

# Der leise Flug der Eule

Thomas F. Geyer, Christoph Fritzsche, Ennes Sarradj, Hermann Wagner

Der lautlose Flug der Eulen ist eines der bekanntesten Beispiele für die Anpassungsfähigkeit der Natur und Vorbild für viele Innovationen auf dem Gebiet der Strömungsakustik mit dem Ziel der Lärminderung an technischen Anwendungen wie Ventilatoren oder Windenergieanlagen. Die Ursachen dieses leisen Flugs sind, neben der geringen Fluggeschwindigkeit der Eule, drei spezielle Anpassungen ihres Gefieders: Eine kammartige Struktur an der Flügelvorderkante, Fransen an der Hinterkante und ein weicher und luftdurchlässiger Flaum, der die Flügel bedeckt. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass der Hakenkamm in erster Linie eine aerodynamische Funktion hat, indem er vor allem bei hohen Anstellwinkeln, das heißt in der Flugphase kurz vor dem Ergreifen der Beute, für mehr Auftrieb und Stabilität sorgt. Jedoch zeigt sich bei diesen Flugkonditionen auch ein akustischer Vorteil, indem er starke Schallquellen an der Flügelspitze verhindert. Die Fransen an der Flügelhinterkante sowie die luftdurchlässige Beschaffenheit des Gefieders tragen deutlich zur Geräuschminderung bei, indem sie die Turbulenz in der Grenzschicht beeinflussen sowie einen allmählichen Druckausgleich zwischen Flügelunterseite und -oberseite ermöglichen. Diese Eigenschaften sorgen dafür, dass das Fluggeräusch der Eule bei mittleren und hohen Frequenzen ab etwa 2 kHz deutlich unter dem anderer Raubvögel liegt. Dies konnte sowohl in Überflugmessungen an lebenden Vögeln sowie in Windkanalmessungen an Flügelpräparaten nachgewiesen werden.

## Einleitung

Der leise Flug der Eule fasziniert die Menschen schon seit langem und ist Inhalt einer ganzen Reihe umfangreicher wissenschaftlicher Publikationen (siehe zum Beispiel [1–5]). Darüber hinaus dient er als Motivation für viele technische Neuerungen auf dem Gebiet der Strömungsakustik, wozu vor allem Modifikationen an Tragflügeln, Rotorblättern von Windenergieanlagen und Ventilatorschaufeln zählen.

Von Interesse sind bei der Auseinandersetzung mit dem leisen Eulenflug im Wesentlichen zwei Fragestellungen: Was genau sind die Ursachen des leisen Flugs? Und wie leise fliegen Eulen wirklich? Diesen Fragen soll im vorliegenden Artikel nachgegangen werden. Dem interessierten Leser wird jedoch empfohlen, ebenfalls die hier zitierte Fachliteratur zu lesen.

## The silent flight of owls

The silent flight of owls is a famous example for nature's ability to adapt to certain requirements, and a motivation for many novel technologies aiming at the reduction of aerodynamic noise from technical applications such as fans and wind turbines. The mechanisms responsible for the silent flight are, beside the low flight speed of the owl, a comb-like structure at the leading edge of the wing, long and soft fringes at the trailing edge and a soft and flow permeable downy surface of the feathers. Past investigations have shown that the leading edge comb primarily serves an aerodynamic function, by increasing lift and adding stability at high angles of attack. This is especially necessary in the final phase of the flight, shortly before the owl catches its prey. More recent measurements also show an acoustic benefit of the hooks, which prevent the formation of a strong noise source at the wing tip at these conditions. The trailing edge fringes and the permeable plumage of the owls lead to a manipulation of the turbulence in the boundary layer and enable a gradual pressure compensation between the pressure side and the suction side of the owl wing. These adaptations result in a significant reduction of the gliding flight noise of owls compared to that of other, non-silently flying birds of prey at medium and high frequencies above approximately 2 kHz. This has been confirmed both in flyover measurements on flying owls as well as in wind tunnel measurements on prepared wings.

## Ursachen des leisen Flugs

Ein erster, oft übersehener Grund für den leisen Flug der Eule im Vergleich zu anderen Raubvögeln ist ihre deutlich geringere Fluggeschwindigkeit. So fliegen Eulen im Gleitflug im Durchschnitt etwa 6 bis 10 m/s [6], während die Durchschnittsgeschwindigkeit des Bussards (*Buteo buteo*) im Schlagflug bei etwa 12 bis 13 m/s und die des Sperbers (*Accipiter nisus*) bei 10 bis 11 m/s liegt [7]. Im Sturzflug sind für den Wanderfalken (*Falco peregrinus*), einen der schnellsten Raubvögel, sogar Geschwindigkeiten von fast 90 m/s gemessen worden [8]. Ermöglicht wird der Eule dieser langsame Flug durch die geringe Flächenlast und die große Flügelfläche bei vergleichsweise geringer Flügelstreckung, also das Verhältnis von Spannweite zu Flügeltiefe [9] sowie einen hohen Koeffizienten [10]. Die deutlichen Un-



Abb. 1: Fotografie eines Uhus.

terschiede in den Fluggeschwindigkeiten spiegeln sich natürlich in den unterschiedlichen Jagdstrategien der Raubvögel wider: Die meist nachtaktive Eule fliegt langsam und in geringer Höhe oder sitzt auf einer etwas erhöhten Position, wie einem Pfahl oder einem Baum, und ortet ihre Beute (vor allem Mäuse, Insekten und andere Kleintiere) akustisch [11]. Dabei hilft neben dem sehr guten Gehör [12] eine spezielle, asymmetrische Anordnung der Ohren. Zusätzlich besitzen Eulen einen sogenannten Gesichtsschleier, eine kranzförmige Einfassung im vorderen Bereich des Kopfes aus Federn (siehe Abbildung 1), der die Schallwellen in Richtung der Ohren lenkt. Die Jagd erfolgt dann bei der Eule ebenfalls mit

Abb. 2: Flügel einer Schleiereule.



vergleichsweise geringer Geschwindigkeit. Andere, nicht leise fliegende Raubvögel wie der Bussard, der Sperber oder der Falke hingegen sind tagaktiv. Sie orten ihre Beutetiere optisch und jagen diese daraufhin durch schnelle Annäherung, so dass die Beutetiere schlicht keine Zeit zur Flucht mehr haben.

