

# Sind elektrisch angetriebene Flugzeuge effizient und leise(r)?

**Symposium Elektrische Propulsoren in der Luftfahrt**

14.10.2021, Braunschweig,

Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF)

Jan Delfs, Martin Hepperle

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Germany



Knowledge for Tomorrow



# Übersicht

- Einleitung: Schallquellen an Flugzeugen – Bedeutung des Propulsorantriebs
- Potenziale: Charakteristika elektrischer Antriebe aero-/akustisch nutzen?
- Schluss: Folgerungen
- Nachtrag: Lärm und nachhaltige Gewinnung elektrischer Energie



## Ein paar einfache Gedanken zu elektrisch angetriebenen Flugzeugen und Lärm ....

- Elektrisch angetriebene Autos sind leise! 😊
  - vorausgesetzt sie fahren langsamer als 30-40km/h 😊
  - > 60km/h: Fahrbahn/Reifen Kontakt Geräusch dominiert 😊
  - > 120km/h: aerodynamisches Geräusch dominiert wie für jedes andere Auto 😞
- Hinweise
  - Flugzeuge fliegen bei Geschwindigkeiten »120km/h sogar bei Start und Landung!
  - Aeroschallerzeugung ~ Luftkräfte ← Flugzeuge müssen zusätzl. Gewichtskraft in die Luft abstützen!
- **Gibt es irgendeinen Grund zu erwarten, dass elektrisch angetriebene Flugzeuge leiser sind?**
- **Vielleicht...** (Forschung benötigt)

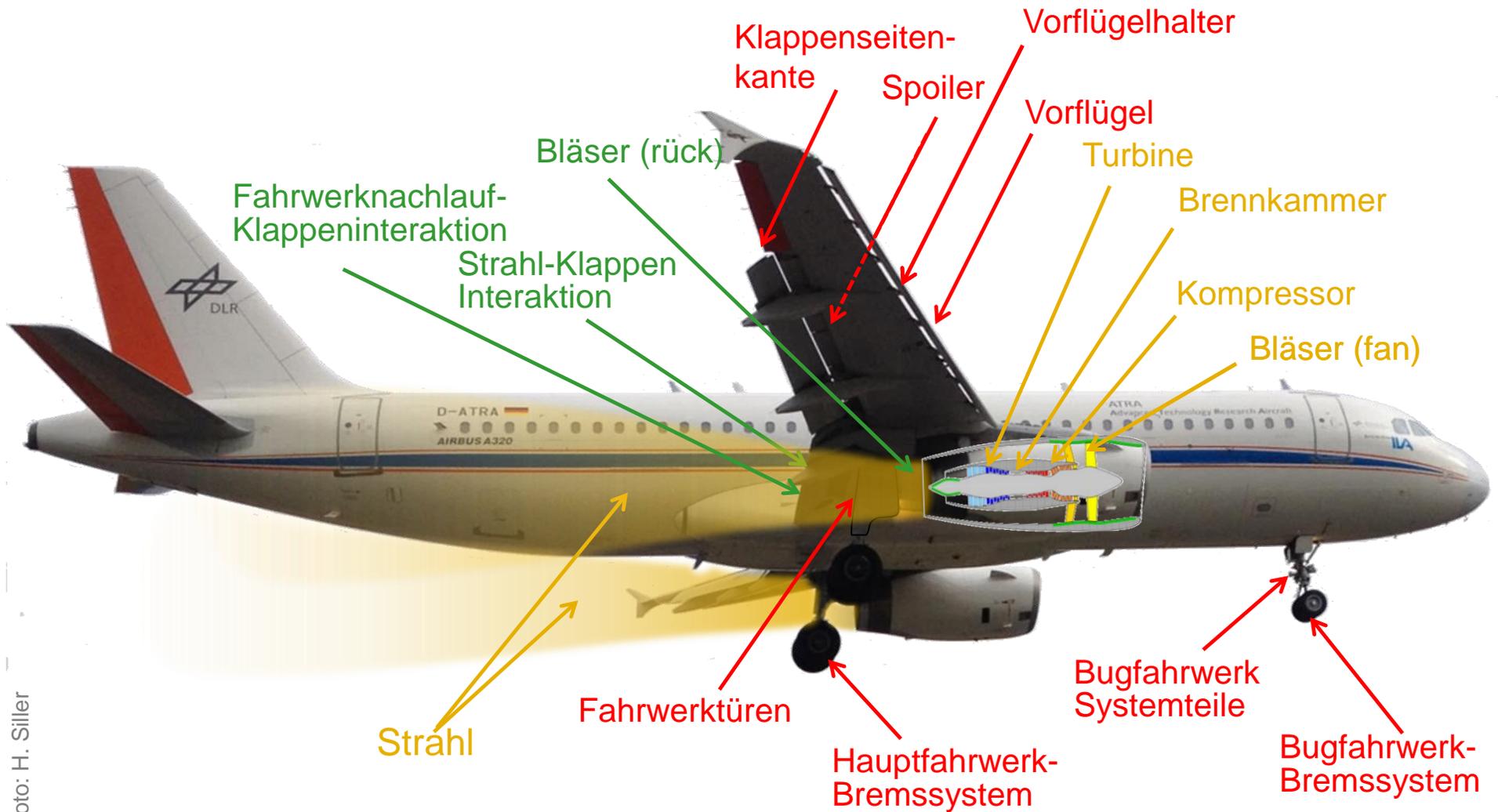


# **Lösung des Fluglärmproblems durch Ersetzen klassischer Luftfahrtantriebe durch Elektromotoren?**

**einige kritische Gedanken...**



# Schallquellen an modernen Strahlflugzeugen



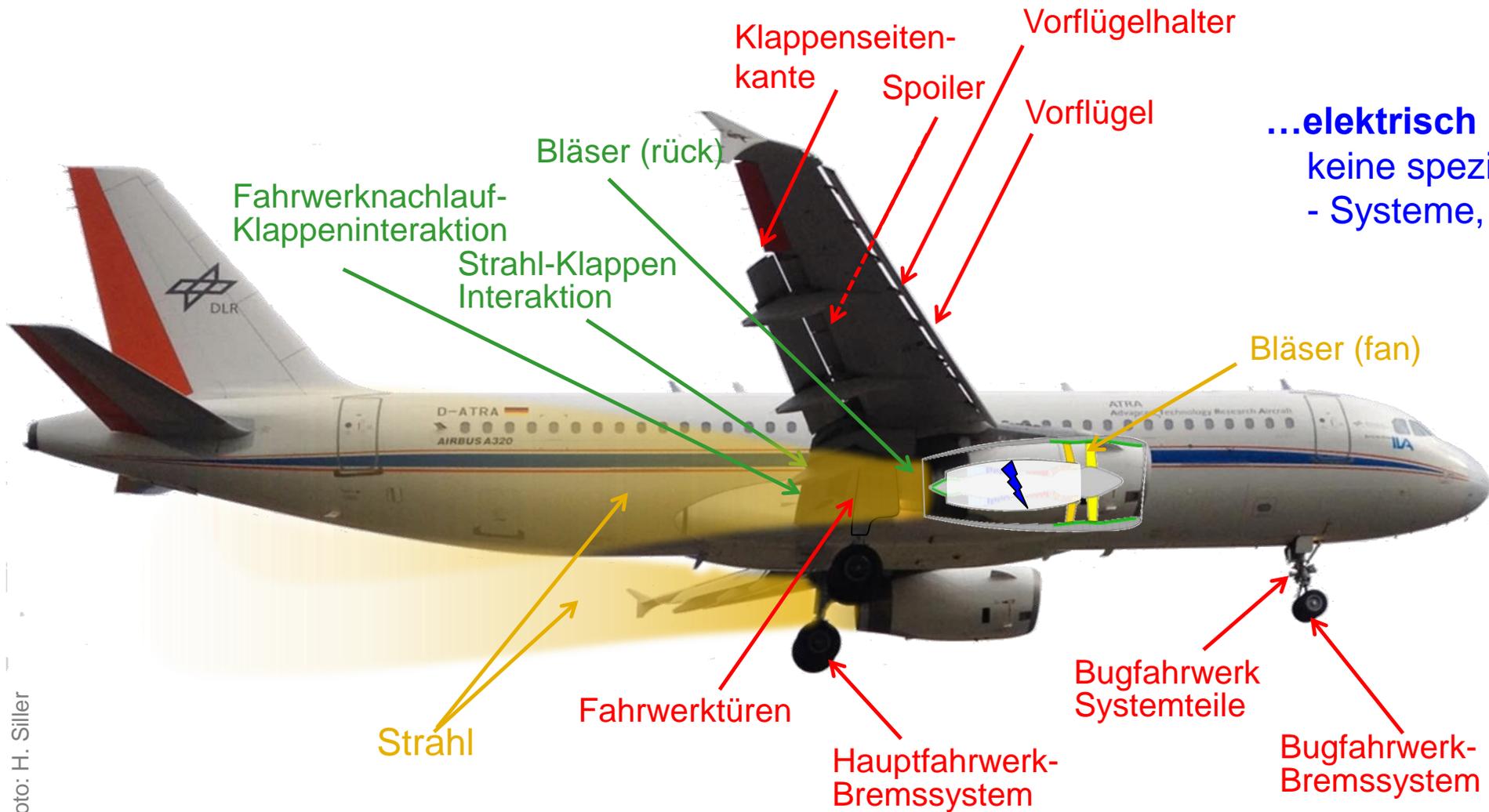
Quellen:

