

Untersuchung des Einflusses von Schutzgittern für Mikrofone in einem Hochgeschwindigkeits-Windkanal

Carolin Mandanna Hurfar¹, Jörg Seume²

Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, 30167 Hannover, Deutschland

Email: hurfar@tfd.uni-hannover.de¹, seume@tfd.uni-hannover.de²

Kurzfassung

Der Einfluss eines Schutzgitters auf die Schalldruckmessung von wandbündig eingesetzten Mikrofonen wird in Abhängigkeit von der Kanal-Mach-Zahl untersucht. Für einen qualitativen Vergleich verschiedener Betriebspunkte wird eine Grenzfrequenz definiert, oberhalb derer die Mikrofone mit Schutzgitter bezogen auf die Referenz-Mikrofone ohne Schutzgitter einen höheren Pegel messen. Bei Erhöhung der Mach-Zahl wird eine Verschiebung der Grenzfrequenz zu höheren Frequenzen festgestellt.

Einleitung

Für aeroakustische Untersuchungen in Turbomaschinen werden am Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) wandbündig eingesetzte Druckfeld-Mikrofone genutzt. Das Kernstück dieser Mikrofone bildet eine sehr dünne und hoch sensible Membran aus Edelstahl. Kleinste Beschädigungen der Membran, z.B. durch Schmutzpartikel in der Strömung, können die Funktionalität des Mikrofons stark beeinträchtigen und es im schlimmsten Fall unbrauchbar machen. Um dies zu vermeiden, kann die Membran mit einem Gitteraufsatz (Schutzgitter) geschützt werden.

Im Fall von Strömungsüberlagerung sind wandbündig eingesetzte Mikrofone direkt den hydrodynamischen turbulenten Druckschwankungen in der Grenzschicht ausgesetzt. Dieser strömungsinduzierter Störpegel überlagert die eigentlichen akustischen Messungen [1]. Die Verwendung von Mikrofonen mit Schutzgittern führt einerseits zu einer räumlichen Trennung von Grenzschichtströmung und Membran, andererseits kann es durch Wirbelbildung am Gitter und Resonanzen zu einer zusätzlichen Beeinträchtigung der Schalldruckmessung kommen. Vergleichende Untersuchungen von Mikrofonen mit und ohne Schutzgitter wurden bereits in Windkanälen mit Strömungsgeschwindigkeiten im unteren Mach-Zahlbereich ($Ma < 0,3$) durchgeführt [2]; Beschreibungen von experimentellen Untersuchungen in einem turbomaschinen-spezifischen hohen Mach-Zahlbereich ($Ma > 0,3$) sind hingegen nicht bekannt.

Der Einfluss eines solchen Schutzgitters auf das Frequenzspektrum von 1/4-Zoll-Kondensatormikrofonen wird in einem Hochgeschwindigkeits-Windkanal experimentell untersucht. Ziel der Versuche ist es, den Einfluss des Schutzgitters auf die Schalldruckmessung über einen weiten Mach-Zahlbereich zu quantifizieren. Hierfür wird der vorherrschende Schalldruck am Düsenaustritt mittels über den Umfang verteilten und wandbündig eingebauten Mikrofonen aufgenommen. Es werden simul-

tan Mikrofone mit Schutzgitter als auch Mikrofone ohne Schutzgitter als Referenz eingesetzt. Anhand der Pegeldifferenzen wird der Störeinfluss des Schutzgitters auf die Schalldruckmessung bestimmt.

