

Berichts.-Nr.: **DLR-IB 224-2014 A 99**

Verfasser: **Thomas Ahlefeldt**

Titel: **Schlussbericht zum Lufo-4 Vorhaben ALSA  
„Akustische Lokalisierung von  
Strömungsablösung im ETW“**

Datum: 6.05.2014

Auftraggeber:

Auftrags-Nr.:

Vorgesehen für:

**Der Bericht um-**  
44 Seiten einschl.  
01 Tabellen  
36 Bilder  
16 Literaturstellen

Vervielfältigung und Weitergabe dieser Unterlagen sowie Mitteilung ihres Inhalts an Dritte,  
auch auszugsweise, nur mit Genehmigung  des DLR  des Auftraggebers.

**DLR**

**Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Bunsenstraße 10  
37073 Göttingen  
Germany  
Abteilung AS-EXV**

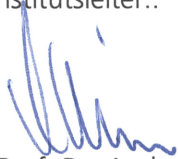
### Kurzfassung:

ALSA (Akustische Lokalisation von Strömungsablösung im ETW) ist ein Forschungsprojekt innerhalb des 4. Luftfahrtforschungsprogramms im Forschungsschwerpunkt "Entwicklung technologischer Bausteine für das klimaschonende Luftverkehrssystem der Zukunft". Projektpartner sind das DLR und die European Transonic Windtunnel GmbH (ETW). Im Rahmen von ALSA wurde ein akustisches Messsystem entwickelt, welches es ermöglicht weltweit erstmalig die Lokalisation von Schallquellen in einem kryogenen druckbeaufschlagten transsonischen Windkanal (ETW) und damit akustische Untersuchungen bei Mach- und Reynoldszahlen realer Transportflugzeuge unter den definierten Bedingungen eines Windkanals durchzuführen. Die besonderen Bedingungen am ETW, d.h. großes Plenum, welches die Messstrecke mit einer Druckhülle und einer Temperaturisolierung für kryogene Gastemperaturen und erhöhte Gasdrücke umschließt, erforderten die Entwicklung eines Sensor- und Signalleitungskonzeptes, das innerhalb einer kryogenen Umgebung anwendbar ist. Die Anwendbarkeit des entwickelten Messsystems konnte am Ende des Vorhabens im Rahmen von zwei Messkampagnen im ETW, die typische industrielle Anwendungen im ETW repräsentieren, nachgewiesen werden: Untersuchungen bei realen Reynoldszahlen an einer Hochauftriebskonfiguration des Modells eines realen Transportflugzeuges im ETW. Bei beiden Untersuchungen konnte somit auch weltweit erstmalig der signifikante Einfluss der Reynoldszahl auf die Schallabstrahlung eines Flugzeugmodells nachgewiesen werden. Das Messsystem zeigte sich hierbei als hinreichend robust, u.a. gegeben durch einen hohen Automatisierungsgrad, der auch im Hinblick auf eine kosteneffiziente Durchführung solcher Messungen realisiert wurde, was bei dem hohen Ressourcenverbrauch an flüssigem Stickstoff und elektrischer Energie während des Windkanalbetriebes ein entscheidendes Kriterium für den ETW darstellt.

## DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.

### Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

Institutsleiter::



(Prof. Dr. Andreas Dillmann)

Verfasser:



(Dr. T. Ahlefeldt) (Dr. Lars Koop)

Abteilungsleiter:



(Dr. Lars Koop)

**Datum:** 16.05.2014

**Bearbeitet:** Ilka Micknaus

**Abteilung:**

Experimentelle Verfahren

**Bericht:**

224-2014 A 99

# Inhalt

## I Kurzdarstellung

<b>1. Aufgabenstellung .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Voraussetzungen des Vorhabens.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>6</b>
<b>4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn.....</b>	<b>9</b>
<b>5. Zusammenarbeit.....</b>	<b>10</b>

## II Eingehende Darstellung

<b>6. Erzielte Ergebnisse .....</b>	<b>12</b>
6.1 Untersuchungen zur Ablöselokalisation (AP 1) .....	12
6.1.1 Windkanalversuch 1 (AP 1.2).....	12
6.1.2 Windkanalversuch 2 (AP 1.3).....	17
6.2 Basiskonzept für Sensoren Bauteile, Signalführung (AP 2) .....	20
6.3 PETW/KKK Vortests mit Mini-Mikrofon-Array (AP 3).....	22
6.4 ETW Mikrofonarray (AP 4) .....	28
6.5 Einbindung in ETW Testsysteme (AP 5) .....	30
6.6 Messungen im ETW (AP 6 - 7).....	32
6.6.1 Implementierung ETW-Array (AP 6).....	32
6.6.2 Vortest im ETW mit dem kleinen Array (AP 7.0).....	34
6.6.3 Abschlusstest im ETW (AP 7.1 - 7.3) .....	36
6.6.4 Zusatz: Zweiter Anwendungstest (AP 7.4).....	41
<b>7. Zusammenfassung und voraussichtlicher Nutzen .....</b>	<b>42</b>
<b>8. Fortschritte bei anderen Stellen .....</b>	<b>43</b>
<b>9. Veröffentlichungen .....</b>	<b>44</b>

---

# I Kurzdarstellung

## 1. Aufgabenstellung

Ziel dieses Antrages 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 einem Mikrofon-Array in der geschlossenen Messstrecke des ETW vermessen werden.

Aufbauend auf die am DLR bereits vorhandene Expertise im Bereich der Mikrofonarray Messtechnik soll in einem ersten Schritt in Zusammenarbeit mit dem ETW diese Messtechnik für die Anwendung unter kryogenen und druckbeaufschlagten Bedingungen weiterentwickelt werden. Parallel dazu soll die physikalische Machbarkeit der akustischen Ablöselokalisation in einem Windkanalversuch unter Normalbedingungen untersucht werden. Abschließend soll das Verfahren in einem Windkanalversuch im ETW unter kryogenen und druckbeaufschlagten Bedingungen demonstriert werden.

Der ETW in Köln<sup>1</sup> weist zur Simulation der Strömungsbedingungen realer Transportflugzeuge eine Messstrecke mit einem Querschnitt von  $2,4 \times 2 \text{ m}^2$  in Verbindung mit einem leistungsstarken Antrieb von 50 MW auf (Abbildung 1). Als Strömungsmedium wird kaltes Stickstoffgas mit Temperaturen bis herab zu  $-170 \text{ °C}$  verwendet, welches zudem auf einen Druck von bis zu 4,5 bar gebracht wird. Die Messstrecke wird von einer Druckhülle aus Edelstahl mit einem Durchmesser von max. 10 m (Plenum) umschlossen. Zur Erhaltung der niedrigen Temperaturen wird kontinuierlich flüssiger Stickstoff (LN2) in den Windkanalkreis eingespritzt und die inneren Kanalwände sind mit Isolationsmaterial ausgekleidet. Der hohe Verbrauch von elektrischer Energie und flüssigem Stickstoff führt zu sehr hohen Betriebskosten, die ein höchst effizientes Vorgehen bei den Abläufen einer Windkanalmessung erfordern.

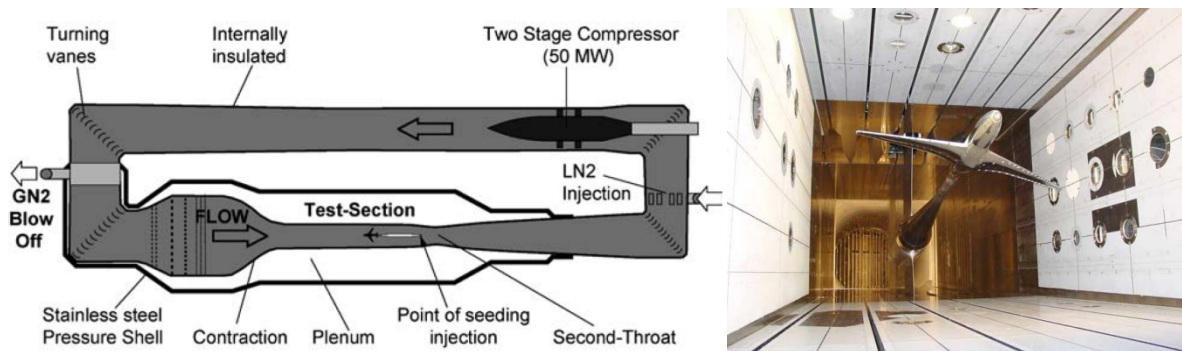


Abbildung 1: Prinzipbild des ETW und Foto mit Blick in die Messstrecke mit einem installierten Vollmodell (Referenzmodell).

Die besonderen Randbedingungen im ETW machen den Einsatz der akustischen Messtechnik besonders schwierig und erfordern entsprechenden Entwicklungsaufwand. Dies gilt im besonderen Maße für die Nutzung dieser Messtechnik für eine akustische Ablöselokalisation.

Hierfür müssen zum einen grundlegende Erkenntnisse zur physikalischen Machbarkeit der akustischen Ablöselokalisation gewonnen werden. Fragestellungen zum Einfluss der besonderen Umgebung (erhöhter Druck, niedrige Temperaturen) auf die Interpretation von Messer-

<sup>1</sup> J. Quest, "ETW - High quality test performance in cryogenic environment," AIAA-2000-2260, 21st Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, (2000).

---

gebnissen sind hierbei ebenso zu klären wie der Einfluss von Designparametern des Mikrofonarrays auf das Messergebnis.

Zum anderen ist die Adaption der akustischen Messtechnik auf die Messstrecke des ETW zu lösen. Das hierbei zu verwendende räumlich hochauflösende Mikrofonarray muss ausgelegt und implementiert werden. Hierzu bedarf es der Klärung der komplexen technischen Fragestellungen hinsichtlich der kryogenen Bedingungen, des erhöhten Betriebsdruck und auch der daraus resultierenden schwierigen Zugänglichkeit der Messstrecke. Weiterhin soll die DLR Messdatenerfassungsanlage in die Windkanal- und Versuchssteuerung des ETW modular eingebunden werden und automatisierte Auswertemethoden integriert werden.

Als Nebennutzen soll das so implementierte Mikrofon-Array auch Daten zur Lokalisation aeroakustischer Schallquellen bei Flug Reynoldszahlen am Modell liefern.

## 2. Voraussetzungen des Vorhabens

### Mach- und Reynoldszahlähnlichkeit in Windkanälen

Ein wichtiges Feld bei der Weiterentwicklung von modernen Verkehrsflugzeugen mit dem Ziel der Steigerung von Effizienz und Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Emissionen ist die Optimierung der Aerodynamik einer Flugzeugkonfiguration. Noch immer besteht in der aerodynamischen Auslegung ein hohes Verbesserungspotential, wie beispielsweise eine Reduzierung des Luftwiderstandes durch Maßnahmen zur Laminarhaltung der Tragflügelumströmung oder der Erhöhung des maximalen Auftriebes beim Landeanflug durch die Optimierung von Hochauftriebssystemen wie Vorflügel und Klappen. Da die zu Grunde liegende Strömungsphysik, wie z.B. beim laminar / turbulenten Umschlag in der Grenzschicht oder dem Auftreten von Strömungsablösungen, nach wie vor nicht vollständig verstanden ist, bedürfen solche Entwicklungen Untersuchungen und Validierungen an Flugzeugmodellen in Windkanälen. Damit Messdaten an einem verkleinerten Flugzeugmodell auf die Großausführung übertragen werden können, sind neben der geometrischen Ähnlichkeit des Modells weitere Strömungs-Kennzahlen einzuhalten. Die wichtigsten Kennzahlen für Transportflugzeuge sind hierbei die Mach-Zahl, die die Kompressibilität der Strömung beschreibt, und die Reynolds-Zahl, die das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften einer Strömung beschreibt. Die Einhaltung beider Kennzahlen für alle Flugphasen eines Verkehrsflugzeuges ist derzeit nur in transsonischen druckbeaufschlagten kryogenen Windkanälen möglich. Neben dem NTF (National Transonic Facility) bei der NASA in Langley<sup>2,3</sup> leistet dies weltweit nur der ETW (European Transonic Windtunnel) in Köln<sup>4</sup>. Beide Windkanäle basieren auf dem gleichen Arbeitsprinzip, d.h. die Verwendung eines kryogenen Strömungsmediums ( $T \geq 100$  K) und zusätzlich erhöhtem Gasdruck ( $p \leq 450$  kPa im ETW).

### Messtechnik

Neben den klassischen Messmethoden zur Strömungsuntersuchung an Flugzeugmodellen in Windkanälen, wie z.B. Messsonden, nimmt die Bedeutung von modernen Messmethoden zunehmend zu, da diese nicht-intrusiv, d.h. berührungslos arbeiten und damit die Strömung beispielsweise durch das Einbringen von Messsonden nicht beeinflussen.

Die Mikrofonarraymesstechnik wird bereits in „warmen“ Windkanälen in industriellen Messvorhaben zur Erfassung der Schallquellen als Standardmesstechnik eingesetzt, beispielsweise um im Designprozess die Wirkung unterschiedlicher Vorflügelkonfigurationen auf die Schallabstrahlung zu untersuchen. Mit dem erfolgreichen Abschluss dieses Vorhabens werden solche Untersuchungen in einem Windkanal bei realen Mach- und Reynoldszahlen von Flugzeugkonfigurationen weltweit erstmals im ETW möglich, womit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Großausführung direkt gegeben ist.

---

<sup>2</sup> W.B. Igoe, „Characteristics and status of the U.S. National Transonic Facility,“ *AGARD Lecture Series No. 111* „Cryogenic Wind Tunnels“, AGARD-LS-111, 1980.

<sup>3</sup> G.M. Gatlin, W.G. Tomek, F.M. Payne, R.C. Griffiths, „Recent improvements in semi-span testing at the National Transonic Facility,“ AIAA 2006-508, *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2006.

<sup>4</sup> J. Quest, „ETW - High quality test performance in cryogenic environment,“ AIAA-2000-2260, *21st Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2000.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

#### Planung

Das Projekt „ALSA - Akustische Lokalisierung von Strömungsablösung im ETW“ wurde für eine Laufzeit von 36 Monaten mit Start in 01/2010 geplant. Die Gliederung des Projektes lässt sich in zwei Phasen unterteilen.

#### *Phase 1:*

In der ersten Phase wird die technische Spezifikation des Messverfahrens im Detail erarbeitet und validiert. Einerseits wird ein Basiskonzept für ein Mikrofon-Array zum Einsatz unter den Betriebsbedingungen des ETW entwickelt. Einzelne Komponenten der einzusetzenden Sensorik werden in einer Kryo-Kammer sowie als Mini-Mikrofon-Array im kleinen Pilot-ETW oder im Kryo-Windkanal KKK der DNW qualifiziert.

Andererseits werden parallel hierzu in einem Windkanal der TU Berlin Druckschwankungen auf der Profilerfläche und die akustischen Signatur einer Strömungsablösung im Fernfeld zeitsynchron vermessen. Hierzu werden in einer ersten kleinen Messkampagne Testmessungen vorgenommen. Auf deren Basis kann dann mit einem optimierten Messaufbau anhand des Vergleichs von Nah- und Fernfelddaten eine Optimierung der Auswertalgorithmen vorgenommen werden und die Empfindlichkeit bestimmt werden, mit der lokale Strömungsablösungen im akustischen Fernfeld erfasst werden kann. Die Spezifikation wird dann anhand von PETW Tests mit dem Mini-Mikrofon-Array validiert. Die erste Phase verteilt sich auf die Hauptarbeitspakete 1,2 und 3:

- AP 1: Nah-/Fernfeldvergleich zur Optimierung der Auswertemethodik
- AP 2: Basiskonzept für Sensoren, Bauteile, Signalführung
- AP 3: PETW/KKK Vortests mit Mini-Mikrofon-Array

#### *Phase 2:*

In der zweiten Phase wird das Konzept auf den ETW übertragen, realisiert und überprüft. Im ersten Schritt wird ein räumlich hochauflösendes Mikrofon-Array ausgelegt. Diese Arbeit, wie auch die Planung der modularen Einbindung der DLR Messdatenerfassungsanlage in die Windkanal- und Versuchssteuerung des ETW und die Automatisierung der Auswertemethoden, werden aus Zeitgründen in Teilen parallel zur Phase 1 durchgeführt werden.

Die Leistungsfähigkeit des so aufgesetzten Verfahrens wird anschließend demonstrativ an einem Halbmodell bei Flug-Re-Zahlen getestet. Die erhaltenen Daten werden hinsichtlich Ablöselokalisierung und Schallabstrahlung ausgewertet, analysiert und dokumentiert. Die zweite Phase verteilt sich auf die Hauptarbeitspakete 4 bis 8:

- AP 4: Detailkonzept für ETW Mikrofon-Anordnung
- AP 5: Einbindung in ETW-Testsysteme
- AP 6: Implementierung ETW Mikrofon-Array
- AP 7: Demonstrationstest
- AP 8: Auswertung, Dokumentation und Bewertung



## Ablauf

Das Vorhaben wurde weitestgehend planmäßig bearbeitet, wobei die Laufzeit (2010 - 2012) um ein Jahr kostenneutral verlängert wurde, da die Einplanung des Demonstrationsversuches in Abstimmung mit anderen Messvorhaben seitens des ETW erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich war.

Aufgrund neuer Erkenntnisse welche im Rahmen Vorhabens gewonnen wurden, ergaben sich Erweiterungen und Änderungen. Diese werden im Folgenden beschrieben. Abschließend wird der das Vorhaben beschließende Demonstrationstest vorgestellt.

## *Vorhabenserweiterungen*

Durch eine Aufstockung haben sich weitere Arbeitspakete ergeben, welche einen zweiten Windkanaltest zur Verbesserung der Zielerreichung des Arbeitspaketes 1 zum Inhalt hatten. Dieser beinhaltete die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung von PIV-Messungen (neu: AP1a.1-1a.4). Aufgrund der oben geschilderten Ergebnisse des ersten Windkanalversuchs (AP 1.2/1.3) wurde später statt der PIV-Technik ein Mikrofonrechen im Nahfeld in diesem zweiten Windkanalversuch eingesetzt.

Im Rahmen von Messungen des Lufo-Projektes „HINVA“ an einem Halbmodell ergab sich die kurzfristige Möglichkeit einen im Projektplan nicht vorgesehenen Vortest (neu: AP 7.0) im ETW mit einem kleinen Array durchzuführen. Hierdurch konnte das Signalleitungskonzept und die vorgesehene Sensorik noch einmal direkt im ETW überprüft werden. Für das kleine Array wurden 14 Mikrofonpositionen der später zu verwendenden 96 Positionen verwendet.

Aufgrund der erfolgreichen Messungen im Demonstrationstest wurde ein weiterer Test im Rahmen des Lufo Projektes HINVA durchgeführt (neu: AP 7.4). Unter anderem wurde in diesem Projekt der Einfluss von einer modifizierten inneren Vorflügelklappe und von Wirbelgeneratoren auf der Triebwerks gondel auf den Hochauftrieb untersucht. Die im Rahmen des Projektes ALSA weiter entwickelte Mikrofonarraymesstechnik wurde hier parallel zu anderen Messtechniken des DLR und des ETW (*CryoPIV – Particle Image Velocimetry*, *CryoTSP – Temperature Sensitive Paint* und *SPT – Stereo Pattern-Tracking*) eingesetzt.

