

Reduzierung des Eigengeräuschs von Tragflügeln durch Seitenplatten

Erik Schneebergen¹, Thomas Geyer², Ennes Sarradj¹

¹ TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, erik.w.schneebergen@tu-berlin.de / ennes.sarradj@tu-berlin.de

² jetzt: Institut für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe, thomas.geyer@dlr.de

Einleitung

Am freien Ende von dreidimensionalen Tragflügeln besteht die Möglichkeit, dass die Strömung nicht mehr dem Profilverlauf von Vorder- zur Hinterkante folgt, sondern um die Seitenkante von der Druck- in die Richtung der Saugseite umschlägt. Der dabei entstehende Wirbel kann in Interaktion mit der Profilkante vor allem im oberen Frequenzbereich breitbandig zum Eigengeräusch des Tragflügels beitragen [1, 2]. Eine Möglichkeit, diese Wirbelentstehung zu verhindern, ist das Anbringen einer Platte an der Seitenkante des Tragflügels, so dass die Strömung gezwungen ist dem Profil zu folgen und die Schallabstrahlung reduziert wird. Die Wirksamkeit dieses Ansatzes soll in diesem Beitrag für ein Tragflügelprofil gezeigt werden. Dafür werden Mikrofonarray-Messungen für geometrische Anstellwinkel zwischen 0° und 30° , sowie für Reynolds-Zahlen bezogen auf die Sehnenlänge von 75.000 bis 225.000 durchgeführt. Zusätzlich wird anhand einer Konfiguration der Einfluss der Seitenplatte auf das Strömungsfeld mit Hitzdrahtmessungen im Nachlauf an der Profilspitze untersucht.

Tragflügel und Seitenplatten

Das verwendete Profil ist ein gewölbter NACA4412-Tragflügel mit 70 mm Sehnenlänge und 140 mm Spannweite. Der Tragflügel ist auf einer Seite an einer drehbaren Platte befestigt, mit der der geometrische Anstellwinkel eingestellt werden kann. Die andere Seite befindet sich frei in der Strömung. Die drei betrachteten Seitenplatten [3] werden jeweils an das freie Ende angebracht und sind in Abbildung 1 zu sehen. Die Platten besitzen jeweils eine Dicke von 2 mm und die Kanten sind unbehandelt.

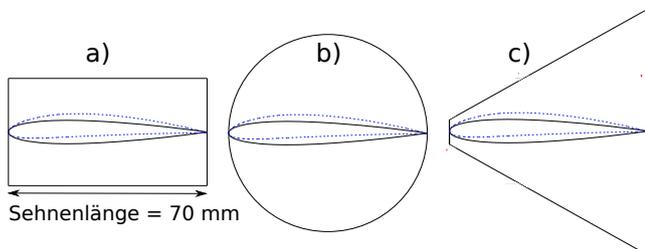


Abbildung 1: Seitenplattengeometrien, NACA 4412 blau gestrichelte Linie, Konturen: a) rechteckig (Höhe halbe Sehnenlänge), b) rund (Radius eine Sehnenlänge), c) Trapez (Höhe 0,1 bis 1,2 Sehnenlängen)

Da eine Berechnung des effektiven Anstellwinkels des Tragflügels mit Seitenplatte nicht möglich ist, werden

die Messungen beim gleichen geometrischen Anstellwinkel verglichen. Die aerodynamischen Untersuchungen von Riley [3] zeigen aber, dass der maximale Auftrieb durch die Seitenplatten erhöht wird. Für eine ausführlichere Beschreibung des Einflusses sei auf die Veröffentlichung von Schneebergen et al. [4] verwiesen.

Versuchsaufbau

Die Messungen wurden im aeroakustischen Windkanal der BTU Cottbus-Senftenberg durchgeführt [5]. Der schematische Versuchsaufbau der Mikrofonarray-Messungen ist in Abbildung 2 dargestellt. Die 47 1/4-Zoll Panasonic Mikrofonkapseln (WM-61A) sind in einer Aluminiumplatte in der Decke befestigt und die restlichen Wände und der Boden sind mit schallabsorbierendem Material ausgekleidet, das eine reflexionsfreie Umgebung bis zu einer unteren Grenzfrequenz von 125 Hz ermöglicht. Die Mikrofon-signale wurden für 40 Sekunden mit einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz aufgezeichnet und anschließend mit dem Acoular 19.02 Framework [6] und dem CLEAN-SC Beamforming-Algorithmus [7] ausgewertet. Dies ermöglicht nicht nur eine Lokalisierung der Schallquellen sondern erlaubt auch die pegelrichtige Integration über die Quellkarte. Zusätzlich wurde mit einem Raytracing-Ansatz der Einfluss der Düsenausströmung auf die Schallausbreitung berücksichtigt. Die verwendete Düse hat einen rechteckigen Querschnitt mit einer Breite von 28 cm und einer Höhe von 23 cm. Um den Einfluss

