

## Ein kleiner Freistrahprüfstand für aeroakustische Messungen

Henri Siller<sup>1</sup>, Max Nussbaumer<sup>2</sup>, Waqas Hayat<sup>3</sup>, Alessandro Bassetti<sup>1</sup>,  
Stefan Funke<sup>1</sup>, Wolfram Hage<sup>1</sup> und Robert Meyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik,  
10623 Berlin, Deutschland, Email: Henri.Siller@DLR.de

<sup>2</sup>University of Cambridge, Großbritannien, <sup>3</sup>TU Delft, Niederlande

### Einleitung

Im Labor der Abteilung Triebwerksakustik des DLR in Berlin wurde ein neuer Prüfstand für akustische Experimente mit Freistrahlen im Unterschallbereich ausgebaut. Er soll für Prinzipexperimente an Freistrahlen und zum Testen von Messtechniken und experimentellen Verfahren genutzt werden.

### Aufbau des Prüfstands

Ein seit den 60er Jahren vorhandener aerodynamischer Freistrahprüfstand, siehe Abbildungen 1 und 2, wurde mit einer reflexionsmindernden Messstrecke erweitert.

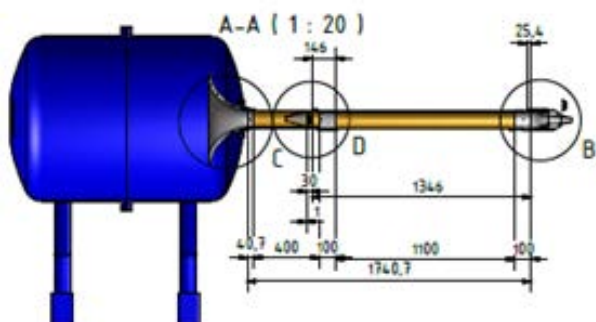


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Freistrahprüfstands.

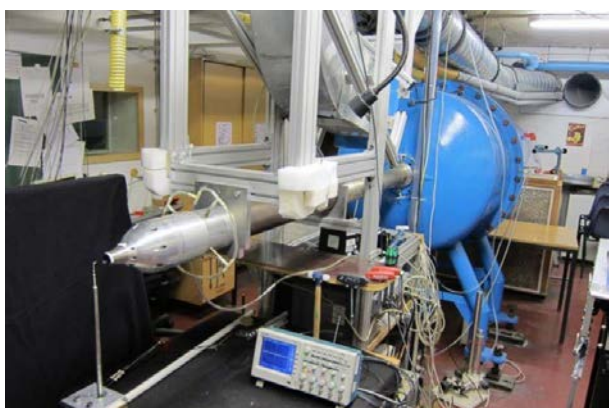


Abbildung 2: Der Freistrahprüfstand vor dem Umbau für akustische Messungen.

Die Messstrecke besteht aus einem an beiden Enden offenen Zylinder aus absorbierenden Schaumstoffen. Darin ist ein lineares Mikrofonarray mit 50 Mikrofonen parallel zur Strahlachse im Abstand von 58 cm montiert, siehe

Abbildungen 3 und 4. Das Array besteht aus 1/4 Zoll Mikrofonen in insgesamt 3 Segmenten mit bis zu 22 Mikrofonen im Abstand von 20,9 mm zueinander.

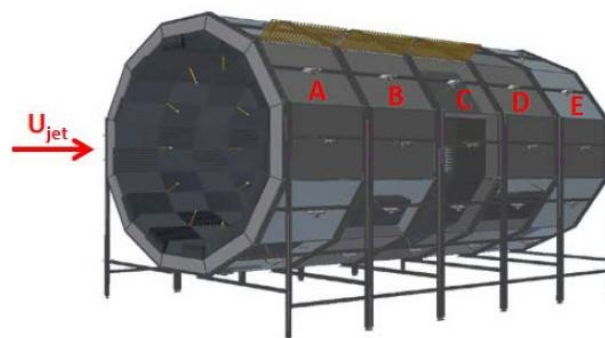


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der reflexionsarmen Einhüllung des Freistrahls.

