



Strömungsgeräusche – Beschreibung und Minderung mittels numerischer und experimenteller Simulation

Jan Delfs

DLR Institut für Aerodynamik & Strömungstechnik
Braunschweig, Abteilung Technische Akustik

Ringvorlesung TU-BS 2011



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Übersicht

- Bedeutung turbulenzbedingter Schallquellen in der Luftfahrt
- Problemstellung der Berechnung turbulenzbedingter Strahler
- stochastische Turbulenzmodellierung und numerische Simulation
- Simulation - Beispiele
- Minderung von Strömungsschall
- Zusammenfassung & Ausblick

Bedeutung turbulenzbedingter Schallquellen in der Luftfahrt



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Turbulenzschallquellen bei Verkehrsflugzeugen - außen

Start:

- ▶ **Triebwerkgeräusch**
 - * **Strahl**

Landung:

- ▶ **Triebwerkgeräusch**
 - * **Strahl**
 - * **Fan Breitband**
 - * **Verbrennung**
- ▶ **Umströmungsgeräusch**
 - * **Hochauftriebsklappen**
 - * **Strahl-Klappeninteraktion**
 - * **Fahrwerk & Klappeninteraktion**
 - * **Spoiler + Rückwirkungen**



Turbulenzschallquellen bei Verkehrsflugzeugen - innen

- **Externe Schallquellen:**

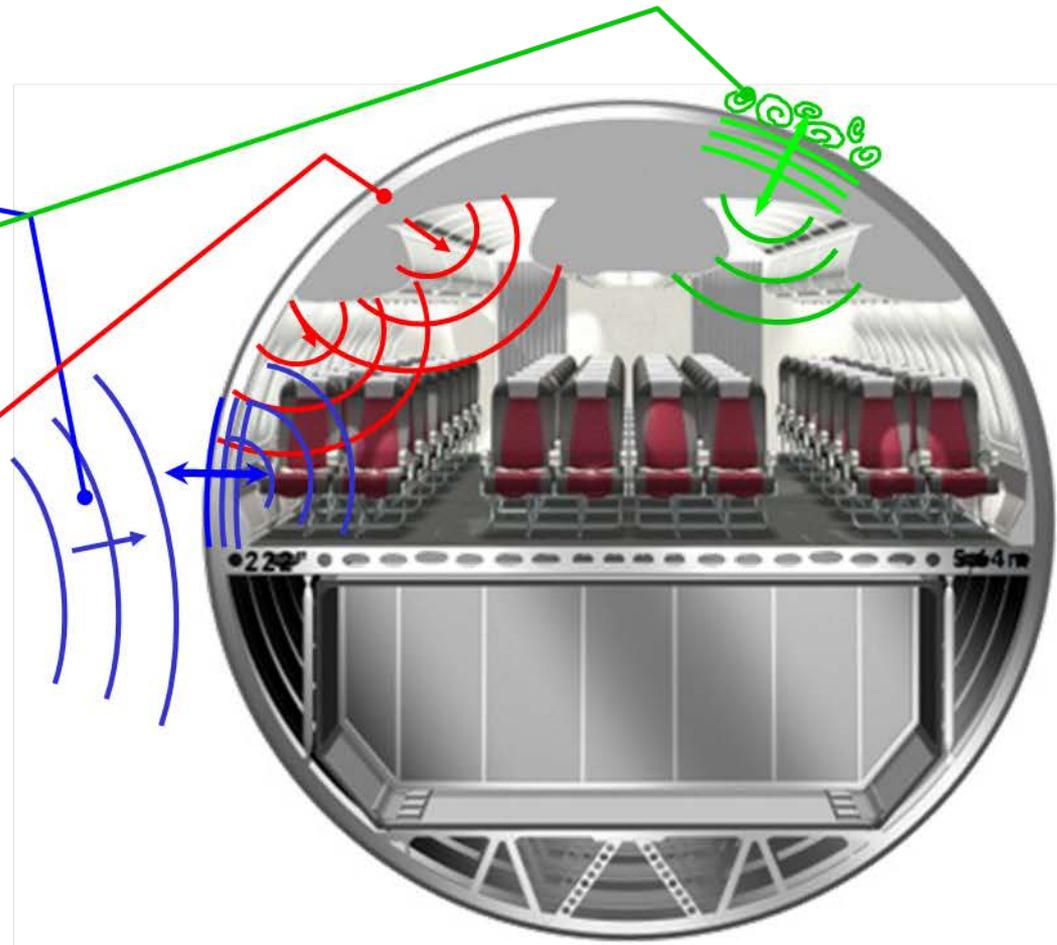
Triebwerksluftschall

Rumpfgrenzschicht

- **Interne Schallquellen:**

Zuluftsystem

(Hydrauliksysteme)



Anforderungen an Rechenverfahren für die Aeroakustik

Beschreibung Turbulenz- oder wirbelbedingter Schallerzeugung:

Quellursache: Wirbelkonvektion, -dynamik, -interaktion mit aerodyn. Oberfl.

Quellvorgang: Umsetzung von Wirbelstörungen in Schall

Beschreibung der Schallabstrahlung inkl. Beugung/Brechung/Streuung:

Schallfortpflanzung in (in)homogenen Medien (Refraktion an Scher-, Grenz- und Temperaturschichten, Streuung an Turbulenz, etc.)

Problemstellung der Berechnung turbulenzbedingter Strahler



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

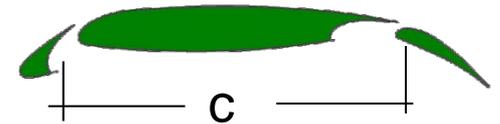
Problemstellung der Berechnung turbulenzbedingter Strahler

Berechnung des Umströmungsgeräuschs eines Tragflügels mit skalenauflösender Strömungssimulation (DES-Detached Eddy Sim.)

Typische Gitterzellenanzahl für Flügelschnitt:

$30 \cdot 10^6 \triangleq \Delta b \sim 3\% c$ spannweitig (Erfahrung TU-B)

$b \sim 5 \cdot c \Rightarrow b \sim 5 \cdot 33 \cdot 30 \cdot 10^6 = 5 \cdot 10^9$ Zellen



$\Rightarrow \sim 10$ Milliarden Zellen zur geeigneten Beschreibung der Schallquellen an komplexem 3D Flügel

Gilt für Modellreynoldszahl 1:10

\Rightarrow ca. 10 Billionen Zellen für Tragflügel bei Originalreynoldszahl !

\Rightarrow exzessiver Rechenaufwand für turbulenz**simulierende** Verfahren

– ungeeignet für Entwurfsaufgaben

+ hilfreich für Klärung Quellmechanismen, Validierungsdaten

Abschätzung LES Rechenaufwand A380 Landung

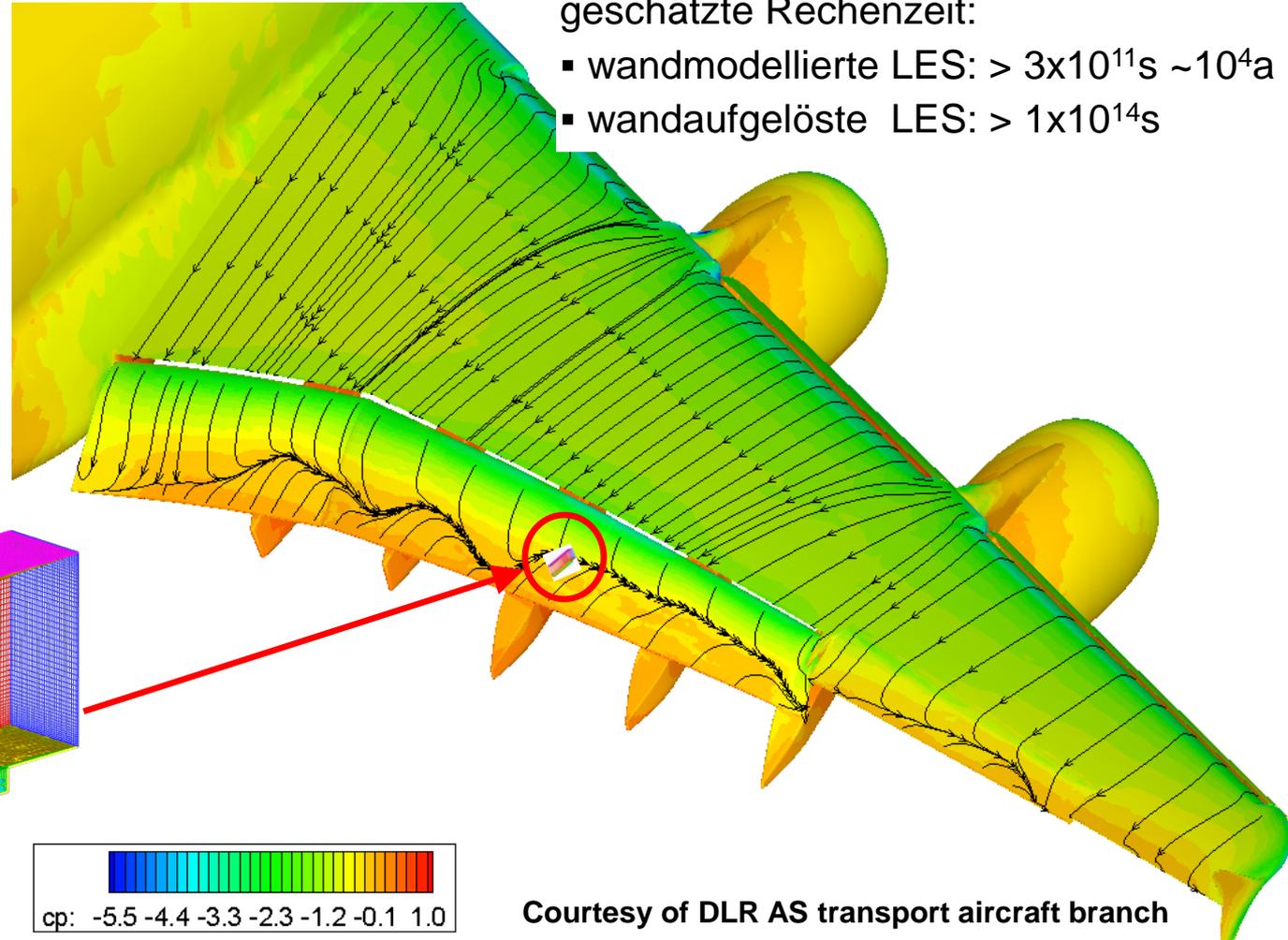
(LES - Large Eddy Simulation)

Flügelfläche: 10m x 40m

geschätzte Rechenzeit:

- wandmodellerte LES: $> 3 \times 10^{11} \text{s} \sim 10^4 \text{a}$
- wand aufgelöste LES: $> 1 \times 10^{14} \text{s}$

LES mit Wandfunktion:
Gebiet $\sim 0.38\text{m} \times 0.05\text{m}$
 10^6s auf 1 CPU (= 20d)