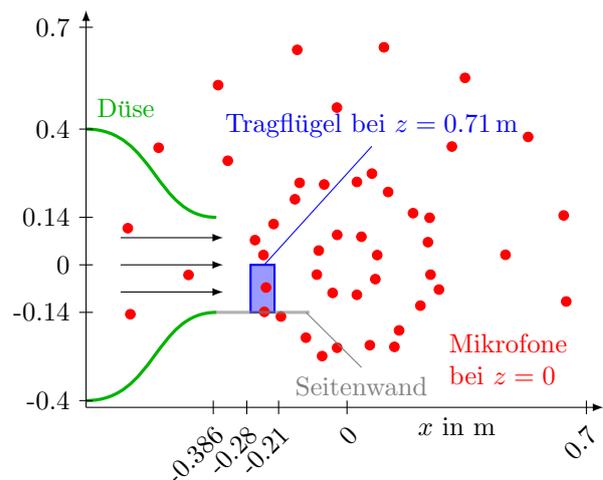


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau, Ansicht durch das Mikrofonarray in der Decke

der Seitenplatten auf das Strömungsfeld zu untersuchen, wurden in einer Ebene in 7 mm Abstand im Nachlauf der Tragflügelspitze 2D-Hitzdrahtmessungen für eine Kon-

figuration mit dem StreamLine Pro Anemometermodul von DANTEC Dynamics durchgeführt. In jedem Punkt werden die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und die Fluktuationsgrößen in Strömungsrichtung sowie senkrecht zu Hinterkante erfasst und daraus die Turbulenzintensität berechnet.

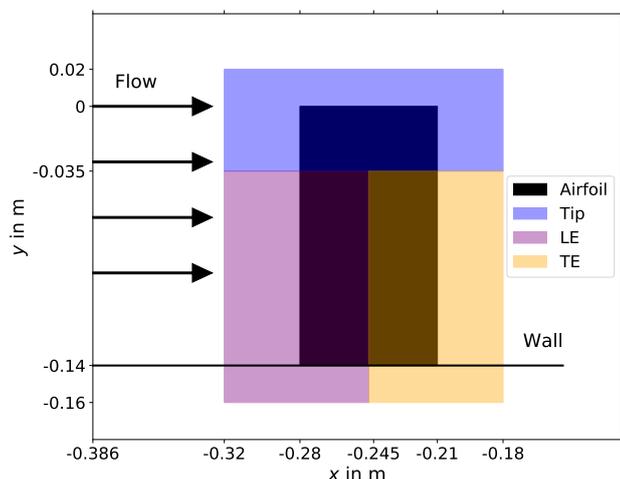


Abbildung 3: Integrationssektoren für Schalldruckpegelberechnung, Sicht von oben auf die Druckseite des Tragflügels (schwarz), LE (leading edge), TE (trailing edge), Abbildung aus [4]

Ergebnisse Akustikmessungen

Zunächst soll ein Überblick gegeben werden für welche Anstellwinkel und Strömungsgeschwindigkeiten das Anbringen der Seitenplatten zu einer Reduzierung des Eigengeräusches führt. Dafür wird der über den gesamten Tragflügel integrierte Schalldruckpegel zwischen Grundkonfiguration und einer Seitenplatte verglichen. Aus der Gesamtschalldruckpegeldifferenz der beiden Konfigurationen ergibt sich dann die Wirksamkeit. Die Integrationsgebiete sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Summe aus Vorder-, Hinterkante und Spitze ergibt den Gesamtpegel des Tragflügels.

