

# Geräuschquellen am Flugzeug und Möglichkeiten der Lärminderung

ICANA 2023

09.03.2023

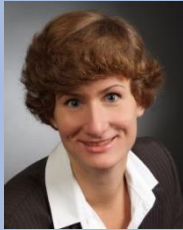


[2]

# Institutsleiter und Wissenschaftliche Mitarbeiter



**Prof. Dr.-Ing. Jeanette  
Hussong**



*Fachgebiet Strömungslehre  
und Aerodynamik*

**Louis Reitter, M.Sc.**



*Wissenschaftlicher Mitarbeiter*

*Forschungsschwerpunkt  
Untersuchung von Ice Crystal  
Icing bei Flugzeug  
Triebwerken*



**Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter  
Schiffer**



*Fachgebiet Gasturbinen, Luft-  
und Raumfahrtantriebe*

**Florian Goertz, M.Sc.**



*Wissenschaftlicher Mitarbeiter*

*Forschungsschwerpunkt  
Numerische Turbinen-  
simulation der Brennkammer-  
Turbinen-Interaktion*



**Prof. Dr.-Ing. Uwe  
Klingauf**



*Institut für Flugsysteme und  
Regelungstechnik*

**Pascal Menner, M.Sc.**

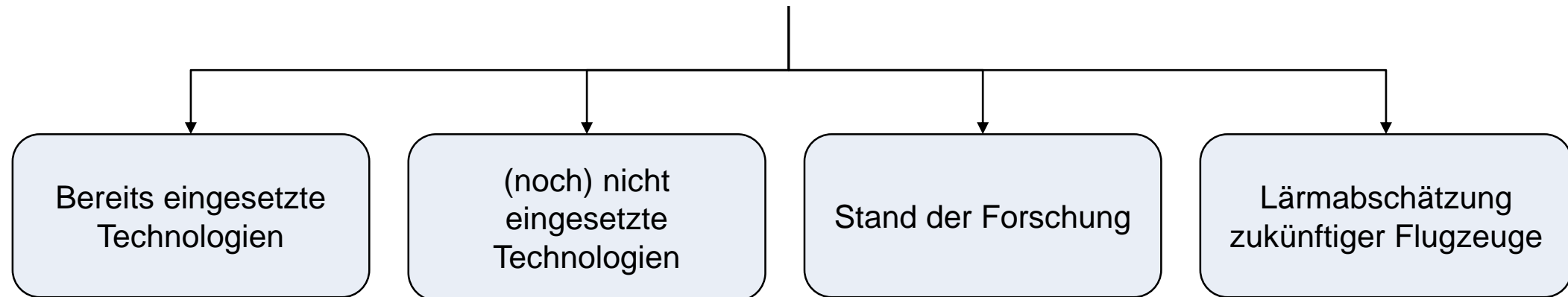


*Wissenschaftlicher Mitarbeiter*

*Forschungsschwerpunkt  
Integration einer Bodenstation  
bei Flugmissionen mit  
reduzierter Cockpitbesatzung*

# Ziele der Technischen Lärmstudie

## Überblick über den Entwicklungsstand von lärmindernden Technologien in Industrie und Forschung mit Bezug auf die bestehende Flugzeugflotte in Frankfurt a.M.



## Literaturrecherche:

- Grundlagen und aktueller Stand der Lärmentstehung und Lärmbewertung
- Entwicklung und aktueller Stand der Lärminderungsmaßnahmen
- Überblick zu aktuellen Forschungsprojekten zu Lärminderungsmaßnahmen (Paper, Forschungsberichte)



## Lecture Series:

- Besuch der Lecture Series „Advanced Concepts for the Reduction of Flow-induced noise Generation, propagation and transmission“ des von Karman Institute for Fluid Dynamics (Belgien) im Rahmen des Projekts „SmartAnswer“
- 13 europäische Forschungseinrichtungen beteiligt, 17 Doktoranden + Professoren



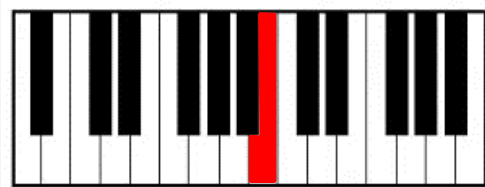
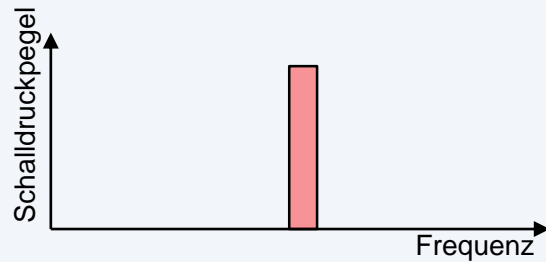
## Expertengespräche:

- Interviews mit Triebwerksakustikexperten von Rolls Royce Deutschland und dem DLR
- Interview mit einem Adaptronikexperten vom DLR
- Fragenkatalog vorab zusammengestellt
- Kontakt zu Boeing, NASA, LHT



# Grundlagen Lärmmessung

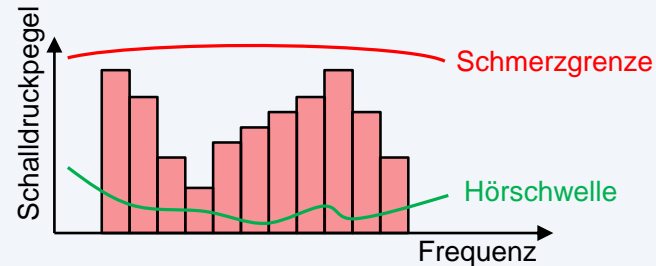
## Schalldruckpegel



- Nur Schalldruck berücksichtigt

→ **dB**

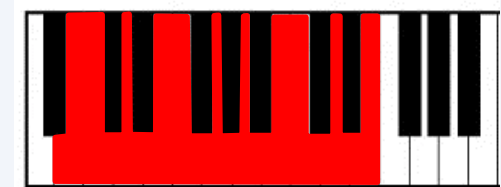
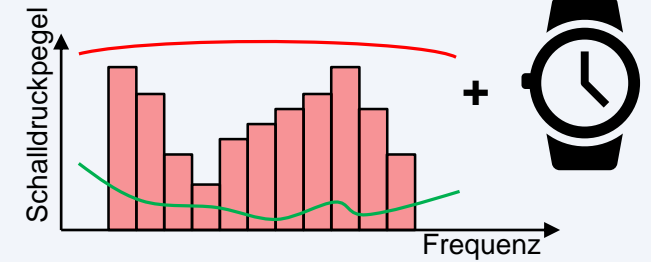
## Lärmstärkepegel



- Schalldruck und Frequenz berücksichtigt

→ **PNdB**

## Effektiver Lärmstärkepegel



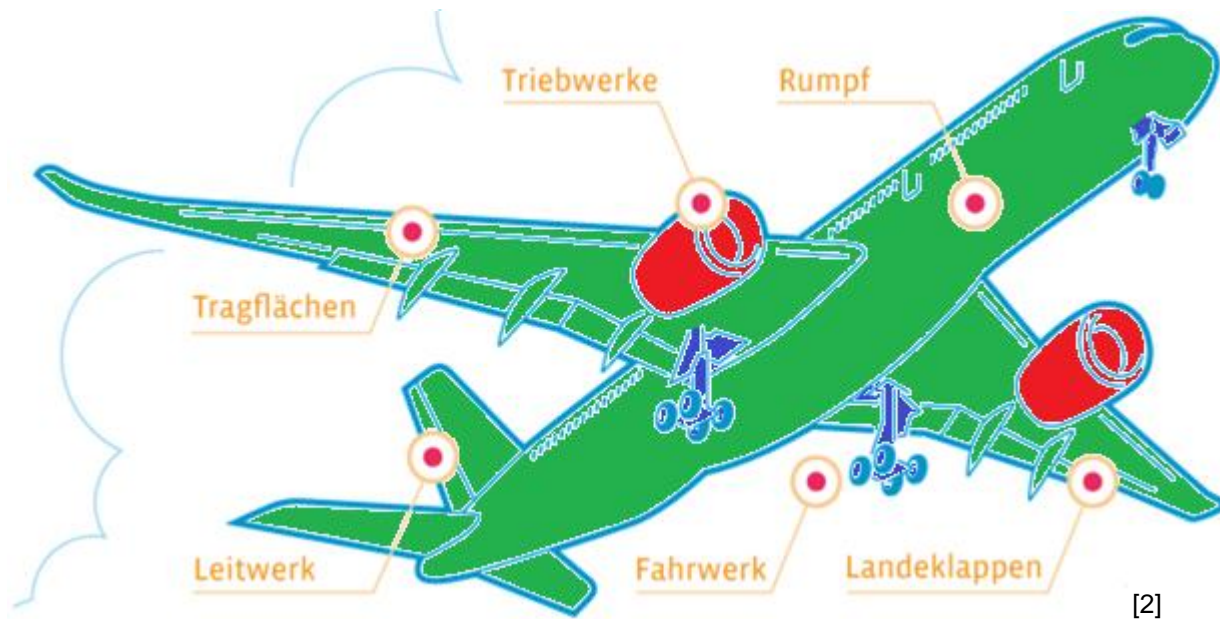
- Schalldruck, Frequenz und Dauer berücksichtigt

→ **EPNdB**

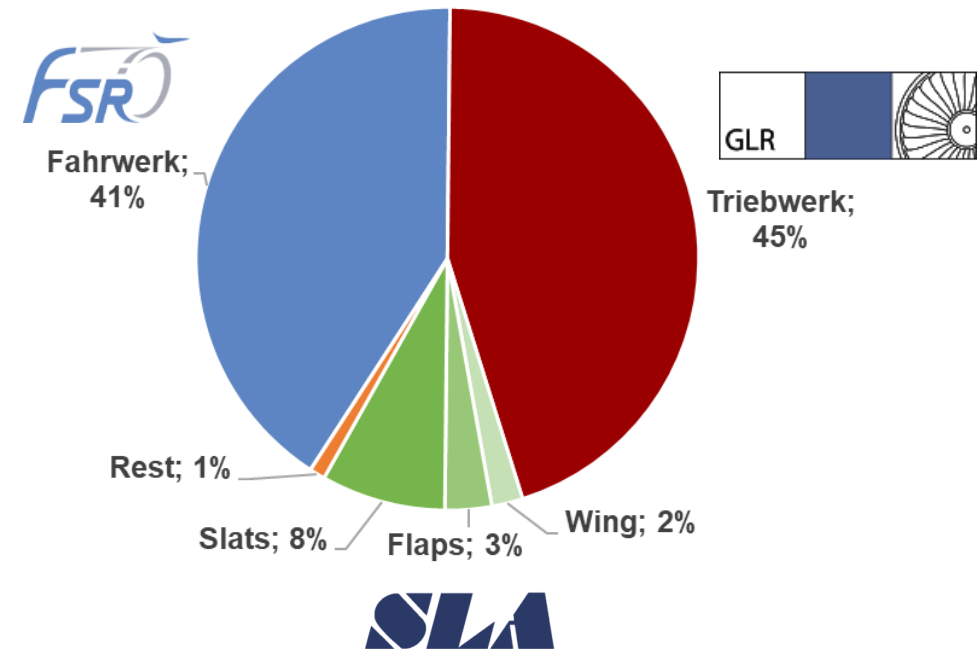
→ **Verwendung für Zertifizierung**

→ menschliche Wahrnehmung 20 - 20.000Hz

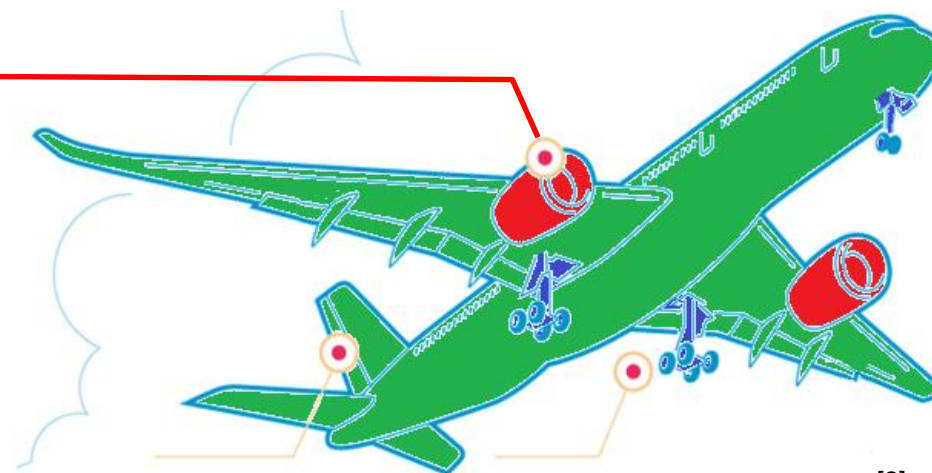
# Verteilung der Lärmemissionen am Flugzeug



