

MINDERUNG VON STRAHL- UND LANDEKLAPPENINSTALLATIONS- GERÄUSCHEN MITTELS PORÖSER MATERIALIEN

**Michael Pott-Pollenske, Jürgen Dierke, Christian Jente
Roland Ewert, Jan Delfs**



Gliederung

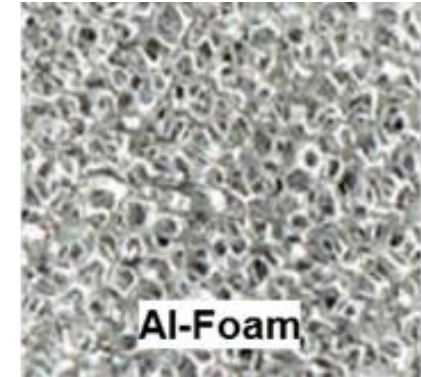


- Umströmungsgeräusch und poröse Werkstoffe
- 3 Anwendungsfälle
- Experimentelle Arbeiten
- Numerische Methoden und Arbeiten
- Ausblick

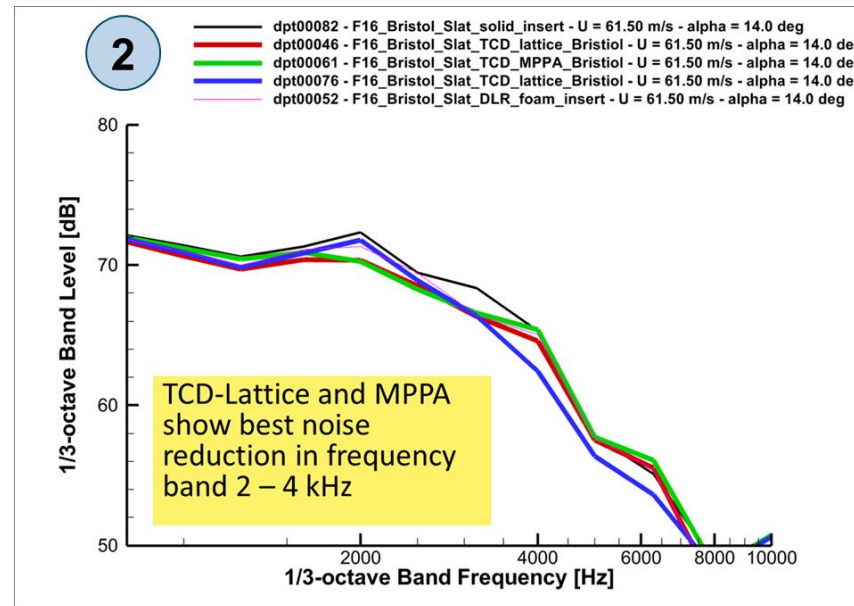
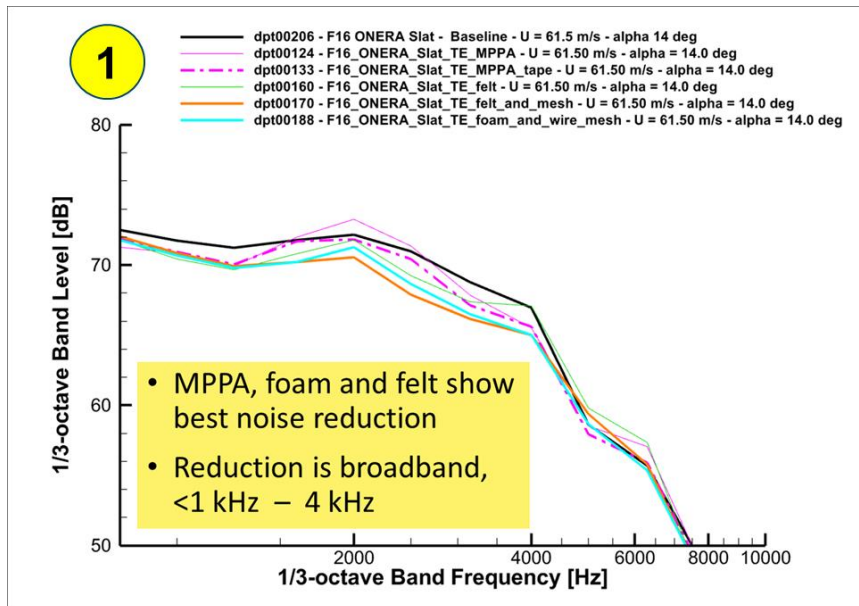
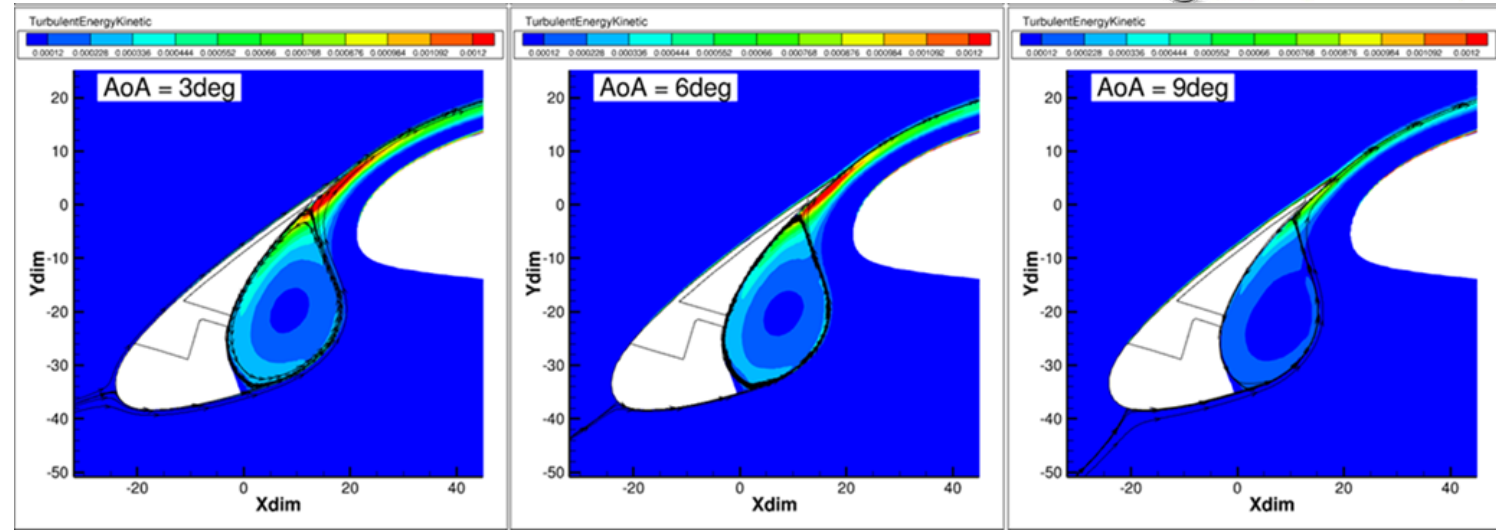
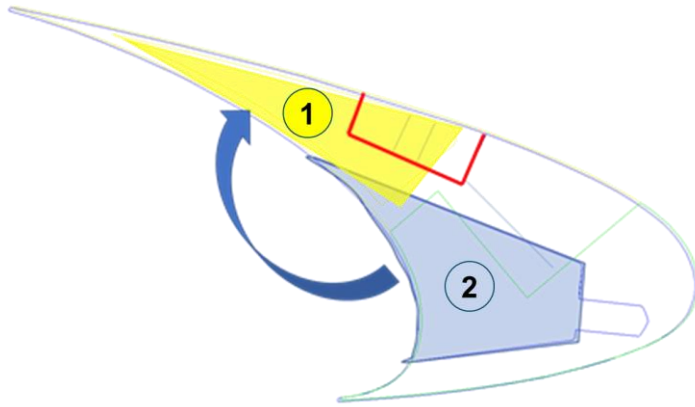
Umströmungsgeräusch und poröse Werkstoffe



1. Landeklappen – Seitenkantengeräusch
2. Fahrwerksnachlauf – Landeklappen Wechselwirkung
3. Strahlinstallationsgeräusch
 - Poröse Werkstoffe, z.B. AL-Schaum
 - ALM Bauteile (Diamond Lattice Strukturen, Kelvin Cell Strukturen)
4. Fahrwerksgeräusch
5. Vorflügelgeräusch, Geräusche der Vorflügelhalter



Vorflügelgeräusch



Liner bewirken eine Lärm-minderung von bis zu 3 dB

Keine Minderung der aerodynamischen Leistung

Lösung ist sehr sensitiv gegenüber Kontur-unstetigkeiten

Fahrwerksgeräusch – Ergebnisse aus Flugversuch

DLR Low Noise ATRA

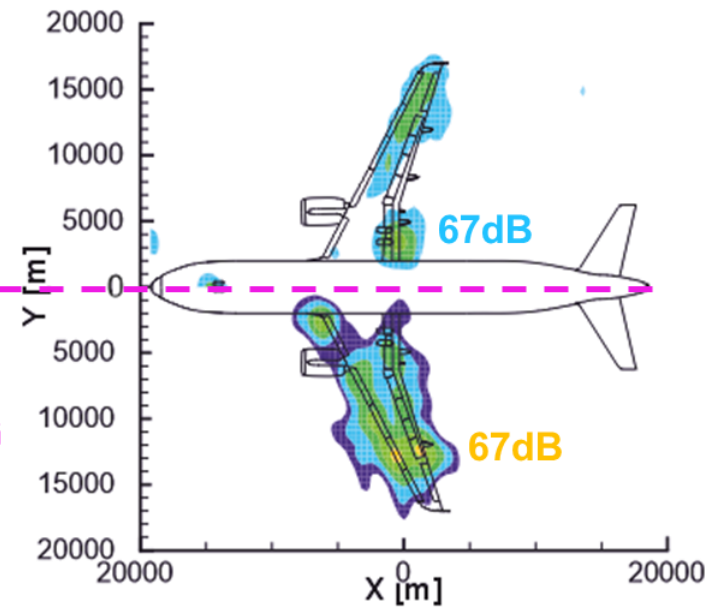
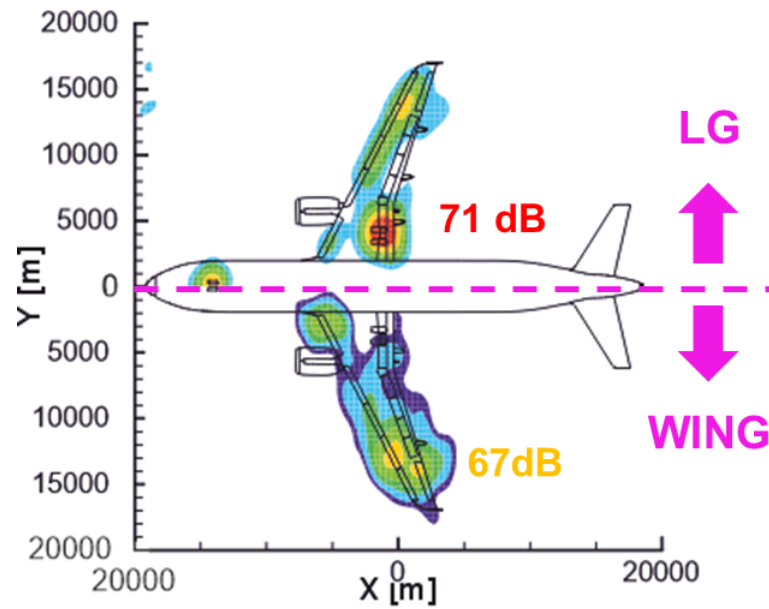


Reference Aircraft

Modified Aircraft

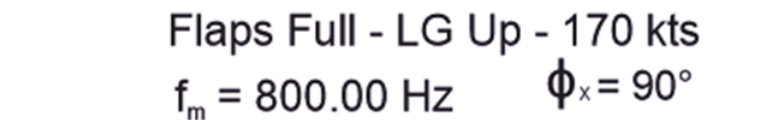
Flaps Full - LG Down - 170 kts
 $f_m = 800.00$ Hz $\phi_x = 90^\circ$

SPL 67 68 70 71



Flaps Full - LG Up - 170 kts
 $f_m = 800.00$ Hz $\phi_x = 90^\circ$

SPL 64 65 66 67 68



Brake cover



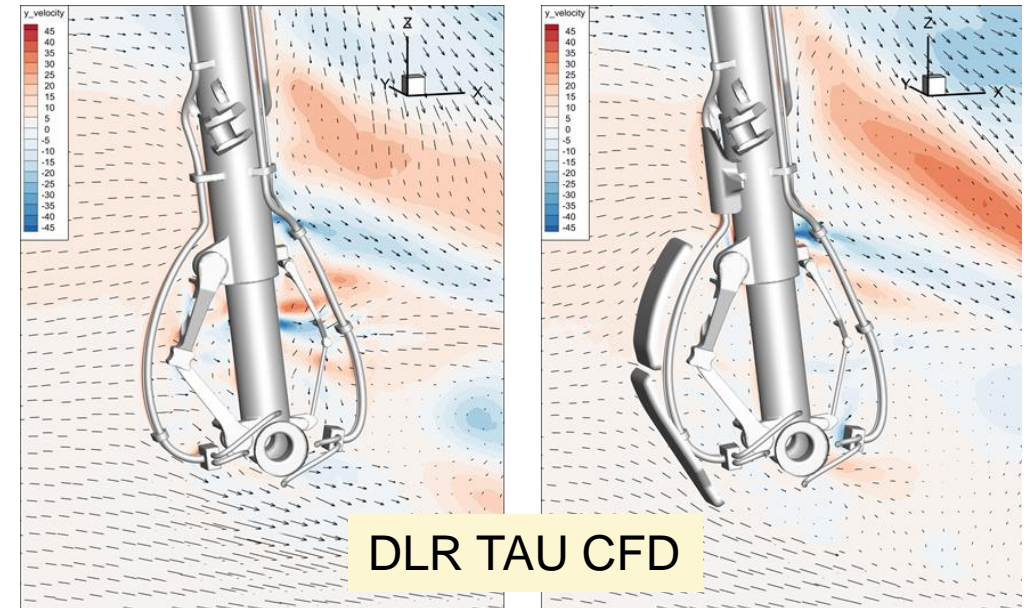
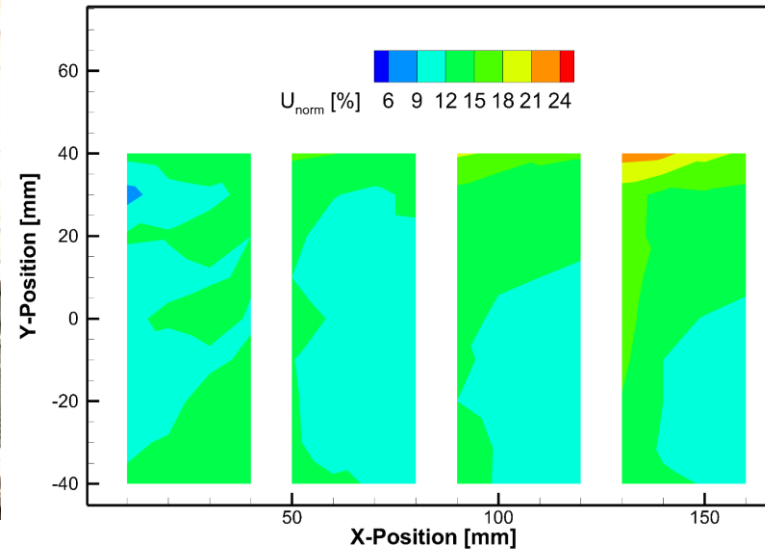
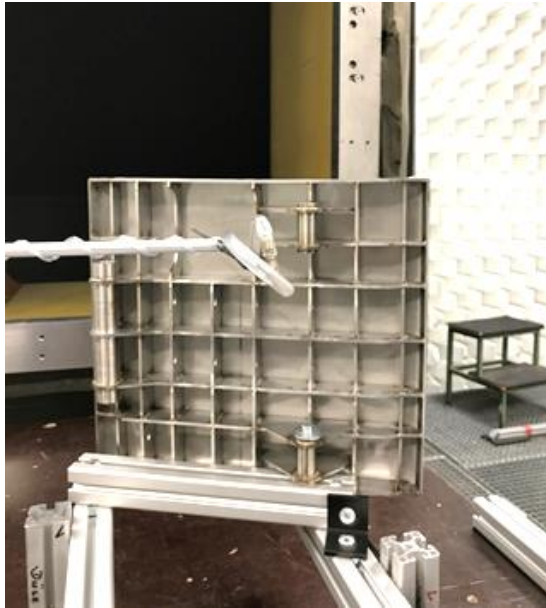
CFK-Bauteile mit
 temperatursensitiver
 Beschichtung



