

AKUSTISCHE LOKALISATION VON STRÖMUNGSABLÖSUNG IM ETW

L. Koop¹, T. Ahlefeldt¹, J. Quest², J. Leuckert³, W. Nitsche³

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Aerodynamik und
Strömungstechnik, Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen, Deutschland

²European Transonic Windtunnel GmbH, Ernst-Mach-Strasse, 51147 Köln, Deutschland

³TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Marchstraße 12, 10587 Berlin

Kurzfassung

Die heutigen gesetzlichen Grenzwerte hinsichtlich der zulässigen Lärmemission zukünftiger Verkehrsflugzeuge haben dazu geführt, dass eine möglichst genaue Vorhersage der zu erwartenden Belastungen bereits in der frühen Entwicklungsphase eines neuen Flugzeugs gewährleistet sein muss.

Das Ziel des hier vorgestellten Vorhabens ist daher, akustische Messungen in Zukunft auch bei flugrelevanten Reynoldszahlen durchführen zu können. Dazu soll die Mikrofon-Array Messtechnik in einem ersten Schritt für die Anwendung unter kryogenen Bedingungen und einem erhöhten Umgebungsdruck im European Transonic Windtunnel (ETW) weiterentwickelt werden. Ein weiteres Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung eines nicht-intrusiven, kanalgebundenen Messverfahrens zur akustischen Ablöselokalisation als Alternative zu bisherigen Standardmesstechniken.

Für die Bereitstellung der Kryo-Array Messtechnik sind umfangreiche Vortests im Kryo-Kanal Köln (DNW-KKK) und im Pilot-ETW (PETW) durchgeführt worden bzw. geplant, in denen Konzepte für Sensoren, Bauenteile und Verkabelung entwickelt und getestet werden. Im Anschluss soll ein großes Kryo-Mikrofonarray konstruiert und entsprechend der Anforderungen des ETW hergestellt werden. Parallel dazu wird die physikalische Machbarkeit der akustischen Ablöselokalisation in einem Windkanalversuch unter Normalbedingungen untersucht. Abschließend soll die Vermessung der akustischen Quellen und der lokalen Strömungsablösung in einem Windkanalversuch im ETW unter kryogenen Bedingungen bei realen Flug-Reynoldszahlen demonstriert werden. Die Arbeiten werden im engen Verbund zwischen dem DLR, dem ETW und der TU Berlin durchgeführt.

1. EINLEITUNG

Bei einer hochgenauen experimentellen Untersuchung einer Flugzeugumströmung im Modellmaßstab müssen alle wesentlichen Ähnlichkeiten wie Geometrie, Mach- und Reynoldszahl eingehalten werden. Für große Transportflugzeuge ist dies in Europa lediglich im European Transonic Windtunnel ETW in Köln möglich. Im ETW strömt reines Stickstoffgas, das bis auf Tiefsttemperaturen von -163° C abgekühlt und auf einen Druck bis zu 4,5 bar gebracht werden kann. Die Strömungsgeschwindigkeit kann von niedrigen Werten wie bei Start und Landung über den Reiseflug bis in den Überschallbereich gesteigert werden. Damit kann zudem der Einfluss von Machzahl, Reynoldszahl und Modellverformung unabhängig voneinander untersucht werden.

Akustische Untersuchungen mit Mikrofon-Arrays sind im ETW bisher jedoch noch nicht durchgeführt worden. Die Vermessung von Schallquellen an Flugzeugmodellen findet bisher in der Regel in Niedriggeschwindigkeitswindkanälen mit Normalbedingungen statt, d.h. der Einfluss der Reynoldszahl auf die Schallabstrahlung wird in der Entwicklungsphase von Flugzeugen in der momentanen Praxis vernachlässigt. Untersuchungen in einem Windkanal mit erhöhtem Umgebungsdruck [1] sowie auch leicht kryogener Umgebung [2] zeigen jedoch bereits einen Einfluss der Reynoldszahl auf die Schallabstrahlung. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher aerokustische Messungen bei Flug-Reynoldszahlen im ETW durchzuführen. Die Mikrofon-Array Messtechnik soll dazu in einem ersten Schritt für die Anwendung unter kryogenen Bedingungen

und einem erhöhtem Umgebungsdruck weiterentwickelt werden. Ein weiteres Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung eines nicht-intrusiven, kanalgebundenen Messverfahrens zur akustischen Ablöselokalisation als Alternative zu bisherigen Standardmesstechniken. Die akustische Signatur einer ablösenden Grenzschicht soll dazu mit dem zuvor entwickelten Mikrofon-Array in der geschlossenen Messstrecke des ETW vermessen und die so gewonnenen Daten dazu verwendet werden die lokalen Strömungsablösungen orten zu können. Folgende Schritte sollen dieses Vorhaben zum Ziel führen

