

## Vom Eulenflügel zum leisen Tragflügel

Thomas F. Geyer

BTU Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl Technische Akustik, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@b-tu.de

### Einleitung

Eulen sind allgemein für ihren nahezu lautlosen Flug bekannt, den sie neben ihrer geringen Fluggeschwindigkeit drei speziellen Eigenschaften ihres Gefieders verdanken: kleinen Haken an der Flügelvorderkante, Fransen an der Hinterkante sowie ein die Flügeloberfläche bedeckender, sehr weicher und luftdurchlässiger Flaum. Motiviert von diesen Anpassungen entstanden in den letzten Jahren eine Vielzahl von möglichen Techniken zur Lärminderung an Tragflügeln sowie an Schaufeln von Ventilatoren und Windrädern. Das betrifft sowohl die Schallentstehung durch die Interaktion einer turbulenten Zuströmung mit der Vorderkante des Profils (Vorderkantenschall) als auch die Schallentstehung durch die Wechselwirkung der profilleigenen Grenzschicht mit der Hinterkante (Hinterkantenschall).

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung des Fluggeräusches von Eulen im Vergleich zu dem nicht leise fliegenden Vogel vorgestellt. Das umfasst zum einen Messungen an Flügelpräparaten in einem aeroakustischen Windkanal, zum anderen Überflugmessungen an frei fliegenden Vögeln. Im zweiten Teil werden verschiedene Konzepte zur Reduktion des Umströmungsgeräusches an technischen Tragflügeln diskutiert. Zur Demonstration werden dabei verschiedene Beispiele aus vergangenen experimentellen Studien an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Senftenberg sowie aus anderen Arbeiten im Überblick gezeigt. Dazu gehören gezahnte Vorderkanten, Vorderkantenhaken sowie die Modifikation der Tragflügel mit porösen, strömungsdurchlässigen Materialien.

### Der leise Flug der Eulen

Der bekannte leise Flug der Eule ist in der speziellen Jagdstrategie dieser Raubvögel begründet: Auf einem Ast sitzend oder in geringer Höhe fliegend, benutzen sie ihr ausgesprochen feines Gehör [1], um Beutetiere (zum Beispiel Mäuse und andere kleine Nagetiere) aufzuspüren. Mit vergleichsweise geringer Fluggeschwindigkeit fliegen sie dann auf ihre Beute zu, die letzte Phase des Fluges nur noch im Gleitflug. Die Beutetiere können aufgrund des geringen Fluggeräusches die Annäherung der Eule erst sehr spät hören und haben dementsprechend keine Zeit mehr, um zu entkommen. Bild 1 zeigt beispielhaft das Foto einer Schleiereule.

### Messung des Fluggeräusches

Um das Fluggeräusch von Eulen, vor allem im Vergleich zu anderen, nicht leise fliegenden Vögeln, bestimmen zu können, sind grundsätzlich zwei Optionen möglich:



Bild 1: Foto einer Schleiereule (*Tyto alba*)

1. Die erste Option sind Messungen in einem Windkanal, der im besten Fall für akustische Messungen besonders geeignet ist. Obwohl es grundsätzlich möglich wäre, fliegende Eulen in einem aeroakustischen Windkanal zu untersuchen (zum Beispiel wurden vergleichbare Messungen von Wei et al. [2] an einer fliegenden Taube durchgeführt), würde das einen immensen Zeit- und Kostenaufwand bedeuten, da die Eulen erst entsprechend trainiert werden müssten und der Windkanal an solche Messungen angepasst werden müsste. Eine Messung an entsprechend präparierten Vögeln oder Flügeln ist daher zweckmäßiger.
2. Die zweite Möglichkeit besteht darin, Überflugmessungen an frei fliegenden Vögeln durchzuführen.

Die erste Option hat den wesentlichen Vorteil, dass die Messungen unter Laborbedingungen stattfinden, sie sind wiederholbar, entsprechende Einflussfaktoren (zum Beispiel Flügelanstellwinkel und Strömungsgeschwindigkeit) können gezielt und unabhängig voneinander variiert werden und die Ergebnisse sind jederzeit reproduzierbar. Messungen können grundsätzlich mit Einzelmikrofonen, aber auch mit entsprechend angepasster Mikrofonarray-technik durchgeführt werden. Letzteres erlaubt neben der Messung der Stärke der Schallentstehung auch die genaue Lokalisation der Schallquellen auf dem Flügel. Nachteilig ist bei der Messung an Flügelpräparaten, dass deren Form durch die Präparation fest vorgegeben ist und sich auch nicht, wie sonst bei einem frei fliegenden Vogel, aktiv an die jeweilige Flugsituation anpassen lässt. Ein präparierter Flügel kann daher stets nur als vereinfachtes Modell für



**Bild 2:** Aufbau für Messungen an Flügelpräparaten im aeroakustischen Windkanal [3]

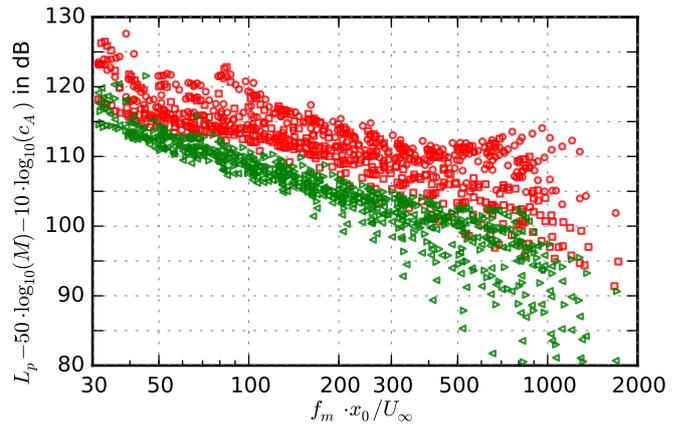
den Flügel eines frei fliegenden Tieres verstanden werden.

Die zweite Option bietet den klaren Vorteil, dass die Vögel natürliche Flugbedingungen vorfinden und die Flügelhaltung dementsprechend ihrem natürlichen Verhalten entspricht. Dafür sind die Messbedingungen sehr viel schwieriger zu kontrollieren, da unter anderem Wetterbedingungen und starke Nebengeräusche eine Rolle spielen können. Die verwendete akustische Messtechnik muss entsprechend sensitiv sein. Darüber hinaus ist es notwendig, die Geschwindigkeit und den Flugpfad der Vögel ebenfalls zu bestimmen.

Im Rahmen einer Studie an der BTU Cottbus - Senftenberg wurden beide Optionen verfolgt. Die Messaufbauten und Ergebnisse sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

### Windkanalmessungen an präparierten Flügeln

Windkanalmessungen wurden an insgesamt vier Spezies von Raubvögeln durchgeführt [3]. Als Vertreter der leise fliegenden Eulenvögel gehörten dazu je zwei Flügel der Schleiereule und des Waldkauzes, während für die nicht leise fliegenden Vögel je zwei Flügel des Bussards und des Sperbers verwendet wurden. Die Messungen fanden im aeroakustischen Freistrahwindkanal der BTU unter Verwendung einer kreissymmetrischen Düse mit einem Durchmesser der Austrittsfläche von 0,35 m statt. Die Maximalgeschwindigkeit mit dieser Düse beträgt etwa 40 m/s, der Turbulenzgrad vor der Düse ist mit weniger als 0,2 % sehr niedrig [4].



**Bild 3:** Ergebnis der Messungen an Flügelpräparaten im aeroakustischen Windkanal, Anstellwinkel  $0^\circ$  ( $\blacktriangleleft$  Schleiereule,  $\blacktriangleright$  Waldkauz,  $\bullet$  Bussard,  $\blacksquare$  Sperber)

Die akustischen Messungen wurden mit einem oberhalb der Flügel und außerhalb der Strömung positionierten Mikrofonarray durchgeführt. Das Mikrofonarray besteht aus 56 1/4-Zoll-Mikrofonkapseln, die bündig in eine Aluminiumplatte mit Abmessungen von 1,5 m  $\times$  1,5 m eingebaut sind. Die Auswertung erfolgte unter Verwendung des CLEAN-SC-Algorithmus [5] mit dem Python-basierten Softwarepaket *Acoular* [6]. Simultan zu den akustischen Messungen wurden mit einer Windkanalwaage die Auftriebskraft  $F_A$  und die Widerstandskraft  $F_W$  gemessen, die durch die Umströmung auf die Flügel wirken. Bezogen auf die mit einem 3D-Koordinatenarm gemessene umströmte Flügelfläche  $S$  lässt sich daraus der Auftriebskoeffizient

$$c_A = \frac{2 \cdot F_A}{\rho \cdot U_\infty^2 \cdot S} \quad (1)$$

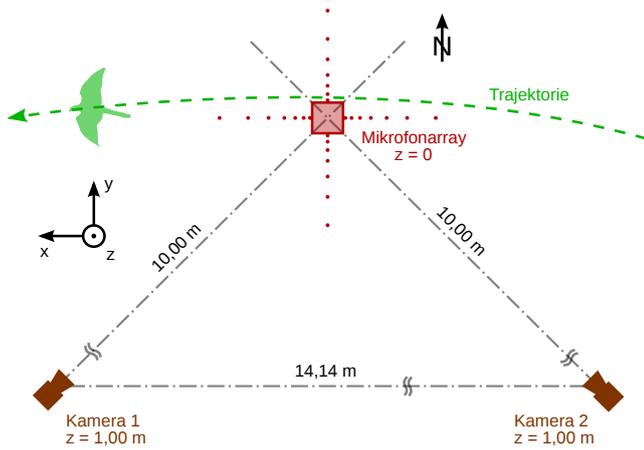
der Flügel bestimmen, wobei  $\rho$  die Fluidichte und  $U_\infty$  die Strömungsgeschwindigkeit sind. Bild 2 zeigt ein Foto des verwendeten Messaufbaus.

Bild 3 zeigt das Ergebnis der Messungen bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $0^\circ$ , die Strömungsgeschwindigkeit wurde im Bereich von 5 m/s bis 20 m/s variiert. Dabei wurde der mit Hilfe des Mikrofonarrays gemessene Schalldruckpegel entsprechend der Theorie zur Schallentstehung an einer halbumendlichen Platte [7] mit der fünften Potenz der Machzahl

$$M = \frac{U_\infty}{c_0} \quad (2)$$

skaliert ( $c_0$  ist die Schallgeschwindigkeit). Zusätzlich erfolgte eine Skalierung mit den gemessenen Auftriebskoeffizienten, das heißt die Pegel lassen sich als auftriebsbezogene Schalldruckpegel interpretieren. Die Darstellung erfolgt nicht als Funktion der Frequenz, sondern als Funktion der Strouhalzahl, die aus der Terzmittenfrequenz  $f_m$ , der Strömungsgeschwindigkeit  $U_\infty$  und einer konstanten Dimension von  $x_0 = 1$  m gebildet wurde.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die an den Flügeln der Eulen gemessenen Schalldruckpegel unter denen der anderen Vögel liegen, und zwar im gesamten Bereich der Strouhalzahlen. Das zeigt, dass Eulen bei gleicher



**Bild 4:** Skizze des für die Überflugmessungen verwendeten Messaufbaus [9]

Fluggeschwindigkeit bereits weniger Schall erzeugen. Da sie zudem deutlich langsamer fliegen als andere Raubvögel wie Bussarde, Falken und Sperber [8], trägt das noch zusätzlich zu einer geringeren Schallentstehung bei.