## *Änderung der Zielsetzung*

Im Verlauf des Vorhabens wurde aufgrund von gewonnenen Ergebnissen die Zielsetzung des Gesamtvorhabens angepasst. Die Messungen im GroWiKa zur Ablösedetektion (AP 1.2/1.3) zeigten, dass ein Zusammenhang zwischen den Nahfeldfluktuationen und den mit einem Mikrofonarray gemessenen Fernfeldschall besteht. Jedoch ergab sich eine unerwartet lange Messzeit, welche für die Ermittlung des Nah- und Fernfeldzusammenhanges notwendig ist. Dies schloss ohne weitere Untersuchungen jedoch eine industrielle Anwendung dieser Messtechnik zur Ablösedetektion vorerst aus. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde das zweite Experiment zur Ablösedetektion (AP 1.4a) modifiziert. Statt der PIV Messung im Strömungsnahfeld wurde das Nahfeld der Druckschwankungen mit einem Mikrofonrechen vermessen<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> T. Ahlefeldt, F. Sopranzetti, C. Spehr, A. Henning, „Investigation of laminar detachment by means of simultaneous microphone and surface hot wire measurements,“ AIAA 2013-2109. *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 27. - 29. May 2013, Berlin, Germany, 2013

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 1.4a bestätigten die der Arbeitspakete AP1.2/1.3, dass eine industrielle Anwendung der Messtechnik zur Ablösedetektion vorerst nicht möglich ist. Anzumerken ist, dass die verwendete Messtechnik zwar zur wissenschaftlichen Untersuchung der Ablösedetektion geeignet ist und Ergebnisse von hohem wissenschaftlichem Wert gewonnen wurden, jedoch nicht für die industrielle Anwendung. Grund hierfür ist eine (für die industrielle Anwendung unwirtschaftlich) hohe Messdauer, welche sich aus dem grundlegenden physikalischen Zusammenhang zwischen Nah- und Fernfeld ergibt. Somit kann eine industrielle Anwendung der Messtechnik zur Ablösedetektion nach dem aktuellen Stand der Forschung ausgeschlossen werden.

Das Ziel *Entwicklung eines nicht-intrusiven, kanalgebundenen Messverfahrens zur akustischen Ablöselokalisation* als Alternative zu bisherigen Standardmesstechniken wurde dann entsprechend angepasst. Die weitere Arbeit konzentriert sich damit auf die *Anwendungsentwicklung der Messtechnik für die Schallquellenlokalisierung*. Die Änderung der Zielsetzung erforderte nur eine geringfügige Aktualisierung des ursprünglichen mit der Antragstellung eingereichten Verwertungsplanes.

#### *Durchführung des Demonstrationstest*

Auf Grundlage des erfolgreichen Vortests im P-ETW<sup>6</sup> wurden der Demonstrationstests im ETW im zweiten Halbjahr 2013 durchgeführt. Für diesen Test wurde im Rahmen des Projektes ein Mikrofonarray mit 96 Mikrofonen entwickelt und konstruiert. Mit diesem Mikrofonarray wurden erstmalig akustische Messungen im ETW unter kryogenen Bedingungen und bei subsonischen Machzahlen durchgeführt.

In dem Demonstrationstest wurden Messungen an einem 1:13,6 skalierten Airbus K3DY Flugzeug-Halbmodell für verschiedene Reynoldszahlen bis zu denen des Originalmaßstabes durchgeführt. Hierbei wurden der Anstellwinkel und die Machzahl variiert. In allen Fällen wurden erfolgreich akustische Quellen auf dem Modell lokalisiert. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Reynoldszahl für verschiedene aeroakustische Quellen auf dem Flugzeugmodell. Unserer Kenntnis nach wurden bei diesen Messungen weltweit erstmalig aeroakustische Daten eines skalierten Modells bei Reynoldszahlen des Originalmaßstabes erfasst.<sup>7</sup>

Zusammen mit dem zusätzlichen Test (AP 7.4, siehe *Vorhabenserweiterungen* auf der vorhergehenden Seite) konnte somit die Anwendbarkeit der Mikrofonarraymesstechnik an zwei typischen Messfällen im ETW demonstriert werden.

---

<sup>6</sup> T. Ahlefeldt und J. Quest, „High-Reynolds Number Aeroacoustic Testing Under Pressurised Cryogenic Conditions in PETW,“ AIAA-2012-0107, *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012.

<sup>7</sup> T. Ahlefeldt und J. Quest, „Real-Flight Microphone-Array Measurements on a scaled Model in ETW,“ AIAA 2014-1483, *52nd Aerospace Sciences Meeting (AIAA SciTech 2014)*, 13. - 17. Jan. 2014, National Harbor, Maryland, USA, 2014

## 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

### Ablösedetektion

Die meisten heute verfügbaren Messtechniken zur Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösung sind unter den ETW Bedingungen nicht effizient einsetzbar. Hier sind die Grenzschichten aufgrund der hohen Re-Zahlen sehr dünn mit etwa 1-2 mm, und der Modellzugang ist aufwändiger als in konventionellen Windkanälen, da bei Tiefsttemperaturen in Stickstoffumgebung getestet wird. Die bisher im ETW eingesetzte Fädchentechnik ist intrusiv und räumlich gering auflösend.

Die weit verbreitete Methode der Infrarot-Thermographie lässt sich in kryogener Umgebung (bei Temperaturen unter 220 Kelvin) nicht mehr einsetzen und ist somit im Betrieb des ETW nicht anwendbar. Eine weitere Methode zur Detektion der Strömungsablösung ist die TSP-Methode. Hier wird mittels der Beobachtung einer temperaturempfindlichen Farbe der laminar-turbulente Umschlag beobachtet werden. Bei der TSP-Methode ist zwar eine Messung von Strömungsablösung im kryogenen Bereich möglich, erfordert aber auch einen aufwendigen Farbauftrag auf das Modell.<sup>8,9</sup>

Das neue Messverfahren ist innovativ, indem es die Nachteile des Stands der Technik vermeidet: Es ist nicht-intrusiv, räumlich hochauflösend, kann als Einmalinvestition fest im Windkanal installiert werden und erfordert keine zusätzliche Ausrüstung oder Bearbeitung der Modelle. Es ist bei Bedarf kurzfristig einsetzbar. Als Nebennutzen kann das Mikrofon-Array auch Daten zur Lokalisation aeroakustischer Schallquellen am Modell liefern.

### Mikrofon-Array Messtechnik

Die Verwendung der Mikrofon-Array Messtechnik in geschlossener Messtrecke ist übliche Praxis<sup>10</sup> zur Vorhersage insbesondere von Strömungslärm. Messungen dieser Art in Windkanälen, welche durch eine Erhöhung des Umgebungsdruckes und/oder durch eine Herabsenkung der Umgebungstemperatur eine Erhöhung der Reynoldszahl erreichen, sind Gegenstand der Forschung. Erste Messungen in bedruckter Messtrecke durch Hayes<sup>11</sup> zeigten einen deutlichen Einfluss der Reynoldszahl auf die Messergebnisse. Da bezüglich des momentanen Standes der Technik Flugreynoldszahlen nur unter Kombination von kryogener und bedruckter Umgebung möglich ist, sind Untersuchungen in dieser Umgebung notwendig. Erste Untersuchungen fanden hier durch Stoker<sup>12</sup> statt, welcher Messungen mit der Mikrofonarraymesstechnik in bedruckter Umgebung bei Temperaturen bis zu 236 Kelvin erfolgreich durchführte.

---

<sup>8</sup> P. Ligrani, "Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics (chap. Measurements of Surface Heat Transfer Characteristics Using Infrared Imaging)," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2007.

<sup>9</sup> U. Fey, Y. Egami, „Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, chap. Transition Detection by Temperature-Sensitive Paint,“ *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2007.

<sup>10</sup> L. Koop, P. Sijtsma, S. Oerlemans, "Noise Source Localization in Closed Test Sections with Microphone Arrays," *1st CEAS European Air and Space Conference*, 2007.

<sup>11</sup> J.A. Hayes, W.C. Horne, S.M. Jaeger, P.T. Soderman, "Measurement of Reynolds number effect on airframe noise in the 12-foot pressure wind tunnel," *5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*, 1999.

<sup>12</sup> R.W. Stoker, R. Gutierrez, J.V. Larssen, J.R. Underbrink, G.M. Gatlin, C. Spells, "High Reynolds Number Aeroacoustic Testing in NASAs National Transonic Facility (NTF)," *46th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 2008.

---

## **5. Zusammenarbeit**

Während des Vorhabens wurde mit Airbus-D bei der Durchführung des Demonstrationstests zusammengearbeitet. Von Airbus wurde das Windkanalmodell zur Verfügung gestellt.

---

## **II Eingehende Darstellung**

## 6. Erzielte Ergebnisse

Die ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ist in den folgenden Kapiteln untergliedert in Anlehnung an die festgelegten Arbeitspakete des Vorhabens (siehe Kapitel 3).

### 6.1 Untersuchungen zur Ablöselokalisation (AP 1)

#### 6.1.1 Windkanalversuch 1 (AP 1.2)

##### Bezug zur Zielsetzung

Durch ein vergleichendes Experiment im Berliner GroWiKa soll durch parallele Messungen von Druckschwankungsverteilungen auf einer Profil-Oberfläche einerseits und von akustische Fernfeldanalysen mit Hilfe eines DLR-Mikrofon-Arrays andererseits der Nachweis der physikalischen Machbarkeit des Messverfahrens sichergestellt werden.

##### Aufbau

Bei der Modellrecherche erwies sich ein 2D-Wölbklappenmodell als vorteilhaft. Für dieses ist bereits eine umfangreiche Datenbasis (Druckverteilungen, Beiwerte, Anstrichbilder) vorhanden. Auf dem Hauptkörper ist für verschiedene Anstellwinkel eine laminare Ablösung und auf der stufenlos verstellbaren Hinterkantenklappe eine turbulente Ablösung zu erwarten. Zudem ist die Hinterkantenklappe übergangslos montiert, was den störenden Einfluss der auf Klappenhalterungen basierenden akustischen Quellen verringert.



Abbildung 2: Querschnitt des 2D Wölbklappen-Profils für GroWiKa Messungen

Die aus vergangenen Versuchen der TU-Berlin vorliegenden und zur Verfügung gestellten Versuchsdaten konnten genutzt werden, um geeignete Betriebspunkte auszuwählen und die Sensoren an für die Untersuchungen optimalen Positionen zu platzieren.

Die Messungen am Großwindkanal in Berlin (GroWiKa) wurden im März 2011 durchgeführt. Für die Messungen im Unterauftrag von der TU Berlin das in Abbildung 3 zu sehende 2D-Wölbklappenmodell hergestellt. Zu sehen ist auch die auf der Unterseite geöffnete Abdeckung zum Zugriff auf die umfangreiche Instrumentierung.

Das Sensorenkonzept für das Profil basiert hauptsächlich auf der Verwendung von Oberflächenheizdrähten, um eine hohe Ortsauflösung zu erhalten. Im Folgenden ist die gesamte Instrumentierung aufgelistet:

- 96 Oberflächenheizdrähte auf dem Hauptelement und der Hinterkantenklappe (Messung der instationären Wandschubspannungen)
- 12 konventionelle Drucksensoren (Kulites) als Referenz zu den Oberflächenheizdrähten (Messung des instationären Drucks)
- Druckbohrungen (Messung des Oberflächendrucks)
- Mikrofonarray mit 144 Mikrofonen druckseitig unter dem Profil positioniert (Messung der instationären Druckschwankungen)

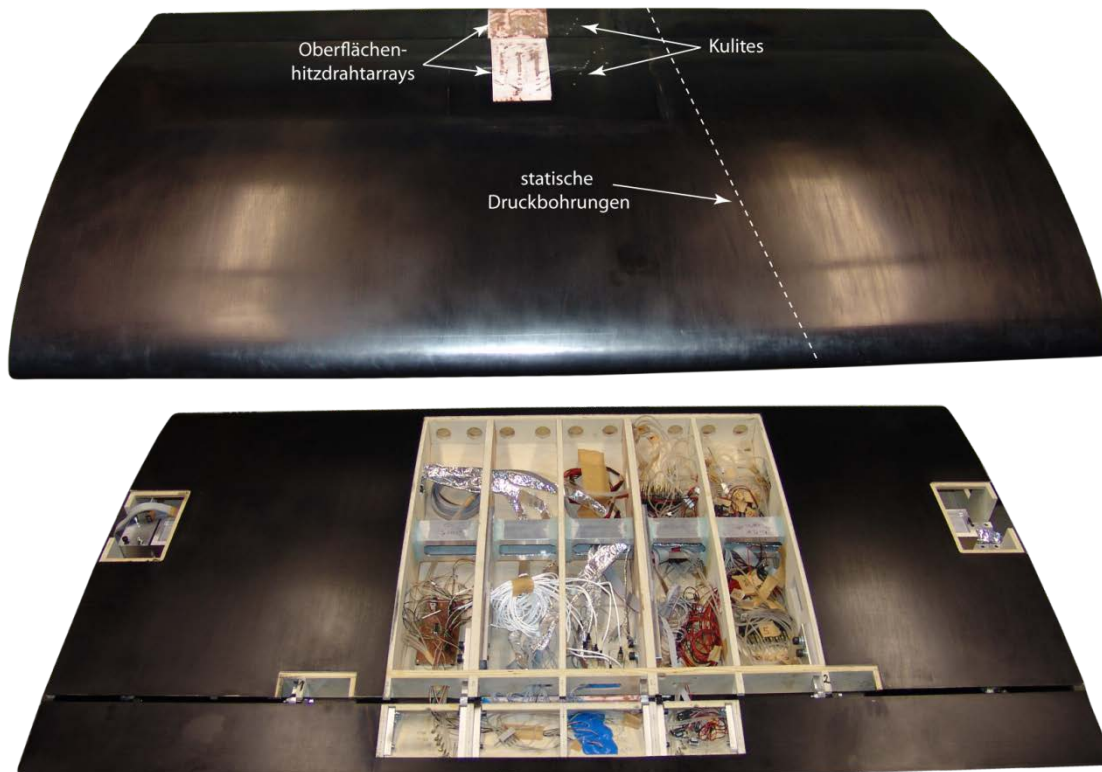


Abbildung 3: Von der TU-Berlin im Unterauftrag erstelltes 2D-Modell

Die Sensorik auf dem Profil dient der Erfassung der Nahfeldinformationen und das Mikrofonarray der Erfassung der Fernfeldinformationen. Abbildung 4 zeigt Fotos des in der Messstrecke eingebauten Wölbklappenprofils mit dem Mikrofonarray.



Abbildung 4: Fotos des Messaufbaus. Das 2D-Profil ist in der Mitte des Kanals mit der Saugseite nach unten ausgerichtet und das Mikrofonarray befindet sich auf dem Boden. Links: Blick in Strömungsrichtung, Rechts: Blick aus Strömungsrichtung, mit der kupferfarbenen Fläche ist die Lage der OHDs auf dem Profil und der Klappe zu sehen.

### Messablauf

Es sollen folgende Konfigurationen untersucht werden:

- Laminare Ablösung
- Turbulente Ablösung
- Ablösung mit fixierter Transition
- Laminare Ablöseblase mit nachfolgender turbulenter Strömung

Die Messungen am Halbmodell fanden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Berlin am GroWiKa statt. Zuerst wurden Konfigurationen identifiziert, welche kontrolliert laminare und turbulente Ablösezustände beinhalten. Dann wurden diese Konfigurationen unter Variation verschiedener Datenerfassungs-konfigurationen (Hochpassfilter, Abtastfrequenz, Messdauer) vermessen. Hierbei wurden die Nah- und die Fernfeldinformationen phasenrichtig erfasst.

### Ergebnisse

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die akustischen Quellkarten für einen ausgewählten Fall mit laminarer Ablöseblase und einem ausgewählten Fall mit turbulenter Klappenablösung. Nähere Untersuchungen zeigten, dass in beiden Fällen auf den Quellkarten im betrachteten Frequenzbereich nur Windkanallärm zu sehen ist, welcher nicht dem Profil zuzuordnen ist. Zudem unterscheiden sich die Quellkarten für beide Fälle nur bei 100 Hz voneinander. Bei 100 Hz ist für den Fall der turbulenten Ablösung ein um 6 dB erhöhter Pegel zu sehen.

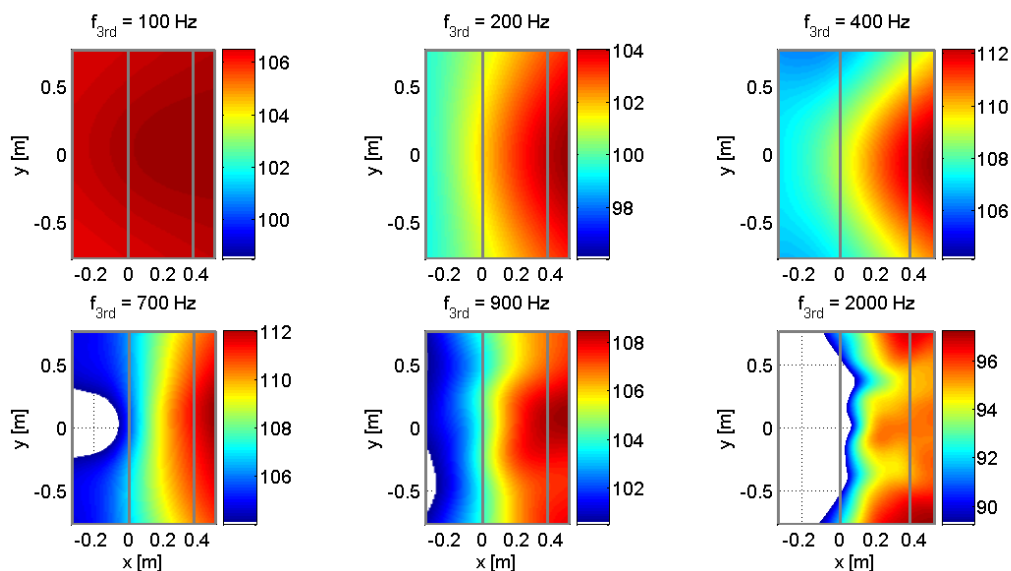


Abbildung 5: Akustische Quellkarten auf der Saugseite des Modells für den Fall der laminaren Ablösung



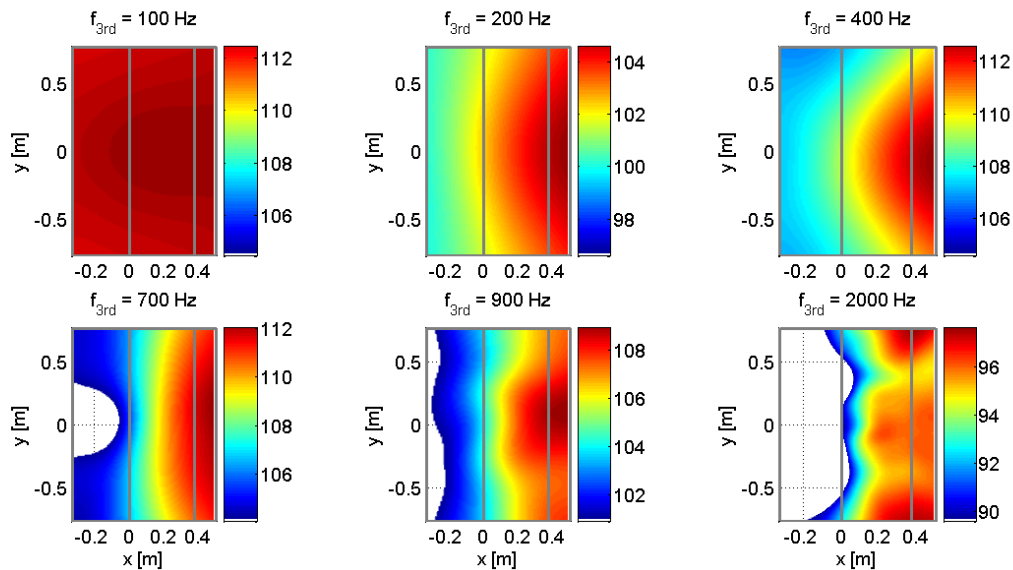


Abbildung 6: Akustische Quellkarten auf der Saugseite des Modells für den Fall der turbulenten Ablösung

Dies zeigt sich auch bei Betrachtung der zugehörigen integrierten Spektren in Abbildung 7. Eine eindeutige Zuordnung zum Quellmechanismus ist aufgrund der naturgemäß sehr geringen räumlichen Auflösung bei tiefen Frequenzen hier nicht möglich und zeigt sich nur durch den Vergleich.