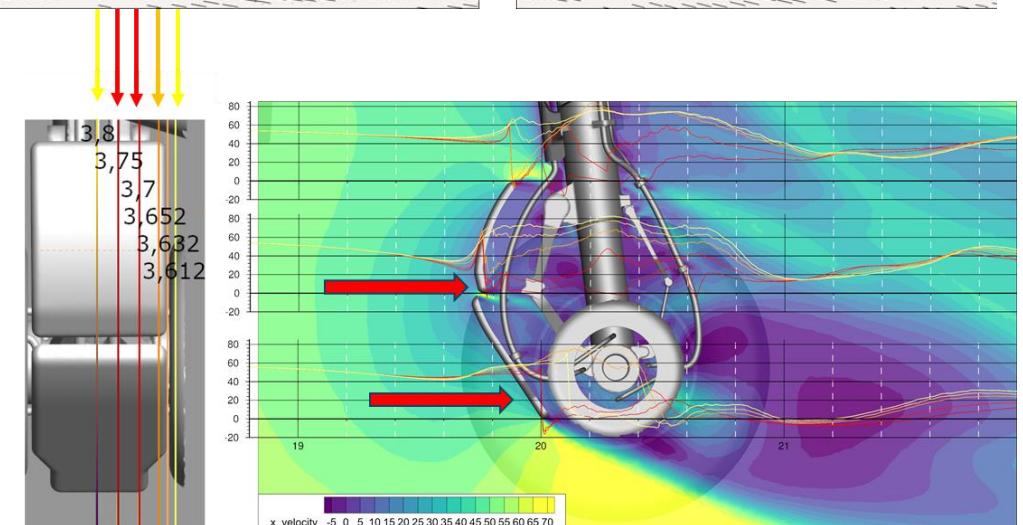
Edelstahlfachwerk mit
 Drahtgewebeabdeckung,
 40% offene Fläche

Minderungsmaßnahmen wirken sehr gut, wesentlicher Beitrag durch das Torque Link Fairing

Nachmessung im AWB



- Fahrwerksgeräusch: $p'^2 \sim U^6$
- Fairing reduziert die Geschwindigkeit um ca. 20%
→ theoretischer Effekt -5.8 dB ($\Delta L = 60 \cdot \log_{10}(0.8)$)
- Der aerodynamische Effekt kann mit CFD simuliert werden
- Zukunft: Gitter per ALM herstellen, keine Drahtnetze
→ Meta-Material, EU-INVENTOR



Landeklappenseitenkantengeräusch

Ergebnisse aus Flugversuch DLR Low Noise ATRA



Reference Aircraft

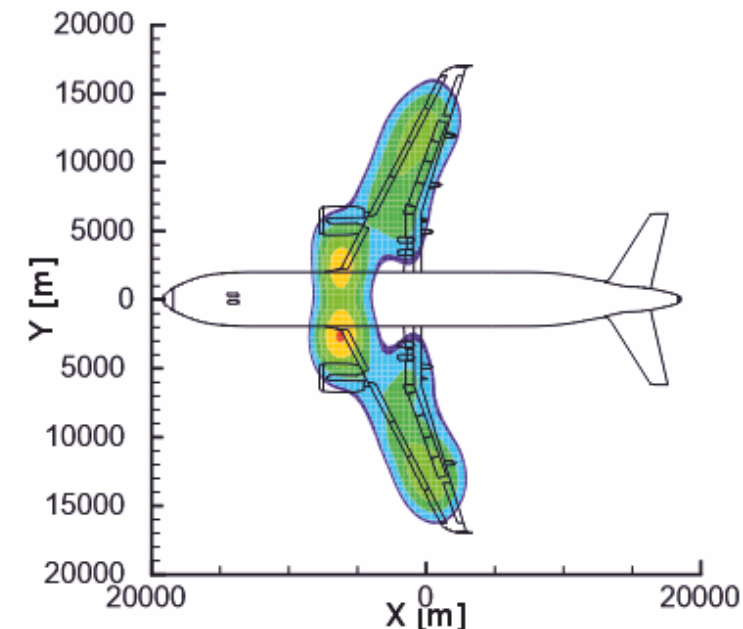
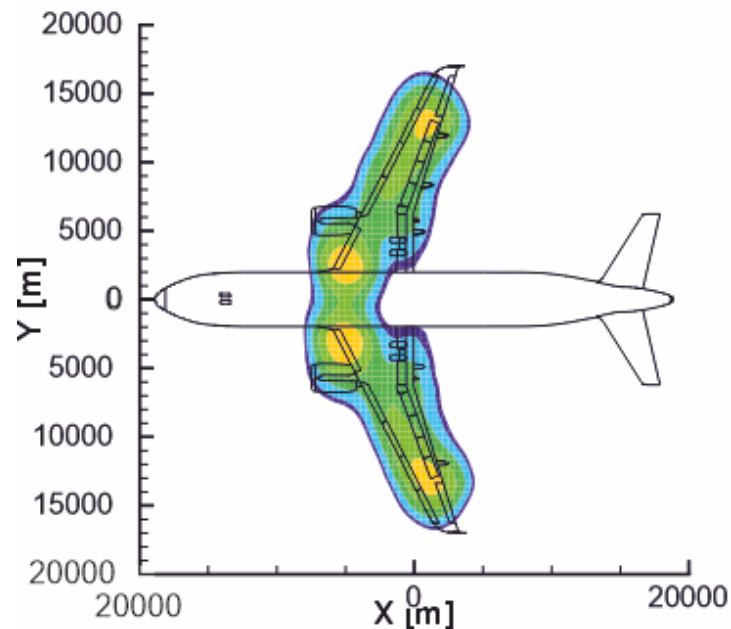
Flaps Full - LG Up - 170 kts
 $f_m = 3150.00 \text{ Hz}$ $\phi_x = 90^\circ$

Modified Aircraft



3150 Hz 1/3-octave band

- Landeklappenseitkante bei hohen Frequenzen als dominante "quasi-Punktquelle" sichtbar
- Geräusch der porösen Landeklappenseitkante nicht mehr dominant



Landeklappenseitenkantengeräusch

Ergebnisse aus Flugversuch DLR Low Noise ATRA



Reference Aircraft

Flaps Full - LG Up - 170 kts
 $f_m = 1250.00 \text{ Hz}$ $\phi_x = 90^\circ$

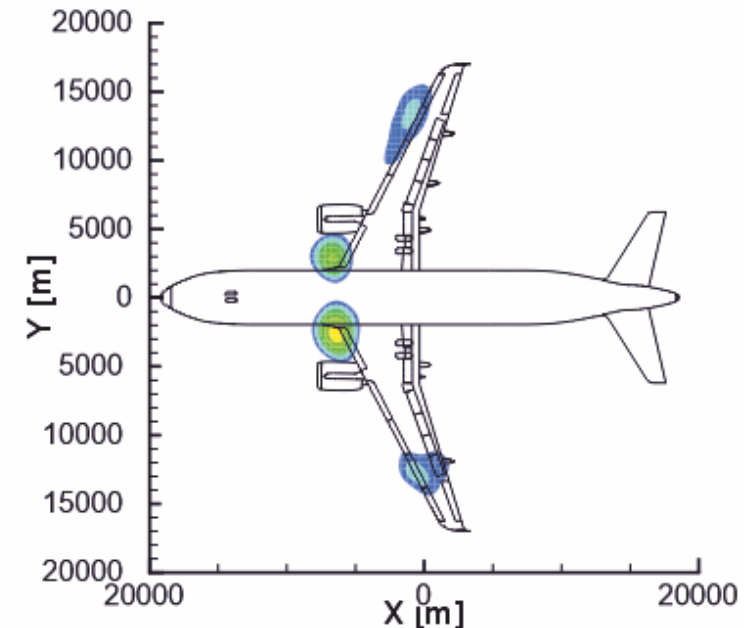
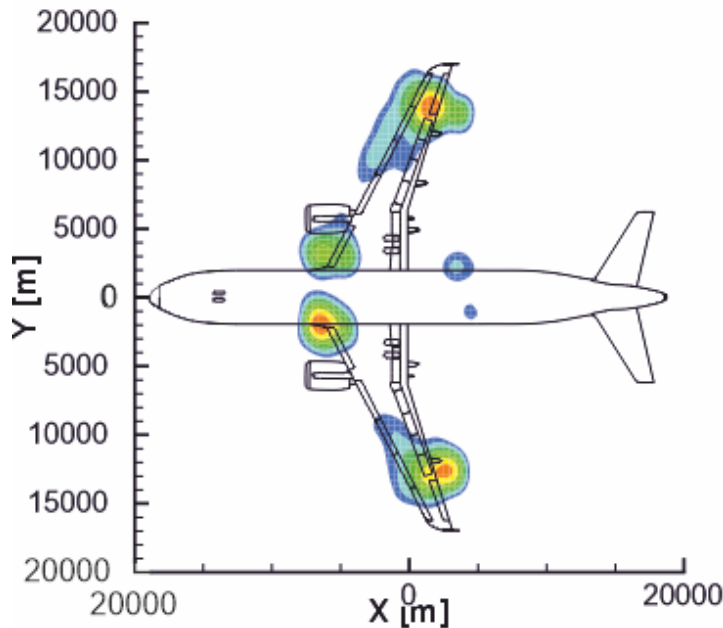
Modified Aircraft



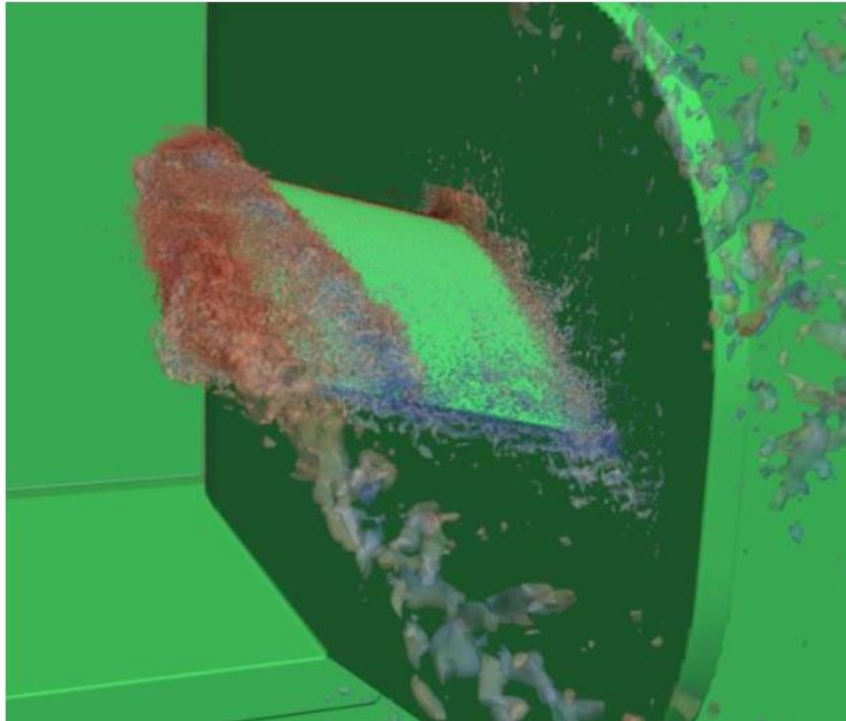
SPL 63 64 65 66 67 68 69

1250 Hz 1/3-octave band

- Geräusch der porösen Landeklappenseitenkante erheblich gemindert

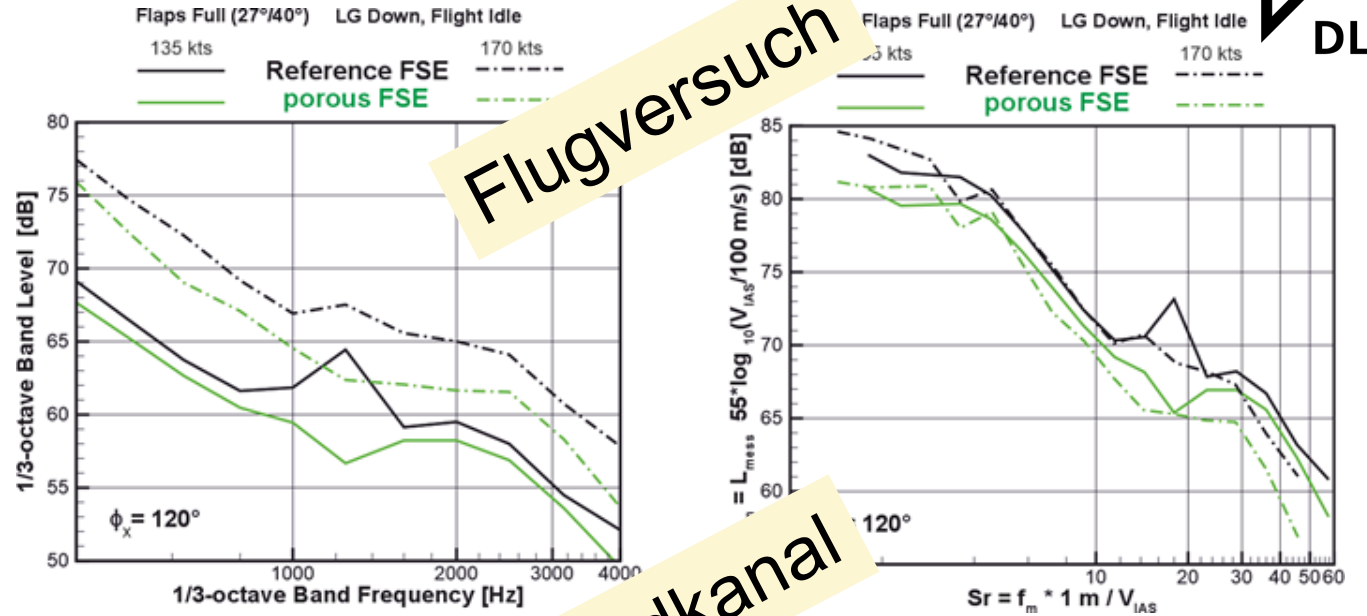


Landeklappenseitenkantengeräusch



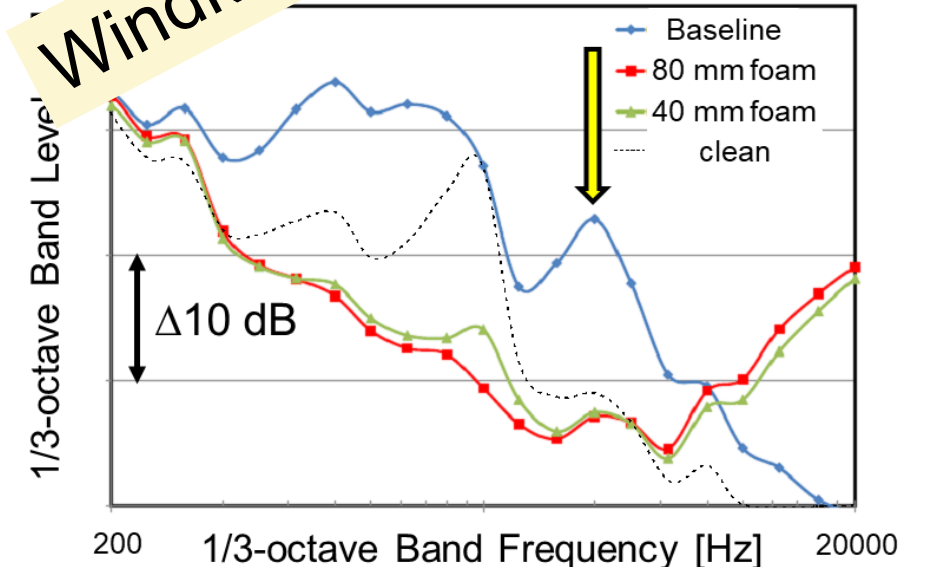
Stan Proskurov, current work on Flap Noise Simulations and Flyover Measurements of a Full-Scale A320 Aircraft

