

Hinterkantenausblasen zur Eigenschallreduktion von Tragflügelprofilen

Tom Gerhard¹, Sascha Erbslöh², Thomas Carolus¹

¹Institut für Fluid- und Thermodynamik, Universität Siegen, 57068 Siegen, E-Mail: tom.gerhard@uni-siegen.de

²Senvion SE, 24783 Osterröföfeld, E-Mail: sascha.erbslöh@senvion.com

Einleitung

Den dominierenden Schallentstehungsmechanismus einer Windenergieanlage stellt die Interaktion der turbulenten Grenzschicht mit der Tragflügelhinterkante dar. Der emittierte Schall hängt von der Turbulenzintensität in der unmittelbaren Umgebung der Kante ab und wird durch die Charakteristik der Grenzschichtentwicklung stromaufwärts der Hinterkante bestimmt.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der möglichen Reduzierung der Hinterkantenschallemissionen von isolierten, quasi-zweidimensionalen Tragflügelsegmenten. Dies erfordert zunächst die detaillierte Bestimmung der akustischen Signatur sowie der Charakteristika der Quellterme der unmodifizierten Referenzprofile. Anschließend muss das Stromfeld dahingehend verändert werden, dass sich die Intensität des abgestrahlten aeroakustisch erzeugten Schalls reduziert. Dazu werden die untersuchten Tragflügelprofile im Bereich der Hinterkante mit einem Ausblassechlitz versehen aus dem ein innerhalb des Tragflügels zugeführter Luftstrom ausgeblasen wird. Die Untersuchungen beschränken sich auf die Beeinflussung der saugseitigen Grenzschicht, da ihr die größere akustische Relevanz zukommt.

Vorgehensweise

Windkanal und Tragflügelelemente. Die experimentellen Untersuchungen werden im kleinen Windkanal der Universität Siegen durchgeführt. Der offene Windkanal mündet in einen reflexionsarmen Raum mit schallhartem Boden der akustische Messungen nach ISO 3745 [1] erlaubt. Der von dem außerhalb der Laborumgebung positioniertem Radialventilator geförderte Luftstrom wird durch verschiedene Kulissen- und Diffusorschalldämpfer akustisch gedämpft (vgl. [2]). Zusätzlich vor der Düse angeordnete Siebe und Gleichrichter sorgen für eine Beruhigung der Strömung und eine turbulenzarme Zuströmung die am Düsenaustritt im Mittel bei ca. 0,2 % liegt.

Alle untersuchten Tragflügel haben eine Sehnenlänge von $c = 0,2$ m und sind $0,5 \cdot c$ stromabwärts des Düsenaustritts vertikal zwischen zwei horizontalen Acrylglas-Platten angeordnet. Die Spannweite entspricht der Seitenlänge des Düsenaustritts ($L = 0,266$ m), sodass sich ein Seitenverhältnis des Tragflügels von $L/c = 1,33$ ergibt. Die mit der Sehnenlänge des Profils berechnete REYNOLDS-Zahl aller durchgeführten Untersuchungen ergibt sich zu $Re = 3,5 \cdot 10^5$. Die Untersuchungen fokussieren sich auf zwei Tragflügelprofile die für die spezifischen Anforderungen von Windenergieanlagen entwickelt wurden. Dies ist zum einen das von SOMERS [3] entwickelte S834 Profil welches als leises Profil für kleine Windenergieanlagen entwickelt wurde. Zudem werden Ergebnisse des an der Technischen Universität Delft entwickelten DU 93-W-210 Profils vorgestellt (vgl. TIMMER UND VAN ROOJ [4]). Letzteres wird im Folgenden aus Gründen der Übersicht als DU93 bezeichnet.