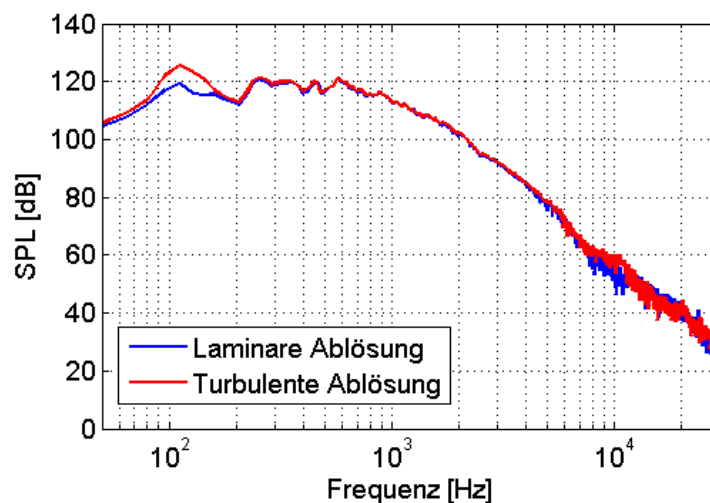


Abbildung 7: Integrierte Spektren der Mikrofonarraymessungen.

Zur näheren Untersuchung wurden auch vereinzelt Messungen mit einer Messdauer von 60 Minuten durchgeführt. Diese zeigten bei der Auswertung einen Zusammenhang zwischen Fernfeld und Nahfeld, welcher aber abhängig von Strömungszustand erst nach einer Messzeit von 15 Minuten erkennbar ist. Abbildung 8 zeigt diesen Zusammenhang in Form der Kohärenz zwischen einem Mikrofon im Fernfeld und ausgewählten OHDs.

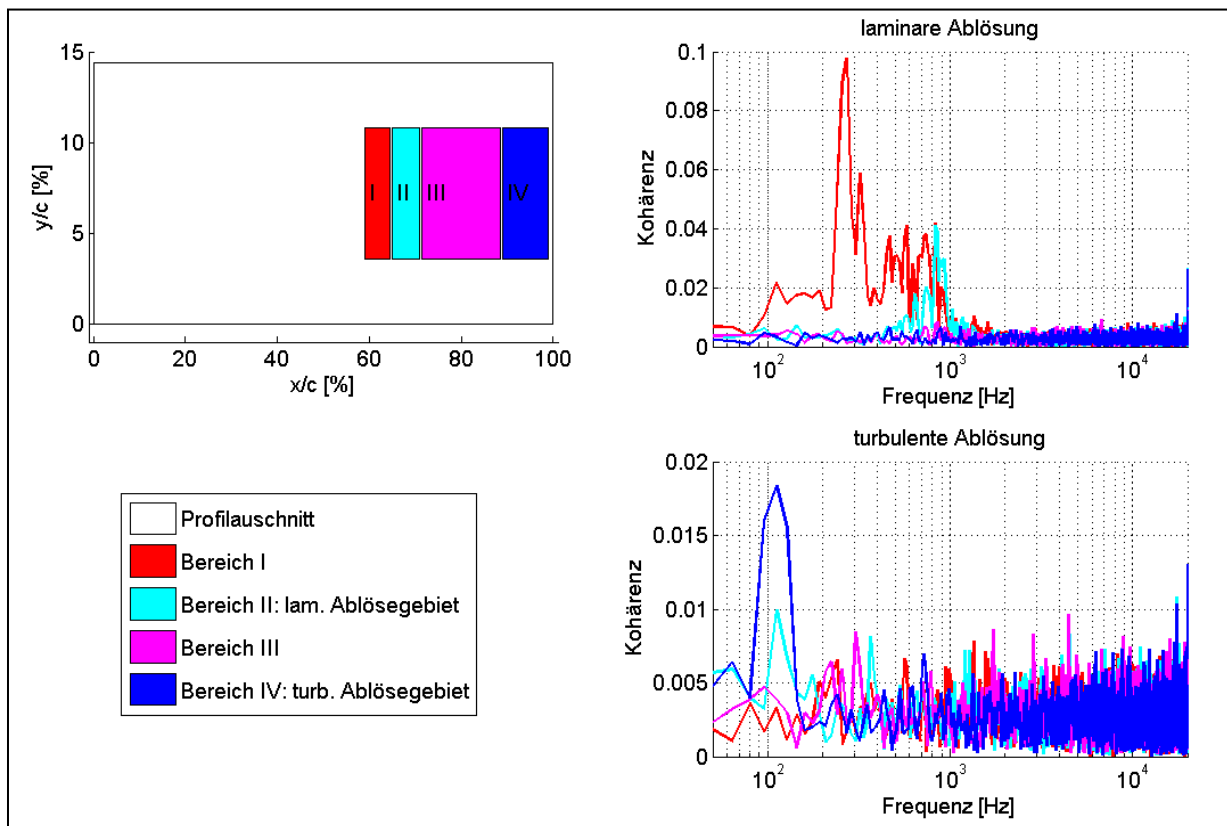


Abbildung 8: Kohärenz von einem Mikrofonsignal im Fernfeld zu Signalen von Oberflächenhitzdrahtsensoren im Nahfeld für verschiedene Bereiche auf dem Profil. Rechts oben: Fall der laminaren Ablösung, Rechts unten: Fall der turbulenten Ablösung

Für den Fall der laminaren Ablösung ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem akustischen Signal und dem Bereich vor dem Ablösegebiet (rot) und dem Bereich der Ablösung selbst (Cyan) zu erkennen. Dieser Zusammenhang zeigt sich in verschiedenen Frequenzbereichen. Die anderen Regionen auf dem Profil zeigen keinen Zusammenhang mit dem akustischen Signal. Für die turbulente Ablösung ist ein signifikanter Zusammenhang im Bereich von 112 Hz im Bereich des Ablösegebietes zu sehen. Damit ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Messdaten im jeweilig ablöserrelevanten Gebiet und den akustischen Fernfelddaten herstellbar.

### Fazit

Prinzipiell zeigt sich, dass eine akustische Lokalisierung der Ablösung im akustischen Fernfeld nicht direkt beobachtbar ist. Die Entwicklung weitergehender Auswertetechniken, welche die Ablösung indirekt beobachtbar macht, setzt einen signifikanten Zusammenhang zwischen Nah- und Fernfeld voraus. Dieser zeigte sich in unseren Messungen nur bei sehr langen Messzeiten (> 15 min). Diese Messzeiten sind für die Anwendung in industriellen Windkanälen wirtschaftlich nicht tragbar. Diese Langzeitmessungen zeigen jedoch neue und sehr interessante wissenschaftlichen Ergebnisse und werfen neue Fragestellungen auf.

## 6.1.2 Windkanalversuch 2 (AP 1.3)

### Bezug zur Zielsetzung

Die Messungen im Windkanalversuch 1 zur Ablösedetektion haben gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen den Nahfeldfluktuationen und den mit einem Mikrofonarray gemessenen Fernfeldschall besteht. Die erzielten Ergebnisse sind somit wissenschaftlich von hohem Interesse und sollen in einem zweiten Windkanalexperiment weiter untersucht werden, zumal eine weitergehende Untersuchung langfristig Antworten für eine industrielle Anwendbarkeit der Messtechnik zur Ablösedetektion geben kann.

Das zweite Experiment zur Ablösedetektion wurde mit den Erkenntnissen aus der ersten Messung etwas modifiziert (siehe Kapitel 3). Zusätzlich soll das Nahfeld der Druckschwankungen mit einem Mikrofonrechen vermessen werden. Die lange Messzeit, welche für die Ermittlung des Nah- und Fernfeldzusammenhanges notwendig ist und sich aus dem Windkanalversuch 1 ergeben hat, schließt ohne weitere Untersuchungen jedoch eine industrielle Anwendung dieser Messtechnik zur Ablösedetektion vorerst aus.

### Aufbau

Im Rahmen der vereinbarten Aufstockung wurden die Ablöseuntersuchungen am Wölbklappenmodell HQ-41 im Berliner Großwindkanal (GroWiKa) mit zusätzlicher Instrumentierung durchgeführt (AP1.4/1.4a). Zusätzlich zur bisherigen Sensorik wurde ein stufenlos traversierbarer Mikrofonrechen mit 8 Kondensatormikrofonen mit Nasenkoni zur Untersuchung des Nahbereiches verwendet. Somit konnte die Charakteristik der Ablösung nun in drei Bereichen untersucht werden: 1) im akustischen Nahfeld der Ablösung (Mikrofonrechen), 2) im akustischen Fernfeld der Ablösung (Mikrofonarray) und 3) auf dem Profil im Bereich der Ablösung (Oberflächenhitzdrähte). Abbildung 9 zeigt Skizzen und ein Foto des Messaufbaus.

Das 2D-Profil ist in der Mitte des Kanals mit der Saugseite nach unten ausgerichtet und das Mikrofonarray befindet auf dem Boden. Auf den Zeichnungen zu sehen ist das Fernfeld-Mikrofonarray (1) und die Schaumstoffschicht (2) auf den Modellträgern (3) welche das Modell (4) halten. Das Nahfeld-Mikrofonarray (5) ist stromab vom Modell positioniert. Das Foto des Messaufbaus zeigt das Fernfeld-Mikrofonarray (1) auf dem Teststreckenboden, das Nahfeld-Mikrofonarray (5) im Vordergrund und das Wölbklappenmodell mit den Oberflächenhitzdrähten (6).

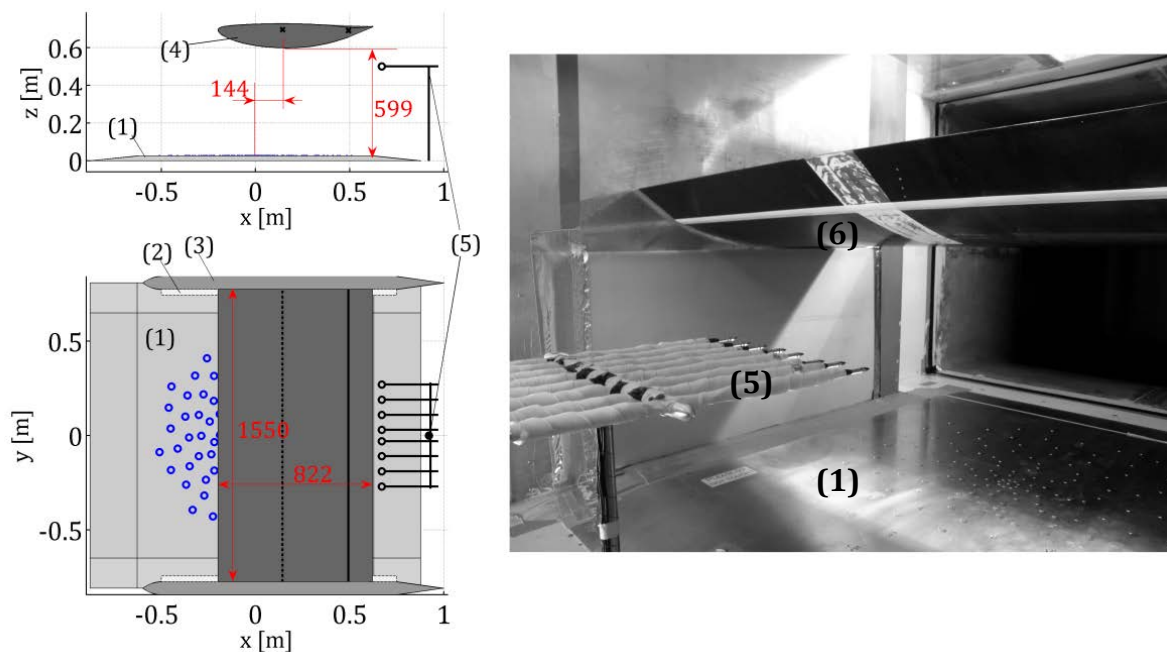


Abbildung 9: Links: Zeichnung des Messaufbaus von der Seitenansicht und der Draufsicht. Zu sehen ist das Fernfeld-Mikrofonarray (1) und die Schaumstoffschicht (2) auf den Modellträgern (3) welche das Modell (4) halten. Das Nahfeld-Mikrofonarray (5) ist stromab vom Modell positioniert. Abstände sind in [mm] angegeben. Rechts: Foto des Messaufbaus mit dem Fernfeld-Mikrofonarray (1) auf dem Teststreckenboden, dem Nahfeld-Mikrofonarray (5) im Vordergrund und das Wölbklappenmodell mit den Oberflächenheizdrähten (6).

## Ergebnisse

Die bedeutendsten Ergebnisse zeigten sich bei Anwendung eines Auswertalgorithmus, welcher unter Berücksichtigung der Übertragungspfade zwischen Nah- und Fernfeld die räumlich-zeitliche Entwicklung des Korrelationskoeffizienten betrachtet *Causality correlation*<sup>13,14</sup>. Dies ermöglicht uns hier, den Entstehungsort aeroakustisch relevanter Strukturen im Bereich der Ablösung zu bestimmen.

Abbildung 10 illustriert ein Ergebnis. Im Fall der laminaren Ablösung können kohärente Strukturen mit einer Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit von  $0.35 u_R$  ( $u_R$  - lokale Geschwindigkeit auf dem Profil) beobachtet werden. Unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit kann der Ursprung der quellinduzierten Störung auf eine Flügeltiefe von 50% zurückgeführt werden. Dies entspricht der Charakteristik von sogenannten Tollmien-Schlichting-Wellen<sup>15</sup>. Im Fall der turbulenten Ablösung hingegen können kohärente Strukturen mit einer Gruppenausbreitungsgeschwindigkeit von  $0.59 u_R$  beobachtet werden. Hier kann der Ursprung auf eine Flügeltiefe von 88% (Übergang Klappe-Hauptprofil, Ort der Ablösung) zurückgeführt werden.

<sup>13</sup> R. Rackl, T. Siddon, Causality correlation analysis of flow noise with fluid dilatation as source fluctuation, Journal of the Acoustical Society of America 65 (5) (1979), 1147-1155.

<sup>14</sup> A. Henning, L. Koop, K. Ehrenfried, Causality correlation in aeroacoustic experiments by means of simultaneous PIV and microphone-array measurements, 3rd Berlin Beamforming Conference, 2010, pp. 1-13.

<sup>15</sup> Schlichting, H., Grenzschicht-Theorie, Verlag G. Braun, 1965

## Fazit

Diese zeitsynchronen Messungen der Nahfeldfluktuationen auf dem Profil, dem mit einem Rechen gemessenen Nahfeldschall und den mit einem Mikrofonarray gemessenen Fernfeldschall sind bisher weltweit einzigartig und beinhalten neue wissenschaftliche Erkenntnisse.

Die bei diesen Messungen gewonnenen neuen Erkenntnisse zum Zusammenhang aerakustischer Quellen mit Grenzschichtphänomenen wurden der internationalen Fachwelt präsentiert (Veröffentlichungen siehe Kapitel 9).

Die Messtechnikentwicklung eines nicht-intrusiven, kanalgebundenen Messverfahrens zur akustischen Ablöselokalisation als Alternative zu bisherigen Standardmesstechniken wird auf Grund der langen notwendigen Messzeiten vorerst nicht für industrienähe Windkanäle einsetzbar sein. Trotzdem wurden bei diesen Messungen wichtige neue Erkenntnisse zum Zusammenhang aerakustischer Quellen mit Grenzschichtphänomenen gewonnen.

Der Meilenstein M1 ist demnach erreicht aber nur für einen eingeschränkten Anwendungsbereich (siehe auch Kapitel 3). Die Aussichten für die Erreichung der übrigen Ziele haben sich nicht geändert.

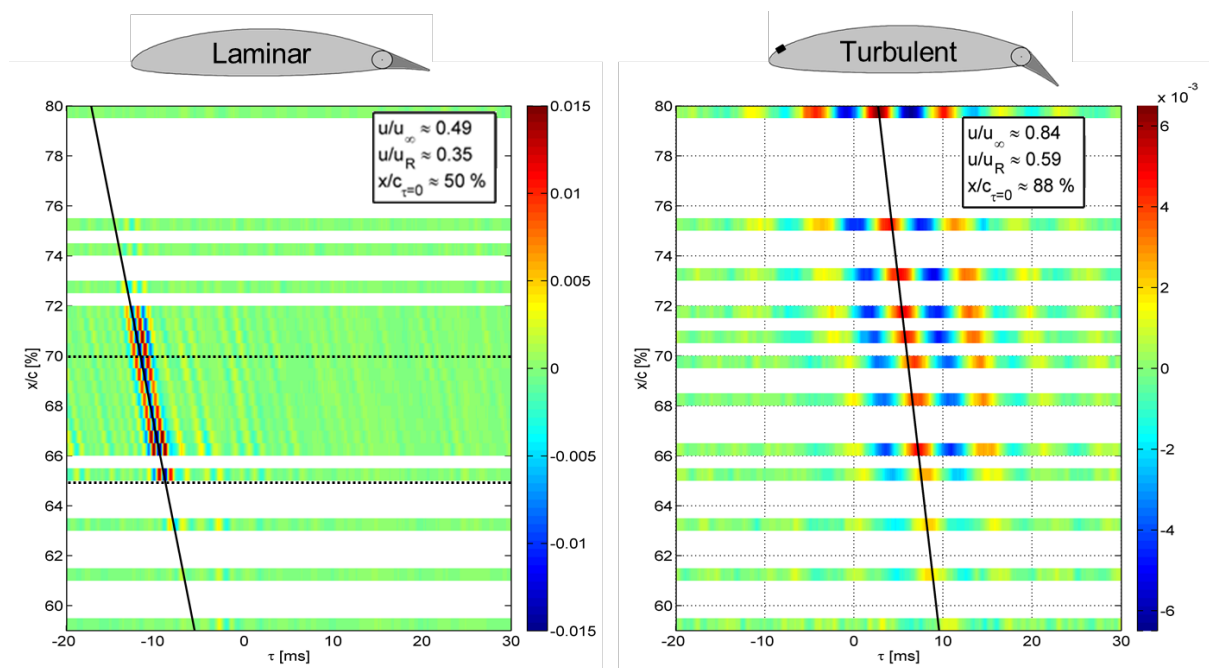


Abbildung 10: Räumlich-zeitliche Entwicklung des Korrelationskoeffizienten zwischen den Oberflächenheizdrahtsensoren und dem durch das Fernfeld-Mikrofonarray fokussiertem Schalldruckpegel. Links: Die Ergebnisse für die laminare Ablösung. Rechts: Die Ergebnisse für die turbulente Ablösung.