Courtesy of DLR AS transport aircraft branch

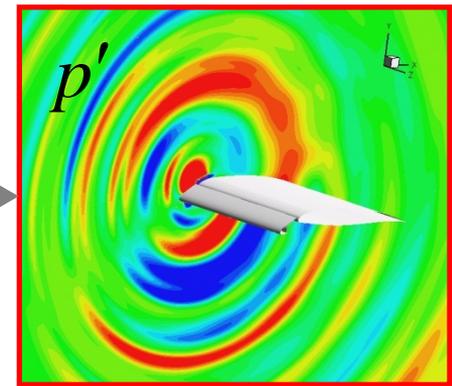
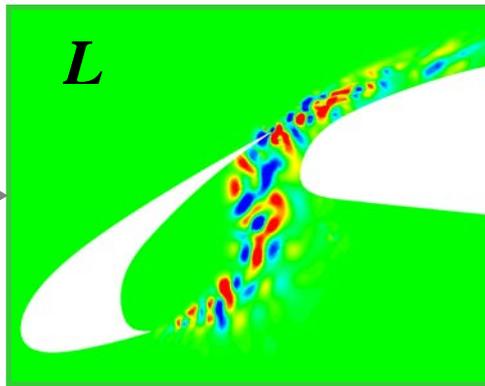
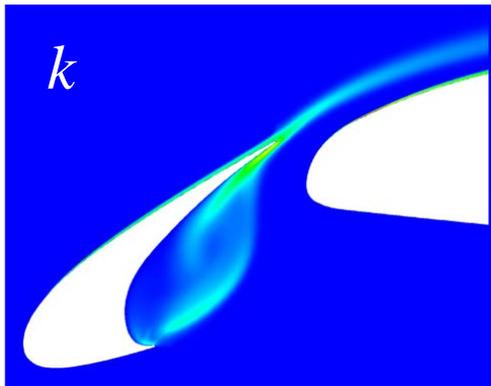
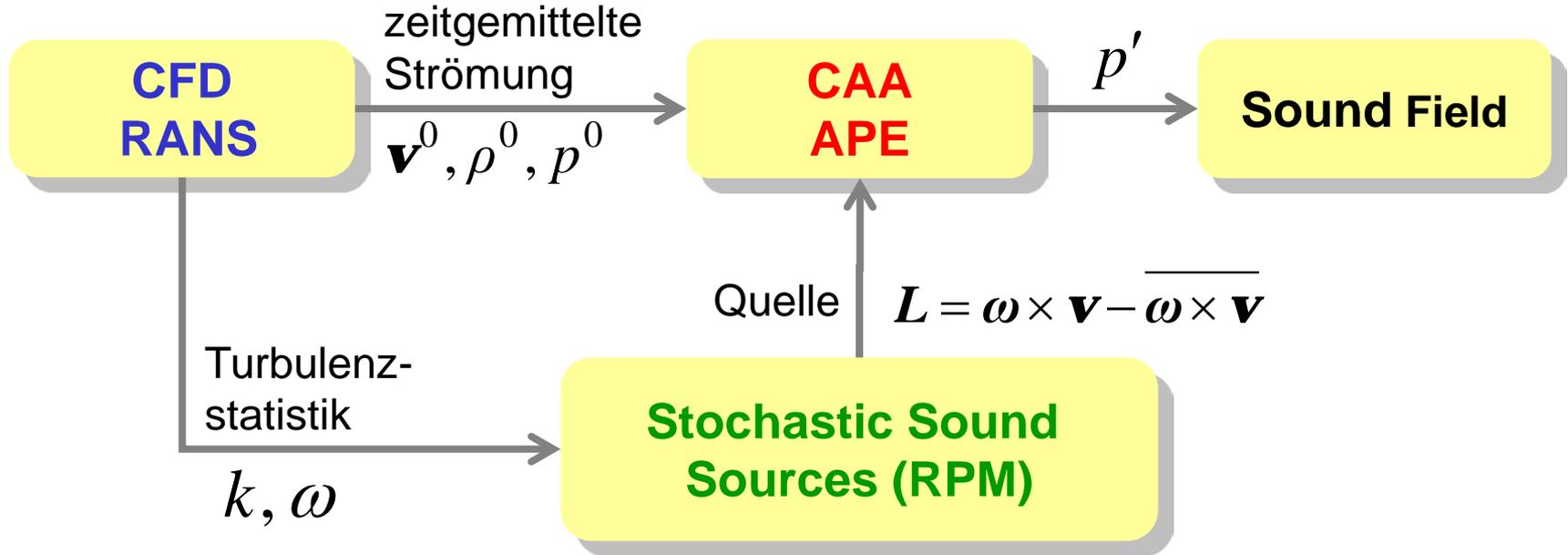
Stochast. Turbulenzmodellierung & numerische Simulation



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

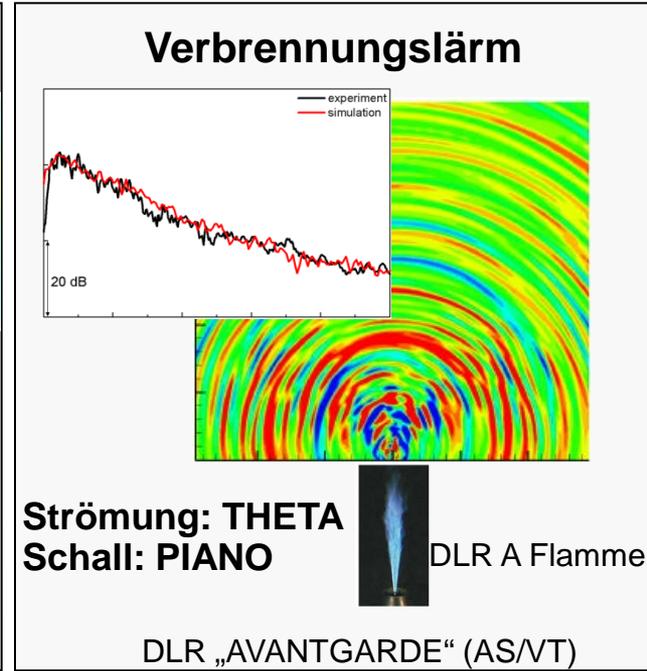
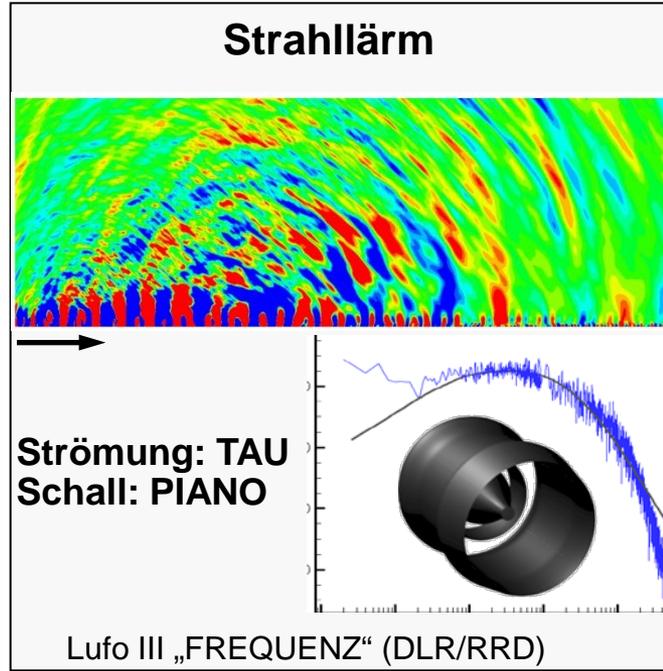
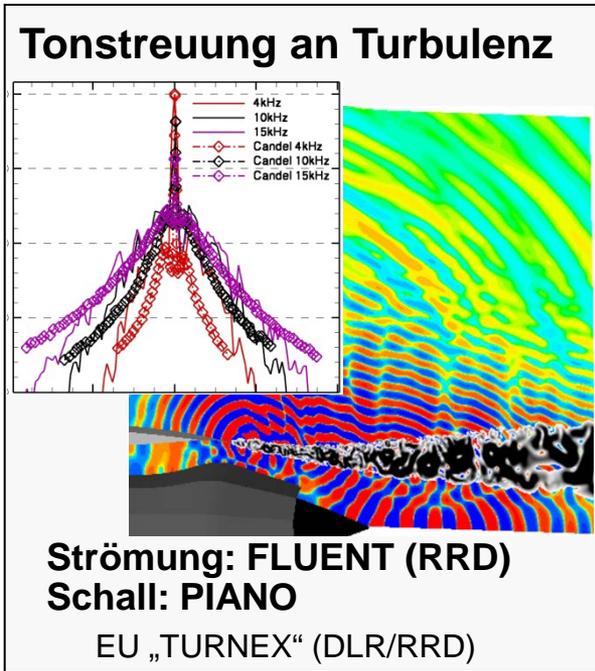
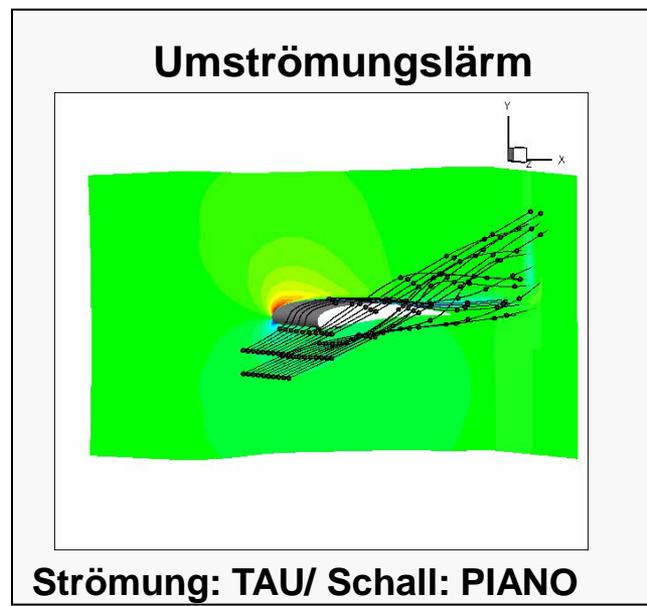
Aeroakustisches Simulationskonzept



Hybrider RANS/CAA Ansatz



⇒ 2-4 Größenordnungen schneller als LES



Simulation – Beispiele

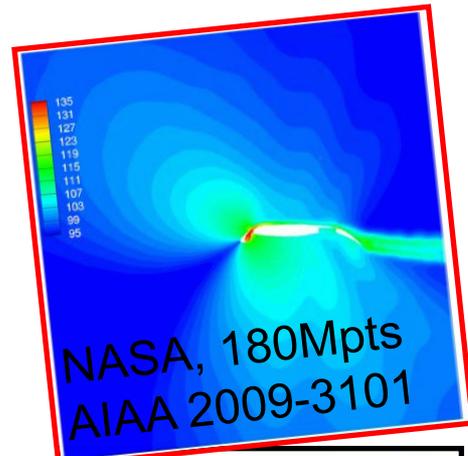
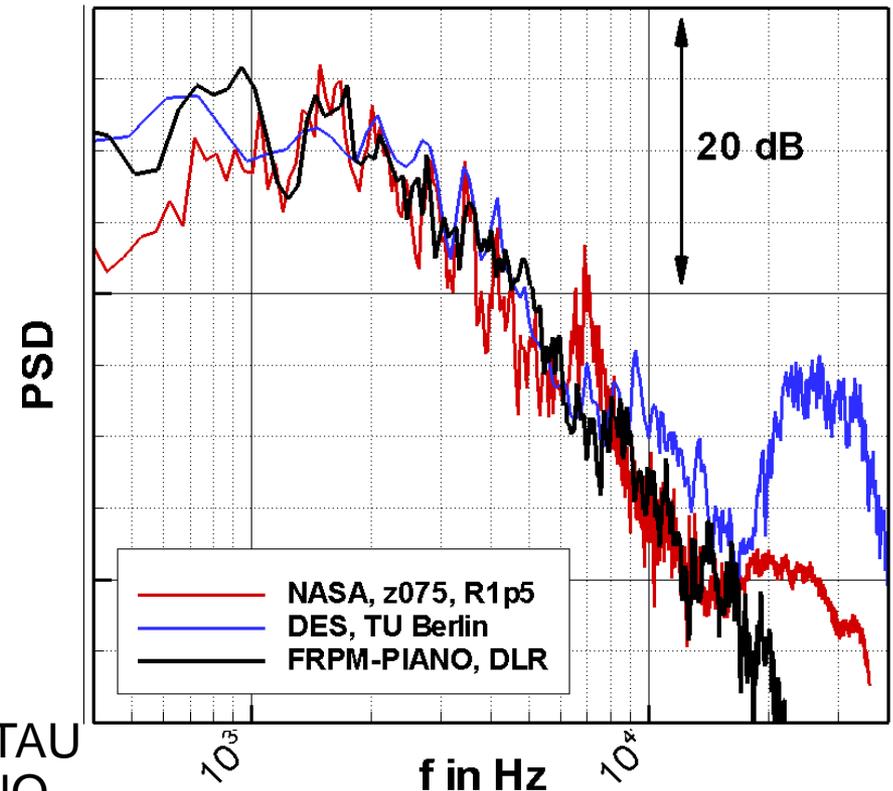


Schallabstrahlung von Hochauftriebsprofil 30P30N

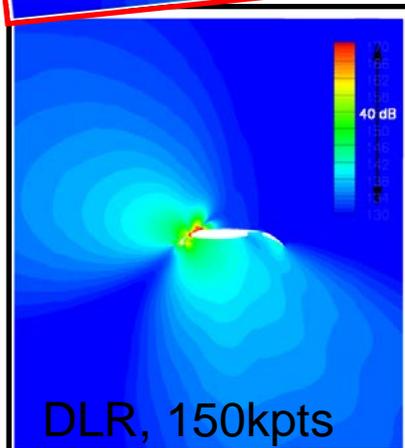
- Vergleich stochast. Ansatz (PIANO) mit anderen Gruppen