- Poröse Seitenkanten modifizieren die Wirbel und bedämpfen die auf die Oberfläche einwirkenden Wechseldrücke (Turbulenz)



Flugversuch

Windkanal



Installationseffekte des Hauptfahrwerks

- Lift:

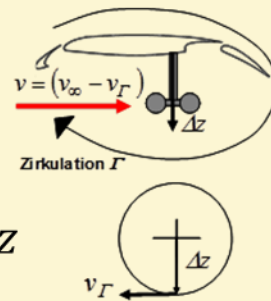
- Kutta-Joukowski $Lift = \Gamma * \rho_{\infty} * v_{\infty} * \Delta s$

- Wing area $Lift = \frac{\rho_{\infty}}{2} v_{\infty}^2 * c_L * c * \Delta s$

- Circulation:

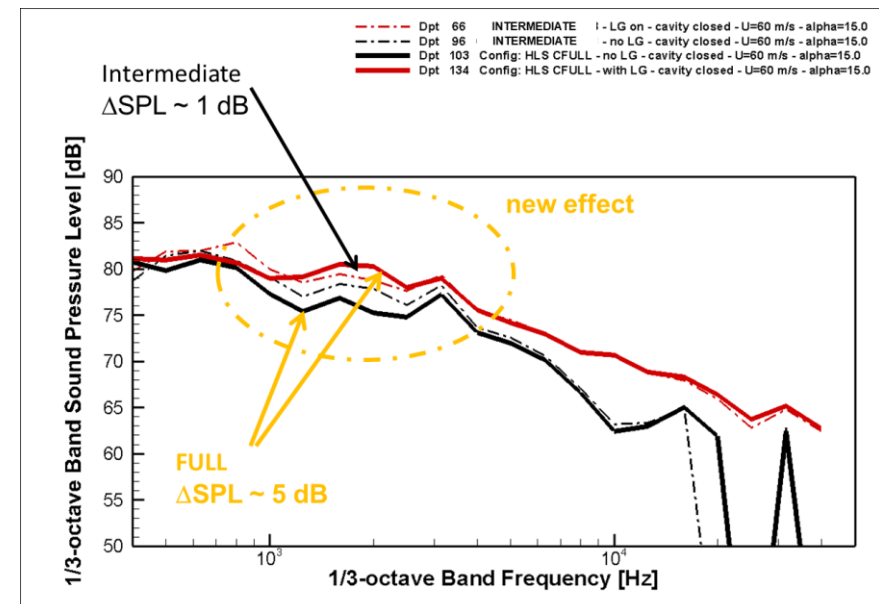
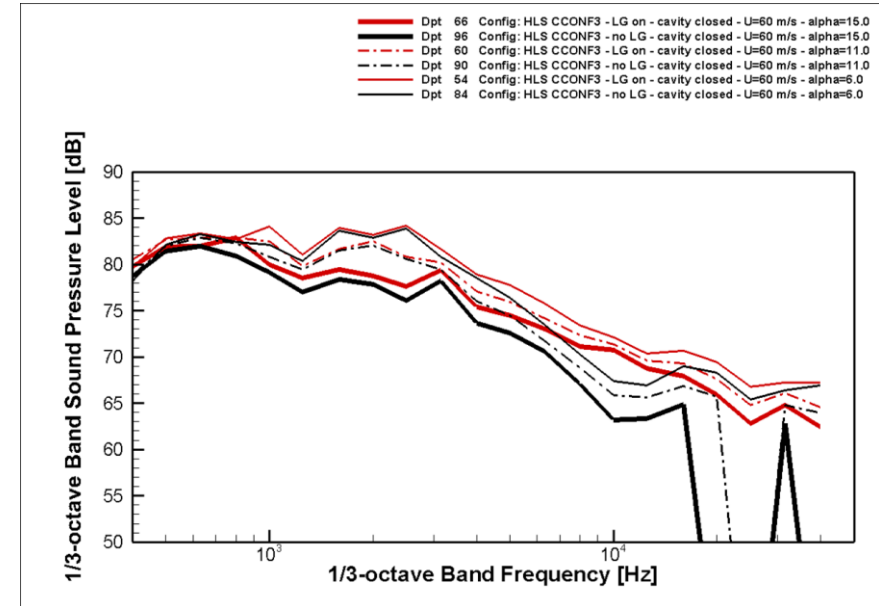
$$\Gamma = v_{\infty} * c_L * \frac{c}{2}$$

- $\alpha=0^{\circ}$: 1.9272 (m²/s)
 - $\alpha=15^{\circ}$: 10.83245 (m²/s)

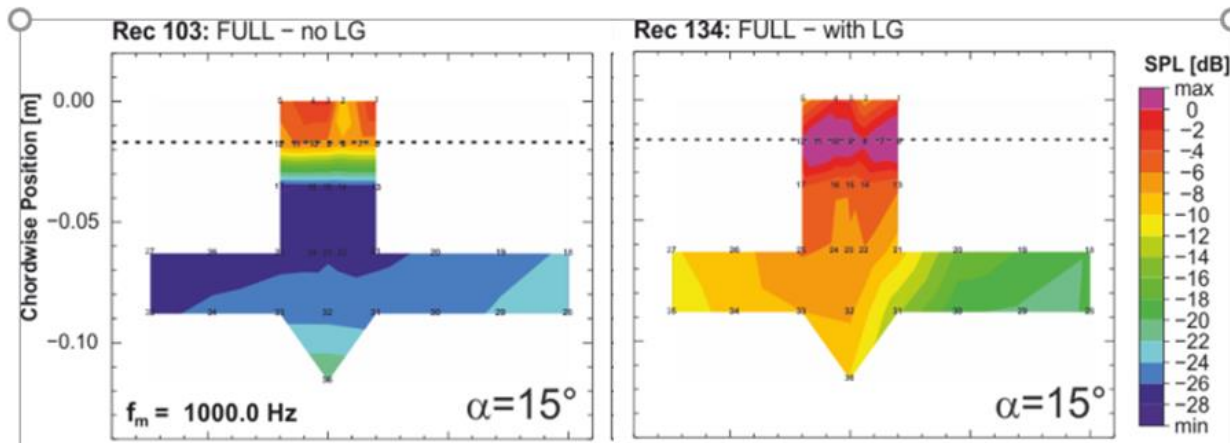
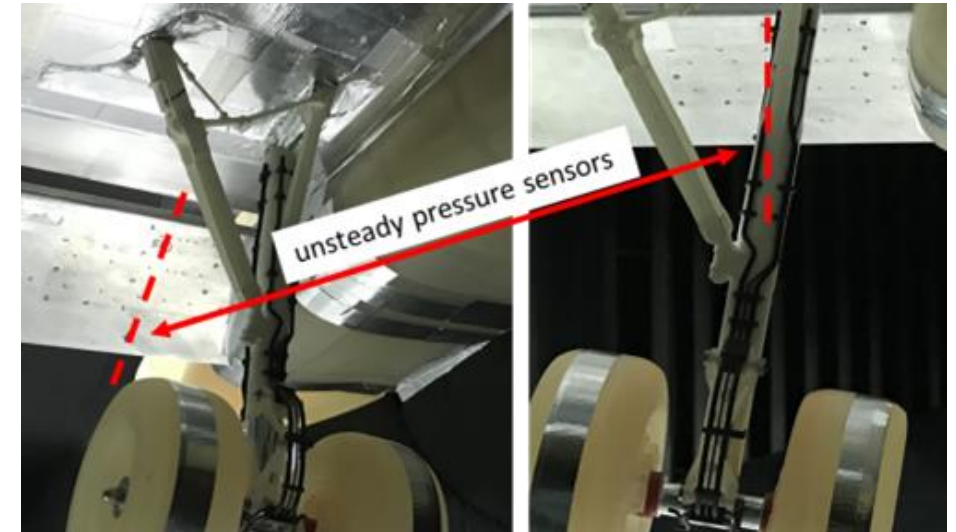
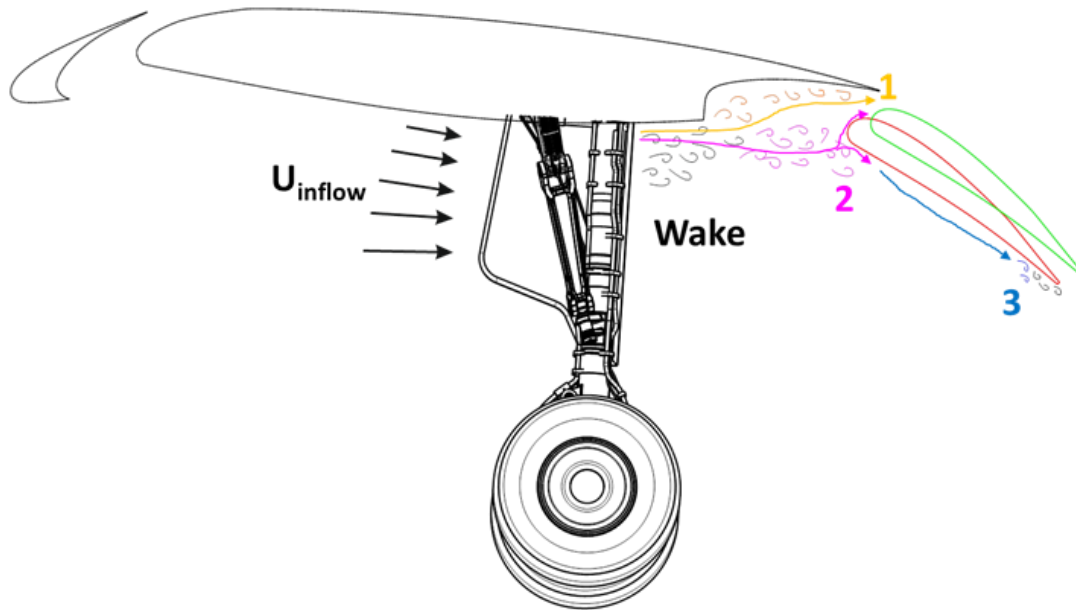


$$\Gamma = v_{\Gamma} * 2 * \pi * \Delta z$$

- $v_{\Gamma} = 1.25 \frac{m}{s}$ (0°) → 58.74 m/s
 - $v_{\Gamma} = 7.03 \frac{m}{s}$ (15°) → 52.96 m/s
 - Velocity change ~ 10%
 - close to the „acoustic“ value



Installationeffekte des Hauptfahrwerks



- Amiet: Vorderkantengeräusch

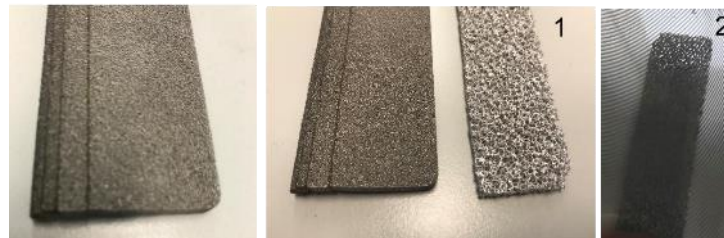
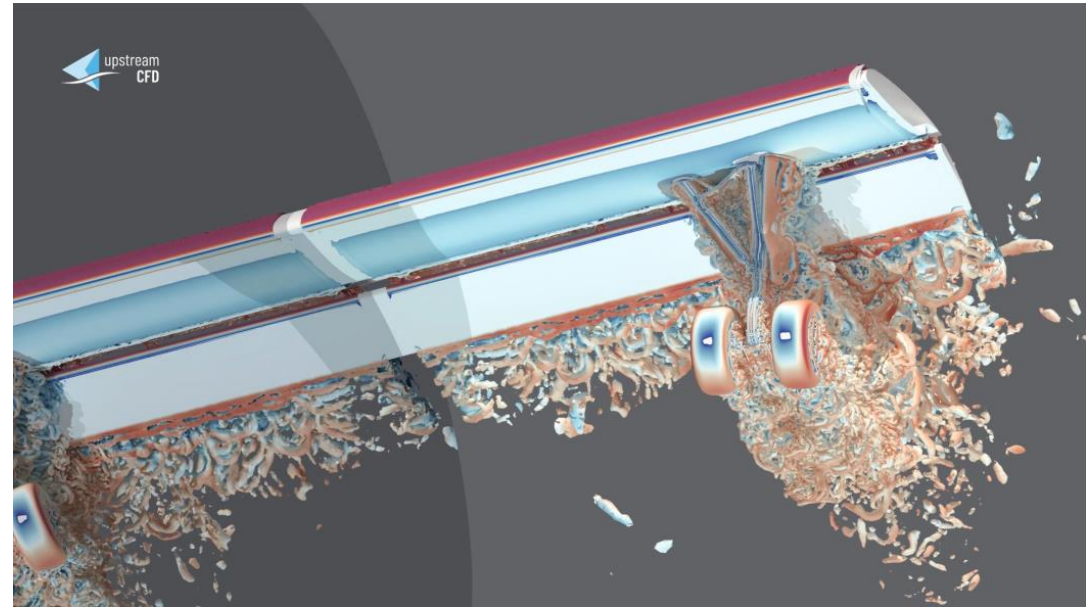
$$SPL_{1/3} = 10 \log_{10} \left[\frac{Ld}{z^2} M^5 \frac{\overline{u^2}}{U^2} \frac{K_x^3}{(1 + K_x^2)^{7/3}} \right] + 181 \cdot 3.$$

Turbulenzgrößen

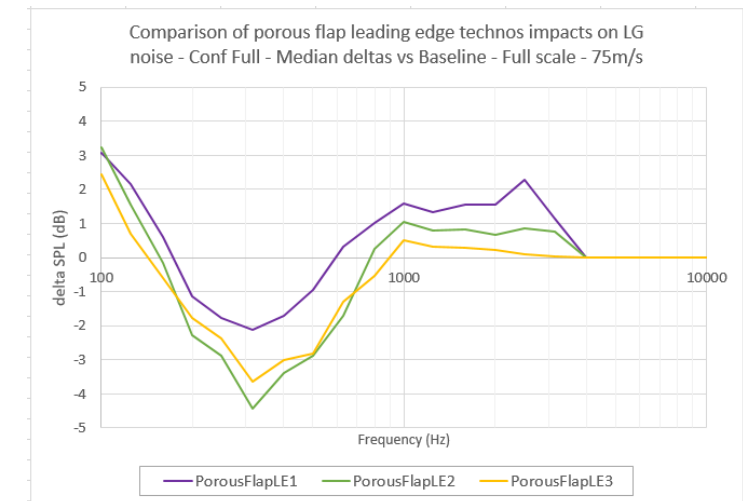
- Wechselwirkung von turbulentem Nachlauf und Landeklappenvorderkante führt zum identifizierten Geräusch

Wechselwirkung Fahrwerksnachlauf und Landeklappe

- Numerische Simulation (Upstream CFD, INVENTOR) zeigt den Nachlauf und die Interaktion mit der Landeklappe
- Das Geräusch kann mit porösen Einsätzen in der Landeklappenvorderkante deutlich reduziert werden



Porous flap leading edges
→ Good efficiency measured in WTT



Strahl-Klappen-Wechselwirkung

- Ziel: optimierte Installation des Triebwerks an den Flügel
- Reduktion des Strahl-Installationsgeräuschs durch den Einsatz poröser Materialien