Verteilung der Lärmemission am Flugzeug in Landekonfiguration [1]



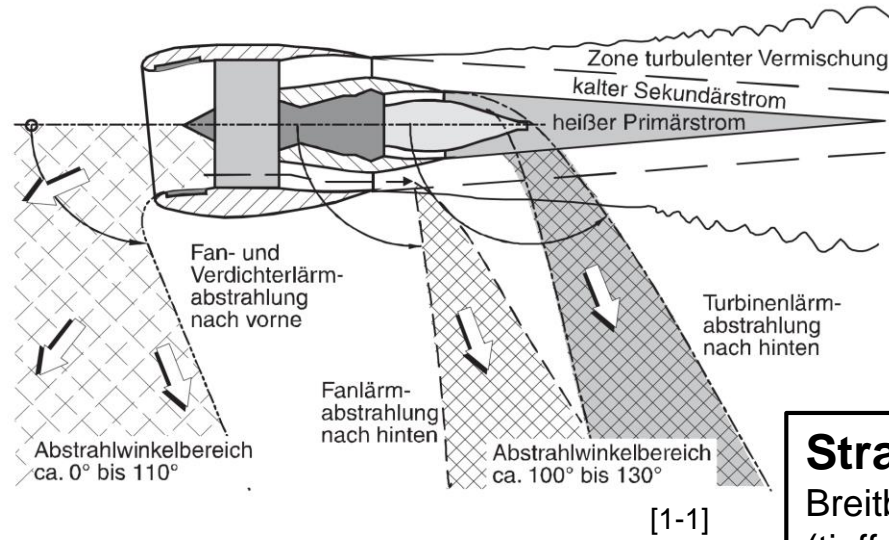
# TRIEBWERK



[2]

# Lärmquellen

## Dominante Lärmquellen



### Fan:

- Töne (alle Frequenzen)
  - Rotor Stator
  - Rotor allein
  - Buzz Saw Noise
- Breitbandlärm

**Strahlärm:**  
Breitbandlärm  
(tieffrequent)

### Verdichter:

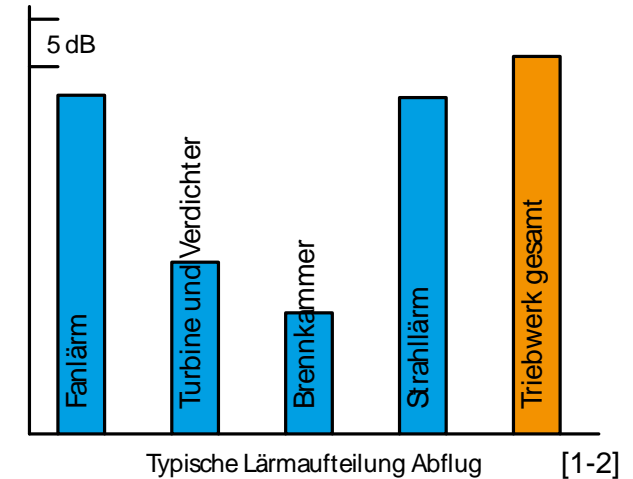
Töne (hochfrequent)  
Breitband

### Turbine:

Töne (hochfrequent)  
Breitband

### Brennkammerlärm

Töne (tieffrequent)  
Breitband



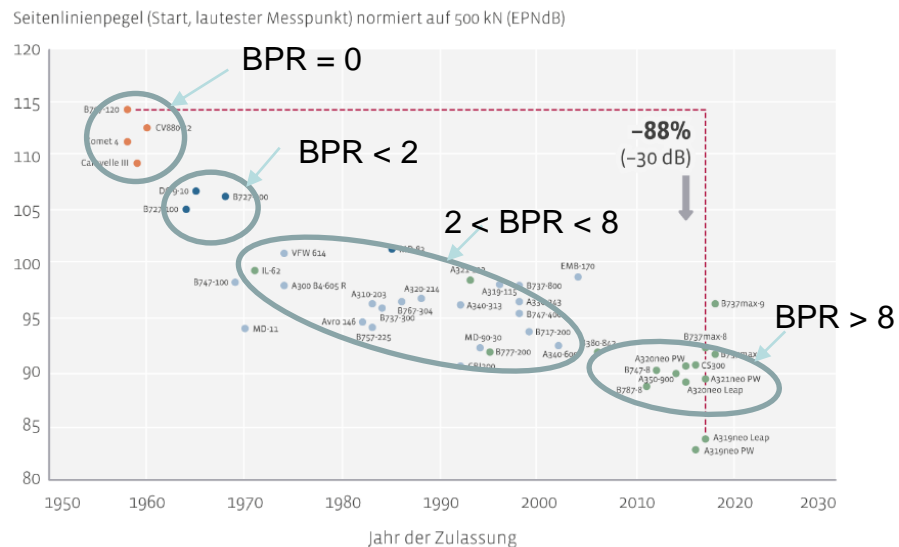
→ **Fan und Strahl dominieren**  
**Triebwerkslärm**

→ **Kerntriebwerkslärm**  
**wird meistens überdeckt**



# Lärmreduzierende Maßnahmen

## Bisherige Lärmreduktion

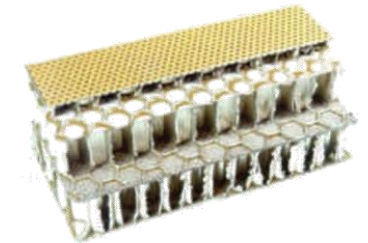


### Anpassung der Triebwerksparameter und Komponentenauslegung

- Verminderung des entstehenden Lärms
- Optimierung erfolgt vor allem auf geringen Treibstoffverbrauch

### Dämpfung des entstandenen Lärms

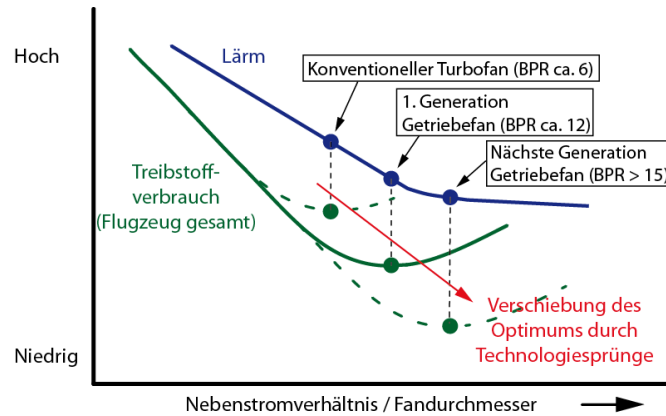
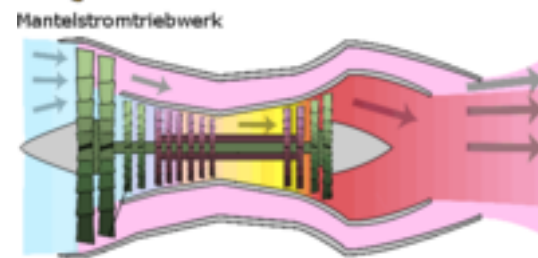
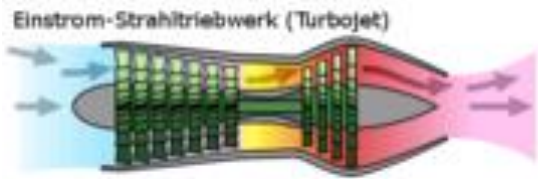
- Akustische Auskleidungen



- Absenkung des Strahlärms um 15 EPNdB durch Nebenstromerhöhung erreicht
- Strahlärm ist nicht mehr dominant

# Lärmreduzierende Maßnahmen

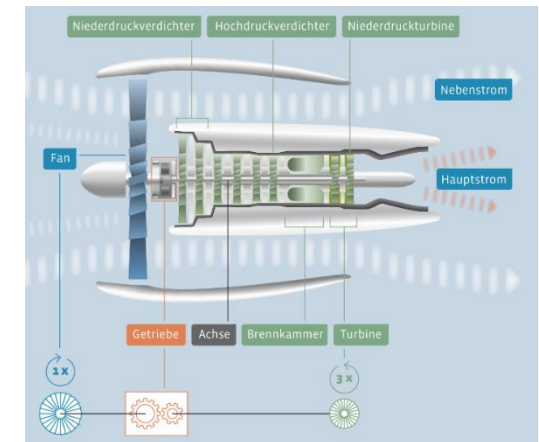
## Erhöhung des Nebenstromverhältnisses



- Triebwerks- und Gondelgewicht
- Widerstandserhöhung
- Fahrwerkslänge
- **Gesamtbilanz Flugzeug: Verbrauch steigt nach Optimum wieder an** (Schätzung: BPR 18-20)



### Getriebefan



#### Einsatz:

- Pratt & Whitney PW1000
  - BPR = 12:1

#### Entwicklung:

- Rolls Royce Ultrafan
  - Für 2025 geplant
  - Großraumflugzeuge
  - BPR 15:1 angestrebt

# Lärmreduzierende Maßnahmen

## Düsenmodifikationen

### Reduktion Strahlmischungsärm:

→ Forcierung schneller Durchmischung, weniger tiefe Frequenzen, hohe Frequenzen werden durch atmosphärische Dämpfung schneller gedämpft.