Bei der Verdeutlichung des Einflusses der Fluggeschwindigkeit auf das entstehende Geräusch im Gleitflug soll eine kurze Beispielrechnung helfen: Betrachtet man den Vogelflügel vereinfacht als eine ebene Platte, so wächst nach der Theorie die durch die Umströmung erzeugte Schallleistung  $P$  mit der fünften Potenz der Strömungsgeschwindigkeit  $U$  an, es gilt also  $P \sim U^5$  [13]. Eine angenommene Reduktion der Fluggeschwindigkeit von 10 % macht sich daher schon in einer Abnahme des Schallleistungspegels von etwa 2,3 dB bemerkbar. Für eine technische Anwendung ist dies natürlich nur beschränkt möglich.

Ein weiterer, weitaus interessanterer Grund für den leisen Flug der Eule sind die speziellen Anpassungen des Eulengefieders. Obwohl bereits seit Anfang des letzten Jahrhunderts durch Publikationen aus dem Gebiet der Zoologie [14] bekannt, wurden diese Anpassungen schließlich 1934 in einem in einer technischen Fachzeitschrift veröffentlichten Artikel von Graham [15] hinsichtlich ihrer Bedeutung für den leisen Flug der Eule zusammenfassend beschrieben. Diese Anpassungen sind

- eine kammartige Struktur an der Vorderkante des Eulenflügels, bestehend aus kleinen, aufwärts gebogenen Häkchen in der Federfahne der vordersten Schwungfeder,
- Fransen an der Flügelhinterkante, gebildet aus den Fahnen der Federn im Bereich der Hinterkante, und
- ein sehr weicher und luftdurchlässiger Flaum, der die Ober- und Unterseite der Flügel bedeckt.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Fotografie des Flügels einer Schleiereule (*Tyto alba*). Im Folgenden werden diese drei Gefiederanpassungen hinsichtlich ihres Beitrags zum leisen Flug im Detail besprochen. Soweit vorhanden, geschieht dies auf Grundlage von Ergebnissen aus der Literatur oder aus eigenen Messungen der Autoren.

#### Der Hakenkamm an der Flügelvorderkante

Der Hakenkamm befindet sich an der Außenfahne der vordersten Schwungfeder, die die Vorderkante des Eulenflügels bildet. Über diese Anpassung existieren etliche biologische Arbeiten, die die genaue Länge, Form sowie die mechanischen Eigenschaften der Häkchen detailliert beschreiben [16, 17]. Dabei besteht breiter Konsens darüber, dass der Hakenkamm im Wesentlichen die Aerodynamik des Flügels beeinflusst [6, 17, 18, 19, 20]. Die kleinen,

gebogenen Häkchen, welche in Abbildung 3 im Detail dargestellt sind, sorgen dafür, dass die Strömung bei hohen Anstellwinkeln des Flügels nach außen, das heißt zur Flügelspitze hin, abgelenkt wird. Bei niedrigen Anstellwinkeln scheint sich dieser Effekt umzukehren [19, 20], wobei hier sicherlich weiterer Forschungsbedarf besteht. Zusätzlich sorgen die Häkchen dafür, dass die Strömung auf der Flügeloberfläche laminar, das heißt nicht turbulent, bleibt. An den einzelnen Häkchen entsteht zudem Turbulenz, so dass der Hakenkamm zur Ausbildung einer sogenannten Wirbelschicht führt [18]. Insgesamt resultieren diese Effekte in einer Verbesserung der Aerodynamik, vor allem bei hohen Anstellwinkeln. Auf diese Weise hilft der Hakenkamm dabei, der Eule das Fliegen mit langsamer Geschwindigkeit und hohen Anstellwinkeln zu ermöglichen, was vor allem in der letzten Phase der Jagd, kurz vor dem Ergreifen der Beute, sowie bei Wendemanövern wichtig ist.

Deutlich weniger Erkenntnisse gibt es zum Einfluss des Hakenkamms auf das entstehende Fluggeräusch. Graham [15] vermutet bereits, dass es durch den Hakenkamm zu einer lokalen Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit kommt, bevor die Strömung auf die eigentliche Vorderkante trifft. In einer frühen Studie von Kroeger et al. [18] aus dem Jahr 1971, die bereits die Nutzbarmachung der Mechanismen der Eule für die Flugindustrie zum Ziel hat, wurden Überflugmessungen an Streifenkäuzen durchgeführt. Dabei flogen die Eulen auf einem bestimmten Pfad im Inneren eines Hallraums, in dem sich ein Mikrofon befand. Im Rahmen dieser Studie wurde auch der Einfluss des Hakenkamms untersucht, indem dieser nach einer ersten Messung entfernt und die Messung anschließend wiederholt wurde. Die Ergebnisse weisen jedoch eine sehr große Streuung auf, so dass eine akustische Wirkung des Hakenkamms zwar naheliegend ist, aber nicht zweifelsfrei festgestellt werden kann. Eine ähnliche Messung wurde kurz darauf, im Jahr 1973, auch von Neuhaus et al. [6] veröffentlicht. Diese Ergebnisse legen ebenfalls eine zumindest geringfügige akustische Wirkung des Hakenkamms nahe, auch wenn die verwendete Messtechnik und die aus Sicht eines Akustikers etwas eigenwillige Darstellung der Ergebnisse eine eindeutige Interpretation erschweren.