Um die akustische Hinterkantenschall-Charakteristik der Referenzfälle zu spezifizieren, werden die Tragflügel zunächst unmodifiziert untersucht. Zur Realisierung des Hinterkantenausblasens sind die Tragflügelgeometrien im Hinterkantenbereich durch eine saugseitig angeordnete und in Spannweitenrichtung konstante schlitzförmige Ausblasseöffnung modifiziert. Die Luft wird dem Tragflügel von beiden Seiten zugeführt und durch interne Kanäle in Richtung des Ausblassechlitzes geführt. Die Ausblasrate kann mit der Geschwindigkeit des Ausblasstrahls u_b und der freien Anströmgeschwindigkeit u_∞ berechnet werden als

$$u_b = u_S / u_\infty \quad (1)$$

Um die Strömung zu beruhigen und die mit der Ausblasluft transportierten Schallquellen zu reduzieren, sind in jeder der beiden Zuleitungen zum Tragflügel Schalldämpfer angebracht. Innerhalb des Tragflügels sorgt ein poröses Rohr für eine weitere Beruhigung der Strömung und eine gleichmäßige Verteilung der Luft über die gesamte Spannweite des Tragflügelsegments.

Neben der Variation der Ausblasrate u_b wurde auch die Position des Ausblassechlitzes entlang der Sehne variiert. Abbildung 1 zeigt die zweidimensionale Profilform exemplarisch für das DU93 Profil mit dem Ausblassechlitz angeordnet bei $(x/c)_S = 0,9$. Die Schlitzhöhe an der Ausblasseöffnung ist konstant über die Spannweite und beträgt $0,01c$.

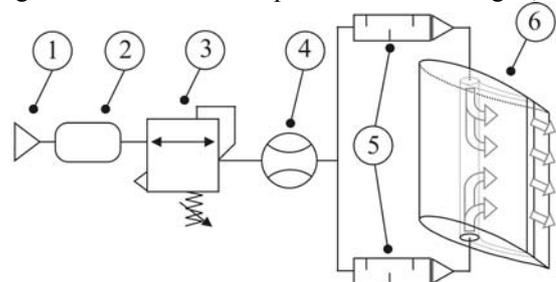


Abb. 1: Schematische Darstellung der pneumatischen Steuerung des Ausblassemassenstromes; 1- & 2- Druckluftquelle und -reservoir, 3-Druckventil, 4-Massenstrommesser, 5-Schalldämpfer, 6-Tragflügel mit Ausblassechlitz.

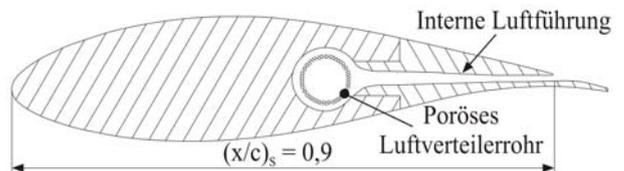


Abb. 2: Skalierte Darstellung des DU93 Tragflügels mit Hinterkantenausblasen.

Grenzschichttripping. Zur definierten Herbeiführung des laminar-turbulenten Umschlages der Tragflügel-Grenzschicht werden bei sämtlichen Windkanaluntersuchungen gezackte 3D-Grenzschichtturbulatoren eingesetzt. Zum einen dienen diese der Unterdrückung von laminaren Instabilitätswellen auf der Oberfläche, zum anderen dient die Fixierung der Transitionspunkte der künstlichen Erhöhung der REYNOLDS-Zahl. Bei modernen Windenergieanlagen treten REYNOLDS-

Zahlen auf, die den im Windkanal erzielten Wert von $3,5 \cdot 10^5$ um ein vielfaches übersteigen. Eine künstlich erzwungene Transition an definierten Punkten führt zu einer angepassten Verteilung der Anteile laminarer und turbulenter Grenzschicht und ermöglicht so eine qualitative Vergleichbarkeit der Grenzschichtcharakteristik des selben Profils bei einer erhöhten REYNOLDS-Zahl. Die Positionen an denen der laminar-turbulente Umschlag herbei geführt wird, entsprechen den natürlichen Transitionspunkten der Strömung bei einer um den Faktor 10 erhöhten REYNOLDS-Zahl ($Re_{sim} = 3,5 \cdot 10^6$). Der Umschlagpunkt wird mit der Software XFOIL [5] für einen Anstellwinkel bestimmt, der bei Re_{sim} die maximale Gleitzahl für das jeweilige Profil liefert ($\alpha_{eff} = 4,7^\circ$ bzw. $4,1^\circ$ für das S834 bzw. das DU93 Profil).