Wie in Abbildung 4 zu sehen, führt das Anbringen der Seitenplatten vor allem bei höheren Anstellwinkeln zu einer Lärmreduzierung. Oberhalb von 12.5° führt das Anbringen der Seitenplatten zu einer deutlichen Lärmreduzierung, die für kleinere Reynolds-Zahlen größer ist. Für niedrigere Anstellwinkel verändert sich der Gesamtschalldruckpegel nur wenig. Der mit dem Anstellwinkel steigende Druckgradient führt dazu, dass die Wirbelentstehung bei der Umströmung der Seitenkante verstärkt wird. Dementsprechend wird die Schallabstrahlung durch die Seitenplatten nur reduziert, wenn dieser Mechanismus einen relevanten Anteil zum Gesamtpegel beiträgt. Außerdem wird ersichtlich, dass die Geometrie der Seitenplatte keinen großen Einfluss auf die Lärmreduzierung hat.

In Abbildung 5 sind die Leistungsdichtespektren für

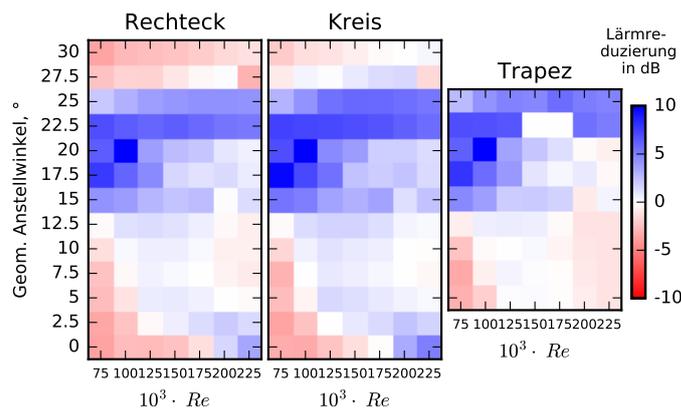


Abbildung 4: Gesamtschalldruckpegeldifferenz für die Seitenplatten für verschiedene Anstellwinkel und Reynolds-Zahlen von 1 kHz bis 20 kHz, blau bedeutet eine Lärmreduzierung und rot eine Lärmerhöhung

verschiedene Anstellwinkel dargestellt. Für die Grundkonfiguration ohne Seitenplatte ist eine breitbandige Erhöhung bei einer Strouhal-Zahl von etwa 13 vorhanden, die mit steigendem Anstellwinkel an Breite gewinnt. Bei 25° erstreckt sich diese Erhöhung über den gesamten betrachteten Frequenzbereich.

Für die Fälle mit Seitenplatte ist diese Erhöhung nicht vorhanden und die Geometrien zeigen sehr ähnliche Spektren. Die Trapezgeometrie zeigt allerdings bei $St = 8$ eine zusätzliche Pegelerhöhung, die auf die Wirbelablösung an der langen Hinterkante zurückzuführen sein könnte.

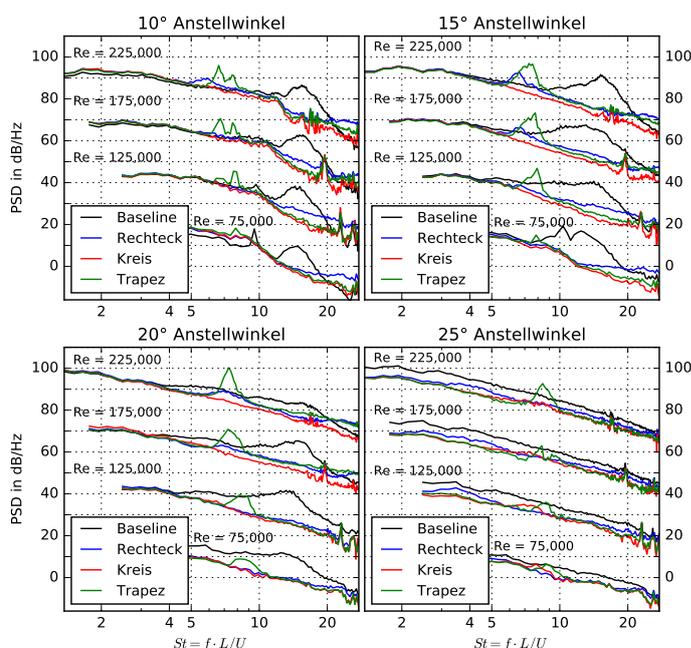


Abbildung 5: Leistungsdichtespektrum für Anstellwinkel von 10° , 15° , 20° und 25° für jede zweite Strömungsgeschwindigkeit und alle Seitenplattengeometrien, für jede Strömungsgeschwindigkeit sind 20 dB addiert worden um Überlappungen zu vermeiden

Zur Visualisierung der Quellgebiete entlang des Tragflügels werden in Abbildung 6 noch einmal die Gesamtschalldruckpegeldifferenzen für die runde Seitenplatte für die einzelnen Integrationsgebiete dargestellt. Es wird deutlich, dass die größte Lärmreduzierung im Bereich des freien Tragflügelendes erreicht wird und für ein großes Gebiet von Anstellwinkeln und Strömungsgeschwindigkeiten Lärminderung von 10 dB und mehr erreicht. Im Bereich der Vorder- und Hinterkante ergeben sich keine großen akustischen Verbesserungen und teilweise sogar höhere Pegel, wenn die Seitenplatte angebracht ist.