## 6.2 Basiskonzept für Sensoren Bauteile, Signalführung (AP 2)

### Bezug zur Zielsetzung

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 wurden die für die späteren Mikrofon-Arrays benötigten Sensoren sowie das zugehörige Equipment (Kabel, elektronische Bauteile) ausgewählt und Tests sowohl in kryogener als auch bedruckter Umgebung unterzogen. Zudem wurde in Zusammenarbeit mit der ETW ein Konzept zur Signalführung erarbeitet, wobei die besonderen Umstände der Versuchsanlage wie die schwere Zugänglichkeit der Messstrecke Berücksichtigung fanden.

### Durchgeführte Tätigkeiten

Für die geplanten Untersuchungen wurden Sensoren ausgewählt und beschafft, sowie erste Tests dieser Sensoren sowie zugehöriger Bauteile in kryogener Umgebung durchgeführt.

Der ausgewählte Sensor wurde in Zusammenarbeit der Firma Brüel&Kjær mit dem ETW und DLR im Vorfeld des Projektes als Prototyp entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein vorpolarisiertes Kondensatormikrofon (Abbildung 11), dessen Vorverstärkerelektronik für die Verwendung in kryogener Umgebung angepasst wurde. Für die in den Arbeitspaketen 3 und 7 geplanten Messungen wurden insgesamt 100 dieser Sensoren beschafft.



Abbildung 11: Foto eines Kondensatormikrofons für die Anwendung in kryogener Umgebung. Am rechten Ende ist die Mikrofonmembran zu erkennen.

Für veränderte Temperaturen ist das Sensorverhalten vom Hersteller bekannt. Zur Überprüfung wurden mit zwei ausgewählten Sensoren erfolgreiche Funktionstests in einer Kryotestkammer durchgeführt. Ein Foto des Messaufbaus zeigt Abbildung 12. Zusätzlich wurden bei diesen Tests Signalkabel aus unterschiedlichen Materialien und mit unterschiedlicher Abschirmung getestet. Die Temperatur wurde hierbei bei verschiedenen Gradienten im Bereich von 290 K bis 100 K variiert. Hierbei zeigten die Sensoren eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen bei wiederholten Durchläufen.

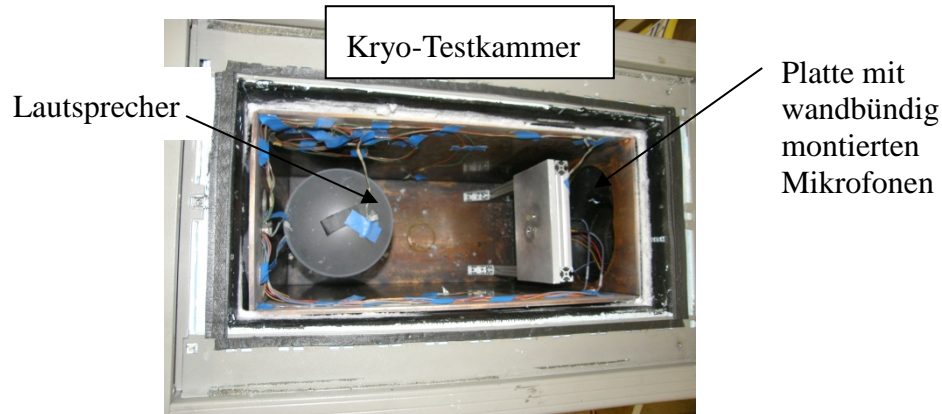


Abbildung 12: Foto des Messaufbaus zu den durchgeführten Funktionstests der Sensoren in kryogener Umgebung.

Die Tests von Sensoren unter erhöhtem Umgebungsdruck wurden am Druckkessel des ETW durchgeführt. Als Sensoren wurden die in AP 2.1 ausgewählten Kondensatormikrofone für die kryogene Anwendung der Firma Brüel&Kjær verwendet. Diese stellte auch das Messsystem PULSE für diese Untersuchungen leihweise zur Verfügung. Abbildung 2 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaus. Zur Untersuchung der Druck- und Temperaturabhängigkeit wurden vier Mikrofone Temperaturen von 300 K bis zu 120 K und Drücken von 1 bar bis 4,5 bar ausgesetzt. Es wurde insbesondere der kombinierte Einfluss beider Größen untersucht.

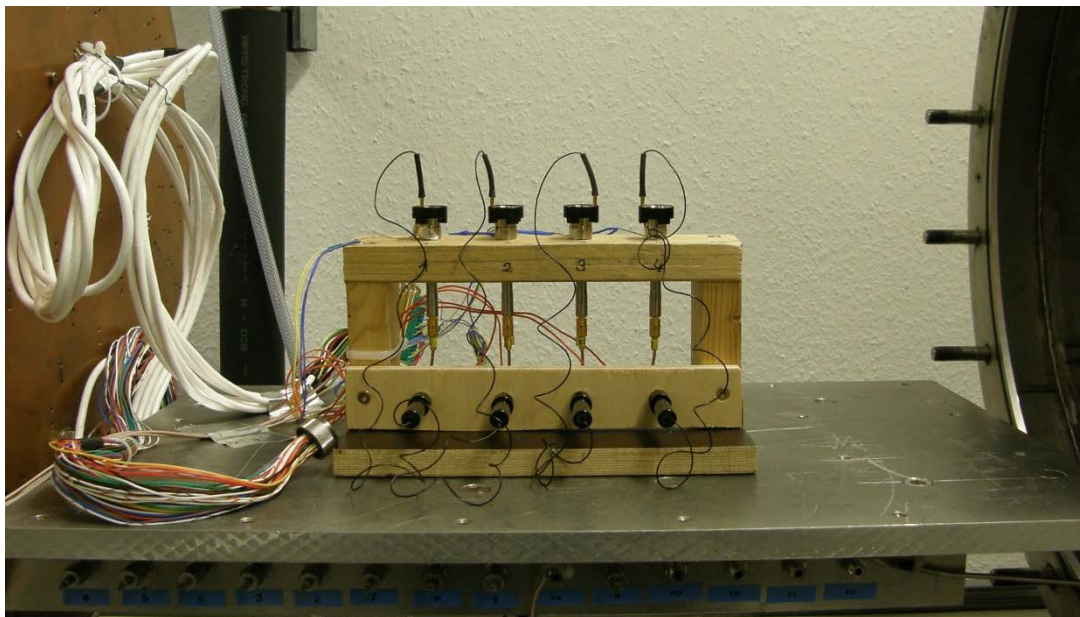


Abbildung 13: Foto des Versuchsaufbaus im geöffneten Druckkessel des ETW. Die vier Mikrofone befinden sich im Holzgestell und sind jeweils mit einem elektrostatischen Aktuator und einem Temperatursensor bestückt.

Die Abweichungen der Ergebnisse der Sensoren zueinander erwiesen sich über die gesamten Messungen als vernachlässigbar. Die Messergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Frequenzganges ab etwa 10 KHz sowohl vom Druck als auch der Temperatur. Abbildung 14 vergleicht beispielhaft die Frequenzgänge für 1,0 bar und 4,5 bar bei verschiedenen Temperaturen.

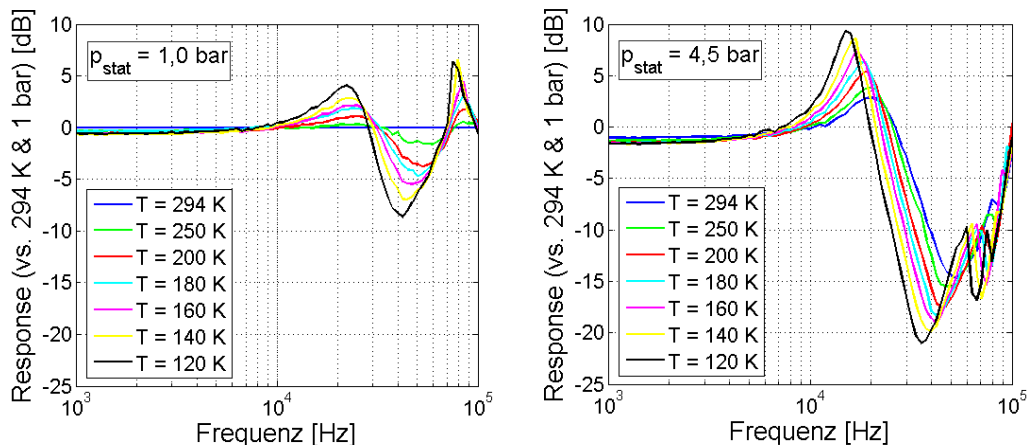


Abbildung 14: Frequenzgang der Kryo-Kondensatormikrofone für  $p_{stat} = 1,0$  bar (links) und  $p_{stat} = 4,5$  bar (rechts) bei verschiedenen Temperaturen. Die Ergebnisse sind normalisiert zu  $p_{stat} = 1,0$  bar und  $T = 294$  K.

Als wesentliche Erkenntnis gegenüber dem vorherigen Wissensstand ist festzuhalten, dass der Einfluss des Druckes auf den Frequenzgang der Sensoren nicht unabhängig von der Temperatur ist. Der Mikrofonhersteller ging davon aus, dass diese Einflüsse unabhängig voneinander sind. Aufgrund der geringen Standardabweichung der Ergebnisse wird die in diesen Messungen ermittelte Temperatur- und Druckabhängigkeit für die folgenden Messungen zur Korrektur des Frequenzganges verwendet werden.

### Fazit

Mit der erfolgreichen Auswahl der Sensorik und der Kalibrierungsmessungen ist das Arbeitspaket 2 mit Beendigung dieser Untersuchungen erfolgreich abgeschlossen.

## 6.3 PETW/KKK Vortests mit Mini-Mikrofon-Array (AP 3)

### Bezug zur Zielsetzung

Auf Grundlage des in Arbeitspaket 2 entwickelten Sensorkonzeptes wurde dann ein Mini-Mikrofon für die Verwendung im PETW entwickelt und konstruiert. Erste Untersuchungen vor dem Einsatz im PETW fanden hierzu im DNW-KKK statt um die Sensoren unter Strömungsbedingungen zu untersuchen. Anschließend wurde die Funktionsweise des Mini-Mikrofon-Arrays in kryogener und bedruckter Umgebung im PETW unter Strömungsbedingungen getestet.

### KKK-Vortests:

Im Rahmen einer projektfremden Messkampagne werden acht der Kryo-Mikrofone einem Test unter Strömungsbedingungen ausgesetzt. Hierfür werden diese in einen eigens hierfür konstruierten Rechen eingebaut und werden unter Verwendung von Nasenkoni der Strömung



im DNW-KKK bei verschiedenen Temperaturen von 290 K bis 100 K ausgesetzt. Als aeroakustische Quelle dient ein über die Kanalhöhe gespannter Draht. Abbildung 15 zeigt verschiedene Ansichten des Rechens.

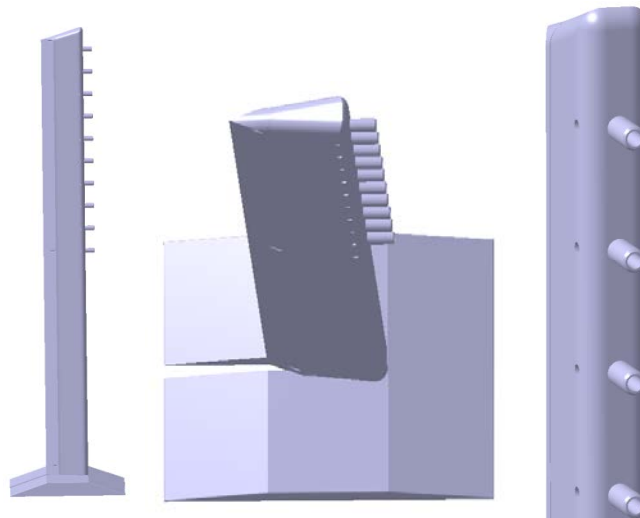


Abbildung 15: Ansichten des Mikrofonrechens für die Sensorentests im DNW-KKK

Im Oktober 2010 wurden Vortests mit den Mikrofonen im DNW-KKK durchgeführt. Hier wurden die Kryo-Kondensatormikrofone in einem Rechen untergebracht, welcher im Rahmen einer projektfremden Messkampagne in der Messtrecke des DNW-KKK montiert wurde. Zur Verminderung des Einflusses von Grenzschicht- beziehungsweise Umströmungsgeräuschen wurden Mikrofone mit Nasenkoni verwendet. Die Messungen fanden bei Temperaturen von 290 K bis 100 K sowie Machzahlen bis zu 0,3 statt. Als Schallquelle diente ein stromauf über die Messtrecke gespannter Draht. Die Messungen wurden zum Vergleich mit zwei verschiedenen Drahtdurchmessern durchgeführt. In der ersten Messdurchführung betrug der Drahtdurchmesser 5 mm und in der zweiten 1,5 mm. Abbildung 16 zeigt ein Foto des an der rechten Kanalwand montierten Mikrofonrechens. Die 12 Mikrofone sind im Rechen montiert und in Strömungsrichtung ausgerichtet.

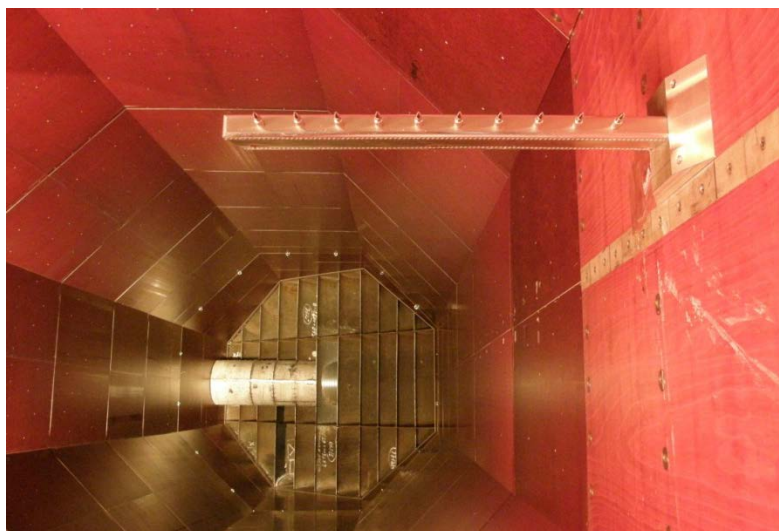


Abbildung 16: Foto des Rechens mit den zehn Kryo-Kondensatormikrofonen im DNW-KKK. Die Blickrichtung ist in Strömungsrichtung. Stromauf befindet sich ein über die Messtrecke gespannter Draht zur Schallerzeugung.

Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Ergebnisse eines Mikrofones bei verschiedenen Temperaturen. In allen Fällen konnte der tonale Anteil (Strouhalton) des umströmten Drahtes im Spektrum eindeutig identifiziert werden. Die Mikrofone zeigten einen störungsfreien Betrieb und keine Abweichungen ihrer Funktionsweise beim Vergleich vor und nach den Untersuchungen unter kryogenen Strömungsbedingungen.

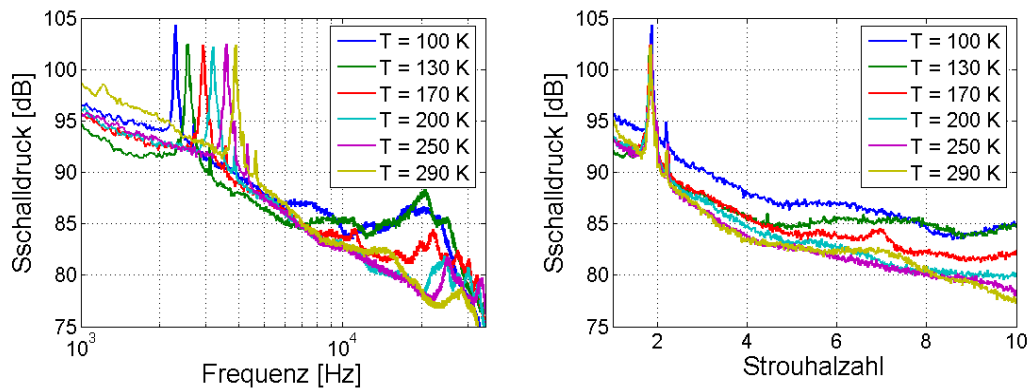


Abbildung 17: Mit einem Kryo-Kondensatormikrofon gemessene Schalldruckspektren des umströmten Zylinders im Fernfeld bei einer Machzahl von 0,3 für verschiedene Temperaturen. Die Ergebnisse sind über der Frequenz (links) und über der Strouhalzahl (rechts) dargestellt.

#### PETW-Vortests:

Für die Messungen am PETW wurde ein Mikrofon-Array entworfen. Hierfür wird als Mikrofonträger ein Blinddeckel aus der Messstrecke des P-ETW mit 12 Kryo-Mikrofonen bestückt und in die Messstrecke eingebaut. Bei den Tests wird auch der Einfluss der Einbauvarianten der Mikrofone untersucht. Somit finden sich auf dem Array zwei Einbauvarianten der Mikrofone (wandbündig und konisch abgesenkt). Abbildung 18 zeigt den Einsatz für das geplante Mini-Array. Im Vorfeld wurde hierfür durch Simulationen eine günstige Mikrofonanordnung ermittelt. Die Sensorpositionen wurden gewählt um im zu erwartenden Frequenzbereich (2 kHz bis 10 kHz) eine gute Quellauflösung zu erreichen.