Experimentelle Methoden. Das Stromfeld im Bereich des Tragflügels wird mittels eines Hitzdrahtanemometers (HDA) bestimmt. Bei der Sonde handelt es sich um eine 1-Draht-Heißfilmsonde der Firma TSI (Typ: 1210-T1.5). Die Messzeit pro Messpunkt betrug 1 s bei einer Abtastrate von $f_s = 51,2$ kHz. Geschwindigkeit und Turbulenzintensität innerhalb der Grenzschicht werden durch das Abtasten von Linien senkrecht zur Anströmrichtung in Spannweitenmitte des Tragflügels bestimmt.

Die Bestimmung der Schallemissionen erfolgt durch ein Mikrofon (1/2" BRÜEL & KJAER™, Typ: 4190) welches in Spannweitenmitte außerhalb der Strömung angeordnet ist. Das Mikrofon ist senkrecht zur Anströmrichtung in 0,3 m Abstand zur Hinterkante auf der Tragflügelsaußenseite positioniert. Die Messzeit pro Messpunkt betrug 30 s bei einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz. Die akustische Charakterisierung des Hinterkantenschalls der untersuchten Profile anhand von Standardmikrofonmessungen sowie mit einem kommerziellen Mikrofon-Array wurde in vorhergehenden Untersuchungen durchgeführt und wird in GERHARD UND CAROLUS [6] beschrieben.

Numerische Methoden. Eine detaillierte Betrachtung des instationären Stromfeldes erfolgt auf Basis von Large Eddy Simulationen (LES) der Tragflügelprofile. Die Windkanaleinflüsse werden dabei durch die Wahl der Domain, welche die Effekte der Düsenströmung mit einbezieht, berücksichtigt. Eine 3D-RANS Simulation des gesamten reflexionsarmen Raumes liefert die Randbedingungen für die LES. Aufgrund des hohen numerischen Aufwandes beschränkt sich die Ausdehnung der Domain in Spannweitenrichtung auf ein Segment des Tragflügels mit einer Breite von $7,5\%c$. Um der Umlenkung der Strömung Rechnung zu tragen, ist die Domain im Nachlauf des Tragflügels um den um die Windkanaleinflüsse korrigierten Anstellwinkel ($\alpha_{geom} = 12,7^\circ$) des S834 Tragflügelprofils geneigt. Weitere Domain-Abmessungen sind in Abb. 3 dargestellt. An den Einlassflächen werden die aus der 3D-RANS Simulation gewonnenen Geschwindigkeitsprofile vorgegeben, an der Auslassfläche der Umgebungsdruck. In Spannweitenrichtung sind die Domain-Seitenflächen als Symmetrieebenen definiert. Mit Ausnahme der Einlassfläche des Ausblassechlitzes, an der ebenfalls eine Geschwindigkeit vorgegeben wird, sind alle Randbedingungen als nicht-reflektierend definiert.

Die Simulationen schließen das Grenzschichttripping mit ein. Die relevante Turbulenz in der Grenzschicht und im Nachlauf wird daher durch den Transitionsprozess erzeugt und ist somit unabhängig von der Zuströmturbulenz. An den Einlässen werden daher keine Störungen vorgegeben. Alle

dargestellten Ergebnisse beruhen auf mindestens $1 \cdot 10^5$ Zeitschritten was ca. 12 Strömungsdurchläufen entspricht. Dabei werden nur die Daten ausgewertet, bei denen sich ein statistisch stationärer Strömungszustand eingestellt hat. Die erzielten Konvergenzkriterien aller Variablen lagen bei $1 \cdot 10^{-6}$.

