



# **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:**

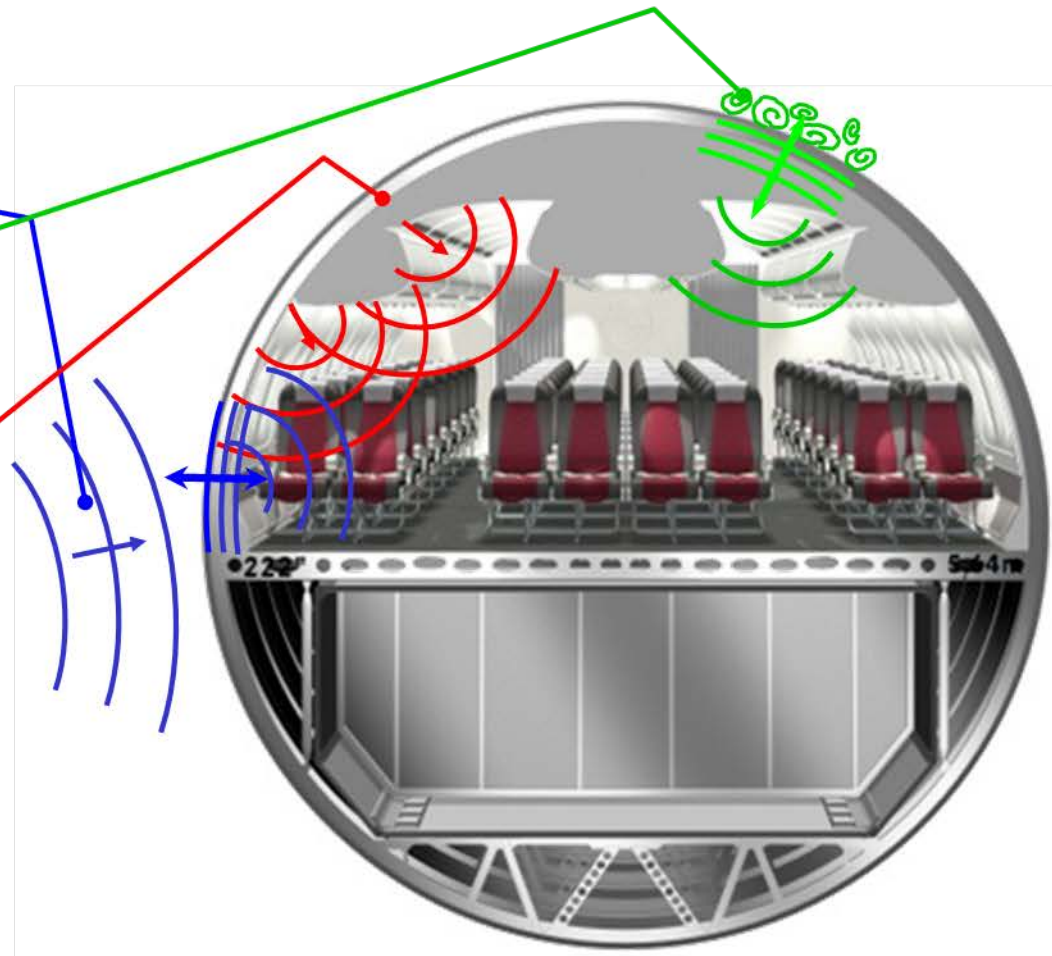
Triebwerksluftschall

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

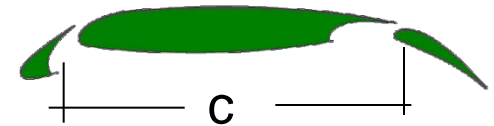
# Problemstellung der Berechnung turbulenzbedingter Strahler

## 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

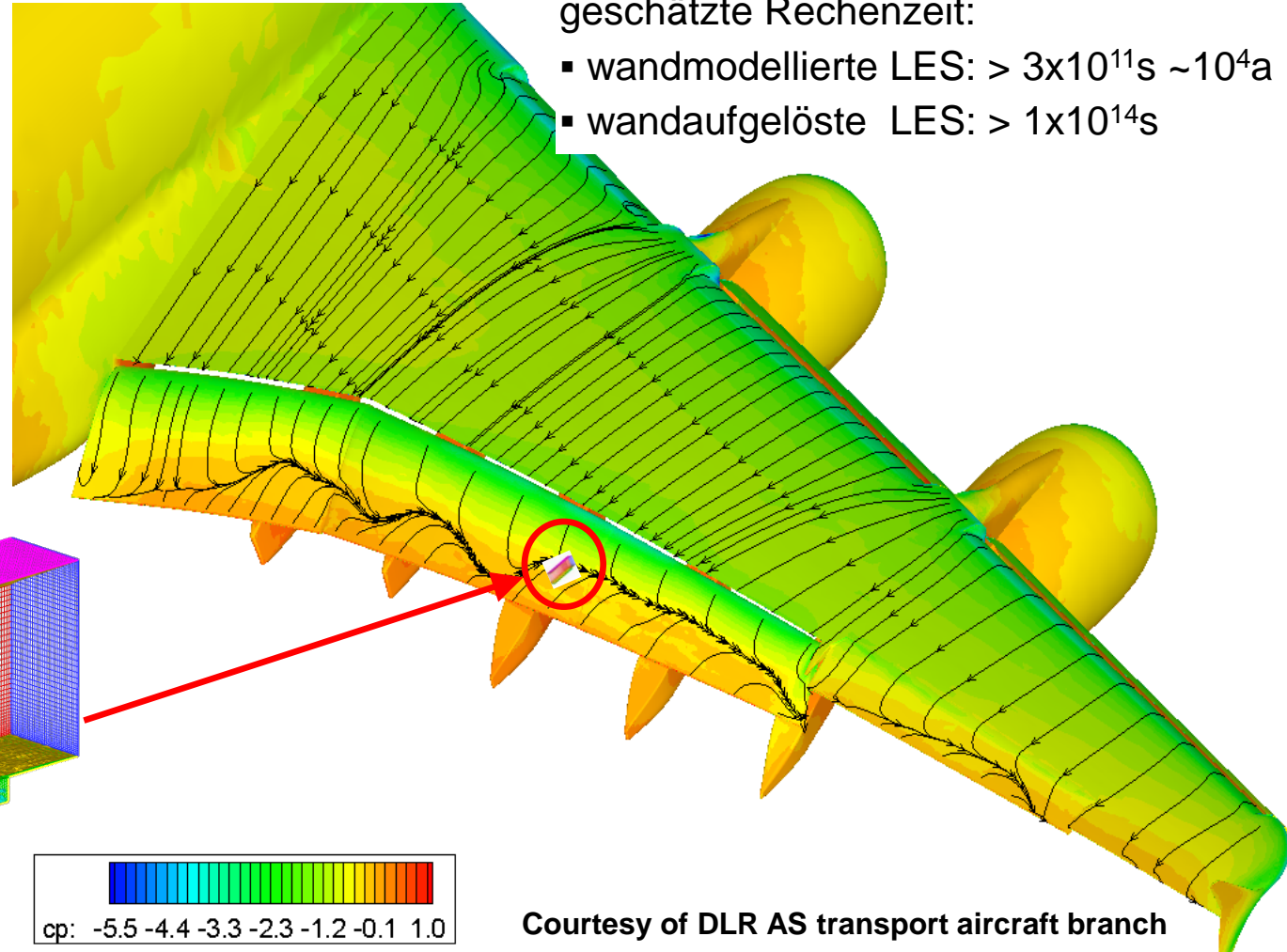
(LES - Large Eddy Simulation)

Flügelfläche: 10m x 40m

geschätzte Rechenzeit:

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

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



Courtesy of DLR AS transport aircraft branch

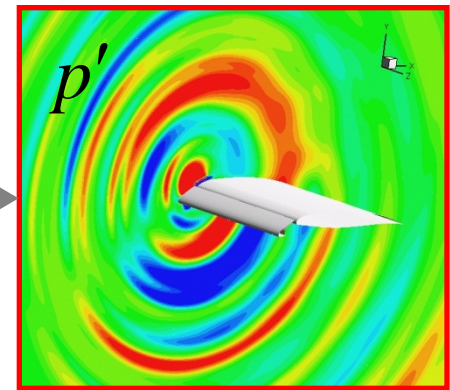
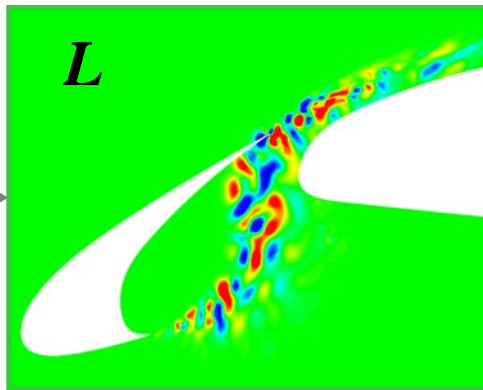
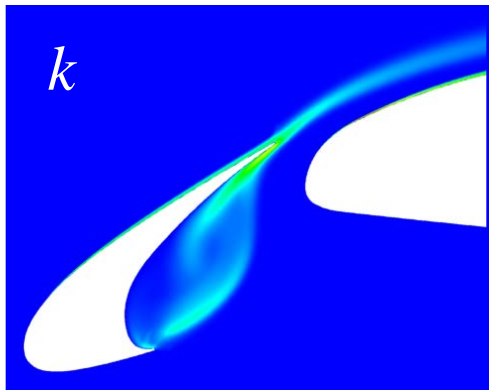
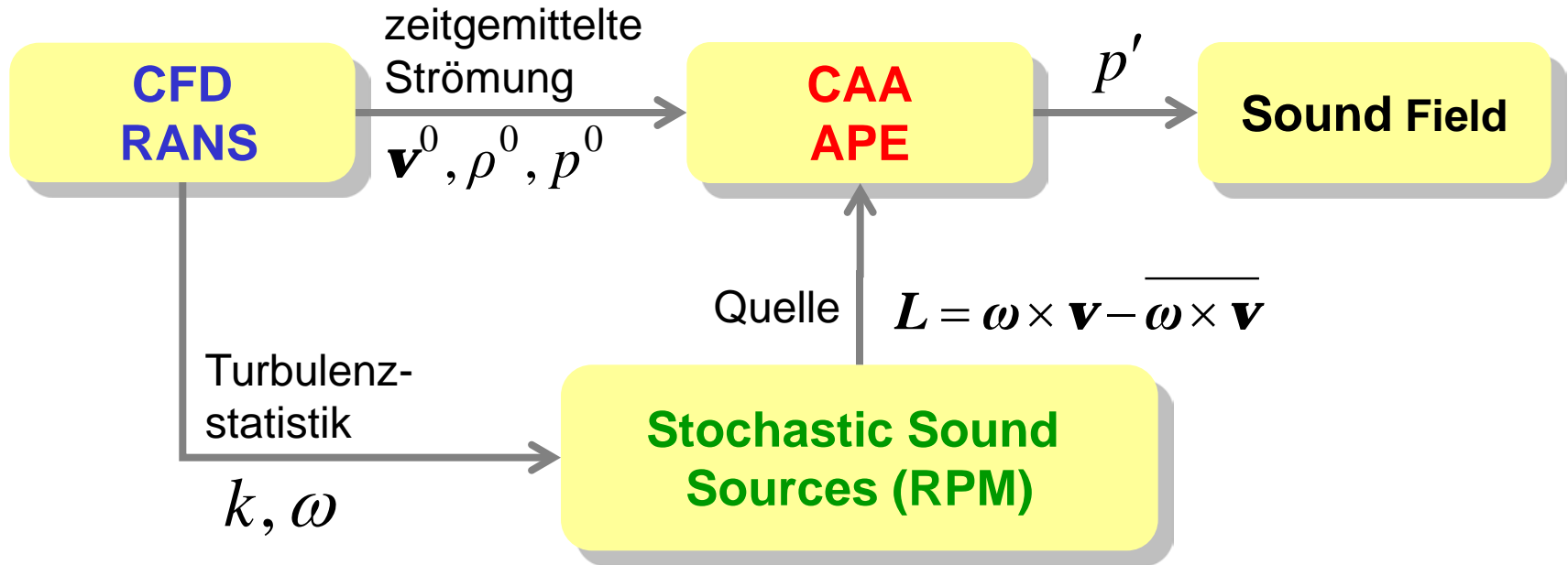
# Stochast. Turbulenzmodellierung & numerische Simulation



