfen, gefertigt und experimentell vermessen (Hintzen et al. 2018).

Tabelle 2: Variierte Einflussgrößen.

Größe	Symbol	Einheit
Turbulenzgrad	Tu	[Pa]
Volumenstrom	$\dot{Q}$	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Serration-Amplitude	A	[--]
Serration-Wellenlänge	$\lambda$	[dB]
Sichelung der Rotorblätter	$\Delta\Phi/\Delta R$	[°/mm]
Verdrehung der Rotorblätter	$\Delta\Phi/\Delta x$	[°/mm]

Tabelle 3: Definierte Zielgrößen zur Analyse des Einflusses verschiedener Einflussgrößen.

Größe	Symbol	Einheit
Statische Druckerhöhung	$\Delta p$	[Pa]
Volumenstrom	$\dot{Q}$	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Systemwirkungsgrad	$\eta$	[--]
Saugseitiger Schalldruck	OASPL <sub>Saug</sub>	[dB]
Druckseitiger Schalldruck	OASPL <sub>Druck</sub>	[dB]
Wanddruckschwankungen	$p'$	[Pa]

Ergebnis dieser Untersuchung waren umfangreiche Erkenntnisse über die Skalierung der Schallreduktion mit den geometrischen Parametern der *Serrations* sowie mit den jeweiligen Zuströmbedingungen. Die Abhängigkeit der resultierenden Reduktion des Gesamt-Schalldruckpegels von *Serration* Amplitude  $A$  und *Serration* Wellenlänge  $\lambda$  unter hochturbulenten Zuströmbedingungen ist in Abb. 7 exemplarisch für drei Betriebspunkte gezeigt. Insgesamt konnten signifikante Schallpegelreduktionen von bis zu 12 dB (In Abb. 7 max. 7.14 dB) erzielt werden, was einer Viertelung des emittierten Schalldruckes entspricht (Reduktion des Schalldruckes um 75%). Hier ist jedoch zu betonen, dass im Rahmen der durchgeführten Studie ein Zusammenspiel aerodynamischer und aeroakustischer Phänomene beobachtet werden konnte. Maximale Schallreduktionen werden primär durch einen verzögerten Eintritt des Rotors in den Instabilitätsbereich erzielt, da die *Leading Edge Serrations* als Wirbelgeneratoren fungieren, welche die Grenzschicht energetisieren und somit zu einer verspäteten Strömungsablösung führen. Fernab dieses Grenzbereiches hingegen überwiegen Dekorrelationseffekte aeroakustischer Natur, welche zu negativen Interferenzeffekten der Schallabstrahlung führen und somit die Schallemissionen signifikant, wenn auch mit geringerer Intensität, reduzieren. Insgesamt wurden *Leading Edge Serrations* mit maximalen Amplituden und maximalen Wellenlängen als besonders vorteilhaft im rotierenden System identifiziert. Anhand des zuvor intensiv untersuchten Effektes der *Serrations* im ebenen System hingegen wurde selbige Amplitudenabhängigkeit, jedoch eine entgegengesetzte Abhängigkeit von der Wellenlänge als am vorteilhaftesten identifiziert, weshalb die ermittelte Abhängigkeit überrascht. Unter Betrachtung der zugrunde liegenden aerodynamischen Abhängigkeiten im ebenen System (Biedermann et al. 2017) wird jedoch deutlich, dass maximale Wellenlängen zu einer erhöhten Verzögerung der Strömungsablösung (*Stall-Delay*) beitragen und somit, im direkten Vergleich zur geraden Vorderkante eine deutlich Schallreduktion in der Nähe des Auslegungspunktes bewirken. Begründet wird dies durch den Umstand, dass der Referenzrotor ohne *Serrations* bereits in den Instabilitätsbereich eintritt, die Variante mit *Leading Edge Serrations* jedoch bei gleichem Betriebszustand im stabilen Operationsgebiet verbleibt und somit deutlich geringere Schallemissionen aufweist. Diese Charakteristik (optimal bei maximalen Wellenlängen) dominiert im Hinblick auf die Signifikanz der geometrischen *Serration* Parameter gegenüber dem Effekt verbesserter Dekorrelationseffekte (minimale Wellenlänge).

