

# Simulation von Hinterkantenlärm an Tragflügelprofilen mit porösen Elementen

Lennart Rossian<sup>1</sup>, Roland Ewert<sup>2</sup>, Jan W. Delfs<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR, Email: lennart.rossian@dlr.de*

<sup>2</sup> *Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR, Email: roland.ewert@dlr.de*

<sup>3</sup> *Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR, Email: jan.delfs@dlr.de*

## Einleitung

Mit der erfolgreichen Reduktion von Antriebslärm heutiger Verkehrsflugzeuge gewinnt Umströmungslärm eine immer größere Bedeutung. Dieser entsteht unter anderem durch die Interaktion der Wirbelstrukturen der turbulenten Grenzschicht mit der Hinterkante der Tragflügel. Zur Reduzierung dieser Lärmquelle werden verschiedene Ansätze verfolgt, unter anderem gezackte Hinterkanten, so genannte Serrations. Ein weiterer Ansatz besteht im Einsatz von strömungsdurchlässigen, porösen Materialien. Experimentelle Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass mit porösen Metallen eine breitbandige Lärmreduktion erreicht werden kann [3]. Bei der numerischen Modellierung solcher Materialien im DLR-CAA-Code PIANO wird auf eine volumengemittelte Beschreibung mittels charakteristischer Materialparameter zurückgegriffen [2]. Eine besondere Modellierung wird dabei für die Ränder des porösen Materials benötigt, da hier eine Unstetigkeit beim Übergang zwischen porösem Material und freier Umströmung vorliegt. Dafür wurden akustische Sprungbedingungen formuliert, die eine Umrechnung zwischen den beiden Bereichen ermöglichen [4]. Mit diesen Methoden ist es möglich, den Einfluss von verschiedenen Materialparametern auf den erzeugten Lärm zu untersuchen. Von besonderem Interesse ist hierbei die Betrachtung von anisotropen und gradierten Materialien.

## Modellierung der Porosität

Bei der Modellierung von porösen Materialien wird eine volumengemittelte Beschreibung verwendet [2]. Dadurch wird vermieden, die feinen Strukturen räumlich aufzulösen. Dies würde zu einem erhöhten numerischen Aufwand führen, der dem Ziel von Entwurfsstudien mit unterschiedlichen Materialien entgegen steht. Als repräsentative Parameter werden die folgenden Größen verwendet:

- Porosität  $\phi$  [-]
- Permeabilität  $\kappa$  [m<sup>2</sup>]
- Forchheimerkoeffizient  $c_F$  [-]

Dabei bildet die Porosität  $\phi$  das Verhältnis vom Fluidvolumen in einem gegebenen Volumen porösen Materials ab. Die Permeabilität  $\kappa$  und der Forchheimerkoeffizient  $c_F$  sind darüber hinaus Modellgrößen, die den Strömungswiderstand durch ein poröses Material wiedergeben. Die Permeabilität bildet hierbei den linear von der Strömungsgeschwindigkeit abhängigen Widerstandsterm ab und der Forchheimerkoeffizient den quadrati-

schen. Sobald die Permeabilität und der Forchheimerkoeffizient  $3 \times 3$ -Tensoren sind, können beliebig anisotrope Materialien abgebildet werden.

Mit den dargestellten Materialparametern werden die im CAA-Code PIANO gelösten Grundgleichungen der linearisierten Eulergleichungen (LEE) bzw. Akustischen Störungsgleichungen (APE) erweitert.

## Akustische Sprungbedingungen

Eine gesonderte Beschreibung ist für die Ränder des porösen Materials und den Übergang zur Umströmung nötig. Da hier die Materialparameter nicht stetig verlaufen, wurden akustische Sprungbedingungen für die klassischen Erhaltungsgrößen

- Massenstrom
- Energie
- Entropie

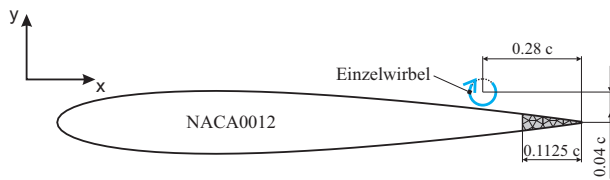
formuliert [4].