DLR

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

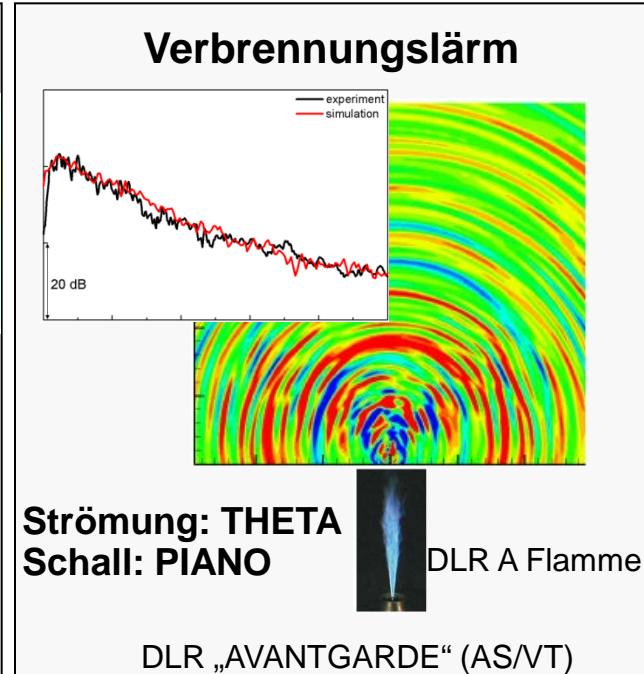
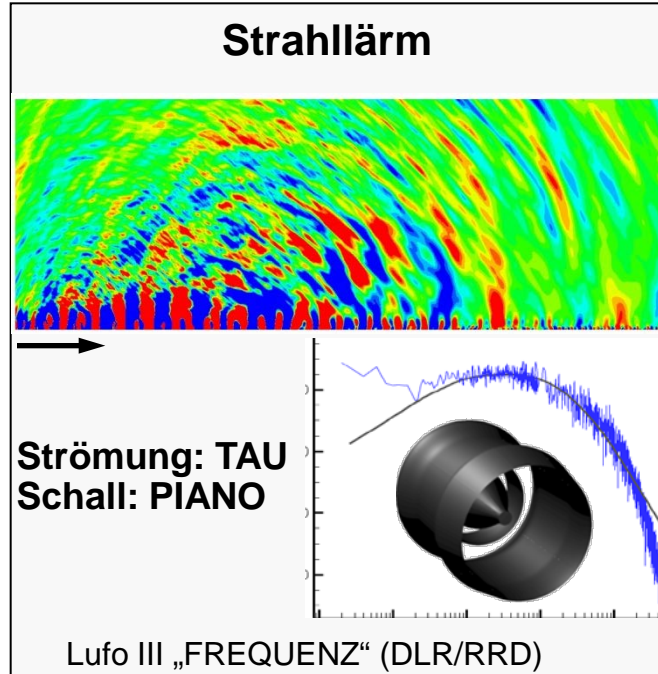
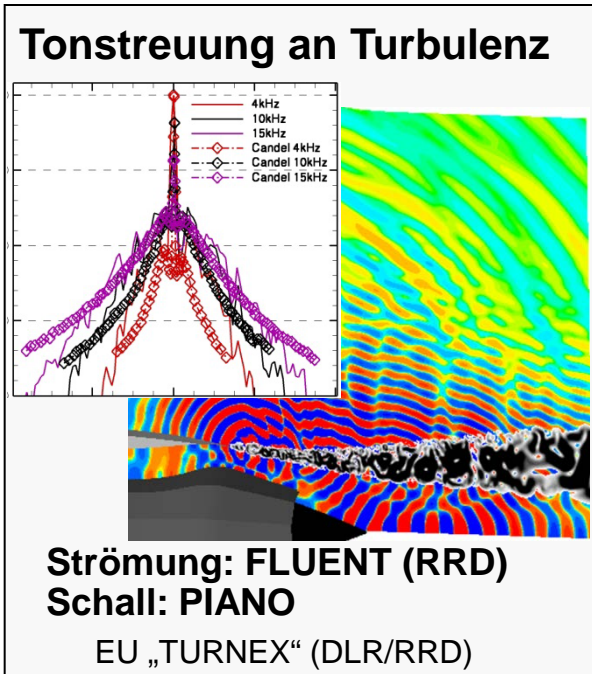
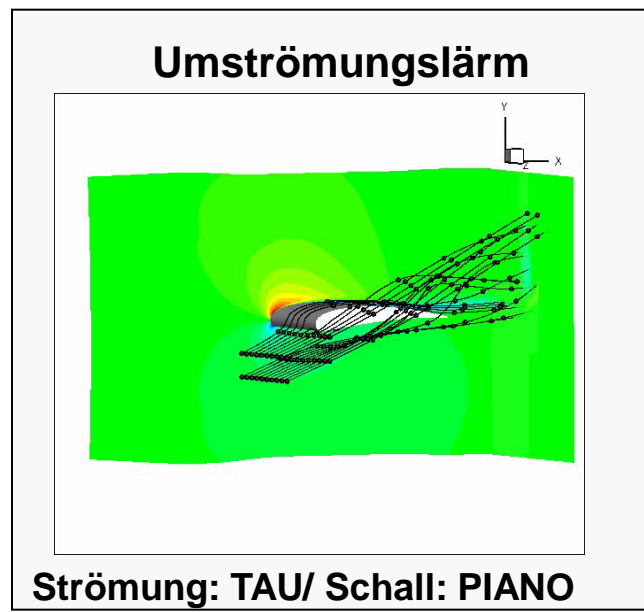
# Aeroakustisches Simulationskonzept



# Hybrider RANS/CAA Ansatz



⇒ 2-4 Größenordnungen schneller als LES



# Simulation – Beispiele



DLR

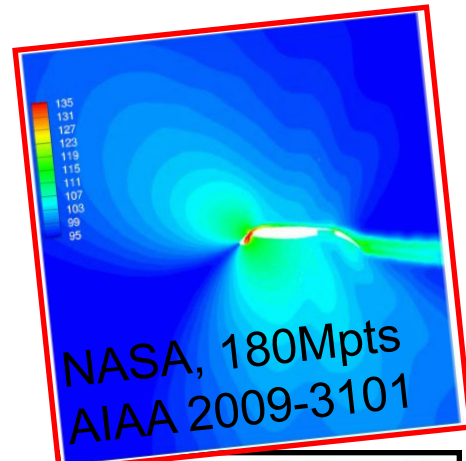
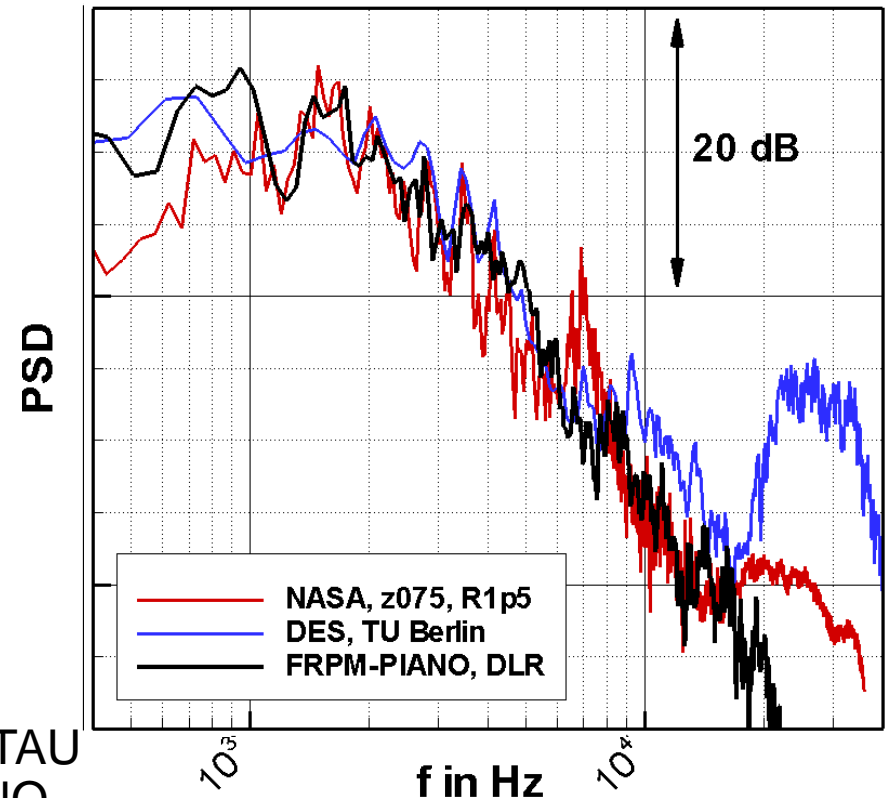
Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

# Schallabstrahlung von Hochauftriebsprofil 30P30N

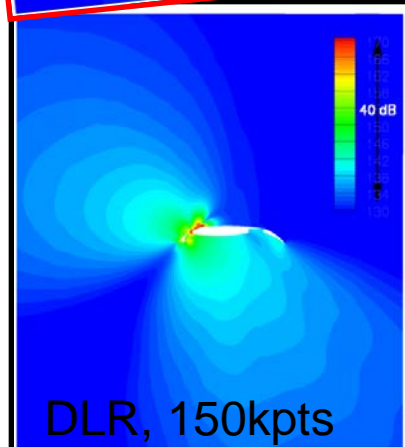
- Vergleich stochast. Ansatz (PIANO) mit anderen Gruppen