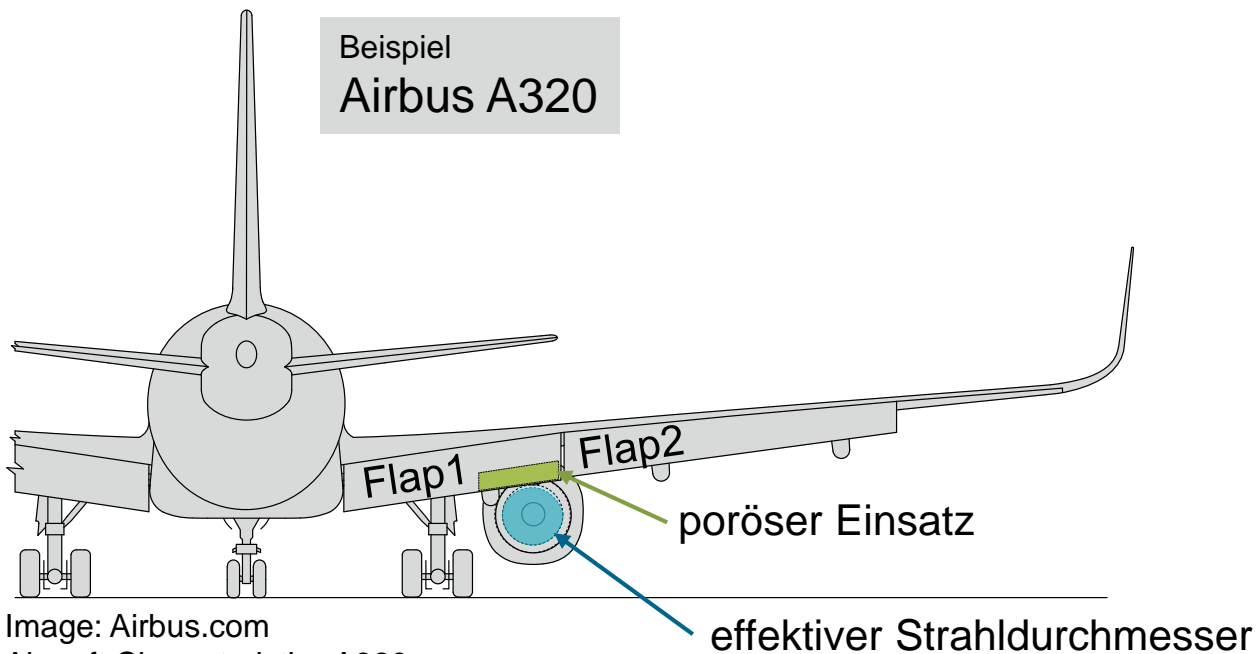


Image: Airbus.com
Aircraft Characteristics A320
- FLAPS EXTENDED -

Modelle im AWB



FLÜGEL

AIRBUS RDJ80

rechter 3D Flügel

$$C_{mid} = 3 D_{mix}$$

Zwei-Element

Hochauftriebssystem

wing, Flap $\delta_F = 14^\circ$

TRIEBWERK

SAFRAN

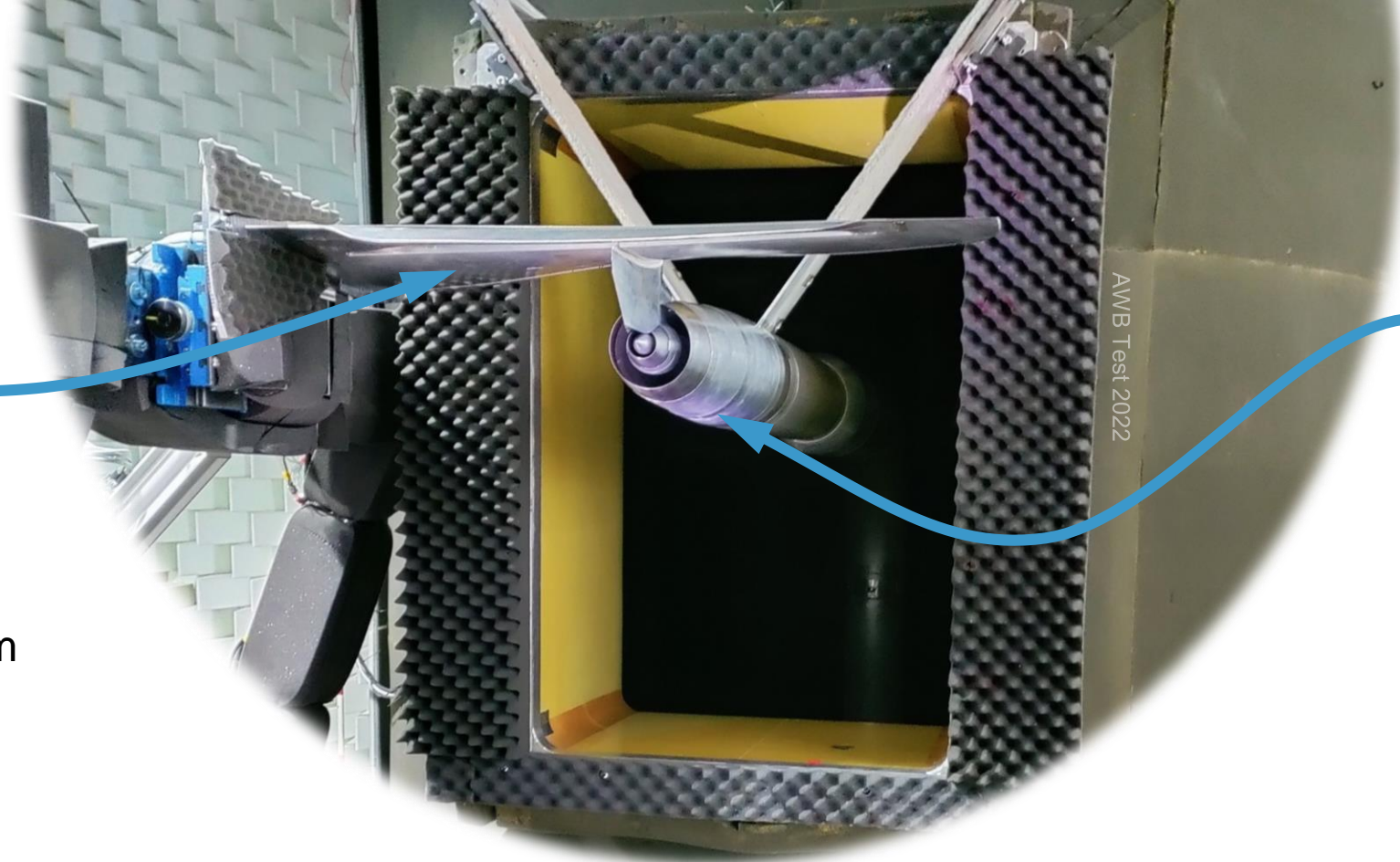
Short Cowl

Turbo-Fan

UHBR Triebwerk

$$A_{Byp}/A_{Core} \sim 7$$

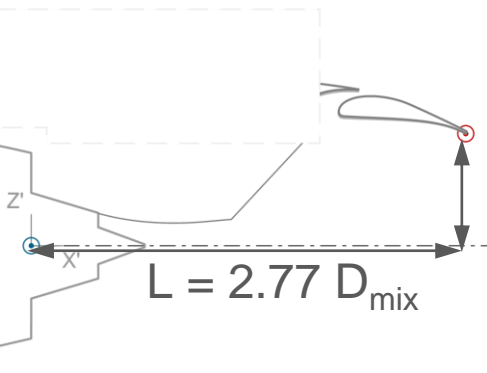
$$D_{mix} \sim \varnothing 100\text{mm}$$



TRIEBWERKSINTEGRATION inkl. Pylon

$$H_2 = 0.71 D_{mix}$$

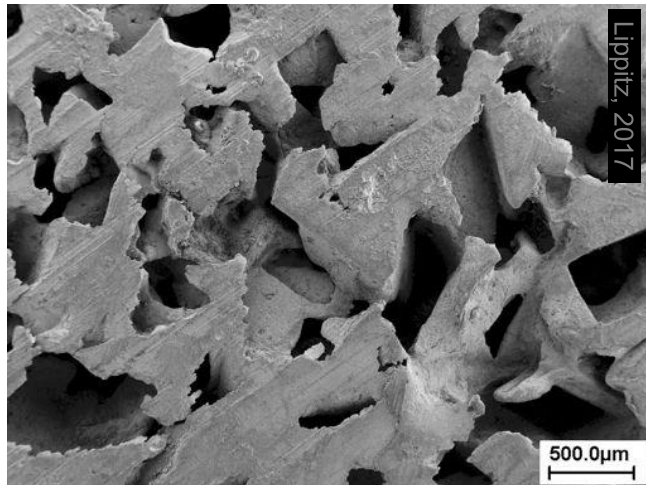
$$L = 2.77 D_{mix}$$



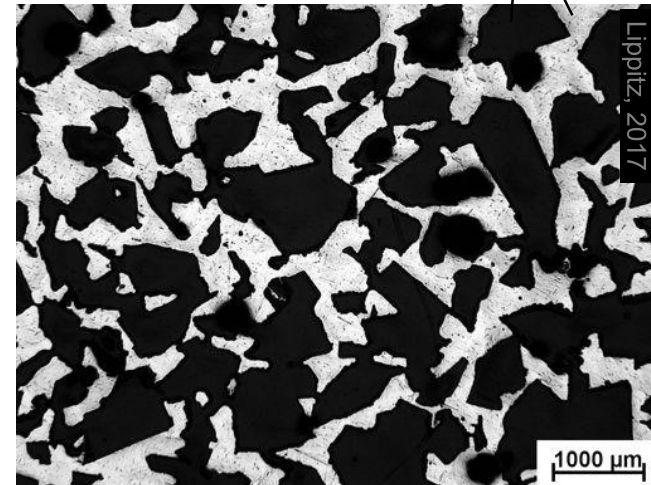
Modelle im Windkanal

Materialauswahl: PA80-110

Oberfläche
Rasterelektronenmikroskop

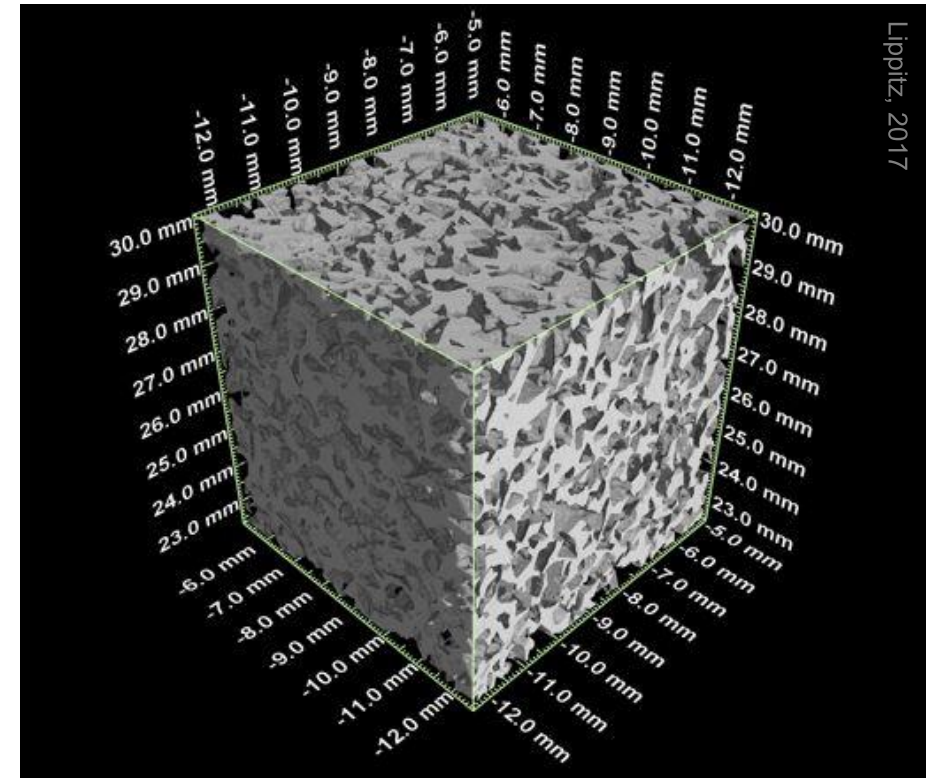


Polierte **Schnittfläche**
Optisches Mikroskop



cavity
Alu

3D Struktur
Computer Tomograph

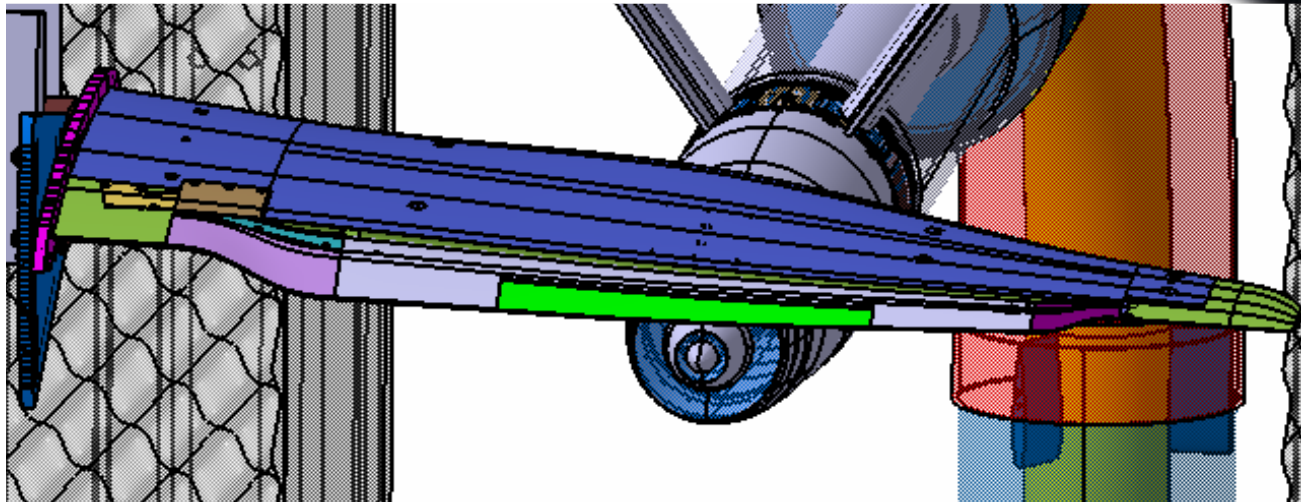


Salz Korngröße $d_{p,0}$ [μm]	Porengröße d_p [μm]	Spezifischer Strömungs- widerstand R [Ns/m^4]	Porosität Φ [-]
80-110	400-1000	145,5	46%

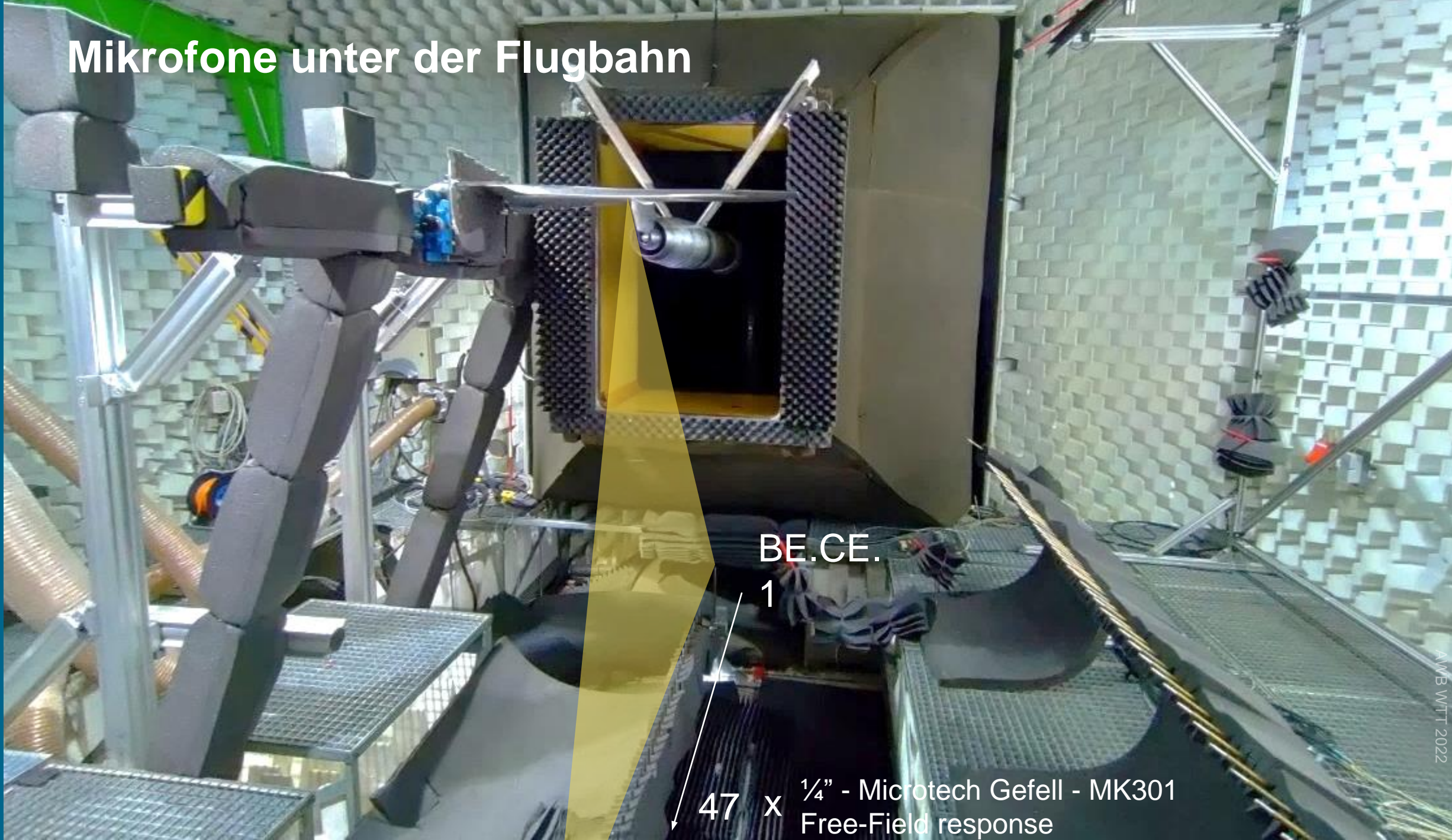
Modelle im AWB

Poröser Einsatz für die Landeklappen

- PA80-110 zeigt gute Ergebnisse in Vortest, 2D (DLR JExTRA, Berlin)
- komplexes 3D Insert, Herstellung: erodieren, 3D
- Test im AWB



Mikrofone unter der Flugbahn



BE.CE.