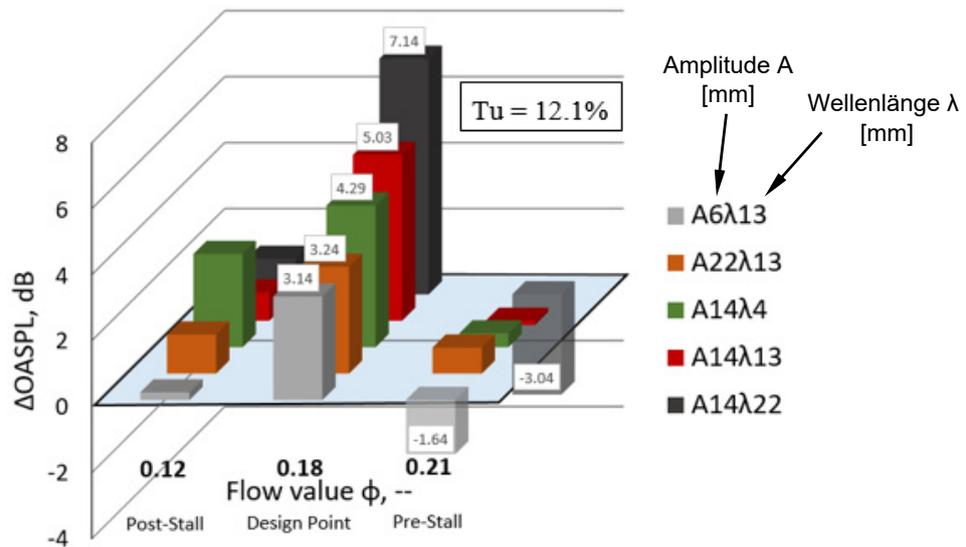


Abbildung 7: Reduktion des Summenpegels in Abhängigkeit der Serration-Parameter Amplitude A und Wellenlänge  $\lambda$  unter Verwendung von Turbulenzgitter  $G_{01}$  an drei repräsentativen Betriebspunkten im Kennfeld (Biedermann et al. 2018a).

#### 4.4 Schallquellenlokalisierung

Bisher beruhten alle Erkenntnisse bezüglich des Schallreduktionspotentials von *Serrations* auf Studien im ebenen System, welche durchweg durch Fremdschallquellen wie bspw. Geräusche des Windkanals, Tragflügel-Hinterkantenschall oder Schallemissionen von Freistrahlen belastet waren.

Im Kontext der in diesem Projekt durchgeführten Parameterstudie kristallisierte sich mehr und mehr der Wert über Aussagen bezüglich der isolierten Schallreduktionskapazität der einzelnen bereits im ebenen untersuchten *Serration*-Designs heraus, da diese Erkenntnisse unverfälscht in das rotierende System transferiert werden könnten. Aus diesem Grund wurde in Kooperation mit der *Technischen Universität Cottbus-Senftenberg* eine kooperative Messkampagne durchgeführt, um mit vorausgegangenen Studien identisch parametrisierte *Serration*-Designs mittels *Array-Beamforming* (aeroakustische Kamera) zu untersuchen und so die reine, isolierte Schallemission in unmittelbarer Nähe der Tragflügel-Vorderkanten zu analysieren (Biedermann et al. 2018b). Exemplarische Ergebnisse können Abb. 8 entnommen werden, welche dreidimensionale Schallkarten (Soundmaps) vor einer Windkanaldüse mit montiertem Tragflügel zeigt. Unter niedrigturbulenter Zuströmung (Abb. 8, links) sind primäre Schallquellen an der Tragflügel Hinterkante zu verorten, während unter hochturbulenter Zuströmung eine Verschiebung zur Vorderkante stattfindet (Abb. 8, rechts). Die Implementierung von *Leading Edge Serrations* (Abb.1, unten) zeigt eine äußerst signifikante Reduktion des emittierten Schalls. Weitere spektrale Analysen dieser gewonnenen Messdaten zeigen unter anderem eine klare Abhängigkeit des Schallreduktionsvermögens vom Anstellwinkel, welches unter negativen Zuströmwinkeln deutlich eingeschränkt wird. Diese

Erkenntnis ist für den Transfer in das rotierende System unmittelbar von Bedeutung, da der Zuströmwinkel einer axialen Strömungsmaschine unter Überlast bspw. ebenjene Anströmung unter negativen Winkeln aufweist.