Prüfstand und Messtechnik

Für die experimentellen Untersuchungen steht ein Hochgeschwindigkeits-Kalibrierkanal (HGK) mit offener Messstrecke zur Verfügung, s. Abb. 1. Der Windkanal wird im offenen Kreislauf d.h. ohne Luft-Rückführung betrieben und über das instituts-eigene Luftversorgungssystem mit Druckluft versorgt. Die Regulierung der Strömungsgeschwindigkeit am Düsenaustritt (Durchmesser ≈ 60 mm) erfolgt über ein parallel geschaltetes, elektronisch gesteuertes Bypass-Ventil. In den hier beschriebenen Messungen wird die Strömungsgeschwindigkeit von $Ma = 0,1$ bis $Ma = 0,75$ mit einer Auflösung von $\Delta Ma = 0,05$ variiert. Bezo-

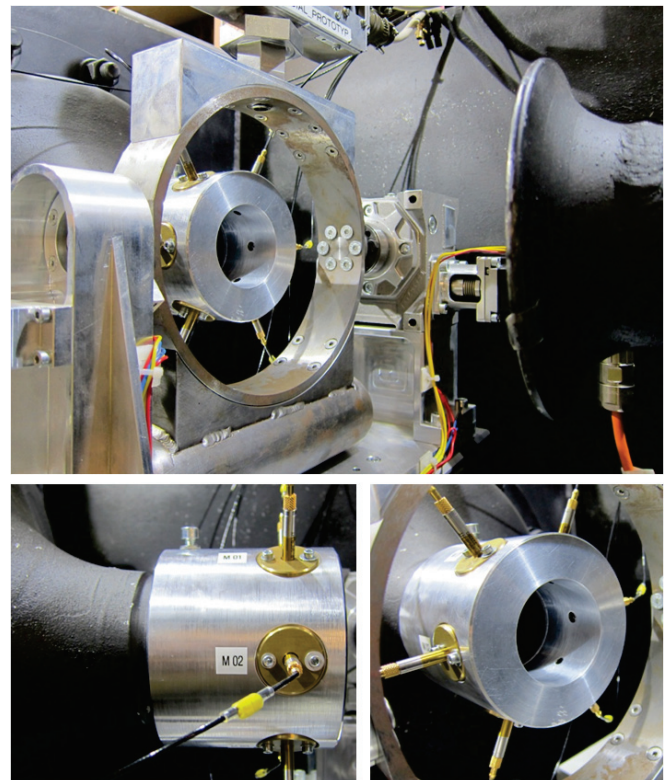


Abbildung 1: Hochgeschwindigkeits-Windkanal (oben) mit Düsenaustritt (unten links) und sechs wandbündig, alternierend mit bzw. ohne Schutzgitter, über den Umfang eingebauten 1/4-Zoll-Mikrofonen (unten rechts)

gen auf den Durchmesser am Düsenaustritt werden entsprechend Reynolds-Zahlen von $Re \approx 1,5 \cdot 10^5$ bis $Re \approx 1,2 \cdot 10^6$ erreicht. Mit der experimentell ermittelten kritischen Reynolds-Zahl von $Re_{krit} \approx 2300$ für Rohrströmungen [3], kann somit für alle Betriebspunkte von einer turbulenten Kernströmung ausgegangen werden. Gemessen werden das strömungsinduzierte breitbandige Rauschen sowie die tonalen Anteile des Kompressors ohne Einbringung zusätzlicher Schallquellen.

Insgesamt werden sechs hoch präzise Druckfeld-Mikrofone vom Typ 46BD der Firma G.R.A.S. vermessen. Bei den Mikrofonen handelt es sich um 1/4-Zoll vorpolarisierte Kondensatormikrofone mit einem linearen Frequenzgang (± 1 dB) im Bereich von 10 Hz bis 25 kHz. Der Dynamikbereich der Mikrofone liegt von 44 dBA re. 20 μ Pa bis 166 dB re. 20 μ Pa. Die Unsicherheit der Kalibrierung incl. Vorverstärker wird vom Werk mit $\pm 0,06$ dB angegeben. Dieser Mikrofontyp wird standardmäßig am TFD für aeroakustische Untersuchungen in Turbomaschinen eingesetzt. In den hier beschriebenen Versuchen werden die Mikrofone äquidistant über den Umfang eines speziell gefertigten Düsenaufsatzes (s. Abb. 1) strömungsseitig wandbündig eingesetzt. Zum Ausgleich von möglichen geringfügigen geometrischen oder aerodynamischen Inhomogenitäten über dem Umfang, werden die Mikrofone alternierend mit und ohne Schutzgitter eingebaut.

