

Berichte aus der Strömungstechnik

**Julian Winkler**

**Investigation of Trailing-Edge Blowing  
on Airfoils for Turbomachinery  
Broadband Noise Reduction**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0350-5

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

Aerodynamisch generierter Schall stellt in vielen Turbomaschinenanwendungen, wie in Flugzeugtriebwerken, Windturbinen, Hubschraubern, sowie in Kühlungsgebläsen vieler industrieller Prozesse, eine Hauptlärmquelle dar. Die vorliegende Studie befasst sich mit dem Hinterkantenausblasen als Möglichkeit zur Breitbandschallreduktion in Turbomaschinen. Jenes Ausblasen wurde in der Vergangenheit hauptsächlich für die Schallreduktion im Triebwerksfan erprobt, ist aber prinzipiell auch denkbar für andere Turbomaschinenanwendungen. Die grundlegende Idee ist es einen sekundären Luftstrom durch die Hinterkante der Rotorschaukeln zu leiten, mit welchem die Rotornachlaufdelle aufgefüllt und die Rotornachlaufturbulenz reduziert wird. Dadurch ist es möglich den Schall zu reduzieren, der aufgrund der Interaktion des Rotornachlaufs mit der Statorschaufel entsteht (Rotor-Stator-Interaktionsschall). Es konnte bisher nachgewiesen werden, dass durch Ausblasen sowohl der tonale als auch der breitbandige Anteil des Rotor-Stator-Interaktionsschalls reduziert werden kann. Bezüglich des Breitbandschalls fehlt jedoch bisher eine detaillierte Analyse aller relevanten Schallentstehungsmechanismen in Verbindung mit dem Ausblasen.

Hinterkantenausblasen zur Breitbandschallreduktion wird in dieser Studie für niedrige Mach-Zahlen und hohe Reynolds-Zahlen am Einzeltragflügel und an zwei Tragflügeln in Tandemverbund untersucht. Dazu werden unterschiedliche Ausblageometrien betrachtet. Experimentelle Untersuchungen dazu werden im aeroakustischen Windkanal durchgeführt und beinhalten Messungen des Schallfeldes, des instationären Tragflügeldruckfeldes und des turbulent Nachlaufs unter Einfluss des Hinterkantenausblasens. Zusätzlich wird für eine detaillierte Analyse der relevanten Schallentstehungsmechanismen die inkompressible Strömung um den Einzeltragflügel für verschiedene Ausblasgeometrien mittels Grobstruktursimulationen berechnet. Der abgestrahlte Schall wird dann für eine bestimmte Ausblasgeometrie auf Basis verschiedener analytischer Modelle und einem numerischen Ansatz berechnet und mit Messungen verglichen.

Es wird gezeigt, dass Hinterkantenausblasen zwei Schallentstehungsmechanismen gegenläufig beeinflusst. Während die Nachlaufturbulenz in Amplitude als auch Raum-Zeit-Struktur reduziert werden kann und damit auch der Nachlauf-Tragflügel Interaktionsschall (welcher dem Rotor-Stator-Interaktionsschall der Turbomaschine entspricht) im Frequenzbereich unterhalb von 2kHz, erhöht sich das Eigengeräusch des Ausblasflügels für Frequenzen oberhalb von 2 kHz. Diese Eigengeräuscherhöhung entsteht vorwiegend durch die Interaktion des Ausblasstrahls mit der Flügelhinterkante und vermindert deutlich das Gesamtschallreduktionspotential des Hinterkantenausblasens. Es wird gezeigt, dass beim Ausblasen durch einen breiten Schlitz nahe

der Hinterkante dennoch eine Reduktion von maximal 2.9dB im Summenpegel möglich ist. Wird dieser Schlitz in viele Einzelkanäle unterteilt, so erhöht sich die maximale Schallreduktion auf einen Wert von 4.1dB, aufgrund der besseren Durchmischung des austretenden Strahls mit dem externen Stromfeld. Die genannten Schallreduktionswerte werden bei teilweisem, nicht vollständigem Auffüllen der Rotornachlaufdelle erreicht. Für solch ein partielles Auffüllen wird weiterhin tonaler Schall in einer Turbomaschine erwartet. Wird die Nachlaufdelle im Sinne eines impulslosen Nachlaufs optimal aufgefüllt, so reduziert sich das Gesamtschallreduktionspotential aufgrund des Ausblaseigengeräuschs des Tragflügels. In dem Fall können additive passive Maßnahmen erforderlich sein um das hochfrequente Eigengeräusch des Ausblasflügels zu reduzieren. Es wird gezeigt, dass eine poröse Hinterkante zu diesem Zweck geeignet ist. Die untersuchten gezackten Hinterkanten hingegen stellen sich im vorliegenden Fall als weitgehend akustisch nachteilig heraus.

## **Abstract**

Aerodynamically generated sound is the major cause for large noise emission from turbomachinery including turbofan engines, wind turbines, helicopters, and cooling fans in a large variety of industrial applications. The following study deals with a method for turbomachinery noise reduction called trailing-edge blowing. This method is, in principle, applicable to any turbomachinery application but has so far been intended almost exclusively for noise reduction in the fan stage of modern turbofan engines. This method involves the addition of a secondary air flow through the trailing edge of a rotor, with which the rotor wake momentum deficit is filled and its turbulence is reduced. This energized wake produces less rotor-stator interaction noise when it impinges on a downstream stator vane. While this method has proven to be effective for tonal noise reduction, investigations regarding the broadband noise reduction potential have largely lacked a detailed analysis of all relevant noise mechanisms that are affected by this method.

Trailing-edge blowing for broadband noise reduction will be studied here on single airfoils and on two airfoils in tandem at low Mach numbers and high Reynolds numbers. The investigations will be conducted on different trailing edge blowing designs. Experiments will be conducted in an aeroacoustic wind tunnel and include measurements of the acoustic far field, the unsteady pressure sources on the airfoils, and the turbulent wake manipulated by blowing. In addition, several incompressible large-eddy simulations will be performed for a detailed analysis and assessment of the turbulent noise sources. The acoustic far-field will be predicted from these simulations using different analytical models and a computational aeroacoustic approach.

It will be shown that trailing-edge blowing affects two competing noise mechanisms. The wake turbulence is successfully reduced by trailing-edge blowing and a noise reduction for frequencies below 2kHz can be observed when this modified wake impinges on a downstream airfoil (wake-airfoil interaction noise). However, the blowing jet itself produces high-frequency noise above 2kHz as it interacts with the trailing edge of the blowing airfoil (blowing self-noise). This additional self-noise diminishes the noise reduction through wake manipulation. The overall integrated noise reduction potential will be shown to be of the order of 2.9dB for an airfoil equipped with a single wide blowing slot. Improvements can be made by segmenting the spanwise slot into an array of discrete channels. This increases the blowing velocity while reducing the required mass-flow rate to add the same blowing momentum. The overall noise reduction is enhanced to 4.1dB due to an improved mixing of the blowing jet with the external airfoil flow. These reduction levels occur for partial wake-filling, for which the tonal noise---as a result of the mean wake velocity deficit---would not be fully eliminated in a turbomachine. For

complete wake-filling conditions the broadband noise reduction can be considerably lower, depending on the blowing geometry. In that case, additional complementary techniques may become necessary to passively reduce the high-frequency blowing self-noise. It will be shown that a porous edge can help to reduce the acoustic efficiency of the blowing jet interaction with the trailing edge and thereby improve the overall possible noise reduction levels from trailing-edge blowing. Conversely, serrated edges will largely yield negative acoustic effects for the configurations investigated in this study.