- 1) In einem ersten Schritt soll die Machbarkeit von Mikrofon-Array Messungen unter kryogenen Bedingungen untersucht werden. Dazu werden Messungen an einem umströmten Zylinder im DNW-KKK durchgeführt. Der Zylinder ist dabei eine relativ einfache Schallquelle, für die analytische Modelle zur Berechnung der abgestrahlten Schallleistung in der Literatur vorliegen, so dass die erhaltenen Messergebnisse mit theoretischen Ergebnissen verglichen und auf Plausibilität geprüft werden können.
- 2) In einem zweiten Schritt soll die Messtechnik an einer Schallquelle mit komplexer Geometrie unter kryogenen Bedingungen getestet werden. Dazu werden ebenfalls Messungen im DNW-KKK jedoch diesmal an einem Halbmodell durchgeführt.
- 3) Daran anschließend soll die Messtechnik für Messungen im ETW, d.h. für Messungen unter kryogenen Bedingungen **und** erhöhtem Umgebungsdruck weiterentwickelt werden.

- 4) Die physikalische Machbarkeit der akustischen Ablösedetektion wird parallel zum vorigen Schritt unter Normalbedingungen untersucht. Dazu werden in einem Windkanal der TU Berlin Druckschwankungen auf der Profiloberfläche eines 2D Modells und die akustischen Signatur einer Strömungsablösung im Fernfeld zeitsynchron vermessen. Anhand des Vergleichs von Nah- und Fernfelddaten werden die Auswertealgorithmen optimiert und die Empfindlichkeit bestimmt, mit der lokale Strömungsablösungen im akustischen Fernfeld erfasst werden können.
- 5) In diesem letzten Schritt werden die Erkenntnisse der vorigen Schritte zu einer Messmethodik zusammengefasst. Die Leistungsfähigkeit der Methodik wird demonstrativ an einem verfügbaren Halbmodell bei Flugreynoldszahlen im ETW getestet. Die erhaltenen Daten werden sowohl hinsichtlich der Schallabstrahlung als auch der Ablöselokalisierung ausgewertet, analysiert und dokumentiert.

Die ersten beiden Arbeitsschritte sind bereits in Eigenregie des DLR erfolgreich durchgeführt worden. Die Messmethode und die erhaltenen Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden in den Abschnitten 2 und 3 beschrieben. Die Arbeitsschritte 3 bis 5 sind Teil eines LuFo4 Projektes (3. Programmaufruf) und werden in Abschnitt 4 genauer erläutert. Diese Arbeiten werden in den nächsten drei Jahren im engen Verbund zwischen dem DLR, dem ETW und der TU Berlin durchgeführt.

2. MESSANODRNUUNG IM DNW-KKK

2.1. Windkanal

Die Messungen wurden im Kryo-Kanal Köln (DNW-KK) durchgeführt. Der DNW-KKK ist ein Windkanal Göttinger Bauart mit einer geschlossenen Messstrecke. Der Querschnitt dieser Messstrecke ist $2,4\text{ m} \times 2,4\text{ m}$. Der Windkanal kann in dem Temperaturbereich $100\text{ K} < T < 300\text{ K}$ und bis zu einer Machzahl von $\text{Ma} = 0,38$ betrieben werden. Dies korrespondiert zu einer maximalen Reynoldszahl von $\text{Re}_{0,1\text{ vs}} = 9 \cdot 10^6$ mit dem Messstreckenquerschnitt S.

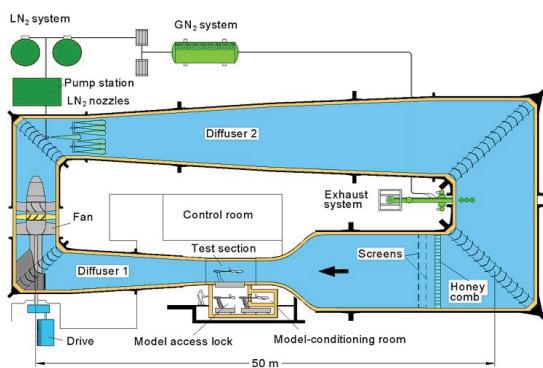


BILD 1. Skizze des Kryo Kanal Köln (DNW-KKK) in der Draufsicht.

2.2. Vortests mit einem Zylinder

Zur Untersuchung der Machbarkeit von Mikrofon-Array Messungen unter kryogenen Bedingungen fanden Messungen an einem Zylinder mit einem Durchmesser von 2,5

mm am DNW-KKK statt. Es wurden umfangreiche Messungen bei verschiedenen Machzahlen ($\text{Ma} = 0,1$ bis $\text{Ma} = 0,3$) in einem weiten Temperaturbereich (290 K bis 100 K) durchgeführt. Um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu überprüfen, wurden die Messreihen über einen Zeitraum von 2 Wochen mehrfach wiederholt.

Das verwendete Linear-Array besteht aus 21 Elektretmikrofonen, welche zuvor im kryogenen Bereich getestet wurden. Die Verschalung des Arrays besteht aus Aluminium, hat eine Dicke von 25 mm, eine Länge in Strömungsrichtung von 1700 mm und eine Höhe von 110 mm (siehe BILD 2).