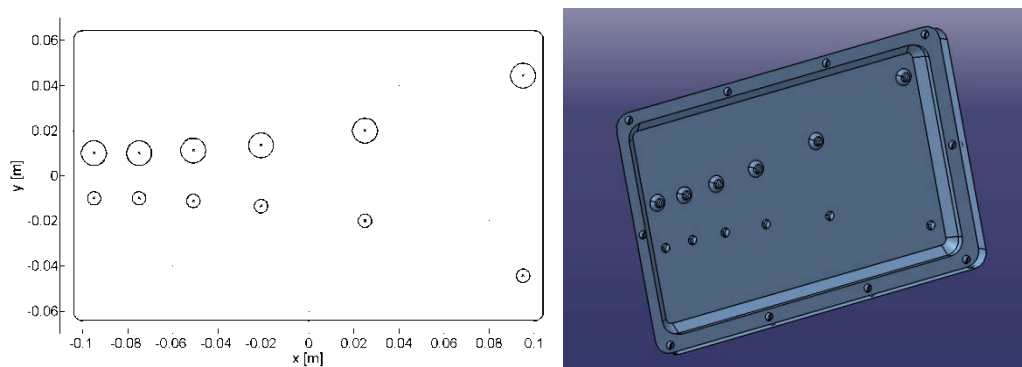


Abbildung 18: Links: Mikrofonanordnung auf dem Blinddeckel des P-ETW. Die unterschiedlichen Kreisdurchmesser kennzeichnen die zwei Einbauvarianten. Rechts: CAD-Zeichnung des Blinddeckels.

Abbildung 19 zeigt die räumliche Spreizfunktion dieser Sensoranordnung auf eine simulierte Monopolquelle bei unterschiedlichen Frequenzen. Zu sehen ist, dass im niedrigen Frequenzbereich mit einer vergleichsweise niedrigen Ortsauflösung zu rechnen ist. Dies ist bedingt durch die sehr beschränkten Einbaubedingungen und die kleine Messstrecke des Testfalls. Im mittleren bis zum hohen Frequenzbereich hin ist die Auflösung gut und sollte im Testfall eine eindeutige Identifizierung der Quelle zulassen.

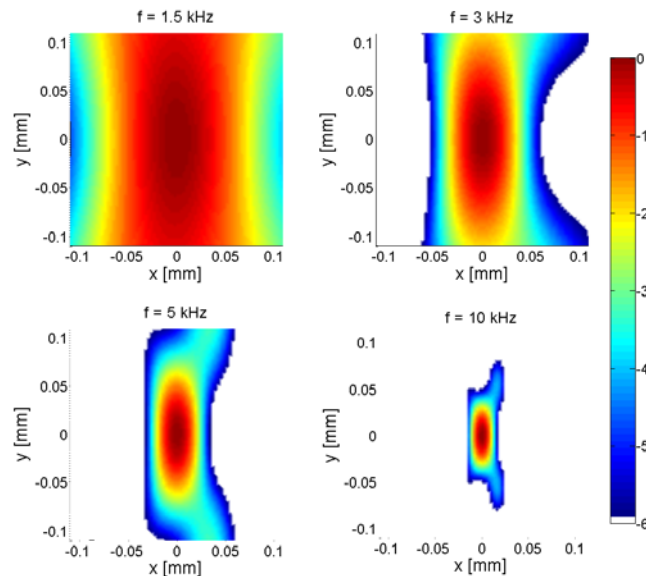


Abbildung 19: Amplitudenantwort des P-ETW Mikrofon-Arrays in der Array-Ebene im Abstand von 0,1354 m (Mitte der Messstrecke).

Im Februar 2010 wurden die Messungen mit dem Mini-Mikrofonarray am Pilot-Kanal des ETW (P-ETW) durchgeführt. Dieser Versuch diente zum einem als Anwendungstest für die ausgewählten Sensoren, das Signalleitungskonzept und die elektronischen Bauteile. Zum anderen konnte eine Quelllokalisierung unter ETW-nahen Bedingungen für  $0,15 < M < 0,3$ ,  $100 < T < 290 \text{ K}$  und  $1 \text{ kPa} < p_{\text{stat}} < 4 \text{ kPa}$  durchgeführt werden.

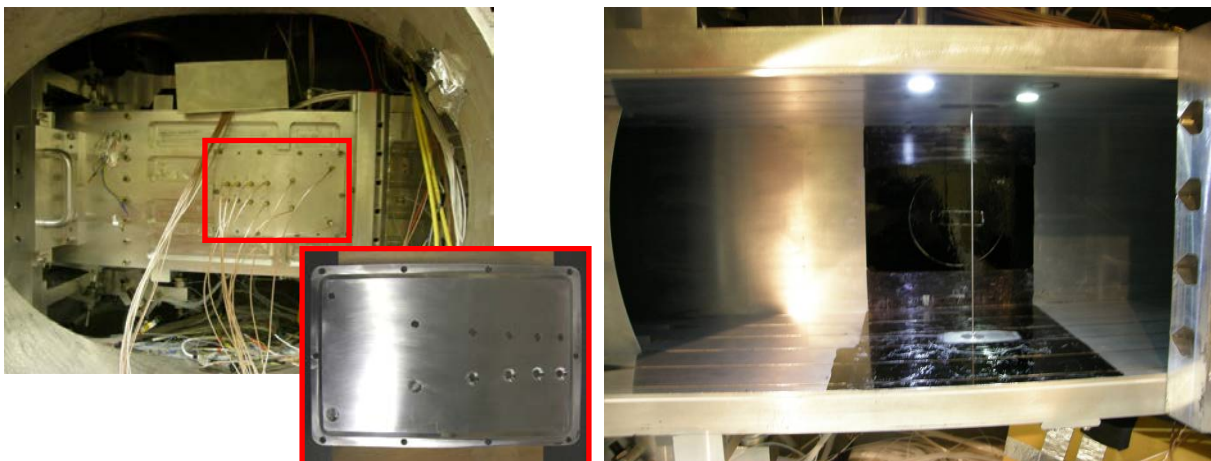


Abbildung 20: Fotos vom Messaufbau. Links: Außenansicht des Kanals. Zu sehen sind die in der Deckelklappe integrierten Mikrofone. Das Detailbild zeigt die Innenansicht der Mikrofone in der Deckelplatte. Rechts: Blick in die Messstrecke mit dem gespannten Zylinder.

Abbildung 20 zeigt Fotos vom Aufbau. In einer Deckelplatte der Seitenwand des Kanals wurden die Mikrofone montiert. Sie befanden sich wandbündig (obere Mikrofonreihe) und hinter einem Konus zurückgesetzt in der Messstrecke. Als Schallquelle diente ein umströmter Zylinder mit einem Durchmesser von 1,9 mm, welcher im Zentrum der Messstrecke gespannt wurde. Die Sensoren und die zugehörige Elektronik zeigten keine Störungen während der Messungen und funktionierten fehlerfrei im betrachteten Temperatur- und Druckbereich.

In Abbildung 21 sind Quellkarten des umströmten Zylinders bei verschiedenen Strouhalzahlen zu sehen. Die oberen Abbildungen zeigen die Ergebnisse für  $p_{\text{stat}} = 199 \text{ kPa}$ ;  $T = 287 \text{ K}$ , die unteren für  $p_{\text{stat}} = 369 \text{ kPa}$ ,  $T = 120 \text{ K}$ . Unter beiden Bedingungen ist die Schallabstrahlung des umströmten Zylinders bei einer Strouhalzahl von 0,18 deutlich detektierbar. Im niedrigeren Strouhalzahlbereich zeigt sich stromaufwärts vom Antrieb und im höheren Strouhalzahlbereich sind hochfrequente Anteile der Zylinder-Schallabstrahlung zu sehen. Zu beachten ist hierbei der unterschiedliche Wertebereich in den dargestellten Ergebnissen. Die Ergebnisse sind plausibel und zeigen, dass trotz der schwierigen Voraussetzungen (kleine Kanalgeometrie, geringe Mikrofonanzahl) eine Schalldetektion bei variablen Druck- und Temperaturbedingungen möglich ist.

Die aus Integration der Quellkarten gewonnenen Spektren über der Strouhal-Zahl zeigt Abbildung 22. Die obere Darstellung zeigt Schalleistungsspektren bei Normaldruck und verschiedenen Temperaturen, die untere Schalleistungsspektren bei Normaltemperatur und verschiedenen Drücken. Deutlich zu sehen ist in beiden Fällen der Strouhal-Peak bei einer Strouhalzahl um 0,18 sowie Obertöne bei höheren Strouhal-Zahlen. Die Druckerhöhung bewirkt im Gegensatz zur Temperaturabsenkung eine zusätzliche breitbandige Anhebung des Spektrums von etwa 12 dB bei Strouhalton. Ein Anteil lässt sich in Übereinstimmung mit der Änderung der akustischen Fernfeldimpedanz ( $\rho c^2$ ) bringen, welche durch die Druckänderung von 100 kPa auf 400 kPa diese Änderung der Schalleistung von 12 dB bewirkt.

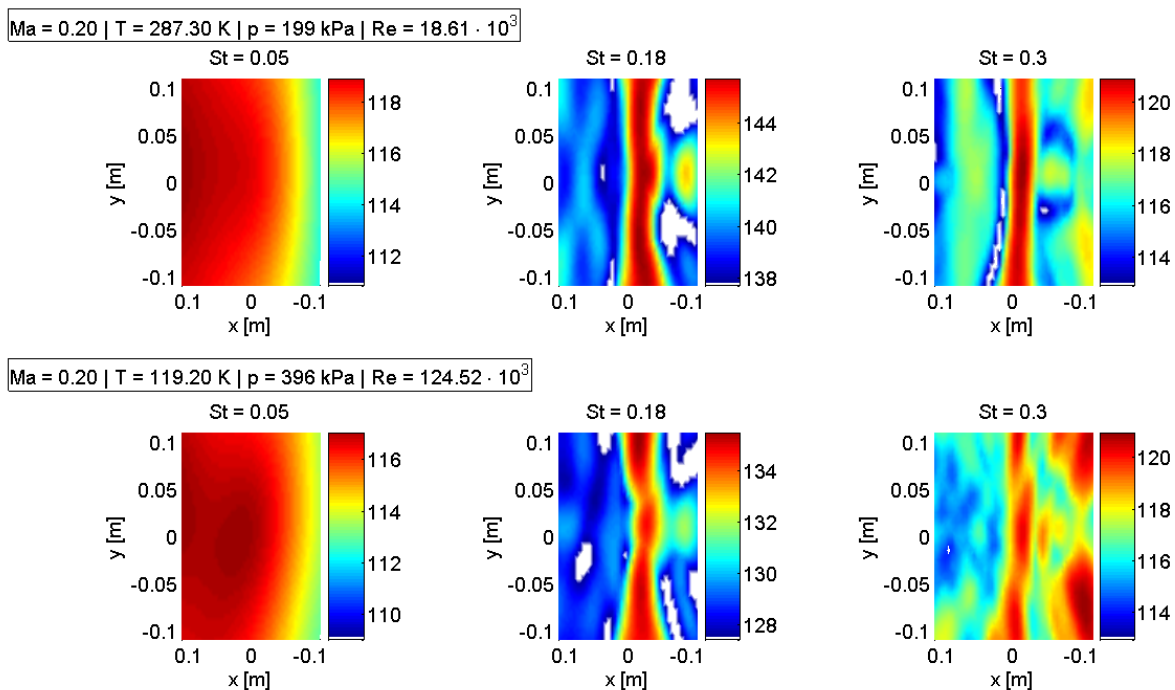


Abbildung 21: Quellkarten des umströmten Zylinders bei verschiedenen Kanal-Umgebungsbedingungen für ausgewählte Strouhalzahlen. Oben:  $p_{\text{stat}} = 199 \text{ kPa}$ ;  $T = 287 \text{ K}$ . Unten:  $p_{\text{stat}} = 369 \text{ kPa}$ ,  $T = 120 \text{ K}$ .

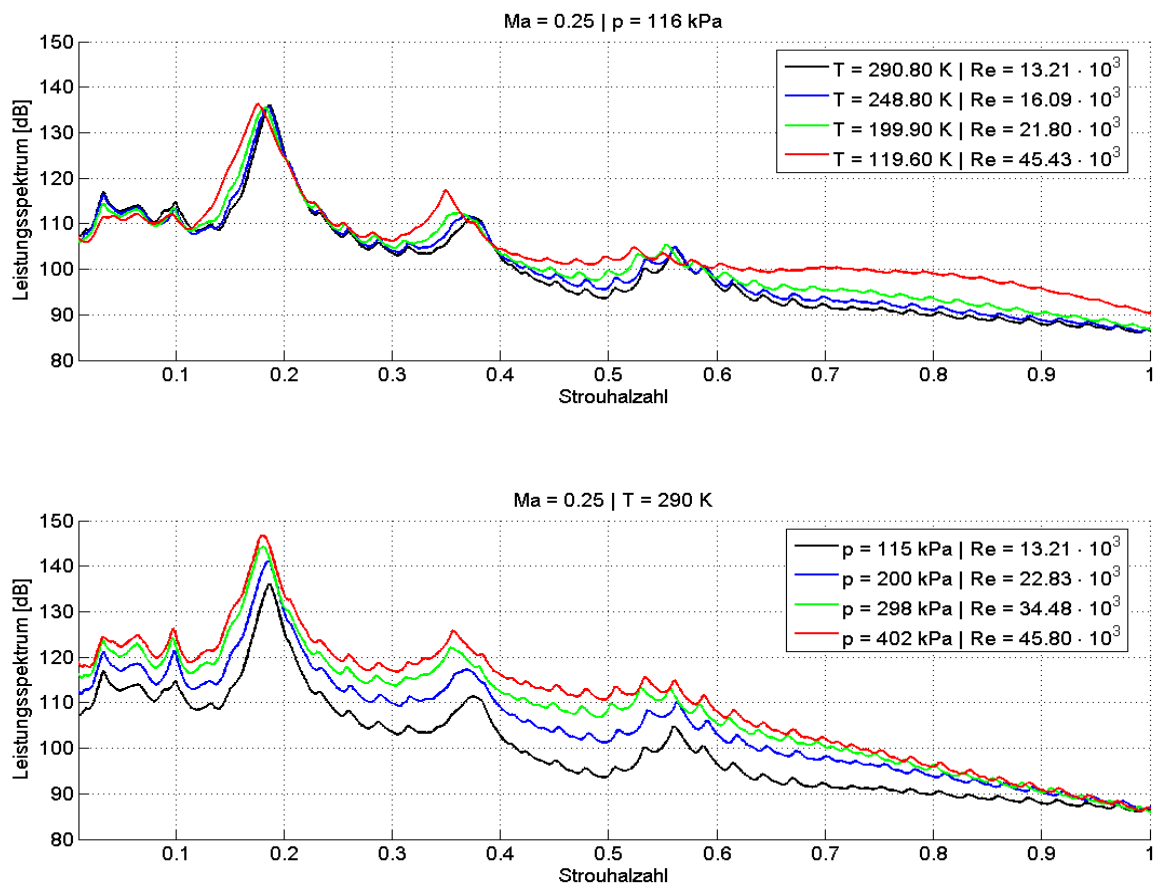


Abbildung 22: Integrierte Spektren der Messungen am P-ETW. Oben: Schalleistungsspektren bei Normaldruck und verschiedenen Temperaturen. Unten: Schalleistungsspektren bei Normaltemperatur und verschiedenen Drücken.

### Fazit:

Mit den Messungen am P-ETW wurde nach unserer Kenntnis weltweit erstmalig eine „Akustische Quelllokalisierung in kryogener und bedruckter Umgebung“ durchgeführt. Die Quelllokalisierung war trotz nicht-idealer Bedingungen erfolgreich und die resultierenden Leistungsspektren entsprachen den physikalischen Erwartungen. Da die Anwendung unter ETW-nahen Bedingungen erfolgreich war ist die geplante industrielle Anwendung der Messtechnik im ETW als sehr viel versprechend einzuschätzen. Der Meilenstein M2 ist mit Abschluss dieses Arbeitspaketes erreicht.

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes AP 3.3 (Messung mit Testarray am PETW) wurden auf einer internationalen Tagung der Fachöffentlichkeit vorgestellt. (Veröffentlichungen siehe Kapitel 9).

## 6.4 ETW Mikrofonarray (AP 4)

### Bezug zur Zielsetzung

In diesem Arbeitspaket wird in Vorbereitung auf das Arbeitspaket 6 ein Detailkonzept für ein Mikrofon-Array zur Anwendung im ETW entwickelt. Ausgehend von den Möglichkeiten zur Verwendung von Mikrofonen in der Kanalwandung wird insbesondere die Mikrofon-Anordnung erarbeitet.

### Ergebnisse

Das Konzept der Mikrofonanordnung für das ETW Mikrofonarray wird durch die zur Verfügung stehenden kreisförmigen Blindfenster und die Paneelen in den seitlichen Messstreckenwänden bestimmt. Die Mikrofone können nach Vorgabe des ETW nur in diesen Bereichen der Blindfenster und der Seitenpaneelen montiert werden.

Aufgrund des sehr eingeschränkten Bereiches wurde eine für verschiedene Frequenzbereiche getrennte Lösung gesucht. Nach der Auslegung des DLR und Modifikationen aufgrund technischer Erfordernisse des ETW ergab sich die in Abbildung 23 gezeigte Anordnung der Mikrofone. In der Gesamtheit umfasst die Anordnung 96 Mikrofone, wovon 66 Mikrofone im zentralen Blindfenster geplant sind. Weitere 30 Mikrofone sind in einem ovalen Außenkreis angeordnet, welche sich über die benachbarten Blindfenster und 2 Paneelen erstreckt.

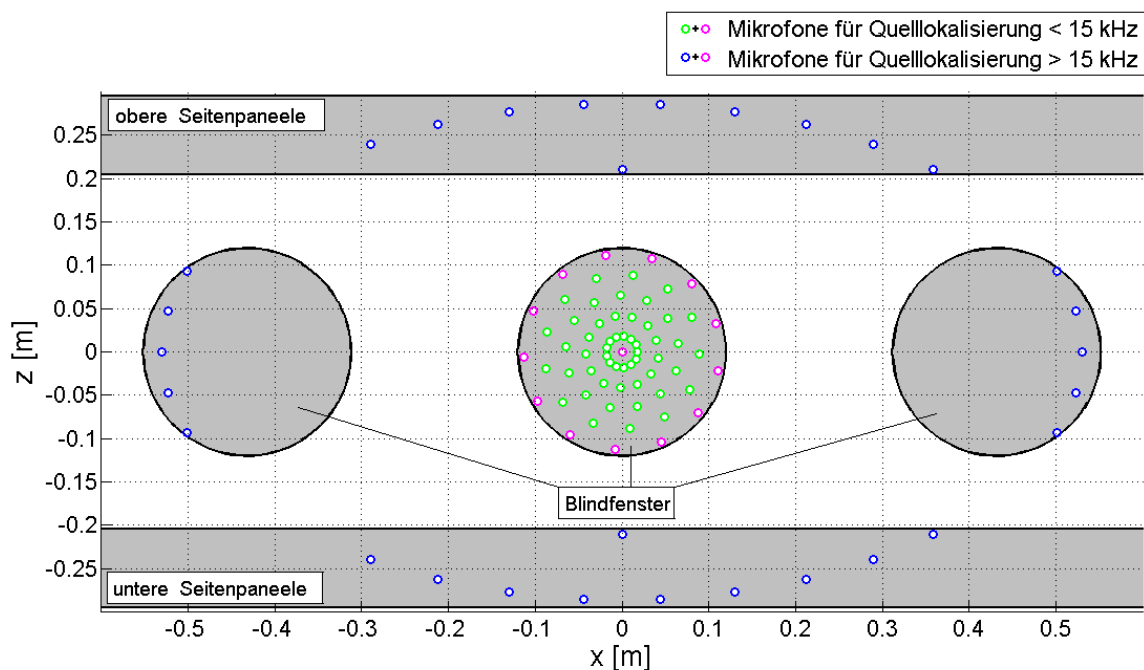


Abbildung 23: Anordnung der Mikrofone für das ETW-Mikrofonarray innerhalb der zur Verfügung stehenden Bereiche. Für verschiedene Frequenzbereiche werden verschiedene Mikrofontypen verwendet.