Für einen großen Bereich der Messmatrix kann eine Reduzierung des Eigengeräusches an der Spitze erreicht werden. Damit dies auch zu einer Reduzierung des Gesamtpegels führt, muss der Wirbelentstehungsmechanismus am freien Ende aber auch der relevante Schallentstehungsmechanismus sein.

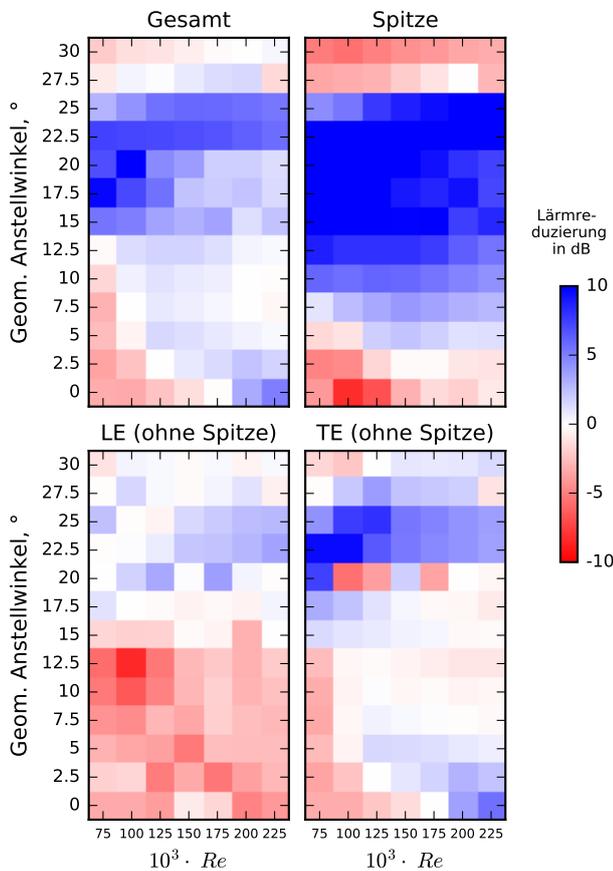


Abbildung 6: Gesamtschalldruckpegeldifferenz für runde Seitenplatte für verschiedene Anstellwinkel und Reynolds-Zahlen von 1 kHz bis 20 kHz, blau bedeutet eine Lärminderung und rot eine Lärmerhöhung, Integrationsgebiete in Abbildung 3 dargestellt

Der genaue Ort der Schallentstehung ist in den Quellkarten in Abbildung 7 zu finden. Die dargestellten Terzbänder entsprechen den relevanten Frequenzanteilen der breitbandigen Erhöhung. Für die Grundkonfiguration ist eine starke Quelle an der Hinterkante der Flügelspitze vorhanden. Bei angebrachter runder Seitenplatte ist diese

Quelle stark reduziert. Um die Ursachen dafür zu klären, wird im nächsten Abschnitt das Strömungsfeld betrachtet.

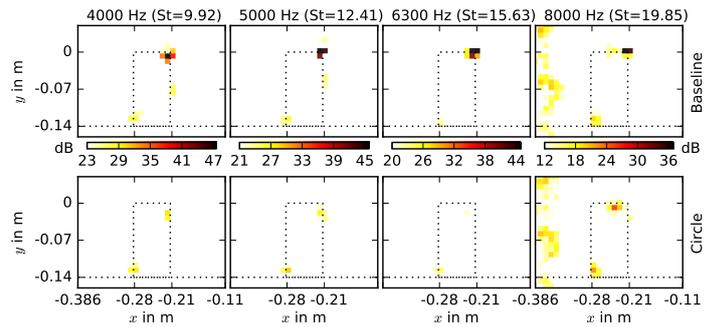


Abbildung 7: NACA 4412 Schallquellenkarten für Spitzenlärm relevante Terzbänder bei 15° Anstellwinkel und $Re=125.000$, oben Grundkonfiguration, unten mit runder Seitenplatte, schwarz gestrichelte Linie Tragflügel und Seitenwand, Strömung von links nach rechts, Abbildung aus [4]