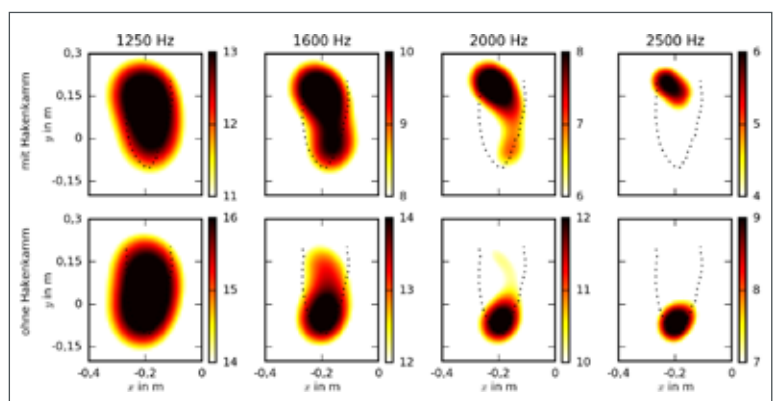
Eine aktuellere Untersuchung [21] zum Einfluss des Hakenkamms auf das Fluggeräusch wurde von den Autoren in Form von akustischen und aerodynamischen Messungen an Flügelpräparaten im Windkanal [22] durchgeführt. Dabei wurden zuerst Messungen an einem intakten Flügel einer Schleiereule durchgeführt. Anschließend wurde der Hakenkamm mit Hilfe eines Skalpell entfernt und die Messungen wurden wiederholt. Die akustischen Messungen



Abb. 3: Mikroskopische Aufnahme der Haken an der Vorderkante des Flügels einer Schleiereule.

erfolgten mit Hilfe einer Anordnung aus mehreren Mikrofonen, einem sogenannten Mikrofonarray. Diese Technik bietet den Vorteil, dass durch spezielle Berechnungsalgorithmen sowohl der Ort als auch die Stärke von Schallquellen bestimmt werden kann [23]. Insgesamt konnten die Messergebnisse zum einen die aus der Literatur bekannten Effekte des Hakenkamms auf die Aerodynamik bestätigen. So sorgen sie für eine leichte Erhöhung der aerodynamischen Auftriebskraft vor allem im Bereich hoher Anstellwinkel sowie für eine geringere Verformung des Flügels, was insgesamt zu einer größeren Stabilität beim Flug führt. Zusätzlich zeigte sich ein sehr interessanter akustischer Effekt, der in Abbildung 4 dargestellt ist. Bei hohen Anstellwinkeln (Anm.: In der Abbildung wird das beispielhaft für einen geometrischen Anstellwinkel von  $24^\circ$  gezeigt, was im freien Flug jedoch einem deutlich niedrigeren Anstellwin-

Abb. 4: Schallquellen am präparierten Flügel einer Schleiereule mit und ohne Hakenkamm bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $24^\circ$  und einer Strömungsgeschwindigkeit von  $10 \text{ m/s}$  (Strömung von links nach rechts, obere Reihe: Hakenkamm intakt, untere Reihe: Hakenkamm entfernt, Spalten zeigen Ergebnisse für das jeweilige Terzband mit Mittenfrequenzen von  $1.250 \text{ Hz}$  bis  $2.500 \text{ Hz}$ ).





kel entsprechen würde.) verhindert der Hakenkamm die Ausbildung einer starken Schallquelle an der Flügelspitze. Stattdessen befinden sich die Schallquellen im Fall des intakten Hakenkamms auf der Oberfläche des Flügels und sind zudem deutlich weniger stark. Dies ist vor allem in den Bildern für Terzfrequenzen ab 1.600 Hz deutlich sichtbar. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Vorderkantenhäkchen vor allem bei hohen Anstellwinkeln wirksam sind, wie sie zum Beispiel kurz vor dem Ergreifen der Beute auftreten. In diesem für den Jagderfolg kritischen Flugzustand wirken die Häkchen stabilisierend, indem sie die Deformation des Flügels und Flügelschwingungen verringern, sie erhöhen die Auftriebskraft und tragen zur weiteren Geräuschkürzung bei.

An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass der Hakenkamm der Eule diejenige Anpassung ist, die wahrscheinlich am häufigsten als Vorbild für Modifikationen an technischen Tragflügeln dient. So ist vor allem die Vorderkantenzähnelung davon inspiriert, die zur Lärmreduzierung an Tragflügeln in turbulenter Zuströmung zum Einsatz kommt (siehe zum Beispiel [24, 25]). Auch hier wirkt sich die Zähnelung zusätzlich positiv auf die Aerodynamik aus, da sie zur Ausbildung von Wirbeln führt, welche die Grundströmung stabilisieren.

#### Der Fransensaum an der Hinterkante

Der sogenannte Fransensaum an der Hinterkante des Eulenflügels wird durch die ausgefranseten Fahnen der hinteren Schwungfedern im Hand- und Armbereich des Flügels gebildet. Während die einzelnen sogenannten Federäste einer Schwungfeder üblicherweise durch ein System von sogenannten Haken- und Bogenfasern miteinander verbunden sind, so fehlen diese Fasern an der Spitze der Schwungfedern der Eule, wodurch die Federäste in diesem Bereich weniger stark untereinander verbunden sind und derartige flexible Fransen entstehen. Abbil-

*Abb. 5: Mikroskopaufnahme der Fransen an der Hinterkante des Flügels einer Schleiereule.*



dung 5 zeigt eine Nahaufnahme dieser Fransen am Flügel einer Schleiereule.

Auch über den Fransensaum der Eule existieren Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Biologie, in welchen Parameter wie die Länge, Orientierung und Dichte der Federäste detailliert beschrieben sind [26]. Zur Wirksamkeit des Fransensausms in Bezug auf das leise Fluggeräusch der Eule bietet die Literatur ebenfalls einige sehr aufschlussreiche Erklärungen (siehe zum Beispiel [15]). Zum einen kommt es durch die Luftdurchlässigkeit der Fransen zu einem allmählichen Druckausgleich zwischen der Oberseite (die sogenannte Saugseite) und der Unterseite (Druckseite) des Flügels. Dadurch ist der Druckunterschied an der eigentlichen Hinterkante des Flügels weniger stark und es entsteht weniger Schall. Zum anderen werden durch die Fransen kleine, in der Strömung über die Oberfläche enthaltene turbulente Wirbel quasi ausgekämmt, so dass diese bei der Interaktion mit der Hinterkante ebenfalls weniger Schall erzeugen. Durch die Form der Fransen nimmt zusätzlich auch die Effektivität ab, mit der Schall an der Hinterkante gestreut wird [27]. Darüber hinaus wird auch der Flexibilität des Fransensausms eine akustische Wirkung zugeschrieben. So wird nach Kroeger et al. [18] das Spektrum der Turbulenz in der Grenzschicht, die sich über dem Flügel ausbildet, durch die Flexibilität zu tieferen Frequenzen verschoben. Da diese Turbulenz letztlich an der Hinterkante in Schall umgewandelt wird, bedeutet das eine Minderung des durch die Umströmung entstehenden Geräuschs bei hohen Frequenzen.