Für den Frequenzbereich über 15 kHz ( $T = 290$  K) bzw. über 10 kHz ( $T = 100$  K) werden die 66 Mikrofone des zentralen Bullauges verwendet und für den Frequenzbereich unterhalb 15 kHz ( $T = 290$  K) bzw. unterhalb 10 kHz ( $T = 100$  K) werden die Mikrofone des ovalen Außenkreises, des äußeren Kreises der Spiralanordnung im zentralen Blindfenster und das zentrale Mikrofon verwendet. Somit ergeben sich 66 Mikrofone für den hohen und 44 Mikrofone für den tiefen Frequenzbereich.

Abbildung 24 zeigt die räumliche Impulsantwort für den hohen Frequenzbereich unter Verwendung der 66 Mikrofone für diesen Frequenzbereich. Die räumliche Auflösung der Impulsantwort ist gut und der Nebenkeulenabstand sehr gut (größer 10 dB). Abbildung 25 zeigt die räumliche Impulsantwort unter Verwendung der 44 Mikrofone für den tiefen Frequenzbereich. Die Darstellung zeigt eine ausreichende bis gute Auflösung und einen ausreichenden Nebenkeulenabstand (etwa 8 dB).

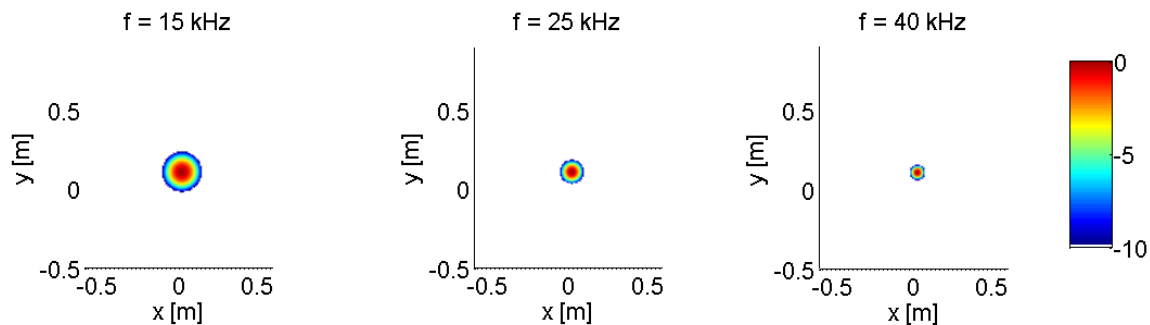


Abbildung 24: Impulsantwort einer Punktquelle bei  $T = 290$  K bei verschiedenen Frequenzen (15 kHz bis 40 kHz) für die hochfrequente Mikrofonanordnung. Die Impulsantwort wird für einen Signal-Rauschabstand von 10 dB gezeigt.

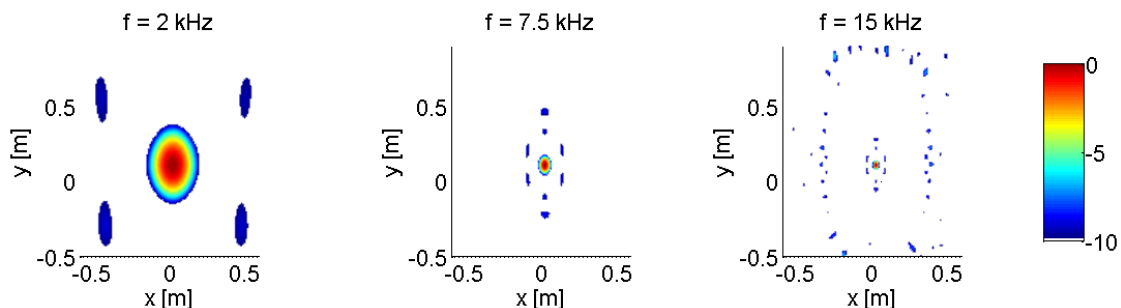


Abbildung 25: Impulsantwort einer Punktquelle bei  $T = 290$  K bei verschiedenen Frequenzen (2 kHz bis 15 kHz) für die tieffrequente Mikrofonanordnung. Die Impulsantwort wird für einen Signal-Rauschabstand von 10 dB gezeigt.

### Fazit:

Die zur Verfügung stehende Fläche für die Positionierung der Mikrofone im Vergleich zu Standard-Windkanälen sehr eingeschränkt. Trotz dieser Einschränkung wurde ein guter Kompromiss erarbeitet, welcher die Anforderungen einer späteren Messung erfüllt. Das hier erarbeitete Konzept wurde auf entsprechende Mikrofoneinsätze für die Kanalwand übertragen und gefertigt (siehe Abschnitt 6.6). Der Meilenstein M3 ist damit erreicht.

## 6.5 Einbindung in ETW Testsysteme (AP 5)

### Bezug zur Zielsetzung

Um die Etablierung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Datenerfassung und Windkanal zu realisieren wird in diesem Arbeitspaket ein Lösungskonzept erarbeitet und umgesetzt. Nach der Definition eines Standards für den Datenaustausch zwischen dem DLR Messsystem und des Windkanals des ETW wird eine entsprechende Schnittstelle programmier-technisch umgesetzt.

### Ergebnisse

Ursprünglich war eine Einzellösung der Schnittstelle DLR-ETW für die akustischen Messungen am ETW vorgesehen. In Zusammenarbeit mit anderen Projekten (LuFo-HINVA, EU-DESIREH) wurde ein Paket erarbeitet, welches umfassend verschiedene Messtechniken der Abteilung AS-EXV des DLR beinhaltet.

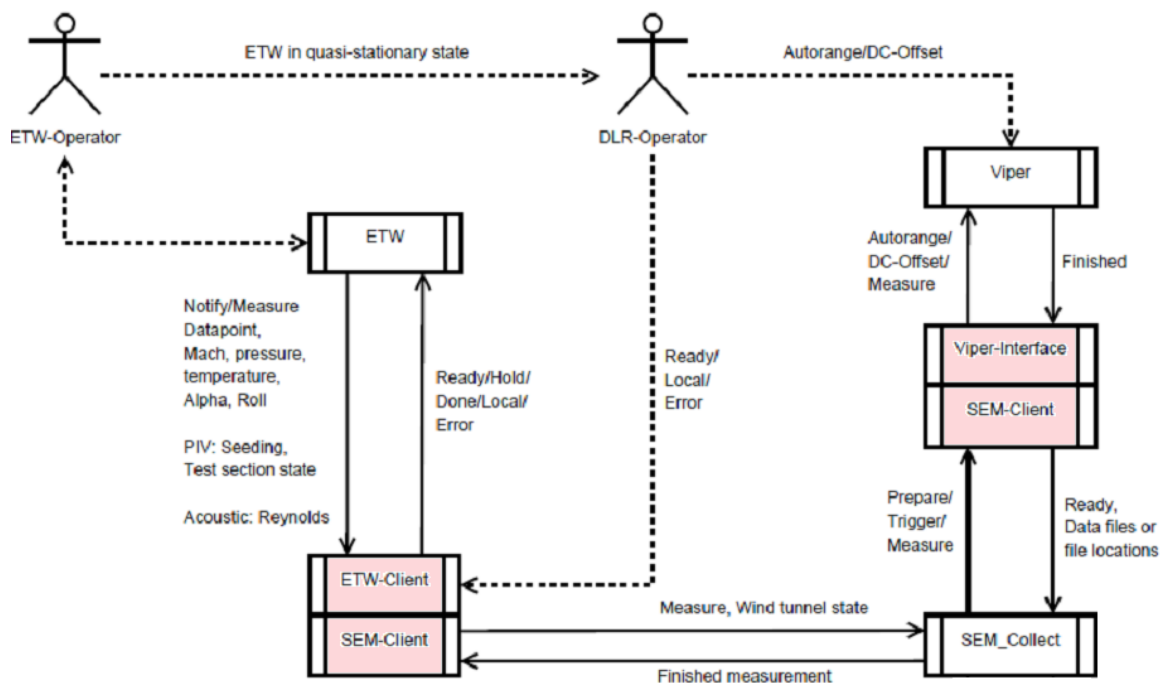


Abbildung 26: Diagramm zum Konzept der Kommunikation zwischen der messtechnischen Hardware des DLR und dem ETW. Farbig markiert sind die für das Projekt zu bearbeitenden Bausteine.

Hierzu wurde zuerst eine Basiskommunikation mit dem DLR-Datenmanagementsystem SEM-Collect und dem ETW geschaffen (siehe Abbildung 26: ETW-Client <-> SEM-Client). Als weiterer Baustein wurde dann die Kommunikation zwischen dem akustischen Messsystem (VIPER) und SEM-Collect fertiggestellt (siehe Abbildung 26: VIPER-Interface <-> SEM-Client). Abschließend wurde die Kommunikation zwischen der Akustik-Hardware (Viper) und SEM\_Collect ist fertiggestellt. Abbildung 27 zeigt die für die akustischen Messungen relevanten Bedienoberflächen.

Durch das gesamte System wird eine Übereinstimmung von Kanalparametern und Messung sichergestellt. Der jeweilige Status der Messstrecke (Betriebszustand Kanal, Strömungskennzahlen, Anstellwinkel usw.) und der des Messsystems (Bereit, hold, Messung beendet, local,



Fehler) werden ständig zwischen SEM-Collect und ETW-Client kommuniziert. Die DLR-Operator und ETW-Operator haben zu allen Zeitpunkten die Möglichkeit in diese automatisierte Messung einzugreifen.

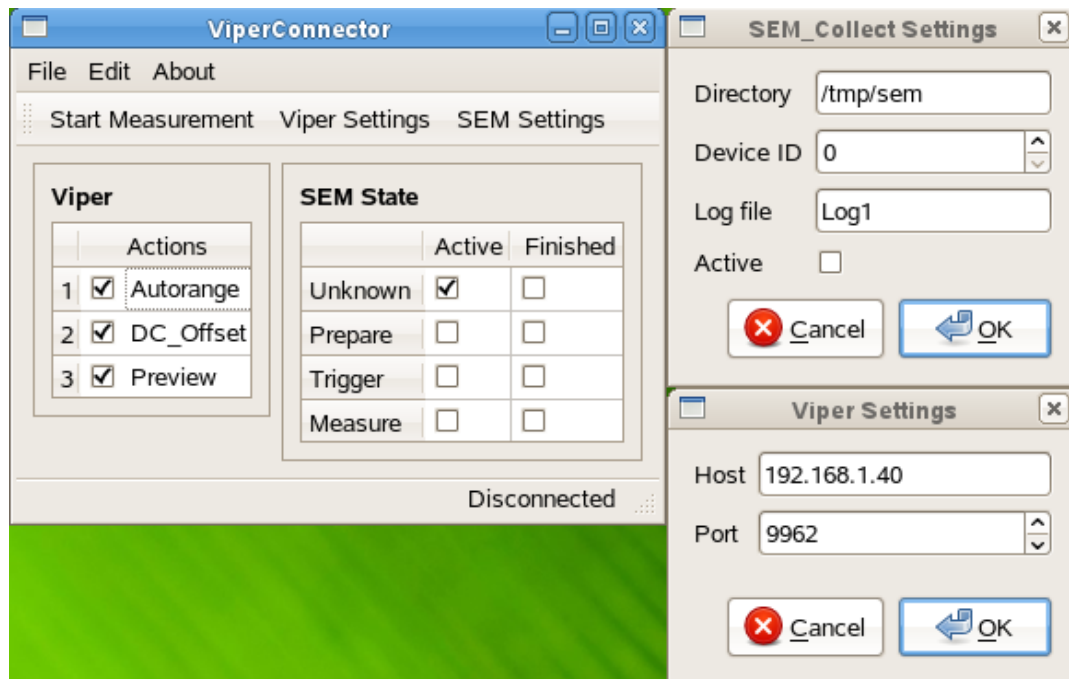


Abbildung 27: Bedienoberfläche zur automatisierten Messung. Zu sehen ist der ViperConnector (Schnittstelle/Bedienung des akustischen Messsystems) und die zugehörigen SEM\_Collect/Viper Einstellungen.

Im Rahmen der Schnittstellenerstellung zwischen dem DLR-System SEM\_Collect und dem ETW wurden auch weiterführende Arbeiten zur Verbesserung der Schnittstelle vorgenommen. Es wurde eine Bachelorarbeit<sup>16</sup> zur Verringerung des Konfigurationsaufwands und Erhöhung der Ausführungsgeschwindigkeit von SEM\_Collect erstellt. Zudem wurde die Basisschnittstelle erstmalig produktiv im Rahmen von EU-Desireh eingesetzt. Aufgrund der dort gewonnen Erkenntnisse wurde eine weitere Fehlerkorrektur und Erweiterung der Schnittstelle durchgeführt:

- Erhöhung der Fehlertoleranz der Schnittstelle SEM\_Collect/VIPER durch Adaption der Implementierung an Design-Standards der zugrunde liegenden Technologien
- Modellierung der Schnittstelle zur Viper als UML-2 Statechart zur Erhöhung der Flexibilität und Fehlertoleranz der Implementierung.

### Fazit

Die Kommunikation zwischen der Akustik-Hardware (Viper) und SEM\_Collect ist fertiggestellt. Zum Abschluss des Arbeitspaketes wurde ein Test mit einem virtuellen ETW Mockup durchgeführt. Hierbei wurde die vollständige und sichere Funktionsfähigkeit der Schnittstelle (ETW<->SEM\_Collect<->VIPER) erfolgreich getestet. Das Arbeitspaket 5 und der Meilenstein M4 sind damit abgeschlossen.

<sup>16</sup> Sven Frank, „Entwicklung eines Netzwerkprotokolls für die Datenerfassungs-Middleware SEM\_Collect,“ Bachelorarbeit DHBW Mannheim. 2012

## **6.6 Messungen im ETW (AP 6 - 7)**

### Bezug zur Zielsetzung

In diesem Arbeitspaket wird auf Grundlage der Erfahrungen mit dem Mini-Mikrofon-Array und den Erkenntnissen aus dem Detailkonzept (AP 4) ein Mikrofon-Array zur Implementierung im ETW entworfen, konstruiert und gefertigt.

Dann wird die Leistungsfähigkeit des entwickelten Messverfahrens demonstrativ an einem verfügbaren Halbmodell bei Flugreynoldszahlen getestet. Die Mikrofon-Array Messtechnik wird zur akustischen Ablöselokalisation im ETW an ausgewählten Strömungskonfigurationen und Betriebsbedingungen verwendet.

### **6.6.1 Implementierung ETW-Array (AP 6)**

Mit dem Abschluss des Arbeitspaketes AP4 wurde das endgültige Anordnungskonzept der Mikrofone an die Werkstatt des ETW übergeben. Dort befinden sich nun die Blindfenster und Blindpaneelen, welche für den Einbau der Mikrofone verwendet werden gefertigt.

Die in der ursprünglichen Planung vorgesehene Kalibrierung des Arrays sah ein Arraygehäuse als Träger der Mikrofone vor (anstatt 3 Blindfenster und 2 Paneelen). So ließe sich, wie im Projektplan aufgeführt, eine ex-situ Kalibrierung im Lärmlabor des DLR Göttingen durchführen. Durch die Einschränkung des Windkanals, nur die beschriebenen Einsätze für die Mikrofonmontage zu benutzen, existiert kein zusammenhängendes Arraygehäuse. Deshalb wurde die im Projektplan vorgesehene Kalibrierung in den Messaufbau, d.h. zeitlich mit dem Arbeitspaket AP7.2 zusammen durchgeführt.

Für die am ETW geplanten Messungen (AP 7.3) wurden auf Grundlage der durchgeführten Vortests zur Kryotauglichkeit (AP 2.3) und der Vortests am PETW (AP 3.3) bzw. ETW (AP 7.0) die Konfektionierung der Kabel für die 96 Sensoren vom DLR in Auftrag gegeben und gefertigt. Diese Kabel wurde dann an den ETW übergeben um dort in Vorbereitung auf die Messung verlegt zu werden.

Im weiteren Zuge der Vorbereitungen wurden die vom ETW fertiggestellten Einsätze zur Konfektionierung an das DLR übergeben. Hier wurden alle Mikrofone in die Einsätze montiert und einer abschließenden Funktionskontrolle unterzogen. Für den sicheren Transport und die Aufbewahrung der mit den Sensoren konfektionierten Einsätze wurde eine Transportkiste gefertigt. In Abbildung 28 ist eine Detailaufnahme eines wandbündig eingesetzten Mikrophones zu sehen, welches die offen liegende Mikrofonmembran zeigt. Abbildung 29 zeigt die konfektionierten Einsätze in der Transportkiste.

### Fazit

Mit der Konfektionierung der Mikrofone in die Einsätze und dem abschließenden Funktionstest am DLR sind die Vorbereitungen für den Aufbau des Demonstrationsexperiments im ETW abgeschlossen.

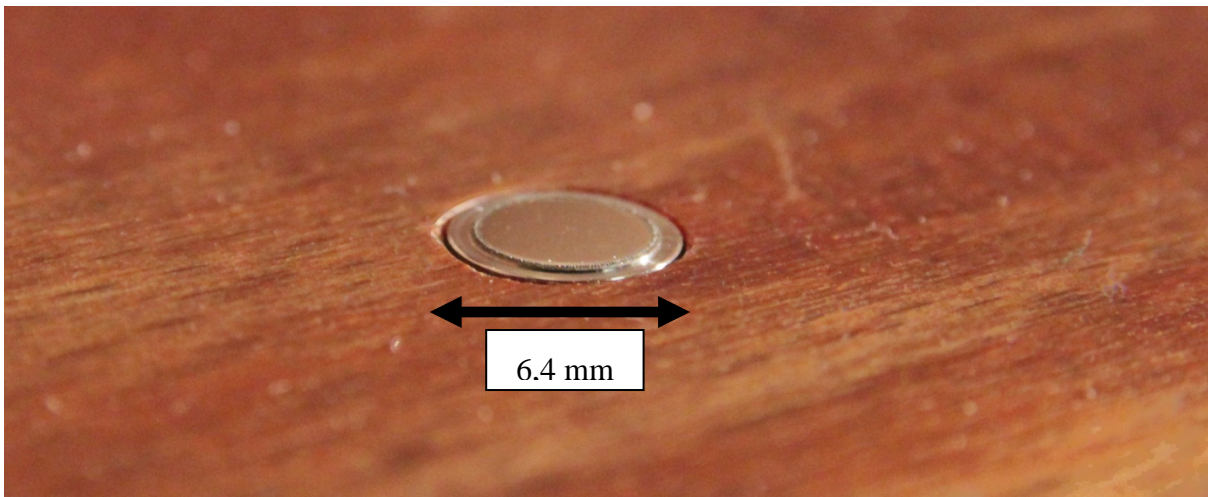


Abbildung 28: Detailaufnahme eines wandbündig montierten Mikrofones. Zu sehen ist die offen liegende Mikrofonmembran.