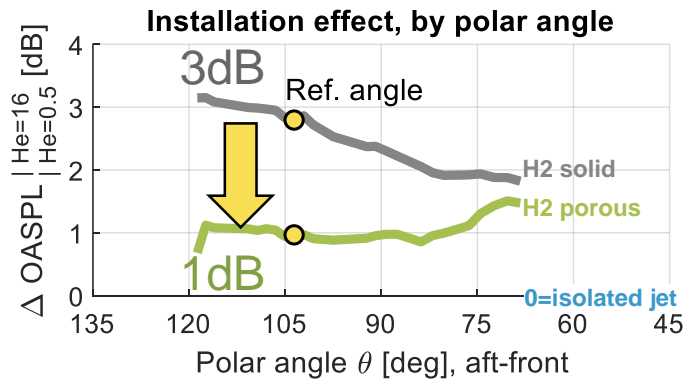
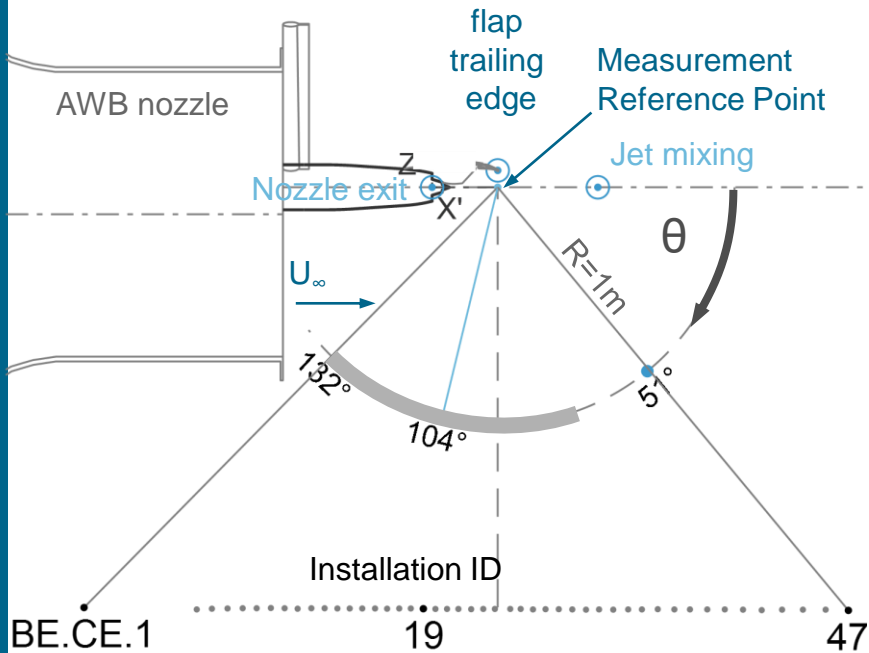
1

47 x 1/4" - Microtech Gefell - MK301
Free-Field response

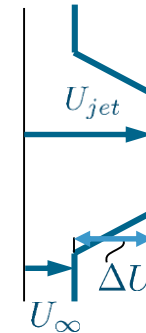
Installationseffekt für $H_2 = 0.71 D_{mix}$

Gesamtpegel bei Referenzbedingungen

$U_\infty = 60 \text{ m/s}$ $U_j = 244 \text{ m/s}$

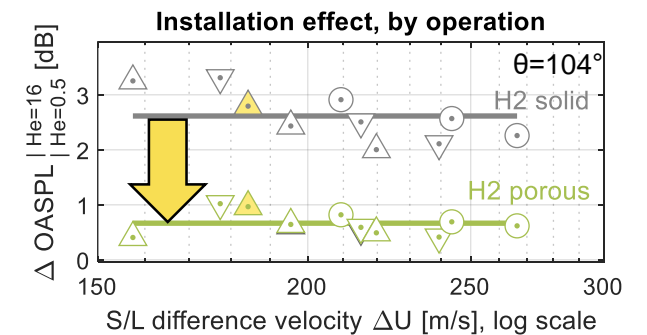
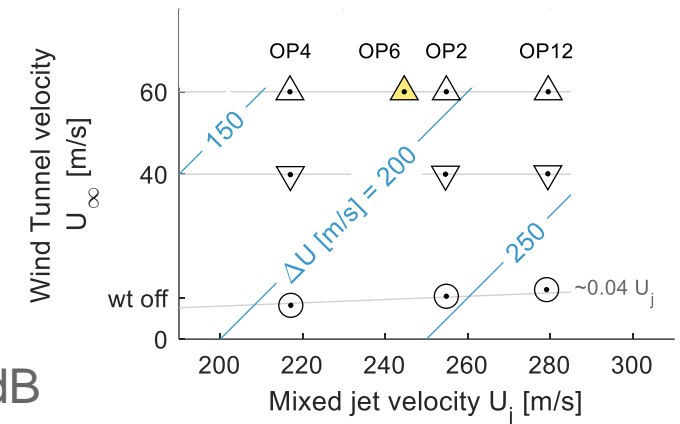


- Installationseffekt (solid flap) +3 dB
- Minderung (porous insert): -2 dB
- Minderung hoch bei Abstrahlung nach vorne
- Effekt ist unabhängig von den Betriebsbedingungen

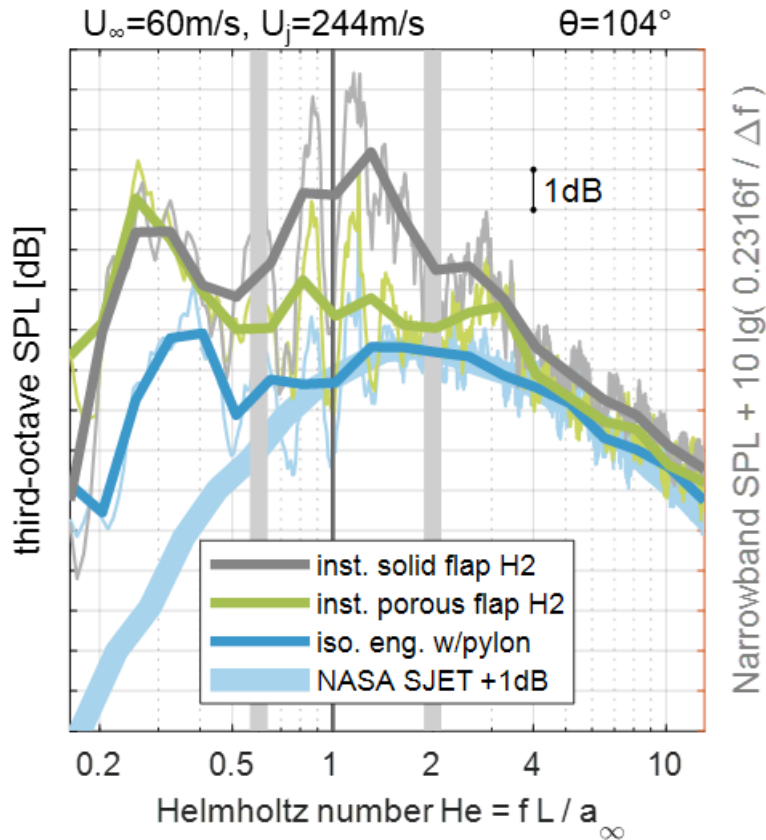
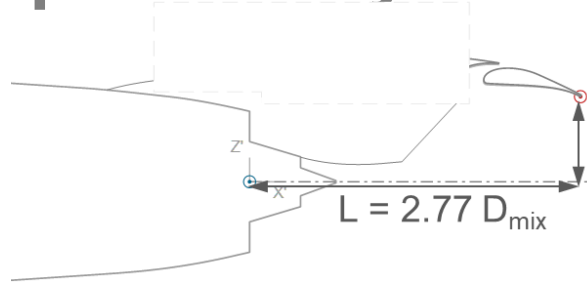


Betriebsbedingungen




Abstrahlung $\theta = 104^\circ$



Installationseffekt: Frequenzanalyse



Frequenzbereich

- I. $He < 1: \lambda > L$ 
Druckschwankungen auf der Druckseite des Flügels
“loading noise” $(\Delta U)^6$
- II. $He = 1: \lambda = L$ 
Strahl-Klappen-Interaktion
Resonanz zwischen Düsenauslaß und Landeklappenhinterkante
- III. $He > 1: \lambda < L$ 
reflected jet wave packets
“ U^8 / jet noise like”

Lärminderung

Aktuelles Experiment: keine Reduktion, weil SNR nicht hinreichend

Minderung: ~3dB

Kein Effekt, wie erwartet

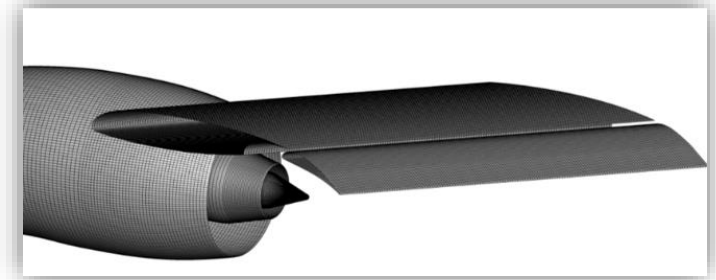
- 2D poröse Materialien auf **gekrümmten** Gittern (EU-DJINN)
- 3D poröse Materialien auf **gekrümmten** Gittern (EU-INVENTOR)

- 3D Strahl-Landeklappen Wechselwirkung auf **hierarchisch-kartesischen** Gittern (EU-DJINN)
- 3D poröse Materialien zur Minderung der Strahl-Landeklappen Wechselwirkung auf **hierarchisch-kartesische** Gitter (post EU-DJINN, **outlook**)

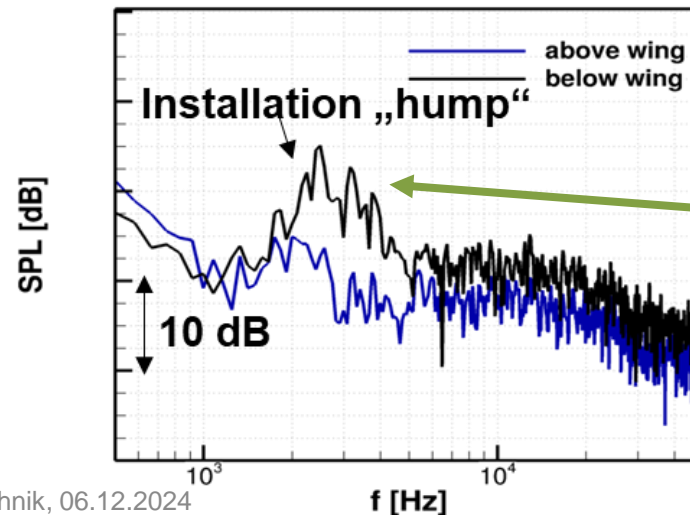
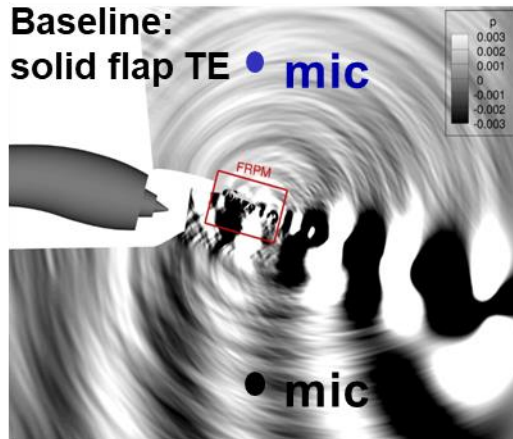
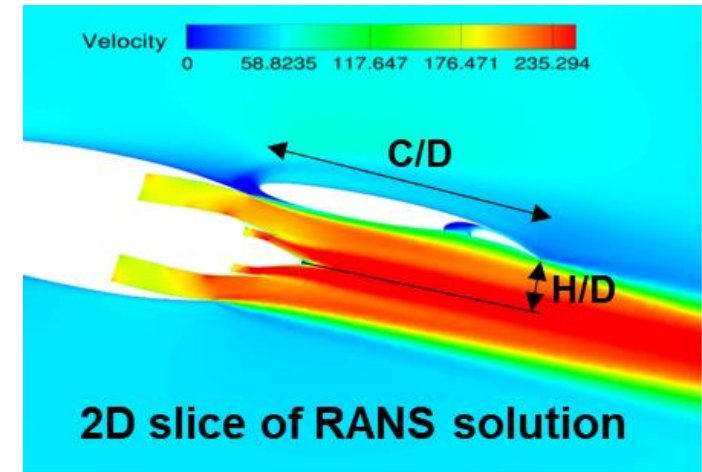
2D poröse Materialien auf gekrümmten Gittern (EU-DJINN)



- Düse und Hochauftriebssystem: EU-ARTEM, RANS verfügbar
- Düse: Bypass $Ma = 0.7$; Kern $Ma = 0.85$
- Flügel: Sehne 0.3 m , Klappenwinkel $= 15^\circ$
- Simulation im Freiflug, $Ma = 0.175$ (60 m/s)
- $L/D \sim 1.9$, height, $H/D \sim 0.5$



- CAA: GE in PIANO \rightarrow linearisierte Euler Gleichungen (LEEs) mit Gradienten der mittleren Strömung (unterstützt das Anwachsen von Instabilitäten)
- FRPM \rightarrow Vorticity based stochastic sound sources



Flügeldruckseite, Experiment

2D poröse Materialien auf gekrümmten Gittern (EU-DJINN)