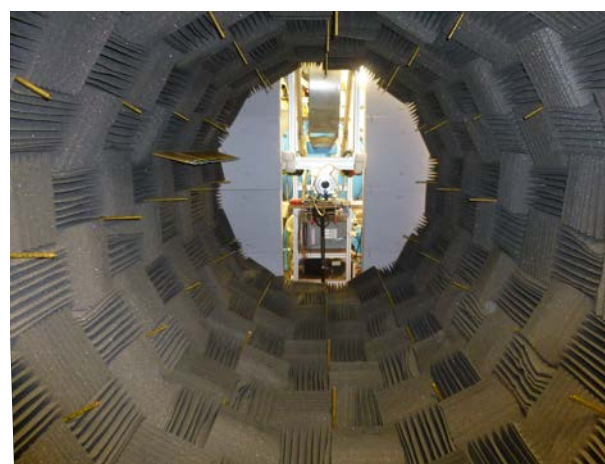
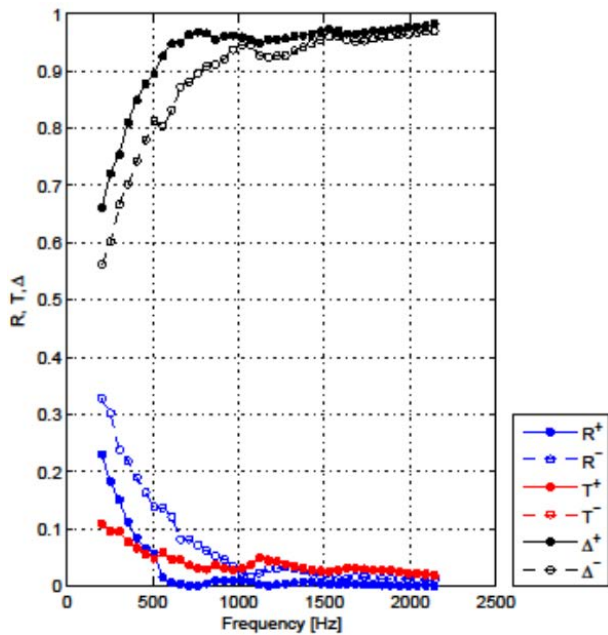


Abbildung 4: Blick in die reflexionsmindernde Umhüllung stromauf auf die Düse, links der Düse ist im Bild das lineare Mikrofonarray zu sehen.

Die Umhüllung ist aus einzelnen quadratischen Segmenten aufgebaut, die aus einer Schicht genopptem Polyurethanschaum auf einer Schicht Basotect bestehen. Der Schaumstoff ist auf einem Lochblech aus Aluminium befestigt, in das ein Mikrofonhalter integriert ist. Die Reflexions- und Absorptionseigenschaften dieser Materialkombination wurden in einem Prüfstand für akustische Liner vermessen. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 5) zeigen, dass diese Kombination oberhalb von etwa 500 Hz sehr günstige Eigenschaften hat. Da die Frequenz mit dem Modellmaßstab skaliert, ist diese untere Grenzfrequenz ausreichend für Experimente mit Düsen in ver-



**Abbildung 5:** Frequenzverlauf der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten des Sandwichaufbaus aus Basotect und Polyurethanschaum auf Aluminiumlochblech.

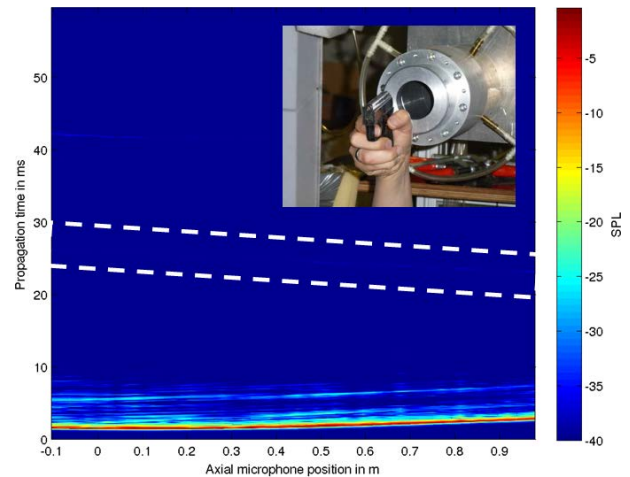
kleinerem Maßstab, deren Ergebnisse auf Schubdüsen von Flugzeugen mit typischen Durchmessern von einem Meter übertragen werden.