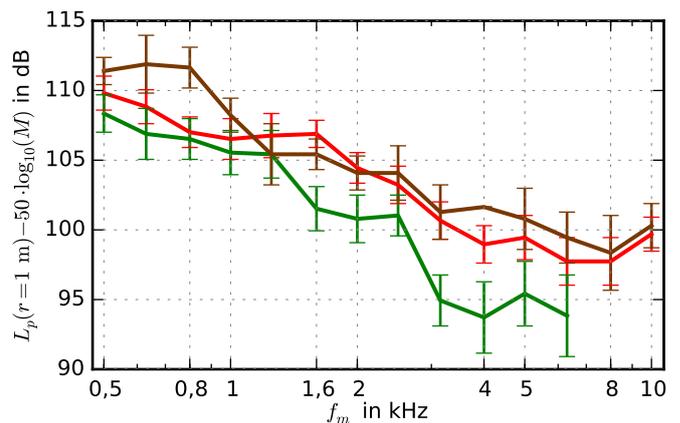
### Überflugmessungen an fliegenden Vögeln

Neben den Messungen an präparierten Flügeln im Windkanal wurden Überflugmessungen an frei fliegenden Vögeln durchgeführt [9]. Diese fanden im *Wildpark Johannismühle* statt. In einer zu diesem Wildpark gehörenden Falknerei finden tägliche Vorführungen statt, bei denen verschiedene Raubvögel zwischen zwei Falknerinnen hin- und herfliegen. Um das beim Gleitflug der Eule entstehende Geräusch messen und mit dem nicht leise fliegender Vögel vergleichen zu können, wurden verschiedene Vögel des Wildparks durch die Falknerinnen dazu gebracht, möglichst im Gleitflug und in geringer Flughöhe über ein am Boden aufgebautes Mikrofonarray zu fliegen. Dieses bestand aus insgesamt 92 Mikrofonen, von denen 64 in eine zentrale ebene Platte eingebaut waren und weitere 28 mit zusätzlichen seitlichen Auslegern befestigt wurden und zu einer Vergrößerung der Arraydimension führten (eine möglichst große Abmessung des Mikrofonarrays ist für die Messung bei tiefen Frequenzen vorteilhaft). Das Array wurde zur Tarnung mit grünen, sehr leichten und luftdurchlässigen Tüchern abgedeckt, um zu verhindern, dass die Raubvögel eventuell die darauf befestigten Messmikrofone zerstören. Simultan zu den akustischen Messungen wurde mit zwei Hochgeschwindigkeitskameras die Flugtrajektorie, das heißt der Flugpfad der Vögel, gemessen. Diese wird benötigt, um in der Datennachverarbeitung die Position des Vogels relativ zum Mikrofonarray sowie die Fluggeschwindigkeit zu ermitteln. Bild 4 zeigt eine Skizze des verwendeten Messaufbaus.

Insgesamt wurden Messungen mit sechs verschiedenen Vögeln durchgeführt. Als Vertreter der leise fliegenden Vögel waren das eine Schleiereule und zwei Uhus, für die nicht leise fliegenden Vögel wurden die Fluggeräusche eines Turmfalken, eines Sakerfalken und eines Wüstenbussards gemessen. Je nach Ausdauer der einzelnen Vögel wurde dabei versucht, eine möglichst große



**Bild 5:** Beispiel des Überfluges einer Schleiereule über das am Boden liegende Mikrofonarray

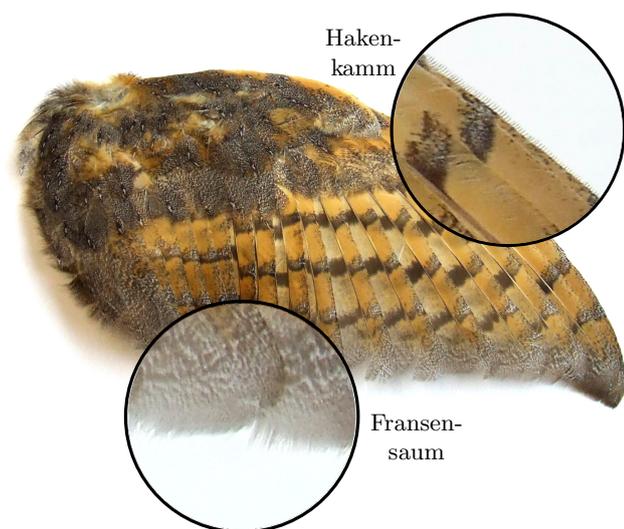


**Bild 6:** Ergebnisse der Überflugmessungen (■ Turmfalke,  $n = 31$ , ■ Wüstenbussard,  $n = 5$ , ■ Schleiereule,  $n = 14$ )

Anzahl an Überflugmessungen zu realisieren. Eine Messung war jedoch letztlich nur dann verwendbar, wenn (1) der Vogel über das Mikrofonarray flog, (2) der Vogel über dem Mikrofonarray nicht mit den Flügeln schlug und (3) der Vogel während des Überfluges nicht schrie. Von allen durchgeführten Messungen blieben so letztlich nur 31 Überflüge des Turmfalken, 5 Überflüge des Wüstenbussards und 14 Überflüge der Schleiereule zur Auswertung übrig. Bild 5 zeigt ein Foto eines Überfluges der Schleiereule.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 6 dargestellt. Dabei wird der gemessene Schalldruckpegel auf eine Entfernung von  $r = 1$  m normiert und wieder mit der fünften Potenz der Machzahl skaliert. Es ist ersichtlich, dass das Gleitflugergeräusch der Eule ab einer Frequenz von etwa 1,6 kHz deutlich unter dem der beiden anderen Raubvögel liegt, wobei der Pegelunterschied mit zunehmender Frequenz sogar noch zunimmt. Das zeigt, dass die Eule im Mittel zwar bei mittleren und hohen Frequenzen deutlich leiser fliegt, jedoch nicht bei tiefen Frequenzen. Dieses Resultat ist vor allem vor dem Hintergrund plausibel, dass das Gehör der typischen Beutetiere der Eule erst bei deutlich höheren Frequenzen empfindlich ist. Laut einer Studie von Markl und Ehret [10] weist zum Beispiel die Hörschwelle der Hausmaus erst zwischen 15 kHz und 20 kHz ein Maximum der Empfindlichkeit auf.

Beide Untersuchungen ergeben demnach, dass das beim



**Bild 7:** Präparierter Flügel einer Schleiereule

Gleitflug einer Eule entstehende Geräusch deutlich unter dem eines nicht leise fliegenden Raubvogels liegt.

Im folgenden Abschnitt sollen kurz die speziellen Eigenschaften des Eulengefieders vorgestellt werden, die neben der geringeren Fluggeschwindigkeit für diesen leisen Flug verantwortlich gemacht werden.

### Anpassungen des Eulenflügels

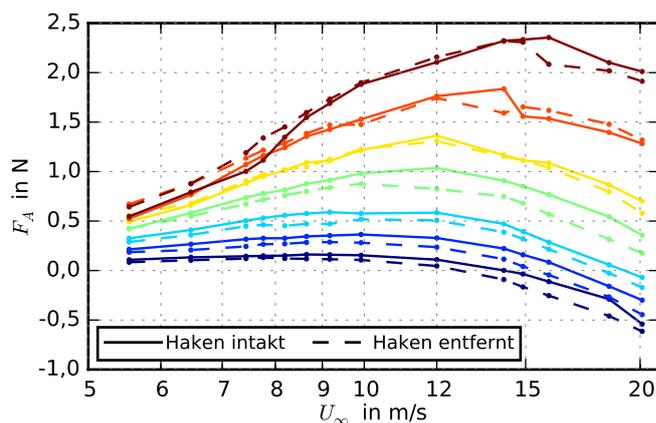
Eine erste umfassende Studie, die sich mit den speziellen Anpassungen des Eulenflügels an den leisen Flug beschäftigte, ist die Arbeit von Graham von 1934 [11]. Graham führt aus, dass drei spezielle Gefiederanpassungen für den leisen Flug der Eulen verantwortlich seien (siehe auch [12, 13, 14, 15, 16]):

1. ein sogenannter *Hakenkamm* an der Flügelvorderkante, bestehend aus den kleinen, festen, leicht nach oben gebogenen Federästen der äußersten Schwungfedern,
2. ein weicher, dünner und luftdurchlässiger *Fransensaum* an der Flügelhinterkante, bestehend aus sehr langen, dünnen Federfahnen und
3. ein sehr weicher, luftdurchlässiger und nachgiebiger *Flaum*, der die Ober- und Unterseite der Flügel bedeckt und als eine Art "Polsterung" verstanden werden kann.

Zur Verdeutlichung zeigt Bild 7 ein Foto des präparierten Flügels einer Schleiereule, bei welchem der Hakenkamm und der Fransensaum hervorgehoben wurden.

### Einfluss des Hakenkamms

Über den Hakenkamm kann aus der vorhandenen Literatur [8, 17, 18] die Vermutung entnommen werden, dass er vor allem aerodynamische Zwecke erfüllt. So sorgt er zum Beispiel dafür, dass die Strömung über den Flügel laminar bleibt, anliegt und darüber hinaus nach außen in Richtung der Flügelspitze abgelenkt wird. Vorhandene akustische Überflugmessungen von Kroeger et al. [17] und Neuhaus

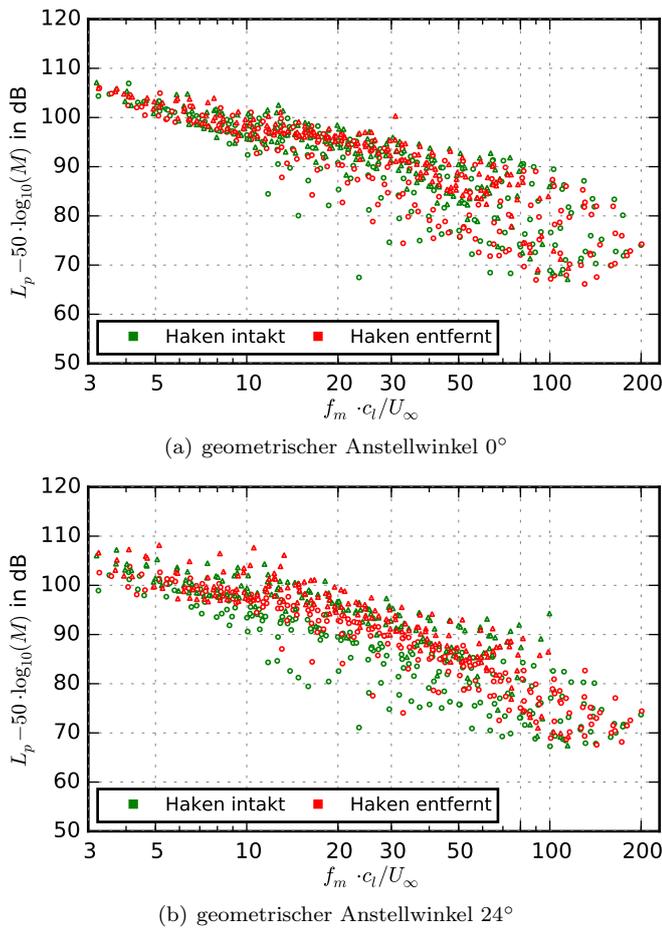


**Bild 8:** Einfluss des Hakenkamms auf die gemessene Auftriebskraft (geometrischer Anstellwinkel ■ 0°, ■ 4°, ■ 8°, ■ 12°, ■ 16°, ■ 20°, ■ 24°)

et al. [8] an Eulen mit und ohne Hakenkamm zeigen jedoch keinen signifikanten Einfluss auf das Fluggeräusch. Um diese Kenntnisse zu überprüfen, wurden im aeroakustischen Windkanal der BTU Cottbus - Senftenberg Messungen an zwei präparierten Flügeln einer Schleiereule durchgeführt, jeweils mit intaktem und entferntem Hakenkamm [20]. Dabei wurde erneut eine Düse mit einem Austrittsdurchmesser von 0,35 m verwendet. Ähnlich dem Vorgehen in [3] wurde die Schallentstehung mit einem oberhalb der Flügel befindlichen ebenen Mikrofonarray gemessen, während zeitgleich die auf die Flügel wirkenden Auftriebskräfte und Widerstandskräfte mit einem Sechskomponenten-Kraft-Momente-Sensor aufgenommen wurden. Zusätzlich ist die Wirkung des Hakenkamms auf die Verformung der Flügel vereinfacht durch die Messung des Versatzes der Flügelspitze bei der Biegung des Flügels mit Hilfe eines Gliedermaßstabs abgeschätzt worden. Messungen mit einer Fadensonde erlaubten zudem Aussagen zur oberflächennahen Strömung über die Flügel.

Der Einfluss des Hakenkamms auf die sich ergebende Auftriebskraft  $F_A$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit ist in Bild 8 für geometrische Anstellwinkel von 0° bis 24° dargestellt. Es ist erkennbar, dass durch den Hakenkamm eine zwar leichte, aber doch deutlich erkennbare Erhöhung des Auftriebs entsteht. Auf die Widerstandskraft war im Rahmen der Messgenauigkeit kein Einfluss feststellbar. Zudem zeigt Bild 8, dass der Flügel bei niedrigen Anstellwinkeln und hohen Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund des hohen Staudrucks seine Form änderte, was zu einer negativen Auftriebskraft führte.