Triebwerk  
Flugwerk  
Installation

Photo: H. Siller



# Schallquellen an modernen Strahlflugzeugen



**...elektrisch**  
keine spezifischen Schallquellen?  
- Systeme, Generatoren, Kühlung..

Quellen:

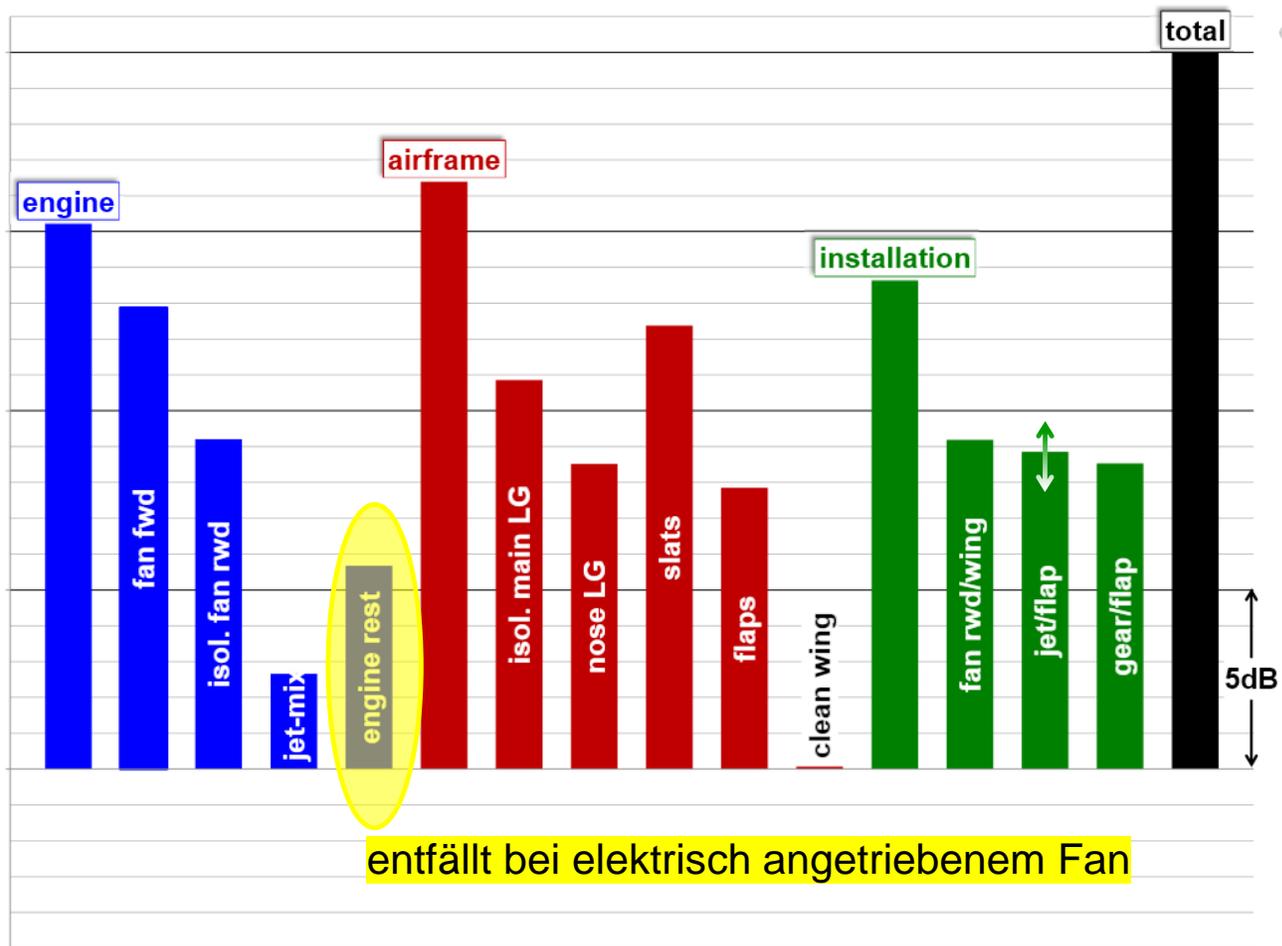
Triebwerk  
Flugwerk  
Installation

Photo: H. Siller



# Installationsquellen – ein Blick auf derzeitige Flugzeuge

Kurz-Mittelstreckenflugzeug, BPR 10-12, Anflug



„komplette“  
Quellenaufteilung

5dB

# Schallquellen an modernen Propellerflugzeugen

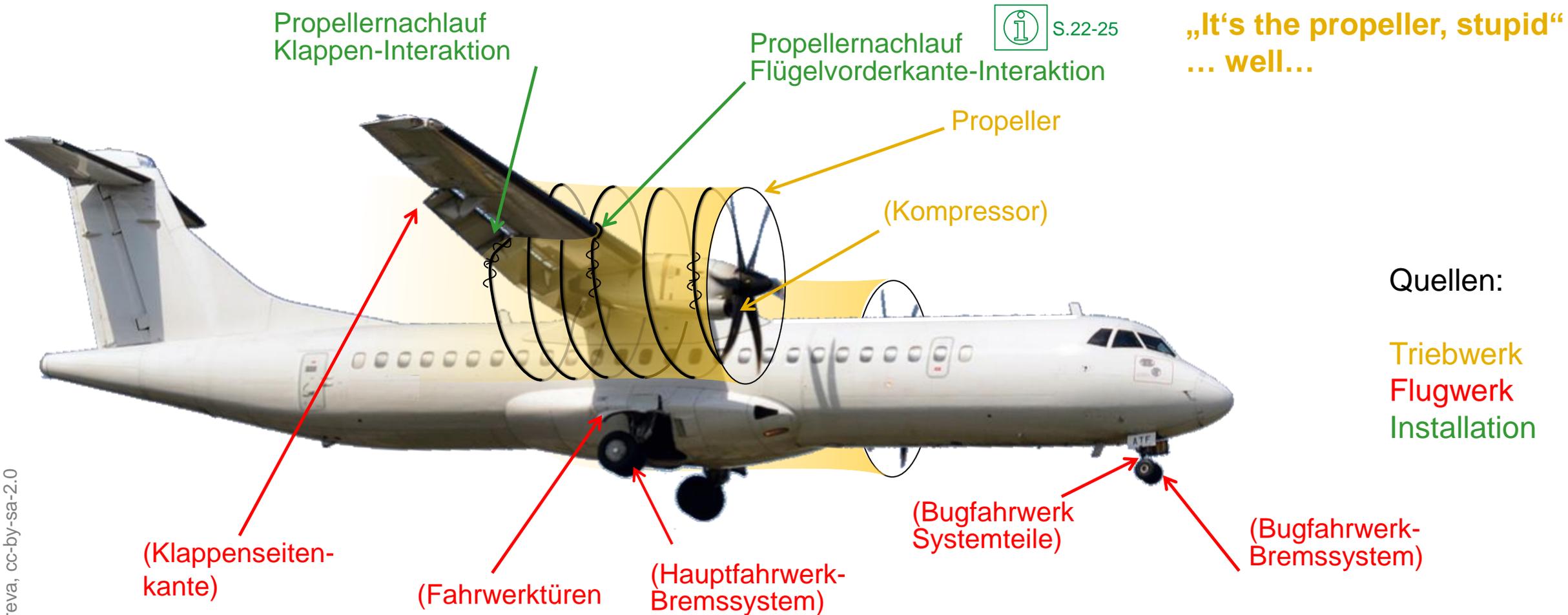


