

Wann ist ein Ton ein Ton?

Auf der Suche nach aeroakustischen Quellmechanismen

Maximilian Behn, Friedrich Bake, Ralf Burgmayer, Benjamin Pardowitz, Lars Enghardt

Oft stehen aeroakustische Schallquellen in engem Zusammenhang mit dem Auftreten von Tönen, die durch die Interaktion von Strömung mit Strukturen oder Resonatoren entstehen. Der Schneidenton einer Orgelpfeife wird beispielsweise gezielt angeregt, auch der Nachlauf eines Zylinders (Karman'sche Wirbelstraße) ist als tonale Schallquelle hinlänglich bekannt. Der tonale Interaktionsschall einer Triebwerksfan- oder Ventilatorstufe stellt ein komplexes aeroakustisches Problem dar, für das aktuell vielfältige Lärmreduktionstechnologien entwickelt werden oder bereits in der technischen Umsetzung sind. In der Modellvorstellung wird von periodischer Wirbelablösung oder von periodischer Interaktion der Rotornachläufe mit den Statorschaufeln ausgegangen. In vielen technisch relevanten Strömungen treten zusätzlich dazu nicht zu vernachlässigende turbulente Strömungsfuktuationen auf, die keinerlei Periodizität aufweisen. Bei ausreichender räumlicher Ausdehnung dieser Strukturen, z. B. in der Zuströmung, werden zusätzliche Schallquellen hervorgerufen, die zu einer verstärkten Schallabstrahlung führen. An ausgewählten Beispielen einer Fanstufe und eines Schneidentons werden mit Hilfe spezieller Analysetechniken vermeintliche und reine Töne im Hinblick auf die ihnen zu Grunde liegenden aeroakustischen Quellmechanismen einander gegenüber gestellt.

Einleitung

In der Strömungsakustik werden häufig Schallentstehungsmechanismen untersucht, die sich durch eine ausgeprägte wahrgenommene Tonhaltigkeit auszeichnen. Die Modellierung solcher Quellen basiert i. d. R. auf der Wechselwirkung einer Strömung mit einer Struktur. Beispiele sind die Interaktion eines Luftstrahls mit der Schneide einer Orgelpfeife, die periodische Wirbelablösung im Nachlauf eines Zylinders (Karman'sche Wirbelstraße) oder die Interaktion von Rotornachläufen mit den Statorschaufeln einer Triebwerksfan- oder Ventilatorstufe, wie in Abbildung 1 illustriert. Aufgrund der strengen Periodizität in den physikalisch zugrunde liegenden Strömungsvorgängen dieser Beispiele werden dis-

When is a tone a tone? – The search for aeroacoustic source mechanisms

Aeroacoustic sources are often linked to the occurrence of tones, which are generated by the interaction of a flow with rigid structures or resonators. For instance, the edge tone of an organ pipe is deliberately excited; also the wake of a cylinder (Kármán Vortex Street) is a well-known tonal sound source. The tonal interaction noise of aeroengine fan stages and ventilators constitutes a complex aeroacoustic problem, which has been and still is subject to the development of many noise reduction technologies. Physical modelling often assumes (exactly) periodical flow structures such as vortex shedding or the interaction of identical rotor wakes with the stator vanes. However, many flow situations relevant in practice feature turbulent flow fluctuations, which are not negligible and furthermore do not exhibit any periodicity. If these flow structures have a sufficiently large spatial extent (e. g. in the inlet flow) additional sources are generated increasing the sound radiation. A detailed spectral analysis shows that the sound pressure components generated by turbulence spread over a narrow frequency band, whereas the interaction tone in case of low inflow turbulence comprises only a single frequency component. Using spectral analysis techniques apparent and pure tones are compared with regard to the underlying aeroacoustic source mechanisms for the examples of a fan stage and the edge tone.

crete Töne angeregt, die eine definierte Frequenz und Phasenbeziehung zur Quelle aufweisen. Viele in technisch relevanten Strömungen auftretende turbulente Strömungsfuktuationen erzeugen hingegen bei Interaktion mit einer Struktur Schallfelder mit Rauschcharakter, die durch ein breitbandiges Frequenzspektrum gekennzeichnet sind.

In der wissenschaftlichen Gemeinschaft wird auf Grundlage von gängigen Modellvorstellungen der Gebrauch der Begriffe „Ton“ und „Rauschen“ nicht einheitlich gehandhabt. In diesem Artikel soll anhand von Beispielen gezeigt werden, dass die Anwendung einer strikten Definition für tonale und breitbandige Schallfeldkomponenten bei der Untersuchung von strömungsakustischen Phänomenen

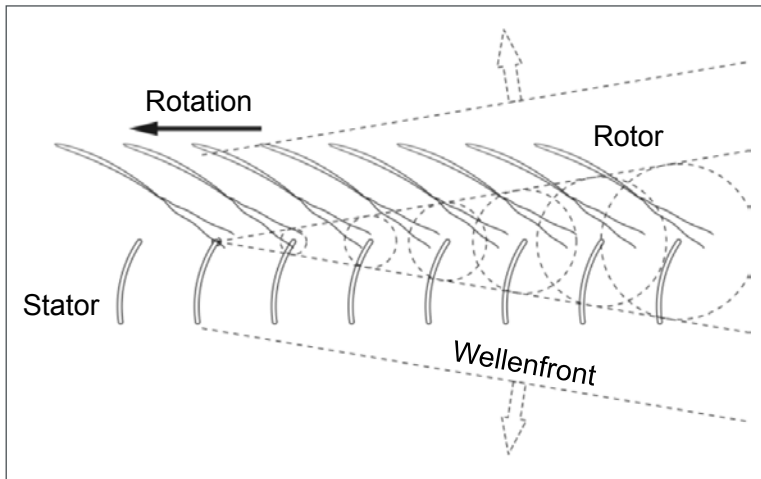


Abb. 1: Interaktion der Rotornachläufe mit den Statorschaufeln und die daraus resultierenden, abgestrahlten Wellenfronten

zur Entwicklung eines tieferen Verständnisses der Schallentstehungsmechanismen hilfreich ist.