### Chevrondüsen:

- Gezackte Düsenhinterkante
- Kerntriebwerksdüse und Nebenstromdüse möglich
- In DLR Versuch: Reduktion um 1dB, angenommenes Potential bis 3dB



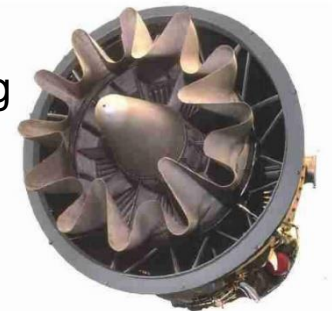
### DLR Schubdüse:

- Vergleichbar zu Chevrons
- In DLR Low Noise Atra getestet (2018)
- 3-4 dB Reduktion erwartbar



### Zwangsmischer:

- Beschleunigte Durchmischung durch Aufteilung des Hauptstrahls in viele kleine Strahlen
- Bei geringen Strahlgeschwindigkeiten (moderne Triebwerke mit hohem Nebenstromverhältnis) nicht mehr relevant

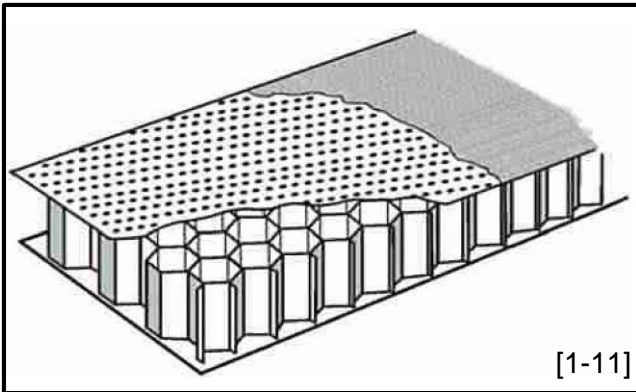


- Reduktionspotential sinkt bei geringer Strahlgeschwindigkeit
- Düsenmodifikationen können höheren Treibstoffverbrauch bewirken

# Lärmreduzierende Maßnahmen

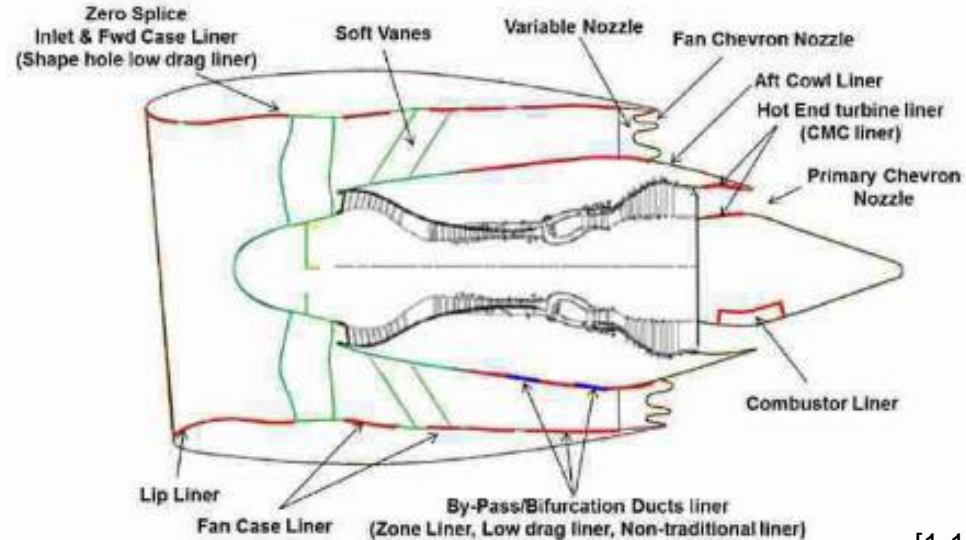
## Akustische Auskleidungen

### Aufbau und Funktion:



### Helmholtz Resonator

- Dämpfung einzelner Frequenzen
- Mehrere Lagen können gestapelt werden → Dämpfung mehrere Frequenzen (Double Degree of Freedom Liner (DDOF))
- Gegen tonalen Lärm



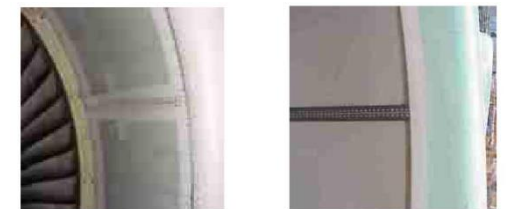
### Stand der Lärmreduktion:

- Absenkung des Lärms um bis zu 12 EPNdB
- Vergleichbare Lärmreduktion wie durch Nebenstromerhöhung

Expertenaussage:  
→ Ohne Auskleidungen wäre Triebwerk doppelt so laut

### Aktuelle Entwicklungen

Zero-splice	0.5-1.5 EPNdB	A380, A350
Nose lip liner	0.5-1.5 EPNdB	Test an A380



Liner mit Splices [1-13]

# Lärmreduzierende Maßnahmen

## Akustische Auskleidungen

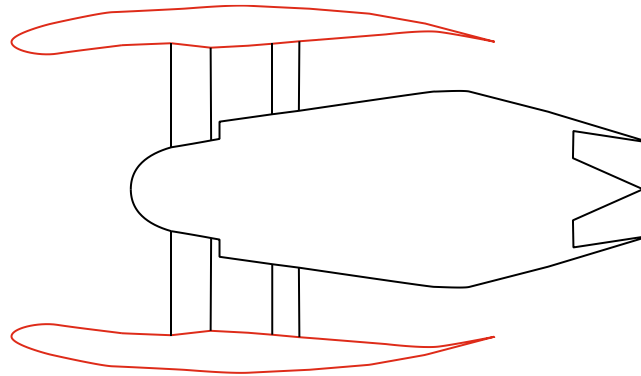
### Derzeitige Herausforderungen:

#### Breitbandlärm

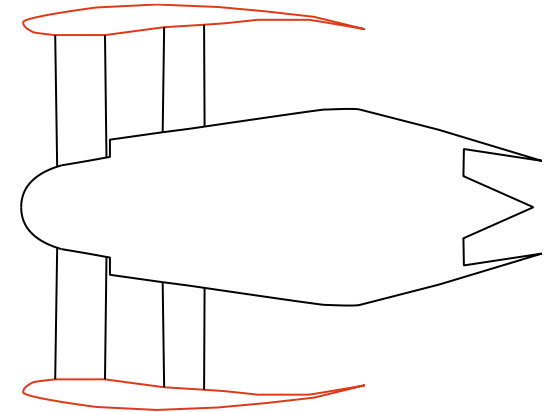
- Fanlärm wird nicht mehr nur von tonalen Anteilen dominiert  
→ Breitbandanteile des Fanlärms müssen behandelt werden
  - Derzeitige Auskleidungen sind für Breitbandlärm ungeeignet
- neuartige Auskleidungen zur Breitbandlärmmreduktion notwendig

#### Trend zu verkürzten Triebwerksgondeln

- Fläche für Auskleidungen nimmt ab
- Effizientere Auskleidungen notwendig



Aktuelles Triebwerksgondeldesign



Trend zur Einlaufverkürzung

# Forschungsaktivitäten

## Akustische Auskleidungen

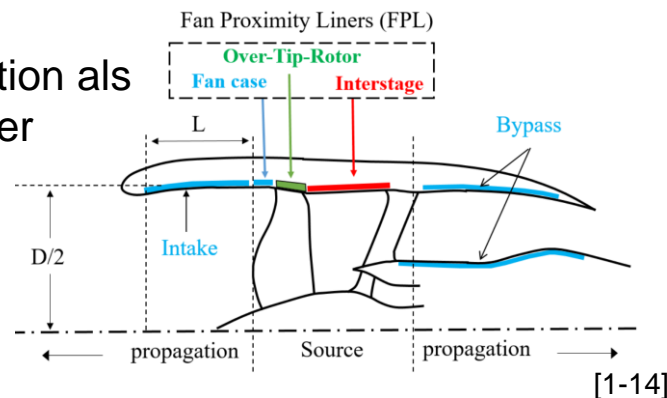
### Aktuelle Herausforderungen:

- Zunehmende Relevanz von Breitbandlärm → neuartige Liner notwendig
- Gewichtseinsparung durch Gondelverkürzung → Fläche für Liner nimmt ab, effizientere Liner notwendig

### Over Tip Rotor Liner:

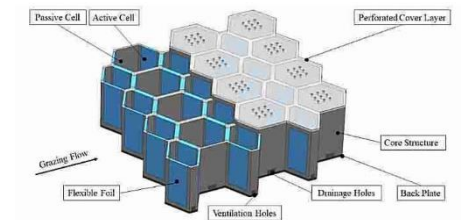
- Rotorinteraktion zu beachten
- Nah an Quelle
- TRL 1-4
- Höhere Lärmreduktion als konventioneller Liner

Forschung:  
SmartAnswer  
NASA



### Breitbandliner:

- Einsatz flexibler Materialien, Dämpfung durch Materialeigenschaften



- FlexiS liner
  - Erweiterung des Frequenzbereichs in dem absorbiert wird
  - DLR Untersuchungen

[1-15]

- Zero Massflow Liner (ZML)
  - Breitbanddämpfung
  - Anregung einer Kavität durch Aktuator
  - DLR Untersuchungen



[1-11]

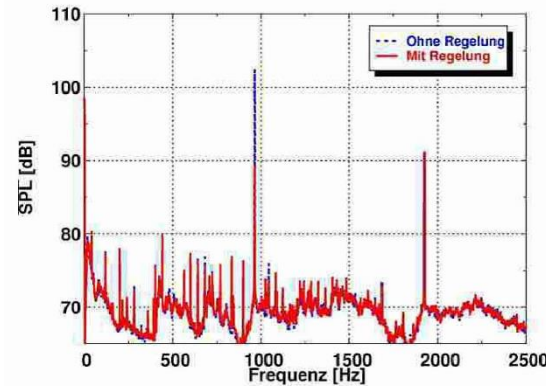
### Aktive Maßnahmen:

- Aktive Unterdrückung einzelner Frequenzen
- Kann nur gegen tonale Anteile eingesetzt werden

### Ansätze:

- Fehlermikrofone + Lautsprecher
  - Kein Vorteil gegenüber passiven Maßnahmen
- Drucklufteinblasung zwischen Rotor und Stator
  - DLR Forschung
  - Kostenintensiv
  - Einsatz nur denkbar, wenn kostengünstigste Lösung zur Erfüllung von Lärmanforderungen

**Geschätztes Reduktionspotential:  
1-2 EPNdB**



[1-9]



[1-9]

### Passive Maßnahmen:

- Behandlung der Schaufelvorderkanten
  - Wellige / gezackte Kanten
  - Poröse Vorderkanten
  - Sehr niedriges TRL
  - Kann Vorteile gegen Breitbandlärm bringen



[1-14]

- Untersuchungen in „SmartAnswer“, in vki Lecture Series vorgestellt
- DLR Projekt: TurboNoiseBB

# Triebwerkslärm

## Fazit und Ausblick

### Möglichkeiten der Lärmreduktion:

- **Anpassung von Triebwerksparametern**
  - Strahlärmreduktion durch Nebenstromverhältniserhöhung
  - Verschiebung zu dominantem Fanlärm
  - Forschung zu Geometrieanpassungen
- **Dämpfung von Lärm**
  - Akustische Auskleidungen
  - Forschung zu aktivem Gegenschall

### Abschätzung zukünftiger Triebwerkslärm:

- Bei evolutionärer Technologieentwicklung nur kleine Verbesserungen zu erwarten
- Alle Quellen relevant