Photo: A. Zvereva, cc-by-sa-2.0



# Schallquellen an modernen Propellerflugzeugen

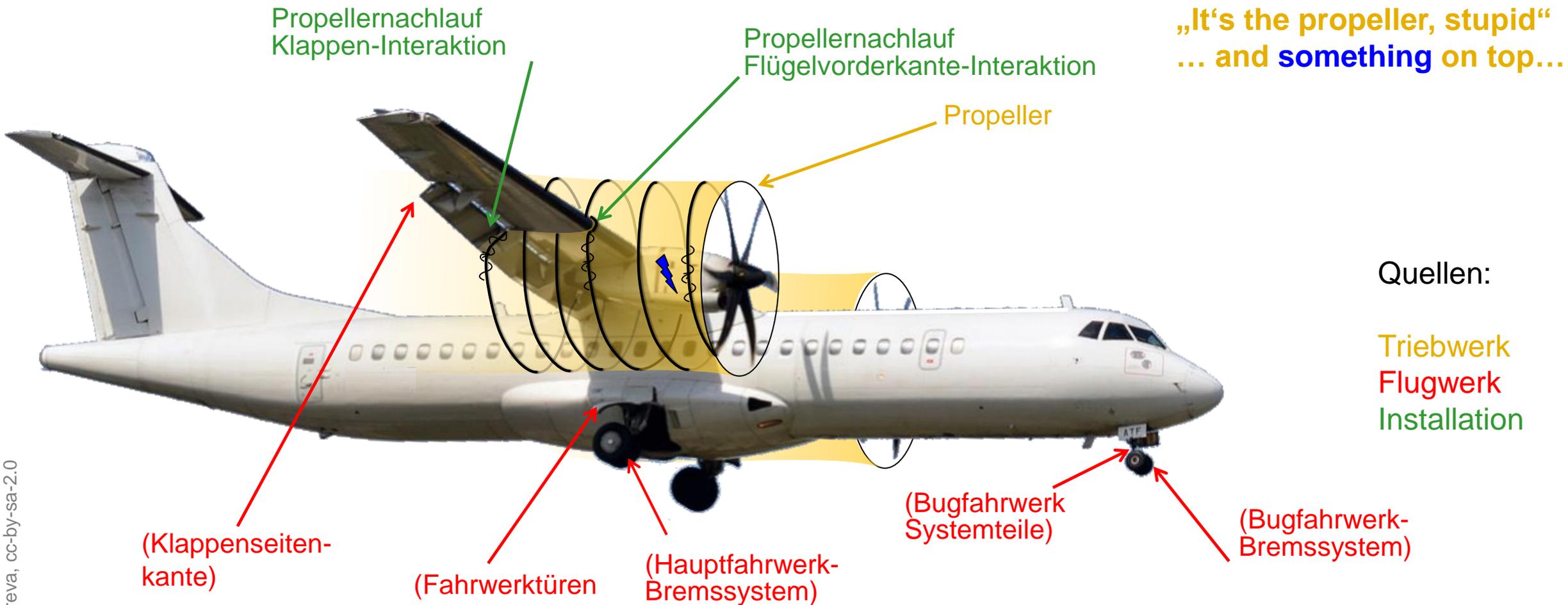


Photo: A. Zvereva, cc-by-sa-2.0



## Ersetzen klassischer Luftfahrtantriebe durch Elektromotoren nicht zielführend für leisere Flugzeuge!

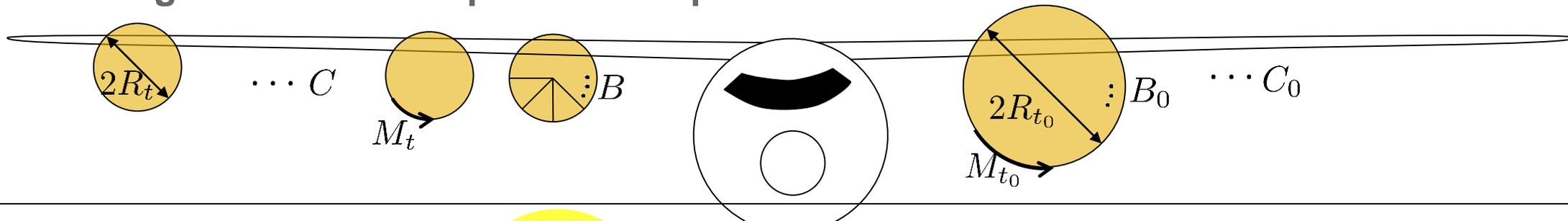
**wie also?**

### 3 Ideen:

- \* 1. verteilte Antriebe (viele kleine Propeller anstatt wenige große)
- \* 2. ungleichförmige Drehzahl ausnutzen?
- \* 3. Phasensynchronisierung zwischen vielen Propellern?