Nach einer kurzen Definition der Begriffe „Ton“ und „Rauschen“ werden gemessene Schallsignale, die vermeintliche Töne aufweisen, hinsichtlich ihrer spektralen Charakteristiken untersucht. Auf Basis der hier vorgestellten, einfachen Klassifizierung lassen sich die Einflüsse der zugrunde liegenden aeroakustischen Quellmechanismen bewerten.

Begriffsdefinitionen

Als reine Töne werden Schallsignale verstanden, die aus einer einzigen Frequenzkomponente bestehen. Sie werden häufig auch als Sinustöne bezeichnet [1]. Im Kontext der (Fourier)-Frequenzanalyse weisen reine Töne eine unendlich schmale Frequenzbandbreite auf. Bei der Auswertung gemessener Mikrofonsignale, die meist in diskreter, digitaler Form vorliegen, ist der berechnete Schalldruckpegel eines reinen Tons unabhängig von der verwendeten Fensterlänge, wenn die Frequenz des Tons mit einer Ana-

lysefrequenz der diskreten Fouriertransformation übereinstimmt. Den reinen Tönen kann jeweils eine feste Amplitude und Phase zugeordnet werden.

Rauschhafte Schallsignale haben sogenannte breitbandige Frequenzspektren. Insbesondere in der akustischen Messtechnik kommen unterschiedlich „farbige“ Rauschsignale zum Einsatz, wie z. B. weißes oder rosa Rauschen, deren Spektren sich unterschiedlich weit über den hörbaren Frequenzbereich erstrecken. In den hier untersuchten aeroakustischen Phänomenen wird sogenanntes Schmalbandrauschen angeregt, dessen Frequenzbandbreite nur wenige Hertz beträgt. Im Gegensatz zu reinen Tönen sind die berechneten Schalldruckpegel stark von der verwendeten Fensterlänge und der daraus resultierenden Frequenzauflösung abhängig. Zur besseren Vergleichbarkeit lässt sich die Amplitudendichte des Schallspektrums berechnen, indem man das berechnete Leistungsspektrum durch die Frequenzauflösung dividiert.

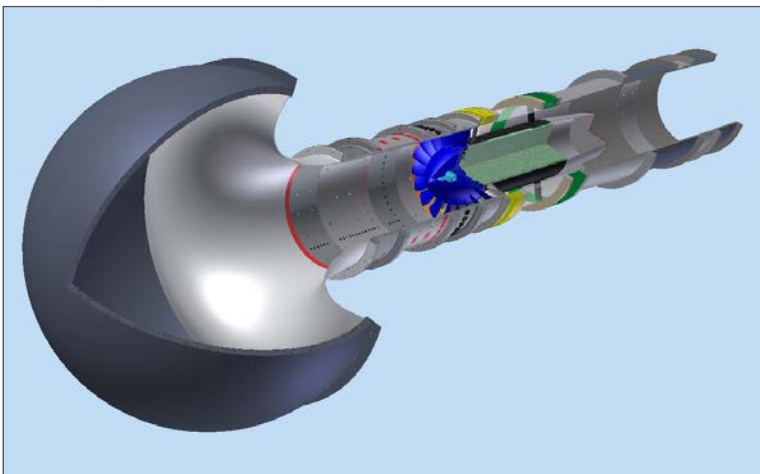
Schallanregung durch Rotor-Stator-Interaktion

In modernen Flugzeugtriebwerken wird zur Erzeugung des Hauptluftstroms, der maßgeblich zum Gesamtschub des Triebwerks beiträgt, eine Fanstufe eingesetzt, die aus einer rotierenden und einer stromab befindlichen statischen Schaufelreihe besteht. Dabei verrichtet der Rotor Arbeit am Fluid, indem das Fluid beschleunigt wird. Hierbei wird das Fluid zu einem gewissen Teil in Rotation versetzt, die wiederum durch den Stator in eine axiale Strömung zurückgewandelt wird. Der Hauptschallentstehungsmechanismus von Fanstufen ist die Interaktion der Rotornachläufe mit den Statorschaufeln. In Abbildung 1 ist der Schallentstehungsmechanismus für eine Fanstufe mit einer höheren Anzahl Rotorschaufeln als Statorschaufeln illustriert.

Die dabei angeregten Frequenzen werden als Blattfolgefrequenzen bezeichnet, da sie sich als Produkt aus der Schaufelanzahl und der Drehfrequenz sowie deren Harmonische berechnen lassen.

Durch eine gestörte Zuströmung wird zusätzliche Schallanregung am Rotor hervorgerufen, die durch auftretende räumliche Variationen des Strömungsfeldes sowie erhöhte turbulente Störungen entstehen. Dies kann insbesondere in Laborversuchsständen mit Zulaufstörungen auftreten, so dass nicht selten am Fanmodell höhere Pegel bei der Blattfolgefrequenz gemessen werden, als sie im Flug tatsächlich auftreten würden. Ein sogenannter ICD (engl. Inflow Control Device) vor dem Einlauf, wie in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt, führt zu einem Ausgleich der Strömung sowie zu einer Verkleinerung der turbulenten Längenskalen der Zulaufturbulenz.

Abb. 2: Laborversuchsstand mit installiertem Inflow Control Device (ICD) im Einlauf



Der Einfluss gestörter Zuströmung ist auch ein wichtiger Untersuchungsaspekt für zukünftige Flugzeugkonfigurationen, bei denen geplant ist, die Triebwerke direkt am Flugzeugrumpf anzubringen und die Grenzschicht des Rumpfes einzusaugen. Die resultierende Strömung im Triebwerkseinlauf ist stark unregelmäßig und es treten turbulente Strukturen mit unterschiedlichen Längenskalen auf.

Schallanregung durch Strahl-Kanten-Interaktion

Ein strömungsgetriebener Aktuator, wie in Abbildung 3 dargestellt, erzeugt einen Ton nach dem Prinzip eines Strahl-Kanten-Systems [2]. Die gezielte Anwendung der Schallerzeugung mit eingeblasener Luft ist beispielsweise im Bereich der Blasinstrumente sehr verbreitet, speziell bei Orgelpfeifen und Flöten. Ein solcher Aktuator kann aber auch für sogenannte Zero-Massflow-Liner in Triebwerken zum Einsatz gebracht werden, wo er zur Anregung der Kavität hinter einer Linerplatte dient [3]. Die akustische Anregung resultiert dann in einem verbesserten Dissipationsverhalten [4].