Den Einfluss des Hakenkamms auf die Schallentstehung an den beiden Flügelpräparaten zeigt Bild 9. Dargestellt ist der mit der fünften Potenz der Machzahl skalierte Schalldruckpegel als Funktion einer auf der mittleren Sehnenlänge  $c_l$  der Flügel basierenden Strouhalzahl für zwei geometrische Anstellwinkel, 0° und 24°. Bei niedrigen Anstellwinkeln (wie in Bild 9(a)) konnte in den Experimenten keine akustische Wirkung festgestellt werden, während sich bei hohen Anstellwinkeln (Bild 9(b)) nur bei einem der zwei Flügel Exemplare eine leichte Verringerung bei Vorhandensein des Hakenkamms zeigte. Zur Zeit ist un-



**Bild 9:** Einfluss des Hakenkamms auf die Schallentstehung

klar, warum dieser Effekt nur bei einem Präparat auftrat. Ein klarer Trend lässt sich daher, in Übereinstimmung mit den Ergebnissen vergangener Studien, nicht ableiten. Dazu wären Messungen an weiteren Präparaten notwendig. Es ist allenfalls eine leichte Tendenz erkennbar, dass die Haken bei hohen Anstellwinkeln akustisch vorteilhaft sein könnten.

Die Untersuchung des Einflusses des Hakenkamms auf die Verformung der Flügel unter Last ergab, dass bei Vorhandensein der Haken die Biegung der Flügel bei hohen Anstellwinkeln geringfügig kleiner ist. Dieser Umstand sollte sich beim Flug der Eule positiv auf die Flugstabilität auswirken. Die Messungen mit der Fadensonde bei vorhandenem Hakenkamm bestätigten grundsätzlich die in der Literatur [17] gefundenen Aussagen zur Ablenkung der Strömung in Richtung Flügelspitze und zum eher laminaren Charakter dieser Strömung. Nach Entfernen des Kamms blieb in der vorliegenden Studie jedoch die Richtung der Strömung unverändert, war aber deutlich turbulenter. Auch diese Erkenntnis lässt vermuten, dass die Haken zur Flugstabilität beitragen.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen eine Vermutung zur Aufgabe des Hakenkamms abgeleitet werden: Da der Hakenkamm generell eine Erhöhung der Auftriebskraft und vor allem bei hohen Anstellwinkeln hinsichtlich der Flugstabilität und vermutlich auch der Schallentstehung Vorteile bietet, ist er vor allem für die kurze letzte Flugpha-

se direkt vor dem Zugriff auf die Beute von Bedeutung. In dieser Phase verringert die Eule ihre Fluggeschwindigkeit, um zu landen, und erhöht gleichzeitig den Anstellwinkel sehr stark, um zu bremsen und gleichzeitig mehr Auftrieb zu generieren.

### *Einfluss des Fransensaums*

Laut der vorhandenen Literatur [11, 14, 17] hat der Fransensaum mehrere Aufgaben: Zum einen erlaubt er einen graduellen Druckausgleich schon vor der eigentlichen Flügelhinterkante, zum anderen wird vermutet, dass sich durch den Fransensaum und auch generell die luftdurchlässige Beschaffenheit des Gefieders das Turbulenzspektrum innerhalb der turbulenten Grenzschicht zu niedrigeren Frequenzen verschiebt, was eine Schallreduktion bei hohen Frequenzen zur Folge hätte. Ebenfalls wird vermutet [19, 21], dass das Vorhandensein des Fransensaums dazu führt, dass der Schalldruckpegel beim Eulenflügel nicht mehr mit der fünften Potenz der Strömungsgeschwindigkeit skaliert (wie bei einem festen Flügel oder einem technischen Tragflügel), sondern mit der sechsten. Dabei wird argumentiert, dass diese Änderung zu einer Schallminderung bei mittleren und hohen Frequenzen führt.

Vorhandene akustische Überflugmessungen von Kroeger et al. von 1971 [17] zeigen jedoch keinen signifikanten Unterschied durch Vorhandensein des Fransensaums. Da jedoch beim Abschneiden der Fransen auch andere aerodynamische Parameter (wie zum Beispiel die gesamte Sehnenlänge des Flügels) geändert werden, erscheinen solche Messungen generell sehr schwierig.

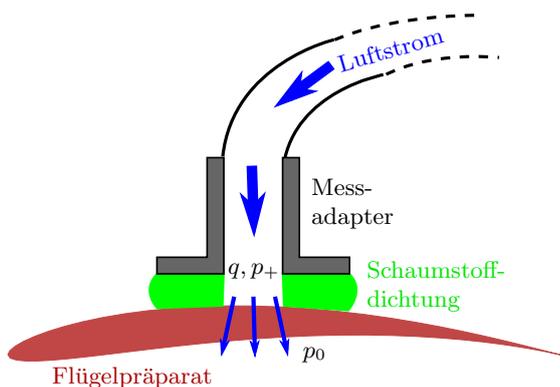
### *Einfluss des Gefiederflaums*

Über die Funktion des weichen Flaums, der die Oberfläche eines Eulenflügels bedeckt, wird vermutet, dass er die Turbulenz in der Grenzschicht dämpft und die Energie vor allem kleinerer Turbulenzwirbel in der Grenzschicht absorbiert [17, 18, 19]. Dies führt dann wiederum zu einer Reduktion der Schallentstehung vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen ab etwa 2 kHz [19], was sich gut mit den Ergebnissen aus den oben besprochenen Überflugmessungen deckt.

Obwohl dieser Flaum als nachgiebig, weich und sogar porös beschrieben wird, existieren jedoch in der Literatur keine quantitativen Angaben zur Beschaffenheit des Flaums bzw. des Eulengefieders insgesamt. Daher wurde im Rahmen einer vom leisen Eulenflug motivierten Studie an der BTU Cottbus - Senftenberg der Strömungswiderstand einer Reihe von präparierten Eulenflügeln gemessen und mit dem von Flügeln nicht leise fliegender Vögel verglichen. Der Strömungswiderstand eines offen-porösen Materials

$$R = \frac{\Delta p}{q} = \frac{p_+ - p_0}{q} \quad (3)$$

beschreibt den Widerstand des Materials gegen eine gleichförmige Durchströmung, also das Verhältnis des über der Probe abfallenden Drucks  $\Delta p$  zum Volumenstrom  $q$ , der die Probe durchströmt. Er ist einer der wesentlichen



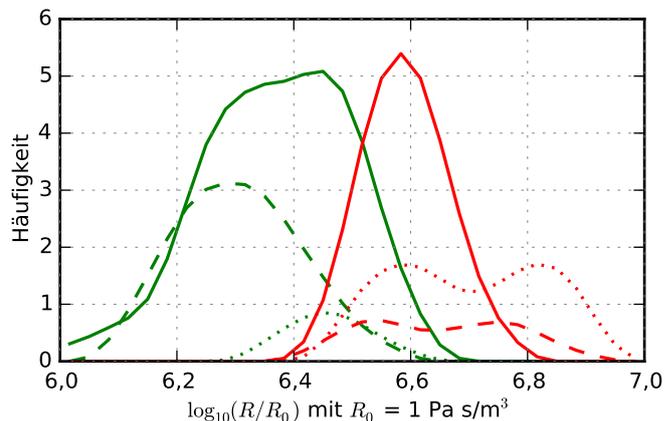
**Bild 10:** Skizze des für die Messung des Strömungswiderstands  $R$  der Flügelpräparate verwendeten Messaufbaus

**Tabelle 1:** Für die Messungen des Strömungswiderstands verwendete Präparate

Vogelart	Anzahl Flügel
Schleiereule	15
Waldkauz	8
Waldohreule	2
Bussard	9
Sperber	2
Taube	5

Parameter zur Beschreibung poröser, offenporiger Materialien. Üblicherweise wird der Strömungswiderstand nach DIN EN ISO 29053 [22] anhand zylindrischer Proben mit einem Durchmesser von 100 mm gemessen, die in einen entsprechenden Probenbehälter eingesetzt werden. Da das im vorliegenden Fall nicht möglich war (die Flügel sollten nicht zerstört werden), wurde ein spezieller Adapter konstruiert, um den Strömungswiderstand in situ zu messen. Dabei wird dieser direkt auf die Probe, das heißt den Flügel, aufgesetzt. Eine spezielle, luftundurchlässige Schaumstoffdichtung sorgt dafür, dass der Luftstrom nicht an der Oberseite austritt, sondern durch den Flügel hindurchströmt. Um eine statistisch signifikante Aussage zu erlauben, wurde von jeder untersuchten Spezies eine möglichst große Anzahl präparierter Flügel beschafft. Zusätzlich sind pro Flügel dann an jeweils acht über die Oberfläche verteilten Positionen Messungen durchgeführt worden. Eine Skizze des Messaufbaus ist in Bild 10 zu sehen, während Tabelle 1 eine Übersicht der untersuchten Flügelpräparate gibt.

Das Ergebnis der Messung des Strömungswiderstands der Flügelpräparate ist in Form eines Histogramms in Bild 11 dargestellt. Aufgetragen ist dabei die Häufigkeit, mit der ein bestimmter Messwert auftritt, als Funktion des gemessenen Strömungswiderstands  $R$  (im logarithmischen Maßstab). Es ist ersichtlich, dass die untersuchten Flügel der Eulen im Mittel in der Tat einen geringeren Strömungswiderstand aufweisen. In Verbindung mit der in den vorigen Abschnitten dargestellten Erkenntnis, dass Eulen leiser fliegen als andere Vögel, lässt sich daraus die Vermutung ableiten, dass



**Bild 11:** Gemessener Strömungswiderstand  $R$  der Flügelpräparate aus Tabelle 1 (■ Schleiereule, ■ Waldkauz, ■ Waldohreule, ■ Bussard, ■ Sperber, ■ Taube)

ein geringerer Strömungswiderstand für ein geringes Umströmungsgeräusch vorteilhaft ist.

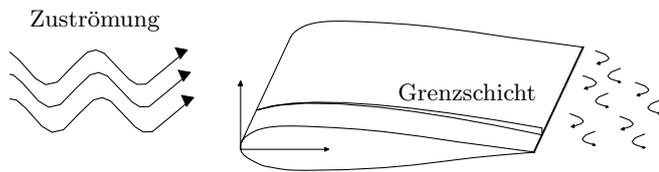
## Lärmminderung an technischen Tragflügelprofilen

Motiviert von den Gefiederanpassungen der Eule für einen leisen Flug gibt es eine Reihe von Modifikationen, mit denen das bei der Überströmung von technischen Tragflügeln (zum Beispiel an Ventilatoren, Windrädern oder Flugzeugen) entstehende Geräusch wirkungsvoll gemindert werden soll. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Beispiele für solche Lärmminderungsmechanismen vorgestellt.

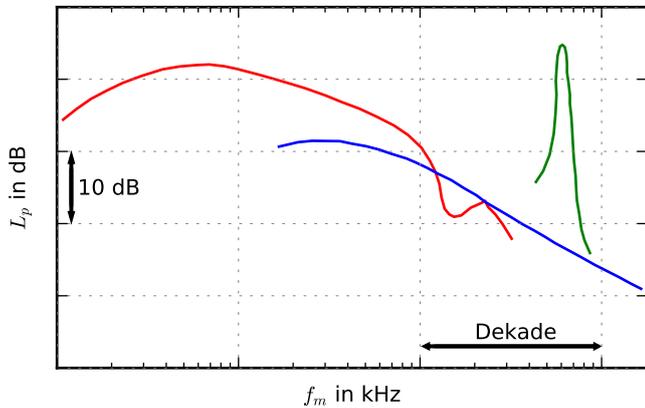
### Grundlagen

Befindet sich ein Tragflügelprofil in einer Strömung, dann kann es grundsätzlich zu verschiedenen Schallentstehungsmechanismen kommen (siehe Bilder 12 und 13) [23, 24]:

- Enthält die Zuströmung turbulente Strukturen (üblicherweise gekennzeichnet durch den Turbulenzgrad  $Tu$  als Maß für die Intensität und eine Längenskala  $\Lambda$  als Maß für die Größe der enthaltenen Turbulenzwirbel), so führen diese beim Auftreffen auf die Profilvorderkante zu fluktuierenden Kräften und es kommt zu einer Schallabstrahlung von der Vorderkante (Vorderkantenschall).
- Bei der Strömung über das Profil bildet sich eine Grenzschicht aus. Je nach Strömungsgeschwindigkeit, Anstellwinkel, Profilform, Profildimension und Rauigkeit der Oberfläche kann diese laminar oder turbulent sein. An der Profilhinterkante kommt es dann zu einer Wechselwirkung dieser profilleigenen Grenzschicht mit der Kante, was wiederum zu einer Schallabstrahlung führt (Hinterkantenschall).
- Handelt es sich um eine stumpfe Hinterkante, kommt es zusätzlich zu einer regelmäßigen Wirbelablösung auf Ober- und Unterseite des Profils. Das führt, wie bei einer Kármánschen Wirbelstraße im Nachlauf eines umströmten Zylinders, zur Entstehung von to-



**Bild 12:** Grundlagen der Schallentstehung an einem zweidimensionalen Tragflügelprofil nach [23]



**Bild 13:** Schematische Darstellung der unterschiedlichen spektralen Anteile bei der Schallentstehung an einem zweidimensionalen Tragflügel, nach [23] (Vorderkantenschall, Hinterkantenschall, Schall durch Wirbelablösung)

nalem Schall.