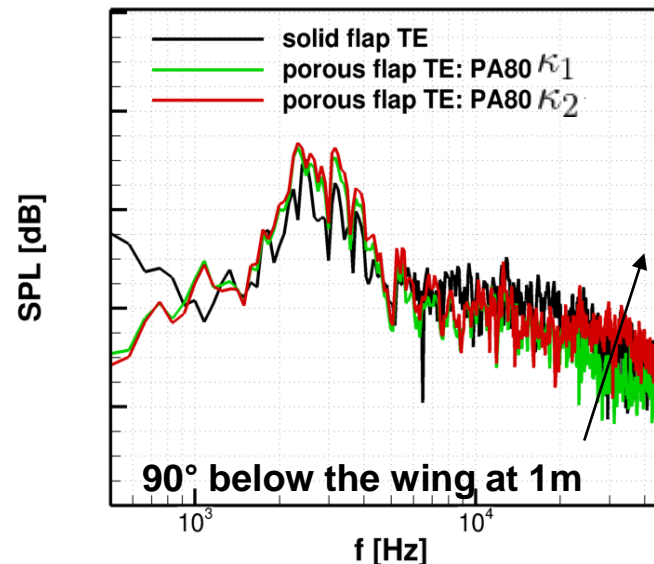
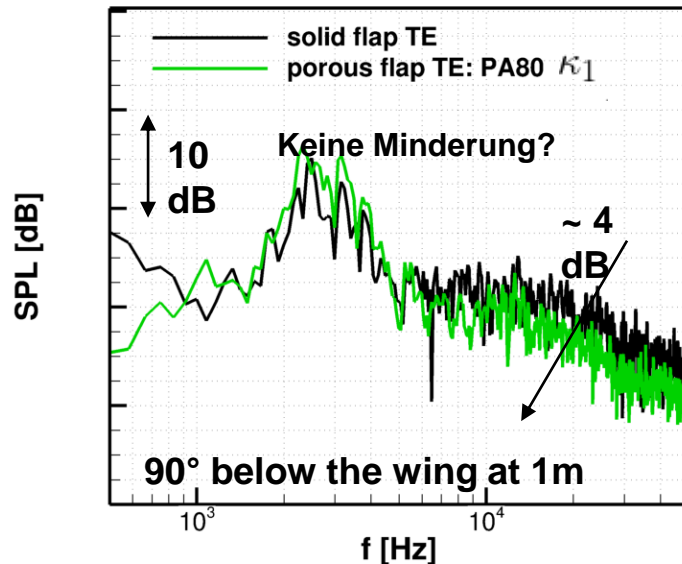
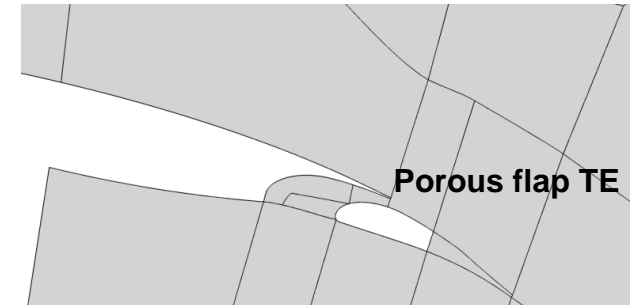
Landeklappenhinterkante: poröses Aluminium - PA 80-110

Porosität: $\phi = 0.46$

Permeabilität $\kappa_1 = 1.36 \times 10^{-9} m^2$ & $\kappa_2 = 4.5 \times 10^{-9} m^2$

Breits des Inserts = $0.5l_f$

Volumengemittelte LEE + FRPM (ER); poröse Materialien werden mit dem linearen Darcy and Forchheimer Term modelliert



3D poröse Materialien auf gekrümmten Gittern (EU-INVENTOR)

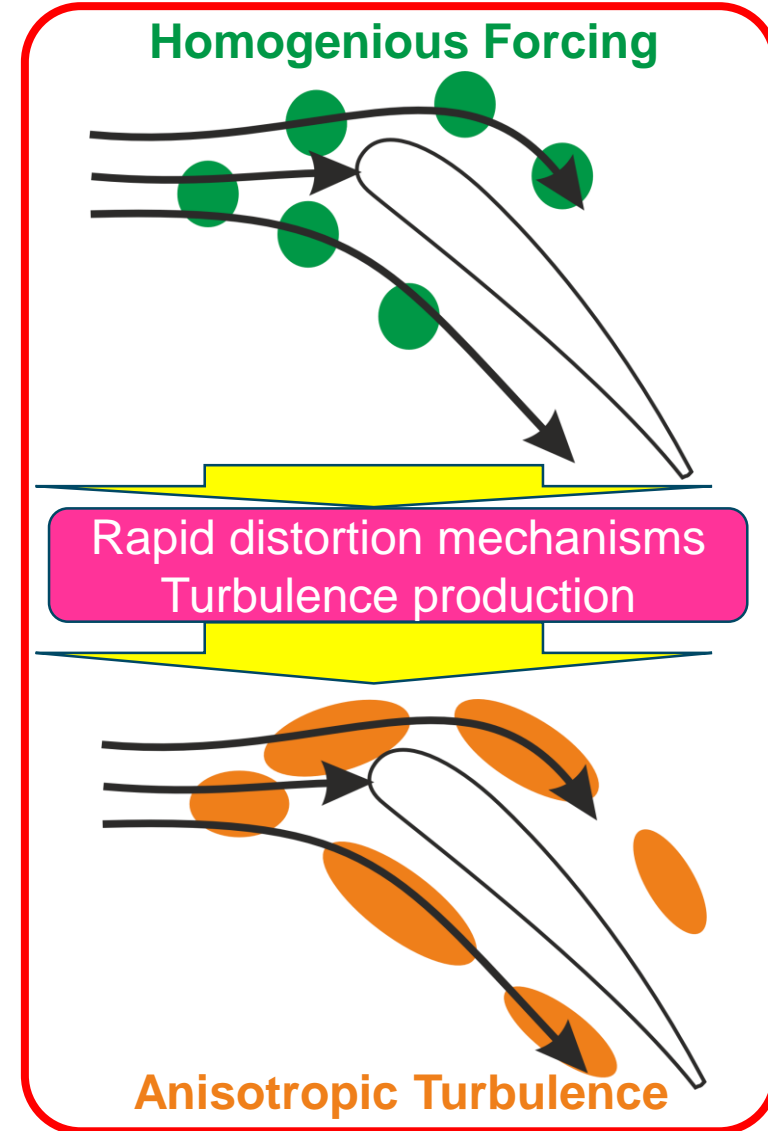
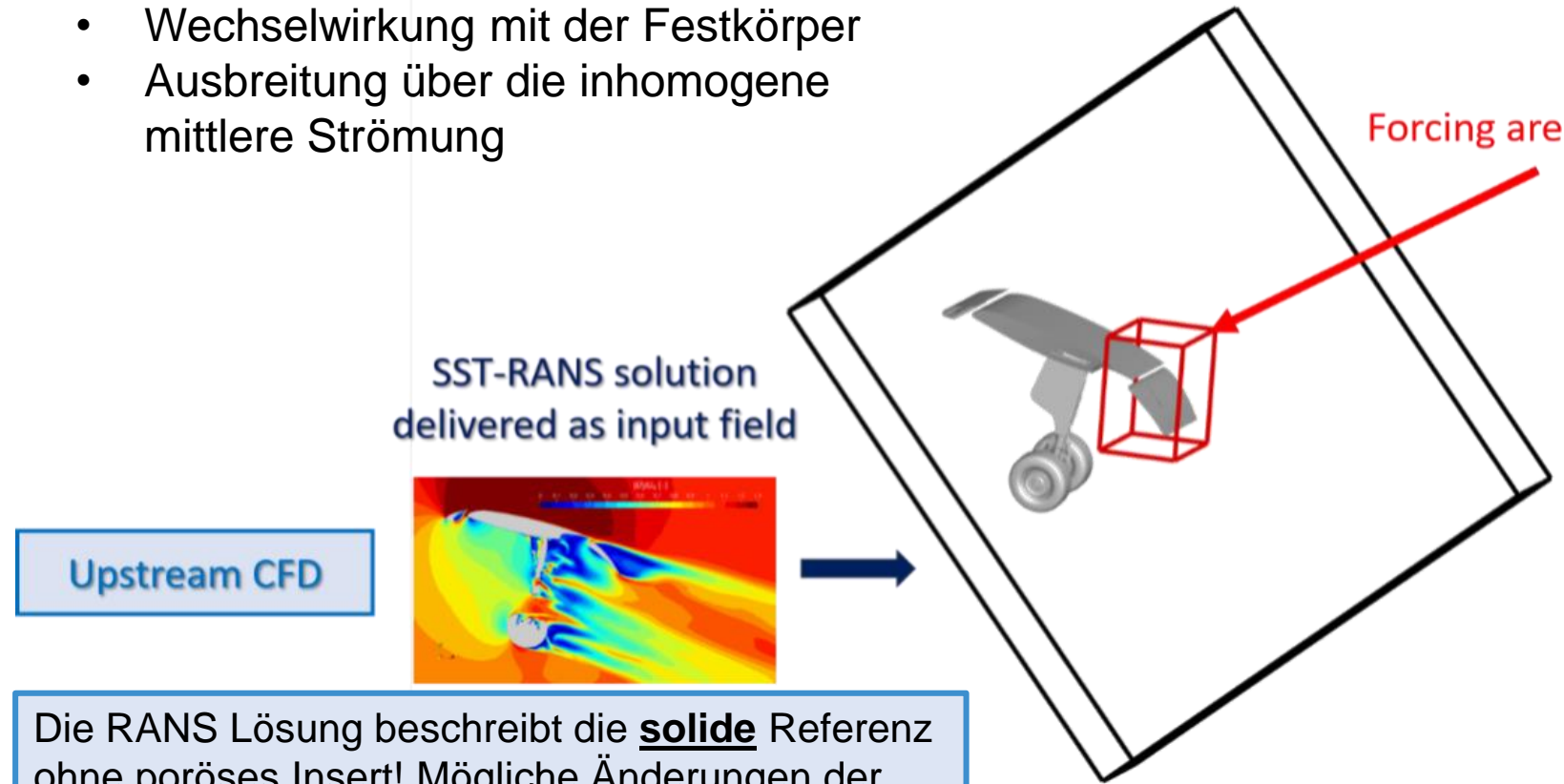


RANS-Lösung des gesamten Aufbaus liefert Strömungs- und Turbulenzstatistiken

Stochastically forced anisotropic turbulence (FRPM) →

Finite Differenzen Code zur Lösung der LEE

- Darcy- and Forchheimer Term (porosität berücksichtigen)
- Wechselwirkung mit der Festkörper
- Ausbreitung über die inhomogene mittlere Strömung



Die RANS Lösung beschreibt die **solide** Referenz ohne poröses Insert! Mögliche Änderungen der mittleren Strömung aufgrund der Porosität werden nicht berücksichtigt.

3D poröse Materialien auf gekrümmten Gittern (EU- INVENTOR - Computational Setup



Simulation:

Gekrümmtes Gitter für die Landeklappe

- Sprungbedingung am porösen Insert

IBM für andere Geometrien

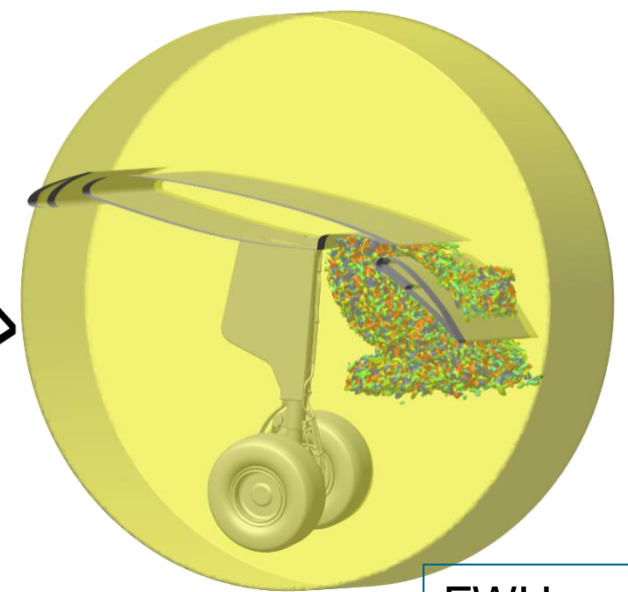
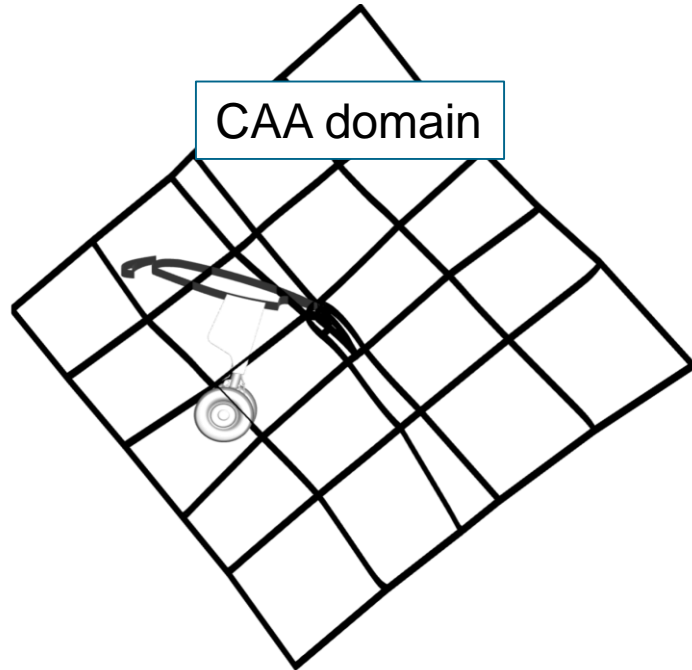
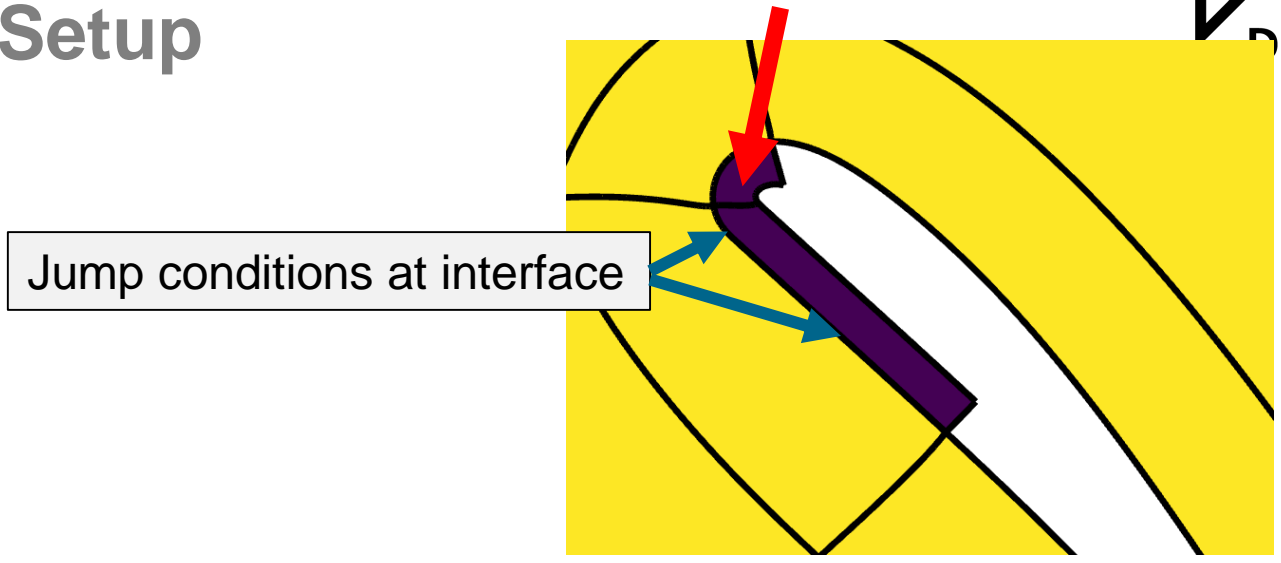
Poröse FWH Fläche

Porositäts Modellierung

- Darcy- and Forchheimer Term

Parameters	Values
Blöcke	300
Punkte	35E6
Domain	1.1 m x 0.2 m x 1.1 m

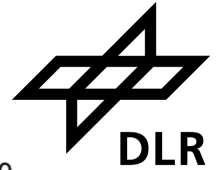
Name	Porosity Φ	Permeability
Reference	0	1
PA80	0.46	4.3E-9
PA120	0.46	1.3E-8
PA200	0.46	4.78E-8



Ergebnisse Direktivitäten (r=10m)

OASPL [400Hz-10kHz]