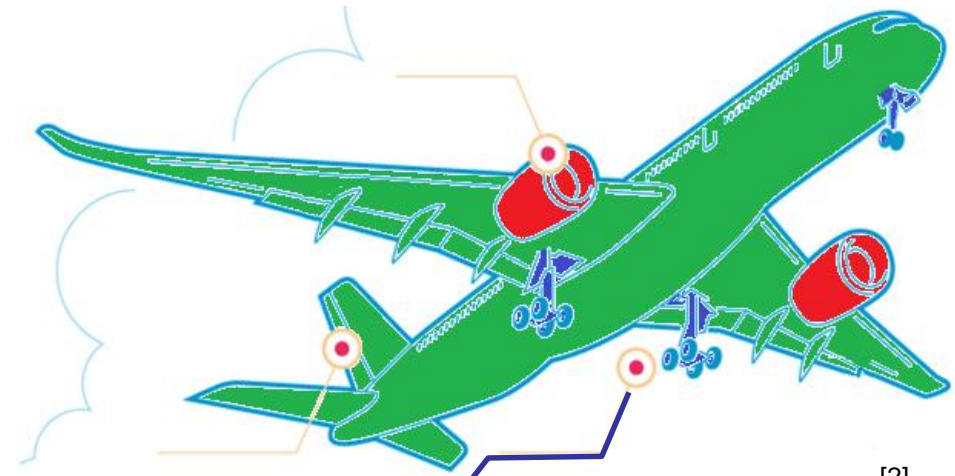
Abschätzung DLR: Delfs/Enghardt(2018):

Triebwerkslärm **-2,3 dB**

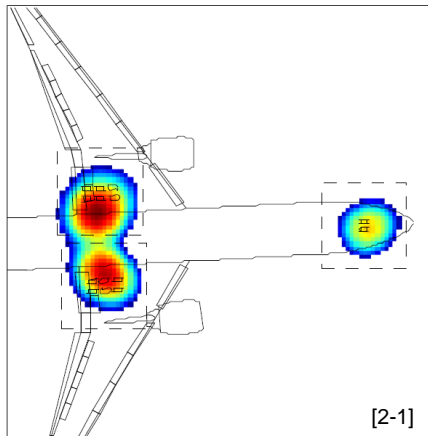
- Weitere deutliche Lärmreduktion ist nur über lärmoptimierten Flugzeugentwurf oder Technologiesprung zu erreichen



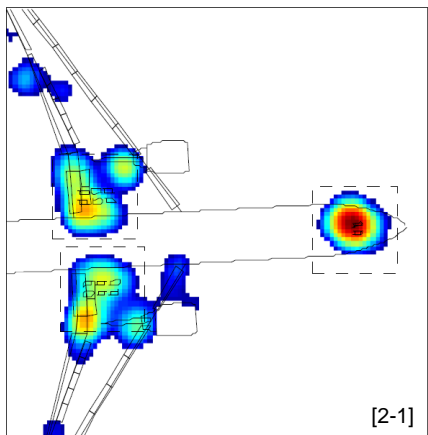
# FAHRWERK



[2]

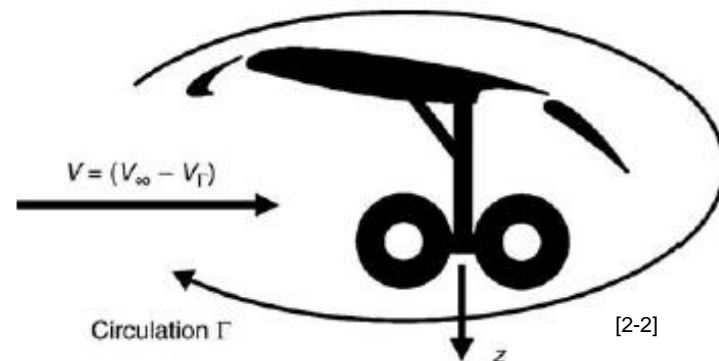


Flap 0, 2100Hz



Flap 30, 2150Hz

- Bugfahrwerk erzeugt mehr Lärm als Hauptfahrwerk beim Landeanflug
- Lärm proportional zur Geschwindigkeit  $\sim V^6$  bis  $V^8$  (abhängig von Frequenzbereich)
- Bugfahrwerk wird mit annähernd Strömungsgeschwindigkeit angeströmt
- Strömung wird auf Tragflächenunterseite verzögert, sodass Hauptfahrwerk mit niedrigerer Geschwindigkeit angeströmt wird  $\rightarrow$  weniger Lärm am Hauptfahrwerk



# Lärmquellen

## Lärmquellen am Fahrwerk

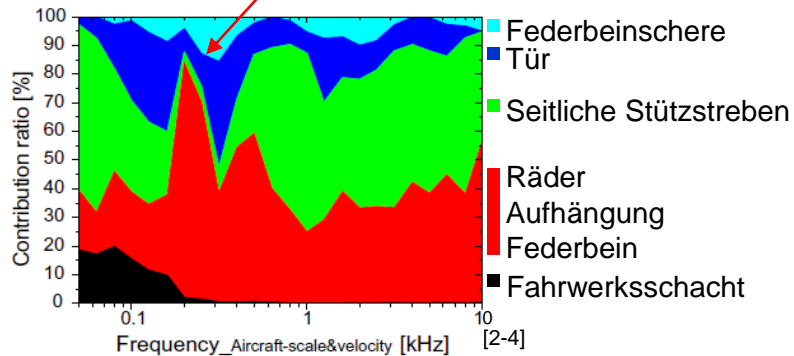
Breitbandlärm im Frequenzbereich 50 Hz – 3000Hz

### Fahrwerksschacht

- Niederfrequenter Lärm < 1000 Hz

### Schachtlöcher:

- tonaler Lärm bei bestimmten Frequenzen
- Kann bei Querströmungen auftreten



Hauptfahrwerk Airbus A350 [2-3]

### Federbein

- Niederfrequenter Lärm < 1000 Hz

### Verbindungen, Stützstreben

- Breitbandlärm abhängig von Größe bis 3000Hz

### Fahrwerks-Truck

- Dominanter Lärm über die meisten Frequenzen
- Radaufhängung, Bremsen, Räder, Federbeinschere
- Breitbandlärm bis ca. 3000Hz

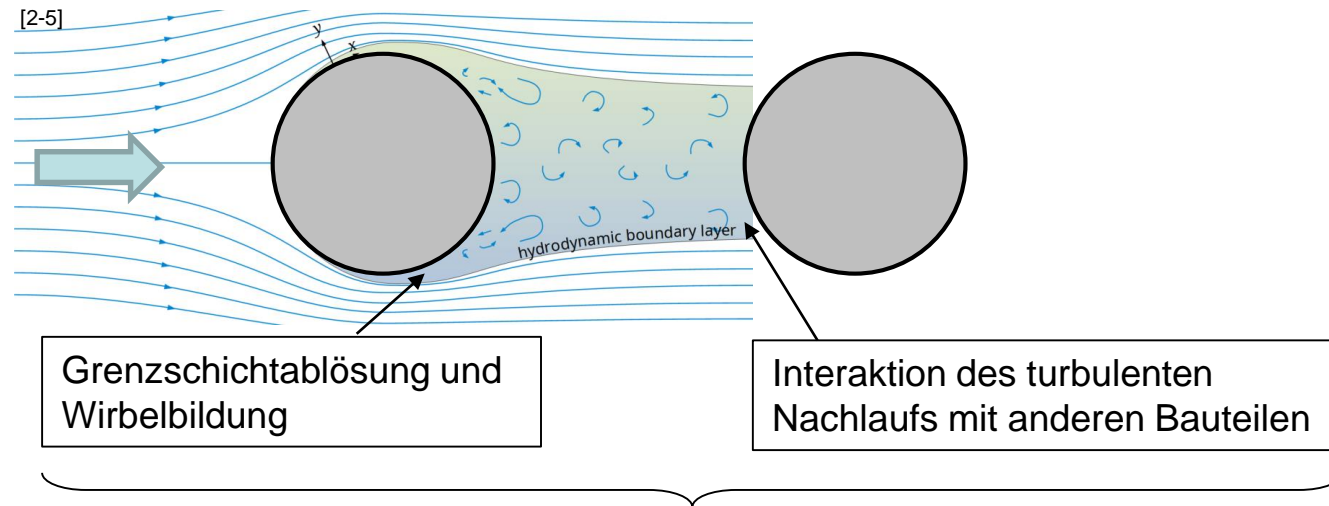
Lärm proportional zur Geschwindigkeit  
~  $V^6$  bis  $V^8$  (abhängig von Frequenzbereich)

# Lärmquellen

## Lärmentstehung am Fahrwerk



Hauptfahrwerk Airbus A350 [2-3]



Frequenzbereich abhängig von Bauteilgröße:

- Große Bauteile (Federbein, Räder) eher niederfrequenter Lärm < 1000 Hz
- Kleine Bauteile (Verbindungen, Bolzen) eher hochfrequenter Lärm bis 3000Hz

### Lösungsansätze:

- Verkleidungen Fahrwerkstruck / Unterboden
- Bremsverkleidungen
- Verkleidungen von Federbein, Streben
- Radkappen (kleine Wirkung im Bereich niedriger Frequenzen)

↑  
Zunehmende  
Wirkung

# Flugversuche Fahrwerksverkleidungen

## Feste Verkleidungen

### DLR – Projekt Low Noise ATRA

- Flugversuche A320 in 2018/2019
- Verkleidung von Federbein, Truck und Fahrwerksschacht des Bugfahrwerks



[2-13]

**Ergebnisse 2021  
veröffentlicht**  
(AIAA Aviation Forum)

### Boeing ecoDemonstrator 2020

- Flugversuche B787-10 Dreamliner in 2020 (600m Höhe)
- Teilverkleidung von Stützstreben und ausgewählten Bereichen zur Strömungsumleitung



[2-14]

**-20% Lärmreduktion am Fahrwerk**  
(Ergebnisse 2022 veröffentlicht  
28th AIAA / CEAS Aeroacoustics 2022  
Conference)

## Poröse Verkleidungen

### NASA 2018

- Gulfstream III Flugversuche in 2018 in 350 ft Höhe (107m)
- Poröse Vollverkleidung des Hauptfahrwerks