- Ist der Tragflügel dreidimensional (das heißt mit einer umströmten Flügelspitze), kommt es zusätzlich zu Querströmungen, was eine komplizierte Wechselwirkung der Grenzschicht mit der Flügelspitze zur Folge hat. Das kann grundsätzlich zu ähnlichen Schallentstehungsphänomenen wie bei der überströmten Hinterkante führen.
- Kommt es bei sehr hohen Profilanstellwinkeln zu Strömungsabriss, so resultiert das in einer zusätzlichen, sehr starken breitbandigen Schallentstehung.

Die im Folgenden beschriebenen Beispiele zur Schallminderung an Tragflügelprofilen beziehen sich im Wesentlichen auf die Schallentstehung an der Profilvorderkante durch die Wechselwirkung mit einer turbulenten Zuströmung, auf die Schallentstehung aufgrund der Interaktion einer turbulenten Grenzschicht mit der Profilhinterkante sowie auf die tonale Schallentstehung durch Wirbelablösung an der stumpfen Hinterkante. Das typische Spektrum des ins Fernfeld abgestrahlten Schalls bei diesen drei Mechanismen ist in Bild 13 schematisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Schallentstehung an der Vorderkante ein sehr dominanter Mechanismus ist, da der entstehende Schall üblicherweise sehr tieffrequent ist und vergleichsweise hohe Amplituden aufweist. Verglichen damit ist der an der Hinterkante entstehende breitbandige Schall eher hochfrequent und weniger stark. Der an der stumpfen Hinterkante entstehende tonale Schall, dessen Frequenz und Bandbreite von der Dicke der Hinterkante und der

Strömungsgeschwindigkeit abhängen, ist ebenfalls sehr dominant und aufgrund der Schmalbandigkeit besonders lästig.

Um die Schallentstehung an der Vorder- und Hinterkante technischer Tragflügel konstruktiv zu mindern, kommen verschiedene Maßnahmen in Frage. Diese sind zum Teil von den speziellen Adaptionen des Eulenflügels motiviert und beziehen sich meist entweder auf die Form der jeweiligen Kante oder auf deren Material. Zur Beeinflussung der Form zählt zum Beispiel die Modifikation der Kante mit einer Zähnelung, zur Beeinflussung des Materials zählen die Modifikationen der Kanten mit porösen oder elastischen Materialien.

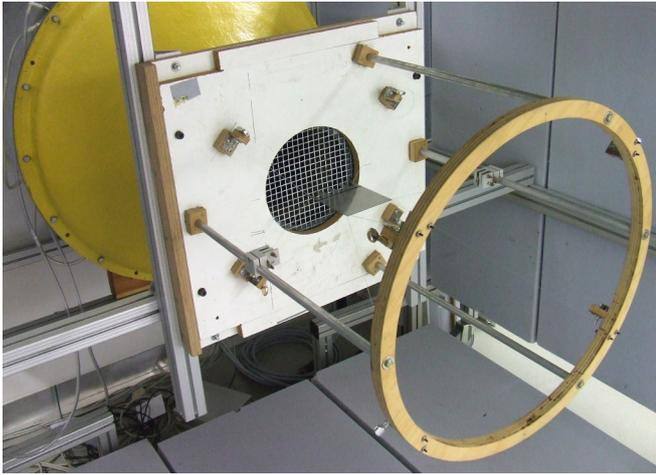
### Minderung der Schallentstehung durch gezackte Kanten

Eine inzwischen bereits vergleichsweise weit verbreitete Maßnahme ist die Ausstattung des Tragflügels mit einer gezackten, gezackten oder wellenförmigen Kante (siehe zum Beispiel [25, 26, 27, 28]). Um den Einfluss einer Zähnelung auf die Minderung von Vorderkantenschall zu untersuchen, wurden im aeroakustischen Windkanal der BTU Messungen an modifizierten ebenen Platten durchgeführt. Im Gegensatz zu einem Tragflügel mit endlicher Dicke ist eine solche Platte ein vereinfachtes Modell, bei dem sich kein Auftrieb bildet. Neben der demzufolge vernachlässigbaren Aerodynamik haben Messungen an einem solchen Modell den Vorteil, dass eine Reihe zum Teil sehr einfacher Schallvorhersagemodelle, wie zum Beispiel [29], zur Verfügung stehen (siehe auch [30]).

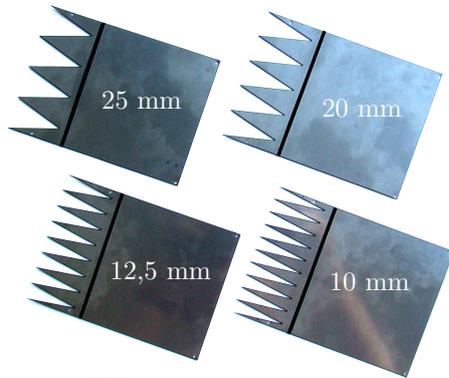
Für die Experimente wurden eine Reihe von ebenen Platten, deren Vorderkanten mit Zacken modifiziert waren, in einer Entfernung von 0,2 m vor der Düse des Freistrahwindkanals positioniert. Dazu wurden die Platten mit dünnen Saiten an einem speziellen Rahmen fixiert. Die benötigte Zuströmturbulenz wurde mit Hilfe von zwei regelmäßigen Lochgittern erzeugt, die direkt an der Austrittsfläche der Düse befestigt waren. Die Messung der Schallentstehung erfolgte mit einem oberhalb der Platten und außerhalb der Strömung positionierten 56-Kanal-Mikrofonarray. Die Auswertung erfolgte unter Verwendung des CLEAN-SC Beamforming-Algorithmus. Bild 14 zeigt ein Foto des verwendeten Messaufbaus mit Platte.

Die untersuchten Platten besaßen eine Zähnelung mit unterschiedlicher Wellenlänge von 10 mm, 12,5 mm, 20 mm und 25 mm, was dem Abstand von Spitze zu Spitze zweier benachbarter Zacken entspricht. Die Länge oder Amplitude der Zähne, das heißt die Hälfte der Entfernung von Wurzel zur Spitze, betrug bei allen Platten 20 mm. Als Referenz diente eine ebene Platte ohne Zacken, welche die gleiche Fläche wie die gezackten Platten besitzt. Die Sehnenlänge  $c_l$  der Platten betrug 0,12 m, die Spannweite  $b$  betrug ebenfalls 0,12 m. Alle Modelle waren mit einem sogenannten Trippstreifen (eine Art "Stolperdraht") versehen, um eine Transition der Grenzschicht von laminar zu turbulent künstlich herbeizuführen. Ein Foto der mit Zacken modifizierten Platten ist in Bild 15 zu sehen.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 16 zu se-



**Bild 14:** Für die Messungen an ebenen Platten mit gezackter Vorderkante verwendeter Messaufbau [30]

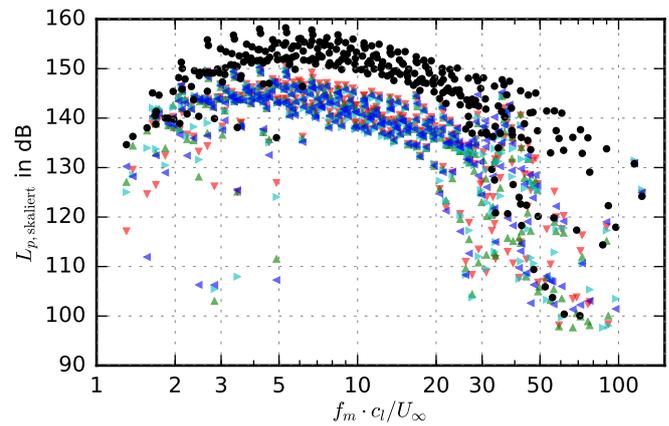


**Bild 15:** Mit Zacken modifizierte ebene Platten (gegeben ist die Wellenlänge der Zacken)

hen. Dabei wurde der gemessene Schalldruckpegel in Anlehnung an das Schallvorhersagemodell von Amiet [31] mit der fünften Potenz der Machzahl, dem Quadrat des Turbulenzgrads und der integralen Längenskala in Strömungsrichtung,  $\Lambda_x$ , skaliert:

$$L_{p,\text{skaliert}} = L_p - \left[ 50 \log_{10}(M) + 20 \log_{10}(Tu) + 10 \log_{10} \left( \frac{\Lambda_x}{c_t} \right) \right] \text{ dB.} \quad (4)$$

Der so skalierte Schalldruckpegel wurde als Funktion der sehnenlängenbasierten Strouhalzahl aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass alle Varianten der Zähnelung zu einer deutlichen Reduktion des Vorderkantenschalls von bis zu 10 dB führen. Unterschiede zwischen den Varianten sind nicht erkennbar, was sich jedoch mit der geringen Spannweite der Modelle und der damit einhergehenden Beschränkung auf mittlere und hohe Frequenzen ab etwa 800 Hz erklären lässt. Darüber hinaus ist bekannt, dass bei ausreichend spitzen Zacken die Wellenlänge nur einen leichten Einfluss auf die mögliche Schallminderung hat [32].



**Bild 16:** Nach Gl. (4) skaliertes Schalldruckpegel der ebenen Platten mit gezackten Vorderkanten (Wellenlänge  $\blacktriangledown$  25 mm,  $\blacktriangle$  20 mm,  $\blacktriangleleft$  12,5 mm,  $\blacktriangleright$  10 mm),  $\bullet$  Referenzplatte



**Bild 17:** Foto eines mit abwechselnd 20 mm und 12 mm langen, gebogenen Vorderkantenhaken modifizierten Tragflügelmodells [33]

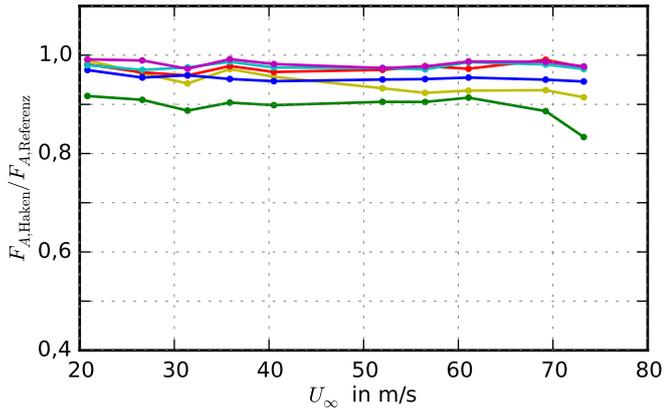
### Minderung der Schallentstehung durch Vorderkantenhaken

In einer weiteren experimentellen Studie wurde der Effekt von Hakenstrukturen, die an der Vorderkante eines Tragflügelprofils befestigt waren, auf die Aerodynamik und die Vorderkantenschallentstehung experimentell untersucht [33]. Zur Verwendung kam ein NASA/Langley LS(1)-0413-Profil, was üblicherweise bei Windrädern Verwendung findet, mit einer Sehnenlänge von 0,2 m. Die Vorderkantenhaken wurden mit 0,7 mm dicken Stahlspindeln realisiert, die fest in vorgefertigte Löcher in der Profilvorderkante gesteckt wurden. Bild 17 zeigt beispielhaft ein Foto eines der untersuchten Tragflügelmodelle, während Tabelle 2 einen Überblick über die verwendeten Varianten der Vorderkantenhaken gibt. Als Referenz diente in allen Messungen ein Tragflügelmodell derselben Geometrie.