290° w.r.t. flow



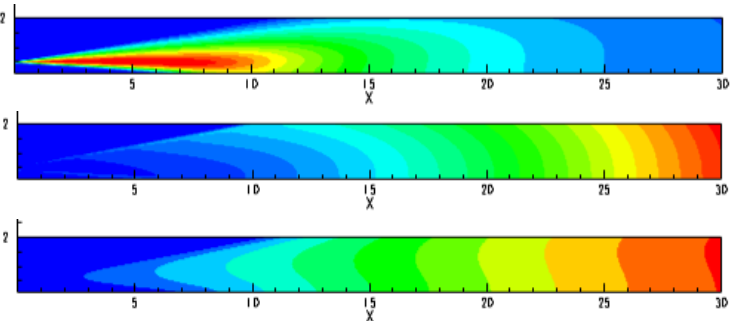
$p_{rms}$



Strömung: TAU  
Schall: PIANO



# Strahlärmvorhersage



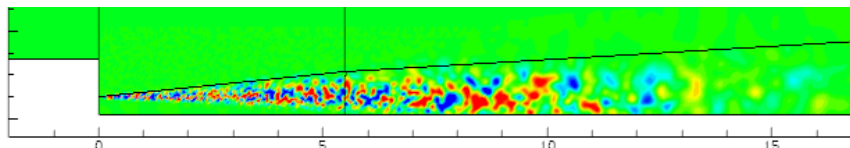
TKE

Zeit-  
skale

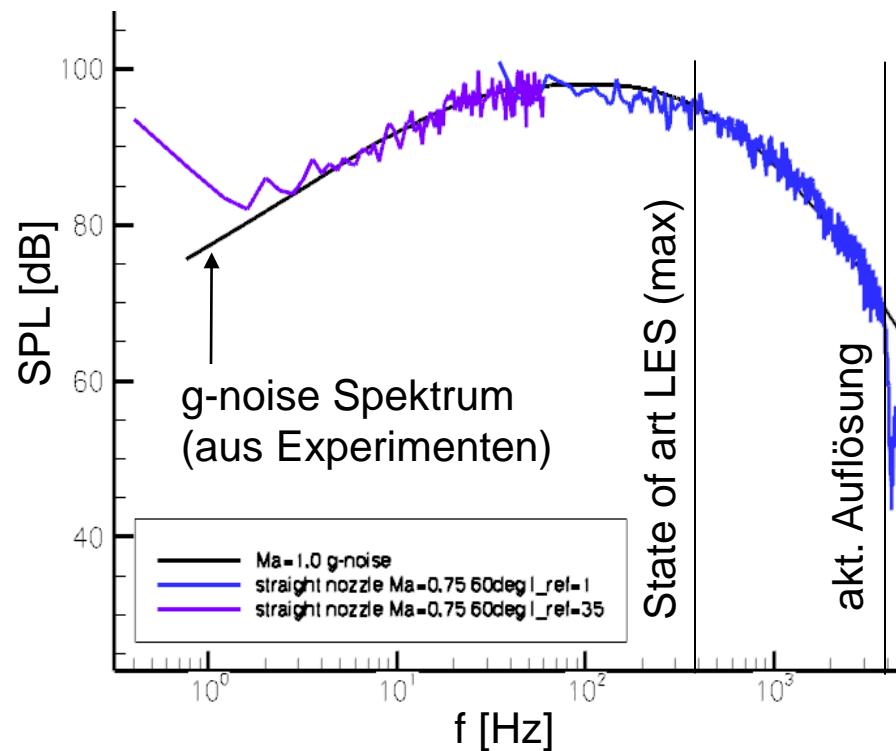
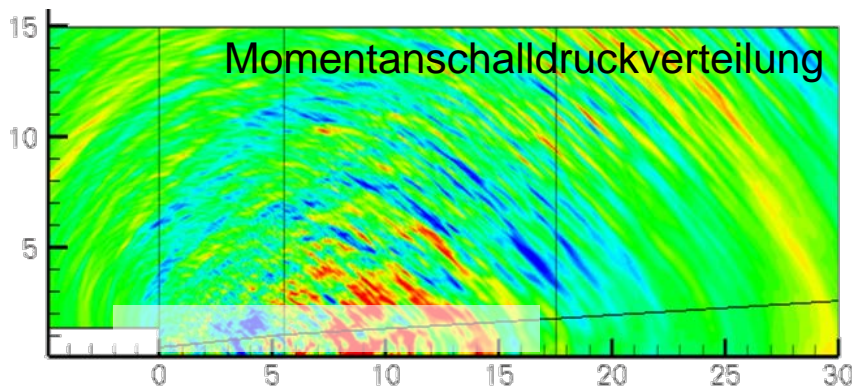
Längen-  
skale

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

Quellterm nach Tam/Auriault  
mit FRPM stochastisch realisiert



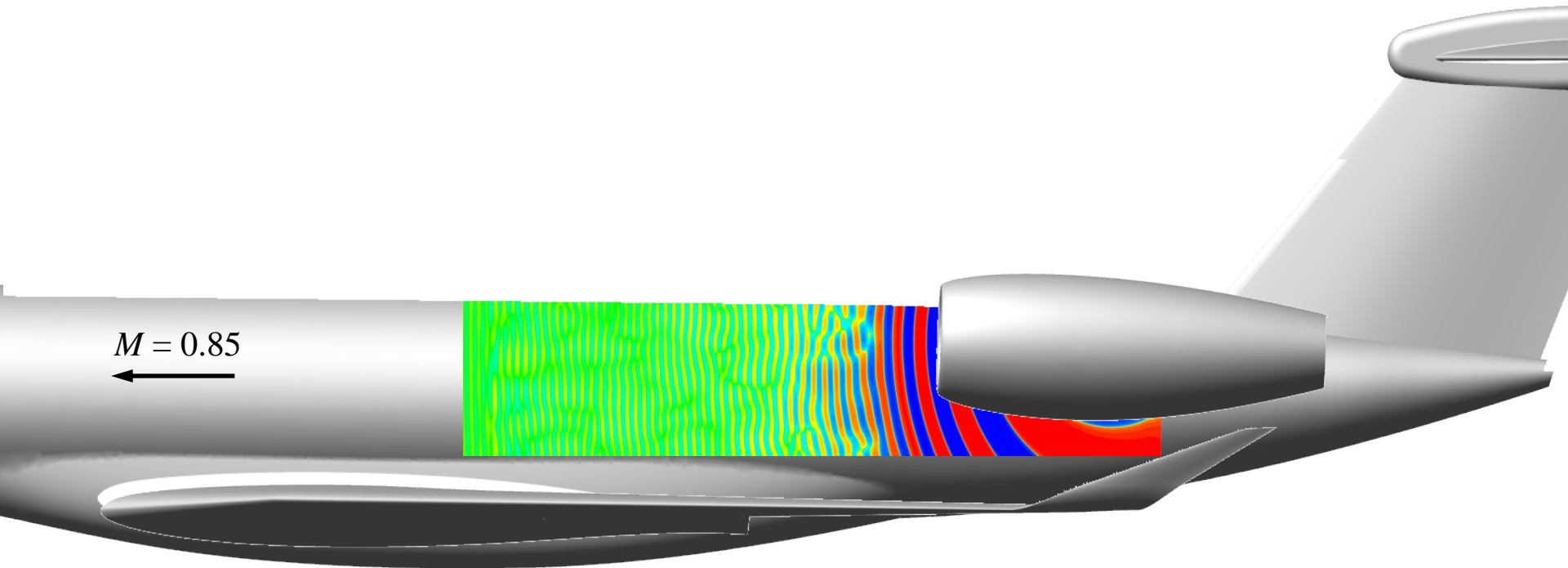
Momentanschalldruckverteilung



# Simulation von Druckfluktuationen auf Rumpf (Reiseflug)

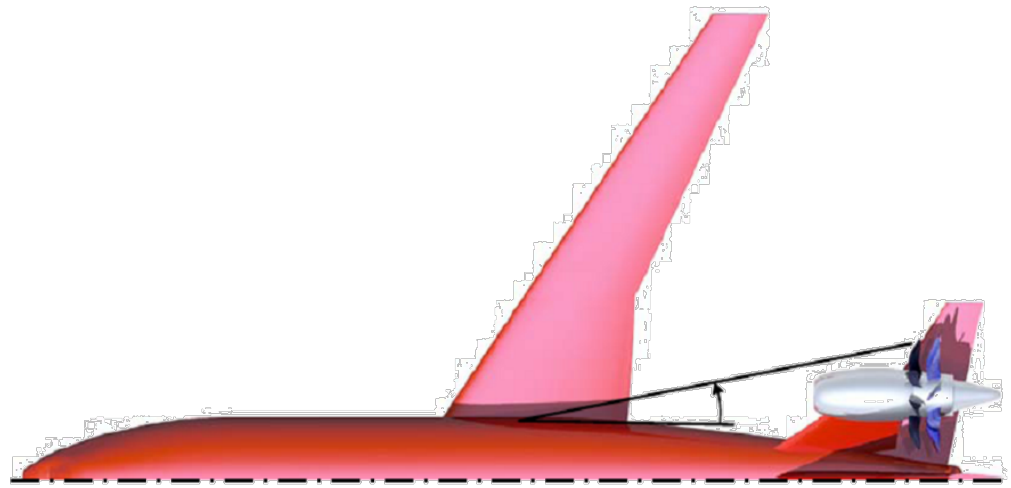
3 Ursachen für turbulenzbedingte Druckschwankungen:

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

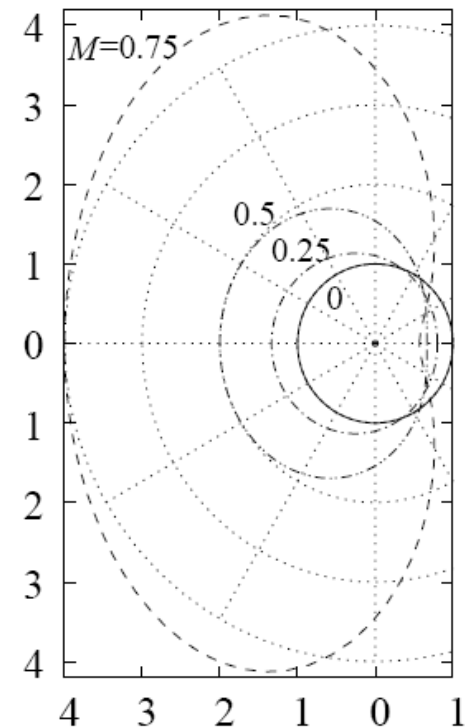
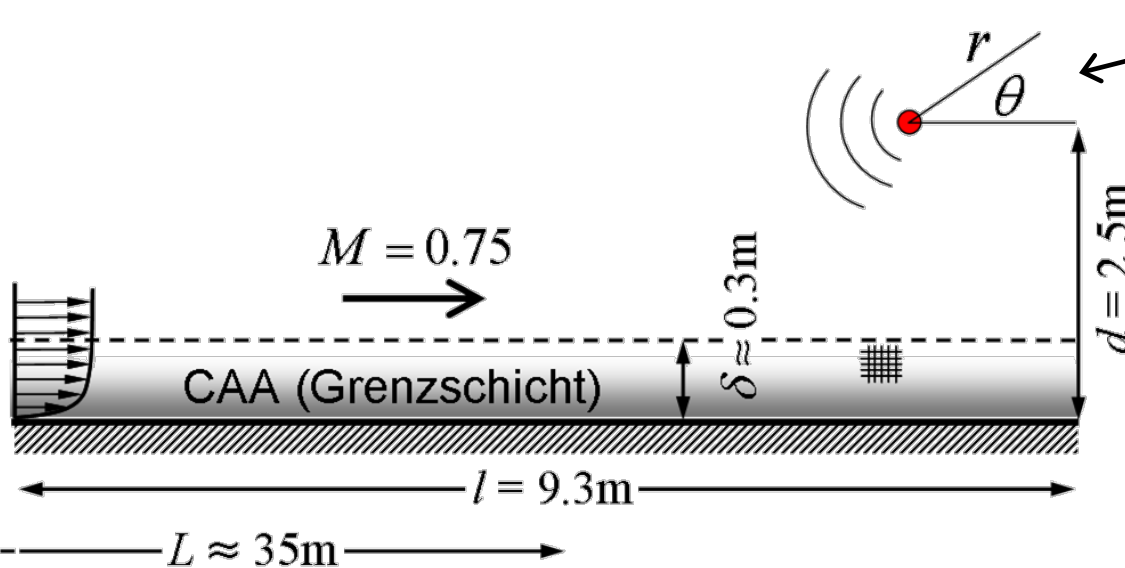




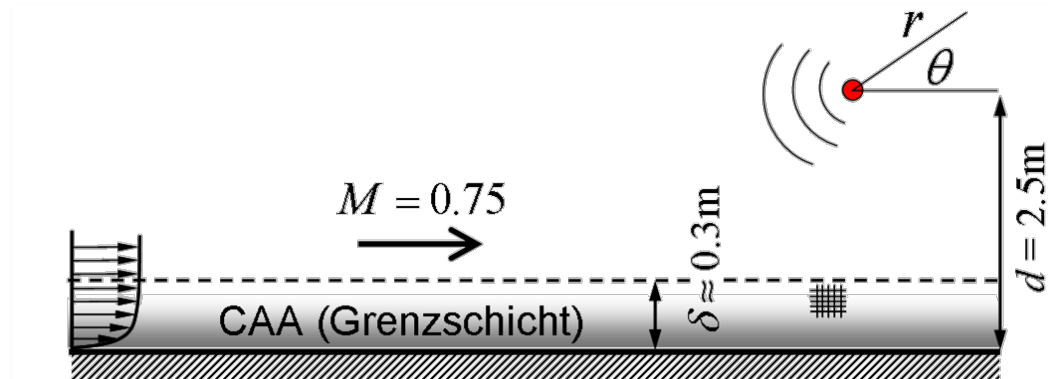
# Rumpfschalldruck aus Tonsignalen vom Triebwerk