In einem Strahl-Kanten-System werden durch das wechselseitige Anströmen der scharfen Kante Druckschwankungen erzeugt, die als Töne wahrgenommen werden. Die Frequenz des Schneidentons ist vom Schneidenabstand a und der Strahlgeschwindigkeit

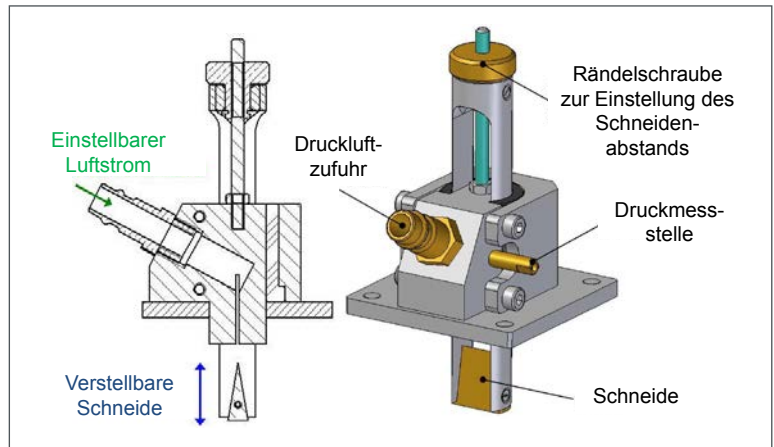


Abb. 3: Aufbau aeroakustischer Aktuator

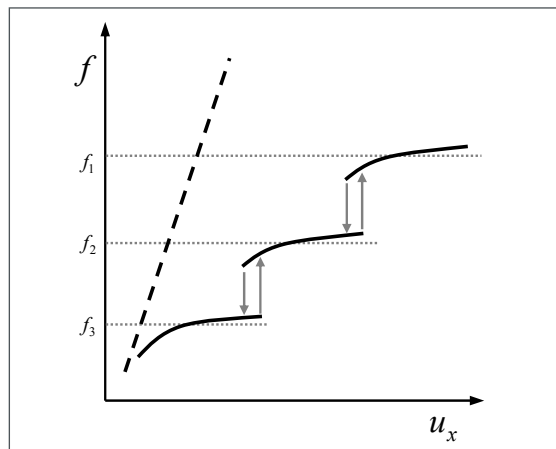


Abb. 4: Frequenzverhalten des Strahl-Kanten-Systems (gestrichelt: ungekoppelt; durchgezogen: an ein Resonanzsystem gekoppelt)

Abb. 5: Skizze (oben) und Foto (unten) des im annularen Linervolumen eingesetzten Aktuators



digkeit u_x abhängig. Im Folgenden wird lediglich die Variation des Schneidentons mit der Strahlgeschwindigkeit betrachtet.

Abbildung 4 zeigt das Frequenzverhalten eines Strahl-Kanten-Systems gekoppelt an einen Resonator am Beispiel einer Orgelpfeife. Die gestrichelte Linie zeigt das Frequenzverhalten des ungekoppelten Systems. Die Bereiche gleichbleibender Frequenzen liegen bei den Eigenfrequenzen des Resonanzvolumens. Ab einer gewissen Frequenz setzt der Grundton des Resonators ein. Die Frequenz des Tons erhöht sich leicht mit der Strahlgeschwindigkeit bis zu einem Frequenzsprung in die nächstgelegene Eigenresonanz. Das Resonanzvolumen bestimmt also hier das Verhalten des Gesamtsystems.

Für die in diesem Artikel dargestellten Ergebnisse wurde der in Abbildung 5 dargestellte Strahl-Kanten-Aktuator mit einem festeingestellten Schneidenabstand a von 12,6 mm in ein annulares Ringvolumen (Linerkavität) eingesetzt und mit verschiedenen Strahlgeschwindigkeiten bzw. Einblasmassenströmen m betrieben. Mit Hilfe von im Resonanzvolumen wandbündig eingebauten Mikrofonen wurde

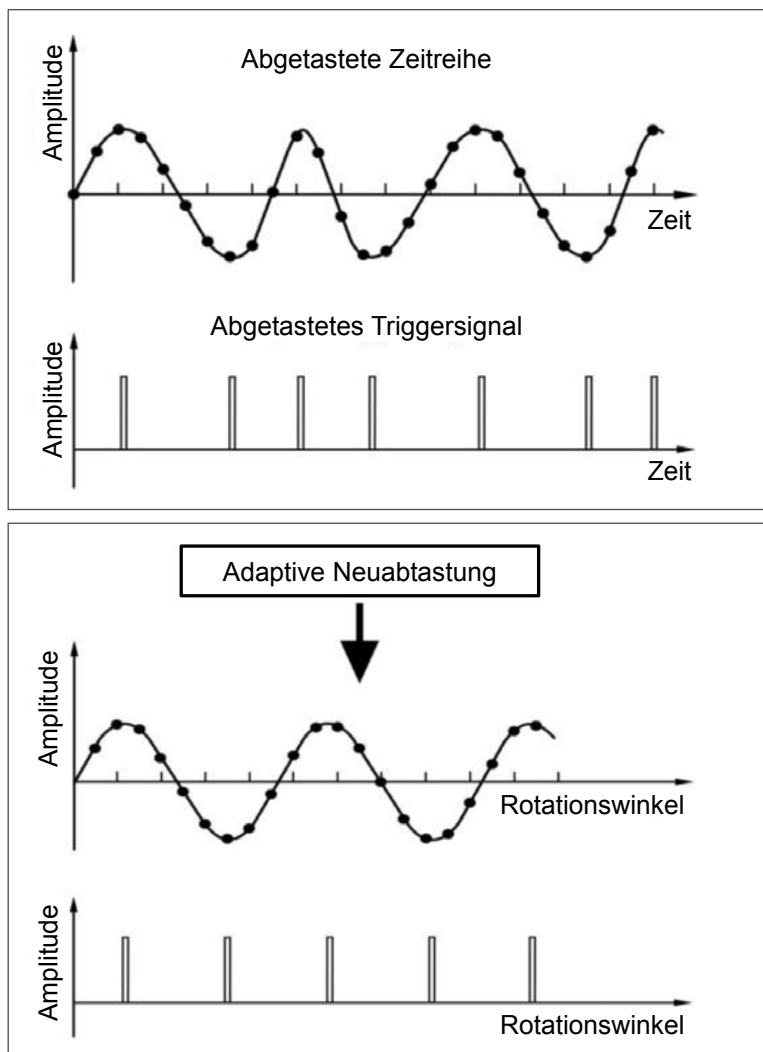
das akustische Antwortverhalten aufgezeichnet und analysiert.