Grundsätzlich ist der Einfluss des Fransensausms auf das Fluggeräusch der Eule jedoch nur sehr schwer experimentell untersuchbar. Das hat damit zu tun, dass – anders als beim Hakenkamm an der Vorderkante – der Fransensaum einen nicht zu vernachlässigenden Bereich des Flügels ausmacht. Ein Abschneiden des Fransensausms zum Zweck vergleichender Experimente an fliegenden Vögeln oder auch an Flügelpräparaten hätte deshalb eine deutliche Veränderung der Flügelform und damit auch der aerodynamischen Parameter zur Folge. Das würde die Ergebnisse eines Vergleichs mit/ohne Fransensaum sehr fragwürdig machen. Das Gleiche gilt auch für andere grundsätzlich denkbare Methoden wie das Abkleben. Sie alle würden den Flügel zu stark verändern, um aussagekräftige Rückschlüsse auf den akustischen Effekt des Fransensausms zu ermöglichen.

Auch die Fransen an der Hinterkante des Eulenflügels dienen als Motivation für Modifikationen an technischen Tragflügeln mit dem Ziel der Minderung des Umströmungsgeräuschs. Dazu zählen zum Beispiel sägezahnförmige Einschnitte (zum Beispiel [28, 29]) oder bürstenförmige Hinterkanten [30]. Auch diese Modifikationen beeinflussen neben dem

Umströmungsgeräusch auch die Aerodynamik des Tragflügels.

#### Das luftdurchlässige Gefieder

Die Daunen auf der Oberfläche der Eulenfedern entstehen durch die im Vergleich zu anderen Vögeln sehr langen Hakenfasern der Eule, auch Pennula genannt, die besonders elastisch sind und auf der Flügeloberfläche aufliegen. Dadurch erscheinen die Federn der Eule generell weicher und elastischer [6] sowie poröser [18]. In der Literatur findet sich für diese Gefiederanpassung daher auch der Ausdruck "Polsterung" [31].

Hinsichtlich des leisen Flugs der Eule dürfte im Fall des weichen Flaums vor allem die erhöhte Permeabilität, das heißt die Luftdurchlässigkeit, im Vergleich zum Gefieder anderer, nicht leise fliegender Vögel, von Interesse sein. Ebenso wie die Fransen an der Flügelhinterkante führt diese Luftdurchlässigkeit zu einem graduellen Druckausgleich zwischen Flügelunterseite und -oberseite sowie zu einer Beeinflussung der in der Grenzschicht sich über den Flügel bewegendenden turbulenten Strukturen, die an der Hinterkante als Schall abgestrahlt werden. Ein direkter Effekt des Gefieders auf den abgestrahlten Schall in der Art einer schallabsorbierenden Struktur ist dabei

ebenfalls untersucht worden [32], spielt jedoch vor allem aufgrund der nur sehr geringen Dicke eines Eulenflügels vor allem im Bereich der Hinterkante [33, 34] eine nur sehr untergeordnete Rolle. Nicht unerwähnt bleiben soll die Tatsache, dass eine teilweise Durchströmung des Flügels wiederum einen negativen Effekt auf die sich ergebende Aerodynamik hat. Über die Luftdurchlässigkeit von Vogelfedern war lange Zeit nur eine Arbeit von Müller und Patone [35] bekannt, die jedoch keine Federn von Eulen enthielt. In einer Studie der Autoren des vorliegenden Artikels wurde jedoch der Durchströmungswiderstand von Eulenflügeln gemessen und mit dem anderer, nicht leise fliegender Vögel verglichen [36]. Der Durchströmungswiderstand ist eine Größe, welche den Widerstand eines luftdurchlässigen Materials gegen eine gleichmäßige Durchströmung beschreibt. Er kann als umgekehrt proportional zur Permeabilität verstanden werden. Für die Messungen wurden 15 präparierte Flügel einer Schleiereule, 8 Flügel eines Waldkauzes (*Strix aluco*) und 2 Flügel einer Waldohreule (*Asio otus*) als Vertreter der leise fliegenden Eulen verwendet. Die Ergebnisse wurden mit denen von Messungen an 9 präparierten Flügeln des Bussards, 2 Flügeln des Sperbers und 5 Flügeln der Taube (*Columba livia*) verglichen. Für jeden Flügel wurden Messungen



# Make better spaces

with the complete software solution for room acoustics

Elegant and user friendly interface

Fast and reliable simulations and measurements

Available as: **B** Basics, **I** Industrial, **A** Auditorium & **C** Combined

Start your free trial at  
**[www.odeon.dk](http://www.odeon.dk)**





an acht, über den Flügel verteilten Messpositionen durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen deutlich, dass die Flügel der Eulenvögel einen signifikant geringeren Durchströmungswiderstand als die Flügel von Bussard, Sperber und Taube aufweisen, dass ihre Luftdurchlässigkeit somit größer ist.

Wie schon für den Fransensaum an der Flügelhinterkante ist es auch für die Daunen auf der Flügeloberfläche nicht möglich, ihren Einfluss auf das Fluggeräusch separat zu quantifizieren. Jede auch nur entfernt denkbare Maßnahme zur Entfernung der Daunen oder zur Abdeckung der Federn hätte eine nicht vernachlässigbare Beeinträchtigung der Flügel-aerodynamik zur Folge.

Auch im Fall des weichen Flaums beziehungsweise generell des luftdurchlässigen Gefieders der Eulen wird versucht, die schallmindernden Mechanismen auf technische Anwendungen zu übertragen. So gibt es zum Beispiel etliche Studien zum Einfluss porös gestalteter Hinterkanten auf den Umströmungslärm von Tragflügeln [37, 38]. Auch bei technischen Anwendungen muss jedoch beachtet werden, dass eine poröse Beschaffenheit nicht nur die Akustik beeinflusst, sondern auch die Aerodynamik.