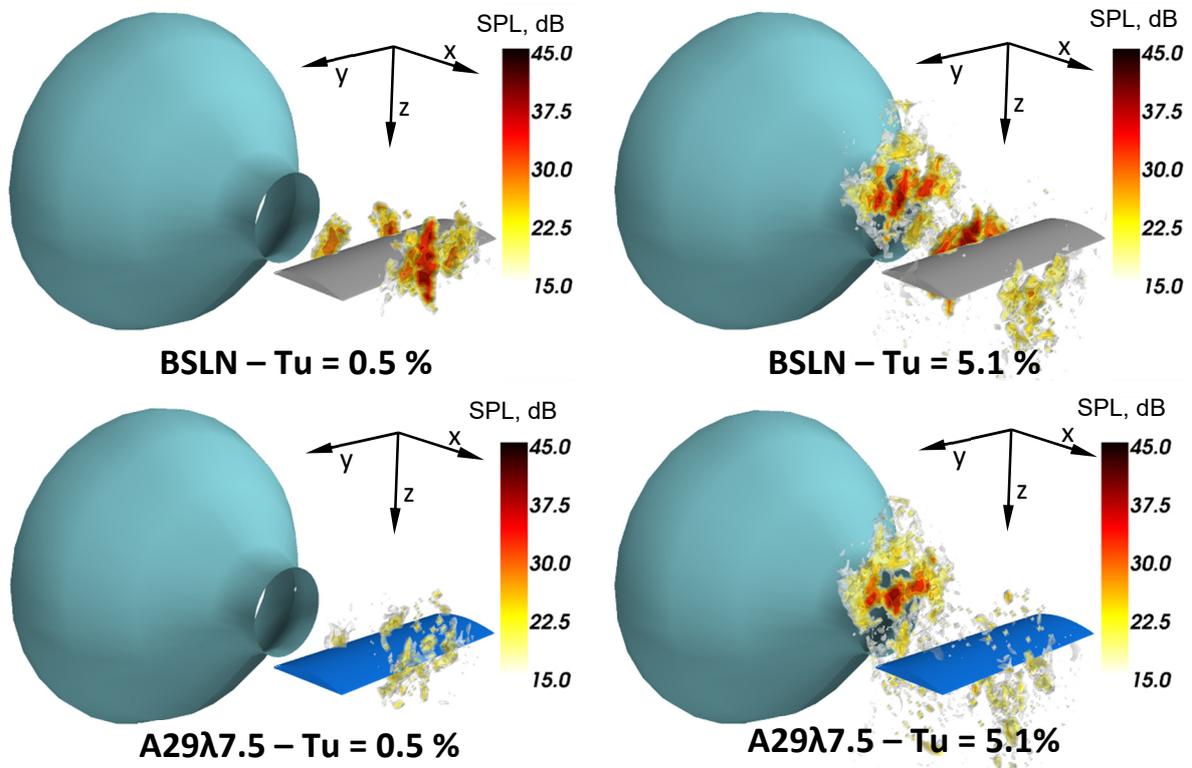


Abbildung 8: 3D-Soundmaps der Schallabstrahlung bei niedrigturbulenter Zuströmung (links) und hochturbulenten Zuströmbedingungen unter Verwendung von Turbulenzgittern (rechts). Vergleich gerader Vorderkanten (oben) mit Leading Edge Serrations (unten). Entnommen aus (Biedermann et al. 2018b).

#### 4.5 Modellbildung

Zur Weiteren Analyse der Abhängigkeiten der definierten Zielgrößen (Schalldruck, statische Druckerhöhung, Wirkungsgrad, vgl. Tabelle 3) von den Einflussgrößen (Zuströmbedingungen, Serration-Amplituden und -Wellenlängen, Tabelle 2) wurde der Blick über den Tellerrand gewagt und sich parallel zu den Primäruntersuchungen mit der modellhaften Abbildung der Wirkzusammenhänge beschäftigt, da der Möglichkeit einer Prognose von Schallreduktionsvermögen und aerodynamischer Performance unter Einbeziehung einer Vielzahl an Einflussgrößen ein hoher Wert beigemessen wird. Hierbei handelt es sich um eine komplexe Problematik, da sowohl aerodynamische Zusammenhänge, welche oftmals eher linearen bis kubischen Abhängigkeiten folgen, als auch aeroakustische Zusammenhänge, mit einer zumeist deutlich höheren Funktionsordnung, beschrieben werden sollen. Genau hier setzt eine weitere durchgeführte Abschlussarbeit an, bei welcher experimentell die Möglichkeit der Abbildung aller definierter Zielgrößen mittels der etablierten *Design of Experiments* (DoE) Methodik untersucht wurde. Der *Design of Experiments* Ansatz verfolgt das Ziel, mit überschaubarem Versuchsaufwand unter Zuhilfenahme statistischer Abhängigkeiten ein