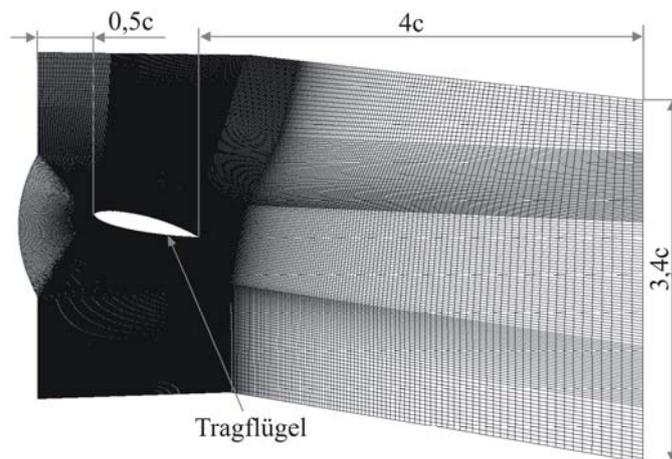


Abb. 3: LES Domain des S834 Referenzprofils.

Ergebnisse

Stromfelddaten. Abb. 4 (oben) zeigt die Geschwindigkeit sowie die 1D-Turbulenzintensität (TI) auf einer senkrecht zur Anströmrichtung angeordneten Linie innerhalb der saugseitigen Grenzschicht der Referenztragflügel. Der in der Abbildung dargestellte Vergleich von numerischen und experimentellen Daten weist insbesondere bei den Geschwindigkeitsverläufen eine gute Übereinstimmung auf. Die aus den HDA-Messungen bestimmte TI weicht zwar im Maximum ab, qualitativ bleiben die Ergebnisse aber vergleichbar. Vergleicht man beide Tragflügel, so zeigt sich für die dünnere Grenzschicht des DU93 Profils eine im Mittel geringere TI. Gleichzeitig tritt das von der LES vorhergesagte Maximum im Falle des DU 93 Profils, im Gegensatz zum S834 Profil, unmittelbar an der Wand auf. Die dickere Grenzschicht und der daher geringere Geschwindigkeitsgradient an der Wand des S834 Profils sind vor allem auf den früheren saugseitigen Umschlagpunkt zurück zu führen. Dieser erfolgt bei dem S834 Profil bereits bei $x/c = 0,17$, bei dem DU93 Profil hingegen erst bei $x/c = 0,41$.

Im unteren Teil von Abb. 4 ist an der gleichen x/c -Position der Vergleich von LES Resultaten für die Referenztragflügel und einen jeweiligen Ausblastragflügel dargestellt. Der Ausblassechlitz ist bei $(x/c)_s = 0,9$ angeordnet, die Ausblasrate beträgt $u_b = 0,5$. Der Ausblasstrahl erhöht die Geschwindigkeit in unmittelbarer Hinterkanten- und Wandnähe beider Tragflügel. Der geringere Geschwindigkeitsgradient innerhalb der Grenzschicht des S834 Referenzprofils führt allerdings dazu, dass die erzielte Erhöhung gegenüber dem Referenzfall hier stärker ausgeprägt ist. Gleichzeitig ist die Geschwindigkeit im Zentrum des Ausblasstrahls ($y/c \approx 0,01$) des DU93 Profils höher. Dies folgt aus einem geringeren Impulsverlust den der Strahl innerhalb der energiereicheren Grenzschicht bis zu dieser Stelle erfährt. Für die TI zeigt sich ein äquivalentes Verhalten. Der Ausblasstrahl reduziert die TI in unmittelbarer Wandnähe beider Profile, die Differenz zwischen Referenz und Ausblastragflügel ist aber für das S834 Profil größer.