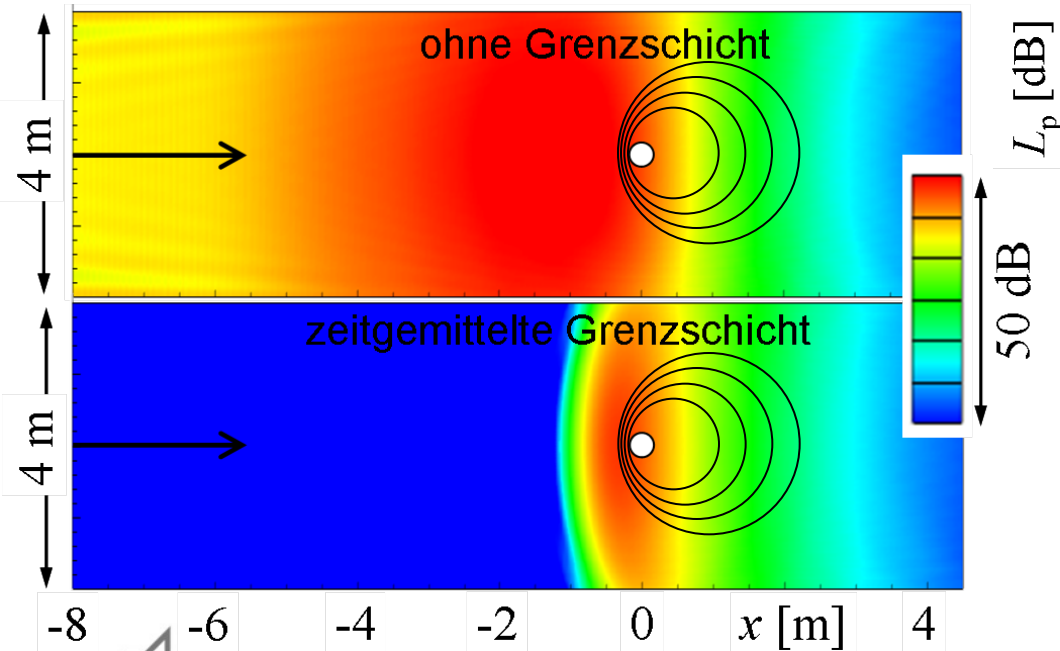
Zunächst vereinfachte Modellierung von Triebwerk Als Monopolschallquelle



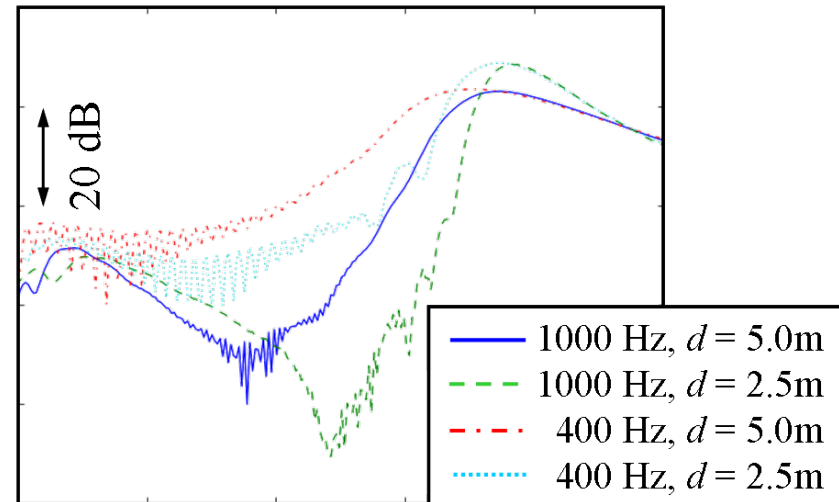
# Rumpfschalldruck aus Tonsignalen vom Triebwerk



Oberflächendruckpegel von Punktquelle Sicht von oben auf Platte

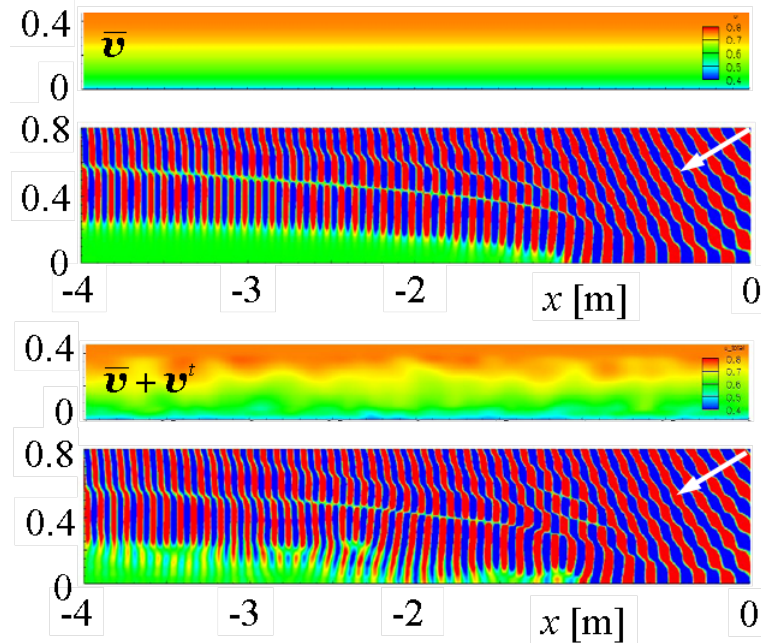
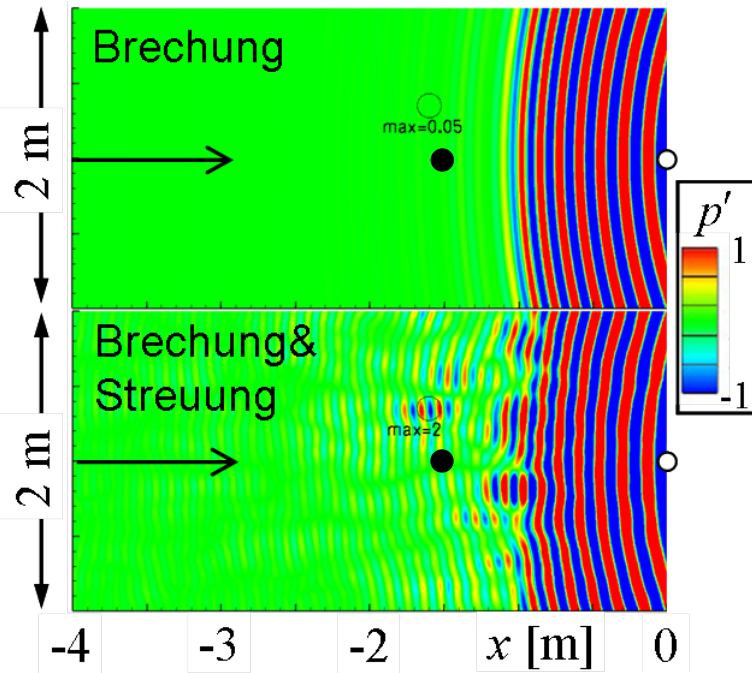


Brechung



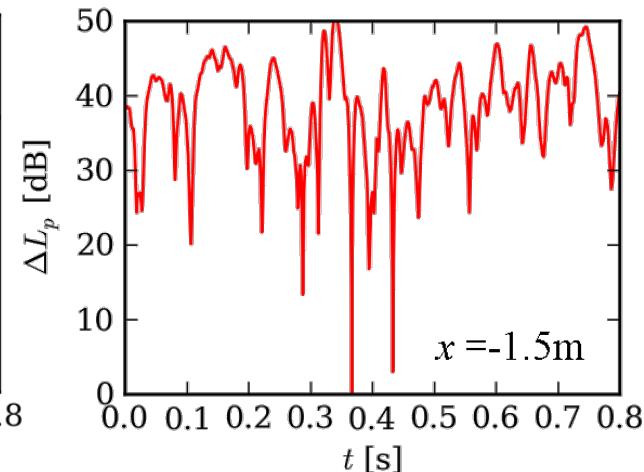
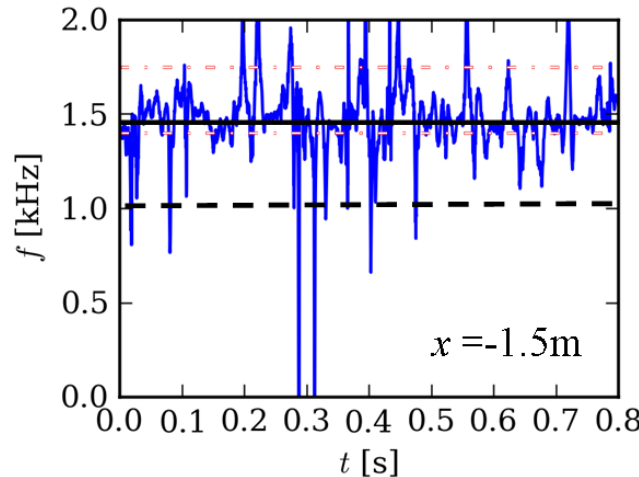
Lauter bei größerem Abstand!  
(Einfallswinkeleffekt)

# Rumpfschalldruck aus Tonsignalen vom Triebwerk



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

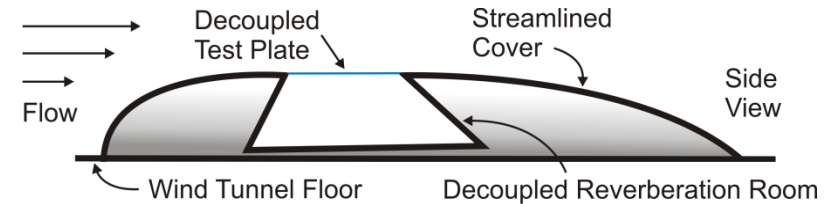
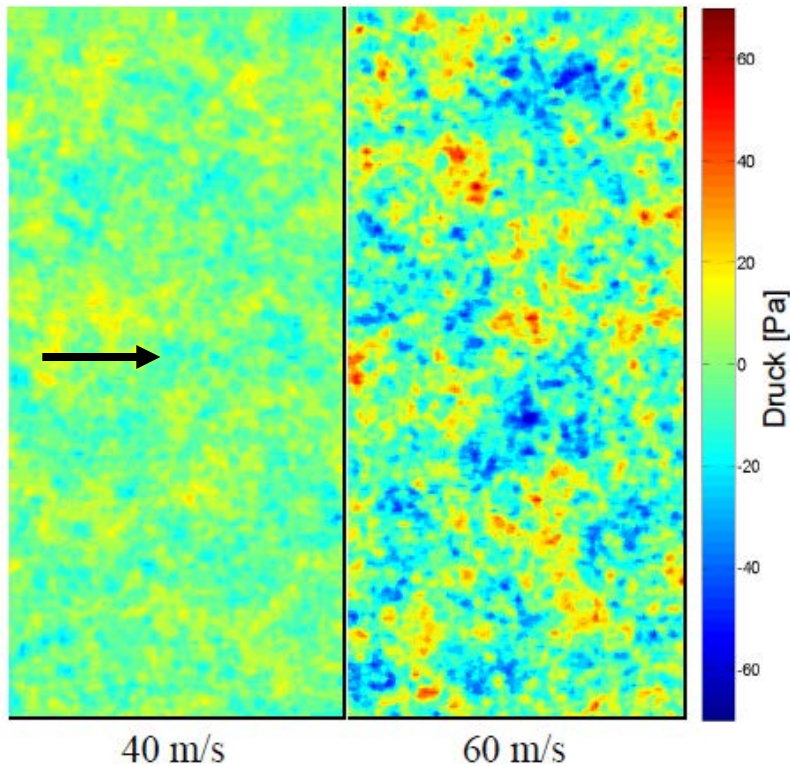
⇒ Dopplerverschiebung (positionsabhängig) !