### Messung des Fluggeräuschs von Eulen

Um das beim Gleitflug der Eule entstehende Geräusch quantifizieren und mit dem anderer Raubvögel vergleichen zu können, sind grundsätzlich drei verschiedene Szenarien möglich. Die erste Möglichkeit wäre die Messung des Geräuschs von frei fliegenden Vögeln anhand sogenannter Überflugmessungen, bei denen der Vogel über ein Mikrofon oder eine ganze Anordnung von Mikrofonen fliegt. Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist, dass die Vögel tatsächlich entsprechend ihrem natürlichen Verhalten fliegen. Von Nachteil sind dabei jedoch störende Einflüsse wie eventuell vorhandene Nebengeräusche oder die Notwendigkeit der Bestimmung der Fluggeschwindigkeit und des Abstands der Vögel vom Mikrofon. Eine zweite Möglichkeit sind Messungen an Vögeln, die in einem speziellen aeroakustischen Windkanal entgegen der Strömung fliegen, und zwar derart, dass sich die absolute Position nicht ändert. Dies bedarf natürlich einem entsprechend aufwändigen Training der Tiere, wobei der Vorteil in der für akustische Messungen geeigneten Messumgebung liegt. Die dritte Möglichkeit wären ebenfalls Messungen in einem Windkanal, jedoch nicht an lebenden Vögeln, sondern an Präparaten. Auch hier liegt der Vorteil in der Nutzung eines für akustische Experimente geeigneten Windkanals, während der Nachteil die Verwendung von starren Flügelpräparaten ist. Grundsätzlich muss jedoch bei allen Methoden beachtet werden, dass das Fluggeräusch der Eule sehr gering ist, was

hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit und den Dynamikbereich der Messmikrofone stellt.

Die erste Variante wurde bereits in frühen Studien von Gruschka et al. [39] und Kroeger et al. [18] im Jahr 1971 sowie von Neuhaus et al. [6] im Jahr 1973 veröffentlicht. Gruschka et al. und Kroeger et al. beziehen sich beide auf die gleiche Messkampagne, bei der ein Streifenkauz (*Strix varia alleni*) auf einem einigermaßen konstanten Pfad durch einen Hallraum fliegen gelassen wurde. Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit im Gleitflug betrug 7,3 m/s, die Messungen erfolgten mit einem knapp oberhalb des Bodens positionierten Kondensatormikrofon. Die gemessenen Schalldruckpegelspektren wurden auf verschiedene Abstände umgerechnet. Dabei zeigte sich, dass das Fluggeräusch ab einem Abstand von etwa 3 m unterhalb der Hörschwelle des Menschen liegt. Vergleiche mit anderen, nicht leise fliegenden Vögeln wurden nicht durchgeführt. Basierend auf den von Kroeger et al. veröffentlichten Daten hat Lilley später eine weitere, vielbeachtete Arbeit zum leisen Eulenflug verfasst [40]. Eine der wesentlichen Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit ist, dass die speziellen Gefiedereigenschaften der Eule dafür sorgen, dass Schallanteile bei Frequenzen oberhalb von 2 kHz praktisch unhörbar sind. Dies ist exakt der Frequenzbereich, in dem die typischen Beutetiere der Eule gerade sehr gut hören.

In der experimentellen Studie von Neuhaus et al. wurde das Fluggeräusch eines Waldkauzes ebenfalls durch Überflugmessungen ermittelt und mit dem von Stockenten (*Anas platyrhynchos*) verglichen. Die Aufnahmen für den Waldkauz entstanden in einer Turnhalle, wo die zwei untersuchten Vögel von einer Hand auf eine benachbarte Sitzstange fliegen mussten, während die Messungen an den Stockenten im Freien stattfanden. Leider flogen die Waldkäuse nicht im Gleitflug, sondern im sogenannten Gleitrudern beziehungsweise im Hochrütteln – beides Flugzustände, bei denen der Vogel aktiv mit den Flügeln schlägt [41]. Die Mikrofontfernung konnte in beiden Fällen nur geschätzt werden. Diese Unterschiede in der Messung, die verschiedenen Flugzustände sowie die ungewöhnliche Art der Darstellung der Ergebnisse machen einen direkten Vergleich der Fluggeräusche schwierig.

Schließlich wurden auch durch die Autoren Überflugmessungen an Eulen und nicht leise fliegenden Vögeln durchgeführt [42]. Die Messungen fanden im "Wildpark Johannismühle" statt. Mit Hilfe der dortigen Falknerinnen wurden dabei in mehreren Messkampagnen verschiedene Raubvögel über ein aus 92 Einzelmikrofonen bestehendes Mikrofonarray fliegen gelassen. Die Bestimmung des Flugpfads der Vögel erfolgte durch zwei Kameras, die zeitsynchron zu den akustischen Messungen filmten. Dabei



Abb. 6: Flug einer Schleioreule über eine am Boden befindliche, mit Tüchern getarnte Anordnung von Messmikrofonen.

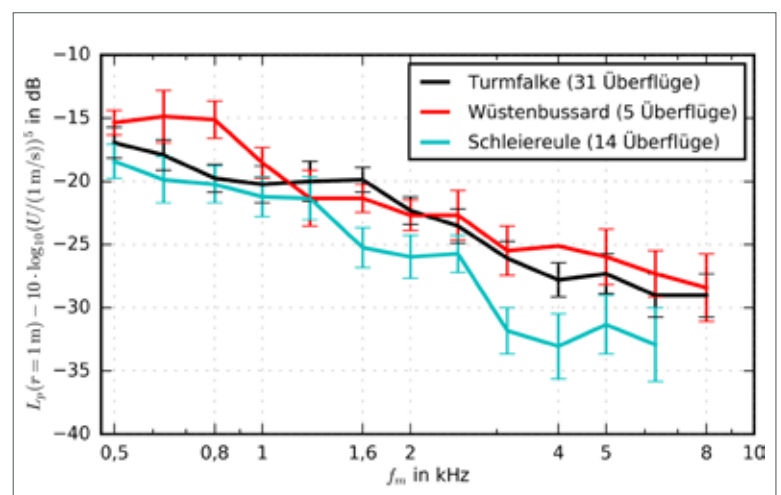
spielten verschiedene Faktoren eine Rolle, die bei der Planung und Durchführung der Messungen entsprechend berücksichtigt werden mussten. So fanden die Messungen im Freien statt, was zum einen zu starken Hintergrundgeräuschen, zum Beispiel durch Wind oder andere Tiere des Wildparks, als auch zu gewissen Einschränkungen des Messaufbaus führte. Dieser musste so gestaltet sein, dass im Fall von ungünstigen Wetterverhältnissen die Messung kurzfristig abgebrochen werden kann. Die aufwändige Messtechnik musste zum anderen durch dünne, sehr schalldurchlässige Materialien getarnt werden, da andernfalls Gefahr bestand, dass die Raubvögel diese zerstören. Abbildung 6 zeigt den Flug einer Schleioreule über das am Boden befindliche, mit dünnen Tüchern getarnte Mikrofonarray.