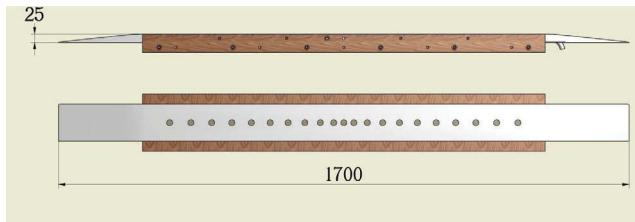


BILD 2. Das Linear-Array (zusammen mit dem laminierten Festholz) besteht aus 21 Elektretmikrofonen im unteren Bildteil als Kreise dargestellt. Dimensionen sind angegeben in [mm].

Der Aluminiumkörper des Arrays wurde verschiebbar auf eine Führung aus laminiertem Festholz montiert. Um die Kontraktion des Aluminiums zuzulassen, wurde das Aluminiumarray nur im Zentrum starr fixiert. Die 21 Elektretmikrofone sind zurückgesetzt hinter Öffnungen montiert, wobei die Öffnungen einen Öffnungswinkel von 90° haben. Die 21 Mikrofone befinden sich auf einer Linie und besitzen relativ zum zentralen Mikrofon logarithmische Abstände. Diese Anordnung wurde gewählt, um eine möglichst große Seitenkeulenunterdrückung in dem Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 20 kHz zu erhalten. Die Mikrofone arbeiten mit einer Versorgungsspannung von 12 V, und jedes Datenkabel ist einzeln abgeschirmt.

BILD 3 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaus. Das Linear-Array ist an der Seitenwand der Messtrecke und der Zylinder ist zwischen dem Kanalboden und der Kanaldecke in der Mitte des Messtrecke angebracht.

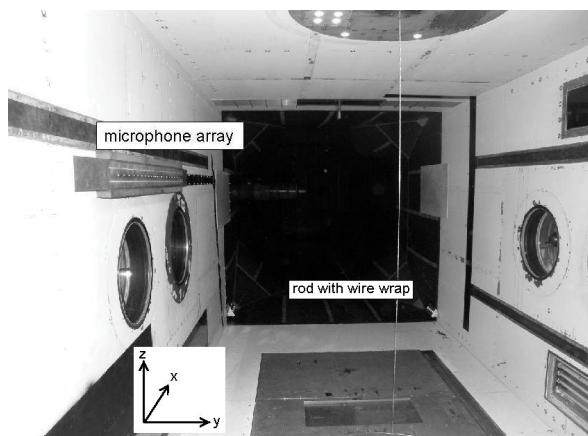


BILD 3. Foto der Messstrecke. Das Linear-Array ist an der Seitenwand der Messtrecke und der Zylinder im Zentrum befestigt. Der Blick ist in Strömungsrichtung.

Der Zylinder ist mit einem Draht umwickelt außer im Bereich der Messebene, um periodische Ablösungen zu

vermeiden. Damit strahlt nur dieser Bereich tonal ab und eine kohärente Linienquelle über die gesamte Zylinderlänge wird vermieden. BILD 4 zeigt das Mikrofon-Array und den Zylinder in der (x,z)-Ebene.

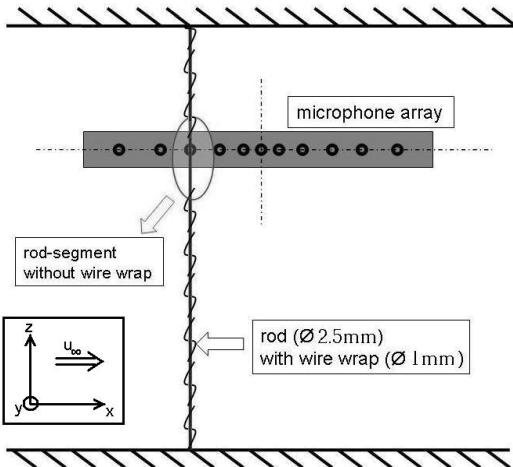


BILD 4. Darstellung der Messanordnung in der (x,z)-Ebene.

2.3. Messungen an einem Halbmodell

Für die Messungen an dem Halbmodell wurde ein zweidimensionales Mikrofon-Array konstruiert, in welchem 144 Mikrofone in logarithmischen Spiralarmen angeordnet sind. Die Elektretmikrofone sind ähnlich wie in dem Linien-Array zurückgesetzt hinter Öffnungen montiert. Die Dimensionen der Arrays sind 1756 mm in Strömungs- und 1300 mm in vertikaler Richtung. Die Verkleidung des Arrays besteht aus Aluminium. Die Befestigung des Arrays an die Seitenwände der Messstrecke erfolgte ebenfalls über laminiertes Festholz, wobei dieses nur über einen starren Fixpunkt im unteren Zentrum des Arrays an der Seitenwand montiert ist. BILD 5 zeigt ein Foto der Messanordnung und BILD 6 schematisch die Anordnung der Mikrofone im Verhältnis zum Halbmodell.



BILD 5. Foto der Messtrecke mit dem Do728 Modell in der Mitte der Messtrecke. Das große Mikrofon-Array ist an der Seitenwand der Messtrecke montiert. Der Blick ist in Strömungsrichtung.