Maximum an Informationen über einen untersuchten Versuchsraum zu erhalten. Der n-dimensionale Versuchsraum wird durch die Limits der zu untersuchenden Einflussparameter aufgespannt. Limitiert wird diese Methodik jedoch durch die Bedingung, dass alle Zielgrößen durch Funktionen maximal zweiter Ordnung (quadratische Abhängigkeit) approximierbar sein müssen. Da diese Bedingung oftmals nicht (insbesondere nicht bei aeroakustischen Zielgrößen) eingehalten werden kann, wurden zusätzlich auch deutlich umfangreichere Approximationsmodelle entwickelt, welche auf Basis von neuronalen Netzen einen gleichverteilten *Latin-Hypercube* Versuchsplan abbilden und schlussendlich die gestellte Bedingung einer gemeinsamen Approximation von aerodynamischen und aeroakustischen Datensätzen mit hoher Qualität erfüllen. Das Latin Hypercube Sampling entstammt ursprünglich dem Umfeld der *Computer Aided Experiments* (CAE) und beschreibt das *Sampling* eines definierten Versuchsraumes unter Verwendung individueller Einstellstufen für jeden einzelnen Versuchspunkt. Dies ist statistisch von großem Vorteil, in Realexperimenten jedoch oftmals schwer umsetzbar, da es einen hohen Aufwand bzgl. des Prototypenbaus, etc. bedeutet. Die erfolgreiche Umsetzung in einem überschaubaren Zeitrahmen war durch die Kooperation mit dem hausinternen ZIES-Institut (Prof. Adam, Herr Marius Reich) möglich, welches bereits über umfangreiche Kompetenzen in der Definition und dem Training neuronaler Strukturen verfügt. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Studie konnten auf der NOVEM 2018 (Noise and Vibration Emerging Methods) in Spanien vor Fachpublikum präsentiert werden und stießen auf großes Interesse seitens anderer Forschungseinrichtungen (Balde et al. 2018; Biedermann et al. 2018d).

Zum derzeitigen Stand konnten eine Vielzahl der im ebenen System gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen des unter dieser Förderung durchgeführten Projektes genutzt und eingebettet werden, um einen Transfer in ein rotierendes System zur Anwendung an Niederdruck-Axialventilatoren zu gewährleisten. Der aeroakustische Nutzen dieser Applikation konnte im Konzept eindeutig nachgewiesen werden, auch existieren bereits verschiedene Erkenntnisse bezüglich der Abhängigkeit einer Schallreduktion von verschiedenen Einflussgrößen. Aerodynamisch werden die *Serrations* als nicht nachteilhaft bewertet und weisen, im Vergleich zu nicht-modifizierten Rotoren, einen ähnlichen Wirkungsgradverlauf auf, zeigen jedoch, bedingt durch den Wirkflächenverlust, auch eine verminderte Kapazität der statischen Druckerhöhung.

## 5 Entstandene Publikationen

Balde, N.; Biedermann, T.; Kameier, F.; Paschereit, C.O.: Aerodynamische und aeroakustische Vermessung eines Axialventilators unter Verwendung statistischer Methoden. DAGA 2018 München.

Hintzen, N.; Biedermann, T.; Kameier, F.; Paschereit, C.O.: Aeroakustische und aerodynamische Analyse eines Niederdruck Axialventilators mit Leading Edge Serrations. DAGA 2018 München.

Biedermann, T.M.; Chong, T.P.; Kameier, F.; Paschereit, C.O.: On the Transfer of Leading Edge Serrations from Isolated Aerofoil to Ducted Low-Pressure Fan Application. *24th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2018-2956.

Biedermann, T.M.; Czeckay, P.; Geyer, T.; Kameier, F.; Paschereit, C.O.: Noise Source Identification of Aerofoils Subjected to Leading Edge Serrations using Phased Array Beamforming. *24th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2018-3794.

Biedermann, T.; Kameier, F.; Paschereit, C.O.: Optimised Test Rig for Measurement of Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of Leading Edge Serrations in Low-Speed Fan Application. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018*.

Biedermann, T.M.; Reich, M.; Kameier, F.; Adam, M.; Paschereit, C.O.: Assessment of Statistical Sampling Methods and Approximation Models Applied to Aeroacoustic and Vibroacoustic Problems. *NOVEM Noise and Vibration Emerging Methods*.