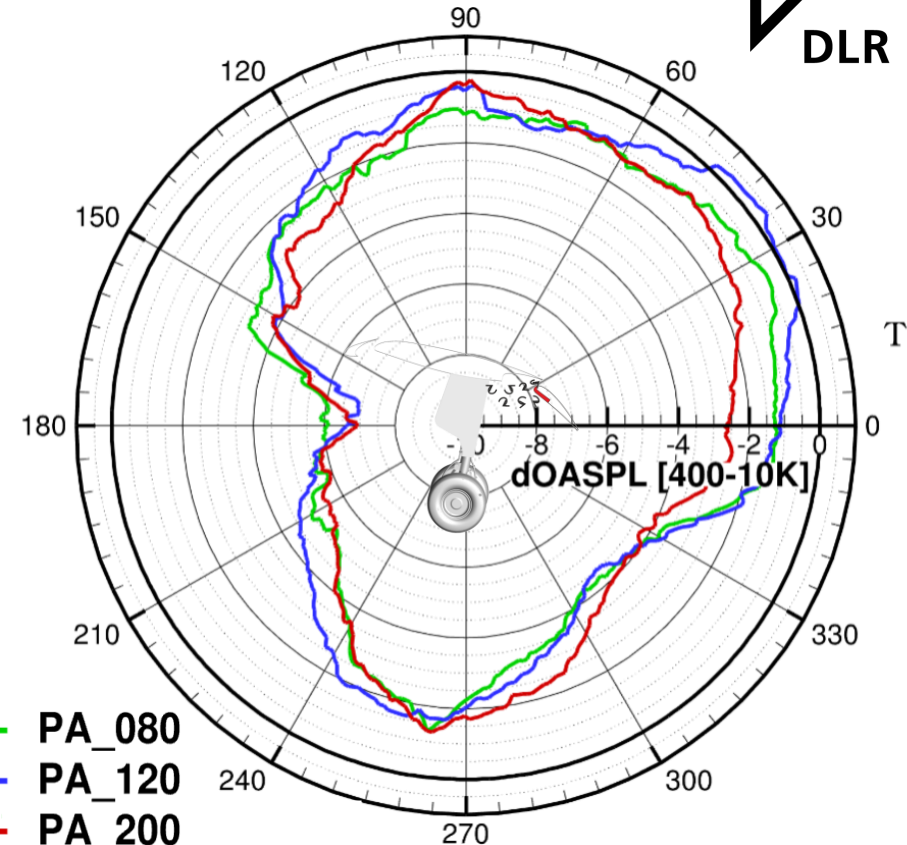
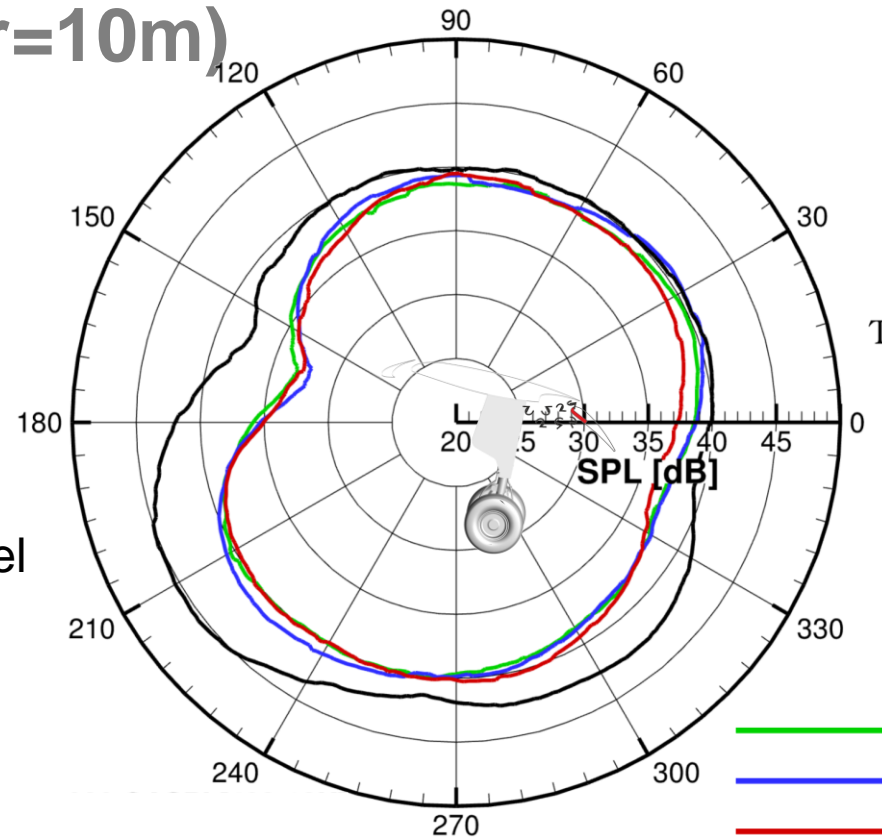
Δ OASPL [400Hz-10kHz]



OASPL für Frequenzen
440 Hz bis 10 kHz

Dipol Pattern

Höchste Schalldruckpegel
für solide Referenz in
Richtung Boden
(Winkel 210°-330°)



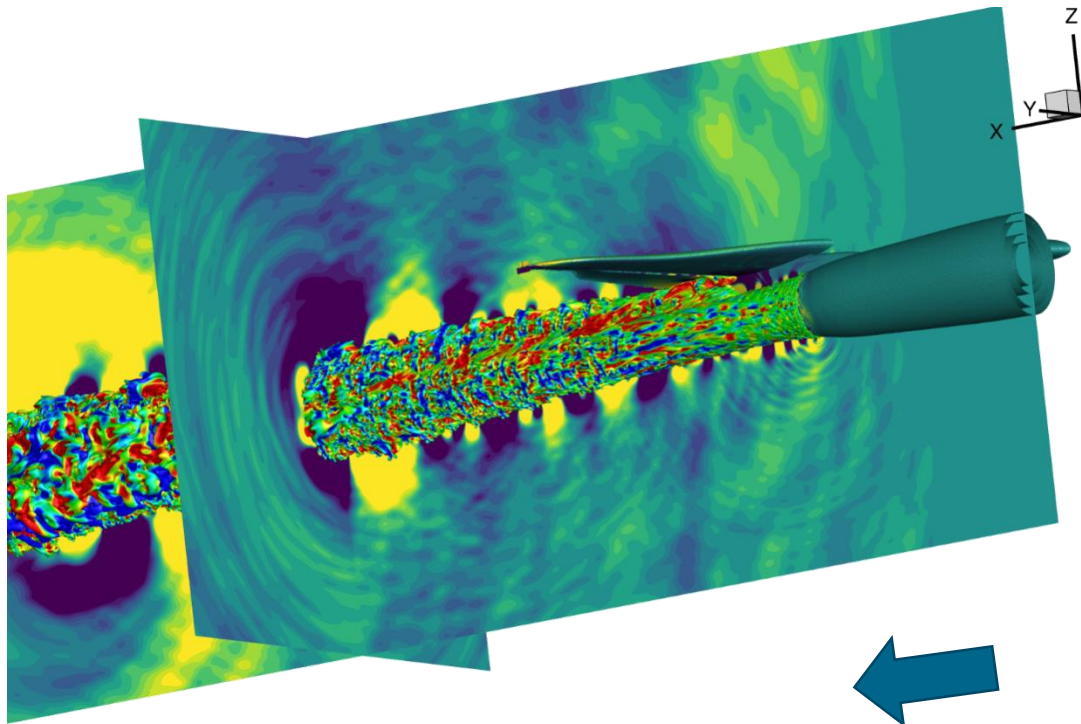
— PA_080
— PA_120
— PA_200
— REF

- Maximalpegel der soliden Referenz: 45 dB, Abstrahlung in Richtung 200° bis 220°
- Maximalpegel mit porösen Inserts ca. 5 dB geringer
- Die porösen Inserts mindern den Gesamtpegel um ca. 2 bis 5 dB

3D Strahl-Landeklappen Wechselwirkung auf hierarchisch-kartesischen Gittern (EU-DJINN) - Windkanal aufbau vs. freifliegendes Flugzeug

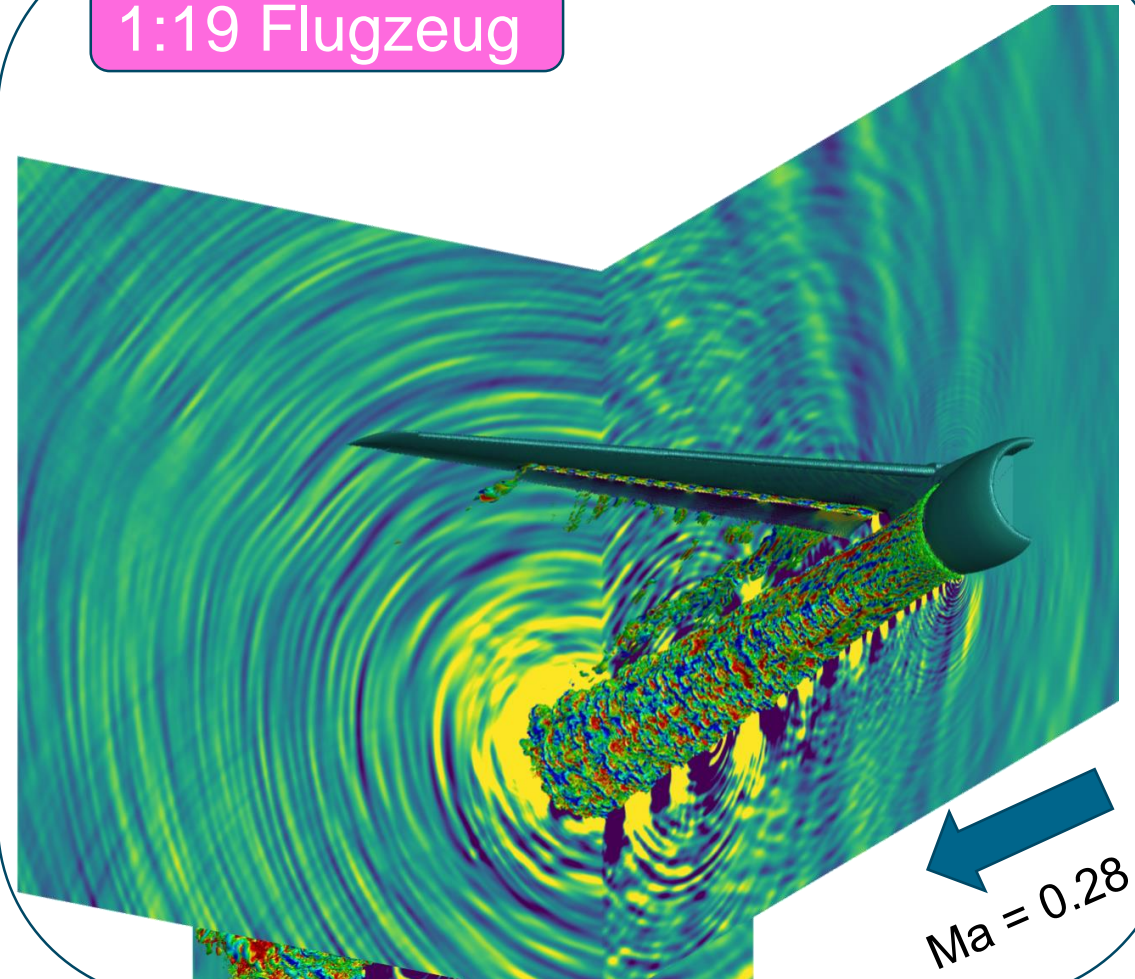


Windkanal



Ma = 0.18

1:19 Flugzeug



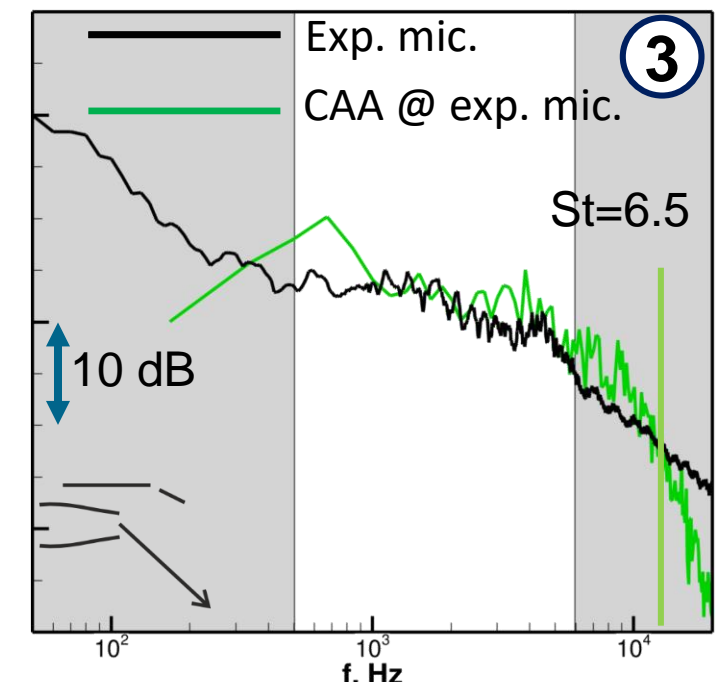
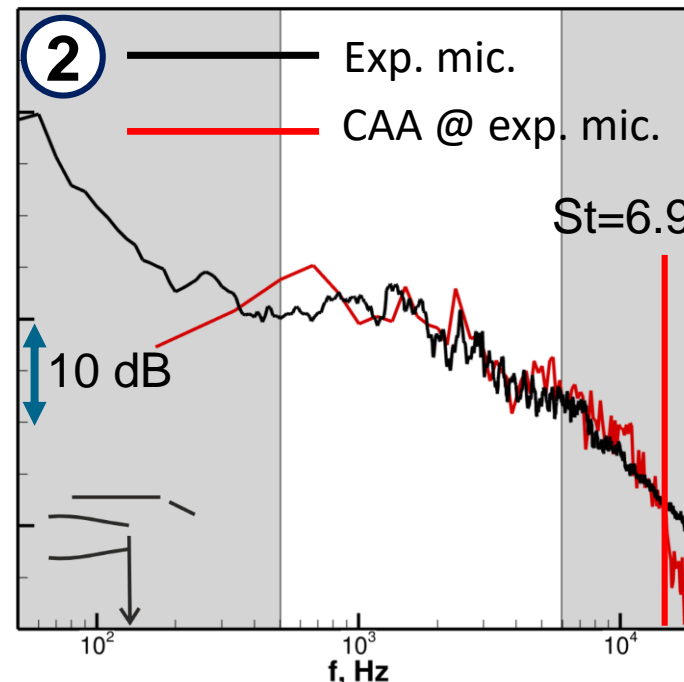
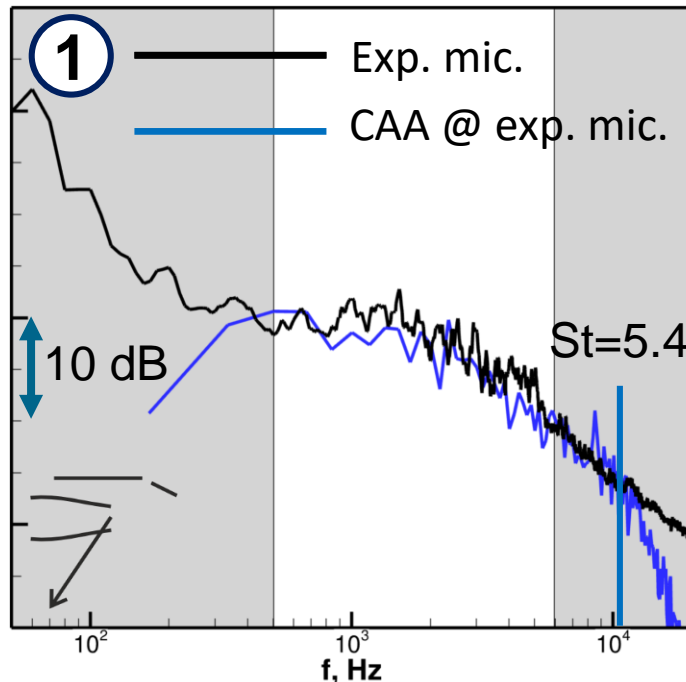
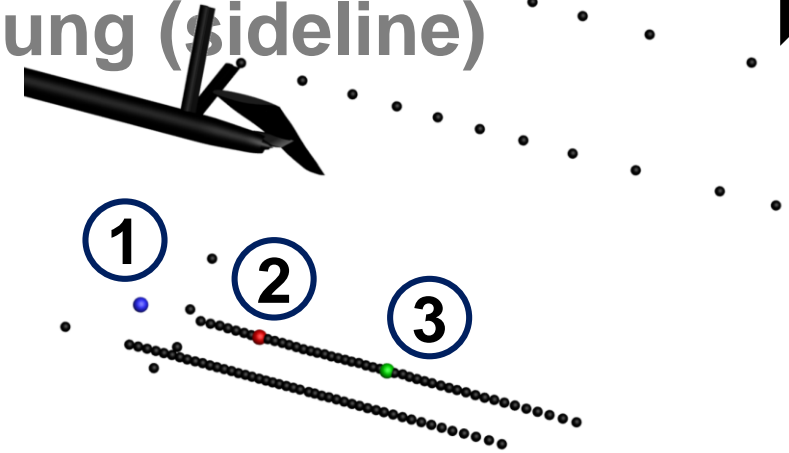
Ma = 0.28