Das verwendete Modell hat eine Skalierung von 1:9,26,

besitzt eine mittlere aerodynamische Flügeltiefe von 353 mm und eine Halbspannweite von 1,44 m. Die vorliegenden Messungen wurden in Landekonfiguration mit ausgefahrenen Vorflügel und Hinterkantenklappen durchgeführt. Das gesamte Halbmodell ist auf einer drehbaren Unterflurwaage montiert. Auf dem Halbmodell wurde mit Ausnahme der Triebwerksgondel kein Turbulenzband verwendet.

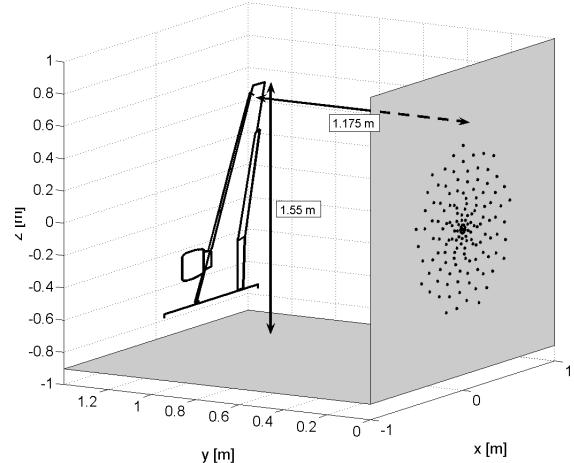


BILD 6. Skizze der Messanordnung. Dargestellt sind die Positionen der Mikrofone im Verhältnis zum Halbmodell.

Der Anstellwinkel wurde im Bereich $-2^\circ < \alpha < 10^\circ$, die Temperatur in 7 Schritten im Bereich $100 \text{ K} < T < 290 \text{ K}$ und die Machzahl in 6 Schritten im Bereich von $0,125 < \text{Ma} < 0,25$ variiert. Der Reynoldszahlbereich bezogen auf die mittlere aerodynamische Flügeltiefe ist $1 \cdot 10^6 < \text{Re} < 9 \cdot 10^6$. Während aller Messungen wurden die aerodynamischen Kräfte (Auftrieb, Widerstand, Moment) vermessen.

2.4. Datenerfassung

Die Mikrofonsignale wurden simultan mit einer Quantisierung von 16 bit und einer Abtastrate von 120 kHz abgetastet. Die Messdauer für jeden Datenpunkt betrug dabei 30 s. Um den Einfluss des tieffrequenten Hintergrundgeräuschpegels auf die Messungen zu reduzieren, wurde ein Hochpassfilter mit einer Eckenfrequenz von 500 Hz verwendet.

Aus den Zeitsignalen wurden Frequenzspektren berechnet mit einer Fensterlänge von 4096 Abtastwerten und einem Hanning-Fenster als Fensterfunktion. Die Frequenzauflösung beträgt damit 29,3 Hz.

2.5. Auswertung

Die Arraysignale wurden mittels eines Delay-and-Sum-Beamformers im Frequenzbereich ausgewertet, um die rekonstruierten Quellstärken S_{exp} auf einem Gitter mit den Gitterpunkten \vec{y}_f für die Frequenzen ω zu gewinnen:

$$(1) \quad S_{\text{exp}}(\vec{y}_f, \omega) = \frac{\vec{e}(\vec{y}_f, \omega)^H R_{\text{DR}}(\omega) \vec{e}(\vec{y}_f, \omega)}{M^2 - M}.$$

R_{DR} bezeichnet hierbei die spektrale Kreuzkorrelationsmatrix. Der Index DR bedeutet, dass die Diagonalterme der Matrix zu Null gesetzt werden. Der komplexe Vektor \vec{e} beschreibt die Phasenverschiebung unter der Annahme einer Punktquelle bei homogener Anströmung. M bezeichnet die Anzahl der Mikrofone und \vec{e}^H den konjugiert transponierten Phasen-Vektor.

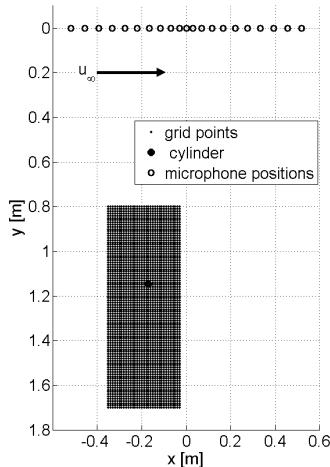


BILD 7. Gitter für die Zylindermessung. Dargestellt sind die Gitterpunkte für die Berechnung des Array Ausgangs in der (x,y) -Ebene. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt an der Position des Zentralen Array-Mikrofons.