## Akustische Überprüfung

Die raumakustischen Eigenschaften des Prüfstands wurden mit Messungen der Impulsantwort einer Schreckschusspistole überprüft. Dabei wurde gezeigt, dass der absorbierende Zylinder in Kombination mit der absorbierenden Verkleidung der Rückwand stromab des Zylinders sehr gut die Reflexionen der Wände des Labors unterdrückt.

Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf des Schalldruckpegels über alle Mikrofone des linearen Arrays nach einem Schuss als Reflektogramm. Die Reflexionen lassen sich mit der Schallgeschwindigkeit und den Maßen des Raums entsprechenden Flächen zuordnen, liegen aber im Pegel wesentlich unter dem des direkten Signals.

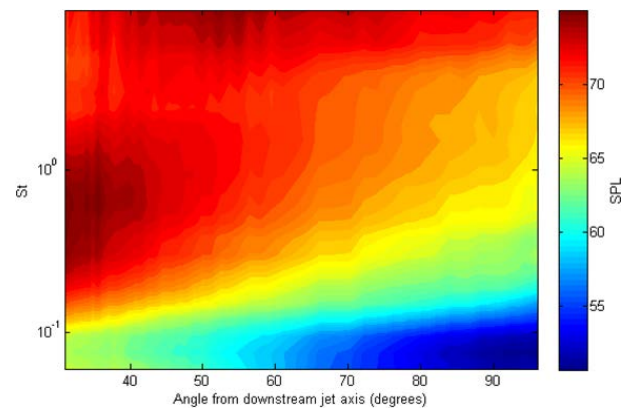
In Abbildung 6 sind die Positionen der Mikrofone entlang der  $x$ -Achse und die Laufzeit entlang der  $y$ -Achse aufgetragen. Das Signal des Schusses zeigt sich als aufwärts gekrümmte Linie, weil das Signal bei den stromab und stromauf gelegenen Mikrofonen später ankommt. Die Reflexion der stromab gelegenen Wand erscheint als von links nach rechts abfallende Linie, da dieses Signal die stromab liegenden Mikrofone zuerst erreicht. Diese Linie ist aber nur sehr schwach erkennbar und deswegen in Abbildung 6 durch zwei weiße, gestrichelte Linien eingegrenzt. Die stärksten Reflexionen erscheinen kurz nach dem Schuss und kommen von der Installation der Düse sowie Decke und Boden. Der stärksten Impuls ist der Schuss selbst, die Reflexionen werden durch die reflexionsarme Umhüllung stark reduziert.



**Abbildung 6:** Reflektogramm des Impulses einer Schreckschusspistole, entlang der  $x$ -Achse sind die Kanäle des Mikrofonarrays in axialer Richtung, entlang der  $y$ -Achse die Laufzeit aufgetragen. Zwischen den beiden weißen gestrichelten Linien liegt eine schwache Reflexion von der Wand stromab der Düse.

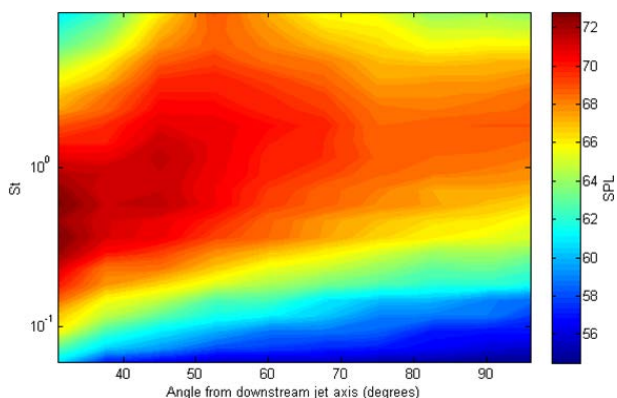
## Aeroakustische Messungen mit Freistrahldüsen

Zur Verifizierung des Prüfstands wurden Messungen mit einer Düse mit einem Durchmesser von 50,8 mm bei verschiedenen Machzahlen von 0,4 bis 0,7 durchgeführt. Die an verschiedenen Entfernungen stromab der Düse gemessenen Frequenzspektren des Strahlgeräusches wurden mit Referenzdaten von Tanna [1], die bei Lockheed 1976 mit einer Freistrahldüse von zwei Zoll Durchmesser gemessen wurden, verglichen.