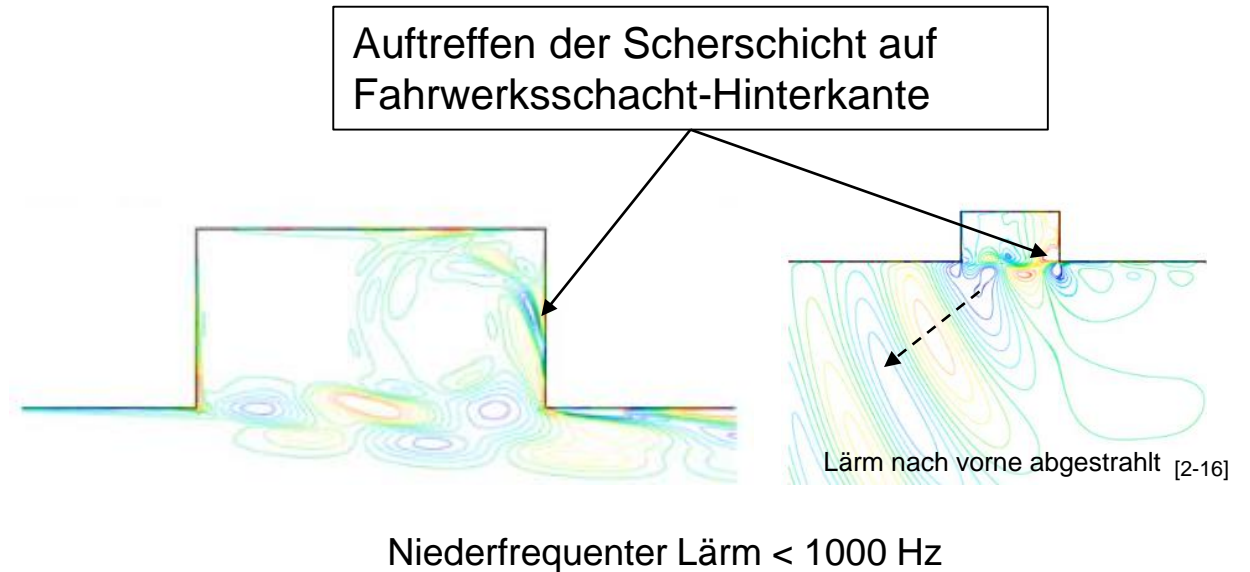
[2-12]

**Lärm  
~  $V^6$  bis  $V^8$**

**-1,4 EPNdB**  
“...their integration into an existing or new airplane design, and the release date of the final product rest solely with the aircraft manufacturers”

# Lärmquellen

## Lärmquelle Fahrwerksschacht



- Lösungsansätze:**
- Fahrwerksschachtöffnung verkleinern
  - Gitternetze
  - Verzahnung (Chevrons) + schallabsorbierender Schaum
  - Air Curtains

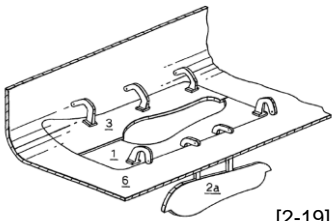
# Flugversuche Fahrwerksverkleidungen

## Fahrwerksschacht verkleinern

- Bereits bei vielen Flugzeugen etabliert
- Ausnahme: B737, Embraer E-Jet Familie
- Keine Retrofitmaßnahme



[2-17]

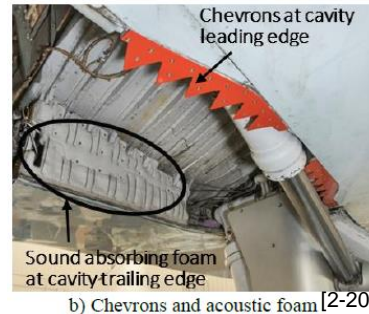


[2-19]

Airbus Patent, 2007

## NASA Technologien

- Gulfstream III Flugversuche in 2018 in 350 ft Höhe (107m)
- Als Retrofit Maßnahme möglich
- “TRL5-6, Implementation durch Flugzeughersteller notwendig”



b) Chevrons and acoustic foam [2-20]

**Verzahnung an Vorderkante und schallabsorbierender Schaum an der Hinterkante**

Lärmreduktion bis max. -0,5 EPNdB

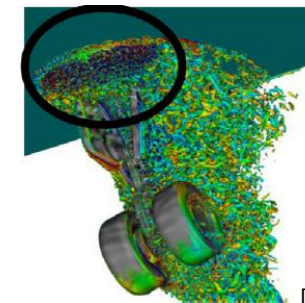
## Umlenkung der Strömung

- Niedrige TRL, Grundlagenforschung
- Komplexe Systeme
- Vermutlich nur effektiv in Verbindung mit weiteren Verkleidungen



[2-21]

**Mechanische Rampe/ Spoiler**



[2-23]

**Air Curtains**  
Umlenkung der Strömung durch eingeblasenen Luftstrahl

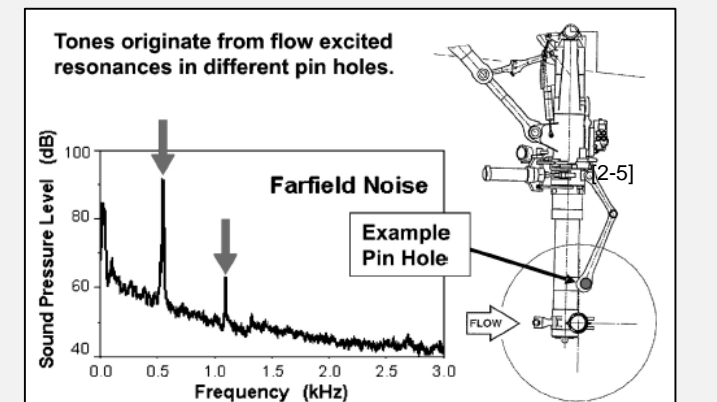
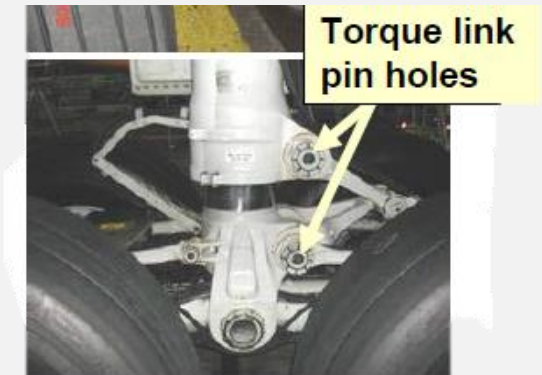
# Lärmindernde Maßnahmen

## Schaftlöcher



Hauptfahrwerk Airbus A350 [2-3]

- Tonale Lärmspitzen können bei bestimmten Strömungssituationen (bspw. Seitenwinde) entstehen, die schwer vorherzusagen sind.
- Lärmspitzen teilweise > 20 dB über Mittelwert
- **Lösung:** Abdeckkappen verwenden
- Vorteile: günstig, geringes Gewicht, leicht zu montieren
- Nachteile: Kondenswasserbildung im Inneren des Schafts kann zu Korrosion führen



[2-26]



# Fahrwerkslärm

## Zusammenfassung



Hauptfahrwerk Airbus A350 [2-3]

**Fahrwerksschacht**

**-0,5 EPNdB** <sup>[2-12]</sup>

für das gesamte Flugzeug  
(aktueller Stand)

**Fahrwerksverkleidungen**

**-1,4 EPNdB** <sup>[2-12]</sup>

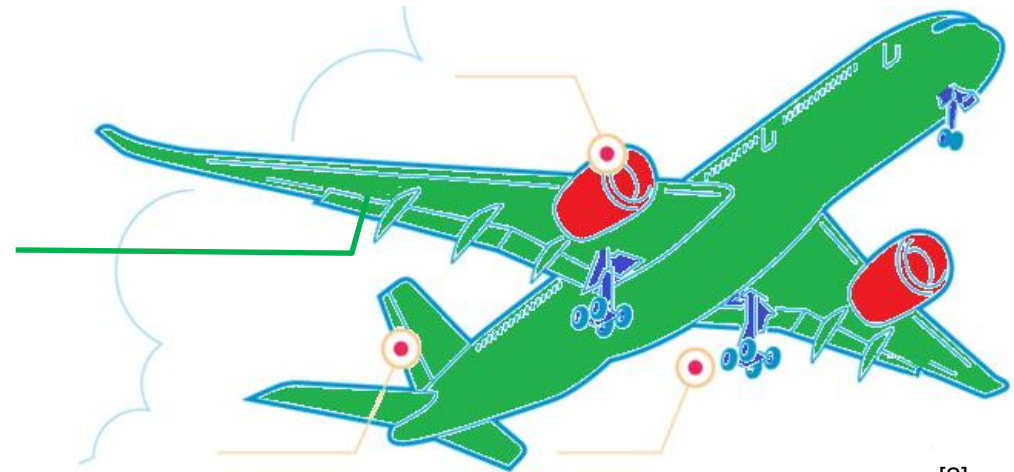
für das gesamte Flugzeug  
(aktueller Stand)

**Gesamtpotential  
Fahrwerk**

**-4 EPNdB** <sup>[2-32]</sup>

für Fahrwerkslärm  
(für gesamtes Flugzeug geringer)

# HOCHAUFTRIEBSSYSTEM



[2]

# Hochauftriebssystem (HAS) Lärmquellen

- Strömungsinteraktion mit Oberflächen und geometrische Unstetigkeiten (Öffnungen, Spalten und Kanten)
  - ⇒ Verwirbelungen (Turbulenz)
  - ⇒ Druckschwankungen / **Lärm**
- Entstehung von **breitbandigem** (50 Hz - 10 kHz) und tonalem Lärm
- HAS Lärm  $\sim v^{4,5-5,6}$  (geringer als Triebwerk und Fahrwerk)
- Hauptlärmquellen HAS:
  - **Spalt zw. Slat & Tragflügel**
  - **Flap – Seitenkanten**
- + Anforderungen an Auftrieb & Reiseflug



# Lärmquellen

## Slat – Spaltlärm



[3-7]

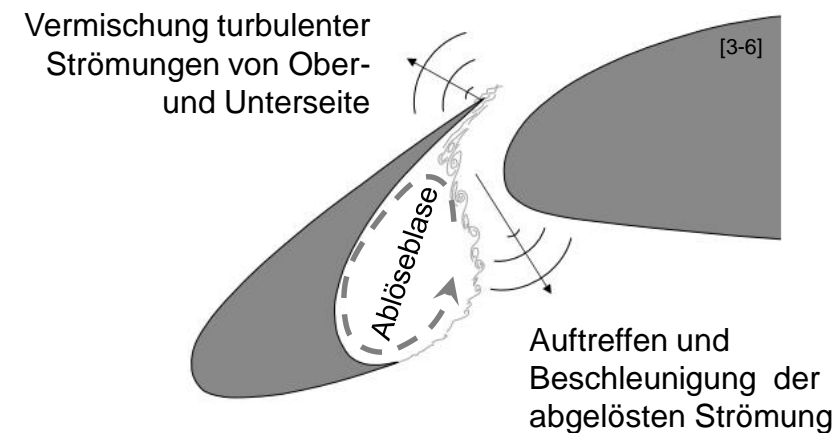
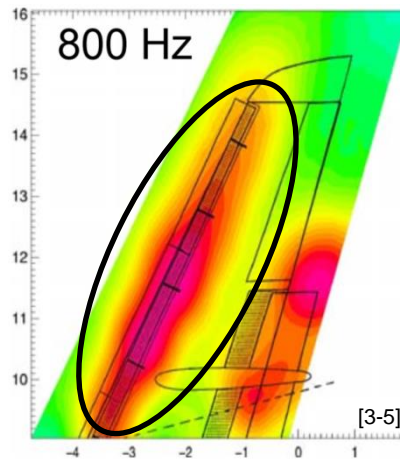
**Nutzen:** Ausgefahrener Slat erhöht Auftrieb

### Slat - Spaltlärm

- HAS dominierende Lärmquelle im niederfrequenten Bereich (0,2 – 0,4 kHz)
- Breitbandiger Lärm erzeugt durch folgende Mechanismen
  - Niederfrequenter Bereich ( $f < 1$  kHz) beeinflusst durch rotierende und oszillierende Ablöseblase
  - Hochfrequenter Bereich ( $f > 1$  kHz) beeinflusst durch Vermischung turbulenter Strömungen an der Slat Hinterkante