Der Arrayausgang wird berechnet auf einem Gitter, welches den für die Auswertung relevanten Bereich abdeckt. Das Gitter für die Zylindermessung ist in BILD 7 dargestellt. Das Gitter ist senkrecht zur Zylinderachse orientiert und besitzt eine Auflösung von 10 mm. Das Gitter für die Halbmodellmessung ist in BILD 8 dargestellt. Dieses Gitter besteht aus 2197 Gitterpunkten und wird mit dem Anstellwinkel des Modells mitgedreht.

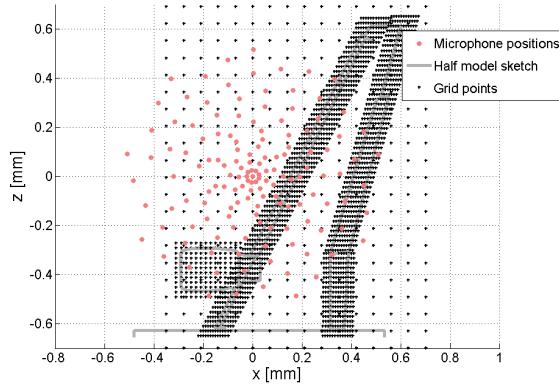


BILD 8. Gitter für die Halbmodellmessung. Dargestellt sind die Gitterpunkte für die Berechnung des Array Ausgangs in der (x,z) -Ebene. Das Do728 Halbmodell ist im Hintergrund skizziert.

2.6. Integrierte Schallleistung

Die spektrale Schallleistung wird aus den Quellstärken S_{exp} berechnet, indem über das gesamte Gitter integriert wird. Dieser Wert wird normiert mit der Quellstärke, welche

durch eine Monopolquelle mit bekannter Quellstärke im Zentrum des Gitters erzeugt wird. Mit dieser Methode wird näherungsweise die Impulsantwort des Mikrofon-Arrays bei Berechnung der abgestrahlten Schallleistung berücksichtigt [3]:

$$(2) \quad P_{\text{exp}} = \sum_{\vec{y}_f} S_{\text{exp}}(\vec{y}_f) \times \frac{P_{\text{sim}}}{\sum_{\vec{y}_f} S_{\text{sim}}(\vec{y}_f)}.$$

In dieser Gleichung bezeichnet P_{sim} die absolute Schallleistung des simulierten Monopols. Dieser simulierte Monopol erzeugt auf dem Gitter die Quellstärken S_{sim} . Für jede Machzahl und Temperatur wurde diese simulierte Monopolantwort berechnet, um den korrekten normierten Array-Ausgang P_{exp} zu erhalten.

3. ERGEBNISSE

3.1. Zylindermessung

Die maximale Schallleistung jeder Messung konnte eindeutig einer Strouhal-Frequenz zugeordnet werden. Für einen qualitativen Vergleich werden die ermittelten maximalen Schallleistungen bei jedem Messpunkt mit einem analytischen Modell zur Schallabstrahlung verglichen. Das in Gleichung (3) dargestellte Modell zur abgestrahlten Schallleistung P_{pred} (unter Annahme von konstanter Länge und konstantem Durchmesser des Zylinders) setzt sich aus thermodynamischen Größen (Dichte ρ , Schallgeschwindigkeit c_o) sowie von der Reynoldszahl abhängigen Größen zusammen (vgl. [4]). Hierzu gehören die Strouhalzahl St , der fluktuierende Auftriebsbeiwert C_l und die Korrelationslänge Λ_d . Diese Größen können nur empirisch ermittelt werden und wurden aus der Literatur entnommen [5]:

$$(3) \quad P_{\text{pred}} \propto \rho c_o^{-3} u^6 St C_l \Lambda_d.$$

BILD 9 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit dem semianalytischen Modell aus Gl. (3). Die deutlichsten Abweichungen sind bei niedrigen Machzahlen (geringer Signal-Rauschabstand) sowie bei bestimmten Reynoldszahlen (Transitionseffekte) zu beobachten [6].

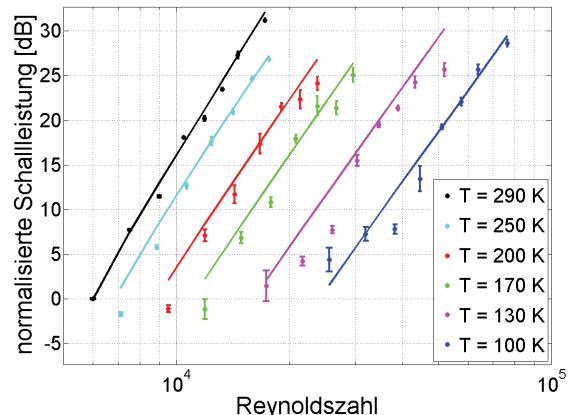


BILD 9. Vergleich der Messwerte (•) mit nach Gleichung (3) berechneten Kurven (—) bei verschiedenen Temperaturen aufgetragen über der Reynoldszahl. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Messwerte an.