290° w.r.t. flow



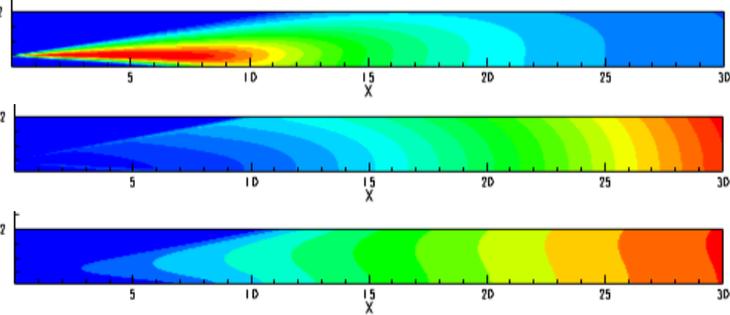
p_{rms}



Strömung: TAU
Schall: PIANO



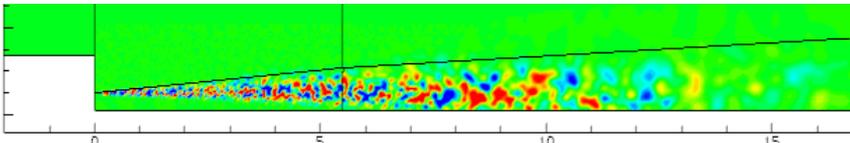
Strahlärmvorhersage



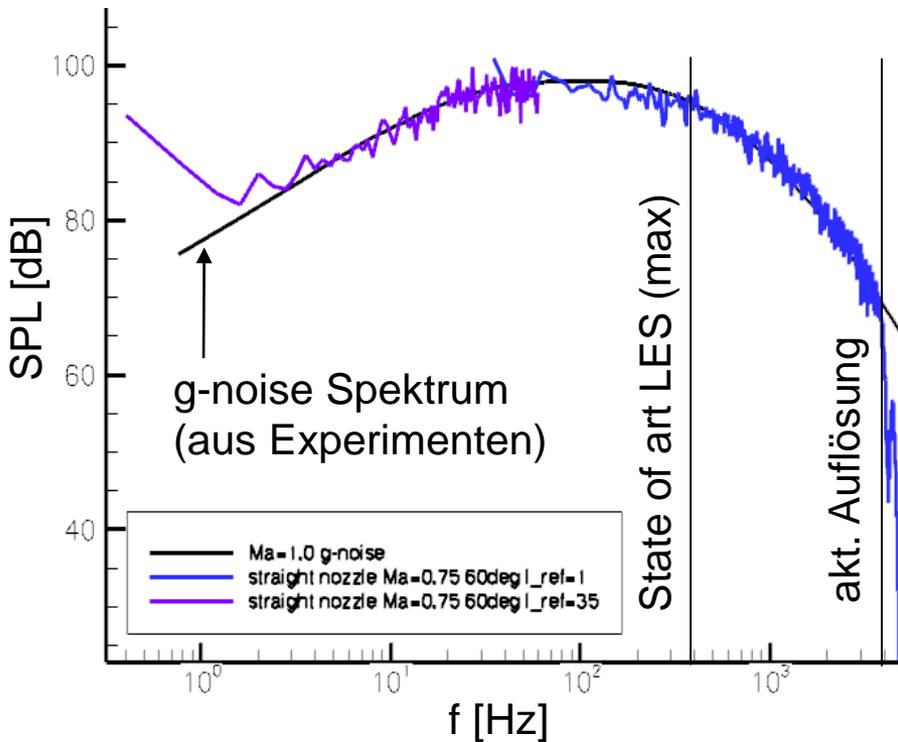
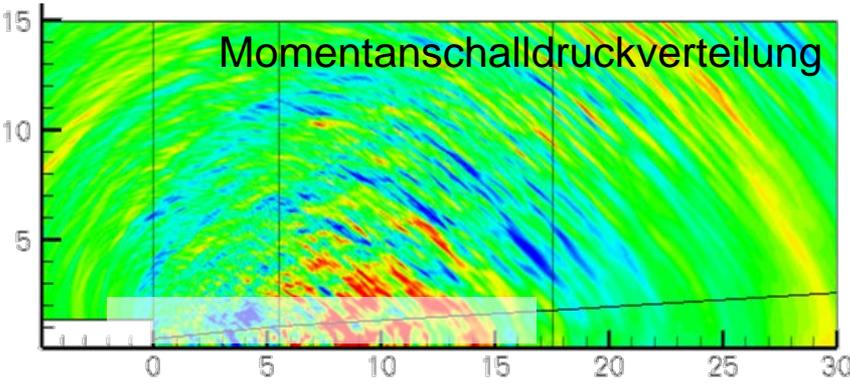
TKE
Zeit-
skale
Längen-
skale

- Einfachstrahl, kalt
- Düsendurchmesser 1m
- Machzahl 0.3...0.95
- $Sr = 0.1 \dots 10$

Quellterm nach Tam/Auriault
mit FRPM stochastisch realisiert



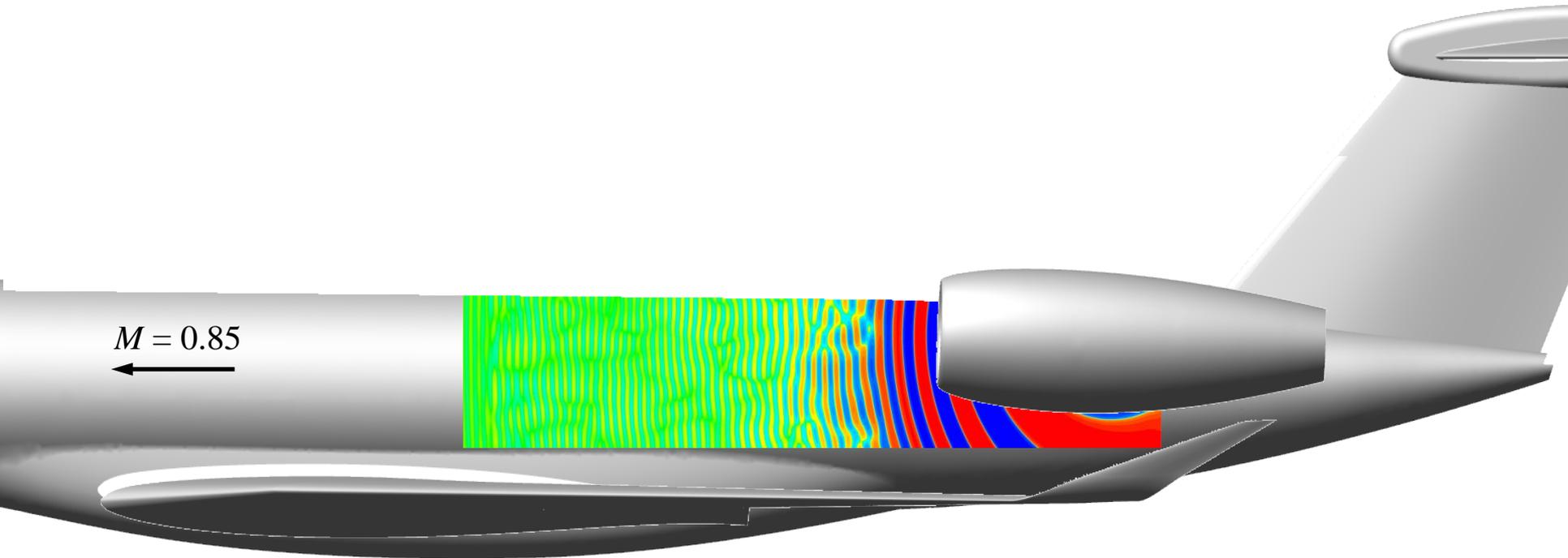
Momentanschalldruckverteilung



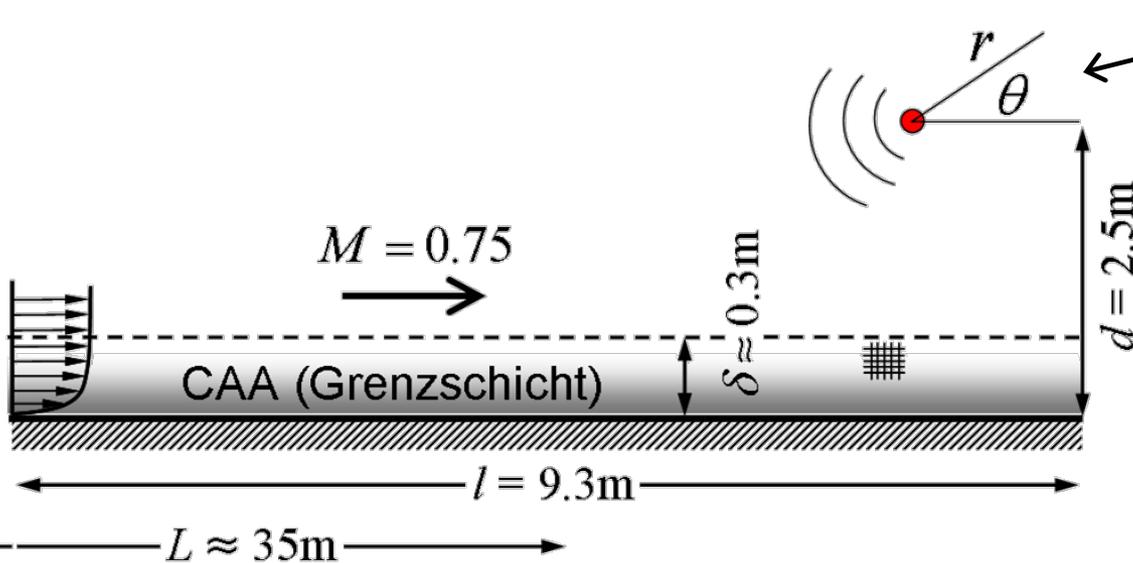
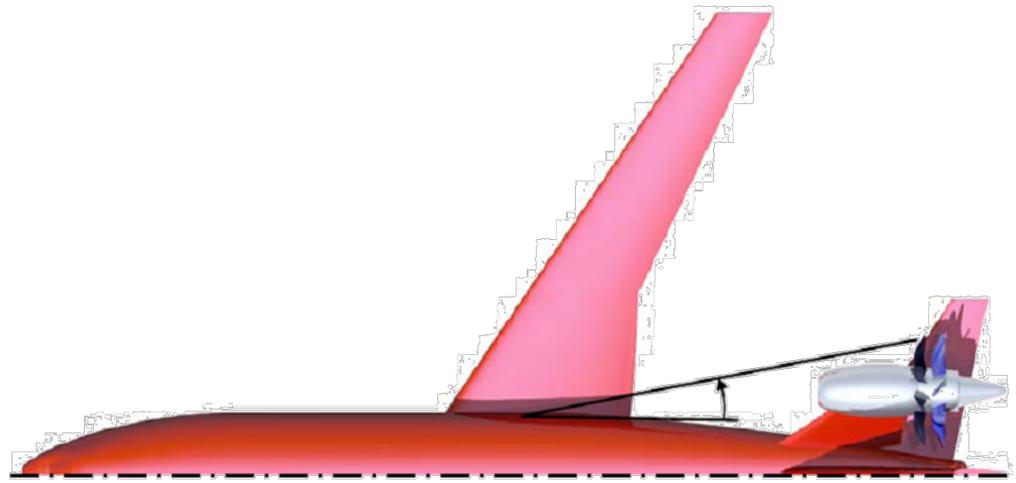
Simulation von Druckfluktuationen auf Rumpf (Reiseflug)

3 Ursachen für turbulenzbedingte Druckschwankungen:

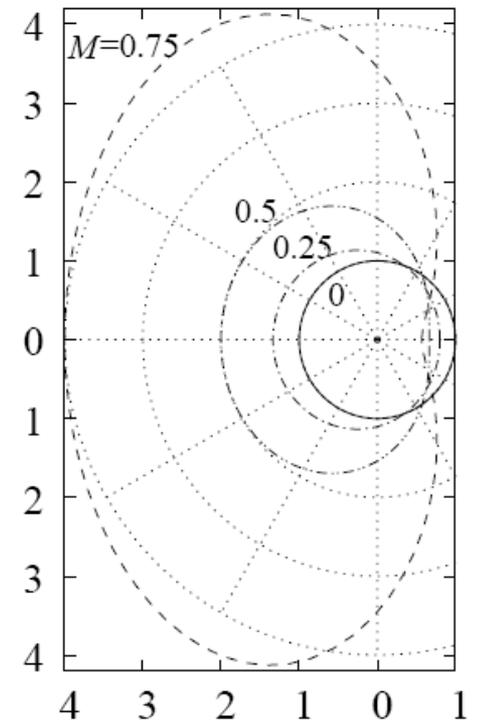
- hydrodynamisches Druckfeld der turbulenten Grenzschichtwirbel
- Strahlschall
- Streuung von Triebwerkstönen in turbulenter Grenzschicht an Rumpf



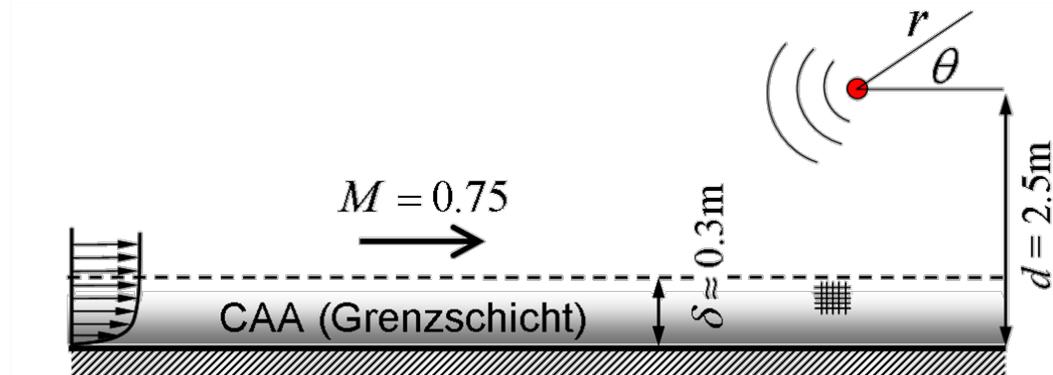
Rumpfschalldruck aus Tonsignalen vom Triebwerk