## Simulationssetup

Zur Untersuchung des Einflusses von porösen Materialien auf den Hinterkantenlärm von Tragflügelprofilen wurden Simulationen mit einem NACA0012-Profil mit poröser Hinterkante bei einem Anstellwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ , einer Machzahl von  $Ma = 0.15$  und einer Reynoldszahl von  $Re = 1.3 \cdot 10^6$  durchgeführt. Das poröse Material erstreckte sich dabei über die letzten 11.25% der Sehnenlänge des Profils (Abb. 1). Als Schallquelle wurde in der Grenzschicht ein Wirbel platziert, der mit der aus einer RANS-Strömungssimulation ermittelten Hintergrundströmung transportiert wurde. Dies ist eine repräsentative Darstellung des Quellmechanismus von Hinterkantenlärm, hervorgerufen durch die Interaktion der Wirbel in der turbulenten Grenzschicht mit der Kante des Profils.

Für die Auswertung wurden 360 Mikrofone kreisförmig um die Hinterkante mit einem Abstand von einer Sehnenlänge positioniert. Damit können sowohl die aufgenommenen Zeitsignale in  $90^\circ$  über der Hinterkante als auch die Richtcharakteristik des abgestrahlten Schalls untersucht werden.

In Tabelle 1 sind die für die Simulationen verwendeten Porositätsparameter aufgelistet. Das erste Material mit einer Porosität von  $\phi = 0.46$  und einer isotropen Permeabilität von  $\kappa = 1.24 \cdot 10^{-10}$  entspricht einem in [3] experimentell untersuchtem porösen Aluminium. Des Weiteren



**Abbildung 1:** Skizze des untersuchten NACA0012-Profiles mit poröser Hinterkante und mit der Umströmung bewegtem Einzelwirbel ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $Ma = 0.15$ ,  $Re = 1.3 \cdot 10^6$ ).

wurden Materialien mit sowohl isotrop als auch anisotrop erhöhter Permeabilität untersucht.

**Tabelle 1:** Simulierte Porositätsparameter

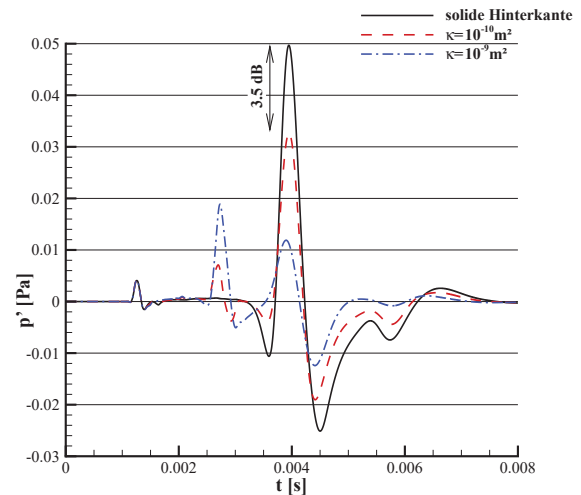
$\phi$	$\kappa_x$ [m <sup>2</sup> ]	$\kappa_y$ [m <sup>2</sup> ]
0.46	$1.24 \cdot 10^{-10}$	$1.24 \cdot 10^{-10}$
0.46	$10^{-9}$	$10^{-9}$
0.46	$10^{-9}$	$1.24 \cdot 10^{-10}$
0.46	$1.24 \cdot 10^{-10}$	$10^{-9}$
0.46	$5 \cdot 10^{-10} \dots 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10} \dots 10^{-9}$

### Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen für den Hinterkantenlärm dargestellt. Erst wird auf den Einfluss unterschiedlicher isotroper Permeabilitäten eingegangen und anschließend zwei anisotrope Materialien diskutiert. Dabei wurde zunächst die Permeabilität in Strömungsrichtung und anschließend quer zur Anströmung durch das Material erhöht. Zum Abschluss wird darüber hinaus ein inhomogenes Material untersucht.