3.2. Halbmodellmessung

BILD 10 stellt zwei Quellkarten gegenüber. Diese unterscheiden sich nur durch unterschiedliche Temperaturen, beziehungsweise Reynoldszahlen. Verschiedene Quellen am Vorflügel und an der Seitenkante können identifiziert werden. Bei einer erhöhten Reynoldszahl ist der Pegel einiger Quellen in etwa unverändert (slat tracks) und der weiterer Quellen um 6 dB (kruger flap, flap tip) erhöht. Zusätzlich ist bei der erhöhten Reynoldszahl auch eine neue Quelle auf der Triebwerksgondel (nacelle strake) identifizierbar [7].

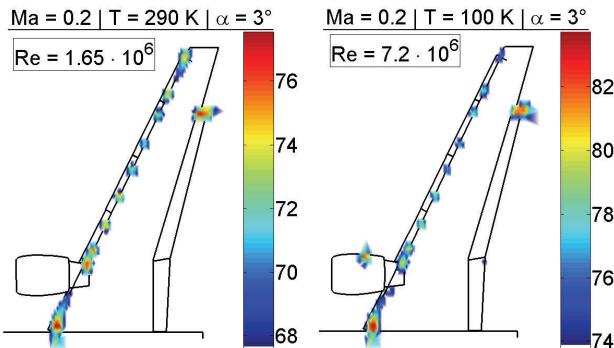


BILD 10. Quellkarten des Halbmodells bei einer Machzahl von 0,2, einem Anstellwinkel von 3° und unterschiedlichen Reynoldszahlen. Die linke Abbildung zeigt eine Quellkarte bei 290 K ($\text{Re} = 1,65 \cdot 10^6$). In der rechten Abbildung führt die Temperatur von 100 K zu einer erhöhten Reynoldszahl von $7,2 \cdot 10^6$.

4. GEPLANTE MESSUNGEN IM ETW

Im Rahmen des LuFo 4 Projektes *Akustische Lokalisierung von Strömungsablösung im ETW (ALSA)* soll die Mikrofon-Array Messtechnik für Messungen im ETW bereitgestellt werden. Dies stellt eine besondere Anforderung an die Messtechnik dar. Zunächst müssen neue Sensoren für die Durchführung der Messungen gefunden werden, welche akustische Messungen sowohl bei sehr geringen Temperaturen als auch bei erhöhtem Umgebungsdruck ermöglichen. Messungen können mit Standard-Elektretmikrofonen unter solchen Bedingungen nicht durchgeführt werden, da der Druckausgleich zwischen Membranvorder- und -rückseite nicht möglich ist und der erhöhte Umgebungsdruck in der Messstrecke zu einer starken Änderung der Membranspannung und einer damit einhergehenden Funktionsuntüchtigkeit des Sensors führen würde. Für Messungen in bedruckter Umgebung erweisen sich Kondensatormikrofone als brauchbarer, da diese einen Druckausgleich zwischen Vor- und Rückseite der Membran herstellen können. Die Firma Brüel&Kjaer hat kürzlich zusammen mit dem ETW eine Spezialanfertigung eines vorpolarisierten Kondensatormikrofons entwickelt mittels dessen Messungen bei Temperaturen bis 100 K möglich sind. Hierfür wurde die Elektronik des Vorverstärkers dieses Mikrofons an die niedrigen Temperaturen angepasst. In einer Kooperation zwischen dem ETW, dem DLR und Brüel&Kjaer wurden Vortests mit diesen Mikrofonen unter kryogenen Bedingungen durchgeführt. BILD 11 zeigt den Amplitudengang eines solchen Mikrofons für verschiedene Temperaturen.

Für die weiteren Untersuchungen sind umfangreiche Messungen in der Kryokammer des ETW und im Pilot-ETW geplant. In der Kryokammer werden die Mikrofone, welche später in dem großen Array verwendet werden sollen, bei unabhängig voneinander variiertem Druck und Temperatur vermessen. Somit werden quantitative Vergleiche der Ergebnisse unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ermöglicht.

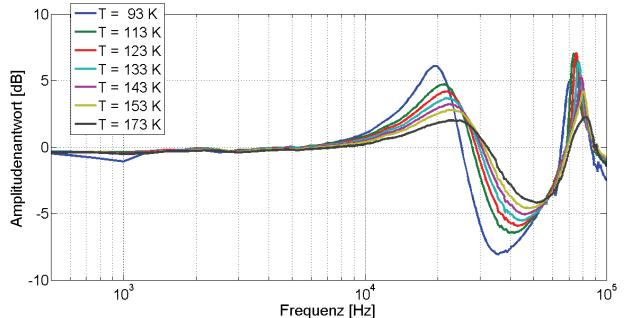


BILD 11. Darstellung der Amplitudenantwort des Kryo-Mikrofons bei verschiedenen Frequenzen. Die Amplitudenantwort ist bezogen auf den Frequenzgang bei Normalbedingungen.

