

Aeroakustische und aerodynamische Analyse eines Niederdruck Axialventilators mit Leading Edge Serrations

Nils Hintzen^{1*}, Till Biedermann¹, Frank Kameier¹, C.O. Paschereit²

¹ Hochschule Düsseldorf, Institute of Sound and Vibration Engineering ISAVE, 40476 Düsseldorf,

*E-Mail: nils.hintzen@hs-duesseldorf.de

² TU Berlin, Institute of Fluid Dynamics and Technical Acoustics ISTA, 10623 Berlin

Einleitung

Unter hochturbulenten Anströmbedingungen stellt breitbandiger Vorderkantenschall eine signifikante additive Schallquelle dar [1]. Dieser Vorderkantenschall skaliert mit dem Turbulenzgrad und dem integralen Wirbellängenmaß der Anströmung [2]. Insbesondere bei Axialventilatoren oder Turbinen ist eine Reduktion dieser Schallquelle von großer Bedeutung [3]. Sinusförmigen Vorderkantenmodifikationen (Leading Edge Serrations) wird ein positiver Einfluss auf die abgestrahlten Schallemissionen an den Schaufel-Vorderkanten zugesprochen [4]. Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von Leading Edge Serrations auf die aeroakustischen und aerodynamischen Eigenschaften eines Niederdruck Axialventilators bei turbulenter Anströmung experimentell zu bestimmen.

Rotordesign und Versuchsaufbau

Zur aerodynamischen und aeroakustischen Untersuchung von Leading Edge Serrations wurde ein eigens nach dem Tragflügelverfahren [1] ausgelegter und per Rapid Prototyping gefertigter Axialventilator verwendet, dessen Blätter sowohl austauschbar als auch im Anstellwinkel verstellbar sind. Da bereits umfangreiche Informationen über die Performance von Leading Edge Serrations an ebenen Tragflügeln des Typs NACA65(12)-10 vorhanden sind [5, 6], wird ebendieses Profil auch als Rotorschaufeldesign verwendet und mit Serrations versehen. Der Nabenradius beträgt $R = 0,1$ m, die Schaufeln weisen einen Spann von $S = 0,098$ m auf. Die Serrations sind durch ihre Amplitude (A in mm) und ihre Wellenlänge (λ in mm) definiert. In Abbildung 1 sind exemplarisch der Axialventilator ohne Serration (im Folgenden Baseline genannt) und mit Serration (Zentralpunkt, mittlere Amplitude und Wellenlänge) dargestellt.

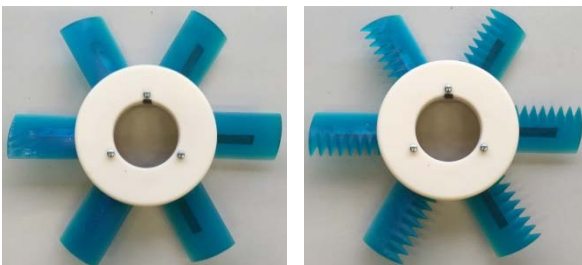


Abbildung 1: Axialventilator nach der Fertigung ohne Serrations (links) und mit Serrations (rechts).

Die Untersuchung umfasst insgesamt fünf Konfigurationen der Serrations, die durch unterschiedliche Parameter der Amplitude und der Wellenlänge definiert sind (Abbildung 2), wobei Amplitude und Wellenlänge maximal 30 % der

Sehnenlänge von $c = 75$ mm entsprechen. Die Drehzahl beträgt $1000 \text{ min}^{-1} \leq n \leq 2000 \text{ min}^{-1}$.

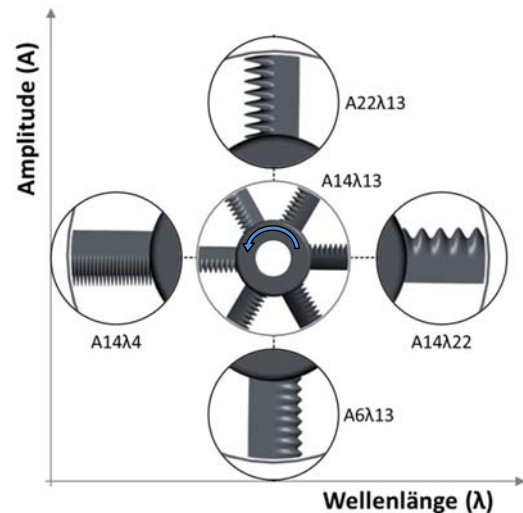


Abbildung 2: Variationen der Parameter Amplitude (A) und Wellenlänge (λ) der Serrations.