### Lösungsansätze:

- Anbringung von Anbauteilen
- Lärmoptimiertes Slatdesign
- Alternative HAS Architekturen



# Lärmindernde Maßnahmen

## Slat – Spaltlärm I



[3-7]

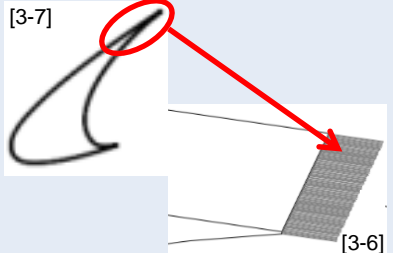
### Lösungsansätze:

- Anbringung von Anbauteilen
- Lärmoptimiertes Slatdesign
- Alternative HAS Architekturen

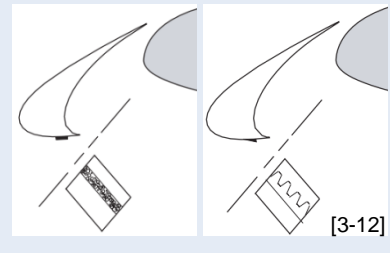


- Maßnahmen zeigen Reduktionspotential
- Jedoch niedrige TRL (1 – 4)
- Stand der Forschung

### Slat-HK-Bürsten



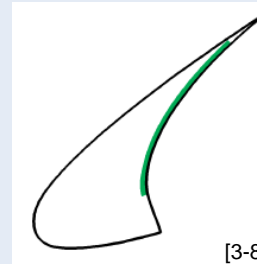
### Slathorn Trigger



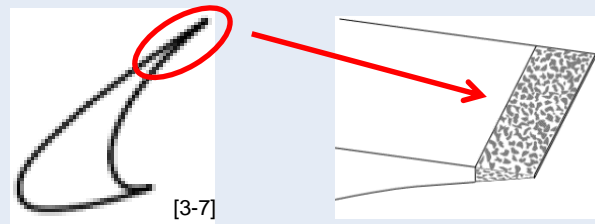
### Poröse Einsätze

**Idee:** Absorption der turbulenten Energie und Bekämpfung der turbulenten Druckschwankungen

#### Slat-Cove-liner

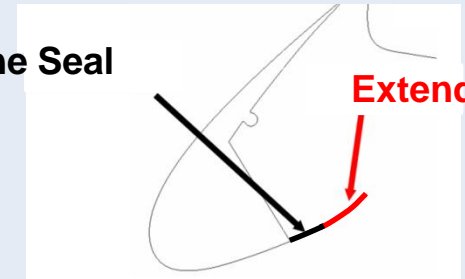


#### Poröse Slat-Hinterkante



### Führen der abgelösten Strömung am Slathorn

#### Baseline Seal



Extended Seal

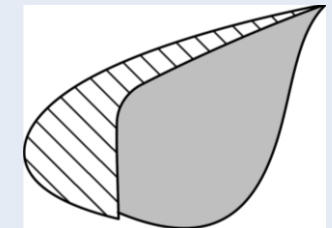
#### Slat-Cove-Cover



Flow

Slat cove cover

#### Slat-Cove-Filler



# Lärmmindernde Maßnahmen

## Slat – Spaltlärm II



[3-7]

### Lösungsansätze:

- Anbringung von Anbauteilen
- **Lärmoptimiertes Slatdesign**
- Alternative HAS Architekturen

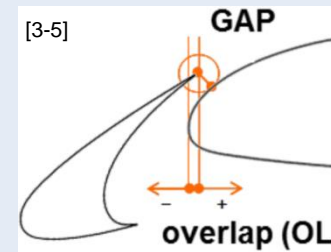
### Optimierungsparameter

- Spaltweite
- Überlappung
- Slat Geometrie

**Hinweis:** Je kleiner der Spalt desto leiser der Slat und geringer der Auftrieb

### Parameteroptimierung

- Spaltweite
- Überlappung



~ 0,5 EPNdB

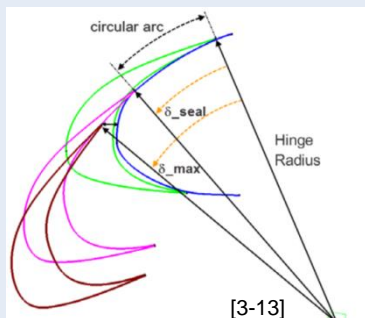
### Very Long Chord Slat (DLR)

- Reduktionseffekte
  - Abschirmung der Hinterkante
  - Reduzierte Beschl. in Spalt

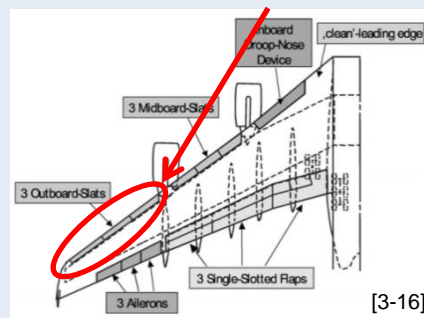


> 0,5 EPNdB

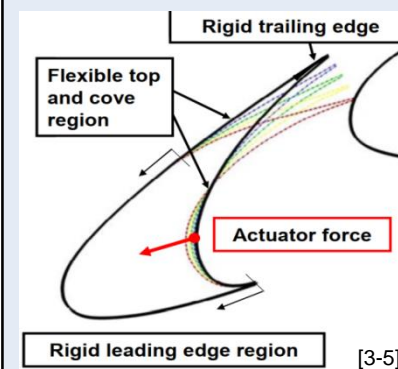
### Airbus A380 & A350 für Outboard Slats



[3-13]



[3-16]



[3-5]

### Adaptiver Slat (DLR)

- Flexible Struktur  
=> Bedarfsangepasste Spaltbreite
  - Spalt zu: Weniger Auftrieb & leise
  - Spalt auf: Hoher Auftrieb & laut
- ~ 0,5 EPNdB (Hochskalierung WK-Versuch)

# Lärmindernde Maßnahmen

## Slat – Spaltlärm III

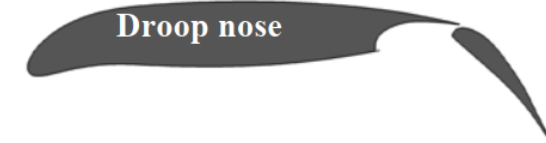


[3-7]

### Lösungsansätze:

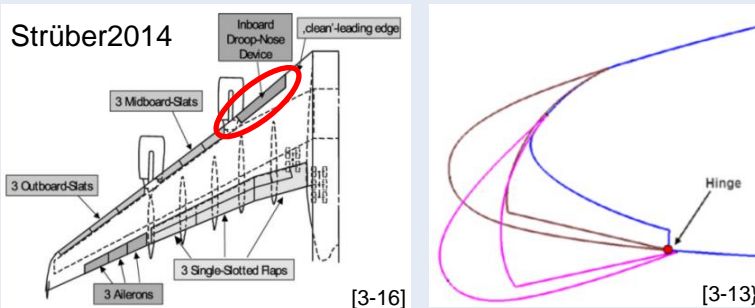
- Anbringung von Anbauteilen
- Lärmoptimiertes Slatdesign
- **Alternative HAS Architekturen**

**Ziel:** Kein Spalt bei gutem Auftrieb  
**Lösung:** **Drop Nose** - Absenkbare und spaltfreie Flügelvorderkante  
 → Kein dominierender Spaltlärm  
 → Moderater Auftrieb & red. Widerstand




[3-15]

### A380 und A350 Hinged Droop Nose

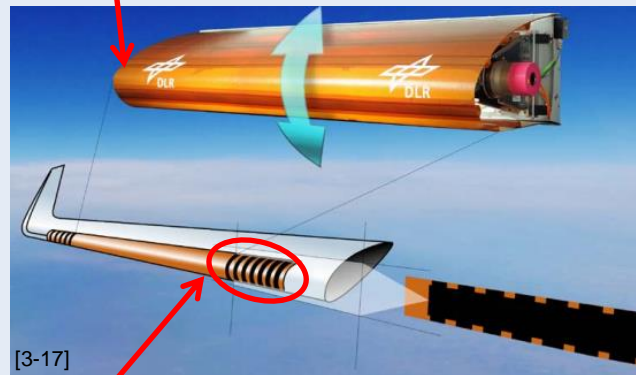


- Starrkörperbewegung um Drehpunkt  
 → Kanten und geometrisch ungünstige Übergänge

Flexible  
  
 Lösung

### Smart Droop Nose (DLR)

- Flexible Struktur erzeugt glatte Außenkontur



**FlexMat (DLR)**

→ Vermeidung Slat -  
Seitenkantenlärm

### Stand der Forschung

- Strukturelle Optimierung (Vogelschlag, Icing, etc.) durchgeführt
- **NEXT:** Integration an Tragflügel für Windkanaluntersuchung

→ Vermutet hohes Lärm-  
reduktionspotential

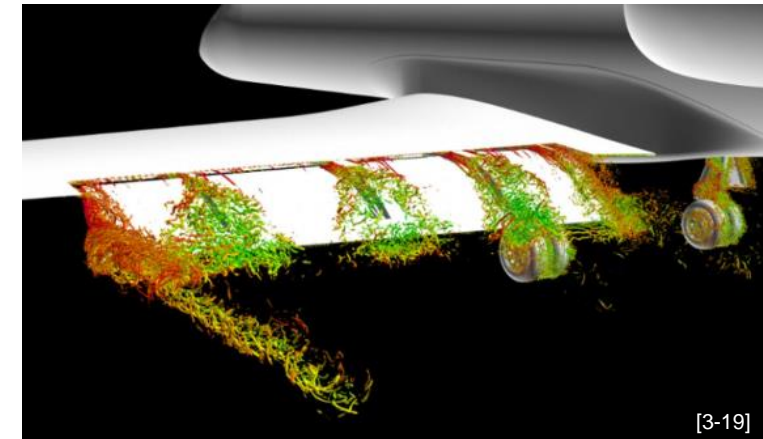
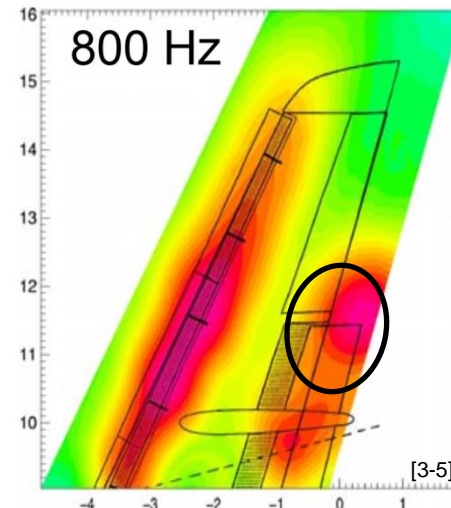
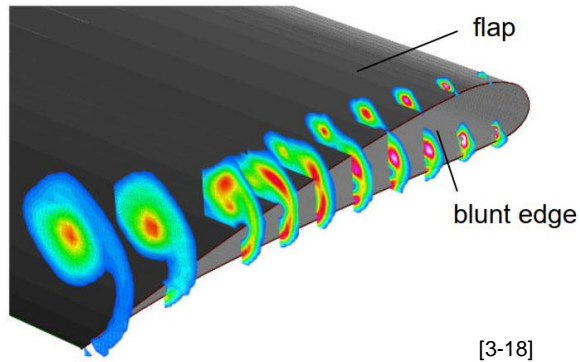