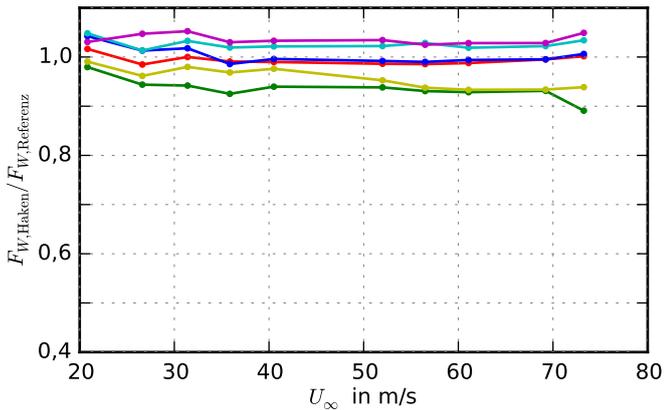
Die zur Erzeugung von Vorderkantenschall benötigte Zustromturbulenz wurde erneut mit Hilfe zweier Turbulenzgitter erzeugt, die direkt an der Düse befestigt wurden. Neben der Messung der Schallerzeugung mittels Mikrofonarray wurden simultan die entstehenden Auftriebs- und Widerstandskräfte mit einer Windkanalwaage gemessen. Die Auswertung der akustischen Messungen erfolgte erneut mit Hilfe des CLEAN-SC-Algorithmus.

**Tabelle 2:** Überblick über verwendete Hakenstrukturen

Länge in mm	Abstand in mm	Form
20	7,6	gerade
12	7,6	gerade
20 / 12 wechselnd	3,8	gerade
20	7,6	gebogen
12	7,6	gebogen
20 / 12 wechselnd	3,8	gebogen



(a) Normierte Auftriebskraft

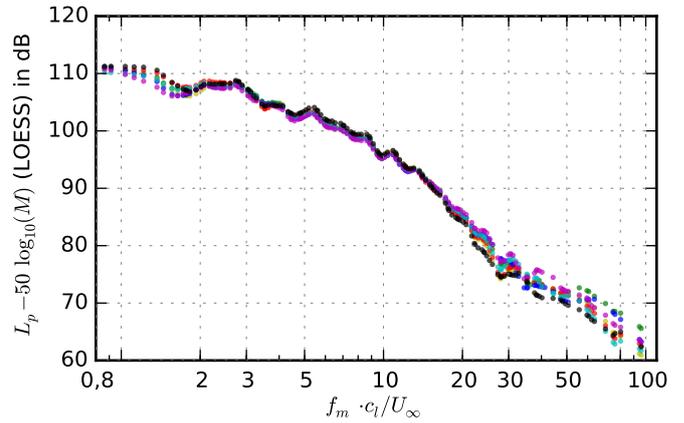


(b) Normierte Widerstandskraft

**Bild 18:** Einfluss der Haken auf die aerodynamischen Kräfte bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $6^\circ$  (■ 20 mm gerade, ■ 12 mm gerade, ■ 20 mm/12 mm gerade, ■ 20 mm gebogen, ■ 12 mm gebogen, ■ 20 mm/12 mm gebogen)

Die gemessenen Auftriebs- und Widerstandskräfte der modifizierten Tragflügel sind in Bild 18 dargestellt, normiert mit den Messwerten des Referenztragflügels. Es ist erkennbar, dass der Einfluss der Haken auf die Aerodynamik nur sehr gering ist. Der maximale Verlust an Auftrieb beträgt im Mittel etwa 10 %, während er für viele Varianten sogar deutlich geringer ist. Im besten Fall beträgt der Verlust an Auftrieb nur etwa 3 %.

Die Auswertung der Akustikmessungen ergab leider ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede bezogen auf den Referenztragflügel. Um diese besser sichtbar zu machen, wurden die entstehenden Punktwolken (skalierte Schalldruck-

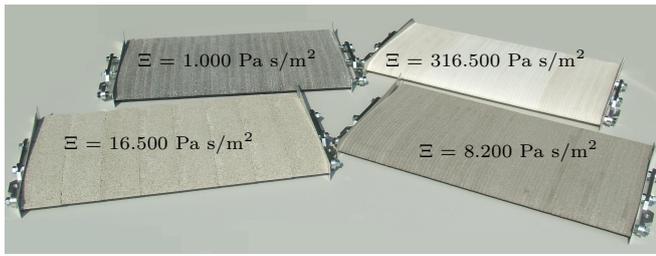


**Bild 19:** Einfluss der Haken auf die Schallentstehung bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $6^\circ$ , gemessene Schalldruckpegel geglättet mit einem LOESS-Algorithmus (● 20 mm gerade, ● 12 mm gerade, ● 20 mm/12 mm gerade, ● 20 mm gebogen, ● 12 mm gebogen, ● 20 mm/12 mm gebogen, ● Referenz)

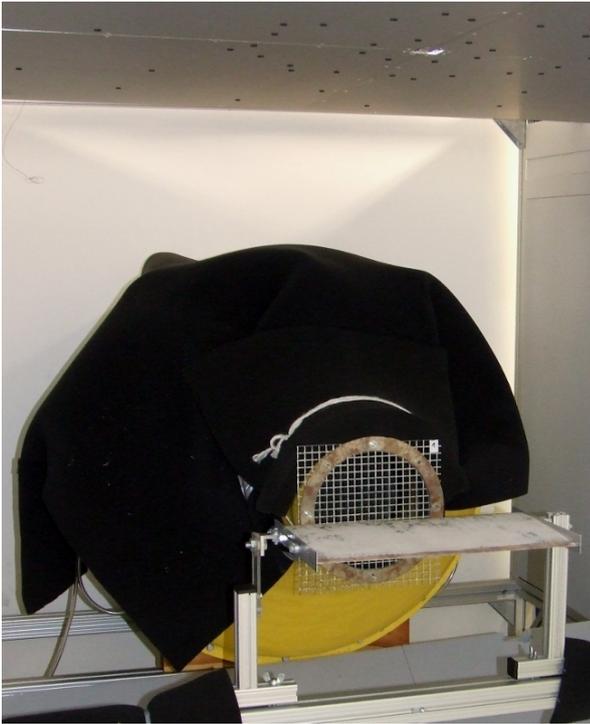
pegel in Abhängigkeit der sehnenlängenbasierten Strouhalzahl) mit einem LOESS-Algorithmus (*locally weighted scatterplot smoothing*) [34] geglättet. Bild 19 zeigt die entsprechend geglätteten, mit der fünften Potenz der Machzahl skalierten Schalldruckpegel. Es ist ersichtlich, dass die Vorderkantenhaken zu einer leichten Reduktion der Schallentstehung bei tiefen Frequenzen und Strouhalzahlen führen, während es bei sehr hohen Frequenzen zu einer Zunahme der Schallemission kommt. Diese Zunahme könnte generell zwei Ursachen haben: (1) Die umströmten Haken könnten selber Schall erzeugen und (2) die Haken "zerkleinern" die in der Zuströmung enthaltenen Turbulenzballen, was zu einer Verschiebung der Schallentstehung von tiefen zu hohen Frequenzen führen würde. Da tieffrequenter Schall jedoch energiereicher und schwerer zu mindern ist als hochfrequenter Schall, erscheint eine weitere Untersuchung solcher Hakenstrukturen durchaus sinnvoll.

### Minderung der Schallentstehung durch poröse Materialien

Neben der Beeinflussung der Schallentstehung durch eine Beeinflussung der Form des Tragflügels ist eine weitere Möglichkeit die Modifikation des Materials. Auch dazu gibt es bereits eine Reihe von Untersuchungen (zum Beispiel [35, 36, 37, 38]). In einer umfangreichen experimentellen Studie wurde an der BTU die Schallentstehung an Tragflügelmodellen aus porösen Materialien untersucht. Das betrifft sowohl die Schallentstehung an der Profilvorderkante bei turbulenter Zuströmung [39, 40] als auch die an der Profilhinterkante bei quasi-laminarer Zuströmung [41, 42, 43]. Dabei waren die Tragflügelmodelle in einem ersten Ansatz komplett aus offen-porösen Materialien gefertigt. Die verwendeten Materialien, zum Beispiel Kunststoff- oder Metallschäume, Gummigranulate oder Blähglasgranulat, wurden dabei durch ihren längenbezogenen Strömungswiderstand  $\Xi$  gekennzeichnet. Dieser ist nach Norm [22] an zylinderförmigen Proben mit einem Durchmesser von 100 mm gemessen worden. Ziel der Studie war, den Einfluss des längenbezogenen



**Bild 20:** Beispielfoto vier verschiedener poröser Tragflügelmodelle

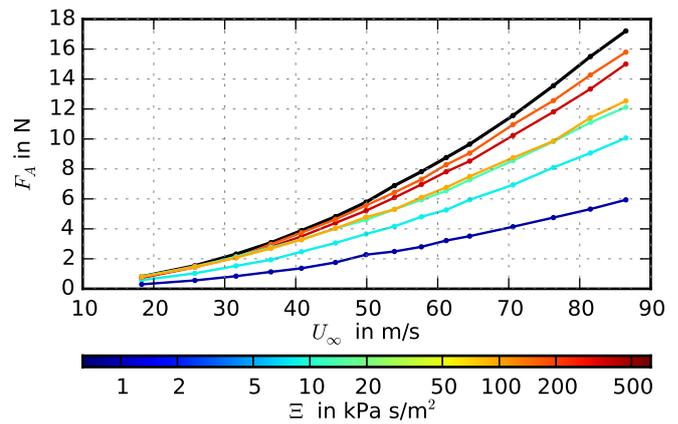


**Bild 21:** Zur Vorderkantenschallmessung verwendeter Messaufbau im aeroakustischen Windkanal (oberhalb des Aufbaus ist das ebene Mikrofonarray zu sehen; die Düse ist zur Vermeidung von Schallreflektionen mit Schaumstoff abgedeckt) [39, 40]

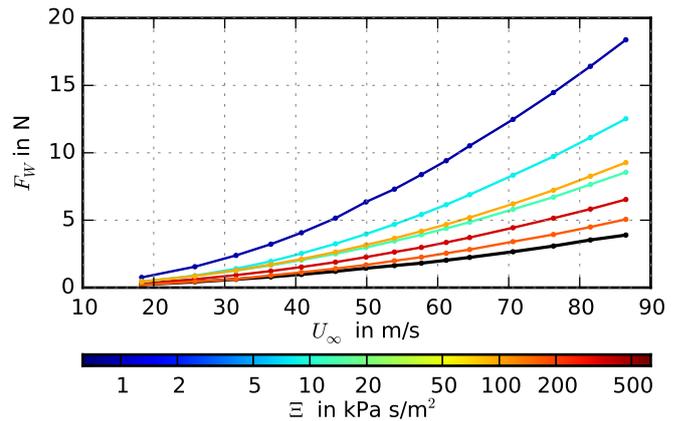
Strömungswiderstands auf die Aerodynamik sowie die Schallentstehung der Profile zu bestimmen. Daher wurde versucht, eine möglichst große Anzahl von Materialien mit verschiedenen längenbezogenen Strömungswiderständen zu erhalten. Letztlich besaßen die verwendeten Materialien längenbezogene Strömungswiderstände von etwa  $700 \text{ Pa s/m}^2$  bis  $506400 \text{ Pa s/m}^2$ .

Die untersuchten Tragflügel waren vom Typ SD7003 [44], mit einer Sehnenlänge von 235 mm und einer Spannweite von 400 mm. Zur Herstellung der porösen Tragflügel wurden aus den Platten porösen Materials einzelne "Tragflügelscheiben" per Wasserstrahlschneiden ausgeschnitten und schließlich in Spannweitenrichtung zu kompletten Tragflügeln zusammengesetzt. Bild 20 zeigt beispielhaft ein Foto von vier porösen Tragflügelmodellen.