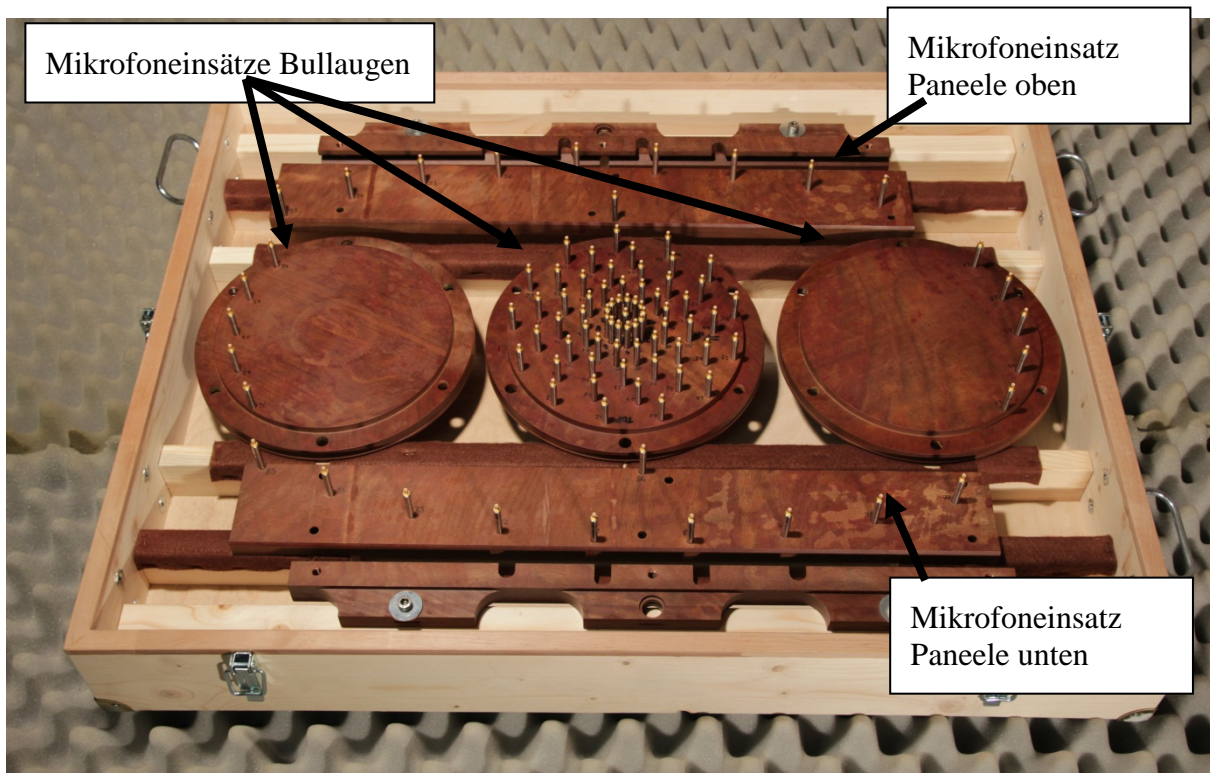


Abbildung 29: Mit den Kryomikrofonen konfektionierte Einsätze für die Messtrecke des ETW in der Transportkiste (Ansicht der Rückseite der Einsätze).

### 6.6.2 Vortest im ETW mit dem kleinen Array (AP 7.0)

Im Rahmen von Messungen des Lufo-Projektes „HINVA“ an einem Halbmodell ergab sich die kurzfristige Möglichkeit einen im Projektplan nicht vorgesehenen Vortest im ETW mit einem kleinen Array durchzuführen (zusätzlich eingeführtes Arbeitspaket 7.0, siehe Kapitel 3). Hierdurch konnte das Signalleitungskonzept und die vorgesehene Sensorik noch einmal direkt im ETW überprüft werden. Für das kleine Array wurden 14 Mikrofonpositionen der später zu verwendenden 96 Positionen verwendet. Das aus OBO-Festholz gefertigte Blindfenster mit den eingebauten Mikrofonen zeigt Abbildung 30.

Die akustischen Signale dieser Tests ergaben keinen Einfluss von elektrischen Störungen durch den Kanalbetrieb. Das Signalleitungskonzept und die Sensorik sind somit für den Demonstrationstest (AP7.2/7.3) sehr gut geeignet.

Durch die geringe Anzahl und die Anordnung der Mikrofone in einem räumlich sehr begrenzten Bereich ergeben sich ein geringer Signal-Rauschabstand, eine geringe Ortsauflösung im tieffrequenten Bereich und eine sehr geringe Tiefenschärfe, wodurch zum Beispiel Schallquellen an der gegenüberliegenden Messstreckewand nicht von denen des Modells unterschieden werden können. Trotz dieser deutlichen Einschränkungen des Testaufbaus zeigten viele Quellkarten gute Ergebnisse und es konnten Schallquellen auf dem Halbmodell bei unterschiedlichen Kanalbedingungen lokalisiert werden.

Den Vergleich zweier Ergebnisse bei gleichem Anstellwinkel, gleicher Mach- und Strouhalzahl aber unterschiedlicher Reynoldszahl zeigt Abbildung 31. Die höhere Reynoldszahl auf der rechten Seite ergibt sich durch eine Anhebung des Druckes auf 397 kPa und eine Absenkung der Temperatur auf 115 K. Der Vergleich zeigt, dass für die beiden Reynoldszahlen sowohl gleiche wie auch unterschiedliche Schallquellen auftauchen. Hier liegt offensichtlich eine Abhängigkeit unterschiedlicher Schallquellmechanismen von der Reynoldszahl vor.



Abbildung 30: Fotos des gefertigten Blindfensters aus OBO-Festholz mit den 14 Mikrofonen. Links ist die der Messstreckenseite zugewandte Seite zu sehen, rechts die Rückseite. Die Membrane der Kryokondensatormikrofone sind wandbündig ausgerichtet.

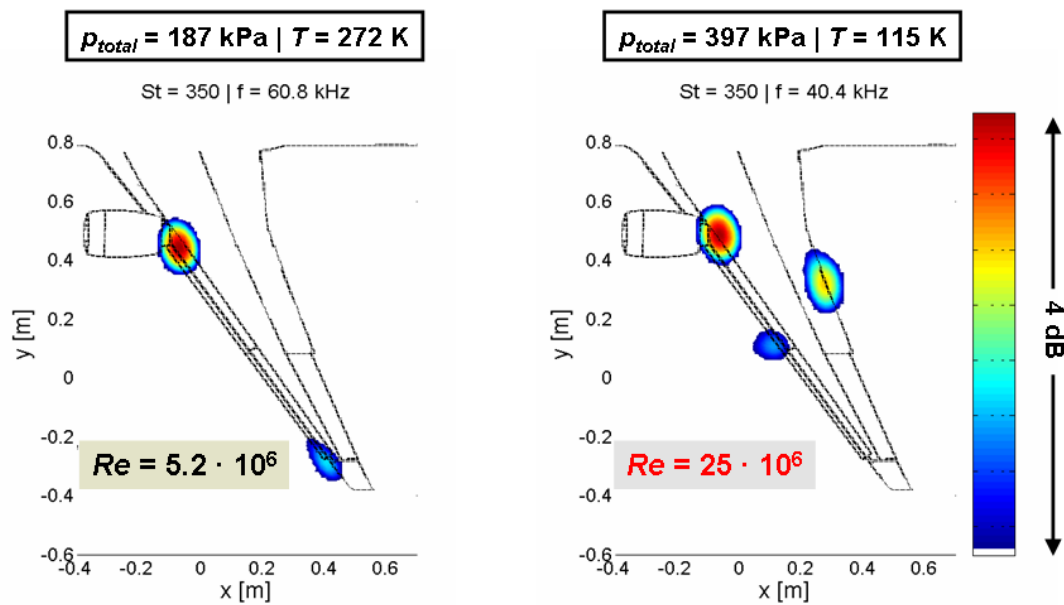


Abbildung 31: Ausgewählte Quellkarten bei einem Anstellwinkel von  $5^\circ$ , einer Machzahl von 0,2 und einer Strouhalzahl (bezogen auf die mittlere aerodynamische Flügeltiefe) von 350. Die linke Seite zeigt die Ergebnisse für eine niedrige Reynoldszahl (geringe Druckerhöhung und Normaltemperatur), die rechte Seite für eine Flugreynoldszahl (hoher Druck und niedrige Temperatur).

#### Fazit:

Im Gesamturteil ist aufgrund der Ergebnisse dieses Vortests davon auszugehen, dass die geplanten Messungen des AP 7.3 mit einem Mikrofonarray mit 96 Mikrofonen (womit insbesondere die Tiefenschärfe und der Signalrauschabstand sehr deutlich verbessert sind) erfolgreich durchgeführt werden können.

### 6.6.3 Abschlusstest im ETW (AP 7.1 - 7.3)

#### Definition der Messaufgabe

In einem gemeinsamen Treffen der Projektpartner mit Airbus Deutschland wurden folgende Punkte für die Messung festgelegt:

#### 1) Modellbereitstellung

Von Airbus wird das K3DY-Halbmodell zur Verfügung gestellt, an dem bereits umfangreiche aeroakustische Untersuchungen im LSWT (Niedergeschwindigkeitswindkanal, Standort Airbus Bremen) durchgeführt wurden.

#### 2) Konfigurationsauswahl

Die Konfiguration des Modells wird identisch zu der des EWA-Benchmark Tests (2007) sein, um zusätzlich einen Vergleich der vorhandenen aeroakustischen Messdaten vom LSWT mit dem ETW durchführen zu können. Bei der Konfiguration handelt es sich um eine typische Landekonfiguration.

#### 3) Messpunkte

Es sind vier Messpunkte vorgesehen. Für jeden Messpunkt werden 3 Machzahlen und jeweils 4 Anstellwinkel eingestellt. Für die Anstellwinkel werden die identischen aerodynamischen Anstellwinkel sowie ein identisch geometrischer Anstellwinkel wie im LSWT EWA-Benchmark Test verwendet.

P1: Umgebungstemperatur und -druck, getripptes Modell (vergleichbare Konfiguration mit LSWT EWA-Benchmark Messungen)

P2: Umgebungstemperatur und -druck, ungetripptes Modell

P3: Umgebungstemperatur und  $p \approx 400$  kPa, ungetripptes Modell (-> erhöhte Reynoldszahl, vergleichbare Deformation des Modells wie in Messpunkt P4)

P4:  $T \approx 120$  K,  $p \approx 400$  kPa, ungetripptes Modell (-> Flugreynoldszahl)

Zusätzlich wurden vom DLR die Rohdaten des Vergleichsfalls (LSWT EWA-Benchmark Test 2007) beschafft und zur Vorauswahl der Messpunkte am ETW (Anstellwinkel, Machzahl) ausgewertet. Hierzu wurden mit denselben Auswertearithmen und Methoden, welche auch für die Ergebnisse des Demonstrationsexperimentes verwendet werden sollen, akustische Quellkarten und Spektren berechnet.

#### Aufbau der Messung am ETW

Die Mikrofone wurden mittels der Einsätze in der Messstreckenwand befestigt. Die Mikrofonanordnung entspricht der in Abbildung 23 dargestellten Anordnung.

Das Airbus K3DY Halbmodell in der Mitte der Messstrecke an die Messstreckendecke montiert. Das Modell ist als Landekonfiguration ausgerüstet. Abbildung 32 zeigt Fotos des Halbmodells in der Messstrecke und das Mikrofonarray, welches mittels der Einsätze aus Festholz in der Seitenwand montiert ist.

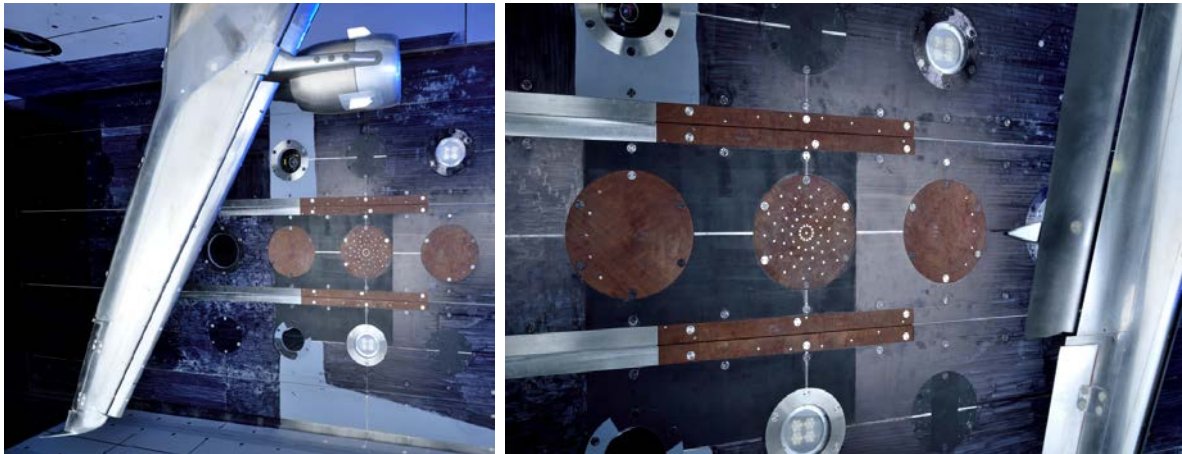


Abbildung 32: Fotos der Messtrecke mit dem Halbmodell im Zentrum der Messstrecke und dem Mikrofonarray in der Seitenwand.

### Messpunkte

Die Messungen wurden bei drei verschiedenen Reynoldszahlen  $Re_\delta$  durchgeführt.  $Re_\delta = 1,42 \cdot 10^6$  als Referenz für Standardwindkanäle,  $Re_\delta = 5,16 \cdot 10^6$  als erhöhte Reynoldszahl und  $Re_\delta = 20,00 \cdot 10^6$  als Flugreynoldszahl-Fall. Um auch den Einfluss der Deformation zu untersuchen, wurde unter Berücksichtigung der Materialparameter des Halbmodells, des Drucks und der Temperatur die Deformation variiert. In der folgenden Tabelle 1 sind die Messpunkte zusammengefasst, welche sich bei einer Machzahl von 0,203 ergeben:

	$T$ [K]	$p_{tot}$ [kPa]	$Re_\delta$ [ $10^6$ ]	$q/E$ [ $10^{-8}$ ]
Messpunkt I	310	110	1,42	1.57
Messpunkt II	125	115	5,16	1.57
Messpunkt III	310	399	5,16	5.70
Messpunkt IV	120	419	20,00	5.70

Tabelle 1: Messparameter der gewählten Messpunkte bei einer Machzahl von 0,203.

Diese Messpunkte bieten die folgenden Vergleichsmöglichkeiten:

- (1) Messpunkt I und II: identische Deformation, unterschiedliche Reynoldszahl
- (2) Messpunkt III und IV: unterschiedliche Deformation, identische Reynoldszahl
- (3) Messpunkt II und III: identische Deformation, unterschiedliche Reynoldszahl

So kann der Effekt der Deformation von Reynoldszahleffekten getrennt betrachtet werden. Diese Messungen wurden zusätzlich zu der Machzahl von 0,203 auch bei 0,175 und 0,225 durchgeführt. Der Anstellwinkel wurde von  $3^\circ$  bis  $9^\circ$  variiert.

Ergebnisse

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen Quellkarten für eine Machzahl von  $M = 0,203$  und einen Anstellwinkel von  $3^\circ$  für verschiedene Reynoldszahlen (Tabelle 1: Messpunkt I bis IV). Jede Quellkarte ist in einem dynamischen Bereich von 20 dB dargestellt. Zur Ergänzung zeigt Abbildung 35 integrierte Quellspektren für die Vorderkante (links) und die Hinterkante (rechts) für alle vier Messpunkte.

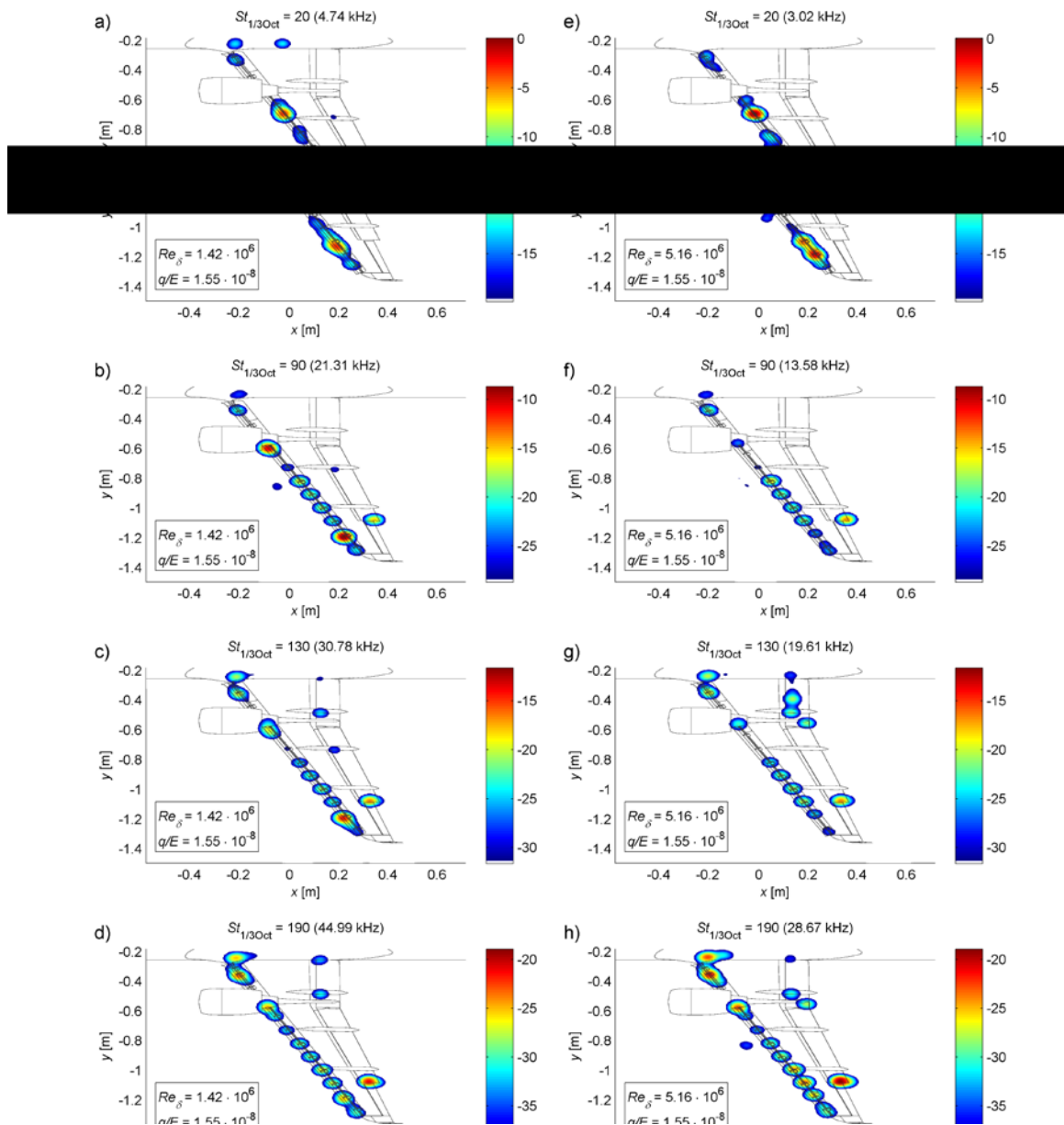


Abbildung 33: Vergleich der Quellkarten [dB] bei einer Machzahl von 0,203, einem Anstellwinkel von  $3^\circ$  und einer Deformation von  $1,57 \cdot 10^{-8}$ ; Messpunkt I (a-d):  $Re_\delta = 1,42 \cdot 10^6$ ; Messpunkt II (e-h):  $Re_\delta = 5,16 \cdot 10^6$ . Die Ergebnisse werden bei Strouhalzahlen von 20 bis 190 gezeigt.