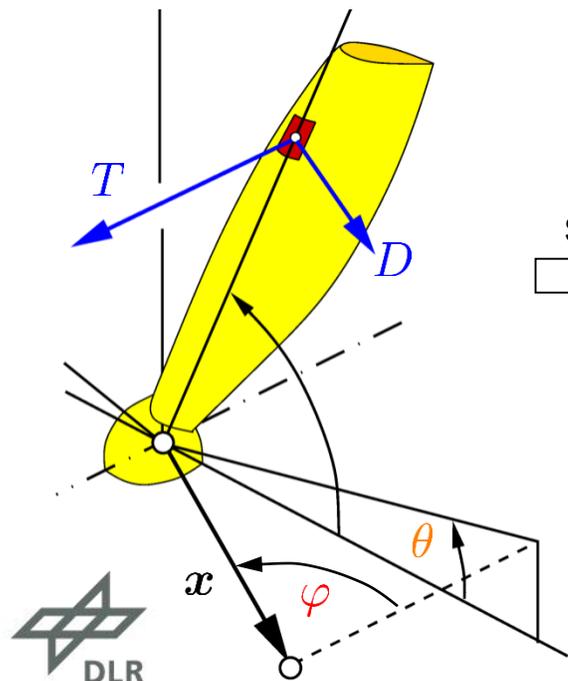


# 1. Minderung der tonalen Propellerschallquellen bei verteiltem Antrieb

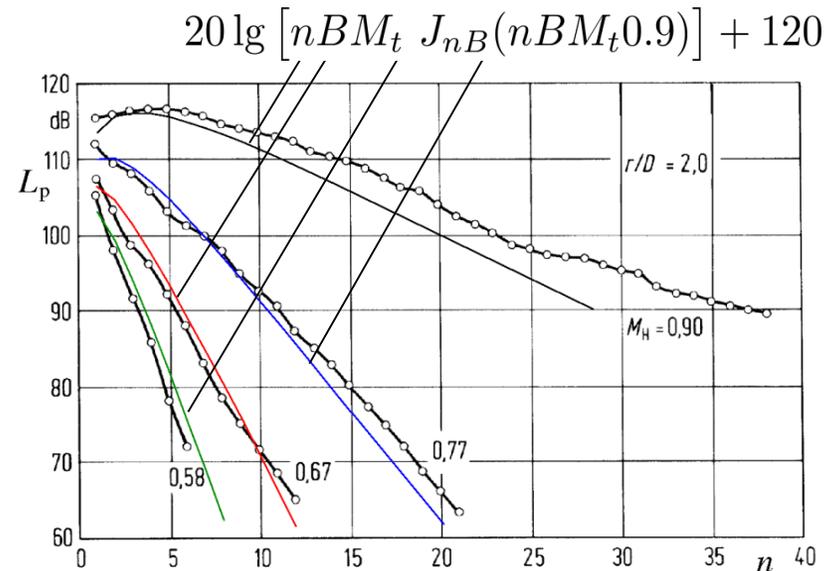
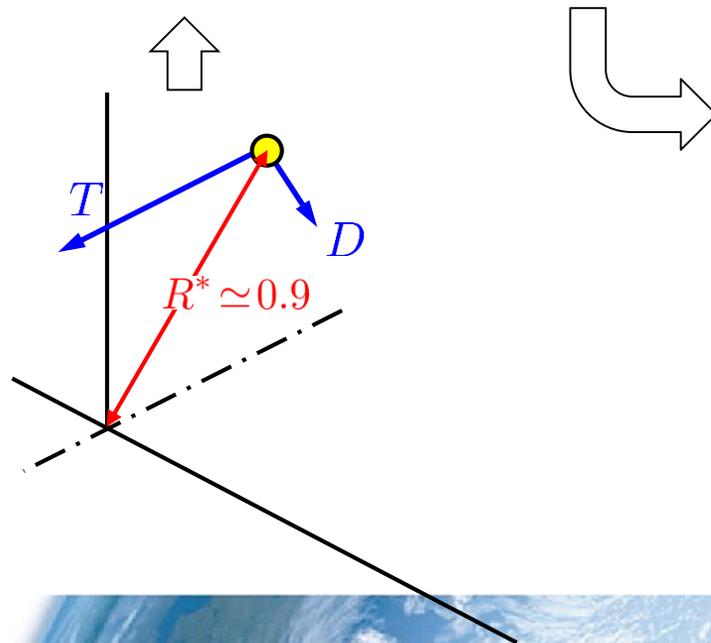


$$\hat{p}_{nB}(\mathbf{x}) \simeq \frac{inB^2 M_t e^{-inB(\omega x/a_\infty + \theta - \pi/2)}}{4\pi x} \int_0^1 \int_{\phi_{TE}(R^*)}^{\phi_{LE}(R^*)} \left[ R_t T \cos \varphi - R_t \frac{D}{M} + inB M_t \rho_\infty a_\infty^2 h \right] J_{nB}(nB M_t R^* \sin \varphi) e^{inB\phi} R^* dR^* d\phi$$

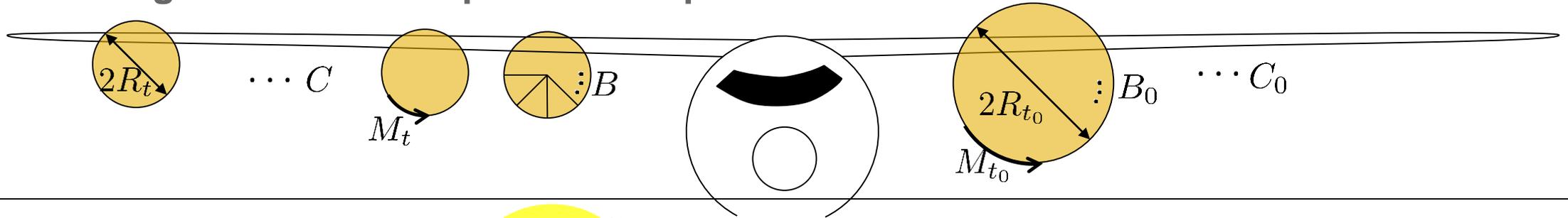
Schalldruck:  $|\hat{p}_{nB}(\mathbf{x})|^2 \sim [nB M_t J_{nB}(nB M_t R^*) (B T R_t^2) R_t^{-1}]^2 \cdot C$



simpl →



# 1. Minderung der tonalen Propellerschallquellen bei verteiltem Antrieb



$$\hat{p}_{nB}(\mathbf{x}) \simeq \frac{inB^2 M_t e^{-inB(\omega x/a_\infty + \theta - \pi/2)}}{4\pi x} \int_0^1 \int_{\phi_{TE}(R^*)}^{\phi_{LE}(R^*)} \left[ R_t T \cos \varphi - R_t \frac{D}{M} + inB M_t \rho_\infty a_\infty^2 h \right] J_{nB}(nB M_t R^* \sin \varphi) e^{inB\phi} R^* dR^* d\phi$$

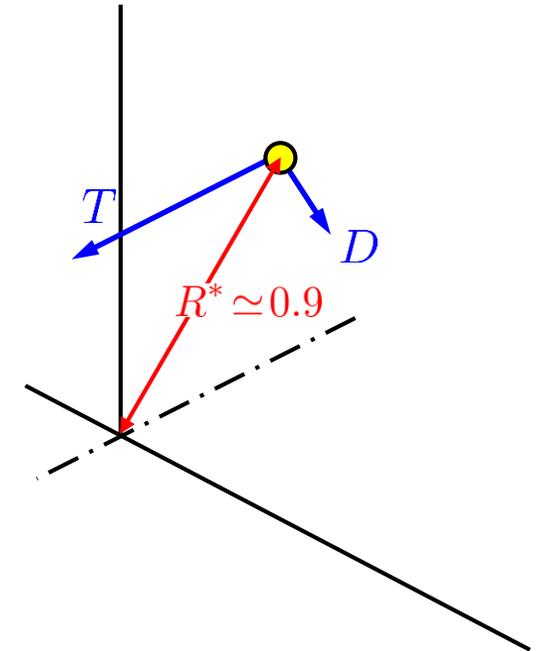
Schalldruck:  $|\hat{p}_{nB}(\mathbf{x})|^2 \sim [nB M_t J_{nB}(nB M_t R^*) (B T R_t^2) R_t^{-1}]^2 \cdot C$

Schallquellreduzierung:

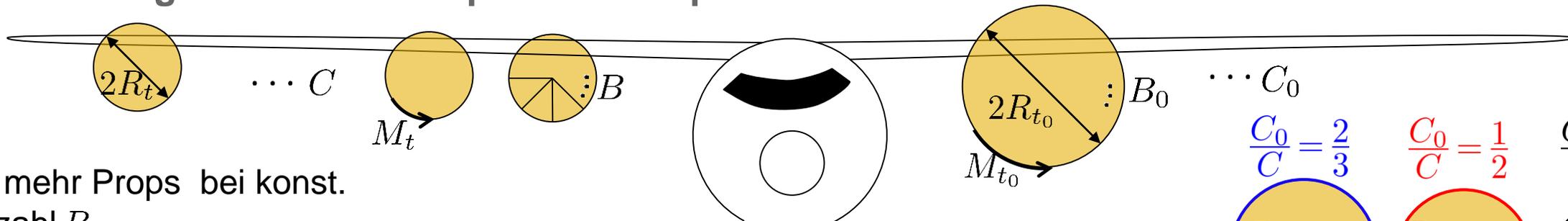
$$\Delta L_p^n = 10 \lg \left\{ \frac{|\hat{p}_{nB}(\mathbf{x})|^2}{|\hat{p}_{nB}(\mathbf{x})|_0^2} \right\} \sim 10 \lg \left\{ \frac{[J_{nB}(nB M_t R^*) B M_t R_{t0}]^2 \cdot C_0}{[J_{nB_0}(nB_0 M_{t0} R^*) B_0 M_{t0} R_t]^2 \cdot C} \right\}$$