Bei den Messungen flogen die Vögel mehrmals von der Hand der einen Falknerin zu der einer anderen, jedoch im Allgemeinen nur so oft, wie sie sich durch entsprechendes Futter locken ließen. Da der Fokus der Messungen ausschließlich auf dem Gleitflug lag und demnach Überflüge mit anderen Flugzuständen sowie solche mit starken Störgeräuschen (zum Beispiel Vogelschreie) nicht ausgewertet wurden, kam für jeden untersuchten Vogel letztlich nur eine sehr begrenzte Anzahl auswertbarer Überflüge zusammen. Von den sechs insgesamt untersuchten Vögeln blieben letztlich ein Turmfalke (*Falco tinnunculus*, 31 gültige Überflüge), ein Wüstenbussard (*Parabuteo unicinctus*, 5 Überflüge) und eine Schleioreule (14 Überflüge) übrig. Aus diesen Messungen wurde der Schalldruckpegel bezogen auf eine Entfernung von 1 m und normiert mit der fünften Potenz der aus den Flugpfaden berechneten Fluggeschwindigkeit  $U$  ermittelt. Diese Normierung ergibt sich aus der bereits genannten Theorie für die Schallentstehung an überströmten Platten [13] unter der Annahme, dass das Fluggeräusch im Gleitflug im Wesentlichen durch die Überströmung der Flügelflächen entsteht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Fluggeräusch der Eule ab einer Frequenz von etwa 1,6 kHz deutlich unter dem Flug-

geräusch der anderen, nicht leise fliegenden Raubvögel liegt. Dieses Ergebnis bestätigt somit sehr gut die von Lilley postulierte schallmindernde Wirkung des Eulengefieders ab einer Frequenz von 2 kHz [40].

Die zweite Möglichkeit, die Durchführung von Windkanalmessungen an fliegenden Vögeln, wurde bisher nur von einer Gruppe chinesischer Wissenschaftler an einer Taube durchgeführt [43]. Auch dabei kam Mikrofonarraymesstechnik zum Einsatz, wodurch gezeigt werden konnte, dass sich die dominanten Schallquellen bei gleitenden Tauben an den Flügelspitzen befinden. Die vergleichsweise große Spannweite typischer Raubvögel, darunter auch Eulenvögel, würde derartige Messungen zur Untersuchung des leisen Eulenflugs sehr aufwändig machen. Die dritte Methode, die Untersuchung des leisen Eulenflugs durch Windkanalexperimente an präparierten Flügeln, wurde ebenfalls von den Autoren verfolgt [10]. Dabei wurden einerseits vorhandene Präparate verwendet, die von den "Senckenberg Naturhistorischen Sammlungen Dresden" zur Verfügung gestellt wurden, sowie weitere von Mitarbeitern dieses

Abb. 7: Skalierte Schalldruckpegel des Fluggeräuschs aus Überflugmessungen in Terzbändern (die Skalierung berücksichtigt den Einfluss unterschiedlicher Fluggeschwindigkeiten in den Messungen; der Wert in Klammern gibt die Zahl der Überflüge an, die in die Berechnung eingingen).



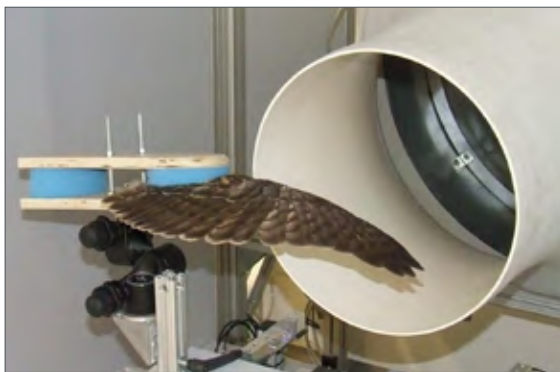
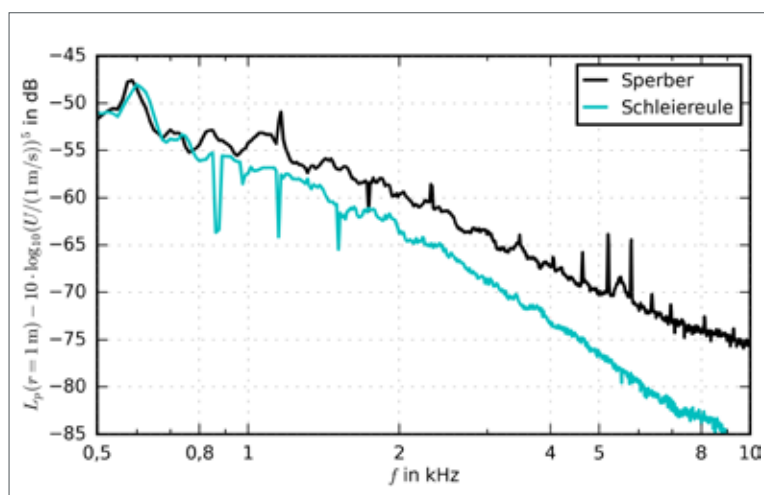


Abb. 8: Messaufbau im aeroakustischen Windkanal (gezeigt ist der rechte Flügel eines Sperbers).