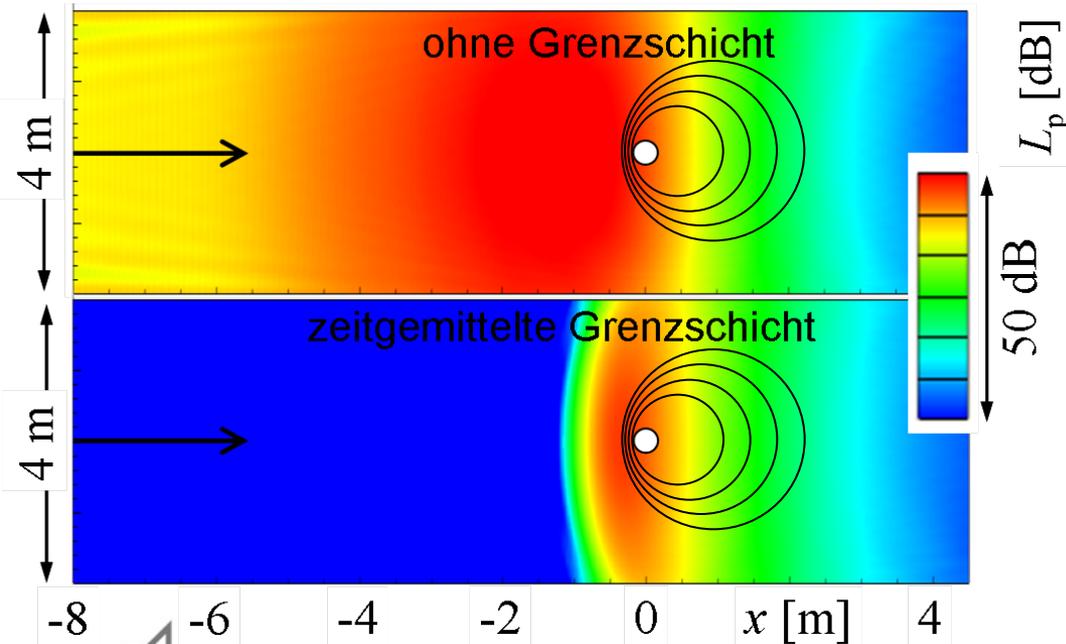
Zunächst vereinfachte Modellierung von Triebwerk Als Monopolschallquelle



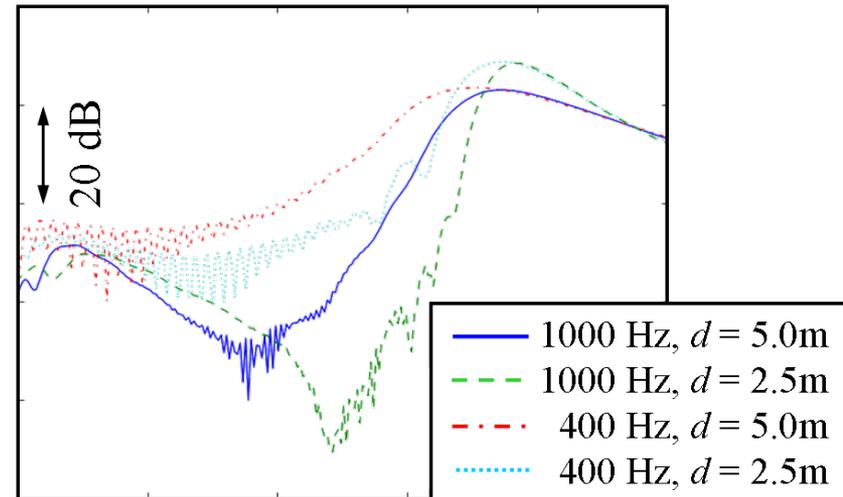
Rumpfschalldruck aus Tonsignalen vom Triebwerk



Oberflächendruckpegel von Punktquelle Sicht von oben auf Platte

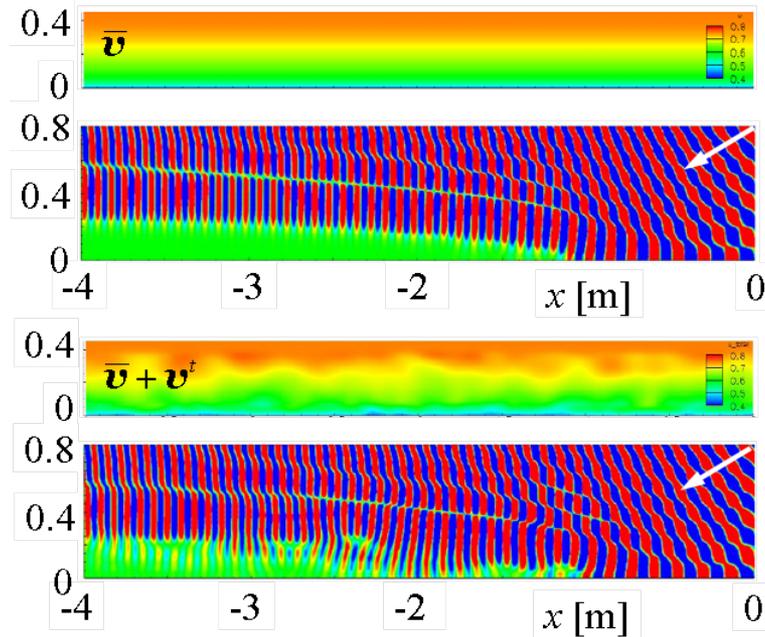
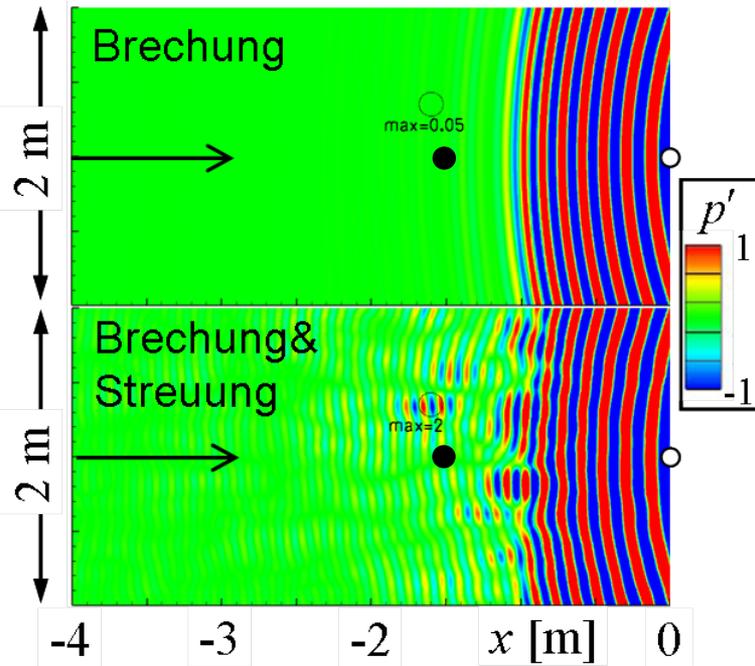


Brechung



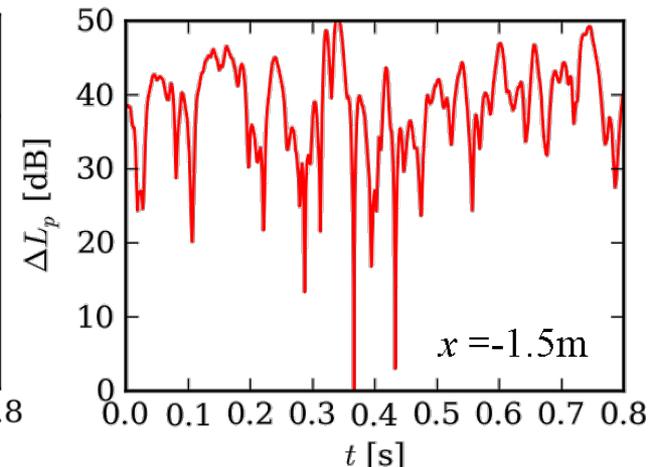
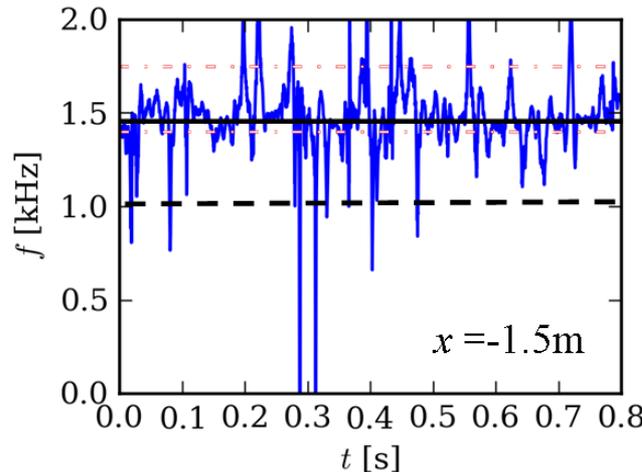
Lauter bei größerem Abstand!
(Einfallswinkeleffekt)

Rumpfschalldruck aus Tonsignalen vom Triebwerk



Brechung + Streuung an bewegten turbul.-Wirbeln (Quellfrequenz 1kHz)

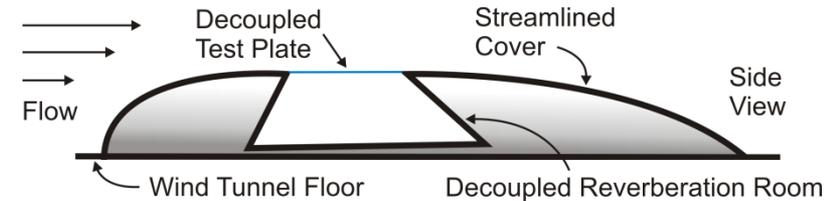
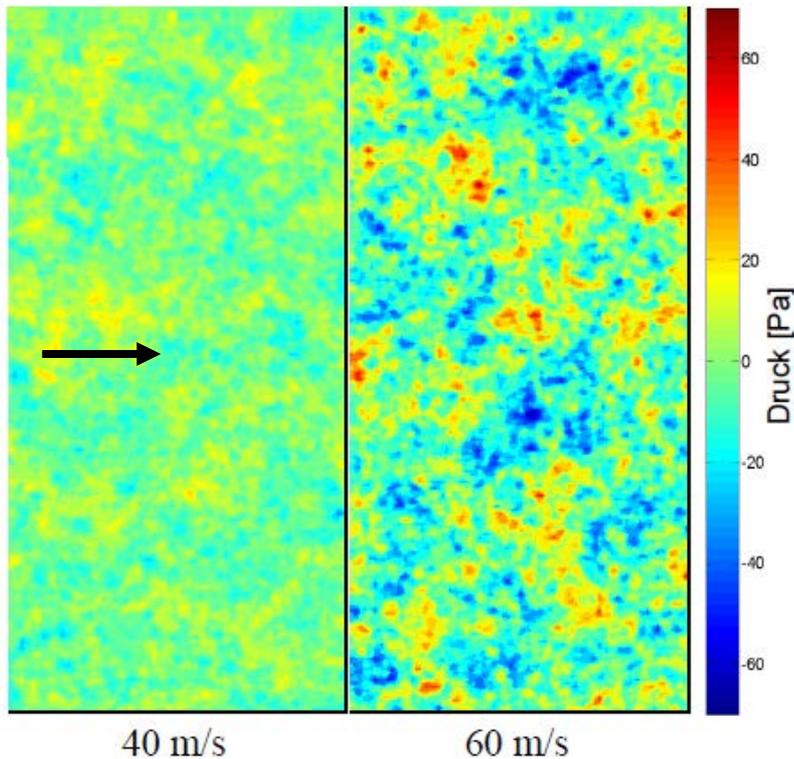
⇒ Dopplerverschiebung (positionsabhängig) !