Durch die Verdrängungswirkung der ausgeblasenen Luft wird zudem die Grenzschichtdicke erhöht. Die maximale TI in der ursprünglichen Grenzschicht verschiebt sich daher nach außen. Außerdem bildet sich zwischen Ausblasstrahl und Oberfläche eine neue Grenzschicht aus, was zu einem Anstieg der TI unmittelbar an der Wand ($y/c \approx 0,005$) führt.

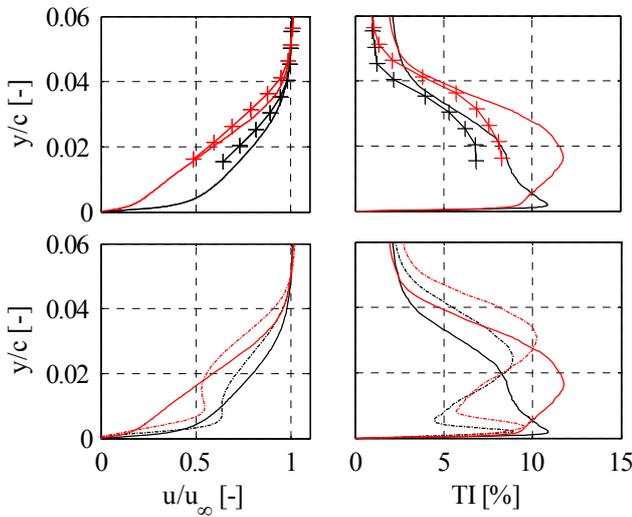


Abb. 4: Geschwindigkeit und Turbulenzintensität auf der Saugseite ($x/c = 0,975$); oben: LES und Experiment (Kreuze markieren die experimentellen Messpunkte), unten: LES Ergebnisse für die Referenztragflügel und einen jeweiligen Ausblastragflügel ($(x/c)_S = 0,9$, $u_b = 0,5$) (gekennzeichnet durch die Strichpunktlinie); Legende: — DU93, — S834.

In Abb. 5 (oben) ist der Pegel der durch die Turbulenz innerhalb der Grenzschicht induzierten Oberflächendruckfluktuationen im saugseitigen Hinterkantenbereich des S834 Referenzprofils dargestellt. Die Fluktuationen steigen in Richtung der Hinterkante insbesondere im mittleren Frequenzbereich ($300 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$) an. Der untere Teil der Abbildung zeigt den Effekt des Hinterkantenausblasens in Form der Differenz der induzierten Fluktuationen eines S834 Ausblastragflügels ($(x/c)_S = 0,9$, $u_b = 0,5$) und der Referenz. Stromab des Ausblasschlitzes wird der Pegel der Fluktuationen für $f < 2,5 \text{ kHz}$ um bis 15 dB reduziert. Gleichzeitig nimmt der Pegel in höheren Frequenzbereichen sowohl stromauf als auch stromab der Ausblasöffnung zu. Dies ist einerseits durch die in die Strömung eingebrachte (Ausblas-)Kante zu erklären. Andererseits besteht der Ausblasstrahl selbst aus kleinskaligen Wirbeln die zum hochfrequenten Anteil der Fluktuationen beitragen.

Der Einfluss der Variation der Position des Ausblasschlitzes entlang der Sehne ist in Abb. 6 dargestellt. Die mit dem dynamischen Druck der freien Anströmung normierten Oberflächendruckfluktuationen zeigen, unabhängig von der Ausblasposition, ein ähnliches Verhalten. Während die gemittelten Fluktuationen stromauf des Schlitzes ansteigen, werden sie stromab der Öffnung reduziert. In Richtung der Hinterkante steigen die Fluktuationen dann, in Folge der Ausbildung der neuen Grenzschicht zwischen Ausblasstrahl und Oberfläche, wieder an. Je nach Position der Ausblasöffnung variiert daher der Oberflächenbereich der von der Reduktion profitiert. In unmittelbarer Hinterkantennähe führt daher der Ausblastragflügel mit dem Ausblasschlitz bei $(x/c)_S = 0,9$ zur größten Reduktion von ca. 45 %.