Die Aufnahmezeit für jeden Betriebspunkt beträgt 40 s. Bei einer Aufnahmezeit von 60 kHz ergeben sich damit 2.400.000 Datenpunkte je Messung und Mikrofon. Mit der gewählten Aufnahmezeit liegt nach dem Nyquist-Kriterium die höchste auflösbare Frequenz bei 30 kHz. Zur Einhaltung des Nyquist-Kriteriums und den Grenzen des linearen Frequenzganges der Mikrofone konzentrieren sich die Untersuchungen auf einen Frequenzbereich von 300 Hz bis 25 kHz. Die Erfassung der Messdaten an den einzelnen Mikrofonen erfolgt simultan.

Signalverarbeitung und -analyse

Zur Reduktion stochastischer Anteile wird eine Mittelung wie im Folgenden beschrieben durchgeführt: Das gemessene Zeitsignal wird zunächst in 40 gleich große, sich nicht überlappende Segmente unterteilt. Anschließend wird die Auswertung segment-spezifisch durchgeführt. Zuletzt werden die Ergebnisse je Mikrofon über alle Segmente gemittelt.

Für eine Abschätzung der Streuung der Messdaten zwischen den Mikrofonen und für eine erste Abschätzung des Einflusses des Schutzgitters, wird in einem ersten Auswerteschritt zunächst als globale Größe der Effektivwert bzw. RMS-Wert (engl. *Root Mean Square*) für die einzelnen Mikrofonensignale gebildet. Für eine detaillierte frequenzspezifische Untersuchung wird das Zeitsignal anschließend mittels der diskreten Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt. Mit der zuvor durchgeführten Segmentierung des Gesamtsignals beträgt die Frequenzauflösung 1 Hz. Zur Vermeidung von Leakage-Effekten wird für jedes Segment eine Hanning-Fensterung verwendet.

In den nachfolgenden Diagrammen ist jeweils der Schalldruck p' als Pegelgröße gemäß

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p'^2}{p_{ref}^2} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

mit $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa angegeben.

Analyse im Zeitbereich

In Abbildung 2 ist der Segment-gemittelte RMS-Wert der einzelnen Mikrofone über der Kanal-Mach-Zahl aufgetragen. Für einen Vergleich der verschiedenen Betriebspunkte sind die einzelnen Werte auf den gemittelten RMS-Wert der Referenz-Mikrofone der jeweiligen Mach-Zahl normiert. Zusätzlich sind die Mikrofon-gemittelten Verläufe der RMS-Werte in das Diagramm eingetragen. Die grauen bzw. orangenen Symbole / Linien kennzeichnen hier (wie auch in den folgenden Diagrammen) die Werte für die Mikrofone ohne Schutzgitter bzw. mit Schutzgitter.

Im unteren Mach-Zahlbereich zeigt sich eine stochastische Verteilung der RMS-Werte. Eine eindeutige globale Aussage bezüglich des Einflusses des Schutzgitters auf den gemessenen Schalldruckpegel kann auf Grund der starken Schwankungen nicht getroffen werden. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit hingegen, ist eine Abnahme der Streuung zu beobachten und es zeigt sich ein deutlicher Amplitudenunterschied zwischen den Messungen mit und ohne Schutzgitter. So liegt in dem Bereich $Ma \geq 0,5$ der gemessene Schalldruckpegel der Mikrofonen mit Schutzgitter nahezu konstant für alle Mikrofone unterhalb der gemessenen Pegel der Referenz-Mikrofonen.