Museums frisch präparierte Flügel von sogenannten Totfunden. Bei Untersuchungen an Präparaten muss jedoch einschränkend festgestellt werden, dass sich ein präparierter Flügel im Windkanal nicht genauso verhält wie der Flügel eines gleitenden Vogels, da sich Eigenschaften wie die Flexibilität durch die Präparation ändern können. Auch die Form der Präparate kann der eines echten Flügels nur möglichst gut anhand von Bild- und Videoaufnahmen nachempfunden werden, aber eine gewisse Unsicherheit bleibt vorhanden. Vorteil derartiger Messungen ist jedoch die gute Reproduzierbarkeit innerhalb einer speziell für akustische Messungen ausgelegten Messumgebung. Zusätzlich können in einem Windkanal auch aerodynamische Parameter, wie Auftriebs- und Widerstandskräfte, gemessen werden, was bei Überflugmessungen nicht möglich ist. In der Studie wurden Messungen an je zwei präparierten Flügeln unterschiedlicher Vogelarten durchgeführt. Dazu gehörten die Schleiereule und der Waldkauz als Vertreter der leise fliegenden Eulenvögel sowie der Mäusebussard (*Buteo buteo*), der Sperber und die Taube als Vertre-

Abb. 9: An Flügelpräparaten im aeroakustischen Windkanal gemessene skalierte Schalldruckpegel (Strömungsgeschwindigkeit ca. 12 m/s, Frequenzauflösung 12,5 Hz).



ter der nicht leise fliegenden Vögel. Die Flügel wurden so vor der Düse des Windkanals befestigt, dass verschiedene Anstellwinkel eingestellt werden konnten. Gleichzeitig wurden die aerodynamischen Kräfte mit Hilfe einer Windkanalwaage gemessen. Abbildung 8 zeigt eine Fotografie des Messaufbaus.

Als Beispiel zeigt Abbildung 9 den am Flügel einer Schleiereule gemessenen Schalldruckpegel im Vergleich zu dem am Flügel eines Sperbers gemessenen. Bei beiden Flügeln war die umströmte Fläche mit  $448 \text{ cm}^2$  (Schleiereule) und  $423 \text{ cm}^2$  (Sperber) etwa vergleichbar groß. Bei dieser Messung betrug die Strömungsgeschwindigkeit  $12,3 \text{ m/s}$ . Sie ist etwas höher als die Fluggeschwindigkeit der Eule unter realen Bedingungen, da akustische Windkanalmessungen bei noch niedrigeren Geschwindigkeiten aufgrund zunehmender Nebengeräusche schwierig sind. Die Schalldruckpegel wurden wie die in Abbildung 7 gezeigten mit der Strömungsgeschwindigkeit sowie auf einen Messabstand von  $1 \text{ m}$  skaliert. Auch diese Ergebnisse zeigen, dass das Geräusch bei niedrigen Frequenzen unterhalb von etwa  $800 \text{ Hz}$  bei beiden Vögeln vergleichbar ist. Mit steigender Frequenz liegt das am präparierten Eulenflügel gemessene Umströmungsgeräusch jedoch deutlich unter dem des Sperberflügels, mit Unterschieden von etwa  $5 \text{ dB}$  bei  $2 \text{ kHz}$  bis hin zu über  $10 \text{ dB}$  bei  $10 \text{ kHz}$  bei dieser Geschwindigkeit.

Somit zeigen sowohl die Überflugmessungen an lebenden Eulen als auch die Messungen an Flügelpräparaten im Windkanal eine deutliche Geräuschminderung gegenüber anderen, nicht leise fliegenden Vögeln. Diese lässt sich jedoch nur in einem Bereich höherer Frequenzen beobachten, in dem das Gehör der üblichen Beutetiere der Eule am sensibelsten ist. Aus evolutionsbiologischer Sicht ist das natürlich sinnvoll, da eine Geräuschminderung bei tiefen Frequenzen für die Jagdstrategie der Eule gar nicht notwendig ist. Ergänzend sei hier noch hinzuzufügen, dass die nachtaktiven Eulen nicht nur deshalb lautlos fliegen, um nicht von ihren Beutetieren gehört zu werden, sondern auch, damit das Geräusch der Beutetiere nicht von ihrem eigenen Fluggeräusch übertönt wird und sie somit ihre Beute auch im Flug akustisch orten können.

### Hinweis

In den Untersuchungen wurden alle Belange des Tiereschutzes eingehalten.

### Danksagung

Die Autoren danken Herrn T. Bachmann, Herrn T. Windisch und Herrn T. Drescher, den Falknerinnen des Wildparks Johannismühle sowie Herrn M. Päckert und Herrn J. Ziegler von den Senckenberg Naturhistorischen Sammlungen Dresden.