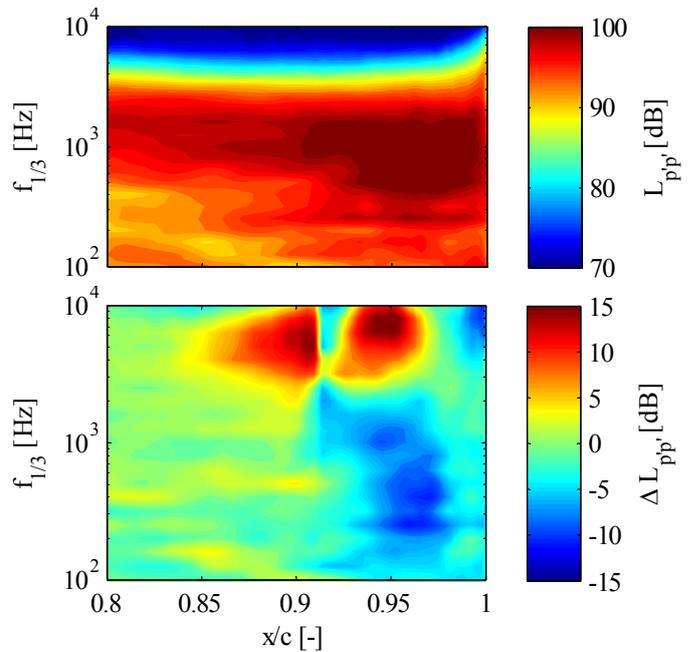


Abb. 5: LES Ergebnisse der Druckfluktuationen im saugseitigen Hinterkantenbereich des S834 Tragflügelprofils; oben: Referenz; unten: Differenz zwischen Referenz und Ausblastragflügel ($(x/c)_S = 0,9$, $u_b = 0,5$).

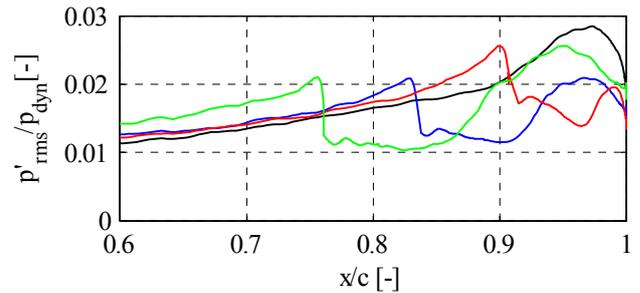


Abb. 6: LES Ergebnisse der saugseitigen Oberflächendruckfluktuationen (S834 Profil); Legende: — Referenz, — $(x/c)_S = 0,75$, — $(x/c)_S = 0,825$, — $(x/c)_S = 0,9$ (alle mit $u_b = 0,5$).

Akustische Ergebnisse. Abb. 7 zeigt das Tragflügelgeräusch der Referenztragflügel bezogen auf das Hintergrundgeräusch welches von dem „leeren“ Windkanal ohne eingebauten Tragflügel (bei gleichem Massenstrom) erzeugt wird. In einem Frequenzbereich zwischen 400 Hz und ca. 2 kHz hebt sich das emittierte Geräusch beider Tragflügel deutlich von dem Hintergrundgeräusch ab. Die breitbandige Überhöhung zwischen 300 Hz und 600 Hz konnte in vorhergehenden Studien als dominierender Hinterkantenschallbereich identifiziert werden [6]. Weiterhin zeigt Abb. 7, dass der Schalldruckpegel des S834 Profils in diesem Bereich ca. 1 dB oberhalb des Pegels des DU93 Profils liegt.