Zudem werden Messungen mit einem Mini-Array unter Strömungsbedingungen im P-ETW durchgeführt. Als aeroakustische Schallquelle für diese Testmessungen wird ein Zylinder verwendet. Als Mikrofonträger wird ein Blinddeckel aus der Messstrecke des P-ETW mit 12 Kryo-Mikrofonen bestückt und in die Messtrecke eingebaut. Zusätzlich wird bei diesem Versuch der Einfluss der Kanalgrenzschicht auf die Mikrofonmembran in zwei Einbauvarianten untersucht. BILD 12 zeigt die Mikrofonanordnung des geplanten Mini-Arrays. Die Sensorpositionen wurden so gewählt, dass in dem zu erwartenden Frequenzbereich eine gute Quellauflösung erreicht wird. BILD 13 zeigt die Array-Antwort auf eine simulierte Monopolquelle bei unterschiedlichen Frequenzen. Diese Array-Pattern zeigen, dass mit der hier gewählten Mikrofonanordnung Quellen im Frequenzbereich $3\text{ kHz} < f < 10\text{ kHz}$ gut aufgelöst werden können. In dem P-ETW Versuch wird der statische Druck von 1 bar bis 4 bar bei verschiedenen Temperaturen im Bereich $100\text{ K} < T < 290\text{ K}$ variiert.

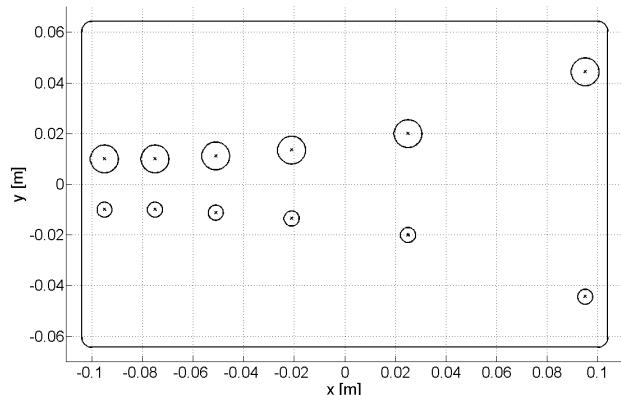


BILD 12. Mikrofonanordnung auf dem Blinddeckel des P-ETW. Die unterschiedlichen Kreisdurchmesser kennzeichnen die zwei Einbauvarianten.

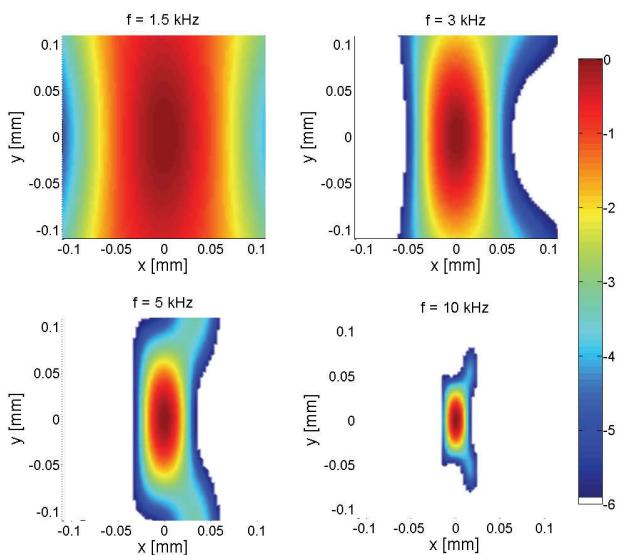


BILD 13. Amplitudenantwort des P-ETW Mikrofon-Arrays in der Array-Ebene im Abstand von 0,1354 m (Mitte der Messtrecke).

Im Anschluss an diese Voruntersuchungen und Sensor-Tests wird ein Detailkonzept für ein Mikrofon-Array zur Anwendung im ETW entwickelt. Geplant ist hierbei ein Mikrofon-Array mit 100 Sensoren. Ausgehend von den Möglichkeiten zur Verwendung von Mikrofonen in der Kanalwandlung wird insbesondere eine optimale Mikrofonanordnung erarbeitet. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei der Zugang zur Messstrecke dar. Die Mikrofone können an der Seitenwand des ETW nur an bestimmten Bereichen eingesetzt werden. Einen deutlichen Anteil des Aufwandes für die Simulation und Optimierung des sich ergebenen Array-Patterns werden daher die Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen der Messtrecke und der für die zu erwartenden Untersuchungen relevante Frequenzbereich unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten durch die variable Testumgebung (Kryo, Druck) haben. Zudem müssen die Kabel von den Mikrofonen durch das Plenum zur Datenerfassungsanlage außerhalb des Plenums geführt werden. Dies stellt auf Grund der niedrigen Temperaturen und des hohen Umgebungsdruckes innerhalb des Plenums eine große Herausforderung dar. Zwischen Datenerfassung und Windkanal wird eine Kommunikationsschnittstelle etabliert. Dazu wird ein Standard für den Datenaustausch zwischen dem DLR Messsystem und der Windkanalsteuerung des ETW definiert und eine entsprechende Schnittstelle programmertechnisch umgesetzt. Anschließend kann so die beim DLR vorhandene Messdatenerfassungsanlage in die Windkanal- und Versuchssteuerung des ETW modular eingebunden und die Datenerfassung durch den Kanal gesteuert werden.