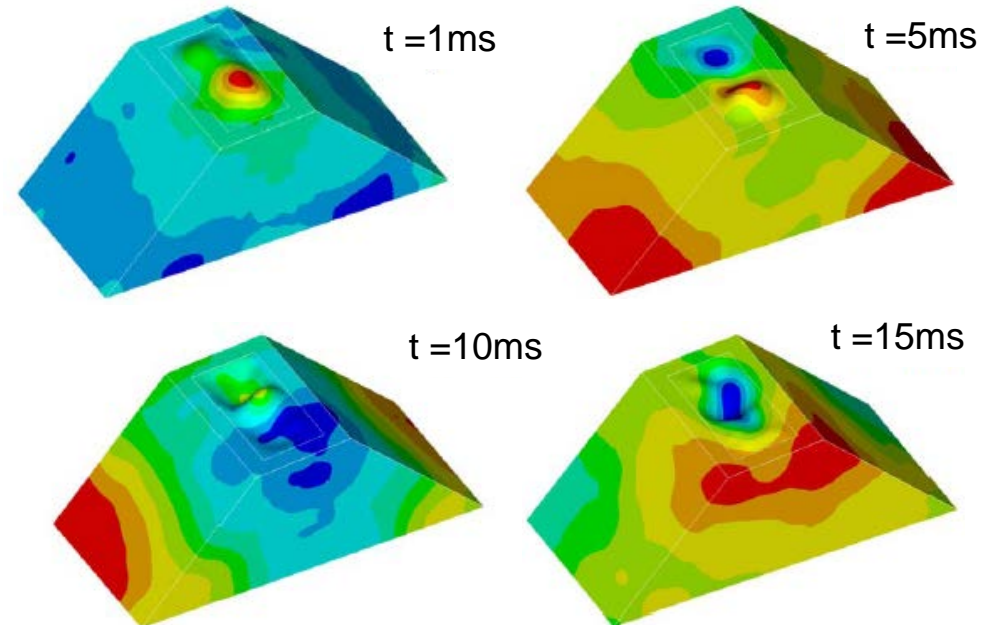
# Rumpfdruckfluktuationen aus Grenzschichtturbulenz

## Stochastisches Wanddruckmodell

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

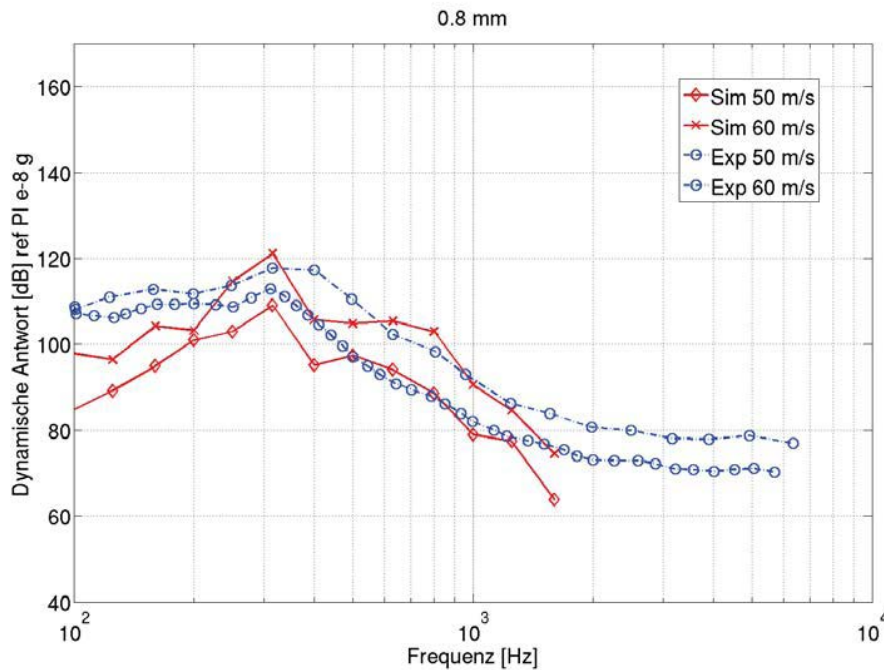
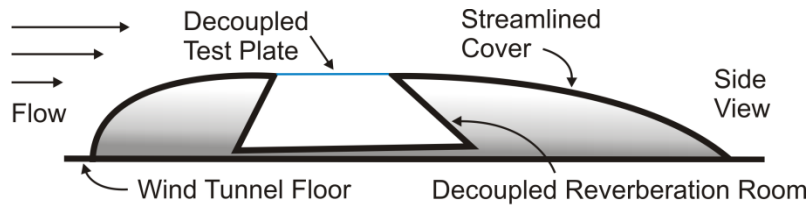


## Kopplung mit ANSYS (Zeitbereich)

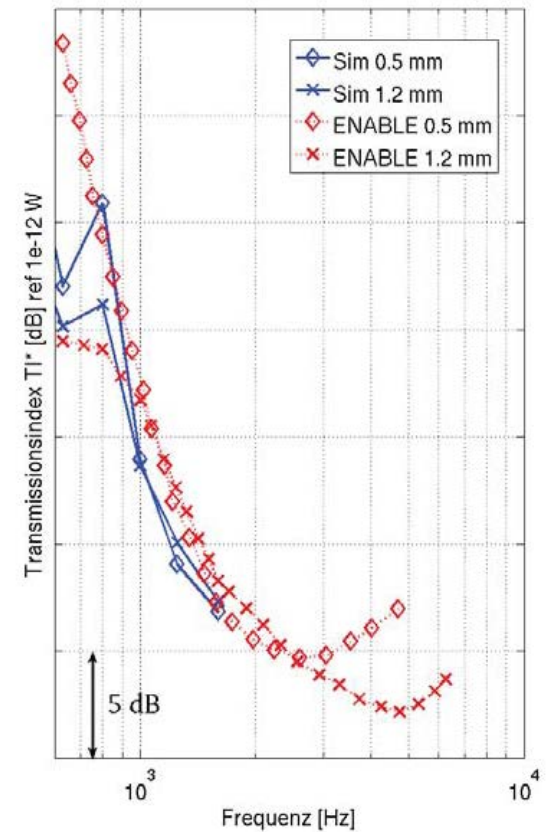


Vibration einer 1.2mm Aluminium Platte  
(ENABLE EU-Projekt).

# Validierung der Kopplung CAA - CSM



Dynamische Plattenantwort



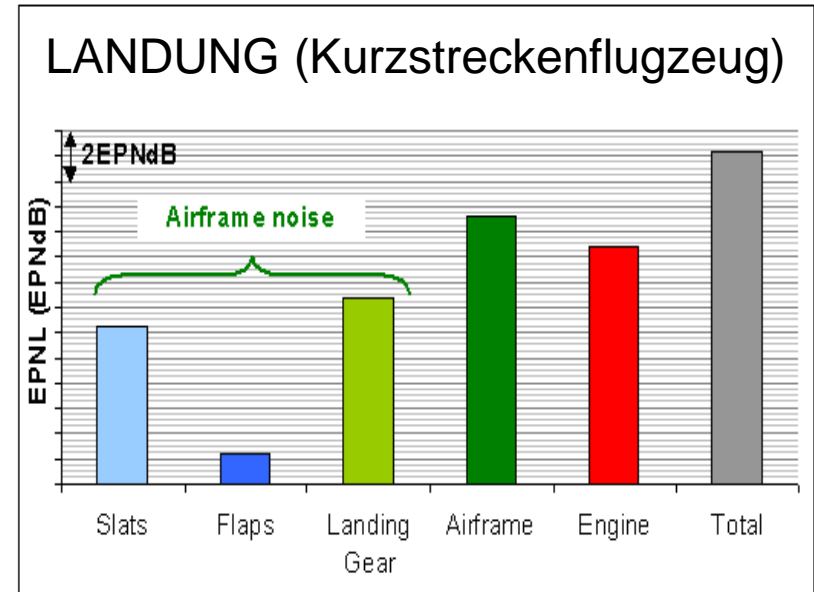
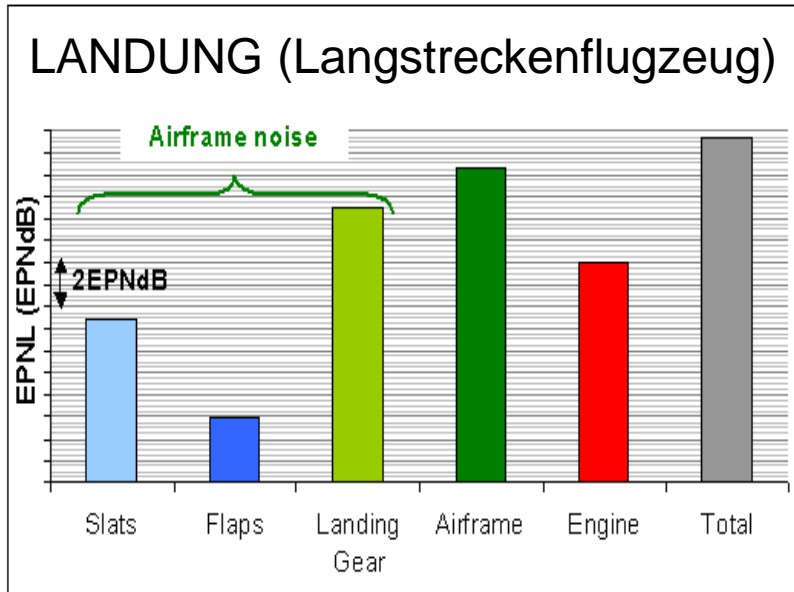
Transmissionsindex

# Minderung von Strömungsschall

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



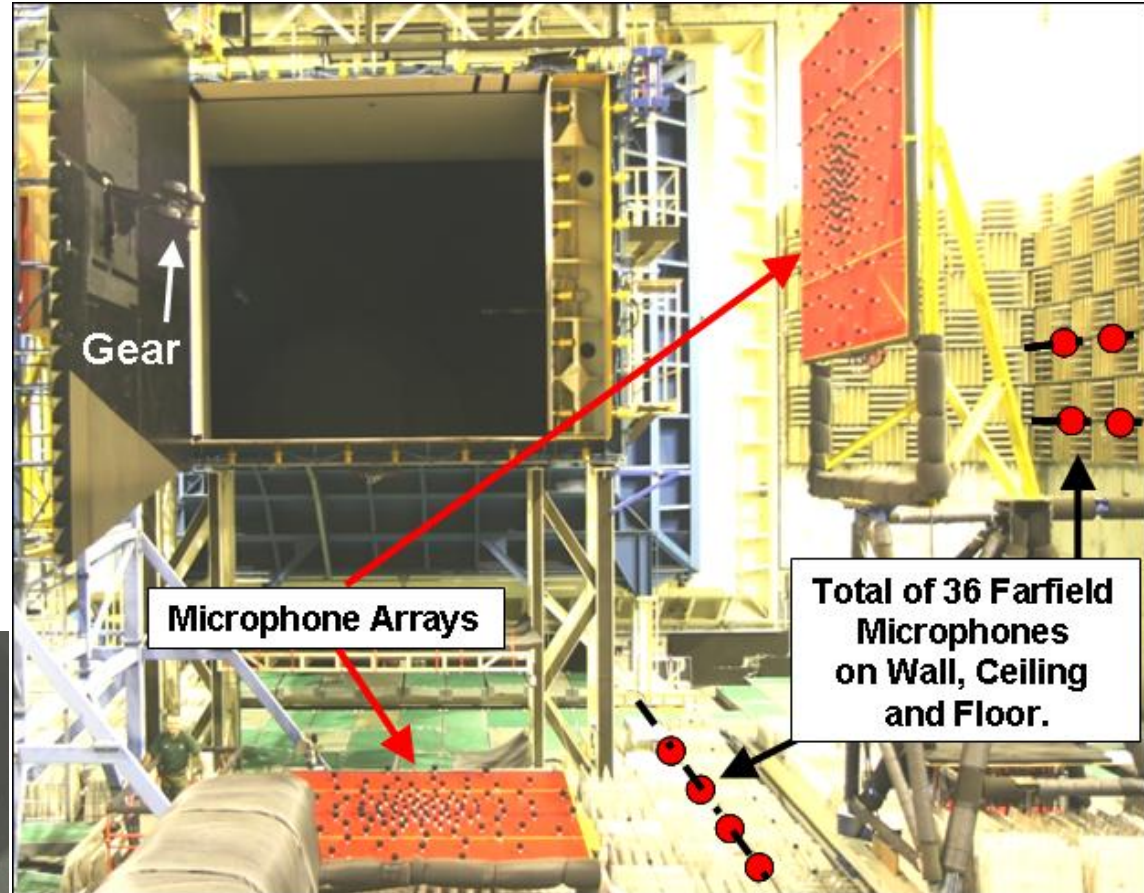
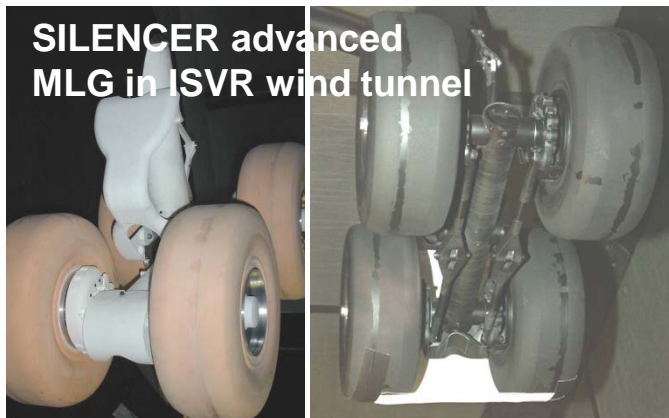
# Quellengewichte am Gesamtflugzeug