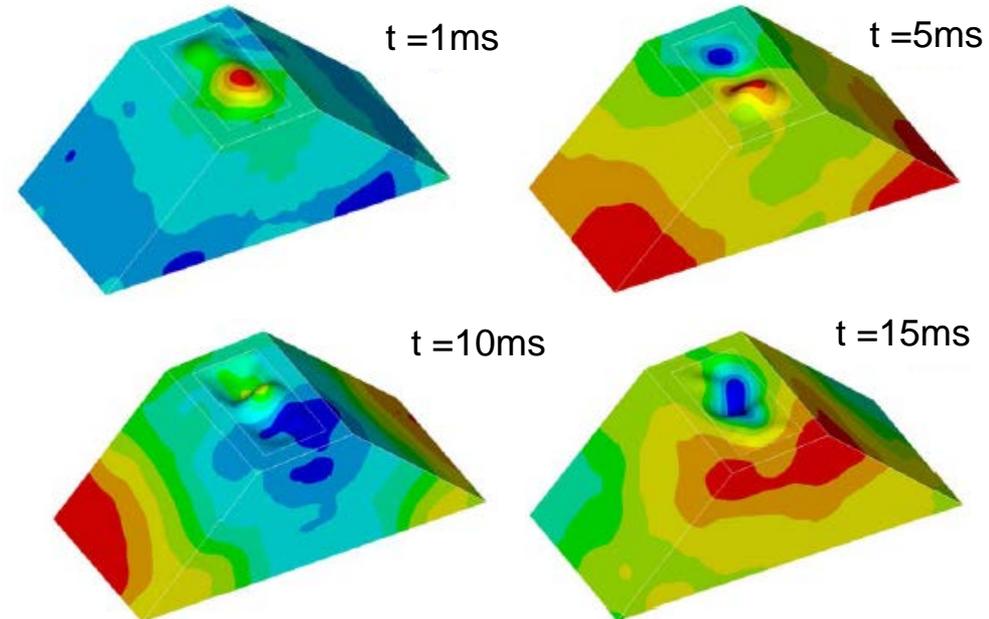
Rumpfdruckfluktuationen aus Grenzschichtturbulenz

Stochastisches Wanddruckmodell

RPM stochastische Anregung
(Momentanverteilung Druck, Sicht
von oben auf Platte)

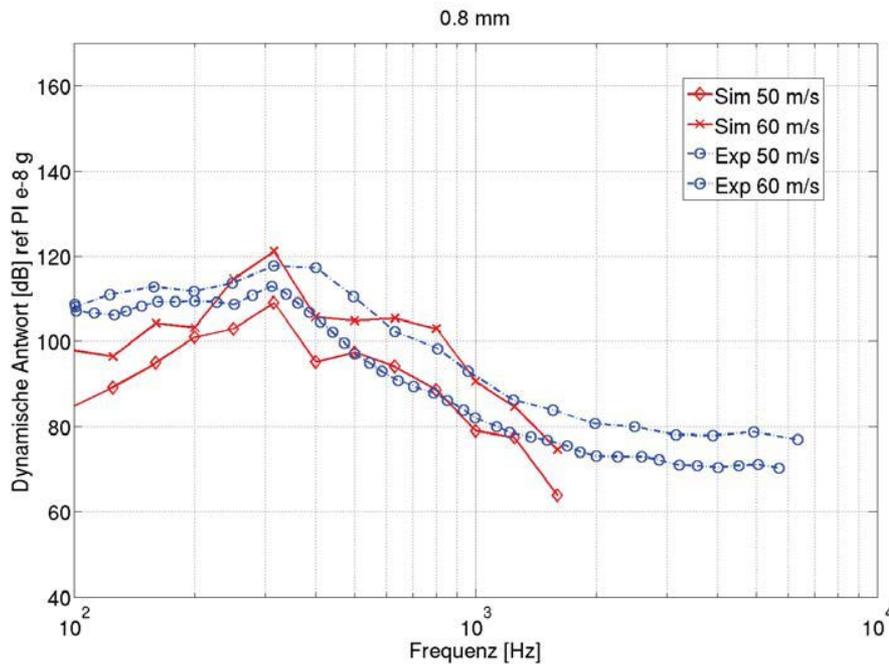
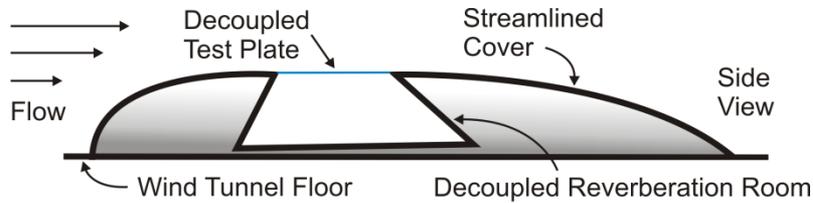


Kopplung mit ANSYS (Zeitbereich)

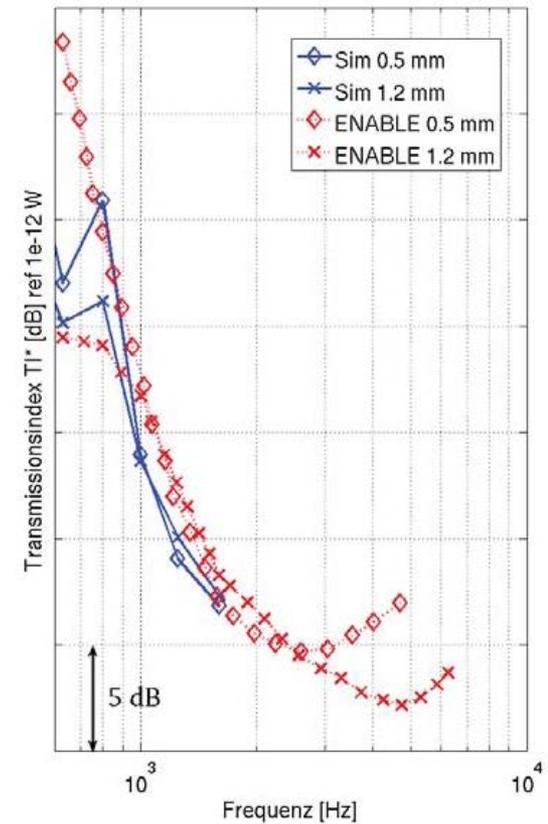


Vibration einer 1.2mm Aluminium Platte
(ENABLE EU-Projekt).

Validierung der Kopplung CAA - CSM



Dynamische Plattenantwort



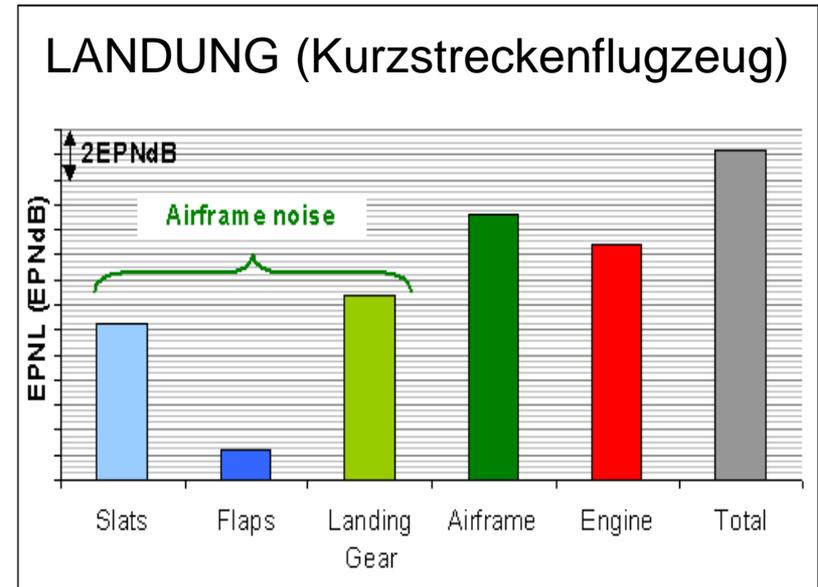
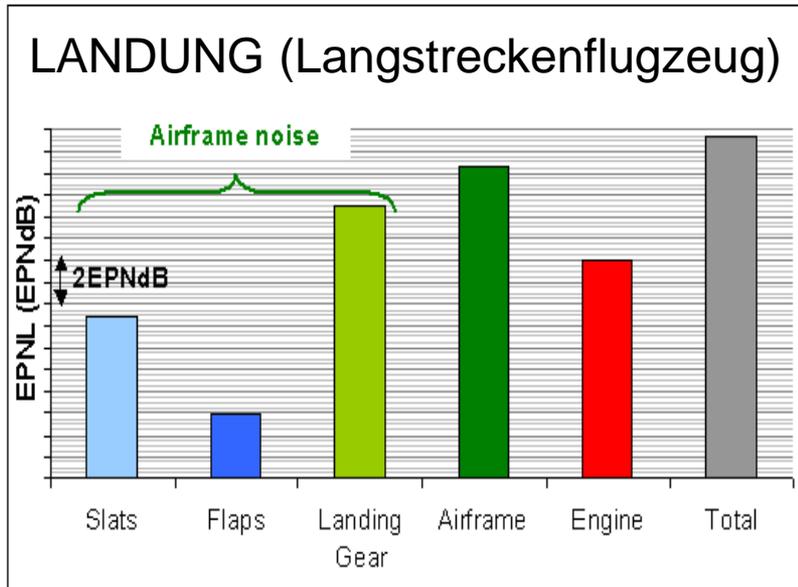
Transmissionsindex

Minderung von Strömungsschall

- durch quellmindernden aero-/akustischen Entwurf
- durch Quellbeeinflussung mittels Zusatzmaßnahmen



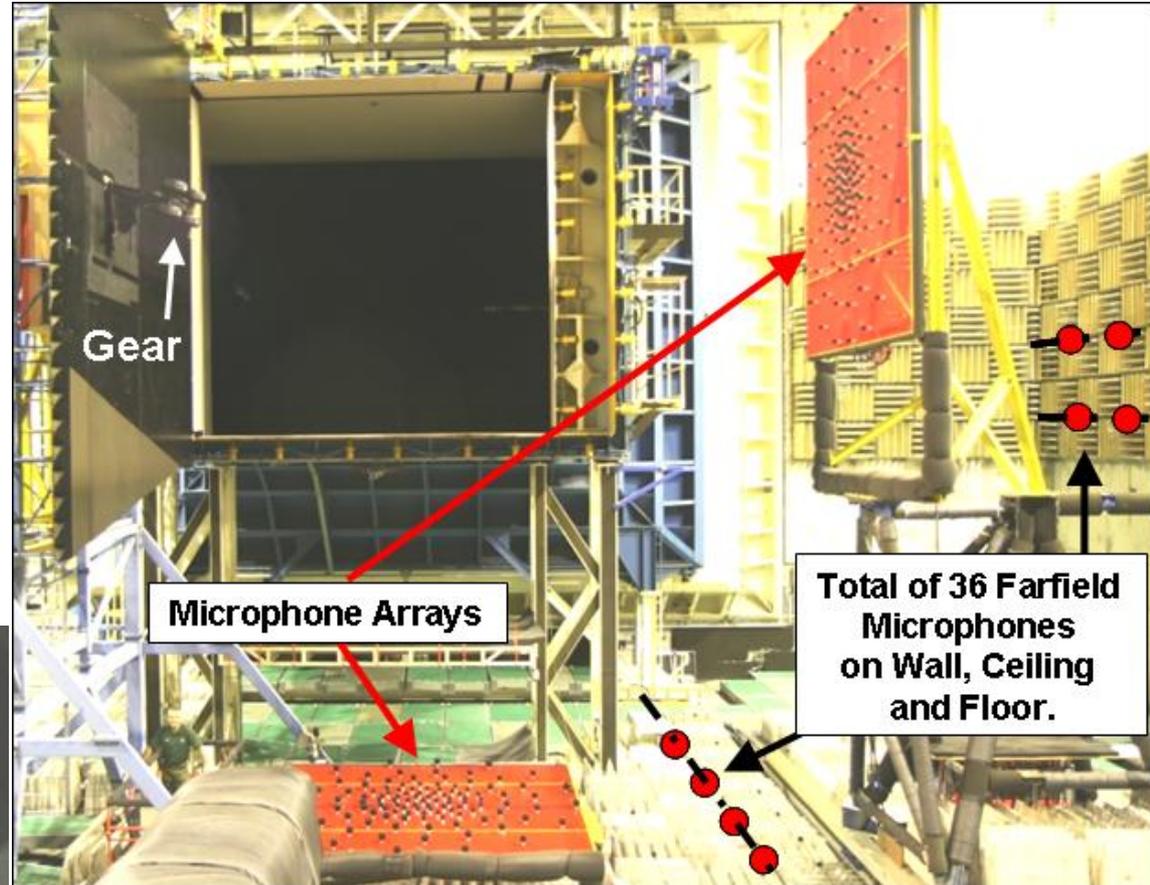
Quellengewichte am Gesamtflugzeug



Quelle: Airbus

Analyse von Fahrwerkslärm

- EU TIMPAN Projekt
- ¼-skaliertes A340-artiges Haupt-FW an Seitenwand im DNW-LLF 6m x 6m offene Messstrecke
- Fernfeldmikrophone für 3D Richtwirkung, $0.1 \text{ kHz} < f < 20 \text{ kHz}$
- Zwei Mikrophonarrays (von unten und Seite)