Die experimentelle Untersuchung erfolgte in einem Rohrprüfstand in Anlehnung an DIN ISO 5136 und DIN ISO 5801 und erlaubt die simultane Erfassung von akustischen und aerodynamischen Parametern (Abbildung 3).

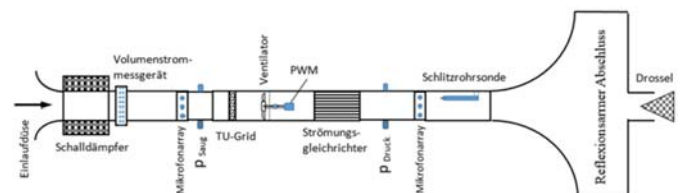


Abbildung 3: Aufbau des Rohrprüfstandes gemäß DIN ISO 5136 und DIN ISO 5801 mit allen relevanten Einbauten und Messgeräten zur simultanen Erfassung der Aerodynamik und des Schalldruckpegels [7].

Der Schalldruckpegel wird über ein saug- und druckseitiges Mikrofonarray mit je drei äquidistant über den Umfang verteilten, wandbündig installierten $\frac{1}{4}$ " Kondensatormikrofonen erfasst. Die Drehzahlbestimmung erfolgt mit hoher Auflösung über einen Beschleunigungsaufnehmer an der Aufhängung des Ventilators. Aerodynamische Kenngrößen sind der hinter der Einlaufdüse ermittelte Volumenstrom und die statische Druckdifferenz zwischen Saug- und Druckseite, gemessen über Druckringleitungen (Abbildung 3). Zur Simulation verschiedener Lastzustände wird druckseitig eine stufenlos verstellbare Drossel verwendet.

Der Turbulenzgrad (Tu) der Anströmung wird durch Gitter in einem Abstand von 0,3 m stromauf des Axialventilators

variiert. Insgesamt werden fünf Gitter mit unterschiedlicher Maschenweite zur Erzeugung von signifikanter Zuströmerturbulenz verwendet (Abbildung 4), welche in vorausgegangenen Studien bereits umfangreich hinsichtlich der resultierenden Turbulenzprofile, der Geschwindigkeitsprofile und der spektralen Zusammensetzung zur Quantifizierung der Zuströmbedingungen untersucht worden sind [7]. Tabelle 1 fasst die gemittelten Kenngrößen in Form der mittleren Geschwindigkeit, des mittleren Turbulenzgrades und der mittleren Standardabweichung noch einmal zusammen.

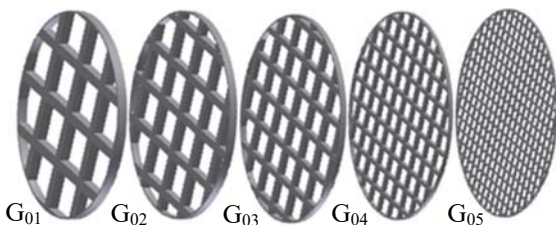


Abbildung 4: Fünf austauschbare Gitter mit variabler Maschenweite G und Strebendicke h (mit $G/h = 5 = \text{konst.}$) zur Erzeugung verschiedener Turbulenzgrade (Tu) mit hohem isotropen Charakter [7, 8].

Tabelle 1: Charakteristische Kenndaten der verwendeten Gitter, gemittelt über den Rohrradius $R = \pm 0,15 \text{ m}$.

Type	U_{Mean} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Tu_{Mean} [--]	σ_{Mean} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
G_{01}	11,27	0,121	1,36
G_{02}	11,97	0,097	1,15
G_{03}	11,77	0,078	0,90
G_{04}	11,58	0,059	0,67
G_{05}	12,19	0,037	0,43
G_{00}	13,32	0,026	0,35

Ergebnisse Aerodynamik

Zur Beurteilung und anschließender Bewertung der Ergebnisse wurden je drei Drehzahlvariationen für die Baseline und eine repräsentative Serration gemessen. Der Volumenstrom sowie die statische Druckdifferenz wurden in die dimensionslosen Kennzahlen der Lieferzahl ϕ und Druckzahl ψ überführt (Formel 1-2). Wie Abbildung 5 zeigt, reduzieren sich die Drosselkennlinien unterschiedlicher Drehzahlen und identischer Rotorgeometrie auf eine Linie. Unter Kompensation der reduzierten Wirkfläche des Rotors mit Leading Edge Serrations sind beide resultierenden Rotorkennlinien nahezu deckungsgleich, lediglich im Bereich starker Androsselung sind geringere Druckzahlen für den modifizierten Rotor zu beobachten, was als Indikator für eine verstärkte Interaktion zwischen Saug- und Druckseite (Sekundärströmungen) des Rotors angesehen wird.