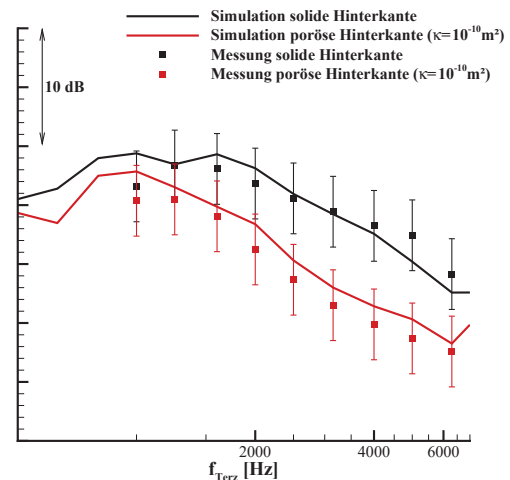
### Isotropes Material

In Abbildung 2 ist das Zeitsignal des Mikrofons 90° oberhalb der Profilhinterkante für unterschiedliche isotrope Materialien dargestellt. Zunächst zeigen alle Kurven bei  $t = 0.0015$  s ein Drucksignal, welches auf die Einkopplung des Wirbels in das Rechengebiet zurückzuführen ist. Anschließend ist bei den porösen Hinterkanten bei  $t = 0.0027$  s ein Signal zu sehen, welches im Referenzfall mit solider Hinterkante nicht auftritt. Dieses repräsentiert die Interaktion des Wirbels mit dem Beginn des porösen Bereichs des Profils. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Permeabilität diese Quelle zunimmt. Im weiteren Verlauf ist das Signal der Interaktion des Wirbels mit der eigentlichen Hinterkante des Profils zu sehen ( $t = 0.004$  s). Hier zeigt sich ein deutlicher Einfluss des porösen Materials, wobei mit steigender Permeabilität die Stärke des Drucksignals abnimmt. Besonders zu beachten ist hierbei, dass bei einer Permeabilität von  $\kappa = 10^{-9}$  m<sup>2</sup> das am Beginn des porösen Bereichs erzeugte Drucksignal stärker ist als das an der eigentlichen Hinterkante. Diese ist somit nicht weiter der dominante Quellort. Die erreichte Reduktion mit den Parametern des experimentell untersuchten porösen Aluminiums ( $\phi = 0.46$ ,  $\kappa = 1.24 \cdot 10^{-10}$ ) liegt mit rund 3.5 dB in der gleichen Größenordnung wie bei den Messungen.



**Abbildung 2:** Zeitsignal des abgestrahlten Schalls im Abstand von  $1 \cdot c$  und  $90^\circ$  über der Hinterkante für eine solide und zwei isotrop poröse Kanten.

Um zu zeigen, ob die erreichte Lärmreduktion mittels porösen Materialien in der Simulation den gleichen Breitbandcharakter wie in den Messungen aufweisen, wurden Simulationen statt mit Einzelwirbel mit rekonstruierter Turbulenz und damit überlagerten Wirbeln unterschiedlichen Längenskalen und Intensitäten durchgeführt. Als Methode kam dabei FRPM (Fast Random Particle Mesh Method) [1] zum Einsatz. Abbildung 3 zeigt, dass die Simulationsergebnisse für den Fall einer soliden und einer porösen Hinterkante gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen. Die im Weiteren vorgestellten Rechnungen werden wieder mit einem Einzelwirbel durchgeführt, um direkt zwischen den Quellorten Beginn poröser Bereich und eigentlicher Hinterkante unterscheiden zu können.



**Abbildung 3:** Ternspektren des Hinterkantenlärms eines NACA0012-Profiles mit solider und mit poröser Hinterkante aus Messungen und Simulationen mit rekonstruierter Turbulenz.