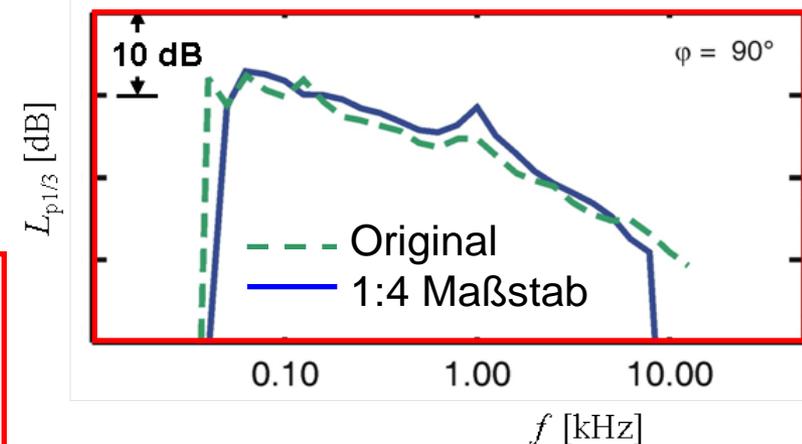
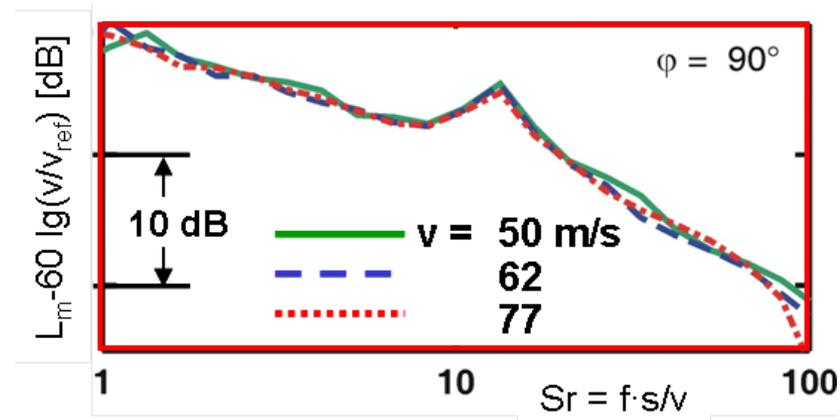
Skalierungsgesetze bei Fahrwerken

- Frequenzskalierung basierend auf Strouhalzahl:

$$St = \frac{f \cdot s}{v} = const.$$

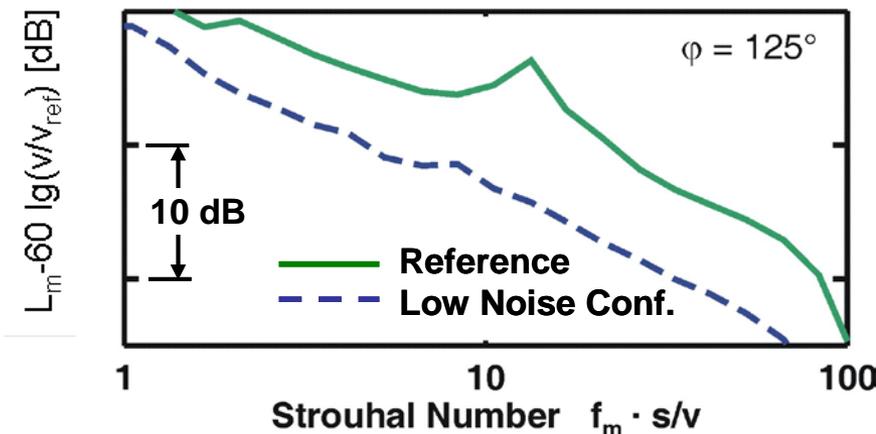
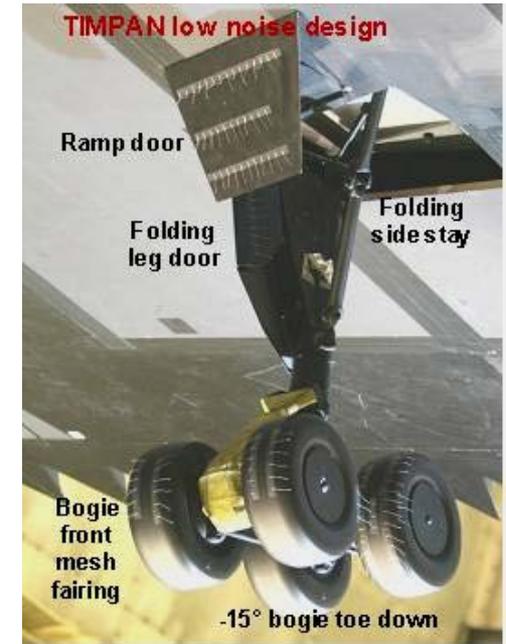
- Pegelskalierung basierend auf dipolartiger Schallquelle mit Quelldimension s:

$$L_{ref} = L_{meas} - 10 \cdot \log \left(\frac{v_{meas}}{v_{ref}} \right)^6 + 10 \cdot \log \left(\frac{s_{ref}}{s} \right)^2 + 10 \cdot \log \left(\frac{r_{meas}}{r_{ref}} \right)^2$$



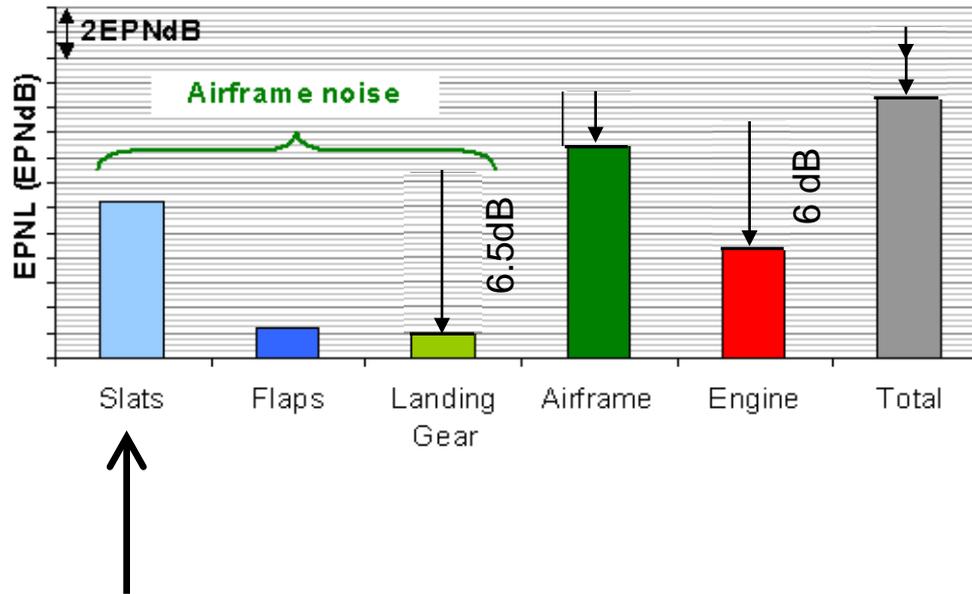
Geräuschminderungspotenzial bei Fahrwerk

- Optimale Kombination von Maßnahmen liefert bis zu **8 dB(A)** Minderung
- Reduktion besonders wirksam stromauf + für hohe Frequenzen
- Maßnahmen enthalten:
 - -15° Anstellung
 - Durchlässige Verkleidung an Fahrgestell und Verbindungselem.
 - Bremsenverkleidung
 - Anstellbare FW-Tür mit neuer Seitenstütze und Rampentür



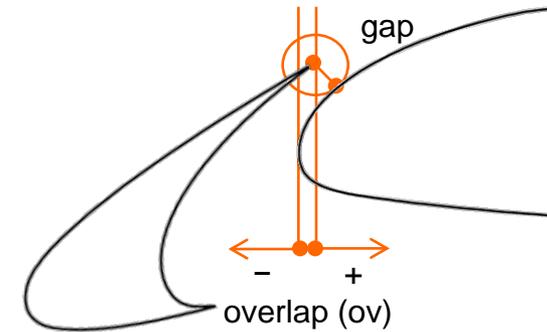
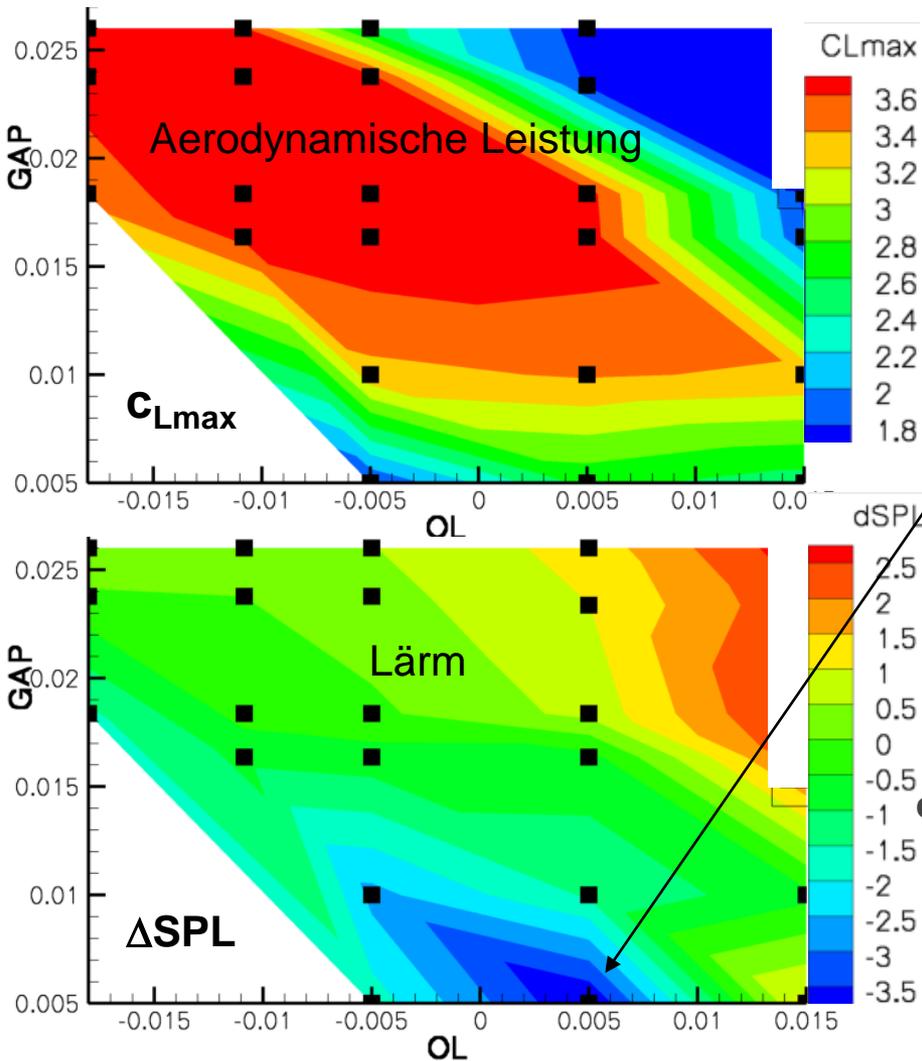
Quellengewichte am Gesamtflugzeug

Hypothese: Fahr- und Triebwerkklärm können reduziert werden



Simulationsbasierter aeroakustischer Entwurf

lärmoptimale Klappensetzung



Achtung: vermeintlich leiseste Vorflügelposition besitzt geringe aerodynamische Leistung
 \Rightarrow Zwang zu schnellerem Fliegen*
 \Rightarrow Pegel steigt mit Fluggeschwind. wieder an!