Fully 3D with immersed boundary conditions

3D Strahl-Landeklappen Wechselwirkung auf hierarchisch-kartesischen Gittern (EU-DJINN) - Validierung (sideline)



- Propagation zu AWB Mikrofonen
 - Direktvergleich an Messmikrofonen
- Grauhinterlegte Regionen
 - unter 500 Hz (Grenze des Windkanals)
 - über $St=3$ (Zielsetzung im Projekt)



3D poröse Materialien zur Minderung der Strahl-Landeklappen Wechselwirkung auf hierarchisch-kartesischen Gittern (post EU-DJINN, outlook)

3D poröse Materialien: muss für Immersed Boundaries implementiert werden

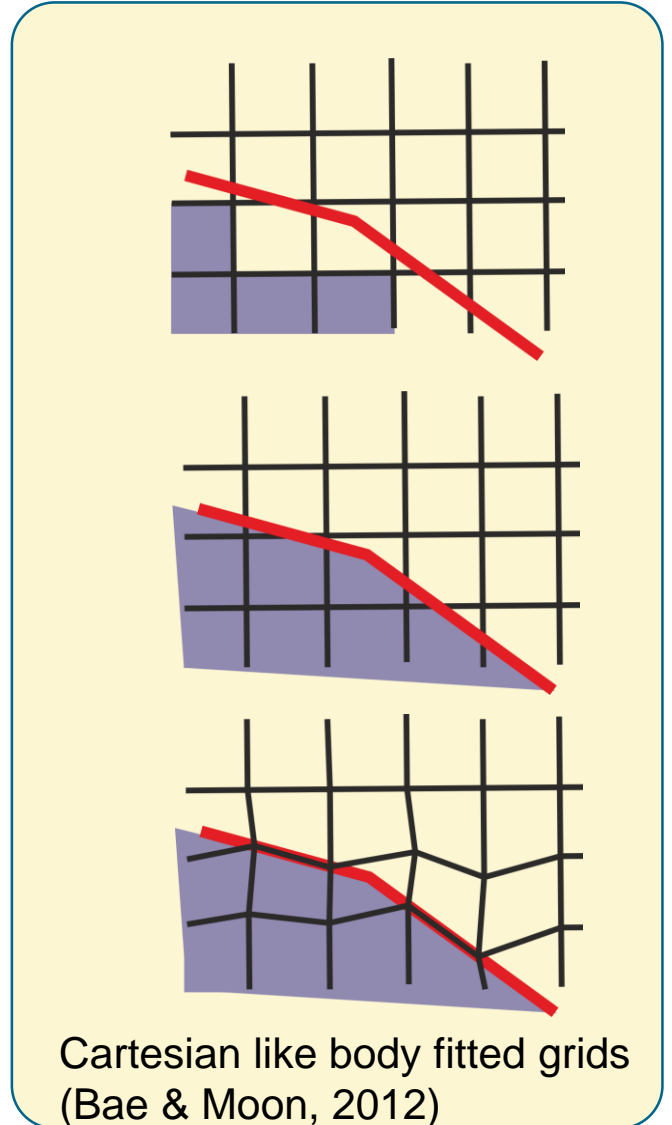
Porosität wird schritt- bzw. zellenweise berücksichtigt,
keine Sprungbedingung auf der Materialgrenze



Sprungbedingung in die IBM integrieren

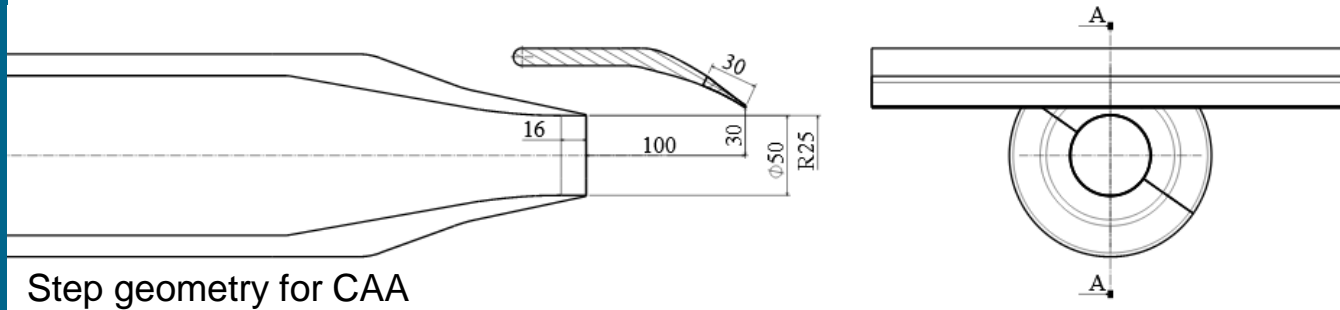
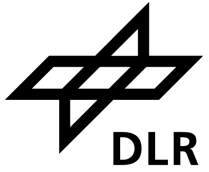


Formulierung für hierarchisch kartesische Gitter
(Boundary fitted cartesian like grid,
Bae & Moon, Comp. & Fluids, 2012)

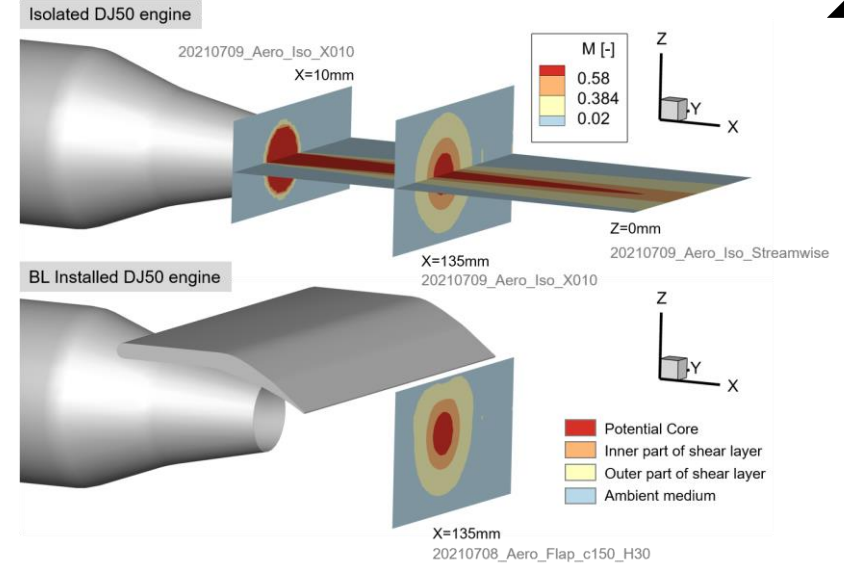


- Beispiele für die Anwendung poröser Werkstoffe zur Minderung des Umströmungsgeräuschs von Verkehrsflugzeugen wurden vorgestellt
- Bisher erfolgt(e) die Entwicklung von Lärminderungsmaßnahmen experimentell in Labor (Werkstoffcharakterisierung) und im Windkanal (Messung an Modellen)
- Zukünftig werden numerische Methoden für die Entwicklung eingesetzt werden können, erste Anwendungen zeigen die Möglichkeiten

WERBEBLOCK! JExTRA Experiment (keine Pylon) wird veröffentlicht

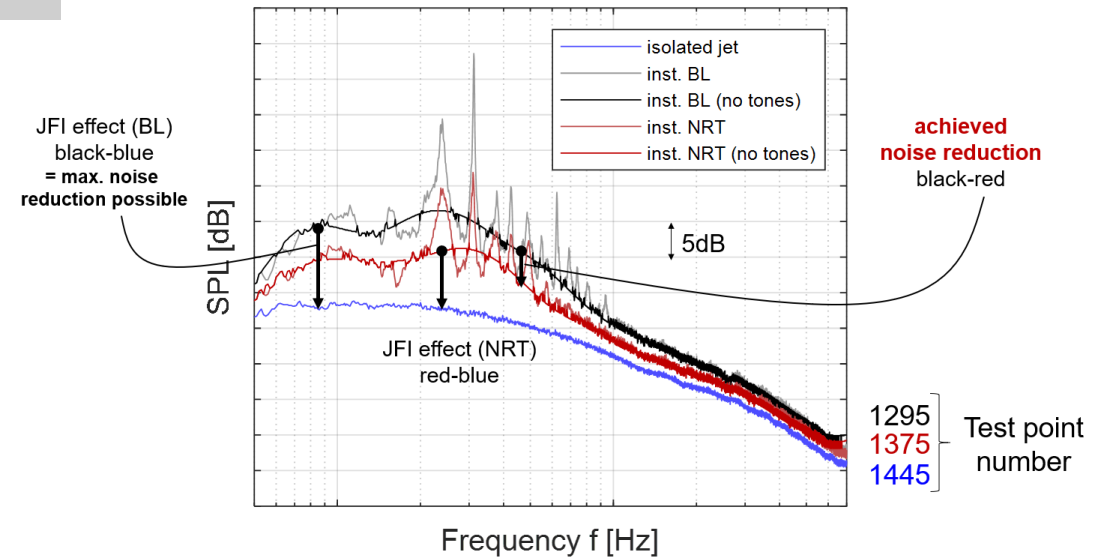
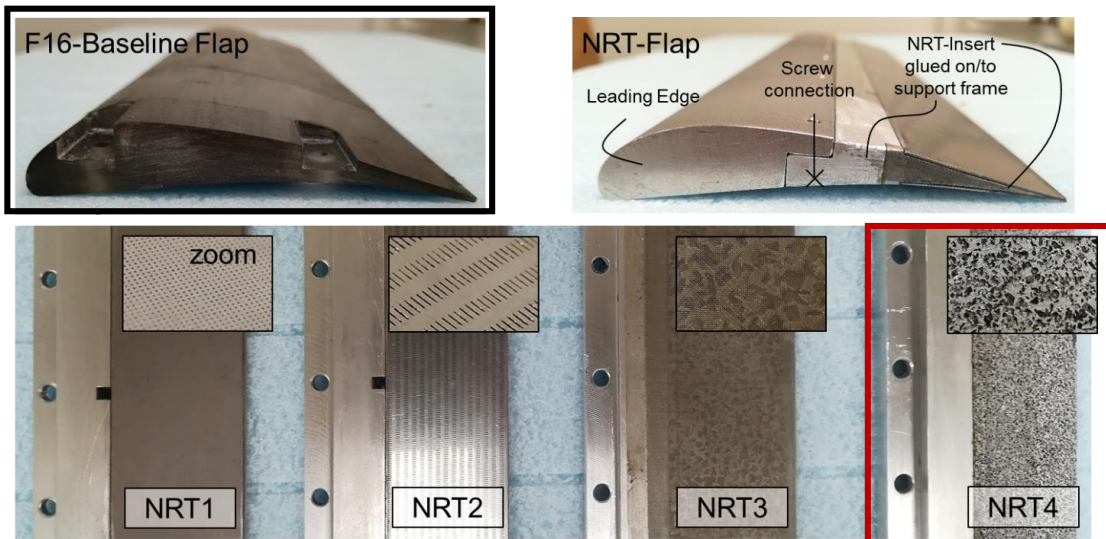


Gemittelte Aerodynamische Daten



Experiment wird als ERCOFTAC Testfall gelistet; **EXP1-6** auf https://kbwiki.ercoftac.org/w/index.php/EXP_Index

Akustische Messdaten für 10 Mikrofone



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



Die gezeigten Daten enthalten Beiträge von

- Henri Siller, DLR
- Jerome Huber, Airbus Operations, Toulouse
- Celia Ekoule, Airbus Operations, Toulouse
- Edoardo Paladini, Safran Aircraft Engines, Moissy Cramayel
- Tristan Goffredi, Safran Aircraft Engines, Moissy Cramayel

Referenzen



Veröffentlichungen

- [1] Lippitz, N: Poröse Materialien zur Reduzierung von Hinterkantenschall an Flugzeugflügeln, Technische Uni Braunschweig NFL, 2017, ISBN-13: 978-3-928628-91-4
- [2] Herr, M., Rossignol, K.-S., Delfs, J., Lippitz, N., and Mößner, M., Specification of Porous Materials for Low-Noise Trailing-Edge Applications. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2014, DOI: 10.2514/6.2014-3041
- [3] Jente, C., Schmidt, J., Delfs, J., Rossignol, K-S, Pott-Pollenske, M., Siller, H., Noise reduction potential of flow permeable materials for jet-flap interaction noise, 28th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2022. DOI: 10.2514/6.2022-3040, see NRT4
- [4] Jente, Huber, Renard, Goffredi, Paladini, „Jet-flap installation noise of pylon mounted jet engine on 3D wing“. 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2024, Rome, Italy. doi: 10.2514/6.2024-3309.
- [5] Jente, Huber, Ekoule, Goffredi, Paladini: „Porous Flap Trailing Edges for the Reduction of Jet Installation Noise“. DAGA 2024, Hannover, Germany, pp. 1179-1182
- [6] Rossian, Ewert, Delfs: “Numerical investigation of porous materials for trailing edge noise reduction”, International Journal of Aeroacoustics, Volume 19, Issue 6-8, <https://doi.org/10.1177/1475472X20954410>
- [7] Dierke, Jürgen und Mößner, Michael und Ewert, Roland und Delfs, Jan Werner (2024) Wind Tunnel vs. Free Flying Aircraft: Comparison of UHBR Jet Installation Noise Using Zonal LES on Octree-Cartesian Grids. 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2024-06-04 - 2024-06-07, Rom, Italien
- [8] Rossian, Lennart und Suryadi, Alexandre und Rossignol, Karl-Stephane und Ewert, Roland und Herr, Michaela und Delfs, Jan Werner und Kumar, Pradeep (2018) Numerical and Experimental Insights into the Noise Generation of a Circulation Control Airfoil. In: 24th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2018. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.. 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference at AIAA AVIATION Forum 2018 Atlanta, GA, USA, 2018-06-25 - 2018-06-29, Atlanta, Georgia, USA. doi: 10.2514/6.2018-3139. ISBN 978-162410560-9
- [9] Faßmann, Benjamin und Rautmann, Christof und Ewert, Roland und Delfs, Jan Werner (2015) Prediction of Porous Trailing Edge Noise Reduction via Acoustic Perturbation Equations and Volume Averaging. In: 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2 (2525), Seiten 1166-1183. 21th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2015-06-22 - 2015-06-26, Dallas, Texas. doi: 10.2514/6.2015-2525. ISBN 978-1-5108-0820-1
- [10] Michael Pott-Pollenske, Daniela Almoneit, and Heino Buchholz: “Low Noise ATRA – An Aircraft Noise Reduction Study based on Retro-fit Technologies”, AIAA AVIATION FORUM, August 2-6, VIRTUAL EVENT, AIAA AVIATION 2021 FORUM
- [11] Michael Pott-Pollenske, Fabian Reuschling, Ezzad Megat, Henri Siller: ”Effectivity Assessment of Noise Reduction Technologies by means of Flight Tests”, AIAA-2024-3056, 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 04.06.2024, Roma, Italy