## Literatur

- [1] Bachmann, T.; Mühlenbruch, G.; Wagner, H.: The barn owl wing: an inspiration for silent flight in the aviation industry? *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication*, volume 7.975, page 79.750N. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [2] Wagner, H.; Weger, M.; Klaas, M.; Schröder, W.: Features of owl wings that promote silent flight. *Interface Focus*, 7(1):20160078, 2017.
- [3] Wang, Y.; Zhao, K.; Lu, X.-Y.; Song, Y.-B.; Bennett, G. J.: Bioinspired aerodynamic noise control: a bibliographic review. *Applied Sciences*, 9(11):2.224, 2019.
- [4] Clark, C. J.; LePiane, K.; Liu, L.: Evolution and ecology of silent flight in owls and other flying vertebrates. *Integrative Organismal Biology*, 2(1):obaa001, 2020.
- [5] Jaworski, J. W.; Peake, N.: Aeroacoustics of silent owl flight. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52:395–420, 2020.
- [6] 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.
- [7] Alerstam, T.; Rosén, J.; Bäckman, M.; Ericson, P. G. P.; Hellgren, O.: Flight speeds among bird species: allometric and phylogenetic effects. *PLoS Biol*, 5(8):e197, 2007.
- [8] Ponitz, B.; Schmitz, A.; Fischer, D.; Bleckmann, H.; Brückner, C.: Diving-flight aerodynamics of a peregrine falcon (*falco peregrinus*). *PLoS One*, 9(2):e86506, 2014.
- [9] Lindhe Norberg, U. M.: Structure, form, and function of flight in engineering and the living world. *Journal of Morphology*, 252(1):52–81, 2002.
- [10] Geyer, T. F.; Sarradj, E.; Fritzsche, C.: Silent owl flight: comparative acoustic wind tunnel measurements on prepared wings. *Acta Acustica United with Acustica*, 99(1):139–153, 2013.
- [11] Taylor, I.: *Barn owls: predator-prey relationships and conservation*. Cambridge University Press, 2004.
- [12] Konishi, M.: How the owl tracks its prey: experiments with trained barn owls reveal how their acute sense of hearing enables them to catch prey in the dark. *American Scientist*, 61(4):414–424, 1973.
- [13] Ffowcs Williams, J. E.; Hall, L. H.: Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 40(4):657–670, 1970.
- [14] Mascha, E.: Über die Schwungfedern. *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie* 77, pages 606–651, 1904.
- [15] Graham, R. R.: The silent flight of owls. *The Aeronautical Journal*, 38(286):837–843, 1934.
- [16] Bachmann, T.; Wagner, H.: The three-dimensional shape of serrations at barn owl wings: towards a typical natural serration as a role model for biomimetic applications. *Journal of Anatomy*, 219(2):192–202, 2011.
- [17] Weger, M.; Wagner, H.: Morphological variations of leading-edge serrations in owls (*strigiformes*). *PloS one*, 11(3):e0149236, 2016.
- [18] Kroeger, R. A.; Grushka, H. D.; Helvey, T. C.: Low speed aerodynamics for ultra-quiet flight. Technical report, Tennessee Univ Space Inst Tullahoma, 1972.
- [19] Anderson, G. W.: An experimental investigation of a high lift device on the owl wing. Technical report, Master Thesis, Air Force Institute of Technology, Air University, 1973.
- [20] Muthuramalingam, M.; Talboys, E.; Wagner, H.; Brückner, C.: Flow turning effect and laminar control by the 3d curvature of leading edge serrations from owl wing. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(2):026010, 2020.
- [21] Geyer, T. F.; Claus, V. T.; Hall, P. M.; Sarradj, E.: Silent owl flight: the effect of the leading edge comb. *International Journal of Aeroacoustics*, 16(3), 115–134
- [22] Sarradj, E.; Fritzsche, C.; Geyer, T.; Giesler, J.: Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. *Applied Acoustics*, 70(8):1073–1080, 2009.
- [23] Herold, G.; Sarradj, E.: Open-source software for the application of microphone array methods. *Noise & Vibration Worldwide*, 48(3-4):44–51, 2017.
- [24] 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.
- [25] Wang, L.; Liu, X.; Li, D.: Noise reduction mechanism of airfoils with leading-edge serrations and surface ridges inspired by owl wings. *Physics of Fluids*, 33(1):015123, 2021.
- [26] Bachmann, T.; Wagner, H.; Tropea, C.: Inner vane fringes of barn owl feathers reconsidered: morphometric data and functional aspects. *Journal of Anatomy*, 221(1):1–8, 2012.
- [27] Lilley, G. M.: The prediction of airframe noise and comparison with experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 239(4):849–859, 2001.
- [28] Oerlemans, S.; Fisher, M.; Maeder, T.; Kögler, K.: Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations. *AIAA Journal*, 47(6):1470–1481, 2009.
- [29] Chong, T. P.; Vathylakis, A.; Joseph, P. F.; Gruber, M.: Self-noise produced by an airfoil with nonflat plate trailing-edge serrations. *AIAA Journal*, 51(11):2665–2677, 2013.
- [30] Herr, M.; Dobrzynski, W.: Experimental investigations in low-noise trailing edge design. *AIAA Journal*, 43(6):1167–1175, 2005.
- [31] Hertel, H.: *Struktur, Form, Bewegung*. Krausskopf-Verlag, 1963.
- [32] Chen, K.; Liu, Q.; Liao, G.; Yang, Y.; Ren, L.; Yang, H.; Chen, X.: The sound suppression characteristics of wing feather of owl (*bubo bubo*). *Journal of Bionic Engineering*, 9(2):192–199, 2012.
- [33] Nachtigall, W.; Klimbingat, A.: Messung der Flügelgeometrie mit der Profilkammethode und geometrische Flügelkennzeichnung einheimischer Eulen. *Biona-Report*, 3:45–86, 1985.
- [34] Liu, T.; Kuykendoll, K.; Rhew, R.; Jones, S.: Avian wings. In 24th AIAA aerodynamic measurement technology and ground testing conference, AIAA paper 2004–2186, 2004.
- [35] Müller, W.; Patone, G.: Air transmissivity of feathers. *Journal of Experimental Biology*, 201(18):2591–2599, 1998.
- [36] Geyer, T. F.; Sarradj, E.; Fritzsche, C.: Measuring owl flight noise. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 249, pages 183–198. Institute of Noise Control Engineering, 2014.
- [37] Geyer, T. F.; Sarradj, E.; Fritzsche, C.: Measurement of the noise generation at the trailing edge of porous airfoils. *Experiments in Fluids*, 48(2):291–308, 2010.
- [38] Jaworski, J. W.; Peake, N.: Aerodynamic noise from a poroelastic edge with implications for the silent flight of owls. *Journal of Fluid Mechanics*, 723(2013):456–479, 2013.
- [39] Gruschka, H. D.; Borchers, I. U.; Coble, J. G.: Aerodynamic noise produced by a gliding owl. *Nature*, 233(5319):409–411, 1971.
- [40] Lilley, G.: A study of the silent flight of the owl. In 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 1998–2340, 1998.
- [41] Lorenz, K.: Beobachtetes über das Fliegen der Vögel und über die Beziehungen der Flügel- und Steuerform zur Art des Fluges. *Journal für Ornithologie*, 81(1):107–236, 1933.
- [42] Sarradj, E.; Fritzsche, C.; Geyer, T. F.: Silent owl flight: bird flyover noise measurements. *AIAA Journal*, 49(4):769–779, 2011.
- [43] 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. ■

**Dr.-Ing.**  
**Thomas F. Geyer**  
*Brandenburgische  
Technische Uni-  
versität Cottbus-  
Senftenberg*

**Christoph Fritzsche**  
*Sächsisches Landes-  
amt für Umwelt,  
Landwirtschaft  
und Geologie,  
Dresden*

**Prof. Dr.-Ing.**  
**Ennes Sarradj**  
*TU Berlin*

**Prof. Dr. rer.**  
**nat. habil. Her-  
mann Wagner**  
*RWTH Aachen*