*) Fluggeschwindigkeit v muss nach Zulassungsanforderungen an aerodyn. Leistung angepasst werden entsprechend

$$C_{Lmax} v^2 = const \Rightarrow$$

$$\frac{v}{v_{ref}} = \sqrt{\frac{C_{Lmax_{ref}}}{C_{Lmax}}} \Rightarrow p_{rms}^2 \sim v^5 \sim C_{Lmax}^{-5/2}$$

Schallintensität skaliert mit v^5

Strömung: TAU, Schall: PIANO



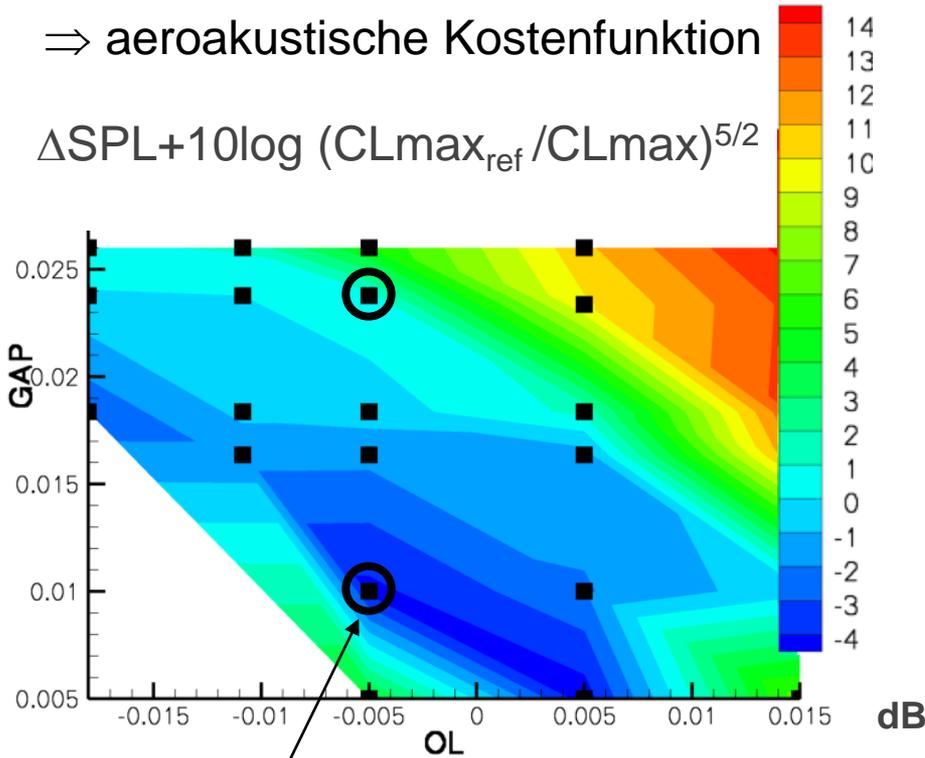
Simulationsbasierter aeroakustischer Entwurf

Optimale Klappensetzung

Multidisziplinäre Kombination von aerodyn. Leistung und Lärm (s.o.) in

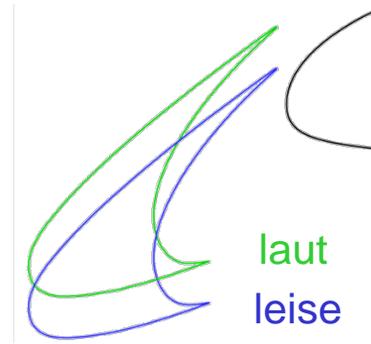
⇒ aeroakustische Kostenfunktion

$$\Delta\text{SPL} + 10 \log \left(\frac{\text{CLmax}_{\text{ref}}}{\text{CLmax}} \right)^{5/2}$$

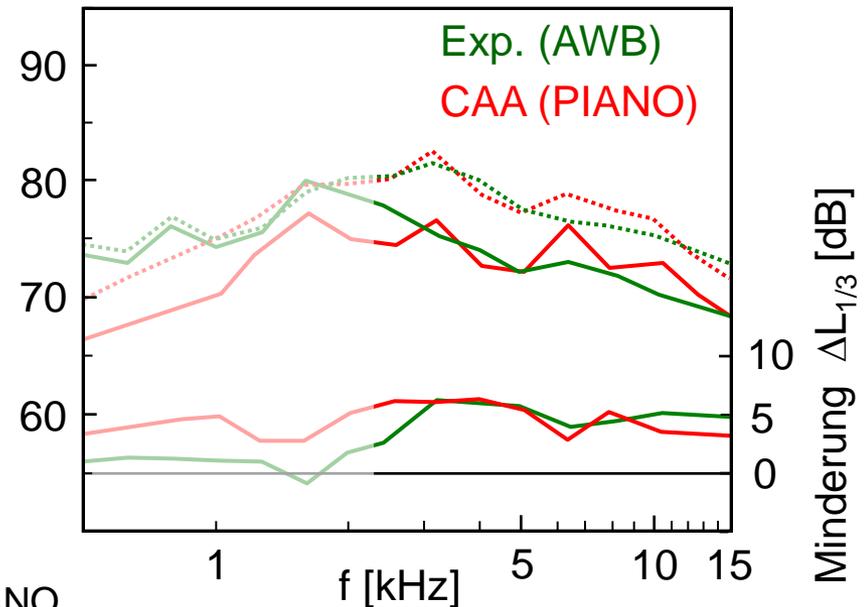


Aeroakustisches Optimum

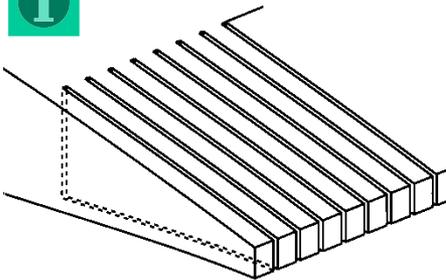
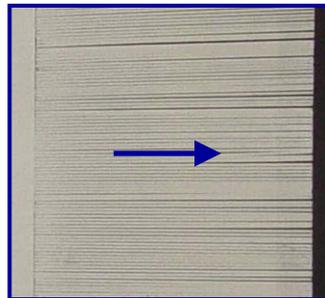
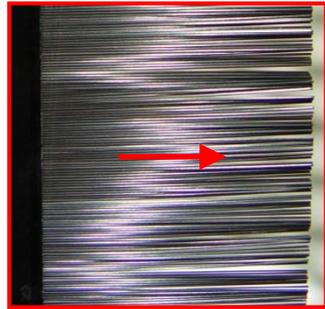
Strömung: TAU, Schall: PIANO



$L_{1/3}$ [dB] Validierung mit Experiment

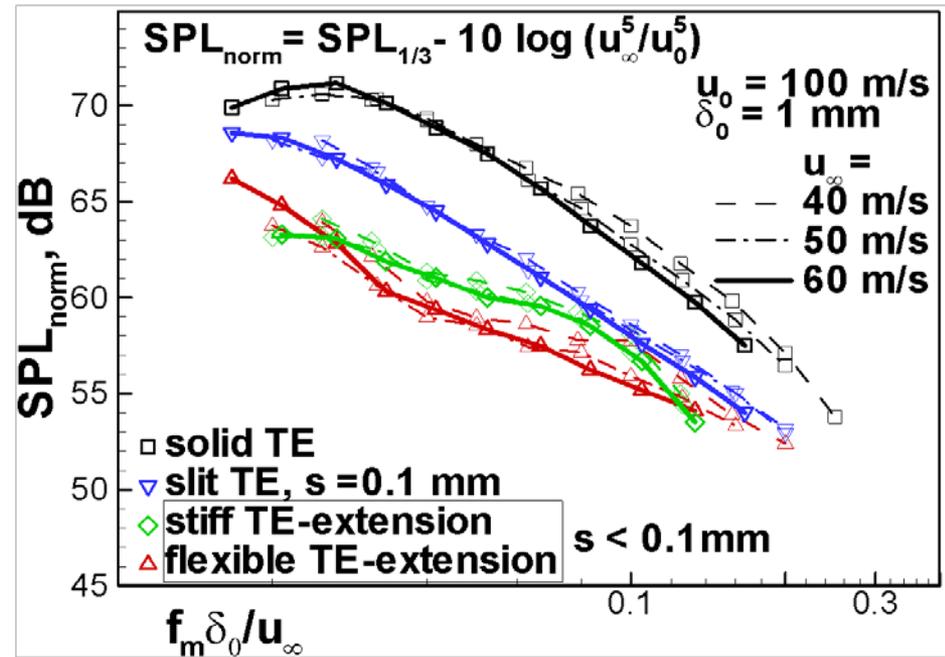
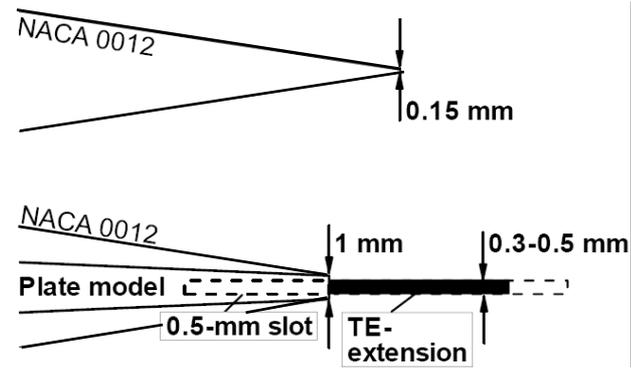