$$\psi = \frac{\Delta p / \rho}{U^2 / 2} \quad [--] \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\dot{Q}}{UA} \quad [--] \quad (2)$$

Abgesehen vom Bereich minimaler Volumenströme, welcher einen äußerst untypischen Arbeitsbereich eines Axialventilators darstellt, sind die untersuchten Rotoren folglich aerodynamisch vergleichbar, was im Umkehrschluss auch einen Vergleich der aeroakustischen Performance rechtfertigt.

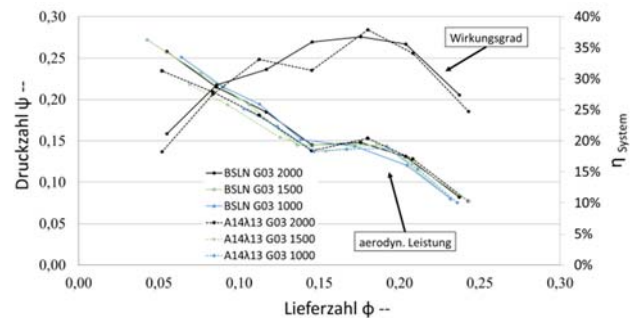


Abbildung 5: Dimensionslose Darstellung der Drosselkennlinien der Baseline und der Serration bei variabler Drehzahl. Additiver Wirkungsgrad bei $n = 2000 \text{ min}^{-1}$.

In Abbildung 6 sind die Wirkungsgradkennlinien für die Baseline und allen fünf untersuchten Serrations bei $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $Tu = 7,8 \%$ dargestellt, wodurch der Einfluss der Serration-Parameter auf die Effizienz der Rotoren erkennbar wird.

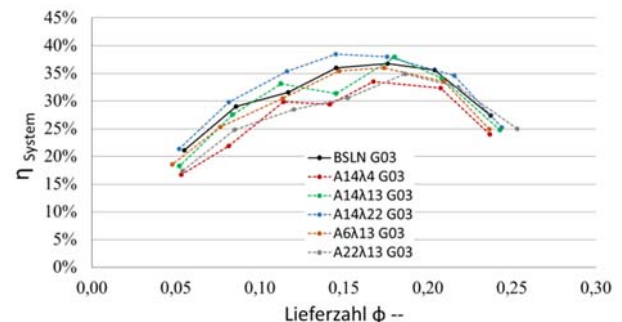


Abbildung 6: Darstellung der Wirkungsgradkennlinien der Baseline und allen untersuchten Serrations bei $Tu = 7,8 \%$ und $n = 2000 \text{ min}^{-1}$.

Ergebnisse Aeroakustik

Die akustische Signatur der untersuchten Rotoren im Rohrprüfstand wurde mit einer Abtastrate von $SR = 44100 \text{ Hz}$, und einer Blockgröße von 32768 aufgenommen, was eine spektrale Analyse bis hin zu einer Grenzfrequenz von 17 kHz bei einer Frequenzauflösung von $1,3 \text{ Hz}$ ermöglicht. Unter Verwendung einer Hanning-Fensterung und einem Overlap von 66% wurden die aufgenommenen Spektren 300-mal gemittelt bevor die gemittelten Summenpegel aller drei verwendeten Mikrofone auf der Saug- und Druckseite mit einem Bandpass von $10 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ kHz}$ ausgegeben wurden.

Im Allgemeinen tragen alle getesteten Konfigurationen der Serrations zu einer signifikanten Schallreduktion bei. Lediglich bei Messungen mit dem Turbulenzgitter kleinster Maschenweite (geringer Turbulenzgrad) kam es teilweise zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels, was auf das Turbulenzgitter selbst zurückgeführt werden kann, da bei diesem im Bereich hoher Lieferzahlen ϕ tonale Effekte auftreten.