Die Messungen fanden im aeroakustischen Windkanal der BTU Cottbus - Senftenberg statt. Die verwendete Düse hat einen Austrittsdurchmesser von 0,2 m,



(a) Gemessene Auftriebskraft

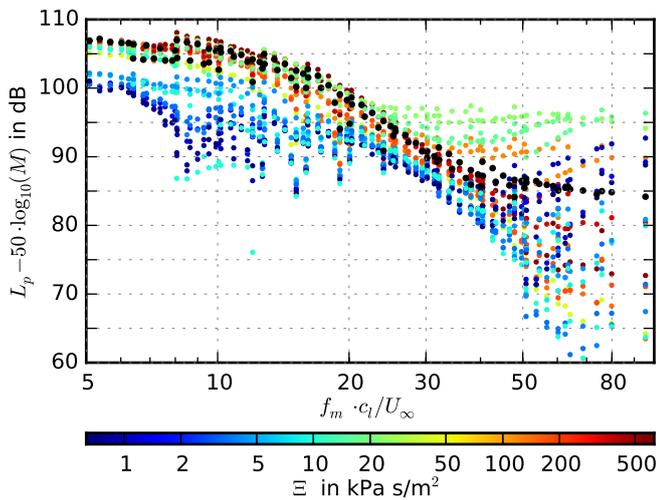


(b) Gemessene Widerstandskraft

**Bild 22:** Einfluss der porösen Beschaffenheit auf die Auftriebskraft  $F_A$  und die Widerstandskraft  $F_W$  bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $4^\circ$  (farbig: poröse Tragflügel, ■ Referenztragflügel)

das heißt die seitlichen Halterungen der Tragflügel befanden sich außerhalb der Strömung. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit mit dieser Düse liegt bei etwa 95 m/s, während der Turbulenzgrad direkt vor der Düse ohne zusätzliche Turbulenzgitter weniger als 0,1 % beträgt. Für die Untersuchung von Vorderkantenschall wurden verschiedene Turbulenzgitter unterschiedlicher Maschengröße zur Erzeugung der benötigten Zuströmturbulenz verwendet. Die Akustikmessungen erfolgten wieder mit einem außerhalb der Strömung positionierten Mikrofonarray, während gleichzeitig die aerodynamischen Kräfte mit einer Windkanalwaage gemessen wurden. Bild 21 zeigt ein Foto des zur Vorderkantenschallmessung verwendeten Messaufbaus.

Die Ergebnisse der aerodynamischen Messungen sind in Bild 22 für eine Auswahl poröser Tragflügelmodelle dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit steigendem längenbezogenen Strömungswiderstand  $\Xi$  der Materialien die Auftriebskraft  $F_A$  steigt. Da ein niedriger längenbezogener Strömungswiderstand in der Regel mit größeren Poren einhergeht, nimmt die Rauigkeit der Oberfläche der porösen Tragflügel mit abnehmendem  $\Xi$  zu. Das führt wiederum zu einer Zunahme der aerodynamischen Widerstandskraft  $F_W$ .

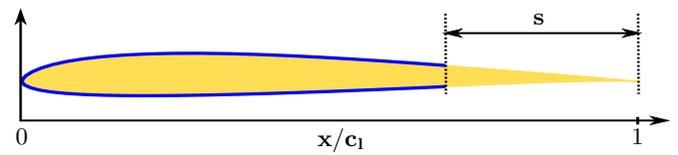


**Bild 23:** Gemessener Vorderkantenschalldruckpegel der porösen Tragflügel bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $0^\circ$  (farbig: poröse Tragflügel, ● nicht poröser Referenztragflügel)

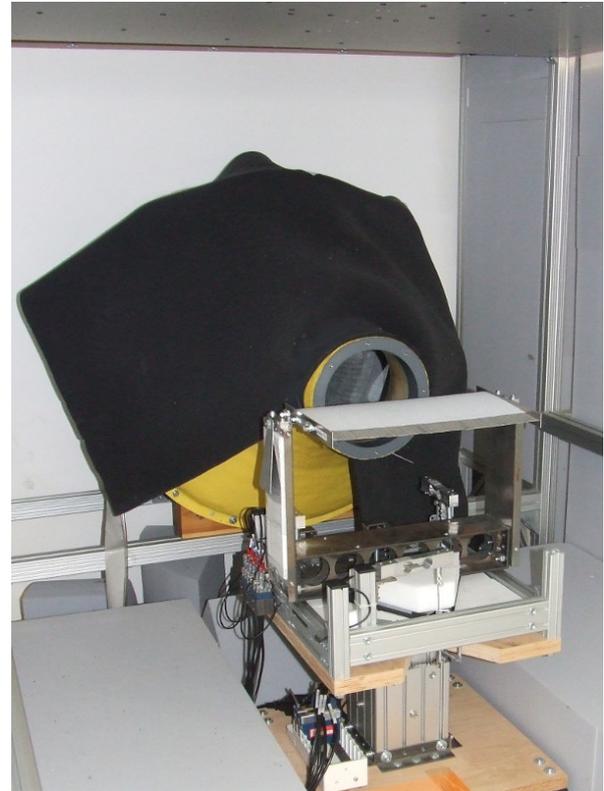
Den gemessenen, mit der fünften Potenz der Machzahl skalierten Schalldruckpegel der porösen Tragflügel in turbulenter Zuströmung als Funktion der sehnenlängenbasierten Strouhalzahl zeigt Bild 23. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Modifikation der Tragflügelmodelle mit porösem Material zu einer deutlichen Schallreduktion vor allem im Bereich niedriger Strouhalzahlen führen kann. Das gilt vor allem für Materialien mit einem niedrigen längenbezogenem Strömungswiderstand. Große Poren scheinen bei der Reduktion von Vorderkantenschall vorteilhaft zu sein, was auf das Verhältnis von Wirbelgröße der Zuströmung zu Porengröße als wichtigen Parameter schließen lässt. Bei hohen Strouhalzahlen zeigt sich eine erhöhte Schallentstehung im Vergleich zum nichtporösen Referenzprofil, was vermutlich auf eine Schallentstehung durch die Überströmung der rauen Profilloberfläche (Rauigkeitslärm) zurückzuführen ist.

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss der porösen Beschaffenheit auf die mögliche Minderung von Hinterkantenschall untersucht. Dazu wurde das Turbulenzgitter entfernt, so dass die Zuströmung quasi laminar ist und kein nennenswerter Schall an der Profilverderrkante mehr entsteht. Um die akustischen Vorteile der porösen Tragflügelmodelle mit den aerodynamischen Vorteilen eines nichtporösen Tragflügels zu verbinden, wurden die vorhandenen vollporösen Tragflügel zum Teil mit einer dünnen, luftundurchlässigen Folie abgedeckt (siehe Bild 24). Auf diese Weise entstanden teilporöse Profile mit einem auf die Sehnenlänge bezogenen porösen Anteil  $s$  von 5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 50 % und 100 % (vollporös). Bild 25 zeigt ein Foto des verwendeten Messaufbaus mit einem teilweise abgeklebten Tragflügelmodell aus Metallschaum.

Der Einfluss der porösen Ausdehnung auf die aerodynamischen Kräfte ist in Bild 26 dargestellt. Darin ist wie erwartet zu erkennen, dass die Auftriebskraft mit sinkender Ausdehnung  $s$  des porösen Materials steigt, während die Widerstandskraft mit sinkendem  $s$  abnimmt.



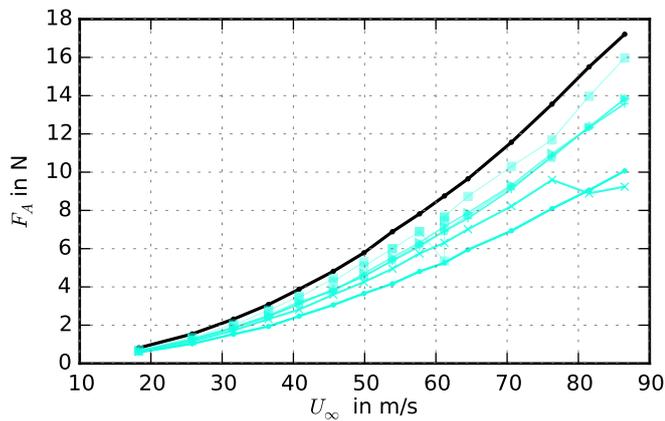
**Bild 24:** Skizze eines teilporösen Tragflügelprofils, bei dem der vordere Teil mit einer dünnen, luftundurchlässigen Folie abgedeckt ist [43]



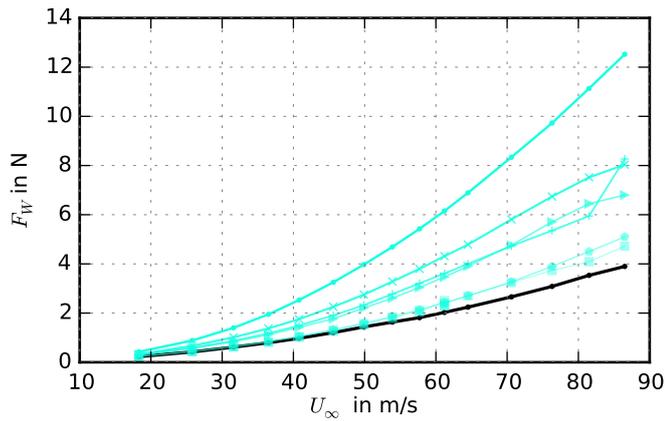
**Bild 25:** Für die Hinterkantenschallmessungen an teilporösen Profilen verwendeter Aufbau im aeroakustischen Windkanal [43]

Eine Möglichkeit, die aerodynamische Leistungsfähigkeit der teilporösen Tragflügel bei der Auswertung der Schallentstehung zu berücksichtigen, ist, die gemessenen Schalldruckpegel auch unter Zuhilfenahme aerodynamischer Parameter zu skalieren. Im vorliegenden Fall wurden die mit Hilfe des orthogonalen Beamforming [46] berechneten Pegel sowohl mit der dritten Potenz der Machzahl  $M$  als auch mit der gemessenen Auftriebskraft  $F_A$  skaliert (Bild 27). Wird davon ausgegangen, dass die Auftriebskraft proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit ist, ergibt sich insgesamt also wieder eine Geschwindigkeitsskalierung mit  $U_\infty^5$ . Die entstandenen skalierten Schalldruckpegel können als "Schalldruckpegel pro Einheit Auftriebskraft" interpretiert werden. Eine Einbeziehung der gemessenen Widerstandskraft wurde bisher noch nicht realisiert, sie sollte aber in zukünftigen Auswertungen berücksichtigt werden.

Durch die Skalierung mit der gemessenen Auftriebskraft sind Tragflügel aus porösen Materialien mit sehr niedrigem Strömungswiderstand und sehr großer Ausdehnung