Zusätzlich zu der Auswertung des Zeitsignals oberhalb der Hinterkante ist noch die Betrachtung der in Abbildung 4 dargestellten Richtcharakteristik interessant. Hier zeigt sich zunächst für den Fall der soliden Hinterkante eine gute Übereinstimmung mit der aus Formel (1) berechneten analytischen Richtcharakteristik für ein Profil mit Keilwinkel  $0^\circ$ . Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Einzelwirbelbetrachtung eine qualitative Auswertung des Einflusses von porösen Materialien erlaubt. Darüber hinaus zeigt sich, dass eine Lärmreduktion über den gesamten Winkelbereich erreicht wird. Dies passt ebenfalls zu den experimentellen Ergebnissen [3].

$$OASPL = 20 \log_{10} \left( \frac{0.001 \sin(0.5 \cdot \theta)}{2 \cdot 10^{-5}} \right) [\text{dB}] \quad (1)$$

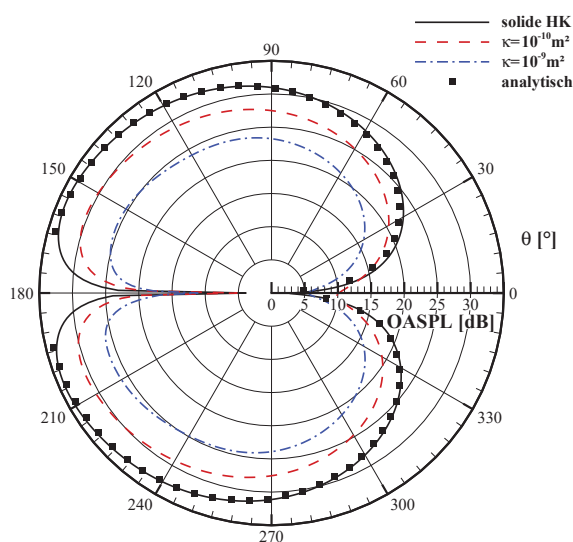


Abbildung 4: Richtcharakteristik des abgestrahlten Schalls im Abstand von  $1 \cdot c$  um die Hinterkante für eine solide und zwei isotrop poröse Kanten.

### Anisotropes Material

Nachdem die Wirksamkeit von isotropen porösen Materialien untersucht wurde, soll im Folgenden auf komplexere, anisotrope Permeabilitäten eingegangen werden. Dabei wird, wie in Tabelle 1 aufgelistet, zunächst eine erhöhte Durchlässigkeit in und anschließend quer zur Strömungsrichtung betrachtet. Abbildung 5 zeigt wie zuvor Abbildung 2 die  $90^\circ$  oberhalb der Hinterkante aufgenommenen Zeitsignale für eine solide und unterschiedliche poröse Hinterkanten. Dabei ist zu erkennen, dass die erhöhte Permeabilität in Strömungsrichtung keinen Einfluss auf das Drucksignal hat und die Permeabilität quer zur Strömung die vollständige Lärmreduktion hervorruft. Zu beachten ist hier wie zuvor, dass der Beginn des porösen Materials zum dominanten Quellort wird.

In Abbildung 6 ist die Richtcharakteristik des abgestrahlten Schalls aufgezeichnet. Dabei zeigt sich, dass über einen Winkelbereich von  $\theta = 30^\circ \dots 330^\circ$  wie in dem bereits gezeigten Zeitsignal nur die Permeabilität quer zur Profilschne die Lärmreduktion hervorruft. Bei Winkeln

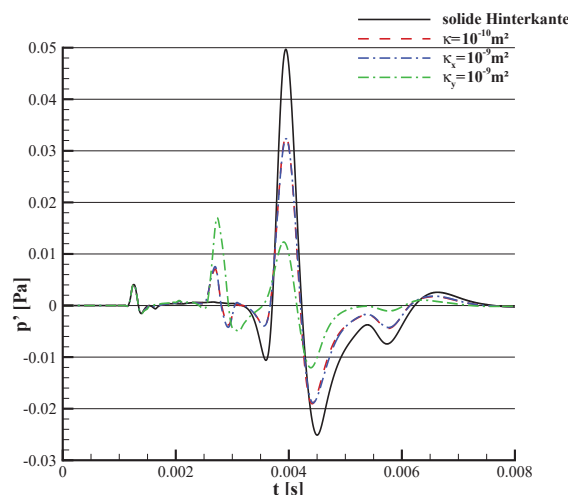


Abbildung 5: Zeitsignal des abgestrahlten Schalls im Abstand von  $1 \cdot c$  und  $90^\circ$  über der Hinterkante für eine solide und zwei anisotrop poröse Kanten.

von  $\pm 30^\circ$  stromab des Profils hingegen bewirkt die Permeabilität entlang der Profilschne eine Reduktion.