Bei der Ursachensuche für die weite Streuung der Werte für $Ma \leq 0,5$ wird ein systematischer Fehler, wie z.B. ungenauer Einbau der Mikrofone, Kalibrierungsfehler, lokale fertigungsbedingte Unterschiede in der Wandrauigkeit, etc. ausgeschlossen, da die Schwankungen vom Betriebspunkt abhängig sind. Auch ist ein eindeutiger

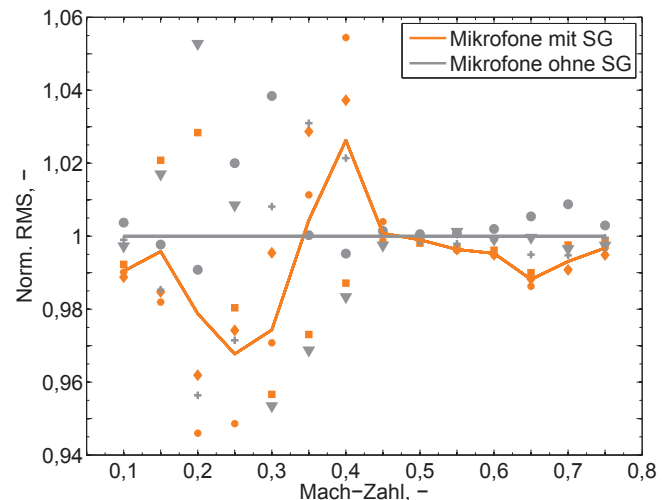


Abbildung 2: Segment-gemittelter RMS-Wert der einzelnen Mikrofone in Abhängigkeit der Kanal-Mach-Zahl. Die Normierung erfolgt bezüglich der gemittelten RMS-Werte der Mikrofone ohne Schutzgitter (SG) für die jeweilige Mach-Zahl.

Ausreißer nicht erkennbar. Mögliche Ursache könnte eine bei diesen niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten nicht voll ausgebildete turbulente Grenzschichtströmung sein, welche zu Inhomogenitäten über dem Querschnitt führt. Der Grund für die stochastische Verteilung kann letztlich nicht geklärt werden. Die große Streuung der Werte im unteren Mach-Zahlbereich erlaubt keine aussagekräftige Interpretation der Ergebnisse. Aus diesem Grund beschränkt sich die weitere Analyse auf den Bereich der Strömungsgeschwindigkeiten von $0,5 \leq Ma \leq 0,75$.

Analyse im Frequenzbereich

Die Analyse des Zeitsignals hat gezeigt, dass für hohe Mach-Zahlen im Mittel der Schalldruckpegel der Mikrofone mit Schutzgitter unterhalb des Pegels der Mikrofone ohne Schutzgitter liegt; d.h. global betrachtet führt der Einsatz eines Schutzgitters bei hohen Mach-Zahlen zu einer Verminderung des strömungsinduzierten Störpegels. Diese Beobachtung widerspricht zunächst der verbreiteten Annahme des negativen Effekts von Schutzgittern auf die Schalldruckmessung. Für eine detailliertere Untersuchung der physikalischen Ursachen der Pegeldifferenzen bietet sich eine Analyse im Frequenzbereich an. In den Diagrammen der Abb. 3 und 4 sind die über die Mikrofone mit bzw. ohne Schutzgitter gemittelten Frequenzspektren von 300 Hz bis 25 kHz für die Mach-Zahlen $Ma = 0,55$ und $Ma = 0,7$ dargestellt. Für beide Fälle zeigt sich ein qualitativ ähnlicher Verlauf: Im niedrigen Frequenzbereich liegen die gemittelten Schalldruckpegel der Mikrofone mit Schutzgitter unterhalb der Pegel der Referenz-Mikrofone. Es folgt ein kurzer Übergangsbereich, nach dem sich dieses Verhältnis umkehrt und die Mikrofone mit Schutzgitter konstant einen höheren Pegel messen. Ein direkter Vergleich der beiden Betriebspunkte zeigt, dass sich der Übergangsbereich mit steigender Strömungsgeschwindigkeit zu höheren Frequenzen verschiebt. Für einen quantitativen Vergleich dieser Verschiebung, wird eine Grenzfrequenz $f_{95\% \geq 0}$ definiert. Diese gibt an, ab welcher Frequenz 95% der nachfolgenden Pegeldifferenzen im Frequenzspektrum