Lärminderungstechnologien – Hinterkantenmodifikationen



Feinstschlitze

RANS: praktisch keine Auftriebseinbußen*

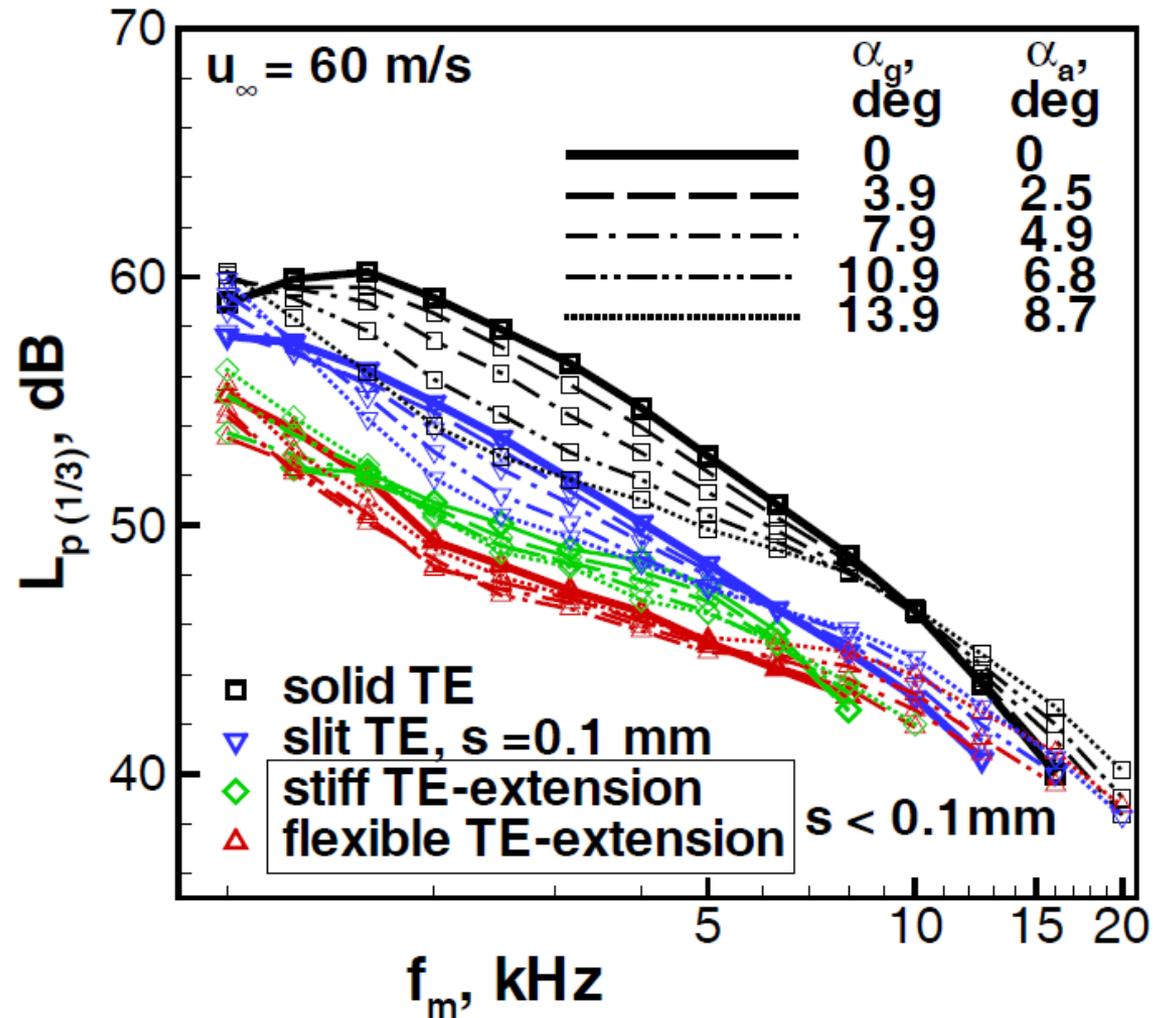


*) Ortmann, J., Wild, J., *Journal of Aircraft*, Vol. 44, No.4, 2007

Hinterkantenlärmsenkung unter aerodynamischer Last



NACA0012

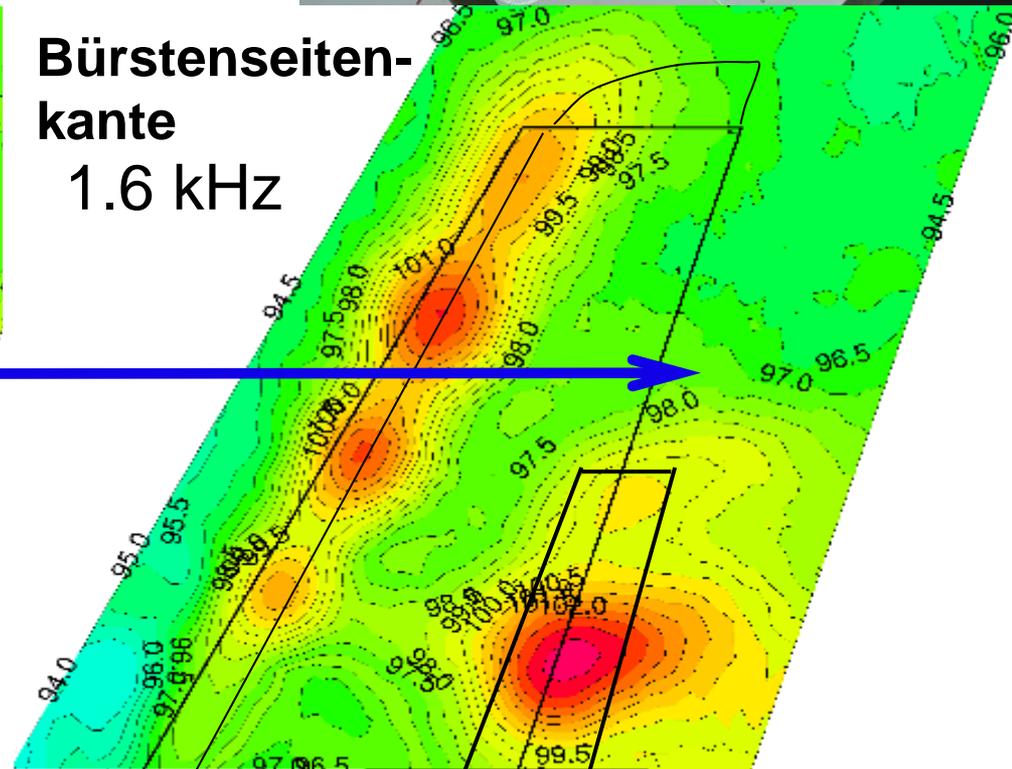
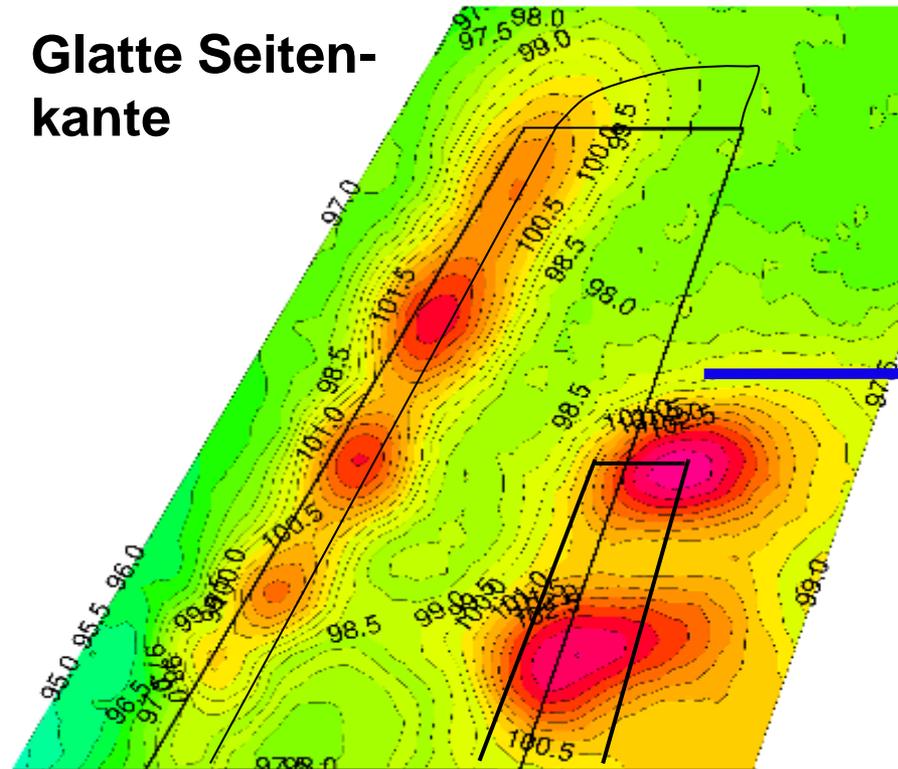


Breitbandlärmreduzierung an Kanten



Glatte Seitenkante

Bürstenseitenkante
1.6 kHz



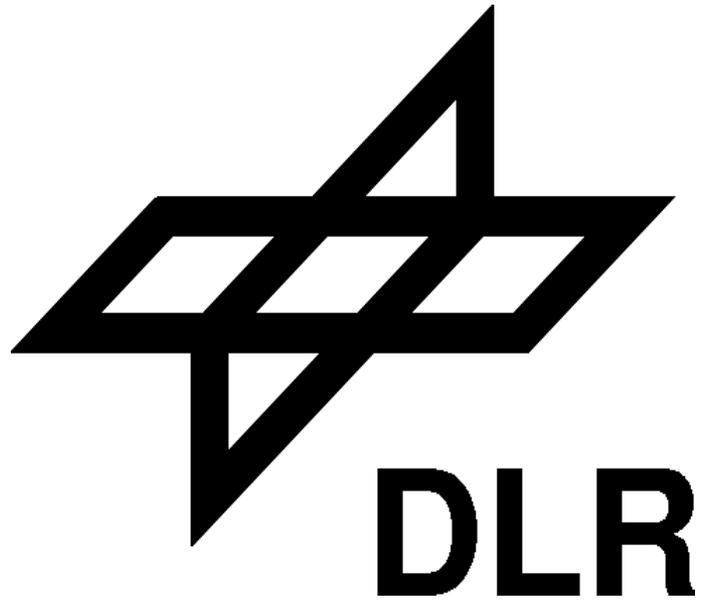
Zusammenfassung

- Mehrzahl der aerodynamischen Außen- und Innenschallquellen am Flugzeug sind turbulenzbedingt und sehr schwer direkt zu simulieren
- Turbulenzbedingte Schallquellen können in vielen Fällen zeitlich-räumlich geeignet stochastisch modelliert werden: FRPM
- RANS+FRPM+LEE/APE Konzept breit einsetzbar, gering. Rechenaufwand
- Erhebliche Streuungseffekte von Rumpfgrenzschicht im Reiseflug (kaum erforscht)
- Entwurf lärmarmere Bauteile machbar auf Basis Δ SPL
- Strömungsdurchlässige Materialien zeigen hohes Minderungspotenzial, Wirkungsweise nicht verstanden und (noch) nicht simulierbar

Ausblick

- Wirkung strömungsdurchlässiger Materialien zur Reduzierung von Umströmungsgeräusch muss simulierbar werden für gezielten Einsatz (SFB880)
- Validierung von CAA ist wichtiges Zukunftsthema:
 - Großskalentests zum Ausschalten von Artefakten (Tonphänomene)
 - Noch leisere Windkanäle mit hoher Strömungsqualität für Schallquellen geringer Intensität
 - Bessere aeroakustische Windkanalkorrekturen („wie valide ist ein Validierungsversuch?“)
 - Neue Ideen zu leisen Modellaufhängungen
- Etablierung von unstrukturierten CAA Lösern für komplexe Geometrien (Fahrwerke, Details an Hochauftriebssystemen etc.)
- Mid-Fidelity CAA für nicht-empirische Schallvorhersage ganzer Flügel/FW
- Adaptive / Aktive Minderung von Strömungsschallquellen

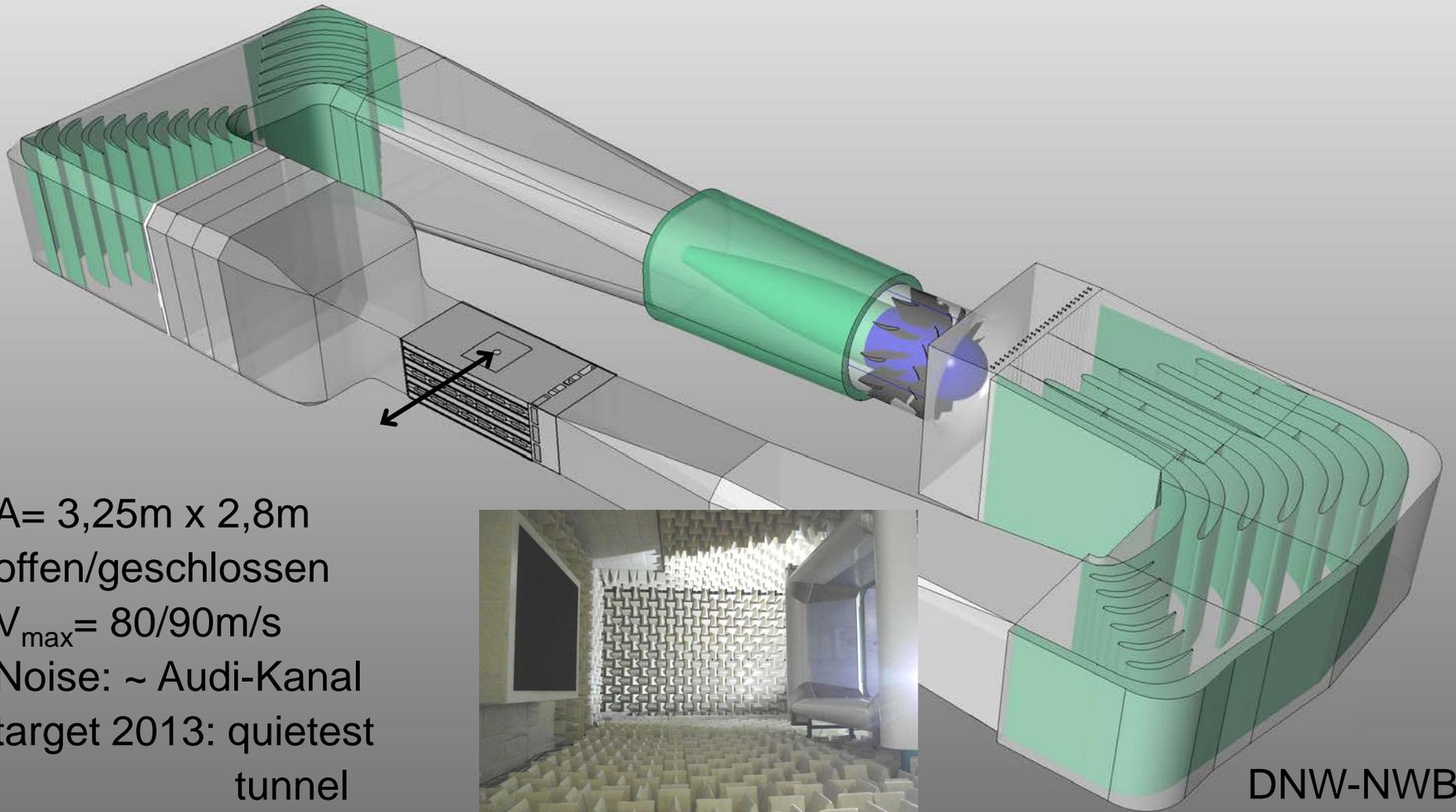




DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Appendix 1: Aeroakustischer DNW-NWB Braunschweig (Einweihung 02.12.2010)

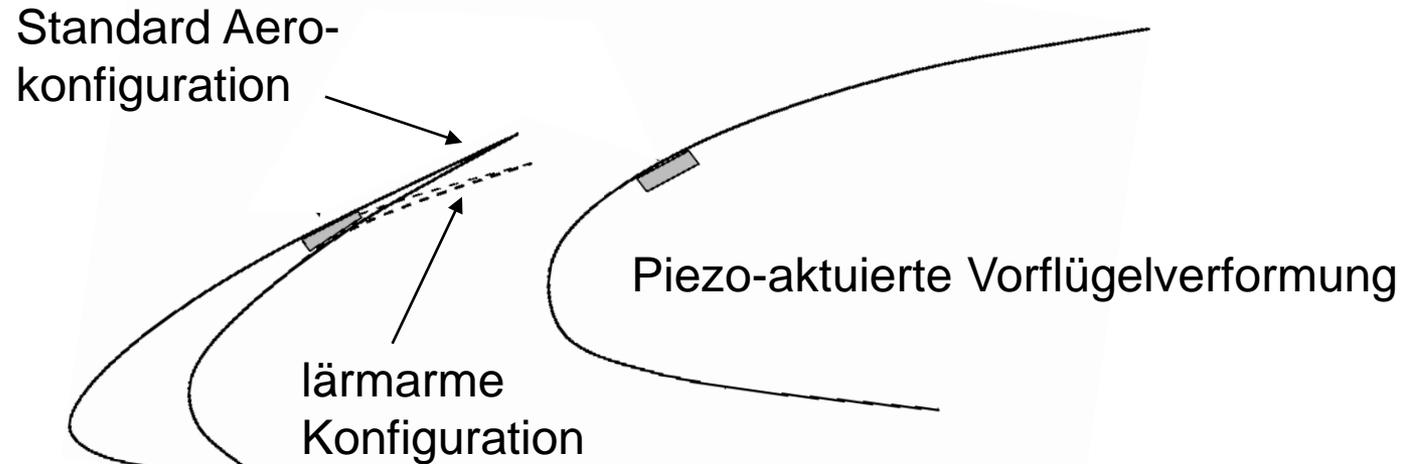


$A = 3,25\text{m} \times 2,8\text{m}$
offen/geschlossen
 $V_{\text{max}} = 80/90\text{m/s}$
Noise: ~ Audi-Kanal
target 2013: quietest
tunnel

DNW-NWB



Appendix 2: Adaptive Minderung von Vorflügelgeräusch



Auslegung mittels CFD/CAA/CSM

EU OPENAIR
DLR SLED