Identifikationsmethode für tonale Schallereignisse

Zur Untersuchung, ob es sich bei einem beobachteten tonalen Schallereignis wirklich um einen Ton im Sinne der in der Einleitung genannten Definition handelt, eignet sich eine detaillierte spektrale Analyse bei Variation der Frequenzauflösung. Üblicherweise werden aufgezeichnete Mikrofon-signale in zeitliche Fenster unterteilt und die daraus mit Hilfe der Fouriertransformation berechneten Kurzzeitspektren gemittelt. Die resultierende Frequenzauflösung ergibt sich aus der Abtastrate und der verwendeten Fensterlänge. Werden die Fensterlängen sukzessive vergrößert, so verbessert sich die Frequenzauflösung. Für die nachfolgenden Analyse-ergebnisse werden drei verschiedene Fensterlängen

Abb. 6 (oben): Ursprüngliches Mikrofon-signal bei Schwankungen der Rotordrehzahl (aus [3] mit Genehmigung)

Abb. 7 (unten): Rotorsynchrones Mikrofon-signal nach adaptiver Neuabtastung (aus [3] mit Genehmigung)



verwendet, sodass sich eine grobe, mittlere und sehr feine Frequenzauflösung ergibt. Für die feinste Frequenzauflösung wird das vollständige Mikrofon-signal mit der Fouriertransformation ausgewertet.

Das beschriebene Verfahren benötigt Signale mit einer festen Phasenreferenz. Diese ist im Fall der eingeschwingenen Strahl-Kanten-Interaktion mit konstant gehaltenem Anregungsmassenstrom gegeben. Bei der Rotor-Stator-Interaktion muss vor Anwendung der spektralen Auswertung der Einfluss von Rotordrehzahlschwankungen korrigiert werden, um Phasenfluktuationen zu vermeiden.

Mittels des Rotortriggersignals wird die relative Rotorposition zu einem festen Gehäusepunkt aufgezeichnet. Schwankungen der Rotordrehzahl verkleinern oder vergrößern die zeitlichen Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Triggerimpulsen, vgl. Abbildung 6. Damit einhergehend wird die momentane Frequenz der Rotor-Stator-Interaktionstöne (RSI) ebenfalls erniedrigt oder erhöht.

Die adaptive Neuabtastung [5] interpoliert das Zeitsignal auf eine feste Sampleanzahl pro Rotorumdrehung, wodurch die Frequenzschwankungen der Rotor-Stator-Interaktionstöne ausgeglichen werden und eine feste Phasenreferenz geschaffen wird, vgl. Abbildung 7. Nach Anwendung der Fouriertransformation erhält man das sogenannte Ordnungsspektrum.

Anwendungsfall Rotor-Stator-Interaktion

Der Vergleich von Frequenzspektren des ursprünglichen Mikrofon-signals ohne feste Phasenreferenz und des rotorsynchronen, neuabgetasteten Mikrofon-signals ist in Abbildung 8 für den Fall mit ICD dargestellt. Die Frequenzauflösung ist relativ zur Rotordrehfrequenz als ΔEO (engl. engine order bzw. Wellenordnung) angegeben. Es zeigt sich, dass die Pegel bei den Harmonischen der Blattfolgefrequenz durch die adaptive Neuabtastung bei sauberer Zuströmung ansteigen.

Wenn der Versuchsstand ohne ICD betrieben wird, die Zuströmung also gestört ist, lässt sich ein anderes Verhalten bei Durchführung der adaptiven Neuabtastung der Mikrofon-signale beobachten. Die Pegel insbesondere bei der Blattfolgefrequenz bleiben nahezu konstant (siehe Abbildung 9). Dies deutet darauf hin, dass die Schallfeldkomponenten bei der Blattfolgefrequenz nicht mit den Rotordrehzahlschwankungen korreliert sind, wie es hingegen bei ungestörter Zuströmung der Fall ist.

Ein genauer Blick auf die Blattfolgefrequenz zeigt den spektralen Charakter des erzeugten Schallfeldes, wie in Abbildung 10 dargestellt. Es ist vielfach verbreitet, von einer Erhöhung der Fantöne durch eine gestörte Zuströmung zu sprechen. Die detaillierte Analyse mit höherer Frequenzauflösung zeigt