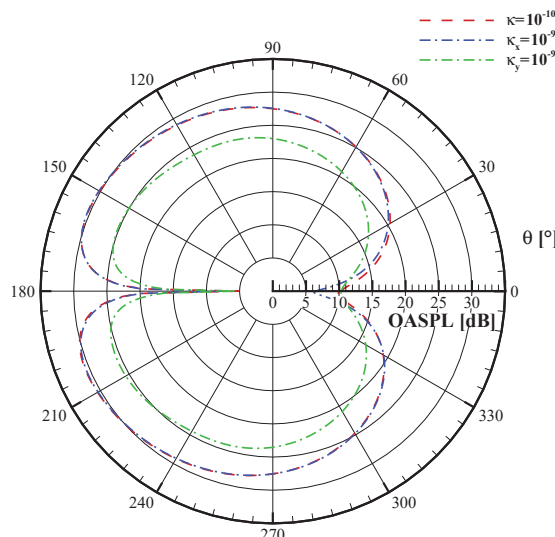
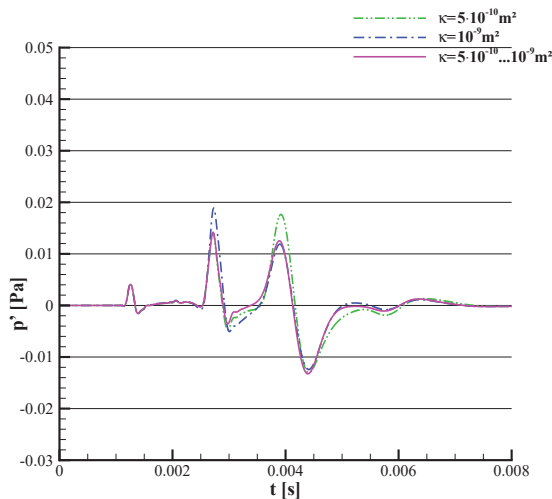


Abbildung 6: Richtcharakteristik des abgestrahlten Schalls im Abstand von  $1 \cdot c$  um die Hinterkante für eine solide und zwei anisotrop poröse Kanten.

### Gradiertes Material

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, dass bei hohen Permeabilitäten nicht die eigentliche Hinterkante des Profils der dominante Quellort ist. Dies stellt eine starke Limitierung der erreichbaren Lärmreduktion dar. Daher wird hier nun der Einsatz von gradierten Materialien untersucht, die eine inhomogene Permeabilität aufweisen. Konkret wurde ein Material modelliert, bei welchem die isotrope Permeabilität entlang der Profilschne linear von  $\kappa = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  bis  $\kappa = 10^{-9} \text{ m}^2$  zunahm. Abbildung 7 zeigt das für dieses Material aufgezeichnete Zeitsignal im Vergleich mit zwei Simulationen mit homogener Permeabilität. Dabei wird deutlich, dass

sich die Vorteile der beiden unterschiedlichen Permeabilitäten gut kombinieren lassen. Beim Übergang zum porösem Material entspricht das Signal mit dem gradierten Material dem des weniger durchlässigen homogenen Materials und an der Hinterkante liegt es nur wenig über dem dessen mit höherer Permeabilität.