In Abb. 8 ist die Differenz des Gesamtschallpegels $L_{p,ges}$ zwischen einem S834 (oben) und einem DU93 Ausblastragflügel (unten) zum jeweiligen Referenztragflügel dargestellt. $L_{p,ges}$ wird über den Frequenzbereich von 300 Hz bis 1 kHz gebildet und ist in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Ausblasrate angegeben. Der Ausblasschlitz beider Ausblastragflügel ist bei $(x/c)_S = 0,9$ angeordnet.

Im Falle des S834 Profils lässt sich eine Reduktion des Pegels von bis zu 3 dB über einen großen Anstellwinkelbereich feststellen. Die optimale Ausblasrate liegt für diesen Ausblastragflügel leicht unterhalb von $u_b = 0,5$. Bei Ausblas-

raten von $u_b > 0.7$ wird das Ausblaseigengeräusch dominant. Dies resultiert aus den erhöhten hochfrequenten Oberflächendruckfluktuationen die in Abb. 5 dargestellt sind. Auch die Schallemissionen des DU93 Profils können teilweise reduziert werden, allerdings beschränkt sich der Bereich auf hohe Anstellwinkel bei denen die Strömung schon vom Profil abgelöst ist. Für $\alpha_{eff} < 9^\circ$ kann hier hingegen keine signifikante Reduzierung festgestellt werden. Die Gründe liegen in der insgesamt geringeren Turbulenzintensität innerhalb der Grenzschicht des Referenzprofils und der dadurch reduzierten Hinterkantenschallemissionen. Das Optimierungspotential ist daher im Falle des DU93 Profils geringer.

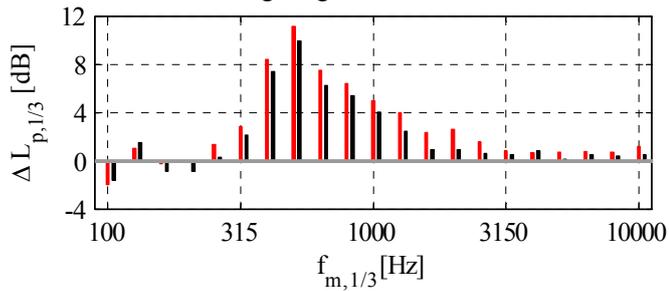


Abb. 7: Differenz zwischen Tragflügelgeräusch der Referenzprofile und Hintergrundgeräusch des Windkanals; Legende: — DU93, — S834.

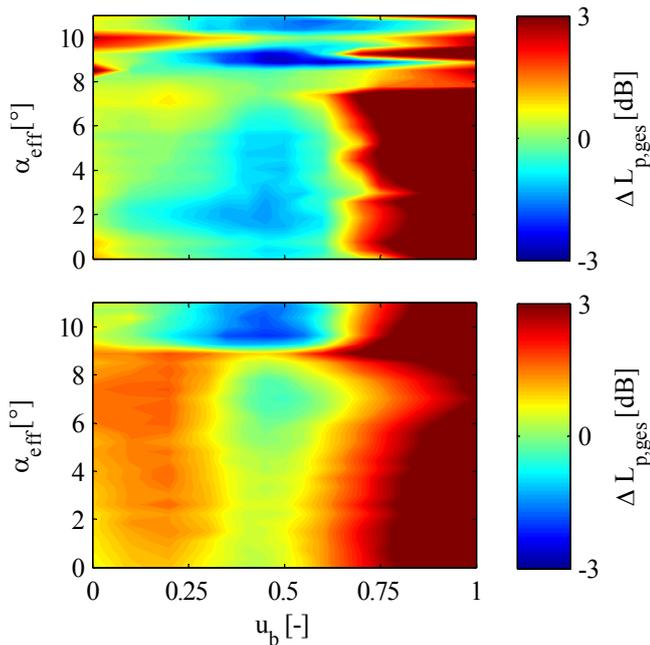


Abb. 8: Differenz des Gesamtschallpegels der Ausblastragflügel ($(x/c)_s = 0.9$) zu dem jeweiligen Referenzprofile in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Ausblasrate; oben: S834, unten: DU93.