über Null liegen, d.h. oberhalb welcher Frequenz die Mikrofone mit Schutzgitter einen höheren Pegel messen. Analog zum Frequenzspektrum stellt die Grenzfrequenz damit auch eine über die Mikrofone gemittelte Größe dar. In den Abbildungen 3 und 4 sind die Grenzfrequenzen zur Verdeutlichung in den Frequenzspektren eingezeichnet (rot gestrichelte Vertikale). Für die nicht dargestellten Frequenzspektren der Betriebspunkte $Ma = 0,5$, $Ma = 0,6$, $Ma = 0,65$ und $Ma = 0,75$ ergeben sich ähnliche Verläufe, die deshalb hier nicht mehr gezeigt werden.

Die sich im betrachteten Mach-Zahlbereich ergebenden Grenzfrequenzen sind im Diagramm in Abb. 5 aufgetragen. Mit zunehmender Mach-Zahl verschiebt sich der Frequenzbereich, für den die Mikrofone mit Schutzgitter höhere Pegel messen, zu höheren Frequenzen. Nach einem zunächst moderaten Anstieg der Grenzfrequenz von $Ma = 0,5$ auf $Ma = 0,55$ steigt die Grenzfrequenz sprunghaft von ca. 5,2 kHz auf 13,9 kHz bei $Ma = 0,6$ an. Danach nimmt der Anstieg der Grenzfrequenz wieder einen moderaten und näherungsweise asymptotischen Verlauf an. Bei $Ma = 0,75$ liegt die Grenzfrequenz bei ca. 19,4 kHz.

Diskussion der Ergebnisse

Vergleichbare Untersuchungen zu dem Einfluss von Mikrofon-Schutzgittern auf akustische Messungen in Kanal- bzw. Rohrströmungen im unteren Mach-Zahlbereich ($Ma < 0,3$) zeigen übereinstimmende Beobachtungen. So wurden in dem Markham-Windkanal der Universität Cambridge in der 1,67 m breiten und 1,22 m hohen Messstrecke der Einsatz von 1/4-Zoll-Mikrofonen mit Schutzgitter von Brüel & Kjaer bei Strömungsgeschwindigkeiten von 20 m/s und 60 m/s getestet [2]. Als Referenz-Mikrofon diente ein LinearX System 1/2-Zoll-Mikrofon ohne Schutzgitter. In Übereinstimmung mit den hier präsentierten Ergebnissen lag der Schalldruckpegel des Referenz-Mikrofons für niedrige Frequenzen zunächst über dem des getesteten Mikrofon; bei höheren Frequenzen zeigte das Mikrofon

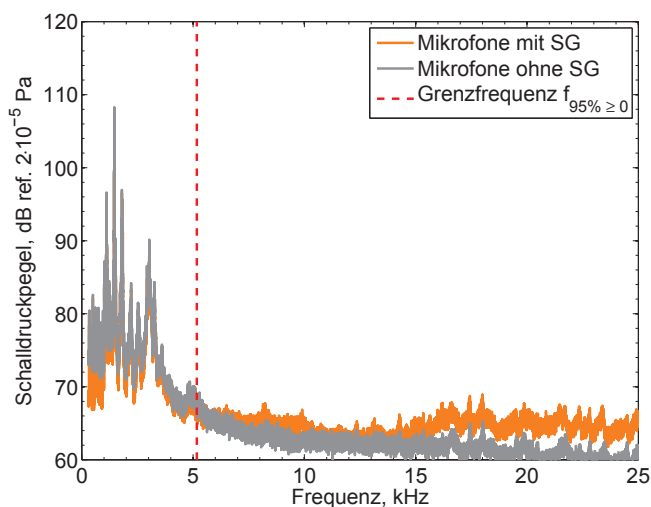


Abbildung 3: Gemitteltes Frequenzspektrum der Mikrofone mit und ohne Schutzgitter bei $Ma = 0,55$