Quelle: Airbus

# Analyse von Fahrwerkslärm

- EU TIMPAN Projekt
- $\frac{1}{4}$ -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)





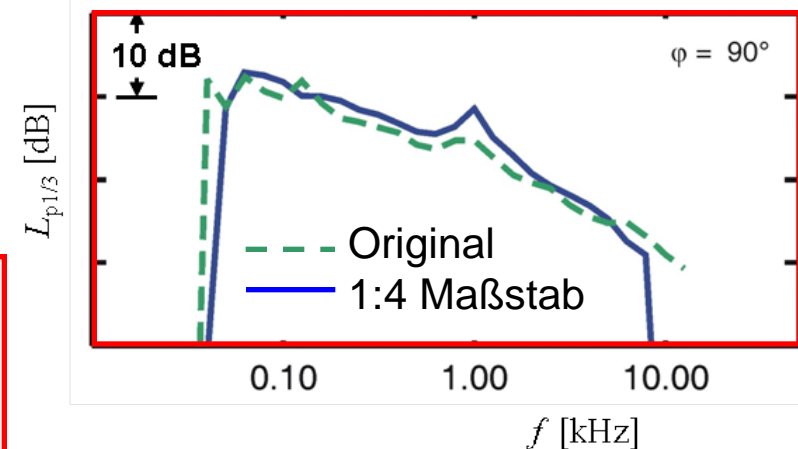
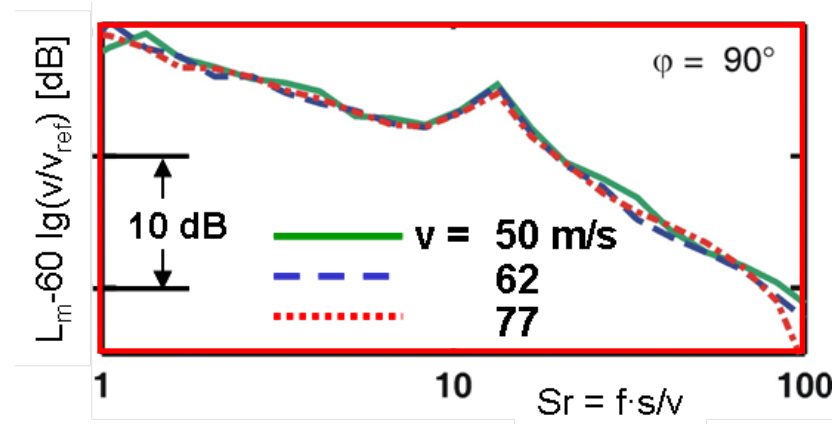
# Skalierungsgesetze bei Fahrwerken

- Frequenzskalierung basierend auf Strouhalzahl:

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

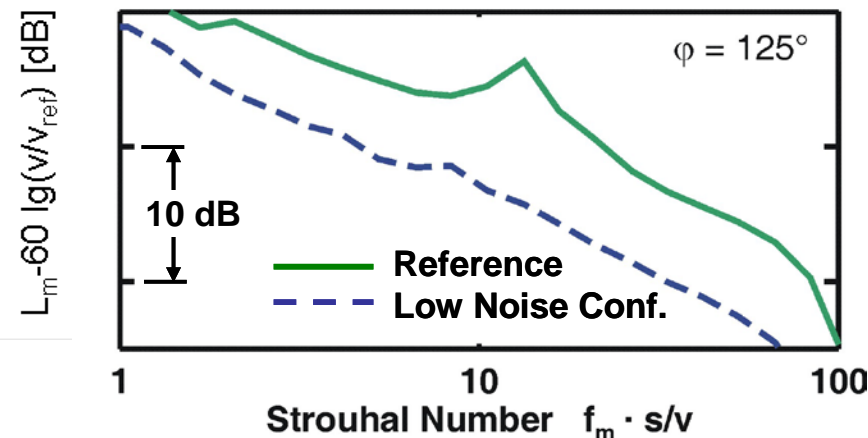
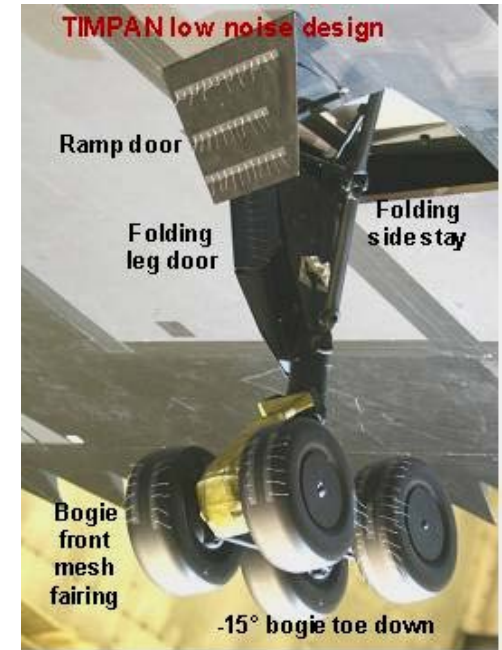
- Pegelskalierung basierend auf dipolartiger Schallquelle mit Quelldimension  $s$ :

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



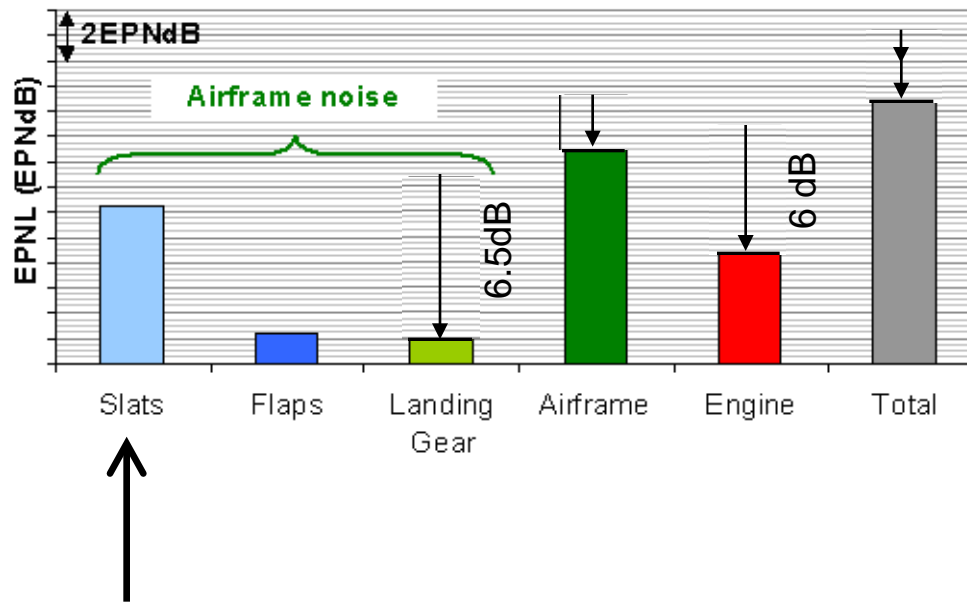
# Geräuschminderungspotenzial bei Fahrwerk

- 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



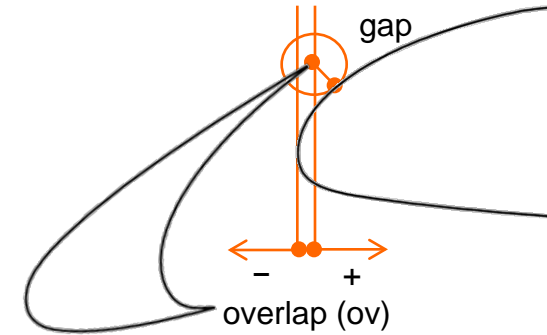
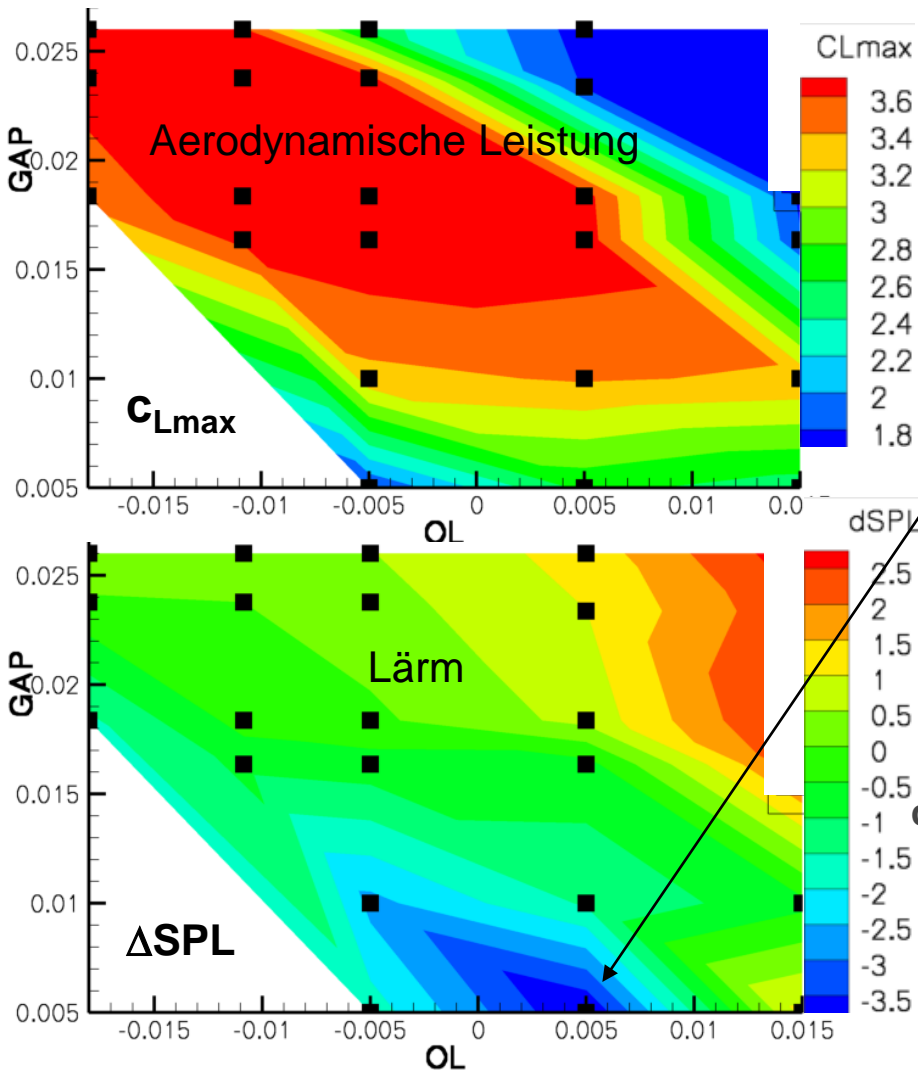
# Quellengewichte am Gesamtflugzeug