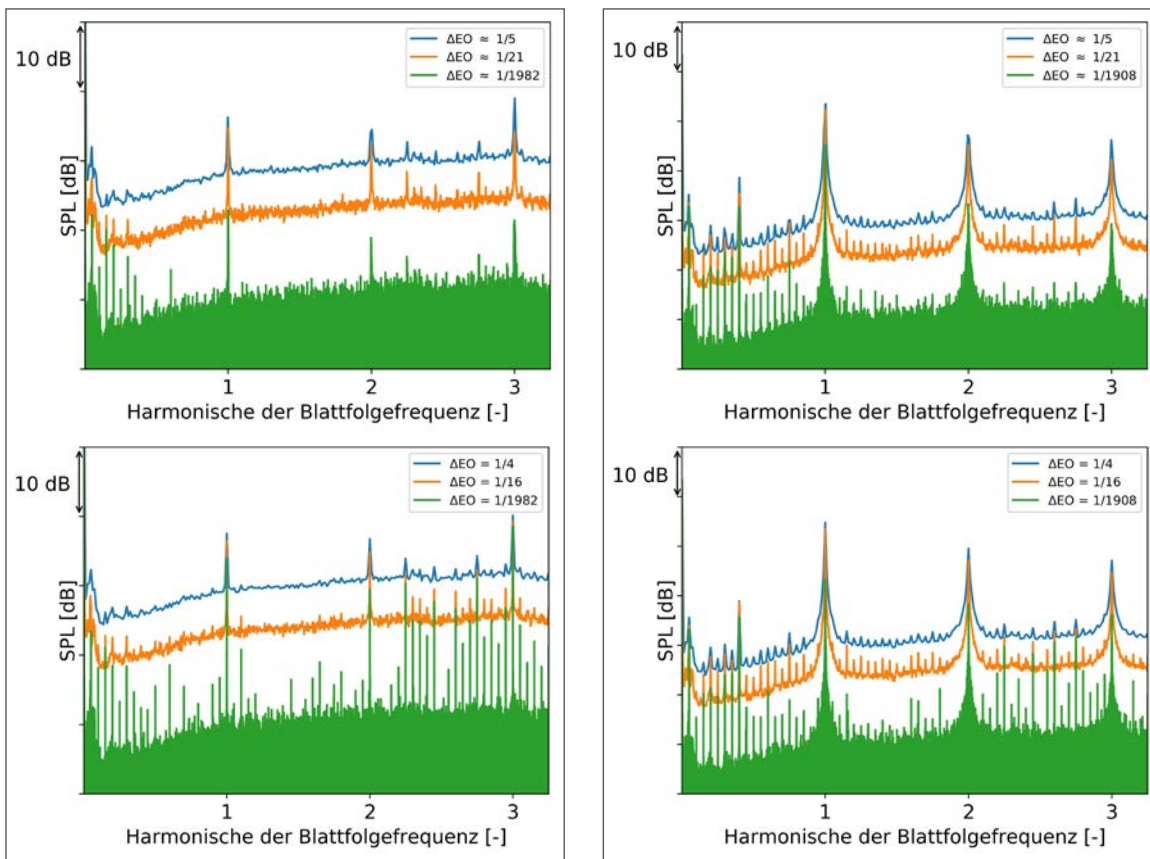
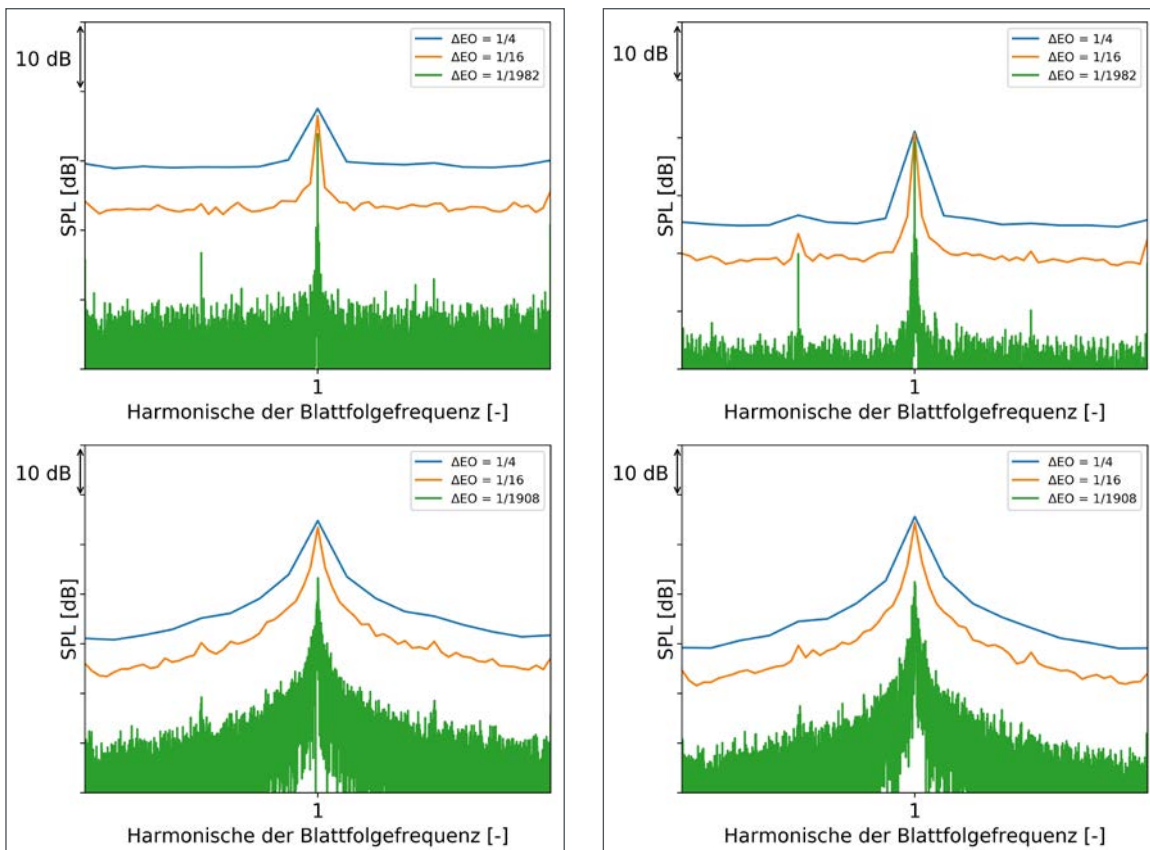


Abb. 8 (links) und Abb. 9 (rechts): Vergleich der Frequenzspektren des ursprünglichen Mikrofonsignals (oben) und des rotorsynchronen Signals (unten, nach adaptiver Neuabtastung) im Einlauf mit ICD (links) und ohne ICD (rechts)

Abb. 10 (links) und Abb. 11 (rechts): Vergleich der Frequenzspektren bei der Blattfolgefrequenz im Einlauf mit ICD (links oben) und ohne ICD (links unten) und im Fernfeld mit ICD (rechts oben) und ohne ICD (rechts unten).