Schub  $S \sim C \cdot B T R_t^2 \sim C \cdot B \frac{\rho}{2} c_T N^2 R_t^4$   $\frac{B T R_t^2 \cdot C}{B_0 T_0 R_{t0}^2 C_0} = 1$

gleicher Gesamtschub



# 1. Minderung der tonalen Propellerschallquellen bei verteiltem Antrieb



z.B.: mehr Props bei konst. Blattzahl  $B$   
 Drehzahl  $N$   
 Schubbeiwert  $c_T$ :

$$\frac{R_t}{R_{t0}} = \left(\frac{C_0}{C}\right)^{1/4} = \frac{M_t}{M_{t0}} = \left(\frac{A_0}{A}\right)^{1/2}$$

$$S/S_0 = 1$$

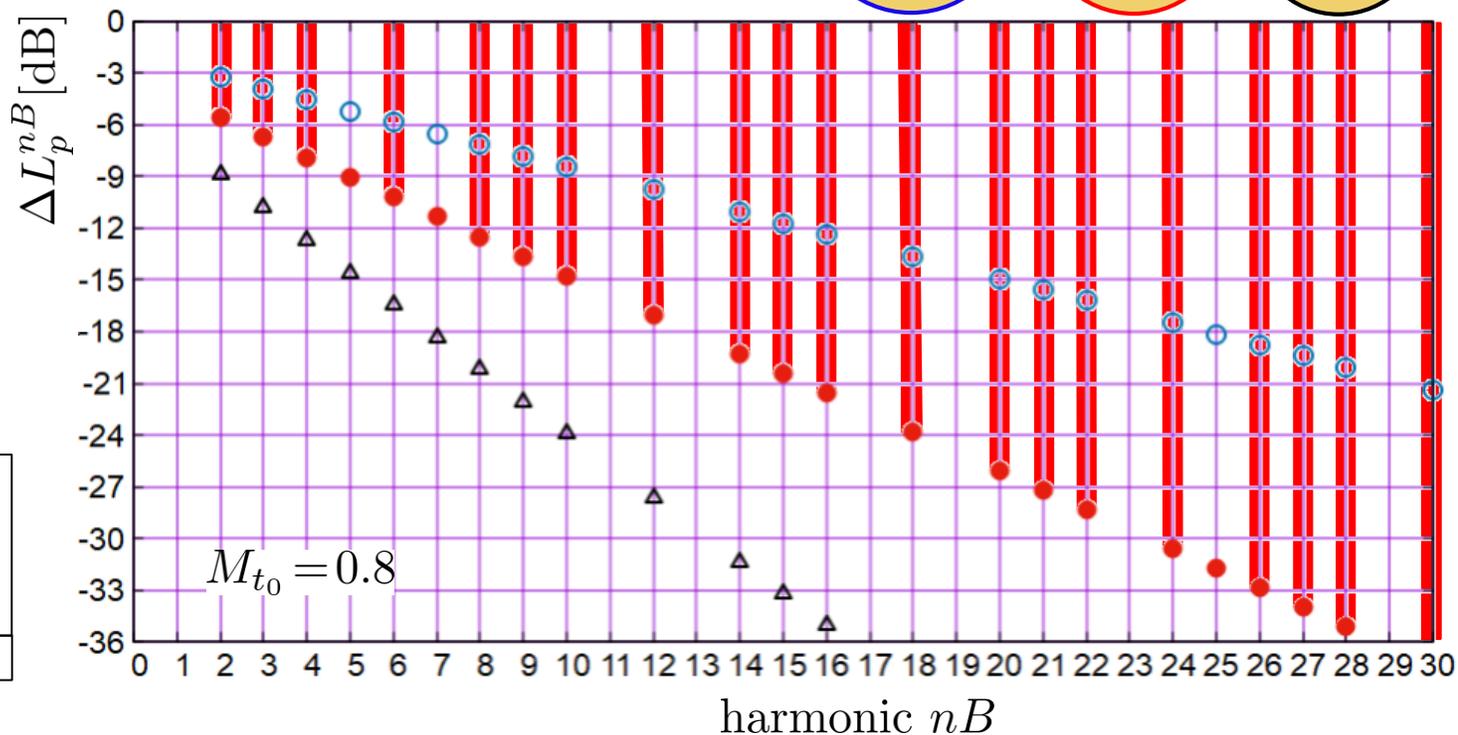
$$\frac{P}{P_0} \sim \frac{U_s}{U_{s0}} \frac{\rho U_s^2 R_t^2 C}{\rho U_{s0}^2 R_{t0}^2 C_0} = \frac{R_{t0}}{R_t} \left(\frac{C_0}{C}\right)^{1/2} = \left(\frac{C_0}{C}\right)^{1/4}$$

$$\Delta L_p^{nB} \sim 10 \lg \left\{ \frac{J_{nB}^2(nBM_{t0}(C_0/C)^{1/4}R^*)}{J_{nB}^2(nBM_{t0}R^*)} \frac{C_0}{C} \right\}$$

bei konst. Gesamtschub

$\frac{C_0}{C} = \frac{2}{3}$	$\frac{C_0}{C} = \frac{1}{2}$	$\frac{C_0}{C} = \frac{1}{3}$
$\frac{R_t}{R_{t0}} = 90\%$ $\frac{M_t}{M_{t0}} = 0.72$	$\frac{R_t}{R_{t0}} = 84\%$ $\frac{M_t}{M_{t0}} = 0.67$	$\frac{R_t}{R_{t0}} = 76\%$ $\frac{M_t}{M_{t0}} = 0.61$

## 3-Blatt-Prop



## 2. Nutzung ungleichförmiger Drehzahleffekt (1/2)

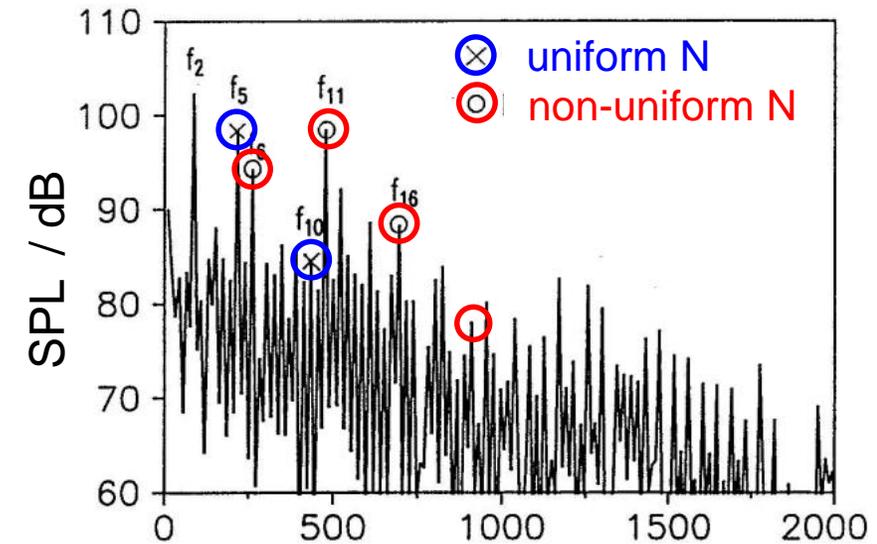


$$N = 2600 \text{rpm}$$

$$\frac{N'}{N} = 1.8\% \text{ at } n = 6$$

$$M_{\text{tip}} = 0.68$$

Effekt „wiederentdeckt“ 2019\*  
bei bürstenlosen E-Motoren  
für Drohnenpropeller/-rotoren



- kolbenmotorbedingte 1.8% **Ungleichförmigkeit der Rotation** erhöht (dominiert!) Propellergeräusch massiv
- Besonders stark bei geringen  $M_{\text{tip}}$
- Abstrahlung nach vorn/hinten ähnlich Pusher-Propeller