Parallel zu diesen akustischen Voruntersuchungen und der damit zusammenhängenden Messtechnikentwicklung wird die Machbarkeit der akustischen Ablösedetektion unter Normalbedingungen in einem Niedergeschwindigkeitswindkanal der TU Berlin untersucht. Durch zeitsynchrone Messungen von Druckschwankungsverteilungen auf einer Profiloberfläche einerseits und von akustischen Fernfeldanalysen mit Hilfe eines Mikrofon-Arrays andererseits soll der Nachweis der physikalischen Machbarkeit des Messverfahrens sichergestellt werden. Für dieses

Experiment wird ein 2D-Profilelement mit einem Array von verschiedenen dynamischen Oberflächensensoren (Kulites, Oberflächenhitzdrähte) ausgerüstet, um für verschiedene Strömungszustände (anliegend, abgelöst) bei freier und fixierter Transition die Strömungstopologie mit Hilfe der flächigen Schwankungsverteilungen zu charakterisieren. BILD 14 zeigt den Querschnitt des geplanten Modells. Bei diesem Wölbklappenmodell ist die Hinterklappe übergangsfrei in verschiedenen Winkeln frei justierbar.



BILD 14. Querschnitt des 2D Profils für die Windkanal-messung an der TU Berlin

Zeitsynchron zu diesen Nahfeldmessungen wird die Schallabstrahlung ins Fernfeld mittels eines Mikrofonarrays vermessen. Anhand des Vergleichs von Nah- und Fernfelddaten werden die Auswertealgorithmen optimiert und die Empfindlichkeit bestimmt, mit der lokale Strömungsablösungen im akustischen Fernfeld erfasst werden können. Die entsprechenden Auswertemethoden werden angepasst.

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Messverfahrens wird dann abschließend demonstrativ an einem Halbmodell bei Flugreynoldszahlen im ETW getestet. Die Mikrofon-Array Messtechnik wird zur akustischen Quell- und Ablöselokalisation im ETW an ausgewählten Strömungskonfigurationen und Betriebsbedingungen verwendet. Dabei fließen die Erkenntnisse aus den Messungen im DNW-KKK, P-ETW und den Messungen an der TU Berlin zusammen. Die Definition der Messaufgabe wird hier in Zusammenarbeit der Projektpartner (ETW und DLR) vorgenommen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Mikrofon-Array Messtechnik wird im Rahmen dieser Arbeiten weiterentwickelt zur Anwendung für einen Messbereich von 300 K bis 100 K in kryogenen Windkanälen bei erhöhtem Umgebungsdruck. Damit können aeroakustische Schallquellen bei realen Flugreynoldszahlen im ETW untersucht werden. Bei Messungen unter diesen extremen Bedingungen sind besondere Anforderungen an das Material und die Auswertung im Vergleich zu konventionellen Messungen im Windkanal zu beachten. In einem ersten Schritt wurde die Machbarkeit von Mikrofon-Array Messungen unter kryogenen Bedingungen im DNW-KKK untersucht. Es wurden Messungen an einem umströmten Zylinder und einem Halbmodell durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen zeigen reproduzierbare Ergebnisse und können sehr gut mit Daten aus der Literatur verglichen werden. Zudem kann ein signifikanter Einfluss der Reynoldszahl auf verschiedene Quellmechanismen festgestellt werden. Im Weiteren ist im Rahmen eines LuFo4 Projektes in Zusammenarbeit mit dem ETW und der TU Berlin die Erweiterung dieser Messtechnik für Messungen unter erhöhtem Druck im ETW geplant. In diesem Zusammenhang soll die Messtechnik zusätzlich zur akustischen Quellanalyse zur akustischen Ablösedetektion verwendet werden.

Die Arbeiten werden im Rahmen des nationalen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo4), Dritter Programmaufruf 2010 bis 2013, gefördert.

6. LITERATUR

- [1] Hayes, J. A. et al.: Measurement of Reynolds number effect on airframe noise in the 12-foot pressure wind tunnel. 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit (1999)
- [2] Stoker, R. W., Gutierrez, R., Larssen, J. V., Underbrink, J. R., Gatlin, G. M., and Spells, C., "High Reynolds Number Aeroacoustic Testing in NASAs National Transonic Facility (NTF)," 46th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2008.
- [3] Oerlemans S., et al.: Quantification of airframe noise using microphone arrays in open and closed wind tunnels. International Journal of Aeroacoustics Vol. 6 (2007), 309-333
- [4] Norberg, C.: Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. Journal of Fluid and Structures Vol. 17 (2003), 57–96
- [5] Fujita, H., et al.: The aeolian tone characteristics of a circular cylinder in high Reynolds number flow. 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (1999)
- [6] Ahlefeldt, T. und Koop L.: Microphone Array Measurement in a Cryogenic Wind Tunnel. AIAA Journal Vol. 48 (No.7), pp. 1470-1479, 2010
- [7] Ahlefeldt, T., et al.: Aeroacoustic High Reynolds Number Measurements of a Scaled Half Model. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference (2010)