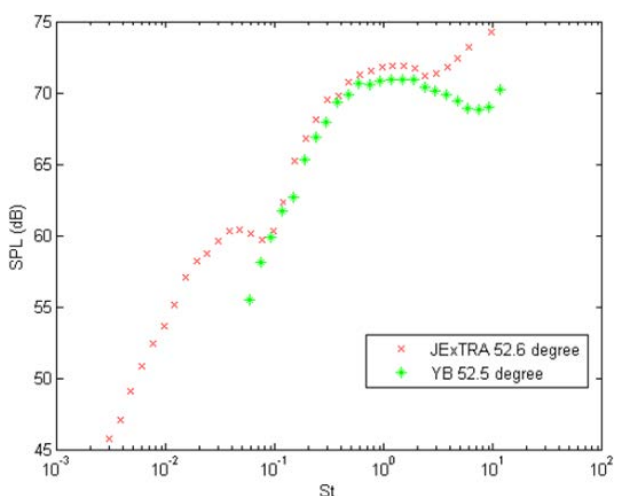
**Abbildung 7:** Messung der Richtcharakteristik der Frequenzspektren des Freistrahls aus einer Düse mit einem Durchmesser von 50,8 mm bei einer Machzahl von 0,5 am neuen Prüfstand. Der Schalldruckpegel ist als Funktion von Strouhalzahl und Emissionswinkel aufgetragen, wobei der Emissionswinkel stromauf zunimmt.

Abbildungen 7 und 8 zeigen die im neuen Prüfstand bzw. die von Tanna [1] gemessenen Richtcharakteristiken. Die Schalldruckpegel sind als Funktion der Strouhalzahl und des Emissionswinkels aufgetragen. Bei der Machzahl  $Ma = 0,5$  dieser Versuche entspricht  $St = 0,1$  in etwa einer Frequenz von 343 Hz. Der Emissionswin-



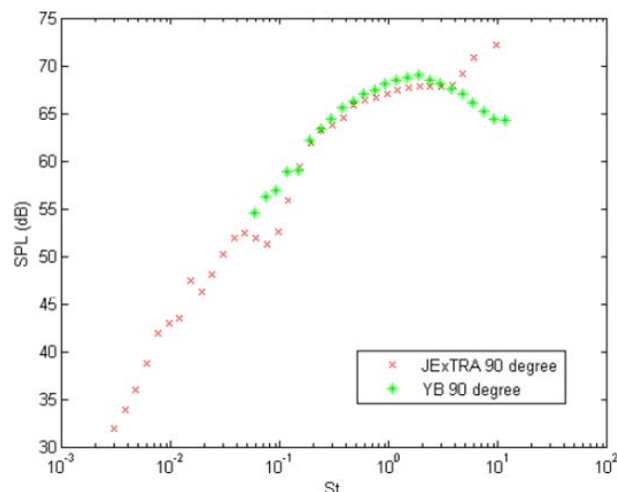
**Abbildung 8:** Messung der Richtcharakteristik der Frequenzspektren des Freistrahls aus einer 50,8mm Düse bei einer Machzahl von 0,5 von Tanna [1]. Der Schalldruckpegel ist als Funktion von Strouhalzahl und Emissionswinkel aufgetragen, wobei der Emissionswinkel in Richtung stromauf zunimmt.

kel  $\theta$  ist als der Winkel zwischen der Strahlachse und der Verbindungslinie zwischen der Düsenaustrittsebene auf der Strahlachse und der Position des jeweiligen Mikrofons definiert. Der Emissionswinkel nimmt also gegen die Strömungsrichtung zu. Die Messungen von Tanna wurden in einem großen reflexionsarmen Raum mit Mikrofonen mit einem radialen Abstand von 12 Fuß von der Düse durchgeführt, die neuen Messungen wurden mit dem linearen Mikrofonarray im Abstand von 58 cm von der Strahlachse durchgeführt. Bei niedrigen Frequenzen weichen die Ergebnisse der beiden Messungen durch die unzureichende Dämpfung der Einhüllung des Strahl am neuen Versuchsaufbau und bei hohen Frequenzen durch die Verwendung unterschiedlicher Mikrofontypen ab. Trotz dieser Unterschiede und der relativ einfachen Reflexionsminderung entsprechen die qualitativen Verläufe der neuen Messungen im mittleren Frequenzbereich sehr gut den Ergebnissen von Tanna [1].