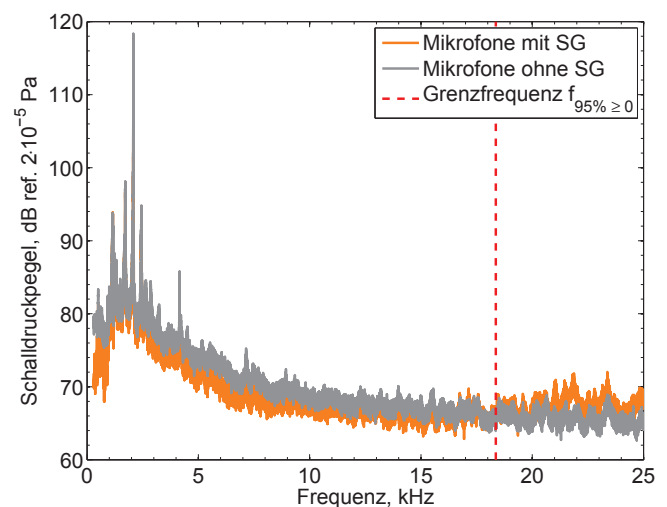


Abbildung 4: Gemitteltes Frequenzspektrum der Mikrofone mit und ohne Schutzgitter bei $Ma = 0,70$

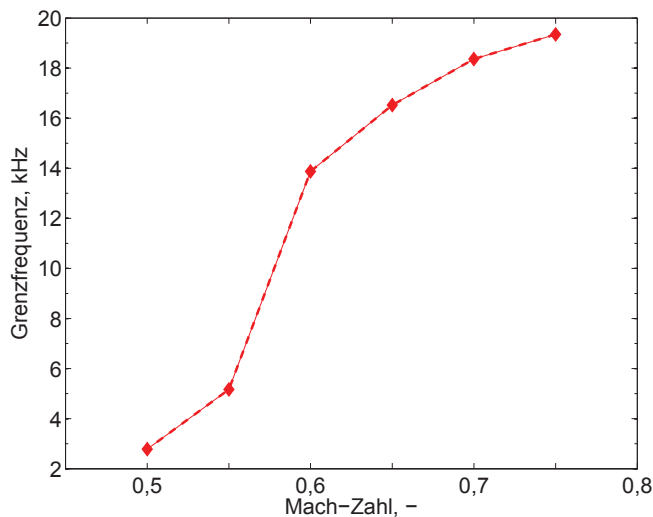


Abbildung 5: Verlauf der Grenzfrequenz $f_{95\% \geq 0}$ über der Kanal-Mach-Zahl

mit Gitter wiederum höhere Pegel an. Analog zu den hier vorgestellten Ergebnissen verschob sich der Bereich, ab dem der gemessene Pegel am Mikrofon mit Schutzgitter oberhalb des Referenz-Pegels liegt, mit höherer Strömungsgeschwindigkeit zu höheren Frequenzen.

Folglich kann festgehalten werden, dass die Verwendung von Schutzgittern sowohl für niedrige Mach-Zahlen als auch für hohe Mach-Zahlen eine Dämpfung der hydrodynamischen Druckschwankungen in der Grenzschicht im niedrigen Frequenzbereich bewirkt. Zwei in der Literatur beschriebene Effekte dienen als Erklärungsansatz:

- (1) Durch den konstruktiv bedingten Spalt zwischen Gitter und Membran bewirken Gitteraufsätze eine räumliche und damit physikalische Trennung von Membran und Grenzschichtströmung. Die Druckschwankungen wirken nicht mehr direkt auf die Membran ein und klingen in der Amplitude mit zunehmender Spalttiefe ab [4].
- (2) Zur Reduktion des strömungsinduzierten Störpegels konzentrieren sich aktuelle Forschungen auf eine Trennung von Membran und Strömung durch eine gezielte Abschirmung der Membran mit akustischen Wellen durchlässigen aber hydrodynamische Schwankungen sperrenden Materialien [4][5]. Analog kann das Schutzgitter als Sperre gegenüber Druckschwankungen gesehen werden. Der wesentliche Unterschied von Schutzgittern gegenüber den Abdeckmaterialien besteht allerdings darin, dass Letztere die Strömung nicht beeinflussen und somit keine zusätzliche Störquelle darstellen.