Ergebnisse Hitzdrahtmessungen

In Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Hitzdrahtmessungen für einen Anstellwinkel von 15° und $Re=125.000$ für die äußeren 20 mm des Tragflügels dargestellt. Für diese Konfiguration ist eine breitbandige Erhöhung im Schalldruckpegelspektrum zu sehen und die zugehörigen Quellkarten sind in Abbildung 7 zu finden.

Im Wesentlichen sind zwei verschiedene Strömungsfelder zu sehen: Die Grundkonfiguration zeigt die höchste Turbulenzintensität entlang der Hinterkante und in einer Wirbelstruktur, die sich um die Seitenkante von der Druckseite auf die Saugseite herum entwickelt. Für die runde und eckige Seitenplatte hingegen befindet sich ein großes Gebiet höherer Turbulenzintensität oberhalb der Hinterkante und in der Nähe der Seitenplatte. In diesen Gebieten oberhalb der Hinterkante findet sich auch für die beiden mittleren Strömungsrichtungen ein Geschwindigkeitsdefizit, das darauf hindeutet, dass die Strömung ablöst. Außerdem wird in der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Auftriebsrichtung deutlich, dass die Seitenplatten den Transfer von Fluid von der Druck- auf die Saugseite reduzieren. Dadurch wird auch die Wirbelstärke reduziert und das Strömungsfeld auf der Saugseite weniger vom freien Ende beeinflusst. Die Strömung zeigt daher zwei dimensionale Eigenschaften und eine Strömungsablösung ist bis zum Tragflügelende zu sehen.

Fazit

Die akustischen Messungen im aeroakustischen Windkanal haben gezeigt, dass es bei der Umströmung eines NACA4412-Tragflügels bei höheren Anstellwinkeln zur Schallentstehung an der Hinterkante der Spitze kommt. Die Schallentstehung ist auf die Formation eines Wirbels bei der seitlichen Umströmung des Profils zurück zu führen und manifestiert sich als breitbandige Erhöhung im oberen Frequenzbereich des Spektrums. Das Anbringen einer Seitenplatte an das freie Ende des Tragflügels