Zusammenfassung

In dieser Studie wird die Möglichkeit untersucht die Interaktion der turbulenten Grenzschicht mit der Hinterkante eines Tragflügelprofils durch das Ausblasen eines sekundären Luftstroms entlang der Saugseite des Tragflügels zu beeinflussen. Das Ziel besteht in der Reduktion der emittierten Hinterkantenschallemissionen die im Falle turbulenzarmer Zuströmung die Gesamtschallemissionen

eines Tragflügelprofils dominieren. Als allgemeine Beispiele werden dazu experimentelle und numerische Untersuchungen an zwei Tragflügelprofilen (S834 und DU 93-W-210) durchgeführt. Das Hinterkantenausblasen wird durch die Implementierung eines Ausblasschlitzes im Bereich der Tragflügelhinterkante realisiert. Aus diesem wird dann ein von außen zugeführter Luftstrom ausgeblasen. Sowohl die Position des Schlitzes als auch die Ausblasgeschwindigkeit wurden variiert.

Der Ausblasstrahl erhöht die Geschwindigkeit innerhalb der Grenzschicht und reduziert gleichzeitig die Turbulenzintensität in unmittelbarer Wandnähe. Dies führt zu einer Minderung der induzierten Oberflächendruckfluktuationen in tieferen Frequenzbereichen. Im höherfrequenten Bereich kommt es allerdings zu einem Anstieg der Fluktuationen in Folge der kleinskaligen Wirbel innerhalb des Ausblasstrahls. Im Falle des S834 Profils führt der Ausblasstrahl so zu einer Reduktion der Gesamtschallemissionen von ca. 3 dB über einen großen Anstellwinkelbereich. Um den unmittelbaren Bereich der Hinterkante bei einer vergleichsweise geringen Ausblasrate zu beeinflussen, ist eine Anordnung des Schlitzes möglichst nah an der Hinterkante vorteilhaft. Die optimale Ausblasrate liegt, für den Fall des Ausblasschlitzes angeordnet bei 90 % der Sehnenlänge, im Bereich von $u_b = 0,5$. Im Falle des DU 93-W-210 Profils fällt die Reduktion deutlich geringer aus, da bereits die Referenz eine vergleichsweise geringe Turbulenzintensität innerhalb der Grenzschicht aufweist. Die geringere Hinterkantenschallemissionen mindern daher das Optimierungspotential.

Die Studie zeigt, dass das Ausblasen eines sekundären Luftstroms im Bereich der Tragflügelhinterkante die (Hinterkanten-)Schallemissionen eines Tragflügelprofils reduzieren kann. Das Potential der Schallreduktion hängt vor allem von der Entwicklung der Grenzschicht stromauf der Hinterkante und damit von der Struktur der Turbulenzintensität unmittelbar an der Hinterkante ab.

Literatur

- [1] ISO: International Organization for Standardization, 2003, "Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure—Precision Methods for Anechoic and Hemi-Anechoic Rooms", ISO 3745: 2003
- [2] WINKLER, J., CAROLUS, T., 2009, "Concept, Design and Characterization of a Small Aeroacoustic Wind Tunnel Facility with Application to Airfoil Measurements", *Noise Control Engineering Journal*, 57(4), pp. 370-383.
- [3] Somers, D.M., *The S833, S834 and S835 Airfoils*, NREL/SR-500-36340, 2005.
- [4] TIMMER, W. A., VAN ROOIJ, R. P. J. O. M., 2003, "Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils", *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada.
- [5] DRELA, M., 1989, XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. University of Notre Dame.
- [6] GERHARD, T., CAROLUS, T., 2014, "Investigation of Airfoil Trailing Edge Noise with Advanced Experimental and Numerical Methods", *21st International Congress on Sound and Vibration*, Peking, China.