Eine maximale Schallreduktion liefert die Konfiguration mit einer mittleren Amplitude und großen Wellenlänge (A14λ22), bei einem Turbulenzgrad von $Tu = 5,9\%$. In Abbildung 7 ist der Schalldruckpegel über der Lieferzahl ϕ aufgetragen. Im Betrachtungsbereich (grün markiert) wurde der Schall um bis zu $\Delta Lp = 7$ dB (5 dB(A)) reduziert. Dieser Bereich spiegelt den Auslegungspunkt (Maximum des Wirkungsgrades) wieder (Abbildung 8, Formel 3).

$$\eta_{System} = \frac{\dot{Q} \cdot \Delta p}{P_{Elec}} \quad [--] \quad (3)$$

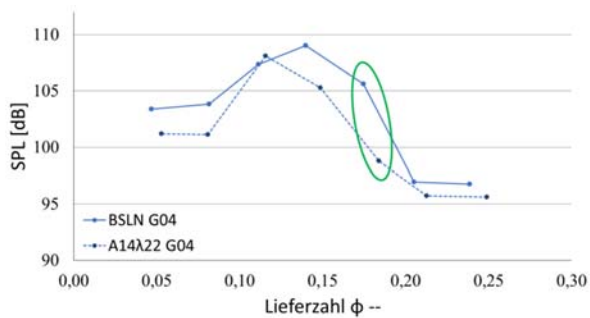


Abbildung 7: Diagramm des Schalldruckpegels (SPL) über die Lieferzahl für die Serration-Konfiguration A14λ22 bei $Tu = 5,9\%$. Grün = Betrachtungsbereich.

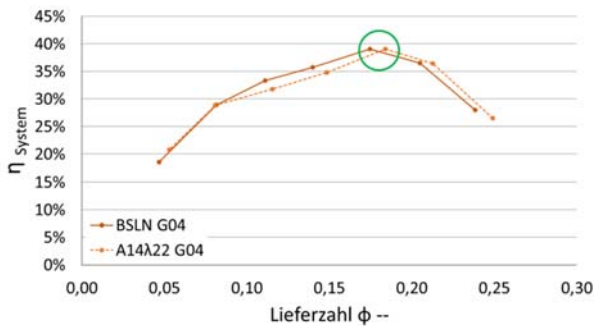


Abbildung 8: Diagramm des Wirkungsgrades η über die Lieferzahl für die Serration-Konfiguration A14λ22 bei $Tu = 5,9\%$. Grün = Betrachtungsbereich.

In Tabelle 2 ist der Einfluss der Turbulenzgitter auf den Schalldruckpegel zwischen der Baseline und der Serration A14λ22 dargestellt. Die größte Reduktion des Schalldruckpegels erzielt Gitter 4 mit einem Turbulenzgrad $Tu = 5,9\%$.

Tabelle 2: Einfluss der Turbulenzgitter auf den Schalldruckpegel zwischen der Baseline und der Serration A14λ22.

Gitter	Baseline SPL	A14λ22 SPL	ΔSPL
[-]	[dB]	[dB]	[dB]
1	106,6	101,1	5,5
2	107,0	102,0	5,0
3	105,6	101,5	4,0
4	105,6	98,8	6,8

Auch spektral betrachtet liefern Serrations eine breitbandige Schallreduktion. In Abbildung 9 ist die Schallreduktion für die Serration A14λ22 im Frequenzbereich dargestellt.

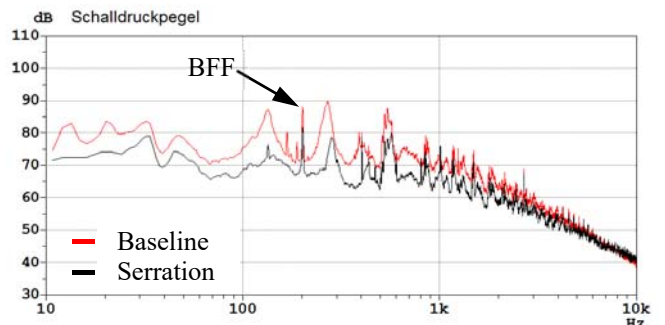


Abbildung 9: Spektralanalyse der Baseline und der Serration A14λ22 für $Tu = 5,9\%$, bei Maximum des Wirkungsgrades. Schallreduktion 7 dB (5 dB(A)).