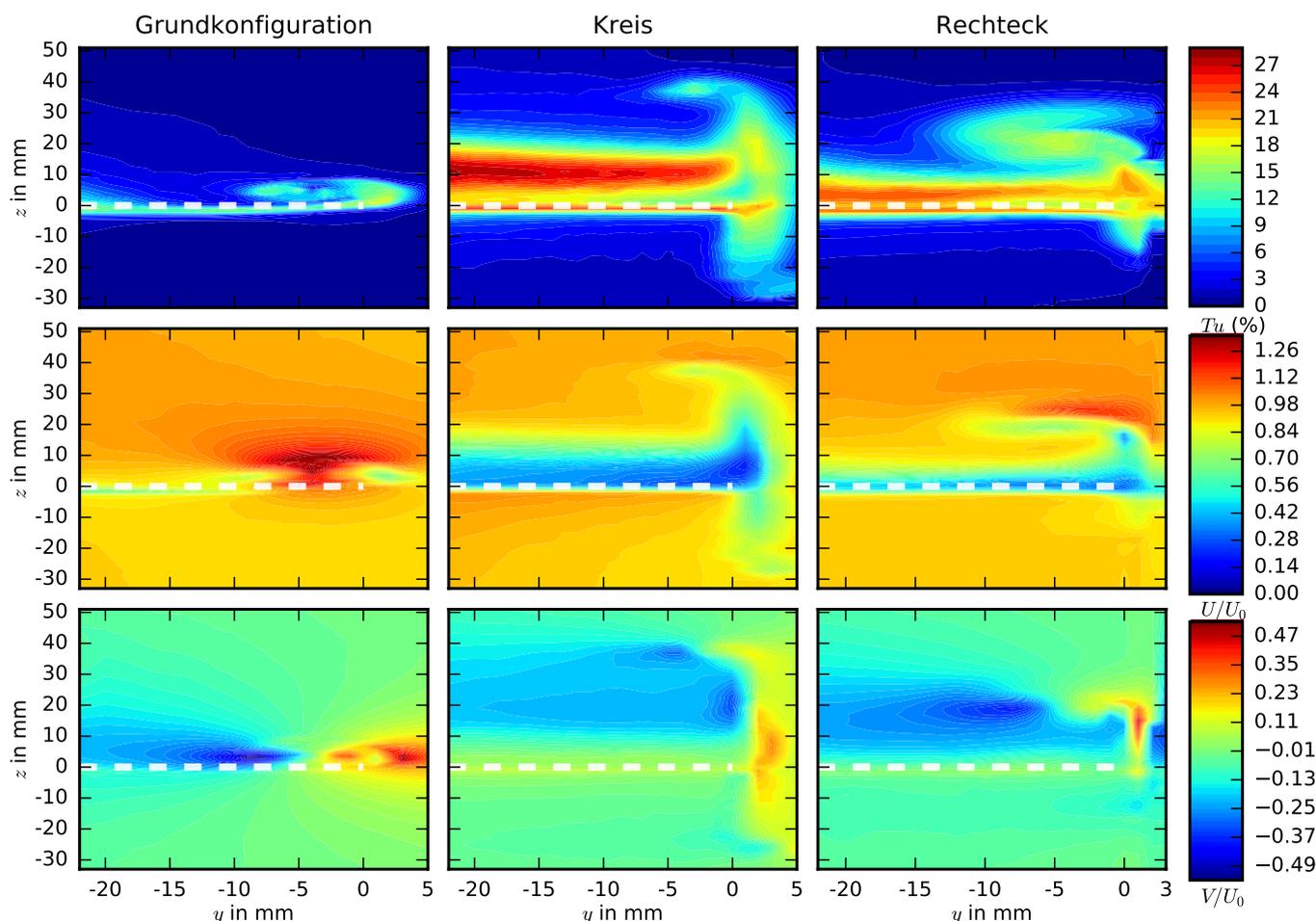


Abbildung 8: Turbulenzintensität, mittlere Strömungsgeschwindigkeit U und mittlere Geschwindigkeit W in Auftriebsrichtung, 15° Anstellwinkel, $Re=125.000$ [Messebene befindet sich 7 mm stromabwärts der Hinterkante, weiß gestrichelte Linie stellt Hinterkante dar, Wand bei $y = -140$ mm und Tragflügelspitze bei $y = 0$ mm]

kann das Eigengeräusch reduzieren. Diese Maßnahme ist vor allem bei höheren Anstellwinkeln effektiv, wenn die Schallentstehung an der Spitze einen großen Einfluss auf das gesamte Schalldruckpegelspektrum hat. Zusätzliche Hitzdrahtmessungen für eine Konfiguration haben gezeigt, dass die Seitenplatten die seitliche Umströmung von der Druck- zur Saugseite reduzieren und dadurch auch die Wirbelentstehung und die damit verbundene Schallabstrahlung vermindern. Die Geometrie der untersuchten Seitenplatte hat dabei keinen großen Einfluss auf die Schallabstrahlung, da alle den Fluidaustausch um das freie Ende reduzieren. Bei den Platten mit geraden Kanten entstehen jedoch noch zusätzliche Spitzen im Spektrum, so dass die runde Seitenplatte insgesamt die höchste Eigengeräuschreduzierung erreicht.

Literatur

- [1] Y. Guo (2011) Aircraft flap side ege noise modeling and prediction, 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference 5-8
- [2] D. J. Moreau, C. J. Doolan (2016) An experimental study of airfoil tip vortex formation noise, 2nd Australasian Acoustical Societies Conference, ACOUSTICS 2016 2, 1167–1176
- [3] D. R. Riley (1951) Wind-Tunnel Investigation and Analysis of the Effects of End Plates of the Aerodynamic Characteristics of an Unswept Wing, Technical Report
- [4] Schneehagen, E., Geyer, T. F., Sarradj, E., Moreau, D. J. (2021) Aeroacoustic noise reduction by application of end plates on wall-mounted finite airfoils. *Experiments in Fluids*, 62(5), 1–21, <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03204-9>
- [5] E. Sarradj, C. Fritzsche, T.F. Geyer, J. Giesler (2009) Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. *Applied Acoustics* 70, 1073–1080, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.02.009>
- [6] Sarradj, E. and Herold, G. (2017), A Python framework for microphone array data processing. *Applied Acoustics* 116, 50–58, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.015>
- [7] P. Sijtsma (2007) CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics* 6, 357–374