### Zur Begutachtung eingereicht:

Biedermann, T.M.; Czeckay, P.; Geyer, T.; Kameier, F.; Paschereit, C.O. (2018): Noise Source Isolation and Localization applied to Airfoils with Serrated Leading Edges. *Under Review in: AIAA Journal*

Biedermann, T.M.; Reich, M.; Kameier, F.; Adam, M.; Paschereit, C.O. (2018): Assessment of Statistical Sampling Methods and Approximation Models Applied to Aeroacoustic and Vibroacoustic Problems. *Under Review in: Advances in Aircraft and Spacecraft Science*

### Abschlussarbeiten

Hintzen, Nils: Master-Thesis (2018):

Aeroakustische und aerodynamische Analyse eines Niederdruck-Axialventilators unter Verwendung von Leading Edge Serrations

Rother, Matthias: Master-Thesis (2018):

Identifizierung und Reduktion hydrodynamischer Störanteile bei aeroakustischen Messungen in Strömungen

Czeckay, Pasquale: Master-Thesis (2018):

Mikrofonarraygestützte Untersuchungen an Tragflügel-Profilen mit Leading Edge Serrations

Balde, Nina Maimuna: Bachelor-Thesis (2018):

Aerodynamische und aeroakustische Vermessung eines Axialventilators unter Verwendung statistischer Methoden

## **Projektarbeiten**

Rother, Matthias (2017):

Bau von zwei Rohrelementen mit wandbündigem Mikrofonarray für einen Prüfstand nach DIN 5136

Mohammad, Zameeruddin; Radadiya, Akash; Parikh, Anand & Antala, Romil (2017):

Measurement and Analysis of Turbulence Generated by an Axial Fan in a Rotating Duct

## **Fachpraktika von Studenten aus dem Ausland**

Marco, Jean-Baptiste, ENSMA, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Poitiers, Frankreich (2017):

*Leading Edge Serrations as a Passive Aerodynamic and Aeroacoustic Treatment in Axial Fans – A Feasibility Study*

Chevalier, Cedrick, ENSMA, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Poitiers, Frankreich (2018):

*Low-Noise Design of an Open Jet Wind Tunnel Collector using Numerical and Experimental Methods*

## **6 Internationalisierung**

Ein Großteil der entstandenen Publikationen ist in Kooperation mit der *Brunel University London, Department of Aerospace and Civil Engineering* entstanden. Eine regelmäßige Korrespondenz mit der dortigen Fachgruppe um Dr. Tze Pei Chong bereicherte das durchgeführte Projekt in vielen Punkten. Des Weiteren wurde ein reger Austausch auf verschiedenen nationalen und internationalen Konferenzen betrieben. Herausragende das Projekt betreffende Abschlussarbeiten konnten auch durch die Unterstützung des Fachbereichs Maschinenbau und Verfahrenstechnik (M&V) der Hochschule Düsseldorf, zudem auf der *Deutschen Jahrestagung für Akustik (DAGA)* präsentiert werden. So konnten zwei Studenten erstmals die eigene Arbeit vor einem Fachpublikum präsentieren und verteidigen, was erste Einblicke in den Wissenschaftsbetrieb und eine gelungene Reflexion der eigenen Arbeit ermöglichte. Schlussendlich hatte das ISAVE über die Projektlaufzeit zweimalig Besuch von Studenten des ENSMA in Poitiers, Frankreich, welche ihr Pflichtpraktikum im Rahmen des geförderten Projektes verrichteten und hier sowohl die Arbeit in einem forschungsstarken Team der Hochschule Düsseldorf an vorderster wissenschaftlichen Front miterlebten als auch selbst dazu beitragen ein spannendes Projekt erfolgreich voran zu treiben.

## 7 Fazit

Insgesamt wird das geförderte Projekt sowohl inhaltlich als auch formell als erfolgreich bewertet. Es war eine ideale Unterstützung um Vorarbeiten durchführen zu können, welche in einer Bewerbung um umfangreichere Mittel mündete und auch die eigene Promotionsarbeit unterstützte. Das Projekt und insbesondere der experimentelle Versuchsaufbau konnte vielfältig Interesse wecken, sowohl bei Besuchern des ISAVE, in den Lehrveranstaltungen des Master- und des Bachelor-Programms (2x Projektarbeiten, 3x Masterthesis, 1x Bachelorthesis) sowie in der Fachcommunity durch die regelmäßige Publikation und Präsentation der Forschungsergebnisse auf einschlägigen wissenschaftlichen Konferenzen. Zum primären Projektziel hinzu kommt die Möglichkeit der Studenten, einmal selbst Forschungsergebnisse auf Fachkonferenzen zu präsentieren und zudem Einblicke in den wissenschaftlichen Betrieb zu erhalten. Das Einbinden ausländischer Studierender schafft eine hohe Dynamik und wertvollen internationalen Austausch innerhalb der Forschungsgruppe sowie setzt eine Vielzahl neuer Impulse. Schlussendlich stärkt die kooperative Zusammenarbeit mit anderen HSD eigenen Instituten wie FMDauto und ZIES die Gesamt-Forschungskompetenz der Hochschule und ermöglicht einen wertvollen Quertransfer von Kompetenzen.