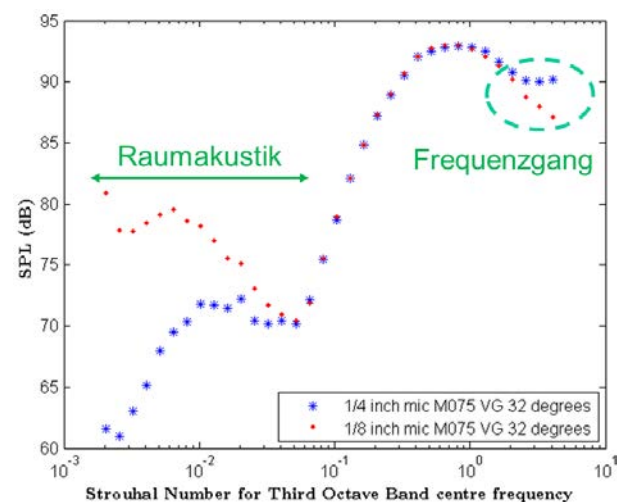
**Abbildung 9:** Vergleich der Messungen mit einer 50,8mm Düse von Tanna [1] (grün) und im neuen Strahlprüfstand der Abteilung Triebwerksakustik bei einem Emissionswinkel von  $\theta = 52^\circ$ .

Abbildungen 9 und 10 zeigen den direkten Vergleich



**Abbildung 10:** Vergleich der Messungen mit einer 50,8 mm Düse von Tanna [1] (grün) und im neuen Strahlprüfstand der Abteilung Triebwerksakustik (rot) bei einem Emissionswinkel von  $\theta = 90^\circ$ .

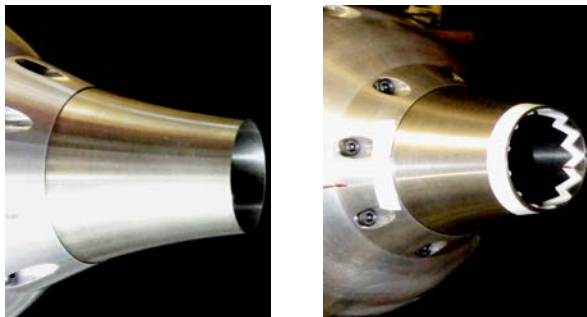
von Frequenzspektren der Datensätze von Tanna und des DLR, die bei Emissionswinkeln von  $\theta = 52^\circ$  beziehungsweise  $\theta = 90^\circ$  gemessen wurden. Die Kurven weichen besonders im Bereich unterhalb von  $St = 0,1$  und oberhalb von  $St = 2$  voneinander ab, liegen aber dazwischen innerhalb eines Intervalls von weniger als dB zusammen. Die Abweichung bei tiefen Frequenzen liegt an der unzureichenden Dämpfung von Reflexionen durch die Schaumstoffelemente des neuen Versuchsaufbaus. Die Unterschiede im hohen Frequenzbereich sind darauf zurückzuführen, dass hier 1/4 Zoll Mikrofone verwendet wurden, während Tanna mit 1/8 Zoll Mikrofonen arbeitete, die bei hohen Frequenzen genauer sind.



**Abbildung 11:** Vergleich der Messungen mit Mikrofonen mit 1/4 Zoll und 1/8 Zoll Durchmesser bei einem Emissionswinkel von  $\theta = 32^\circ$ .