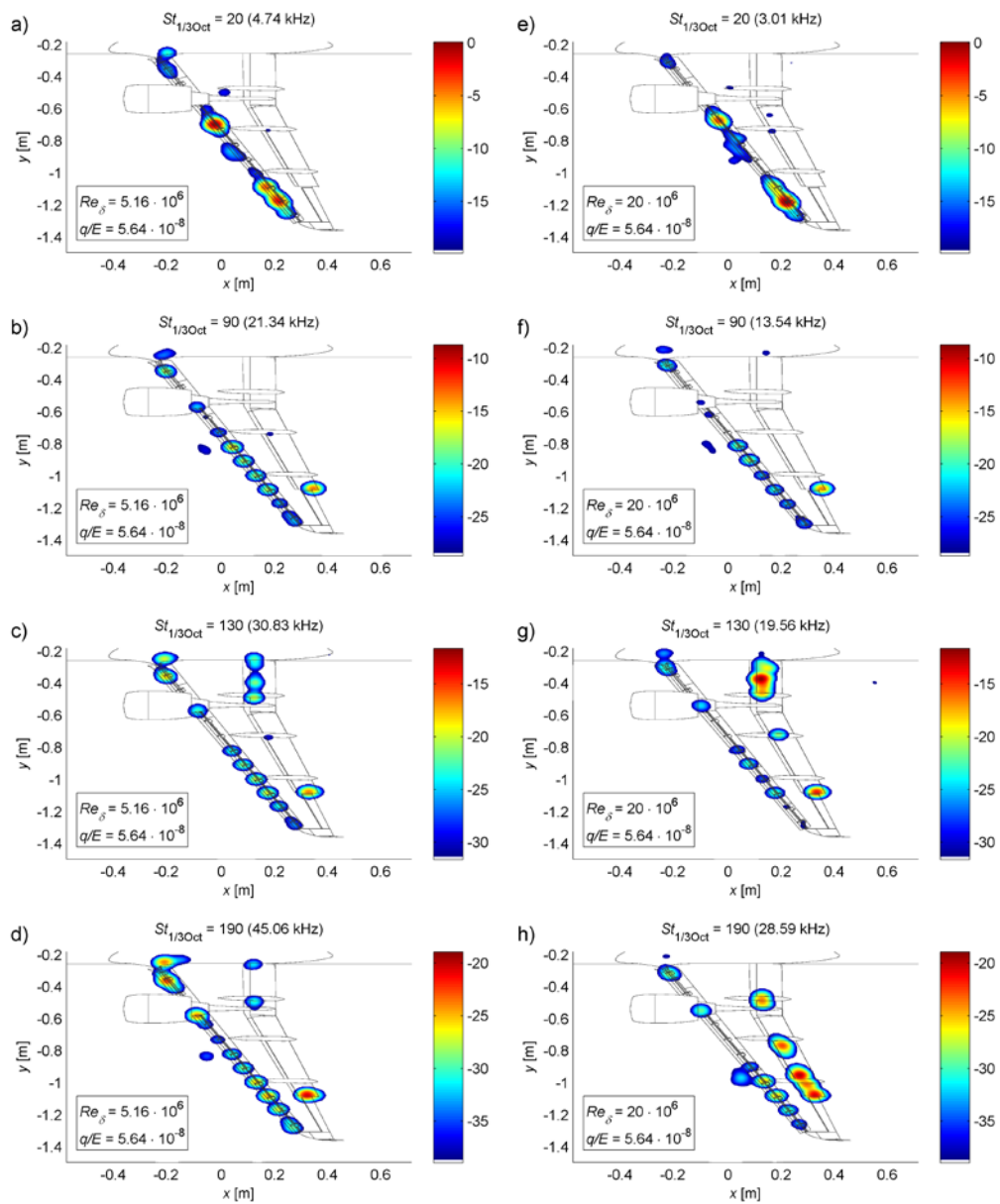


Abbildung 34: Vergleich der Quellkarten [dB] bei einer Machzahl von 0,203, einem Anstellwinkel von 3° und einer Deformation von  $5,70 \cdot 10^{-8}$ ; Messpunkt III (a-d):  $Re_{\delta} = 5,16 \cdot 10^6$ ; Messpunkt IV (e-h):  $Re_{\delta} = 20,00 \cdot 10^6$ . Die Ergebnisse werden bei Strouhalzahlen von 20 bis 190 gezeigt.

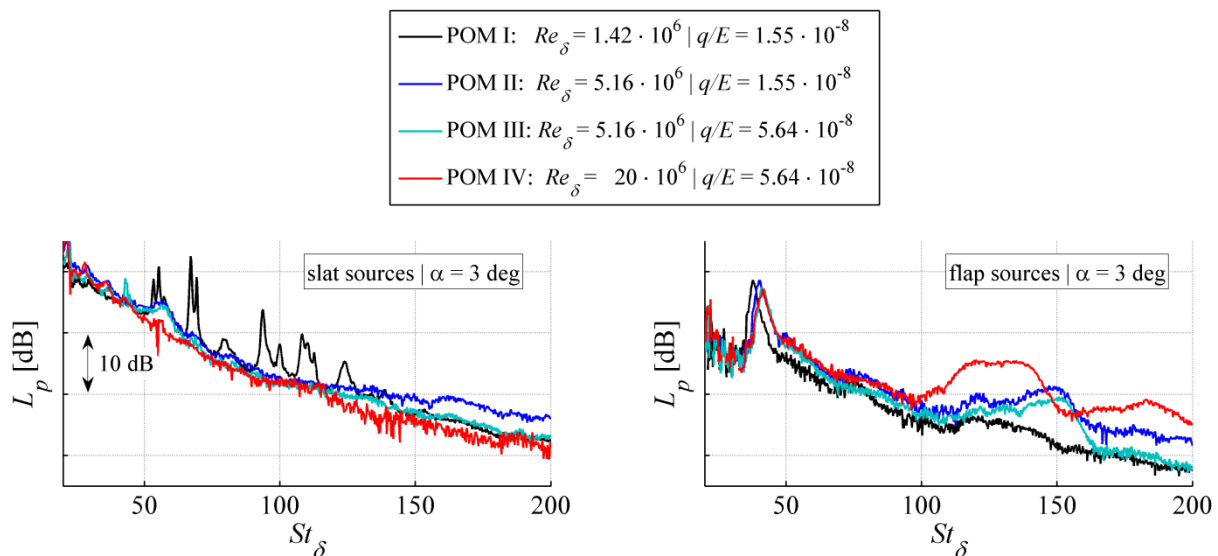


Abbildung 35: Quellspektren über der Strouhalzahl für die Vorderkante (links) und die Hinterkante (rechts) für verschiedene Reynoldszahlen und Deformationen. Die Machzahl beträgt 0,203 und der Anstellwinkel  $3^\circ$ .

### Einfluss der Deformation

Der Vergleich der Ergebnisse von Messpunkt II und III (Abbildung 33 (e-h) und Abbildung 34 (a-d)) zeigt den Einfluss der Deformation. Für alle Strouhalzahlen sehen die Quellkarten sehr ähnlich aus. Geringe Unterschiede sind zu beobachten, wie zum Beispiel zusätzliche Quellen auf dem Übergang von innerer zu äußerer Hinterkantenklappe (sstellte ich als gelöstes Klebeband heraus) und beim Klappenspalt am Rumpf (der Deformation zuzuordnen). Im Allgemeinen ist der Einfluss der Deformation als sehr gering einzustufen.

### Einfluss der Reynoldszahl

Der Vergleich der Ergebnisse in jeweils Abbildung 33 und Abbildung 34 wie auch die Spektren in Abbildung 35 zeigen den Effekt der Reynoldszahl. Insbesondere die Ergebnisse in Abbildung 34 sind hier hervorzuheben, da dort weltweit erstmalig akustische Quellkarten bei einer Reynoldszahl zu sehen sind, welche der Flug-Reynoldszahl entspricht. Die wichtigsten Ergebnisse aus den Messungen sind:

- Es existieren mehrere Quellen, welche eine Reynoldszahlabhängigkeit aufweisen. Zum Beispiel:
  - Tonale Quellen auf dem Vorflügel (sogenannte *Slat Tones*), welche nur bei niedrigen Reynoldszahlen auftreten
  - Quellen auf dem inneren Vorflügel, welche nur bei mittleren Reynoldszahlen auftreten
  - Dominante Quellen auf der Hinterkantenklappe bei Flugreynoldszahlen und verschiedene Peaks mit kombinierter Strouhal und Reynoldszahlabhängigkeit
- Bei den Quellen auf der inneren und äußeren Hinterkantenklappe bei Flugreynoldszahl handelt es sich um sehr dominante Quellen. Diese stehen wahrscheinlich in Zusammenhang mit der dünneren Grenzschicht, welche mit der Spaltströmung, der Hinterkante des Flügels, den Klappenhalterungen und der Hinterkantenklappenvorderkante interagiert.

## Fazit

Diese das Projekt abschließenden Messungen sind, soweit bekannt, die weltweit ersten Untersuchungen, welche „Airframe Noise“ an einem skalierten Halbmodell bei Flugreynoldszahlen lokalisieren. Erfolgreich wurde die Lokalisierung von Schallquellen bei diesen extremen Messbedingungen demonstriert. Die Ergebnisse zeigen deutliche Reynoldszahlabhängigkeiten. Diese hier gewonnen Ergebnisse mit ihrer hohen Bedeutung für die Lärmprognose in der Flugzeugentwicklung wurden auf einer internationalen Tagung der Fachöffentlichkeit vorgestellt. (Veröffentlichungen siehe Kapitel 9).

### 6.6.4 Zusatz: Zweiter Anwendungstest (AP 7.4)

Aufgrund der erfolgreichen Messungen im Demonstrationstest wurde ein weiterer Test im Rahmen des Lufo Projektes HINVA durchgeführt. Unter anderem wurde in diesem Projekt der Einfluss von einer modifizierten inneren Vorflügelklappe und von Wirbelgeneratoren auf der Triebwerks gondel auf den Hochauftrieb untersucht.

Die im Rahmen des Projektes ALSA weiter entwickelte Mikrofonarraymesstechnik wurde hier parallel zu anderen Messtechniken (CryoPIV – *Particle Image Velocimetry*, CryoTSP – *Temperature Sensitive Paint* und SPT – *Stereo Pattern-Tracking*) eingesetzt. So konnte auch der volle Funktionsumfang der im Rahmen des Arbeitspaketes 5 entwickelten Software zur Anbindung an den ETW genutzt werden (siehe Abschnitt 6.5) und das akustische Messsystem vollautomatisch und „nebenbei“ zu den anderen Messsystemen verwendet werden.

Die Arrayanordnung war identisch zu der im Demonstrationstest (siehe Abschnitt 6.6.3). Bei dem Modell handelte es sich wie im Demonstrationsexperiment um ein Halbmodell in Hochauftriebskonfiguration. Akustische Quellkarten wurden bei verschiedensten Bedingungen erfasst (Machzahl, Reynoldszahl, Anstellwinkel). Abbildung 36 zeigt ein Beispielergebnis. Hier werden bei identischen Bedingungen (Anstellwinkel  $5^\circ$ , Machzahl 0,186, Flugreynoldszahl) zwei verschiedene Konfigurationen miteinander verglichen. Deutlich zu sehen ist die zusätzliche Quelle beim Wirbelgenerator auf der Gondel und der verringerte Pegel bei der inneren Vorflügelklappe.

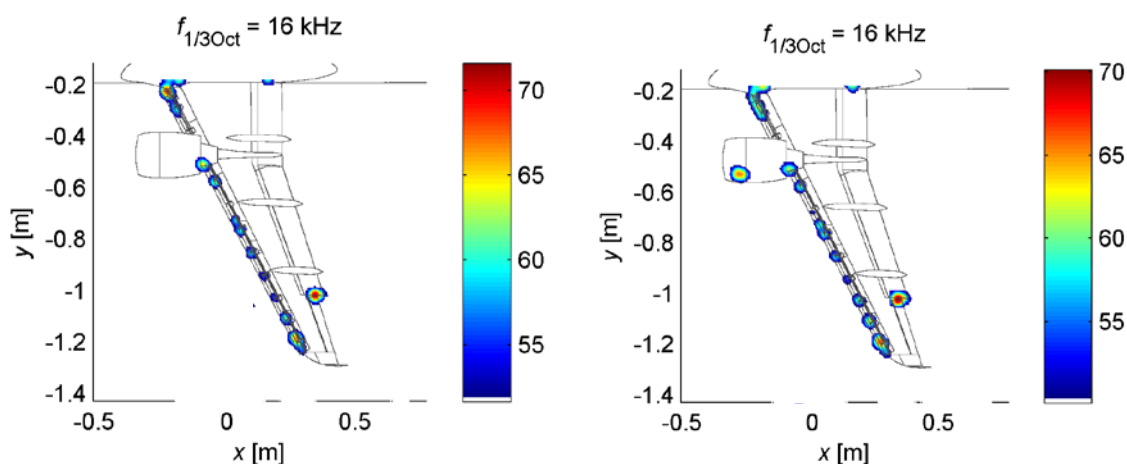


Abbildung 36: Einfluss der veränderten Flügelkonfiguration auf die Schallabstrahlung (rechte Abbildung: zusätzlicher Wirbelgenerator auf der Gondel, modifizierte innere Vorflügelklappe). Zu sehen sind die Quellkarten bei einer Terzmittenfrequenz von 16 kHz.

## 7. Zusammenfassung und voraussichtlicher Nutzen

Das im Vorhaben entwickelte akustische Messsystem ermöglicht weltweit erstmalig die Lokalisation von Schallquellen in einem kryogenen druckbeaufschlagten transsonischen Windkanal (ETW) und damit akustische Untersuchungen bei Mach- und Reynoldszahlen realer Transportflugzeuge unter den definierten Bedingungen eines Windkanals. Die Funktionalität des akustischen Messsystems konnte am Ende des Vorhabens an zwei typischen Anwendungsfällen (Hochauftriebskonfigurationen realer Transportflugzeugmodelle im ETW) demonstriert werden. Bei der letzten Messung konnte der Einsatz des akustischen Messsystems auch unter industriellen Bedingungen unter Beweis gestellt werden (vom Windkanal gesteuerte automatische Anwendung parallel zu anderen Messtechniken). Das Messsystem zeigte sich hierbei als hinreichend robust, u.a. gegeben durch einen hohen Automatisierungsgrad, der auch im Hinblick auf eine kosteneffiziente Durchführung solcher Messungen realisiert wurde, was bei dem hohen Ressourcen-Verbrauch an flüssigem Stickstoff und elektrischer Energie während des Windkanalbetriebes ein entscheidendes Kriterium für den ETW darstellt.

Somit steht der Forschung und der Flugzeugindustrie ein neues wichtiges Messverfahren für die experimentelle Untersuchung aeroakustischer Fragestellungen im ETW zur Verfügung. Die Einbindung des Messverfahrens wurde so ausgelegt, dass es als Zusatz zu standardmäßig durchgeführten aerodynamischen Untersuchungen ausgeführt werden kann. Viele akustische Phänomene werden derzeit auf Grund fehlender allgemeingültiger physikalischer Modelle nur unzureichend von Simulationen zur Prognose der Schallabstrahlung (CAA – *Computational Aeroacoustics*) erfasst. Die akustischen Messdaten bieten hier eine gute Validierungsmöglichkeit bestehender und zukünftiger Berechnungsmodelle. Dies ist nun auch bei realen Mach- und Reynoldszahlen im ETW möglich.

---

## **8. Fortschritte bei anderen Stellen**

Neue Fortschritte im Bereich der Messung von aeroakustischen Quellen in druckbeaufschlagten kryogenen Windkanälen bei anderen Stellen sind den Autoren nicht bekannt.

## 9. Veröffentlichungen

- [1] L. Koop; T. Ahlefeldt, J. Quest, J. Leuckert, W. Nitsche, „Akustische Lokalisation von Strömungsablösung im ETW,“ *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010*, 2010.
- [2] T. Ahlefeldt, „Anwendung der Mikrofonarraymesstechnik in kryogenen und druckbeaufschlagten Windkanälen,“ *Fachausschusssitzung: Simulation und Validierung bei Strömungsschallproblemen in der Luftfahrt, Fahrzeug- und Anlagentechnik*, 2011.
- [3] T. Ahlefeldt, „Microphone array measurements under combined pressurized cryogenic Conditions,“ *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331 (2012), 2012.
- [4] T. Ahlefeldt und J. Quest, „High-Reynolds Number Aeroacoustic Testing Under Pressurised Cryogenic Conditions in PETW,“ AIAA-2012-0107, *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012.
- [5] T. Ahlefeldt, C. Spehr, „Microphone-Array Measurements in cryogenic/pressurized Wind tunnels,“ *AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustic*, 18. - 21. March 2013, Merano, Italy, 2012.
- [6] T. Ahlefeldt, F. Sopranzetti, C. Spehr, A. Henning, „Investigation of laminar detachment by means of simultaneous microphone and surface hot wire measurements,“ AIAA 2013-2109. *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 27. - 29. May 2013, Berlin, Germany, 2013.
- [7] T. Ahlefeldt und J. Quest, „Real-Flight Microphone-Array Measurements on a scaled Model in ETW,“ AIAA 2014-1483, *52nd Aerospace Sciences Meeting (AIAA SciTech 2014)*, 13. - 17. Jan. 2014, National Harbor, Maryland, USA, 2014.
- [8] T. Ahlefeldt, „Kalter Schall: Aeroakustische Messungen bei Mach- und Reynoldszahlähnlichkeit,“ *DAGA 2014 40. Jahrestagung für Akustik*, 10. - 13. März 2014, Oldenburg, Germany, 2014.