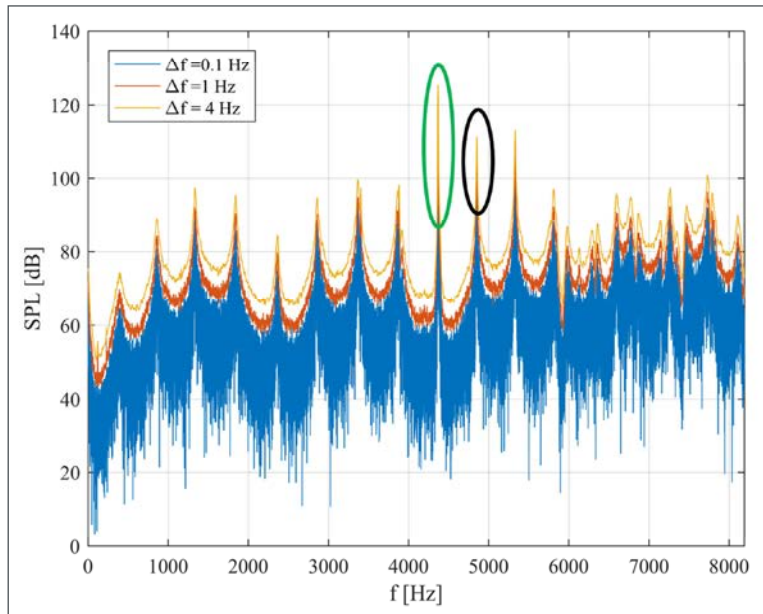


Abb. 12: Gesamtspektrum bei $a = 12,6 \text{ mm}$ und $m = 5,2 \text{ kg/h}$

jedoch, dass sich das Schallfeld bei der Blattfolgefrequenz verändert hat. Der im Fall mit ICD stark ausgeprägte Ton erfährt ohne ICD eine bedeutende spektrale Verbreiterung, was dafür spricht, dass rauschhafte Schallfeldkomponenten stärker angeregt werden. Daraus lässt sich als Wirkmechanismus die

Interaktion der Rotorschaukeln mit der großskaligen und zudem amplitudenverstärkten Zuströmturbulenz ableiten.

Nun werden im Fernfeld gemessene Mikrofonsignale betrachtet, um zu klären, ob es sich möglicherweise bei dem Anstieg der rauschhaften Komponenten im Signalspektrum um Strömungsrauschen aufgrund von der turbulenten Druckschwankungen handelt. Diese werden durch die schnelle mittlere Strömung über die wandbündig installierten Mikrofonmembranen konvektiert.

In Abbildung 11 zeigt sich, dass im Fernfeld die gleiche spektrale Charakteristik wie im Strömungskanal vorliegt. Das ist ein deutlicher Hinweis dafür, dass das erhöhte Rauschen tatsächlich Teil des angeregten und ins Fernfeld abgestrahlten Schallfeldes ist.

Anwendungsfall Strahl-Kanten-Interaktion

Abbildung 12 zeigt das Frequenzspektrum von einem der im Resonanzvolumen des Liners eingebauten Mikrofone für drei verschiedene Frequenzauflösungen bei einem Einblasmassenstrom m von $5,2 \text{ kg/h}$. Es werden offensichtlich verschiedene Resonanzfrequenzen gleichzeitig angeregt, wovon eine besonders dominant auftritt (grüne Markierung). Bei anderen

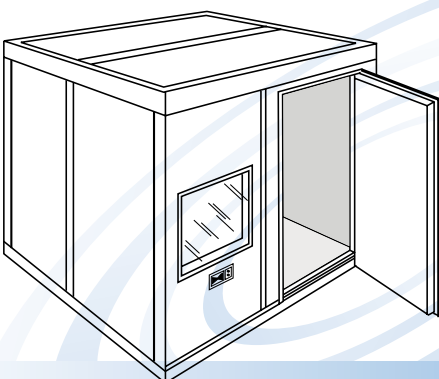
IAC Acoustics für Medizin und Forschung

Ein- und doppelwandige Akustikkabinen

IAC ist weltweit führender Hersteller und Lieferant von Akustik-Räumen, Kabinen und echofreien Kammern für die Hörforschung und -entwicklung sowie einer Vielzahl von Akustikprodukten mit nachgewiesener Wirksamkeit.

Akustiklösungen von IAC Acoustics

Langjährige Expertise, der Sie vertrauen können.



deutschland@iac-gmbh.de
www.iac-gmbh.de

Resonanzfrequenzen (z. B. schwarze Markierung) liegt der angeregte Schalldruckpegel (SPL) um mindestens 10 dB niedriger. In diesem Gesamtspektrum scheinen sich sowohl die dominierende Frequenz als auch die weiteren Resonanzfrequenzen auf den ersten Blick als diskrete Töne darzustellen.

Betrachtet man jedoch die einzelnen Peakfrequenzen durch einen Zoom in das Spektrum jeweils im Detail, dann zeigt sich, dass nur die dominante Frequenz (Abb. 13 oben) auch in der hohen Frequenzauflösung von 0,1 Hz (blau) noch klar als Ton erkennbar ist. Der Schalldruckpegel bei dieser Frequenz ist nahezu unabhängig von der spektralen Frequenzauflösung. Selbst bei der feinsten Frequenzauflösung liegen die Pegel der benachbarten Frequenzstützstellen weit unter dem des Tonpeaks. Im Gegensatz dazu zeigt der vergrößerte Bereich um eine „Neben-Peakfrequenz“ (Abb. 13 unten), dass bei sukzessiver Verfeinerung der Frequenzauflösung sowohl der maximale Schalldruckpegel sinkt, als auch die Pegelwerte der benachbarten Frequenzstützstellen im Vergleich zum Peakpegel relativ hoch liegen. Diese „Neben-Peakfrequenz“ wird also eher durch ein Schmalbandrauschen als durch einen diskreten Ton charakterisiert.

Erklären lässt sich dieses Verhalten dadurch, dass bei der dominanten Frequenz eine ideale Kopplung zwischen dem schallerzeugenden Strahl-Kanten-System und einer der Hohlraumresonanzfrequenzen des Ringvolumens besteht. Damit kommt es zu einer diskreten tonalen Schallanregung. Die turbulente Schlitz-Kantenströmung bei Reynoldszahlen im Bereich von 15.000 verursacht allerdings auch eine „verrauschte“ Anregung von weiteren Hohlraumresonanzen. Bei diesen Frequenzen gibt es aber keine saubere Kopplung zwischen dem Strahl-Kanten-System und den Hohlraumresonanzen. Daher erscheinen diese Frequenzen im Spektrum eher als Schmalbandrauschen und entsprechen somit mehr der Systemantwort des Hohlraums bei breitbandiger Anregung, die erhöhte Pegel bei den Resonanzfrequenzen des Hohlraums aufweist.