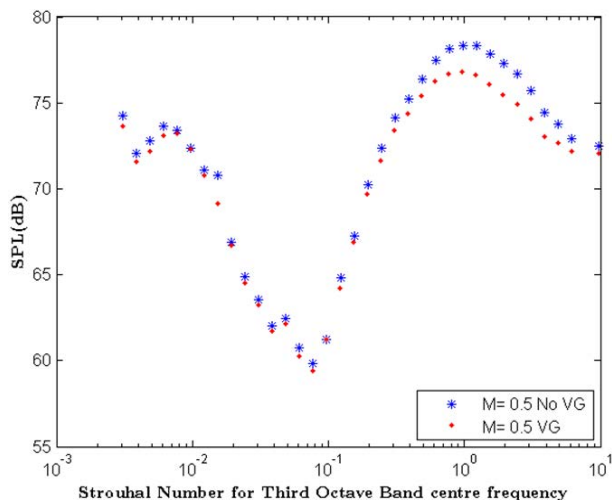
Das zeigt auch Abbildung 11 mit den Ergebnissen von Messungen im neuen Prüfstand mit 1/4 und 1/8 Zoll Mikrofonen an unterschiedlichen azimuthalen Positionen aber gleichen Emissionswinkeln. Auch hier sind die mit den 1/4 Zoll Mikrofonen gemessenen Pegel höher. Im tief-

frequenten Bereich kann die Einhüllung der Messstrecke den Einfluss der Raumakustik an den unterschiedlichen azimuthalen Positionen nur unzureichend kompensieren, was zu starken Abweichungen der Pegel führt. Im Bereich  $0,1 < St < 2$  ist die Übereinstimmung der Messungen aber sehr gut.



**Abbildung 12:** Die 25,4 mm Düsen: Referenz (links) und mit Wirbelgeneratoren (rechts).

Weitere Messungen wurden in Anlehnung an ein Experiment von Meyer et al. [2] durchgeführt. Dabei wurde die Geräuschminderung durch den Einbau von Wirbelgeneratoren in Düsen untersucht. Die Düse mit den als am besten befundenen Wirbelgeneratoren (siehe Abbildung 12) wurde im neuen Prüfstand vermessen.



**Abbildung 13:** Vergleich der Messungen mit der 25,4 mm Düse mit und ohne Wirbelgeneratoren bei einer Machzahl von 0,5 und einem Emissionswinkel von  $\theta = 35^\circ$ .

Dabei konnten innerhalb des relevanten Frequenzbereichs zwischen  $0,1 < St < 10$  die geräuschmindernde Wirkung der Wirbelgeneratoren reproduziert werden. Beispielhaft sind in Abbildung 13 die mit und ohne Wirbelgeneratoren bei einer Machzahl von 0,5 und einem Emissionswinkel von  $\theta = 35^\circ$  gemessenen Frequenzspektren dargestellt. Der Gesamtpegel wird durch den Einbau der Wirbelgeneratoren um etwas mehr als ein Dezibel gemindert, wobei schon eine Korrektur von 0,35 dB für die Minderung der Austrittsgeschwindigkeit um etwa 1 % durch die Verkleinerung des Austrittsquerschnitts der Düse berücksichtigt wurde.

## Fazit

Ein aerodynamischer Strahlprüfstand wurde durch eine reflexionsmindernde Umhüllung erweitert und kann jetzt für akustische Messungen an kleinen Freistrahldüsen im subsonischen Bereich verwendet werden. Die ersten Messungen an Düsen mit 50,8 mm und 25,4 mm Durchmesser bei Machzahlen bis  $Ma = 0,8$  zeigen Ergebnisse, die gut mit publizierten Referenzdaten vergleichbar sind. Die reflexionsmindernde Umhüllung des Strahl funktioniert im Frequenzbereich oberhalb von etwa 500 Hz sehr gut und der Prüfstand ist so für kleine aeroakustische Experimente an Freistrahlen geeignet.

## Literatur

- [1] Tanna, H.K. 'The Generation and Radiation of Supersonic Jet Noise. Volume III, Turbulent Mixing Noise Data' Lockheed-Georgia Company, 1976.
- [2] Meyer, Robert und Kuo, Ching Wen und McLaughlin, Dennis (2013) Reduction of subsonic jet noise by passive flow control devices. 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (34th AIAA Aeroacoustics Conference), 24.-27. Mai 2013, Berlin, Deutschland.