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



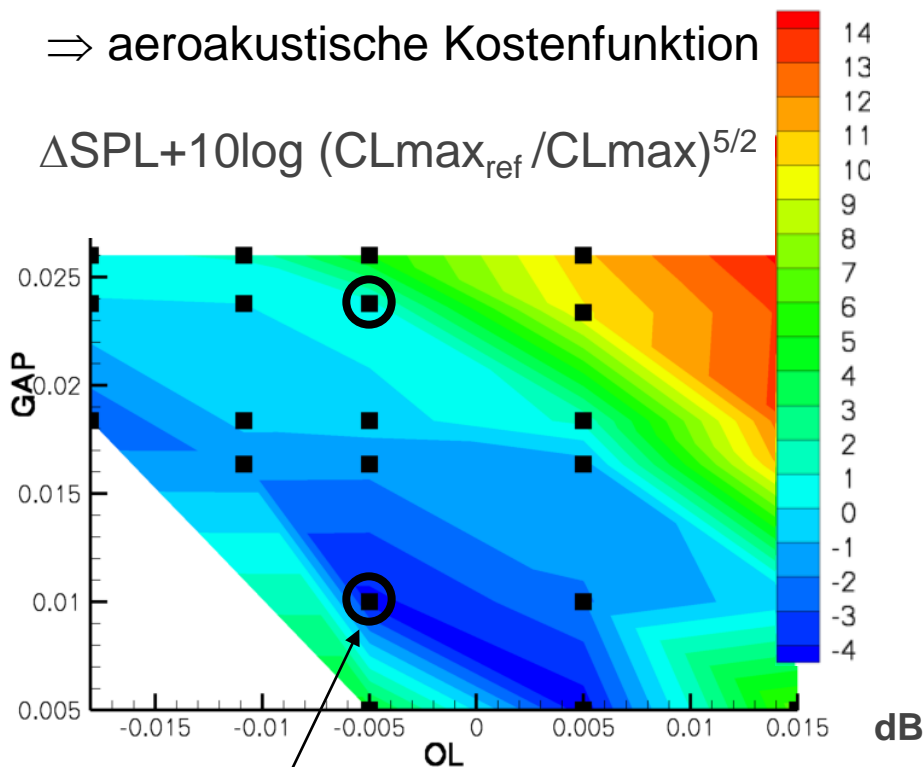
# Simulationsbasierter aeroakustischer Entwurf

## Optimale Klappensetzung

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

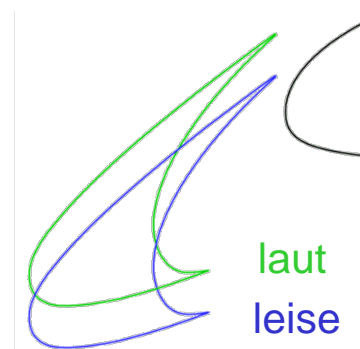
⇒ aeroakustische Kostenfunktion

$$\Delta\text{SPL} + 10 \log (CL_{\text{max,ref}} / CL_{\text{max}})^{5/2}$$

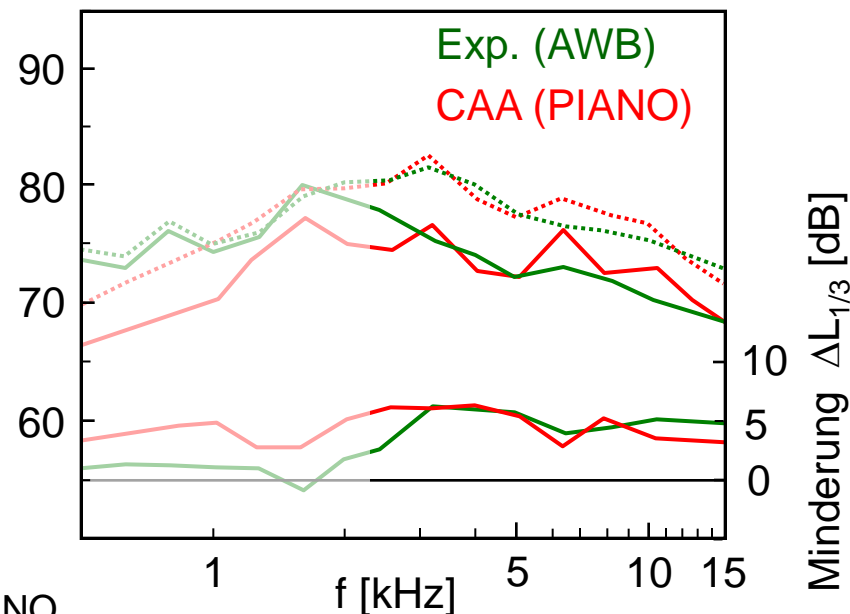


Aeroakustisches Optimum

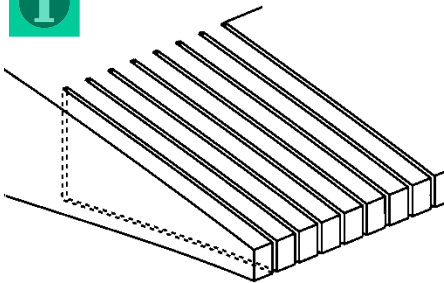
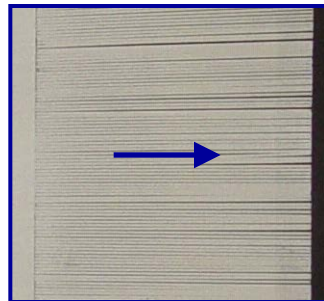
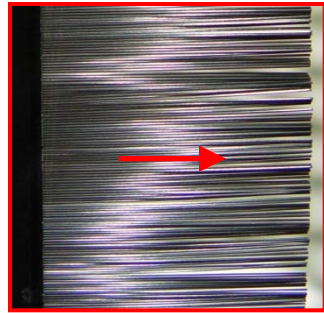
Strömung: TAU, Schall: PIANO



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

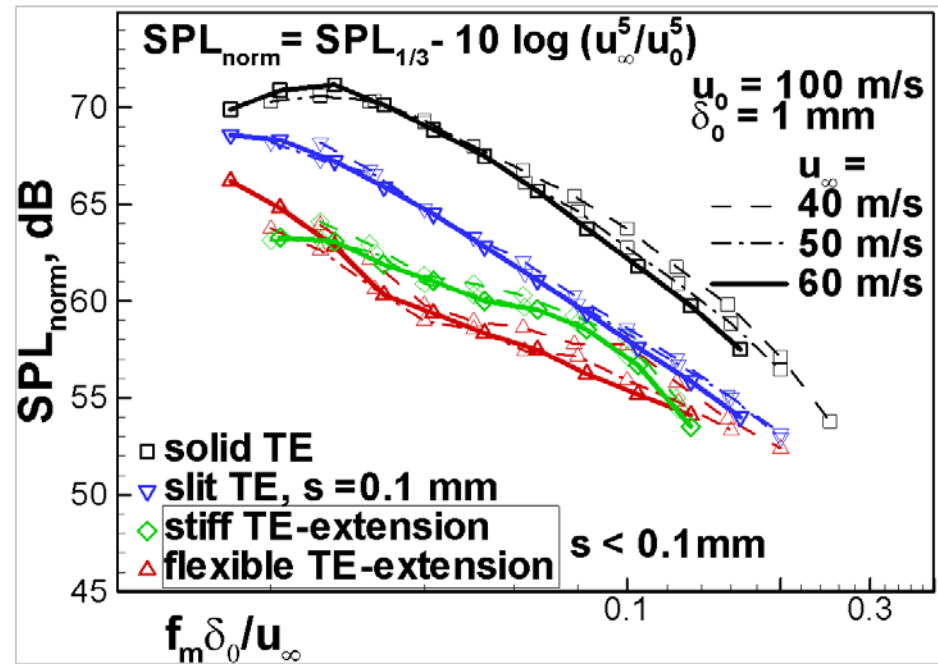
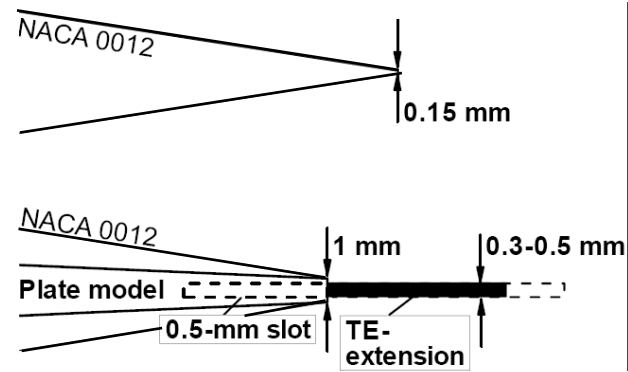