Verändert man den Betriebspunkt geringfügig, indem der Einblasmassenstrom am Aktuator leicht erhöht wird, dann ändert sich die Frequenzantwort sprunghaft. Abbildung 14 zeigt, dass dann die dominante Frequenz bei einer höheren Resonanzfrequenz liegt. Die zuvor dominante Komponente wird nun durch eine „Neben-Peakfrequenz“ repräsentiert. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die Erhöhung des Massenstroms und damit der Strahlgeschwindigkeit einen Sprung im Frequenzverhalten des, an das Resonatorsystem gekoppelten, Strahl-Kanten-Systems, wie in Abbildung 3 (durchgezogene Linien) zeigt, verursacht.

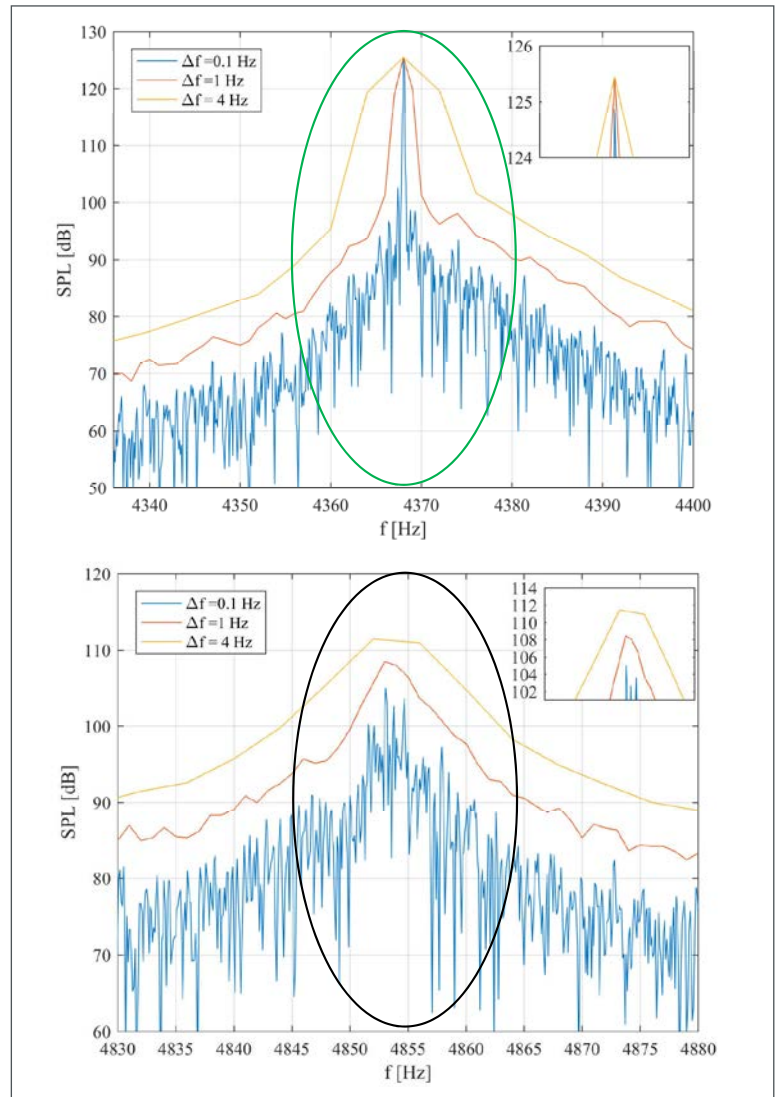
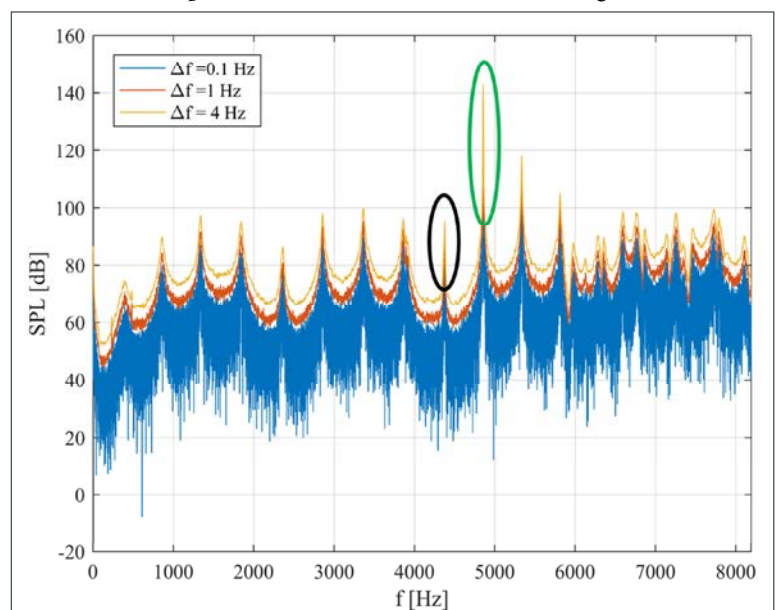


Abb. 13: „Dominante“ Frequenz bei $a = 12,6$ mm und $m = 5,2$ kg/h, reiner Ton (oben). Nächsthöhere Resonanzfrequenz nur Schmalbandrauschen (unten).