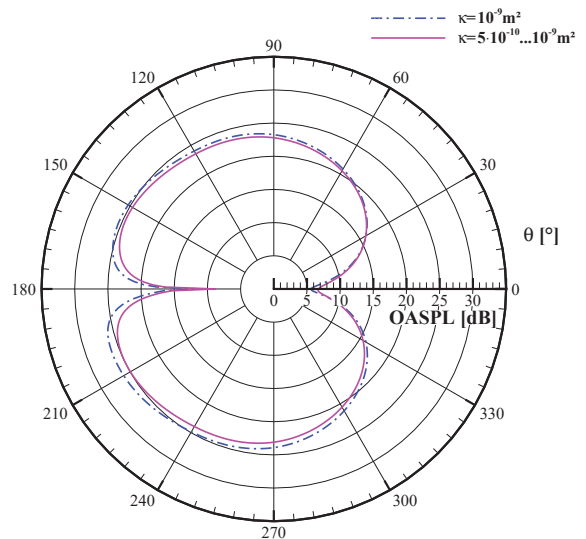


**Abbildung 7:** Zeitsignal des abgestrahlten Schalls im Abstand von  $1 \cdot c$  um die Hinterkante für zwei homogene und ein gradiertes poröses Material.

Der positive Einfluss eines inhomogenen Materials wird auch in der Richtcharakteristik (Abb. 8) deutlich. Es ist gut zu erkennen, dass vor allem stromauf eine deutliche Lärmreduktion im Vergleich zu dem homogenen Material erreicht wird, wobei stromab nur eine leichte Erhöhung auftritt. Dies ist wahrscheinlich durch den räumlichen Abstand der beiden Quellorte zu erklären. Dabei ist für die Mikrofone stromauf das Signal aus der Quelle vom Übergang zum porösen Material durch den geringeren Abstand im Vergleich zu dem von der Hinterkante um rund 1 dB erhöht.

## Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das Prinzip zur Modellierung poröser Materialien in numerischen CAA-Simulationen im Code PIANO dargestellt. Dabei wurde auch auf die Beschreibung des Übergangs zwischen porösem Material und der freien Strömung eingegangen. Davon ausgehend wurden Simulationen von Hinterkantenlärm eines NACA0012-Tragflügelprofils vorgestellt, wobei der Quellmechanismus einmal mit einem Einzelwirbel und einmal mit rekonstruierter Turbulenz aus FRPM realisiert wurde. Dabei wurde gezeigt, dass für isotrope, homogene Materialien die vorhergesagte Lärmreduktion gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt. Bei stark durchlässigen Materialien ist zu beachten, dass die eigentliche Profilhinterkante nicht der dominante Quellort ist, sondern der Beginn des porösen Bereichs. Darüber hinaus wurde der Einfluss von komplexen, also anisotropen und inhomogenen porösen Materialien untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei anisotropen Materialien über einen großen Winkelbereich



**Abbildung 8:** Richtcharakteristik des abgestrahlten Schalls im Abstand von  $1 \cdot c$  um die Hinterkante für ein homogenes und ein gradiertes poröses Material.

nur die Permeabilität quer zur Profilhinterkante durch das Material entscheidend ist. Hinsichtlich der Verschiebung des dominanten Quellorts bei hohen Permeabilitäten konnte gezeigt werden, dass gradierte inhomogene Materialien eine gute Wahl sind diese Verschiebung zu verhindern und so eine weitere Lärmreduktion ermöglichen.

## Literatur

- [1] Ewert, R., Dierke, J., Siebert, J., Neifeld, A., Appel, C., Siefert, M., and Kornow, O., CAA broadband noise prediction for aeroacoustic design, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 17, pp. 4139–4160 (2011)
- [2] Faßmann, B. W., Rautmann, C., Ewert, R. und Delfs, J. W.: Prediction of Porous Trailing Edge Noise Reduction via Acoustic Perturbation Equations and Volume Averaging. AIAA Paper 2015-2525 (2015)
- [3] Herr, M., Rossignol, K.-S., Delfs, J. W., Mößner, M. und Lippitz, N.: Specification of Porous Materials for Low-Noise Trailing-Edge Applications, AIAA Paper 2014-3041 (2014)
- [4] Rossian, L., Faßmann, B. W., Ewert, R. und Delfs, J. W.: Prediction of Porous Trailing Edge Noise Reduction Using Acoustic Jump-Conditions at Porous Interfaces, AIAA Paper 2016-2920 (2016)