Inhaltlich konnte der aeroakustische Nutzen von *Leading Edge Serrations* in einer *Proof-of-Concept* Studie belegt werden. Hierzu wurde ein umfangreicher Versuchsstand definiert und realisiert, welcher auch in zukünftigen detaillierteren Untersuchungen zum Einsatz kommen wird. Zudem wurde ein Designkonzept für den Rotor sowie ein Fertigungsverfahren für die austauschbaren Rotorschaukeln erarbeitet, welches in den Folgeprojekten eine zeit- und ressourcenschonende Methode zur systematischen Parametervariation bietet. Erste Kernaussagen vorausgegangener Studien im ebenen System konnten bereits auf eine rotierende Applikation transferiert werden und ließen sich partiell bestätigen. Von besonderem Interesse sind jedoch beobachtete gegenläufige Trends von bspw. *Serration* Amplitude und *Serration* Wellenlänge im Hinblick auf die aeroakustische Performance, welche noch einmal die Notwendigkeit einer dezidierten Untersuchung der Transferparameter herausstellt.

Zusammenfassend kann das durchgeführte Projekt als eine gelungene Voruntersuchung beschrieben werden, welches einige der im Rahmen der Forschungslücke gestellten Fragen beantwortet. Jedoch wird auch eine Vielzahl weiterer Fragen aufgeworfen, was sehr deutlich die Notwendigkeit von am aktuellen Projekt anknüpfenden und aufbauenden Untersuchungen zeigt.

## 8 Ausblick

Die langfristige Entwicklung des Projektes ist noch ungewiss. Durch die umfangreichen Vorarbeiten, welche durch die HiFF-Förderung ermöglicht wurden, konnte ein weiterführender Förderantrag gestellt werden, welcher bei positiver Begutachtung eine deutlich detailliertere Analyse der Wirkzusammenhänge von *Leading Edge Serrations* ermöglichen würde, um so die Entwicklung dieser Technologie voranzutreiben. Im Rahmen der Projektdurchführung wurde ein reges Interesse seitens industrieller Vertreter an der bearbeiteten Thematik bekundet, was als Indikator für die Relevanz der Thematik gewertet wird. Bisher mangelt es jedoch an einer umfangreichen finanziellen Investition seitens der Industrie um das Thema im Hinblick auf eine baldige Marktfähigkeit weiter verwerten zu können.

Kurz- bis mittelfristig wird das Projekt jedoch im Rahmen der Promotion von Herrn Till Biedermann an der TU Berlin in Kooperation mit der HSD fortgeführt. Diesbezüglich sind weiterführende Untersuchungen bzgl. der zugrundeliegenden Wirkmechanismen als auch des Einflusses verschiedener Designparameter auf die Aerodynamik und Aeroakustik geplant. Beispielsweise wird der Einfluss eines variablen Amplituden/ Wellenlängenverhältnisses (Abb. 9, rechts) mit dem Ziel untersucht werden, die aerodynamische Performance bei gleichbleibender akustischer Effizienz zu gewährleisten. Ebenfalls soll die Verwendung von Doppelamplituden/ Doppelwellenlängen (Abb. 9, links) zu einer erhöhten akustischen Effizienz im Sinne eines breiteren Arbeitsbereiches (Frequenzband) als auch einer verstärkten Pegelreduktion beitragen.