Erkennbar ist, dass im Auslegungspunkt in einem Frequenzbereich von $10 \text{ Hz} \leq f \leq 8 \text{ kHz}$ eine signifikante Schallreduktion auftritt, wohingegen es zu einer leichten Erhöhung im hochfrequenten Bereich kommt, welche jedoch nicht pegelrelevant ist. Diese hochfrequente Erhöhung kann auf eine Erhöhung der Rotorblatt-Eigengeräusche in der Grenzschicht und an der Hinterkante zurückgeführt werden. Der Schalldruckpegel der Blattfolgefrequenz (BFF) wird ebenfalls reduziert, wie Abbildung 10 zeigt.

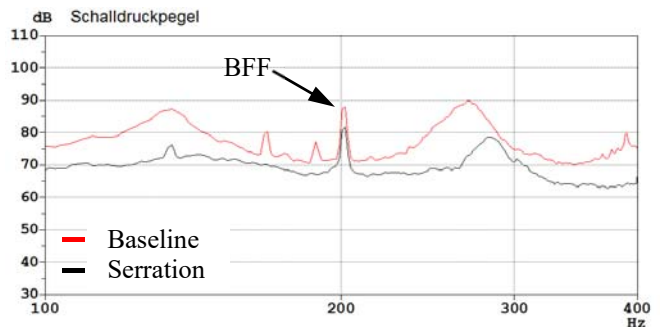


Abbildung 10: Spektralanalyse der Baseline und der Serration A14λ22 für $Tu = 5,9\%$, bei Maximum des Wirkungsgrades. Betrachtung der Blattfolgefrequenz (BFF).

Die absolute aerodynamische Leistung wird durch die Verwendung der Serrations und der damit verbundenen geringeren Oberfläche reduziert, jedoch wird die Effizienz nicht beeinträchtigt. In Abbildung 11 ist die dimensionslose Druckerhöhung der Baseline und der Serration A14λ22 dargestellt.

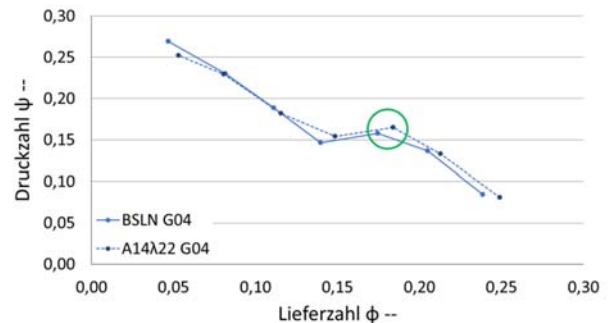


Abbildung 11: Dimensionslose Darstellung der Druckerhöhung für die Baseline und die Serration A14λ22 für $Tu = 5,9\%$, bei maximalem Wirkungsgrad.

Im betrachteten Punkt (Maximum des Wirkungsgrades) liefern beide Rotorvarianten aerodynamisch gleichbleibende Ergebnisse. Bei anderen Konfigurationen der Serrations

kommt es zu vergleichbaren Ergebnissen. Lediglich bei einer kurzen Wellenlänge und mittlerer Amplitude konnte ein Druckverlust ab dem Eintritt in den Stall-Bereich festgestellt werden. Dieses Phänomen wurde auch bereits im Falle ebener Tragflügel mit/ ohne Serrations beobachtet. Als Ursache werden auftretende Sekundärströmungen bei hohen Anstellwinkeln im Bereich der Serration-Wurzeln vermutet, welche dem Druckaufbau abträglich sind (Abbildung 12).



Abbildung 12: Unterschiedliche Wellenlänge der Serration A14λ4 (links) und der Serration A14λ22 (rechts), zur Verdeutlichung des besseren Druckaufbaus bei großer Wellenlänge.

Abbildung 13 verdeutlicht diesen Aspekt. Hier sind die Serrations A14λ4 und A14λ22 (vgl. Abbildung 12) im direkten Vergleich dargestellt. Die Serration A14λ22 erreicht im Gegensatz zur Serration A14λ4 deutlich höhere Druckzahlen.

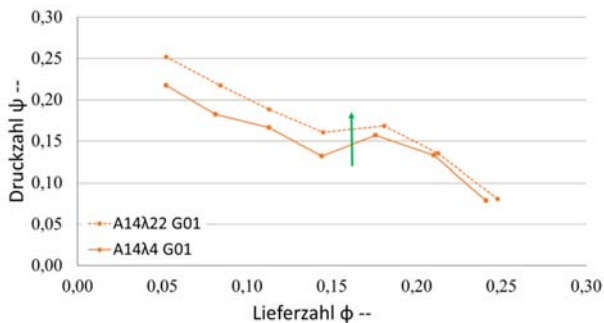


Abbildung 13: Dimensionslose Darstellung der Rotorkennlinien für die Serration A14λ4 und die Serration A14λ22 für $Tu = 12,1\%$.