(a) Gemessene Auftriebskraft



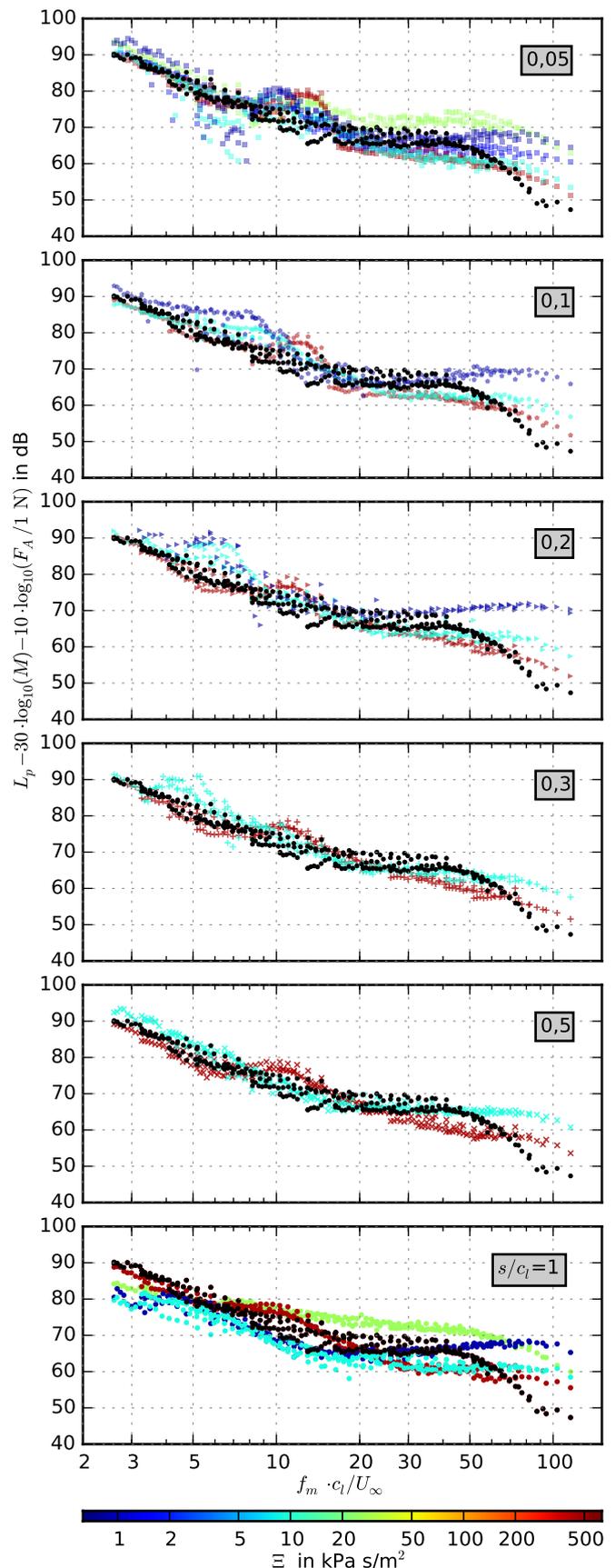
(b) Gemessene Widerstandskraft

**Bild 26:** Einfluss der porösen Ausdehnung auf die Auftriebskraft  $F_A$  und die Widerstandskraft  $F_W$  bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $4^\circ$  (poröser Tragflügel mit  $\Xi = 8200 \text{ Pa s/m}^2$ , Ausdehnung  $s/c_l = \blacksquare 0,05; \blacktriangleright 0,2; + 0,3; \times 0,5; \bullet 1; \blacksquare$  nicht poröser Referenztragflügel)

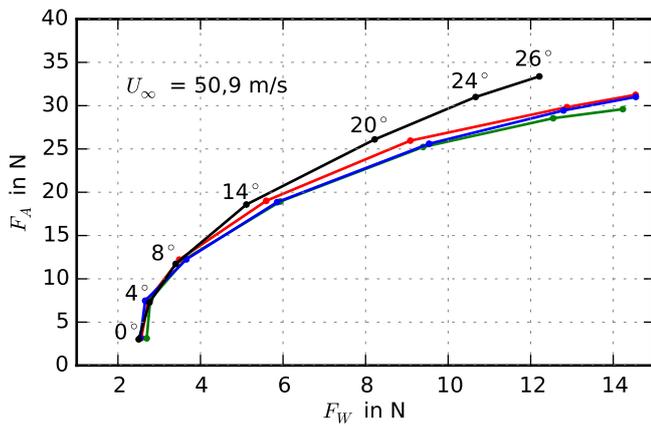
des porösen Materials im Vergleich zum Referenztragflügel nicht mehr effektiv. Die Skalierung bewirkt, dass sich nur noch kleinere Strouhalzahlbereiche ergeben, in denen es zu einer Schallreduktion kommt. Trotzdem ist in Bild 27 ersichtlich, dass es auch bei einer porösen Ausdehnung von nur 5 % bereits zu einer merklichen Schallreduktion kommen kann. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die porösen Materialien bei sehr hohen Strouhalzahlen wieder zu einer Schallentstehung durch die überströmte raue Oberfläche führen.

Basierend auf den Messergebnissen zur Schallentstehung an der Vorderkante und an der Hinterkante der vollporösen Tragflügel wurden mit Hilfe der symbolischen Regression mathematische Modelle zur Schallvorhersage entwickelt [45]. Eine Einbeziehung der porösen Ausdehnung in ein solches Modell ist vorgesehen.

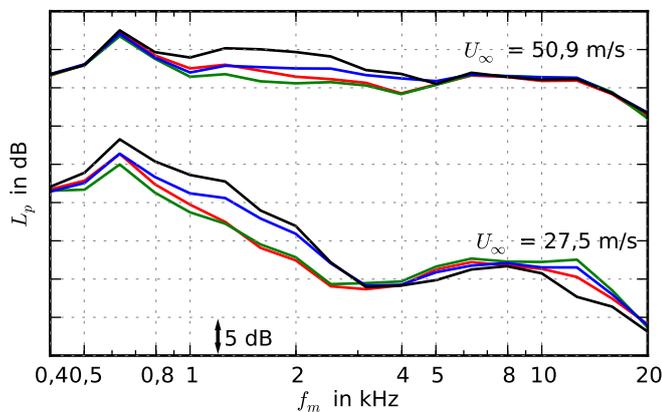
In den eben beschriebenen Versuchen mit porösen Tragflügeln wurde der Ansatz verfolgt, frei erhältliche Materialien zu verwenden. Die Beschaffung geeigneter offenporöser Materialien ist jedoch unter Umständen sehr zeit- und kostenaufwändig. Darüber hinaus ist es auch möglich, dass ein Material mit gewünschten Eigenschaften gar nicht erhältlich ist. In Zusammenarbeit mit einem In-



**Bild 27:** Hinterkantenschalldruckpegel der (teil-)porösen Tragflügel bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $0^\circ$  für unterschiedliche Ausdehnungen des porösen Materials (farbig: poröse Tragflügel,  $\bullet$  nicht poröser Referenztragflügel)



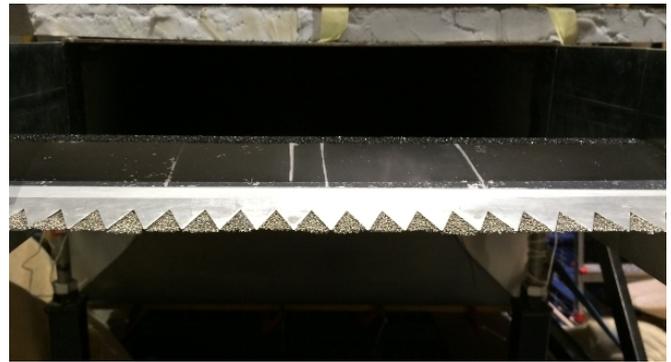
**Bild 28:** Lilienthalpolare, gemessen bei einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 51 m/s (■ Variante 1, ■ Variante 2, ■ Variante 3, ■ nicht poröser Referenztragflügel)



**Bild 29:** Schalldruckpegelspektren (in Terzbändern), gemessen bei Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 28 m/s und 51 m/s (■ Variante 1, ■ Variante 2, ■ Variante 3, ■ nicht poröser Referenztragflügel)

dustriepartner wurde daher ein zweiter Ansatz verfolgt, bei dem künstliche poröse Materialien zur Modifikation der Tragflügelvorderkante gezielt hergestellt wurden. Das erfolgte nach dem Rayleigh-Modell eines Absorbers mit regelmäßigen, parallelen Kreiskapillaren [47], das heißt per Rapid Prototyping wurden Vorderkanten gedruckt, die mit durchgängigen, geraden Kreiskapillaren versehen waren. Dabei wurden Größe, Abstand, Geometrie und Neigung der Kapillaren variiert, so dass in Summe mehr als 20 verschiedene Varianten getestet werden konnten. Das Ziel dieses Ansatzes war, eine poröse Vorderkante zu finden, die sowohl eine deutliche Schalldruckpegelminderung als auch möglichst geringe aerodynamische Verluste mit sich bringt.

Die Experimente fanden erneut im aeroakustischen Windkanal der BTU unter Verwendung einer Düse mit einer runden Austrittsfläche mit 0,2 mm Durchmesser statt. Die Zuströmturbulenz wurde durch ein Turbulenzgitter erzeugt, die Tragflügel besaßen ein SD7003-Profil und hatten eine Sehnenlänge von 0,235 m. Neben der Messung der Schallemission mit einem Mikrofonarray wurden die aerodynamischen Kräfte mit einer Windkanalwaage gemessen.



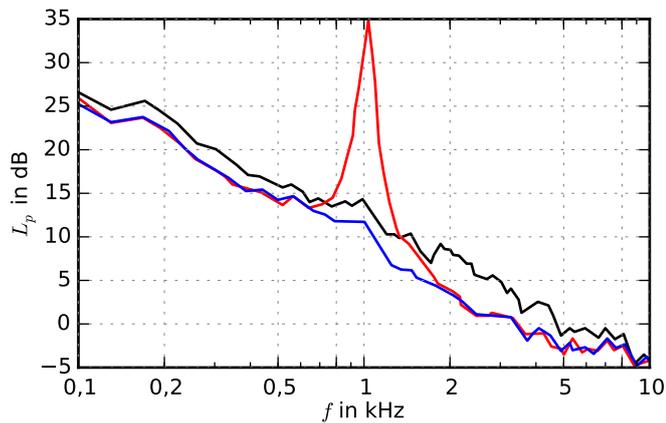
**Bild 30:** Foto eines Tragflügelprofils mit gezackter Hinterkante, deren Lücken mit porösem Material aufgefüllt wurden [48, 49], Ansicht von stromab (mit Erlaubnis des Urhebers)

In Bild 28 sind gemessene Lilienthalpolare für drei Varianten dieser gezielt hergestellten porösen Vorderkanten dargestellt. Es ist ersichtlich, dass durch einige der Modifikationen im Bereich niedriger geometrischer Anstellwinkel (bis etwa 8°) keine aerodynamischen Verluste mehr auftreten. Bei höheren Anstellwinkeln ist der Auftrieb im Vergleich zum Referenztragflügel reduziert, bei gleichzeitig etwas erhöhter Widerstandskraft. Die Wirkung der Kapillaren auf die Schallentstehung ist in Bild 29 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Modifikationen zu einer deutlichen Lärminderung von bis zu 5 dB in einem mittleren Frequenzbereich von etwa 1 kHz bis 4 kHz führen. Gleichzeitig kommt es bei etlichen niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten zu einer Erhöhung der Schallemission bei hohen Frequenzen (in Bild 29 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 28 m/s ab etwa 10 kHz).

Insgesamt sind die Resultate mit den künstlich hergestellten porösen Vorderkanten jedoch bereits sehr vielversprechend, da sich in einem breiten mittleren Frequenzbereich eine Minderung des Umströmungslärms ergibt, während die Aerodynamik in einem vergleichsweise großen Anstellwinkelbereich kaum negativ beeinflusst wird.

### Minderung der Schallentstehung durch eine Kombination aus Zacken und porösen Materialien

In einer an der Brunel University London durchgeführten Studie [48, 49] wurden Windkanalexperimente an NACA0012-Tragflügelmodellen mit gezackter Hinterkante durchgeführt. Das Vorhandensein der Zähnelung führt breitbandig zu einer deutlichen Reduktion des Hinterkantenschalls im Vergleich mit einem Referenztragflügel ohne Zähnelung. Da die Tragflügel eine endliche Dicke aufweisen, resultiert das "Herausschneiden" der Zacken jedoch in einer lokalen Erhöhung der Hinterkantendicke im Bereich der Wurzel dieser Zacken. Durch die somit entstehende stumpfe Hinterkante kommt es, wie in Bild 13 schematisch dargestellt, zu einer Entstehung von tonalem Schall aufgrund einer regelmäßigen Wirbelablösung. Um diesen tonalen Beitrag zu vermeiden, wurden die entstehenden Lücken mit einem bereits in [41] verwendeten porösen Metallschaum "aufgefüllt" (siehe Bild 30). Dadurch wurde der tonale Anteil erfolgreich unterdrückt, so dass es zu einer gleichmäßigen, breitbandigen Reduktion



**Bild 31:** Schalldruckpegelspektren, gemessen mit einem Einzelmikrofon in einem Abstand von 1 m senkrecht über der Hinterkante bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s, aus [48] (■ Referenztragflügel mit unmodifizierter, gerader Hinterkante, ■ gezahnte Hinterkante, ■ gezahnte + porös modifizierte Hinterkante gemäß Bild 30)

des Hinterkantenschalls von etwa 2 dB bis 5 dB im gesamten betrachteten Frequenzbereich von 100 Hz bis 10 kHz kam (siehe Bild 31).