[3-7]

**Nutzen:** Ausgefahrener Flap erhöht Auftrieb

### Flap - Seitenkantenlärm

- 2. Hauptlärmquelle des HAS
- Spalt zw. Flap und Tragfläche
- Seitenkantenwirbel hoher Wirbelstärke
  - **Breitbandiger Lärm**
  - Am stärksten im mittleren Frequenzbereich 1 – 2 kHz



### Lösungsansätze

- Modifikation der Randbedingung an Kanten
- Vermeidung / Verzögern des Wirbelaufrollens
- Vergrößerung des Wirbeldurchmessers bei gleichbleibender Stärke



# Lärmindernde Maßnahmen

## Flap – Seitenkantenlärm I



[3-7]

### Reduktion der Systemkomplexität



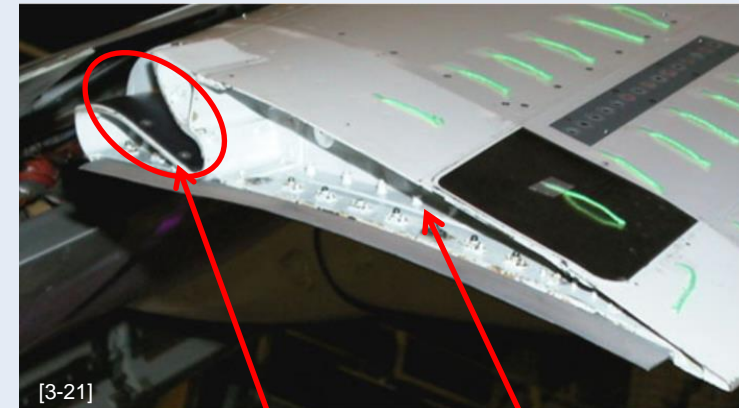
#### Designoptimierung:

- Single Slotted Flaps
- Flaps über große Spannweite anbringen
- Kleine Seitenkantenspalte

→ Weniger Kanten die zur Wirbel- und Lärmbildung führen



### Schließen von Öffnungen



- Bsp. A320: Fish mouth und Seitenkante  
→ Glatte und geschlossene Flächen erzeugen weniger Verwirbelungen

# Lärmindernde Maßnahmen

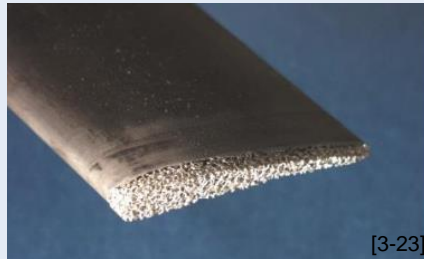
## Flap – Seitenkantenlärm II



[3-7]

### Seitenkanten - Modifikation

#### Poröse Seitenkante



[3-23]

- Stetiger Druckausgleich von Ober- und Unterseite

#### Seitenkante mit „Zaun“



[3-23]

- Verzögerung des Aufrollens des Seitenwirbels

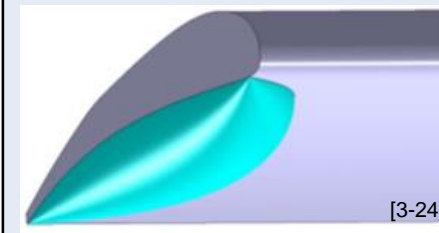
#### Seitenkante mit Bürste



[3-23]

- Stetiger Druckausgleich von Ober- und Unterseite

#### Veränderung der Kantengeometrie



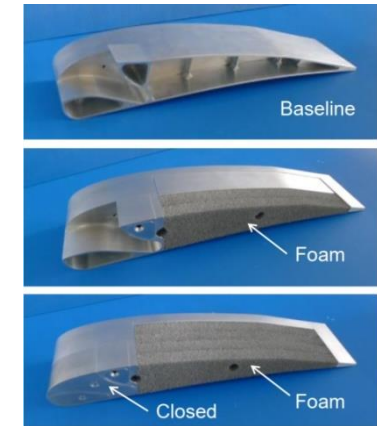
[3-24]

- Strömung liegt an
- Verlagerung des Kantenwirbels

### Flugversuche 2018/19 mit 10 Retrofitmaßnahmen

#### → 3 davon am Hochauftriebssystem

- Spoiler Splitter Platte
  - Abschirmung des Lärms ausgehend von den Störklappen
- Slat – Seitenkantenabdeckung aus porösem Material
  - Minderung des Lärms bei Umströmung der Seitenkante
- Flap – Seitenkante aus porösem Material (**1 - 2 dB** aus vorherigem FV)
- Ergebnisse sind noch nicht veröffentlicht



[3-23]

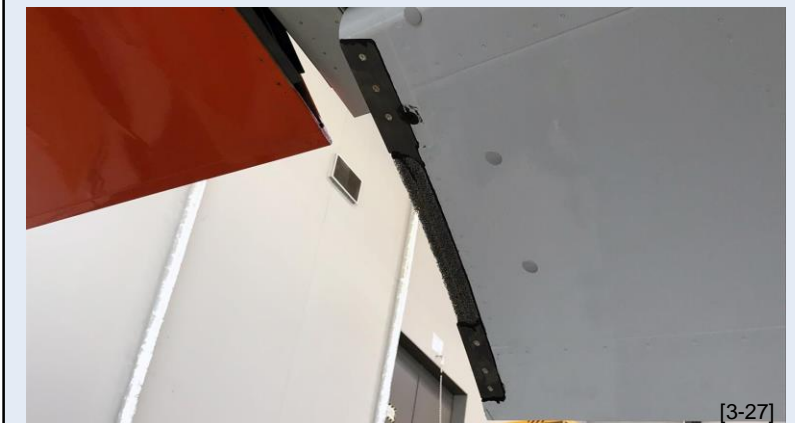
### Spoiler Splitter Platte



### Poröse Slat - Seitenkante



### Poröse Flap - Seitenkante



# Flugversuch Flap – Spalte schließen



[3-7]

## Unterdrückung der Flap Seitenkantenwirbel → Flap mit flexibler Übergangshaut

### Adaptive Compliant Trailing Edge

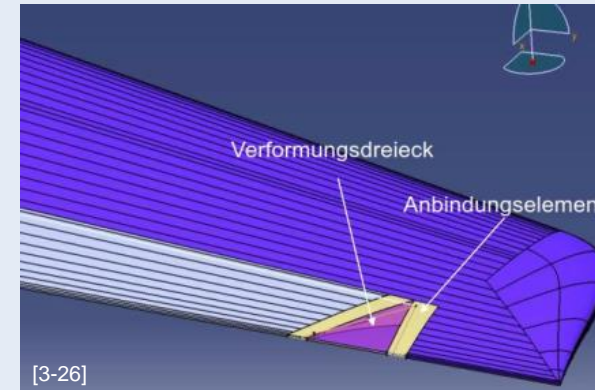
- Kooperation NASA und FlexSys
- Gulfstream III Flugversuch 2017 (> TRL 6)
- **2 EPNdB** (bei gleichem Auftrieb, ohne Slats, Fahrwerk eingefahren)



[3-25]

### Projekt FlexMat

- Kooperation: DLR, TU München, Invent GmbH (Fertigung)
- Demonstrator: Flap & Smart Droop Nose mit FlexMat
  - FlexMat: Verbund aus Synthetik kautschuk und GFK
- TRL 1 – 3
  - **NEXT**: Tragflügelmodell für aerodynamische und aeroakustische Vermessung



[3-26]

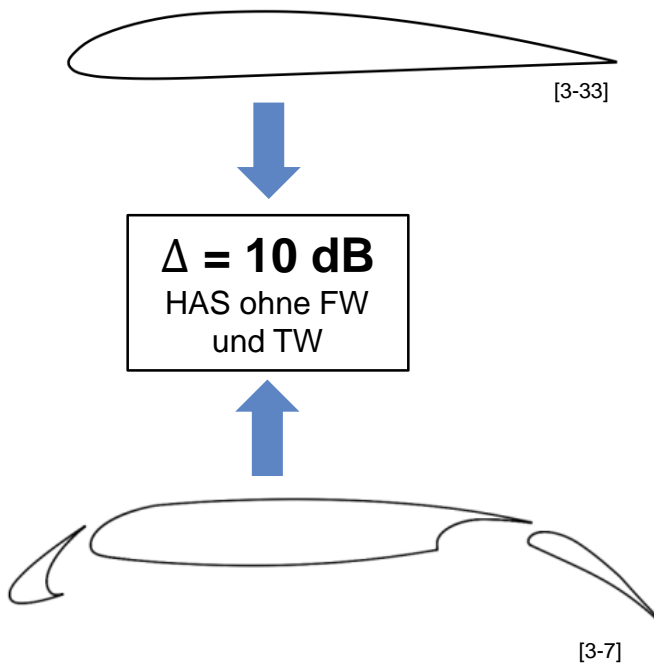


[3-26]

# Hochauftriebssystem

## Zusammenfassung und Ausblick

Abschätzung DLR: Delfs / Enghardt (2018):



**Slats**

**-4 dB**  
HAS ohne  
FW und TW

**Flaps**

**-4 dB**  
HAS ohne  
FW und TW

**Gesamtpotential  
Hochauftriebssystem**

**-1 EPNdB** <sup>[3-3]</sup>  
Am Gesamtflugzeug

FW – Fahrwerk  
TW – Triebwerk

# ZUSAMMENFASSUNG

# Zusammenfassung und Ausblick

**Bisher:** Triebwerk war dominante Lärmquelle (Strahlärmreduktion)

**Jetzt:** Identifikation und Reduktion von allen Lärmquellen notwendig (Triebwerk, Fahrwerk, Hochauftriebssystem, etc.)

<10 Jahre

Lärmreduktion durch  
**Erneuerung der Flugzeugflotten**  
mit bereits umgesetzten Technologien



A320

[3]



A320neo

[4]

**-5 EPNdB**<sup>[6]</sup>  
(beim Flyover)

10 - 20 Jahre

Integration neuer Technologien in neue  
Flugzeuggenerationen

Triebwerk: -2,3 EPNdB  
Airframe (Fahrwerk+HAS): -3,8 EPNdB

**Gesamtpotential: -2,5 EPNdB**<sup>[7]</sup>  
(zusätzlich zum Roll-over)

> 20 Jahre

Andere Flugzeugkonzepte  
**-3,2 EPNdB**<sup>[7]</sup>  
(zusätzlich)



[5]





# Quellen

## Allgemein

- [1] PowerSys Solutions. Case study: reducing aircraft noise through accurate predictions of landing gear noise. Quelle: <https://powersys-solutions.com/case-study-reducing-aircraft-noise-through-accurate-predictions-of-landing-gear-noise/> (letzter Aufruf 07.10.2020).
- [2] Das Fluglärm Portal: Lärmquellen: An der Wurzel des Problems. Quelle: <https://www.fluglärm-portal.de/fluglaerm-debatte/laermquellen/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3] Wikipedia: Airbus-A320-Familie. 2020. Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Airbus-A320-Familie> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [4] Flugrevue: Das 1000. Flugzeug der A320neo-Familie. 2019. Quelle: <https://www.flugrevue.de/zivil/a321neo-fuer-indigo-airbus-uebergibt-1000-flugzeug-der-a320neo-familie/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [5] Airbus: Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. 2020. Quelle: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [6] EASA certification noise levels. Quelle: <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/easa-certification-noise-levels> (letzter Aufruf 15.12.2020).
- [7] Delfs; Enghardt: Lärmreduktion von Verkehrsflugzeugen. Stand der Technik und Zukunftsperspektiven. DLR, 2018.
  