Abb. 14: Gesamtspektrum bei $a = 12,6$ mm und $m = 5,6$ kg/h



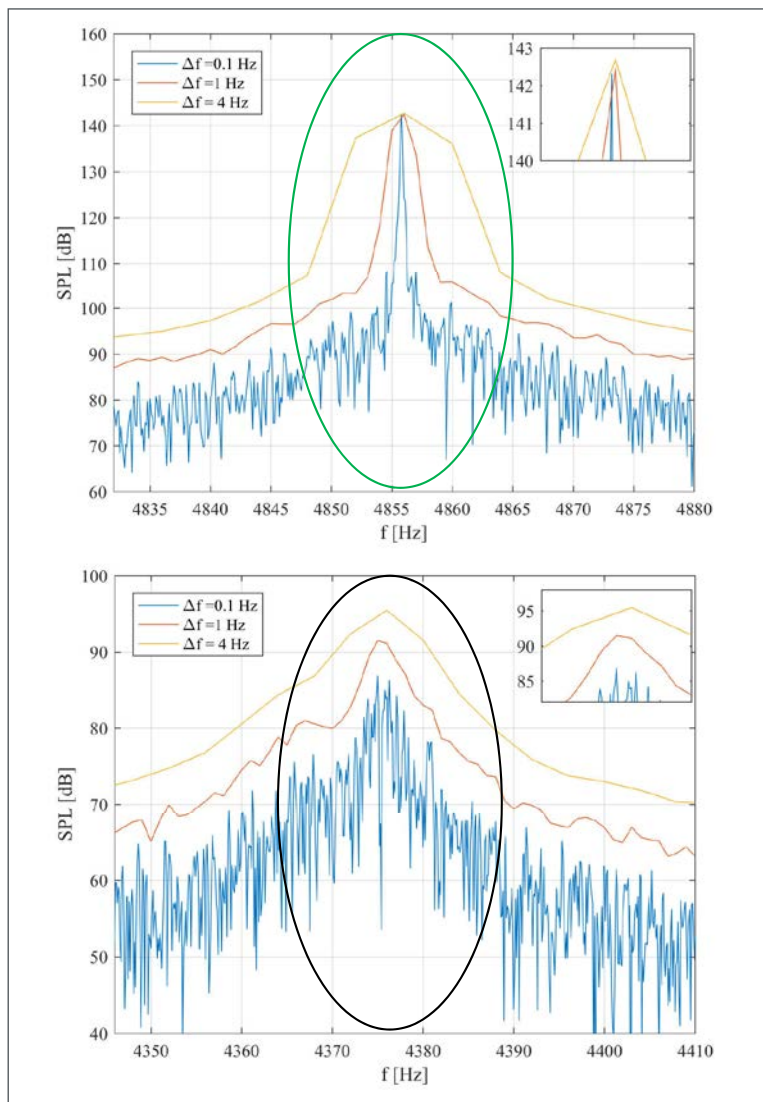


Abb. 15: „Dominante“ Frequenz bei $a = 12,6 \text{ mm}$ und $m = 5,6 \text{ kg/h}$, reiner Ton (oben). Nächstniedrigere Resonanzfrequenz nur Schmalbandrauschen (unten).

Die genauere Betrachtung beider Frequenzen in Abb. 15 bestätigt diese Vermutung. Bei der dominanten Frequenz (Abb. 15 oben) liegt eine eindeutig tonale Schallanregung vor. Die „Neben-Peakfrequenz“ (Abb. 15 unten) weist hingegen nun eher ein Schmalbandrauschverhalten auf.

Maximilian Behn,
Dr. Friedrich Bake,
Ralf Burgmayer,
Dr. Benjamin Pardowitz,
Prof. Dr. Lars Enhardt
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik, Triebwerksakustik, Berlin

Fazit

In vielen strömungsakustischen Schallentstehungsvorgängen treten schmalbandige Peaks auf, die das menschliche Ohr pauschal als Töne erfasst. Selbst die hochgenaue Fourieranalyse der Zeitsignale eines Mikrofons erweist sich oft als trügerisch und kann nicht exakt unterscheiden, ob es sich bei wahrgenommenen Schallsignalen um reine Töne oder Breitbandsignalanteile in einem schmalen Frequenzband handelt, was für den reinen Höreindruck oft nebensächlich ist, sehr wohl aber dabei helfen kann, verschiedenen Schallentstehungsmechanismen auf die Spur zu kommen.

In dem vorliegenden Artikel wurden zwei typische strömungsmechanische Schallentstehungsmechanismen vorgestellt, deren Schallentstehung bzw. -abstrahlung mit Hilfe von Laboraufbauten sorgfältig vermessen wurde. Beide Anwendungsbeispiele wiesen entweder zwei unterschiedliche Betriebsbedingungen oder eine Parametervariation auf. Die vorgeschlagene, recht einfach anzuwendende Methode zur Tonidentifikation erlaubte es in beiden Fällen, die nicht offensichtliche Veränderung der tonalen Schallentstehung durch die Parametervariation auf unterschiedliche Entstehungsmechanismen bzw. Veränderungen der Kombination von Schallanregung und angekoppeltem Resonanzkörper zurückzuführen. Der Artikel soll zum einen demonstrieren, dass die Identifikation von Tönen und deren Zuweisung zu Schallentstehungsmechanismen oftmals erst auf den zweiten Blick mit Hilfe sorgfältiger Analysetechnik gelingt. Zum anderen soll er Kolleginnen und Kollegen dazu anregen, eigene Tonaufzeichnungen mit dem vorgestellten Verfahren zu untersuchen, um die Tonreinheit von strömungsakustischen Anregungsmechanismen zu überprüfen.

Literatur

- [1] Möser, M.: Technische Akustik. Berlin, Springer Verlag 2015.
- [2] Pardowitz, B.: Entwicklung und Erprobung eines aeroakustischen Aktuators zur Schallerzeugung. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2009.
- [3] Heuwinkel, C.; Busse, S.; Enhardt, L.; Röhle, I.: Vorrichtung und Verfahren zur Verbesserung der Dämpfung von akustischen Wellen. Patent, ausgestellt am 30. Mai 2012, Patentkennung: EU EP 2167796 B1.
- [4] Lahiri, C.; Pardowitz, B.; Bake, B.; Röhle, I.; Enhardt, L.: Excitation of a Zero Mass Flow Liner for Acoustic Damping. AIAA Journal 49, Nr. 3, S. 513–519, 2011.
- [5] Tapken, U.: Analyse und Synthese akustischer Interaktionsmoden von Turbomaschinen. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2016. ■