In wieweit in den vorliegenden Messungen der erste oder zweite Effekt dominiert, ist schwer abzuschätzen. Auf Basis der Abschätzungen in der Literatur [4] kann davon ausgegangen werden, dass die Dämpfung im Spalt, bei einer Spalttiefe von ungefähr 0,6 mm, gering ausfällt. Neben den zuvor beschriebenen positiven Effekten, kommt es allerdings auf Grund der inhomogenen Oberflächenbeschaffenheit der Schutzgitter zu einer Störung

der Grenzschichtströmung am Gitter - Wirbel und turbulente Strukturen entstehen [6]. Diese stellen, neben den hydrodynamischen Druckschwankungen der Grenzschicht, eine zusätzliche Störquelle der akustischen Messung dar. Zudem besteht die Gefahr des Auftretens von akustischen Resonanzen im Spalt [1] und damit einhergehenden Pegelspitzen im Spektrum. Letztere sind in den vorliegenden Messungen allerdings nicht aufgetreten.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Für einen qualitativen Vergleich des Einflusses eines Schutzgitters in Abhängigkeit von der Kanal-Mach-Zahl wurde die Grenzfrequenz $f_{95\% \geq 0}$ eingeführt. Bezogen auf den strömungsinduzierten Störpegel markiert die Grenzfrequenz den Übergang zu dem Frequenzbereich, für den ein Mikrofon mit Schutzgitter einen höheren Pegel misst als ein Referenz-Mikrofon ohne Gitter. In Übereinstimmung mit vergleichbaren Untersuchungen im niedrigen Mach-Zahlbereich, wird in dieser Untersuchung eine Verschiebung der Grenzfrequenz zu höheren Frequenzen mit steigender Strömungsgeschwindigkeit festgestellt.

Neben der Mach-Zahl bestimmt die Reynolds-Zahl maßgeblich die Grenzschichtströmung. Zur Separation der Grenzschichteffekte und zur Erstellung einer breiten Datenbasis bieten sich weiterführende Versuche bei unabhängiger Regelung von Mach- und Reynolds-Zahl an. Für eine statistisch aussagekräftigere Quantifizierung der definierten Grenzfrequenz sollten die Messungen mit einer größeren Anzahl an Mikrofonen durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Soderman, P.T., Allen, C.S.: Microphone Measurements In an Out of Airstream. *Aeroacoustic Measurements*, edited by T.J. Mueller, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2002
- [2] Shin, H.-C., Graham, W.R., Sijtsma, P., Andreou C., Faszler, A.C.: Implementation of a Phased Array in a Closed-Section Wind Tunnel. *AIAA Journal* (2007) Vol.45, No.12, 2897-2909
- [3] Schlichting, H., Gersten, K.: Grenzschichttheorie. 10te Auflage, Springer-Verlag, Deutschland, Berlin Heidelberg, 2006
- [4] Jaeger, M. S., Horne, W.C., Allen, C.S.: Effect of Surface Treatment on Array Microphone Self-Noise. 6th AIAA/CEAS, Aeroacoustics Conference and Exhibit, Maastricht, The Netherlands, AIAA-Paper (2000) 2001-2169
- [5] Fleury, V., Coste, L., Davy, R., Mignosi, A., Cariou, C., Proster, J.-M.: Optimization of Microphone Array Wall Mountings in Closed-Section Wind Tunnels. *AIAA Journal* (2012) Vol.50, No.11, 2325-2335
- [6] Underbrink, J.R.: Aeroacoustic Phased Array Testing in Low Speed Wind Tunnel. *Aeroacoustic Measurements*, edited by T.J. Mueller, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2002