Zusammenfassung und Ausblick

Zur Schallreduzierung eines Niederdruck Axialventilators wurden Leading Edge Serrations unter hochturbulenten Anströmbedingungen untersucht. Die aerodynamischen und aeroakustischen Analysen erfolgten in einem Rohrprüfstand in Anlehnung an DIN ISO 5136 und DIN ISO 5801. Ziel der Arbeit war es zu untersuchen, inwieweit sich Leading Edge Serrations positiv auf die abgestrahlten Schallemissionen auswirken und diese unter gleichbleibender Aerodynamik reduzieren. Der verwendete Ventilator ist ein eigens ausgelegter und per Rapid Prototyping gefertigter Axialventilator, dessen Blattform gemäß eines NACA65(12)-10 Profils gewählt wurde. Der Anstellwinkel der Blätter blieb über den Spann konstant. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Schallreduktion im Auslegungspunkt bis hin zum Stall-Bereich. Im Auslegungspunkt (Maximum des Wirkungsgrades) wird eine Schalldruckpegelreduktion von bis zu 7 dB (5 dB(A)) erzielt. Die Effizienz der Schallreduktion ist eine Funktion der Konfiguration der Amplitude und Wellenlänge der Serrations sowie des Turbulenzgrades der Anströmung. Spektral betrachtet, wird eine breitbandige Schallreduktion im Bereich $10\text{ Hz} \leq f \leq 8\text{ kHz}$ erzielt. Auch der Schalldruckpegel der Blattfolgefrequenz (und anderer drehzahlspezifischer tonaler

Komponenten) wird bei Verwendung von Leading Edge Serrations maßgeblich reduziert. Die geringeren Wirkflächen der modifizierten Rotoren wirken sich geringfügig auf die aerodynamische Leistung aus, wohingegen der Wirkungsgrad nicht beeinträchtigt wird. Zukünftig ist ein stärkerer Fokus auf eine detaillierte Quantifizierung geometrischer Rotor- und Serration-Parameter auf die Schallreduktion vorgesehen. Im Detail bedeutet dies eine Erhöhung der Komplexität der Blattgeometrie unter Einbindung von Parametern wie Verdrehung, Sichelung und Neigung. Anschließend werden die über den Spann konstant gehaltenen Serrations zur Doppelamplitude bzw. zur Serration mit variabler Amplitude und variabler Wellenlänge weiterentwickelt. Bei allen weiteren Untersuchungen wird auch der Anstellwinkel der Blätter der Umfangsgeschwindigkeit angepasst, sodass eine schaufelkongruente Anströmung im Auslegungspunkt gewährleistet werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Carolus, T., *Ventilatoren*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2013.
- [2] Zenger, F., Herold, G., and Becker, S., "Acoustic Characterization of Forward- and Backward-Skewed Axial Fans under Increased Inflow Turbulence," *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*.
- [3] Biedermann, T., Chong, T. P., and Kameier, F., "Reduktion und Analyse von Tragflächen-Vorderkantenschall, verursacht durch eine turbulente Anströmung," DAGA, 2016.
- [4] Chong, T. P., Vathylakis, A., McEwen, A., Kemsley, F., Muhammad, C., and Siddiqi, S., "Aeroacoustic and Aerodynamic Performances of an Aerofoil Subjected to Sinusoidal Leading Edges," 2015. doi: 10.2514/6.2015-2200.
- [5] Biedermann, T. M., Chong, T. P., Kameier, F., and Paschereit, C. O., "Statistical-Empirical Modelling of Airfoil Noise Subjected to Leading Edge Serrations," *AIAA Journal*; Volume 55, issue 9, 2017, pp. 3128–3142. doi: 10.2514/1.J055633.
- [6] Biedermann, T., Kameier, F., Koster, O., Schreiber, D., Chong, T. P., and Paschereit, C. O., "Polyoptimisation of the Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of Aerofoils with Serrated Leading Edges," *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2017. doi: 10.2514/6.2017-3493.
- [7] Biedermann, T., Kameier, F., and Paschereit, 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*, 2018.
- [8] Laws, E. M., and Livesey, J. L., "Flow Through Screens," *Annual Review of Fluid Mechanics*; Vol. 10, No. 1, 1978, pp. 247–266. doi: 0.1146/annurev.fl.10.010178.001335.