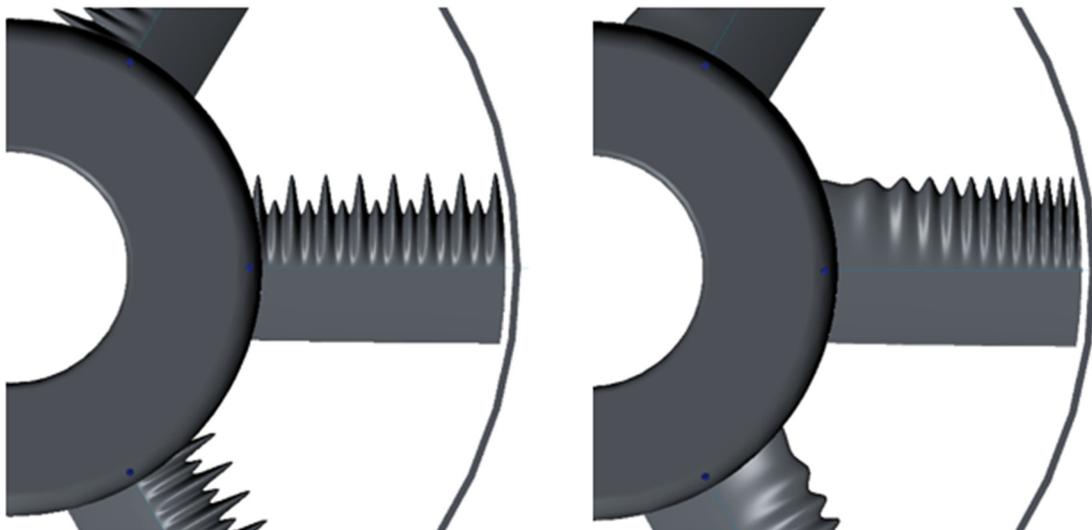


Abbildung 9: Neuartige Designs der *Leading Edge Serrations* zur weiteren Optimierung der aerodynamischen und aeroakustischen Effizienz in Form von Doppelamplituden (links) sowie eines über den Radius variablen Amplituden/ Wellenlängenverhältnisses (rechts). Abbildung aus (Biedermann et al. 2018a)

## Literaturverzeichnis

- Balde, Nina; Biedermann, Till; Kameier, Frank; Paschereit, Christian Oliver (2018): Aerodynamische und aeroakustische Vermessung eines Axialventilators unter Verwendung statistischer Methoden. *Jahrestagung für Akustik DAGA 2018*.
- Biedermann, Till; Kameier, Frank; Koster, Oliver; Schreiber, Denis; Chong, Tze Pei; Paschereit, Christian Oliver (2017): Polyoptimisation of the Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of Aerofoils with Serrated Leading Edges. *23<sup>rd</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2017-3493.
- Biedermann, T.M.; Chong, T.P.; Kameier, F.; Paschereit, C.O. (2018a): On the Transfer of Leading Edge Serrations from Isolated Aerofoil to Ducted Low-Pressure Fan Application. *24<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2018-2956.
- Biedermann, T.M.; Czeckay, P.; Geyer, T.; Kameier, F.; Paschereit, C.O. (2018b): Noise Source Identification of Aerofoils Subjected to Leading Edge Serrations using Phased Array Beamforming. *24<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2018-3794.
- Biedermann, Till; Kameier, Frank; Paschereit, Christian Oliver (2018c): Optimised Test Rig for Measurement of Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of Leading Edge Serrations in Low-Speed Fan Application. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018*.
- Biedermann, T.M.; Reich, M.; Kameier, F.; Adam, M.; Paschereit, C.O. (2018d): Assessment of Statistical Sampling Methods and Approximation Models Applied to Aeroacoustic and Vibroacoustic Problems. *NOVEM Noise and Vibration Emerging Methods*.
- Chaitanya, Paruchuri; Narayanan, Subramanian; Joseph, Phillip; Vanderwel, Christina; Kim, Jae Wook; Ganapathisubramani, Bharathram (2015): Broadband noise reduction through leading edge serrations on realistic aerofoils. DOI: 10.2514/6.2015-2202.
- Chong, Tze Pei; Vathylakis, Alexandros; McEwen, Archie; Kemsley, Foster; Muhammad, Chioma; Siddiqi, Saarim (2015): Aeroacoustic and Aerodynamic Performances of an Aerofoil Subjected to Sinusoidal Leading Edges. DOI: 10.2514/6.2015-2200.
- Clair, V.; Polacsek, C.; Le Garrec, T.; Reboul, G.; Gruber, M.; Joseph, P. (2013): Experimental and Numerical Investigation of Turbulence-Airfoil Noise Reduction Using Wavy Edges. In: *AIAA Journal* 51 (11), S. 2695–2713. DOI: 10.2514/1.J052394.
- Dewar, Stephen W.; Watts, Phillip; Fish, Frank Eliot (2008): US 8,535,008 B2. Angemeldet durch Dewar et al. am 2008. Anmeldenr: US 8,535,008 B2. Veröffentlichungsnr: US 8,535,008 B2.
- Europ. Commission (Hg.) (2015): FLOCON (Adaptive and Passive Flow Control for Fan Broadband Noise Reduction). European Commission : CORDIS : Projects & Results Periodic Report Summary 3.
- Finez, Arthur (2012): Etude expérimentale du bruit de bord de fuite à largebande d'une grille d'aubes linéaire et de sa réduction par dispositifs passifs. DOCTEUR SPÉCIALITÉ ACOUSTIQUE Dissertation. L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON, Lyon, Frankreich.
- Hersh, Alan S.; Soderman, Paul T.; Hayden, Richard E. (1974): Investigation of Acoustic Effects of Leading-Edge Serrations on Airfoils. In: *Journal of Aircraft* 11 (4), S. 197–202. DOI: 10.2514/3.59219.
- Hintzen, Nils; Biedermann, Till; Kameier, Frank; Paschereit, Christian Oliver (2018): Aeroakustische und aerodynamische Analyse eines Niederdruck Axialventilators mit Leading Edge Serrations. *Jahrestagung für Akustik DAGA 2018*.