- [8] Sterner: Energiespeicher. 2014.
- [9] Bräunling: Flugzeugtriebwerke. 2009.
- [10] Das Fluglärm Portal: Mediathek. 2020. Quelle: <https://www.fluglärm-portal.de/mediathek/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).

# Quellen

## Triebwerkslärm

- [1-1] Bräunling, Willy J.G.: Flugzeugtriebwerke. 2009.
- [1-2] Nesbitt, Eric: Current engine noise and reduction technology. 2019.
- [1-3] Leylekian, Laurent; Lebrun, Maxime; Lempereur, Pierre: An Overview of Aircraft Noise Reduction Technologies. 2014.
- [1-4] Fluglärm-Portal: Alle Infos zu Fluglärm. 2020. Quelle: <https://www.xn--fluglrm-portal-9hb.de/> (letzter Aufruf: 17.11.2020).
- [1-5] Wikipedia: Turbinen-Strahltriebwerk. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Turbinen-Strahltriebwerk> / (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [1-6] Hughes, Chris: The Promise and Challenges of ultra high bypass ratio engine technology and integration. 2011.
- [1-7] Michel, Ulf: Noise reduction by aircraft innovations. Die Fracht braucht die Nacht. German Aerospace Center (DLR). 2010.
- [1-8] Pochkin, Yaroslav; Khaletskiy, Yuri: Aircraft Fan Noise Reduction Technology Using Leaned Stator Blades. 2015.
- [1-9] DLR: Leiser Flugverkehr. 2004.
- [1-10] DLR Portal: Leiser Fliegen: DLR testet nachrüstbare Technologien zur Lärminderung. 2020. Quelle: [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180918\\_technologien-laermminderung-fliegen.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180918_technologien-laermminderung-fliegen.html) (letzter Aufruf: 02.12.2020).
- [1-11] Bake, F.; Knobloch, K.: Novel liner concepts. 2019.
- [1-12] ICAO: Technology goals assessment and review for engines and aircraft. 2019.
- [1-13] Batard, H.: The Zero Splice Engine Intake Liner: an Efficient Way of Reducing Aircraft Noise Without any Weight or Aerodynamic Penalty. 2004.
- [1-14] Roger, M. et al: Rotating machine noise reduction with serrations, conventional and over-the-tip liners (vki Lecutre Series notes).2020.
- [1-15] P.König: Concept Development and Evaluation for a Broadband Noise Absorbing Acoustic Liner Concept for Aviation. 2019

# Quellen

## Fahrwerkslärm

- [2-1] Elkoby: Airframe Noise Test Results from the QTD II Flight Test Program. 2007.
- [2-2] Dobrzynski: Airframe Noise Landing Gear Noise. 2010.
- [2-3] Airbus: Aircraft Parking and Storage. 2020. Quelle: <https://safetyfirst.airbus.com/aircraft-parking-and-storage/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [2-4] Murayama: Computational study of low-noise fairings around tire-axle region of a two-wheel main landing gear. 2010.
- [2-5] Tec-science: Grenzschichtablösung (Strömungsabriss). 2020. Quelle: <https://www.tec-science.com/de/mechanik/gase-und-fluessigkeiten/grenzschichtablosung-stromungsabriss/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [2-6] Li: Noise Sources Control of an Aircraft Landing Gear. 2007.
- [2-7] Dobrzynski: Experimental Assessment of Low Noise Landing Gear Component Design. 2009.
- [2-8] Smith: Control Of Landing Gear Noise Using Meshes. 2010.
- [2-9] Ravetta: Noise Control of Landing Gears Using Elastic Membrane-Based Fairings. 2007.
- [2-10] Elkoby: Airframe noise test results from the QTD II flight test program. 2007.
- [2-11] Dobrzynski: Airframe noise–landing gear noise. 2010.
- [2-12] Ravetta: Assessment of Airframe Noise Reduction Technologies based on EPNL from Flight Tests. 2019.
- [2-13] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Leiser Fliegen: DLR testet nachrüstbare Technologien zur Lärmminde- rung. 2018. Quelle: [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180918\\_technologien-laermminderung-fliegen.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180918_technologien-laermminderung-fliegen.html) (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [2-14] Boeing: ecoDemonstrator Overview. 2020. Quelle: <https://www.boeing.com/principles/environment/ecodemonstrator#/videos/2020-ecodemonstrator-safran-landing-gear-noise-test> (letzter Aufruf: 15.12.2020)
- [2-15] CNN: Airbus A380: The wondrous giant that never quite took off. 2020. Quelle: <https://edition.cnn.com/travel/article/airbus-a380-birth-and-death/index.html> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [2-16] Rowley: Dynamics and Control of High-Reynolds-Number Flowover Open Cavities. 2006.
- [2-17] Youtube: Airbus A350 Gear Swing. 2020. Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=zzMsnhQfg2g> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [2-18] Khalid: Wie ist das Hauptfahrwerk 737 vor Witterungseinflüssen geschützt?. 2020. Quelle: <https://antwortenhier.me/q/wie-ist-das-hauptfahrwerk-737-vor-witterungseinflu-ssen-geschu-tzt-60241914449> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [2-19] White: Landing Gear Door. 2007
- [2-20] Ravetta: Assessment of Airframe Noise Reduction Technologies based on EPNL from Flight Tests. 2019.
- [2-21] Neri: Aeroacoustic Source Separation on a Full Scale Nose Landing Gear Featuring Combinations of Low Noise Technologies. 2015.
- [2-22] Chow: Landing Gear Door Assembly. 2008.
- [2-23] Radespiel: Fundamentals Of High Lift For Future. 2020.
- [2-24] Zhao: Use of dual planar jets for the reduction of flow-induced noise. 2017.
- [2-25] Oerlemans: Reduction of Landing Gear Noise Using an Air Curtain. 2010.
- [2-26] Dobrzynski: Airframe Noise Landing Gear Noise. 2010.
- [2-27] Chow: Aircraft noise reduction apparatus. 2012.
- [2-28] Dobrzynski: Experimental Assessment of Low Noise Landing Gear Component Design. 2009.
- [2-29] Li: Noise Sources Control of an Aircraft Landing Gear. 2007.
- [2-30] Menner: Numerische Untersuchung der Ablösekontrolle mittels Plasma-Aktuatoren am NACA 0015 Profil. 2015.
- [2-31] Zhao: Noise reduction technologies for aircraft landing gear-A bibliographic review. 2019.
- [2-32] Dobrzynski: Almost 40 Years Of Airframe Noise Research. 2008.

# Quellen

## Hochauftriebslärm

- [3-1] <https://www.dlr.de/content/de/grossforschungsanlagen/a320-atra.html> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Airbus-A320-Familie> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-3] Dobrzynski: Almost 40 Years of Airframe Noise Research: What Did We Achieve?. 2008.
- [3-4] <https://news.aviation-safety.net/2019/12/09/faa-proposes-3-9-million-penalty-against-boeing-for-installing-nonconforming-slat-tracks-on-b737-aircraft/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-5] Herr: Efficient and Airworthy Passive and Active Airframe Noise Control Strategies. 2012.
- [3-6] Bernicke: Overset-LES for Airframe Noise Investigation. 2020.
- [3-7] Yser: High-Order Variational Multiscale Model in Finite Elements Applied to the LEISA-2 Configuration. 2018.
- [3-8] Delfs: Aircraft Noise Assessment—From Single Components to Large Scenarios. 2018.
- [3-9] Dobrzynski: Model and full scale high-lift wing wind tunnel experiments dedicated to airframe noise reduction. 2001.
- [3-10] Khorrami: Effects of geometric details on slat noise generation and propagation. 2006.
- [3-11] Horne: Measurements of 26%-scale 777 Airframe Noise in the NASA Ames 40- by 80 Foot Wind Tunnel. 2005.
- [3-12] Mendoza: Aeroacoustic measurements of a Wing/Slat model. 2002.
- [3-13] Strüber: THE AERODYNAMIC DESIGN OF THE A350 XWB-900 HIGH LIFT SYSTEM. 2014.
- [3-14] Reckzeh: Der intelligente Tragflügel - Multifunktionale Klappen an der A350 XWB und der Weg zu zukünftigen Konzepten. 2003.
- [3-15] Pott-Pollenske: Aerodynamic and Acoustic Design of Silent Leading Edge Devices. 2014.
- [3-16] Reckzeh. Aerodynamic design of the high-lift-wing for a Megaliner aircraft. 2003.
- [3-17] DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik: Innovationsbericht 2020.
- [3-18] Hutcheson: Noise Radiation from a Continuous Mold-Line Link Flap Configuration. 2008.
- [3-19] Khorrami: Toward noise certification during design: airframe noise simulations for full-scale, complete aircraft. 2019.
- [3-20] Delfs: Airframe related aeroacoustics of transport aircraft. 2013.
- [3-21] Dobrzynski: Abschlussbericht zum Projekt Leiser Flugverkehr – Minderung des Umströmungslärm. 2004.
- [3-22] <https://worldofaircraftdesign.files.wordpress.com/2011/11/a380-landing-flaps-slats-spoilers-nacelle-kruger-4.jpg> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-23] Reichenberger: AFLONEXT FINAL CONFERENCE - Noise Control on Flap Side Edge. 2018.
- [3-24] Yamamoto: A flight demonstration for airframe noise reduction technology. 2019.
- [3-25] Kota: Flight Testing of the FlexFloilTM Adaptive Compliant Trailing Edge. 2016.
- [3-26] TU München: FlexMat TUM - Konzeptsdefinition und Voruntersuchungen zu formvariablen Werkstoffen und Flugzeugkomponenten. Abschlussbericht 2020.
- [3-27] [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180918\\_technologien-laermminderung-fliegen.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180918_technologien-laermminderung-fliegen.html) . (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-28] Knoblauch: EU Projekt ARTEM – Aircraft Noise Reduction Technologies and Related Environmental Impact. Summary M 24. 2020.
- [3-29] <https://www.earthlife.net/birds/images/anatomy/owl-feather.jpg> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-30] <https://wingmag.com/winglets> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-31] <https://www.fluglärm-portal.de/laerm-vermeiden/moderne-flugzeuge/oberflaeche-fluegel-fahrwerk/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-32] Shivashankara: Boeing Noise Research and Development for Quieter and Efficient Aircraft. ICANA 2013.
- [3-33] <https://texample.net/tikz/examples/airfoil-profiles/> (letzter Aufruf: 15.12.2020).
- [3-34] Delfs/Engelhardt: Lärmreduktion von Verkehrsflugzeugen - Stand der Technik und Zukunftsperspektiven. 2018.