# Lärminderungstechnologien – Hinterkantenmodifikationen



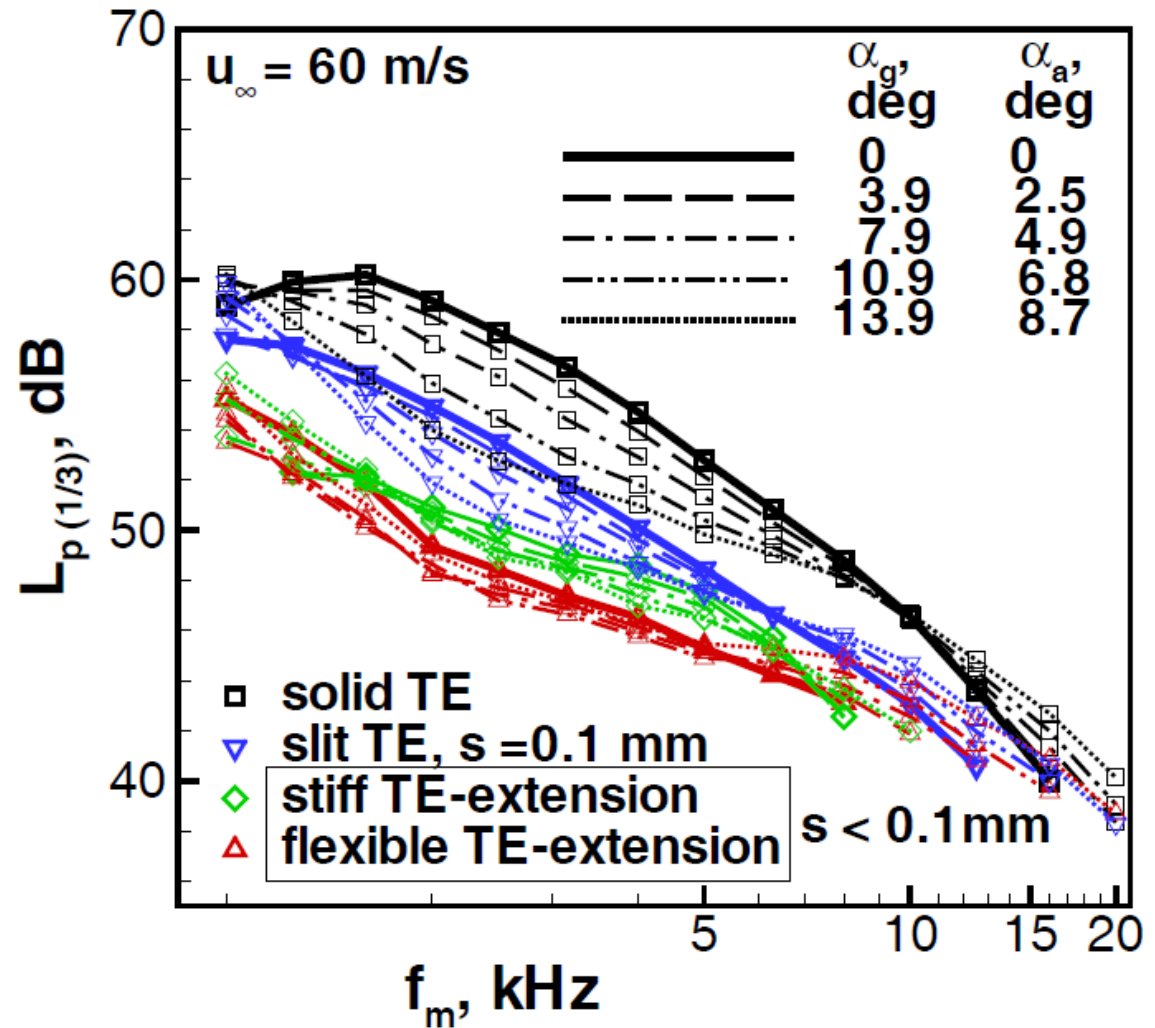
## Feinstschlitze

RANS: praktisch keine Auftriebseinbußen\*



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

# Hinterkantenlärmsenkung unter aerodynamischer Last



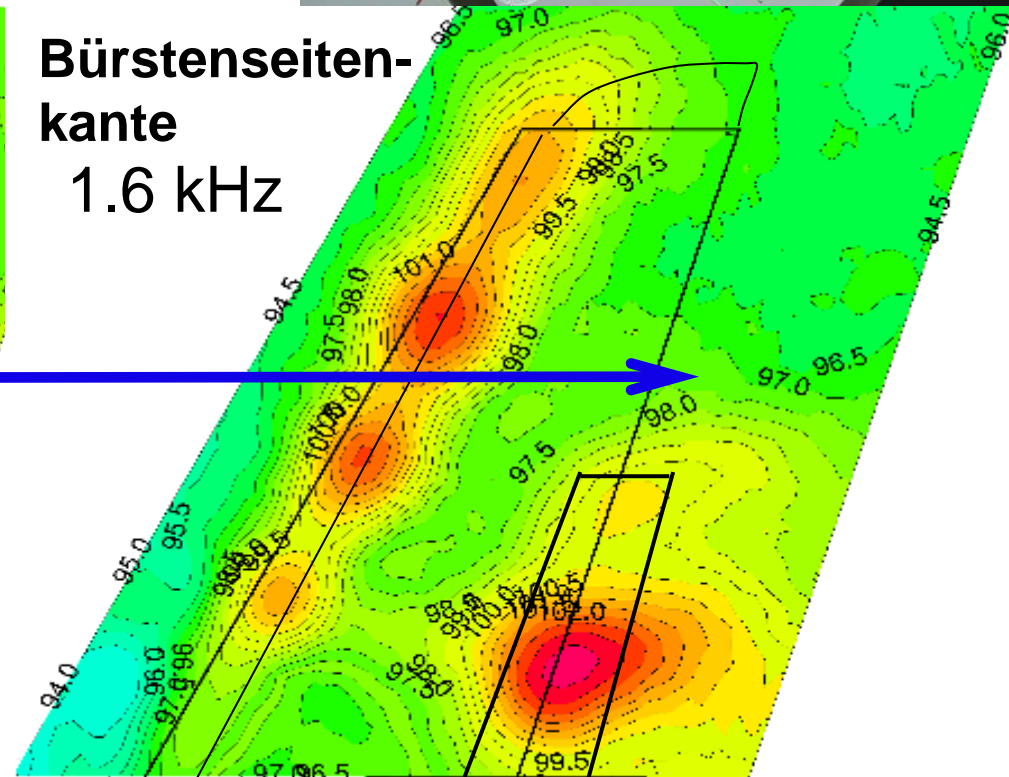
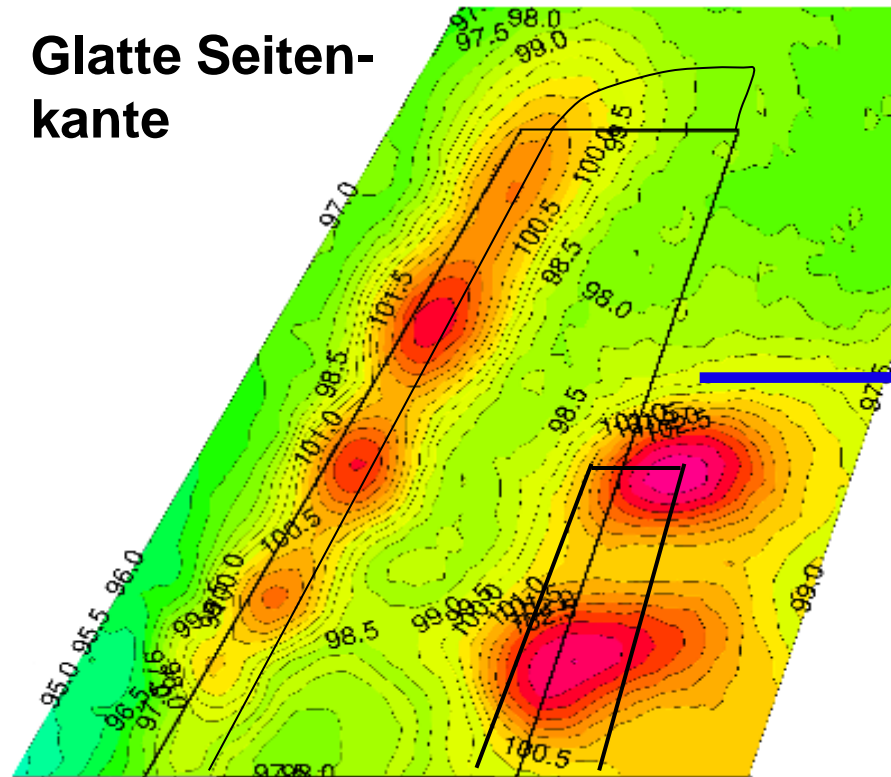
NACA0012

# Breitbandlärmreduzierung an Kanten



**Glatte Seitenkante**

**Bürstenseitenkante  
1.6 kHz**





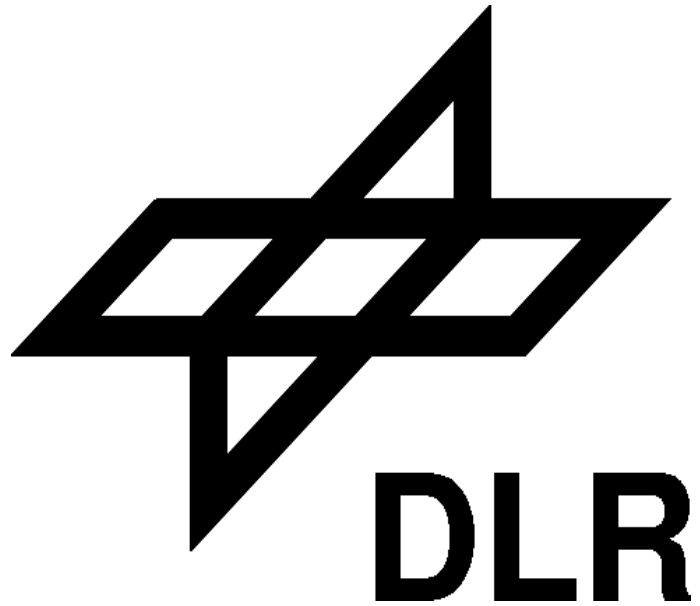
# Zusammenfassung

- 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  $\Delta$ SPL
- Strömungsdurchlässige Materialien zeigen hohes Minderungspotenzial, Wirkungsweise nicht verstanden und (noch) nicht simulierbar

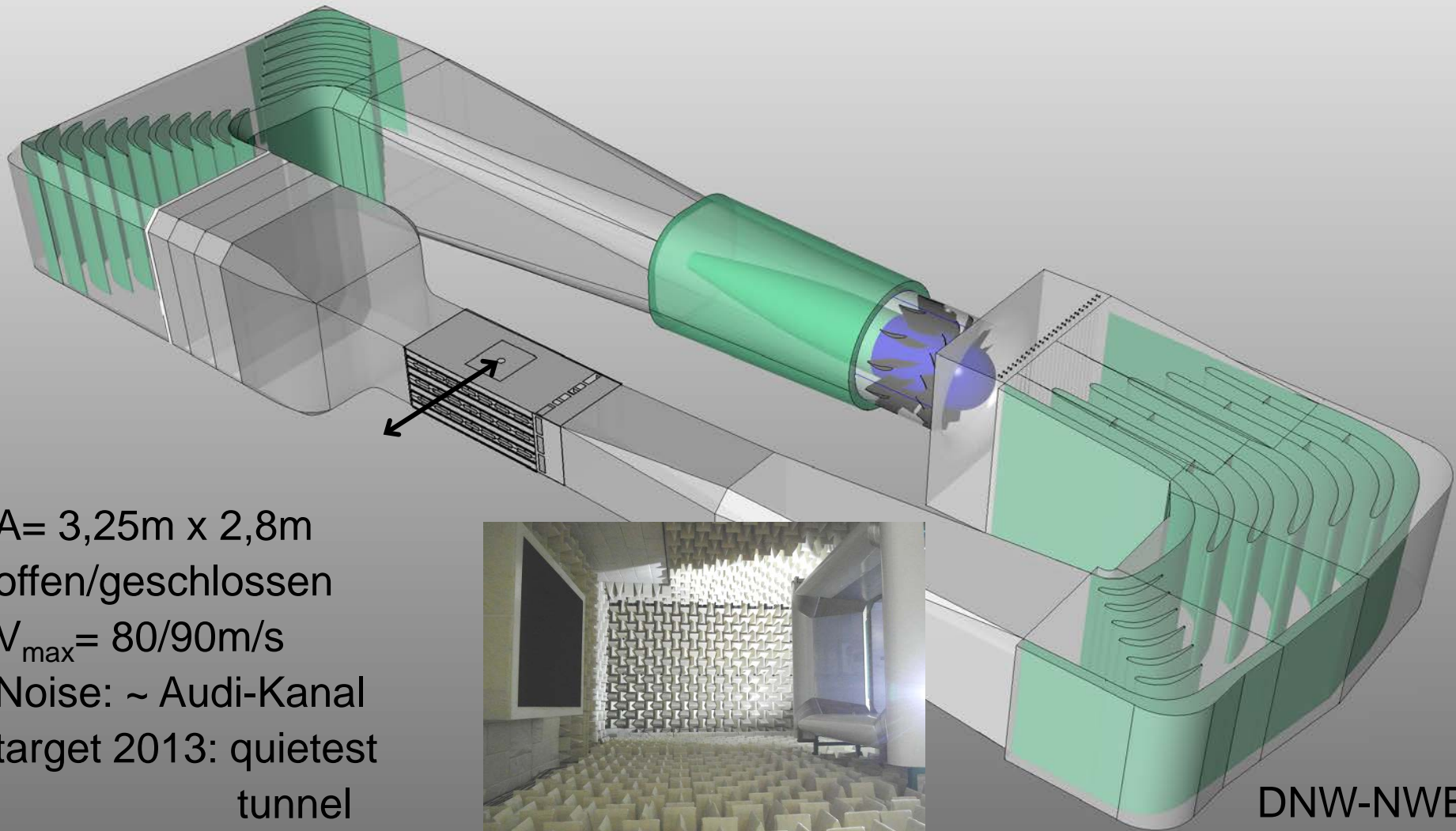
# Ausblick

- ➔ 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



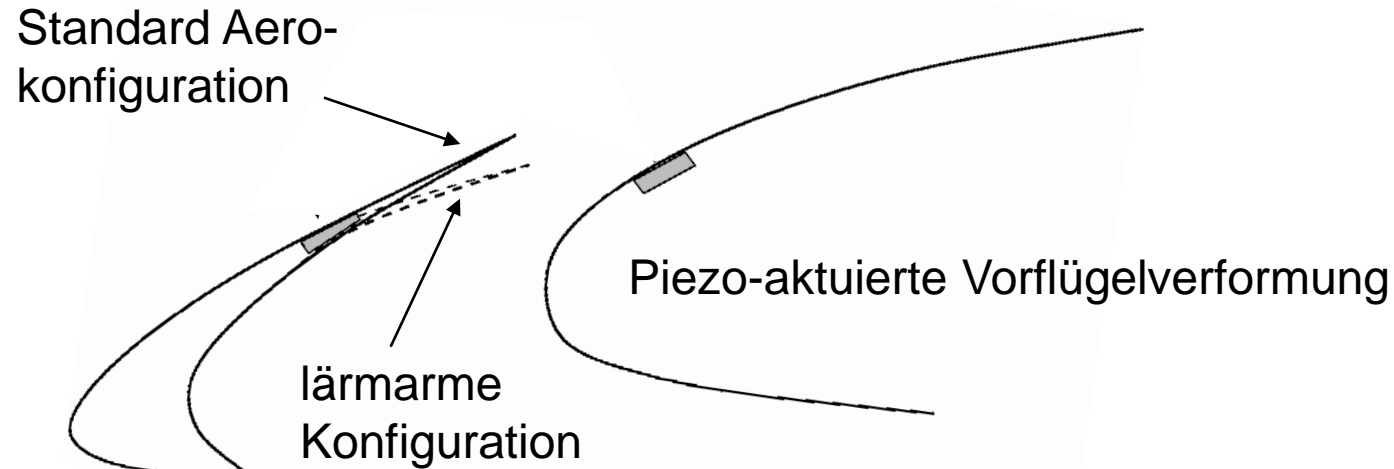


# Appendix 1: Aeroakustischer DNW-NWB Braunschweig (Einweihung 02.12.2010)



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

# Appendix 2: Adaptive Minderung von Vorflügelgeräusch



Auslegung mittels CFD/CAA/CSM

EU OPENAIR  
DLR SLED