Lau, Alex S. H.; Haeri, Sina; Kim, Jae Wook (2013): The effect of wavy leading edges on aerofoil–gust interaction noise. In: *Journal of Sound and Vibration* 332 (24), S. 6234–6253. DOI: 10.1016/j.jsv.2013.06.031.

Locke, Charley (2016): Humpback Whales Solve a Big Problem for Wind Turbines. Online verfügbar unter <http://www.wired.com/2015/11/whales-wind-turbines/>, zuletzt geprüft am 26.01.2016.

Narayanan, Subramanian.; Joseph, Phillip; Haeri, Sina; Kim, Jae Wook (2014): Noise Reduction Studies from the Leading Edge of Serrated Flat Plates. *20<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2014-2320.

Polacsek, Cyril; Reboul, Gabriel; Clair, Vincent; Le Garrec, Thomas; Deniau, Hugues (2011): Turbulence-airfoil interaction noise reduction using wavy leading edge: An experimental and numerical study. *Inter Noise 2011*.

Roger, Michel; Schram, Christophe; Santana, Leandro de (2013): Reduction of Airfoil Turbulence-Impingement Noise by Means of Leading-Edge Serrations and/or Porous Material. *19<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. DOI: 10.2514/6.2013-2108.

Sabah, Muriel (2001): Etude expérimentale du bruit à large bandes d'une grille d'aubes. Application au calcul du bruit des soufflantes. Docteur Spécialité Acoustique Dissertation. L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON, Lyon, Frankreich.

Wood, Dean (2016): Envira-North Systems Ltd. Online verfügbar unter <http://www.enviranorth.com/index.html>, zuletzt aktualisiert am 12.01.2016, zuletzt geprüft am 26.01.2016.

## Abkürzungsverzeichnis

$\lambda$	[mm]	<i>Serration</i> Wellenlänge
A	[mm]	<i>Serration</i> Amplitude]
$\Phi_{uu}^L(\omega)$	[dB/Hz]	Spektrale Energiedichte der Geschwindigkeitsfluktuation
$\Phi$	[--, °]	Lieferzahl (dimensionsloser Volumenstrom), Winkel
$\Psi$	[--]	Druckzahl (dimensionslose Erhöhung des statischen Druckes)
$\Delta p$	[Pa]	statische Druckerhöhung
$\dot{Q}$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
$\eta$	[--]	Wirkungsgrad
OASPL	[dB]	Gesamtschalldruckpegel (Overall Sound Pressure Level)
$\Delta$ OASPL	[dB]	Reduktion des Gesamtschalldruckpegels
$p'$	[Pa]	Effektivwert des Schalldruckes
Tu	[--]	Turbulenzgrad
BSLN	[--]	Baseline, Vorderkante eines Tragflügels ohne jede Modifikation
R	[mm]	Rohrradius
x	[mm]	longitudinale Koordinate

# IMPRESSUM

Informationen zur Publikationsreihe:

## **Berichte zu HSD-intern geförderten Forschungsprojekten**

<https://www.hs-duesseldorf.de/forschung/Seiten/publikationen.aspx>

### **Herausgeber**

Hochschule Düsseldorf  
Der Vizepräsident für Forschung und Transfer  
Münsterstr. 156  
40476 Düsseldorf

Redaktion und Ansprechpartnerinnen

Dr. Rebekka Loschen, Stabstelle Forschung und Transfer

Stefanie Söhnitz, Hochschulbibliothek

Titelblattgestaltung: Katharina Regulski, Hochschulbibliothek

### **Zitationsvorschlag:**

Biedermann, Till; Kameier, Frank (2018): Konzeption eines praxisnahen Versuchsstandes zur Untersuchung von *Leading Edge Serrations* als *Proof-of-Concept*. Düsseldorf: Hochschule Düsseldorf (Berichte zu HSD-intern geförderten Forschungsprojekten, Nr. 2).

Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:due62-opus-12300>

DOI: 10.20385/2625-3690/2018.2

Die Publikation steht unter einer Creative Commons Lizenz:

[CC-BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Dieses Dokument wird bereitgestellt durch  
HSDopus – Der Publikationsserver der Hochschule Düsseldorf.  
Hochschulbibliothek  
[opus.bibliothek@hs-duesseldorf.de](mailto:opus.bibliothek@hs-duesseldorf.de)  
<https://opus4.kobv.de/opus4-hs-duesseldorf/>

**ISSN: 2625-3690**