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Paper werden zuerst zwei verschiedene Methoden zur Messung des Fluggeräuschs gleitender Eulen vorgestellt. Dazu zählen Mikrofonarraymessungen an präparierten Flügeln in einem aeroakustischen Windkanal sowie Überflugmessungen an frei fliegenden Vögeln in einem Wildpark. Beide Methoden zeigen, dass Eulen bei mittleren und hohen Frequenzen ab etwa 1,6 kHz leiser fliegen als andere Raubvögel, was sehr gut mit den Erkenntnissen aus der vorhandenen Literatur übereinstimmt. Ursache des leisen Fluges sind neben der vergleichsweise geringen Fluggeschwindigkeit spezielle Gefiederanpassungen der Eule. Zwei dieser Anpassungen (ein an der Flügelvorderkante befindlicher Hakenkamm sowie ein sehr weicher und luftdurchlässiger Flaum, der die Oberfläche der Flügel bedeckt) werden genauer diskutiert und mit Hilfe eigener Messungen analysiert.

Im zweiten Teil des vorliegenden Beitrags werden verschiedene Konzepte zur Minderung des Umströmungsgeräuschs technischer Tragflügel anhand von Beispielen diskutiert. Dazu gehört die Minderung von Vorderkantenschall durch eine Zähnelung der Vorderkante sowie durch die Verwendung von speziellen Hakenstrukturen. Auch die Modifikation technischer Tragflügel mit offen-porösen Materialien, sowohl zur Minderung der Schallentstehung an der Profilvorderkante, als auch an der Hinterkante, wird vorgestellt. Neben der Verwendung frei beschaffbarer poröser Materialien (wie Kunststoff- und Metallschäume) bietet auch die gezielte Fertigung poröser Teile per Rapid Prototyping etliche Vorteile. So lassen sich die aerodynamischen Nachteile einer porösen Beschaffenheit des Profils (wie eine geringere Auftriebskraft bei gleichzeitig erhöhter Widerstandskraft) in einem weiten Anstellwinkelbereich nahezu komplett reduzieren, während sich weiterhin eine deut-

liche Schallminderung einstellt. Abschließend wird eine Studie vorgestellt, bei welcher gezielt die Lücken in einer gezahnten Hinterkante mit porösem Material aufgefüllt werden. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass zukünftige Konzepte zur Lärminderung an Ventilatoren, Windrädern und Tragflügeln sehr vielversprechend auch als Kombination verschiedener Ansätze ausgeführt werden können.

## Danksagung

Ein Teil der in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen wurde im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms “Strömungsbeeinflussung in der Natur und Technik” unter der Fördernummer SA 1502/1-3 durchgeführt. Der größte Teil der Flügelpräparate wurde von den “Senckenberg Naturhistorischen Sammlungen Dresden” zur Verfügung gestellt, die Taubenflügel waren Leihgaben des “Lehrstuhls und Instituts für Biologie II (Zoologie)” der RWTH Aachen. Die Überflugmessungen fanden im “Wildpark Johannismühle” mit freundlicher Unterstützung der Mitarbeiterinnen der Falknerei statt.

Der Autor bedankt sich bei Ennes Sarradj, Christoph Fritzsche, Jens Giesler, Anna-Sophia Henke, Gert Herold, Marcus Hobrecht, Silke Kaschwich, Roman Kisler, Carsten Langhof, Falko Thorsten Meiselbach, Marcus Schrödter, Christian Schulze, Sparsh Sharma, Thomas Windisch sowie Manuel Bartsch, Gerhard Baumgartner, Vanessa Claus, Thomas Drescher, Lili-Fröhlich, Sven Haase, Philipp Hall, Yangyang Ji, Rudolf John, Viktor Kalimbach, Benjamin Kästner, Carlos Kierok, Philipp Krtschil, Falko Krüger, Maximilian Kutta, Kai Liu, Daniel Materne, Thomas Mayer, Martin Noack, Joseph Nowigk, Willi Poppe, Christoph Prietz, Thomas Schulze, Martin Silvan, Christian Voigt, Peggy Winkler und Sahar Wasala.

## Literatur

- [1] Dyson, M. L., Klump, G. M., Gauger, B., Absolute hearing thresholds and critical masking ratios in the European barn owl: a comparison with other owls. *Journal of Comparative Physiology A*, 182(5), 695-702, 1998
- [2] Wei, Q., Zhong, S., Huang, X., Experimental evaluation of flow-induced noise in level flight of the pigeon (*Columba livia*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), EL57-EL63, 2013
- [3] Geyer, T. F., Sarradj, E., Fritzsche, C., Silent Owl Flight: Comparative Acoustic Wind Tunnel Measurements on Prepared Wings. *Acta Acustica united with Acustica*, 99: 139 – 153, 2013
- [4] Sarradj, E., Fritzsche, C., Geyer, T. F., Giesler, J., Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel, *Applied Acoustics*, 70, 1073 – 1080, 2009
- [5] Sijtsma, P., CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics*, 6(4), 357 – 374, 2007
- [6] Sarradj, E., Herold, G., A Python framework for microphone array data processing. *Applied Acoustics*, 116, 50 – 58, 2017

- [7] Ffowcs Williams, J. E., Hall, L. H., Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering halfplane, *Journal Fluid Mechanics*, 40, 657 – 670, 1970
- [8] Neuhaus, W., Bretting, H., Schweizer, B., Morphologische und funktionelle Untersuchungen über den 'lautlosen' Flug der Eulen (*Strix aluco*) im Vergleich zum Flug der Enten (*Anas platyrhynchos*). *Biologisches Zentralblatt*, 92, 495 – 512, 1973
- [9] Sarradj, E., Fritzsche, C., Geyer, T. F., Silent Owl Flight: Bird Flyover Noise Measurements. *AIAA Journal*, 49 (4): 769 – 779, 2011
- [10] Markl, H., Ehret, G., Die Hörschwelle der Maus (*Mus musculus*). *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 33, 274 – 286, 1973
- [11] Graham, R. R., The Silent Flight of Owls. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 286: 837 – 843, 1934
- [12] Mascha, E., Über die Schwungfedern. *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie* 77, 606 – 651, 1904
- [13] Sick, H., Morphologisch-funktionelle Untersuchungen über die Feinstruktur der Vogelfeder. *Journal für Ornithologie*, 206 – 372, 1937
- [14] Hertel, H., Struktur, Form, Bewegung. *Otto Krauskopf-Verlag Mainz*, 1963
- [15] Bachmann, T., Anatomical, Morphometrical and Biomechanical Studies of Barn Owls' and Pigeons' Wings. *Doktorarbeit, RWTH Aachen*, 2010
- [16] Wagner, H., Weger, M., Klaas, M., Schröder, W., Features of owl wings that promote silent flight. *Interface Focus*, 7(1), 20160078, 2017
- [17] Kroeger, R. A., Gruschka, H. D., Helvey, T. C., Low Speed Aerodynamics for Ultra-Quiet Flight. *AFFDL, TR 971-75*, 1973
- [18] Anderson, G. W., An Experimental Investigation of a High Lift Device on the Owl Wing. *Air Force Institute of Technology, Air University, Wright-Patterson AFB, Ohio*, 1973
- [19] Lilley, G. M., A Study of the Silent Flight of the Owl. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1998
- [20] Geyer, T. F., Claus, V. T., Sarradj, E., Markus, P. M.: Silent Owl Flight: The Effect of the Leading Edge Comb on the Gliding Flight Noise. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-Paper 2016-3017, 2016
- [21] Jaworski, J. W., Peake, N., Aerodynamic Noise from a Poroelastic Edge with Implications for the Silent Flight of Owls. *Journal Fluid Mechanics* 723, 456 – 479, 2013
- [22] DIN EN 29053:1993-05, Akustik: Materialien für akustische Anwendungen - Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053:1991); Deutsche Fassung EN 29053, 1993
- [23] Blake, W. K., Frenkiel, F. N., Temple, G. (Ed.), *Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Volume II: Complex Flow-Structure Interactions*. Academic Press, 1986
- [24] Brooks, T. F., Pope, D. S., Marcolini, M. M., Airfoil self-noise and prediction. Technical report, NASA Reference Publication 1218, 1989
- [25] Hersh, A. S., Soderman, P. T., Hayden, R. E., Investigation of acoustic effects of leading-edge serrations on airfoils. *Journal of Aircraft* 11 (4), 197 - 202, 1974
- [26] Gruber, M., Joseph, P. F., Chong, T. P., Experimental investigation of airfoil self noise and turbulent wake reduction by the use of trailing edge serrations. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-Paper 2010-3803, 2010
- [27] Moreau, D. J., Doolan, C. J., Noise-reduction mechanism of a flat-plate serrated trailing edge. *AIAA Journal*, 51(10), 2513 – 2522, 2013
- [28] Biedermann, T., Chong, T. P., Kameier, F., Statistical-empirical modelling of aerofoil noise subjected to leading edge serrations and aerodynamic identification of noise reduction mechanisms. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-Paper 2016-2757, 2016
- [29] Moriarty, P., NAFNoise User Guide, NWTC Information Portal (NAFNoise). <https://nwtc.nrel.gov/NAFNoise>. Last modified 24-September-2014, 2005
- [30] Geyer, T. F., Sarradj, E., Hobracht, M., Noise generated by a leading edge in anisotropic turbulence. 45th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2016), Hamburg, 6067 – 6078, 2016
- [31] Amiet, R. K., Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream. *Journal of Sound and Vibration* 41(4), 407 – 420, 1975
- [32] Narayanan, S., Joseph, P., Haeri, S., Kim, J. W., Noise reduction studies from the leading edge of serrated flat plates. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-Paper 2016-2320, 2014
- [33] Geyer, T. F., Wasala, S. H., Cater, J. E., Norris, S. E., Sarradj, E., Experimental Investigation of Leading Edge Hook Structures for Wind Turbine Noise Reduction. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-Paper 2016-2954, 2016
- [34] Cleveland, W. S., Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74, 829-836, 1979
- [35] Chanaud, R. C., Kong, N., Sitterding, R. B., Experiments on porous blades as a means of reducing fan noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 59, 564 – 575, 1976
- [36] Herr, M., Design criteria for low-noise trailing edges. 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-Paper 2007-3470, 2007

- [37] Finez, A., Jondeau, E., Roger, M., Jacob, M. C., Broadband noise reduction with trailing edge brushes. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-Paper 2010-3980, 2010
- [38] Reichenberger, J., Noise Control on Flap Side Edge, 45th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2016), Hamburg, 6016 – 6020, 2016
- [39] Geyer, T. F., Sarradj, E., Giesler, J., Hobracht, M., Experimental assessment of the noise generated at the leading edge of porous airfoils using microphone array techniques. 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (32nd AIAA Aeroacoustics Conference). AIAA-Paper 2011-2713, 2011
- [40] Geyer, T. F., Sarradj, E., Giesler, J., Application of a Beamforming Technique to the Measurement of Airfoil Leading Edge Noise. *Adv Acoust Vib*, Vol. 2012, 2012
- [41] Geyer, T. F., Sarradj, E., Fritzsche, C., Measurement of the noise generation at the trailing edge of porous airfoils. *Experiments in Fluids*, Vol. 48, 291 – 308, 2010
- [42] Geyer, T. F., Sarradj, E., Fritzsche, C., Porous Airfoils: Noise Reduction and Boundary Layer Effects. *International Journal of Aeroacoustics*, Vol. 9(6), 787 – 820, 2010
- [43] Geyer, T. F., Sarradj, E., Trailing edge noise of partially porous airfoils. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (35th AIAA Aeroacoustics Conference), AVIATION 2014, AIAA-Paper 2014-3039, 2014
- [44] Selig, M. S., Donovan, J., Fraser, D., Airfoils at Low Speeds. SoarTech Aero Publications, 1989
- [45] Sarradj, E., Geyer, T. F., Symbolic regression modeling of noise generation at porous airfoils. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 333, Issue 14, 3189-3202, 2014
- [46] Sarradj, E., A fast signal subspace approach for the determination of absolute levels from phased microphone array measurements. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, 1553 – 1569, 2010
- [47] Mechel, F. P., Schallabsorber Band II: Innere Schallfelder, Strukturen. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995
- [48] Vathylakis, A., Chong, T. P., Joseph, P. F., Poro-Serrated trailing edge devices for airfoil self-noise reduction. *AIAA Journal*, Vol. 53, No. 11, 3379 – 3394, 2015
- [49] Chong, T. P., Dubois, E., Optimization of the poro-serrated trailing edges for airfoil broadband noise reduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(2), 1361 – 1373, 2016