# Warum sollte ein E-antriebener Propeller leiser sein?

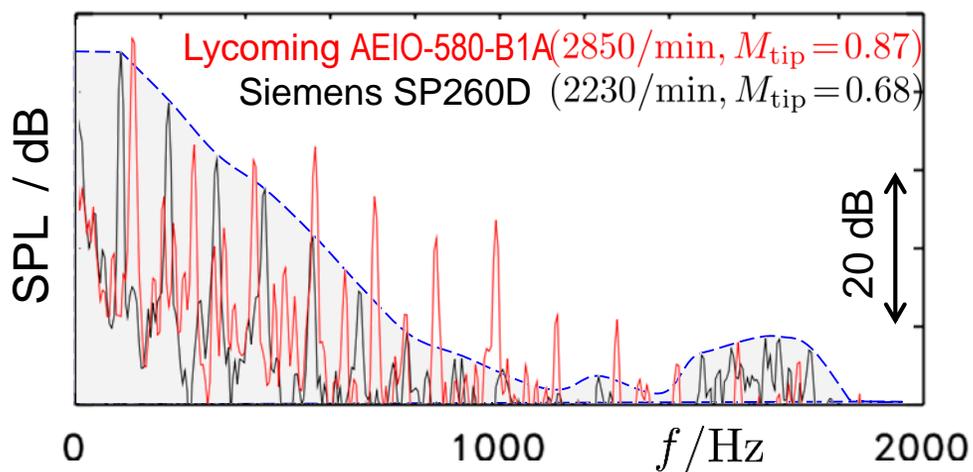
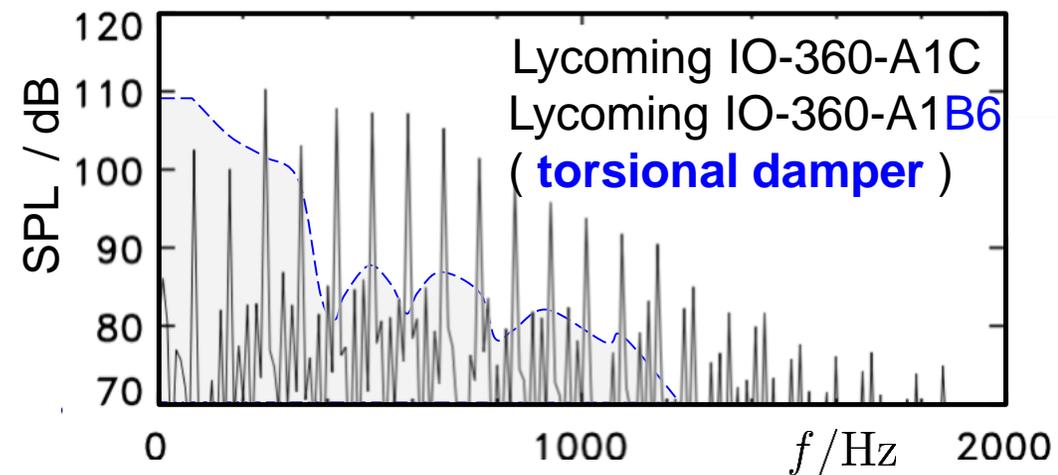
(e.g. test on Extra 330LT a/c with Siemens E-motor\*)



roughly evaluated from video\*, 1000ft flyover



4 stroke 4 cyl. piston engine drive



Massive Pegelreduktion durch

- **Vergleichmäßigung der Rotation**
- **Herabsetzung der Blattspitzenmachzahl  $M_t$  + Belastungssteigerung (! Installationsgeräusch)**
- (Eliminierung von Kolbenmotorauslass Geräusch)

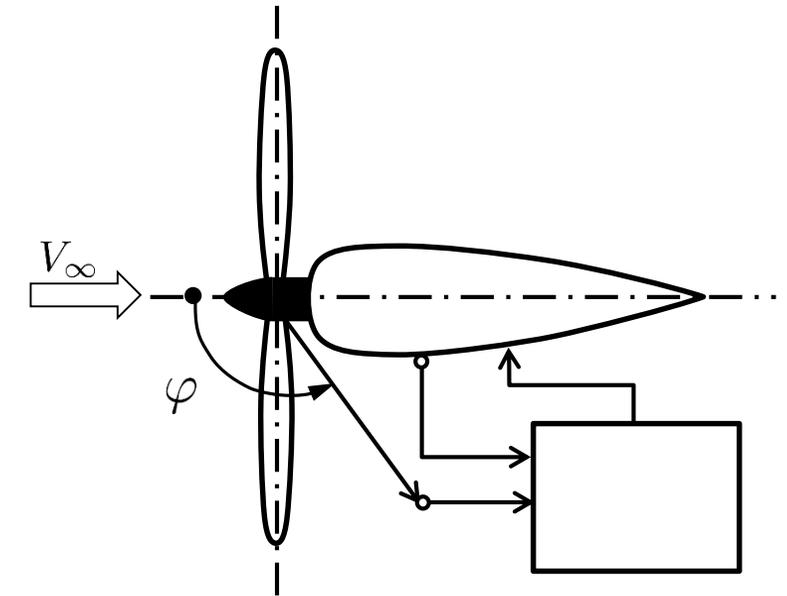
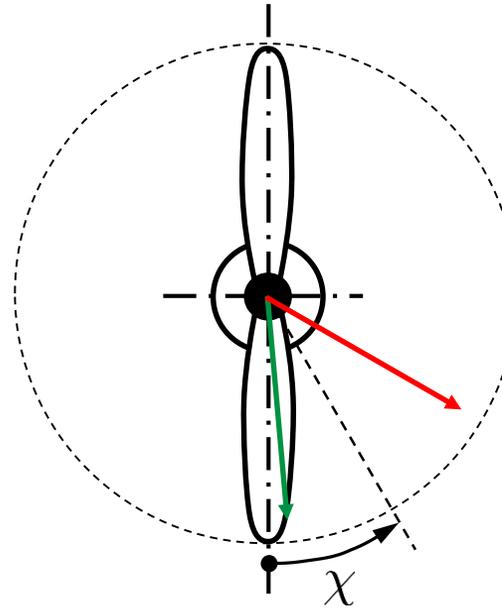
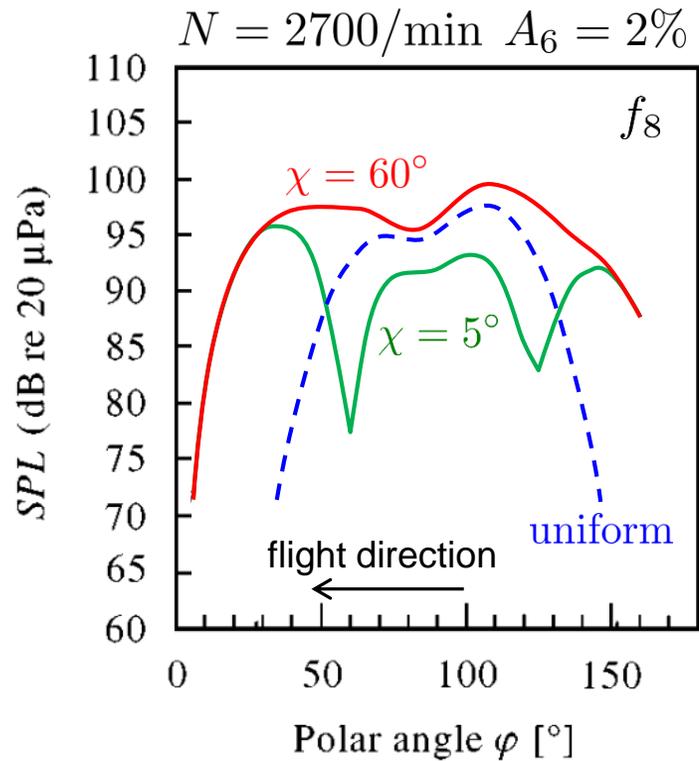
→ Elektrischer Antrieb ☺

→ Gasturbine (Turboprop) ☺☺ (noch besser)

\*) <https://www.youtube.com/watch?v=WyllWeDtPy0&index=7&t=0s&list=PLw7lLwXw4H53YUddJ99vzOVFgn-o4f17U>



## 2. Nutzung ungleichförmiger Drehzahleffekt (2/2)



Konzept:

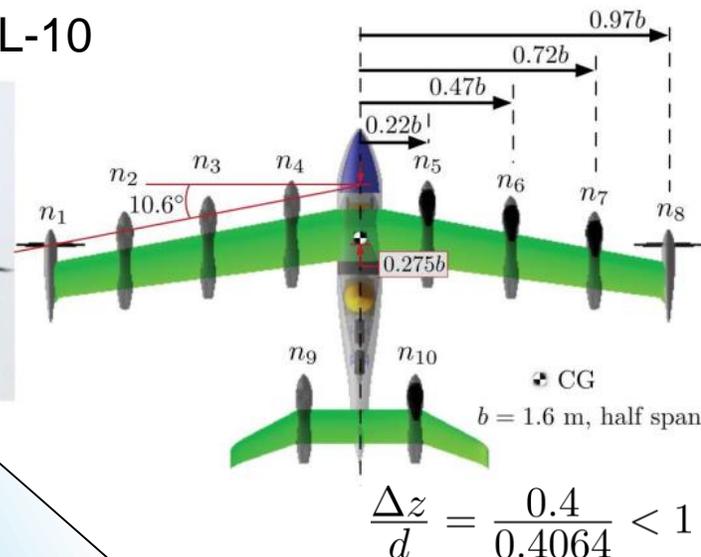
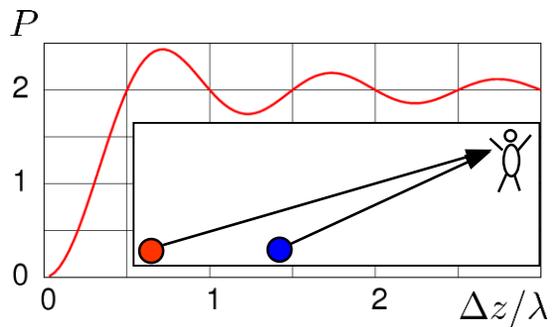
gezielte Aufbringung von Ungleichförmigkeit mittels E-Motor  
(angepasst auf Prop und/oder mit Regler)

notwendig:

Leistungselektronik, schnelle Regler

weiteres Potenzial: Ausregeln von Installationsschall bei pusher Props

### 3. Auslöschung von Schall (gegen-)gephaster Propeller



$$\frac{\Delta z}{d} = \frac{0.4}{0.4064} < 1$$

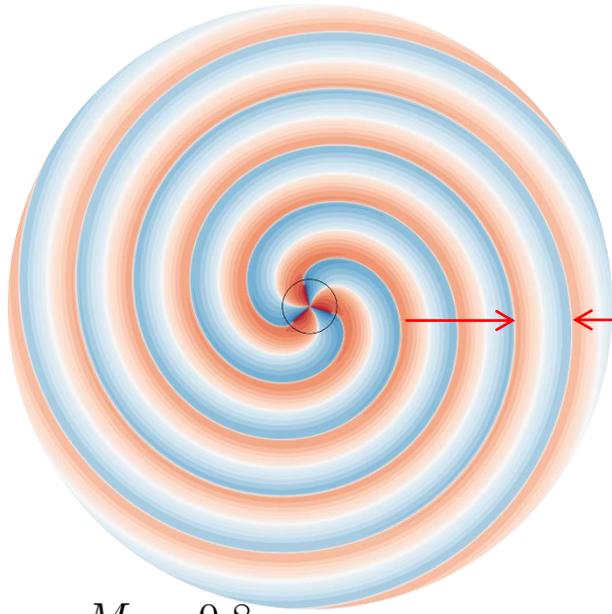
$$\frac{\Delta z}{\lambda_{nB}} = nBM_t \frac{\Delta z}{\pi d} \stackrel{!}{<} \frac{1}{2}$$

$$n \stackrel{!}{<} \frac{\pi}{2} \frac{d}{\Delta z} \frac{1}{BM_t}$$

Bester Fall:  $B = 2, d/\Delta z = 1$

$$n \stackrel{!}{<} \frac{\pi}{4} \frac{1}{M_t} \quad \text{auslöschbar: } n = 1 \text{ für } M_t < 0.5$$

⇒ globale Ton-Auslöschung bei Propellern nicht machbar



$M_t = 0.8$

$\lambda_{3,6,9,\dots}$

**zonale** Ton-Auslöschung  
ausrichtbarer  
„low noise beam“

<https://ntrs.nasa.gov>

## Effizienz/Aerodynamik bei E-Antrieben

- elektrische Antriebe für sich sind nicht effizienzsteigernd; im Gesamtflugzeugkontext eher gegenteilig wg. der Problematik der **Leistungsbereitstellung**: zusätzliche Massen, Systeme, Kühlung,...
- **verteilte Antriebe** liefern Verbesserung in der Aero-Performance (Projekt Synergie: 10% gegenüber 2-Prop Lösung); derzeit jedoch bestenfalls Effizienzneutralität insgesamt (und noch keine Nachhaltigkeit wenn umgesetzt mit Kerosin-Generatoren)
- nachhaltiges Fliegen mittels elektrischen Antrieben zunächst denkbar für
  - GA-Flugzeuge und Kleinfluggeräte mittels Batterien
  - Regionalflugzeug mittels H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen oder H<sub>2</sub>-Generatoren (mehr Volumen/Widerstand)
  - Mittelstrecke/Langstrecke (ggf. längerfristig)
- **Fazit**: elektrische Antriebe nicht effizienter, bestenfalls neutral in Verbindung mit neuem Gesamtentwurf



## Zusammenfassung/Folgerung

- Vortrieb erzeugt die Aero-Schallquellen, weitgehend unabhängig vom Antrieb des jeweiligen Propulsors
- trotz Wegfall von Gasturbinengeräusch potenzielle Zusatzschallquellen durch E-Motorantriebe
- E-Antriebe für sich sind nicht effizienzsteigernd, eher im Gegenteil
- E-Antriebe ermöglichen neue Entwurfsfreiheitsgrade für Gesamtentwurf aerodynamisch u. akustisch
  
- Sind also elektrisch angetriebene Flugzeuge effizient und leise(r)?
  - **Nein**, wenn reines Ersetzen von Gasturbine/Kolbenmotor
  - **Ja**, bei Veränderung des Flugzeuggesamtentwurfs in Verbindung mit dem Propulsorkonzepten (verteilte Antriebe, alternative Anordnung, Phasensynchronisierung zu zonaler Schallauslöschung)



# Nachtrag – Leise Elektrizitätsgewinnung...

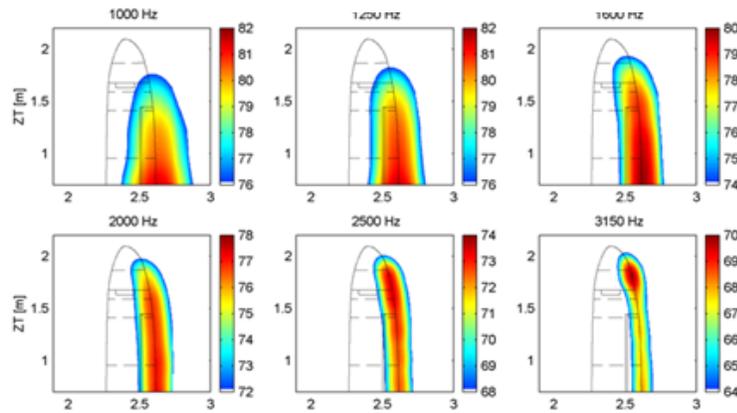


Gefördert durch:

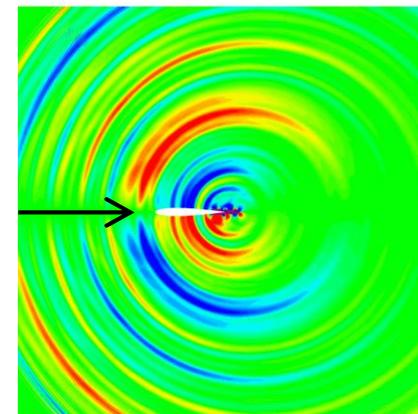
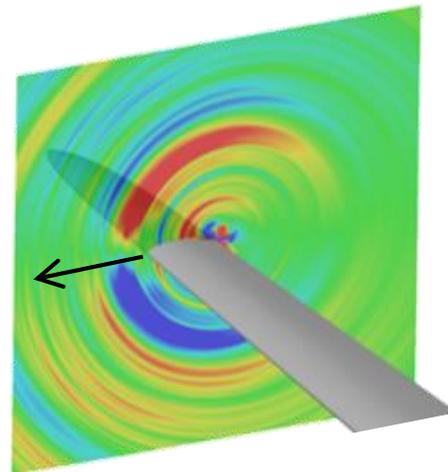
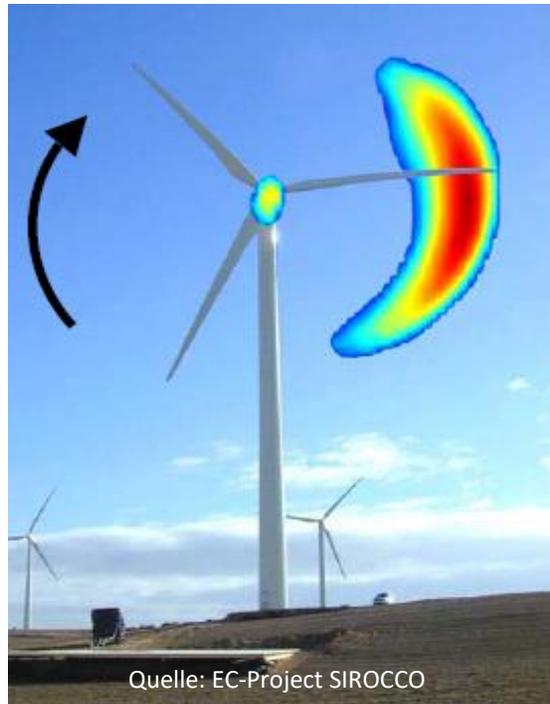
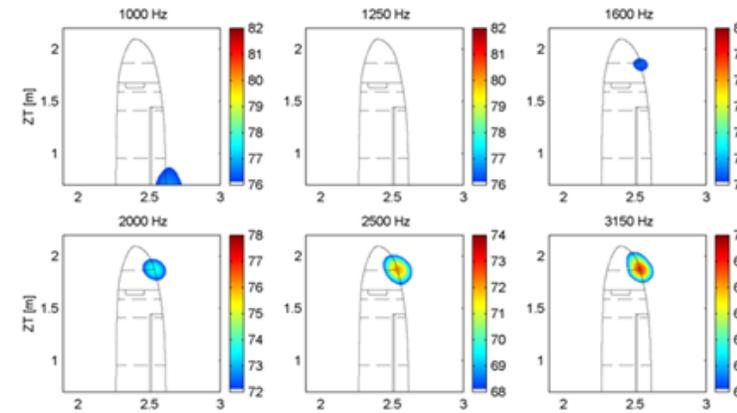


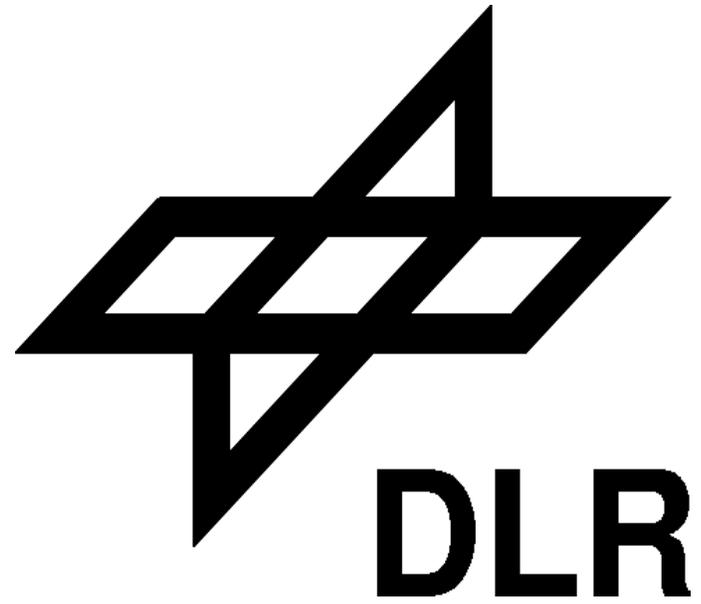
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

### RoH-W-18%c37 FUL

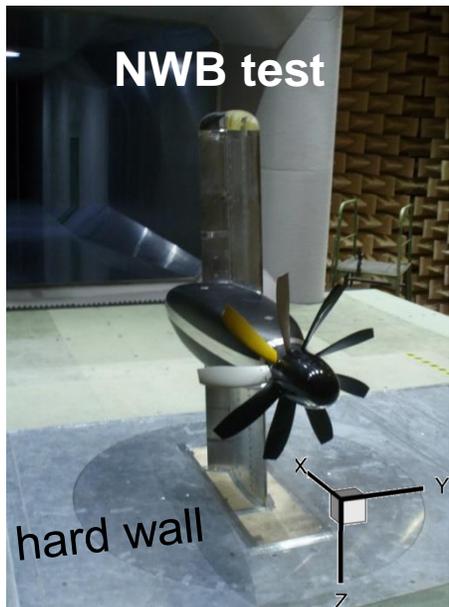


### RoH-W-18%c37 FUL + brush



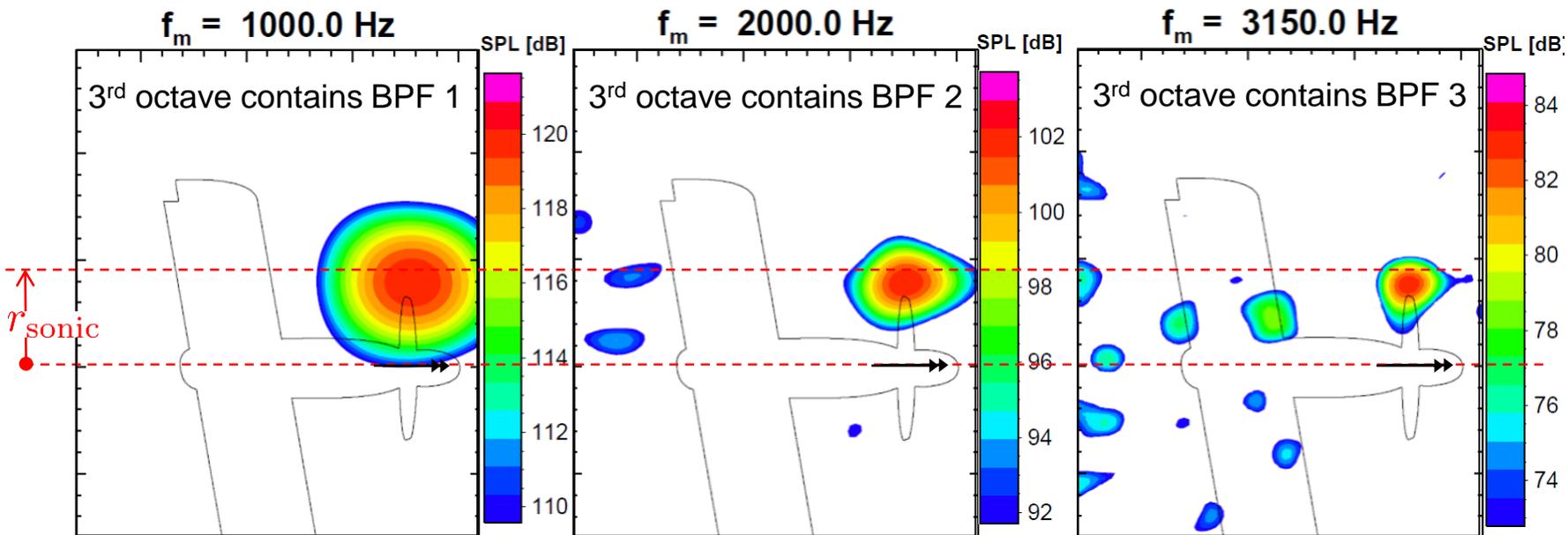
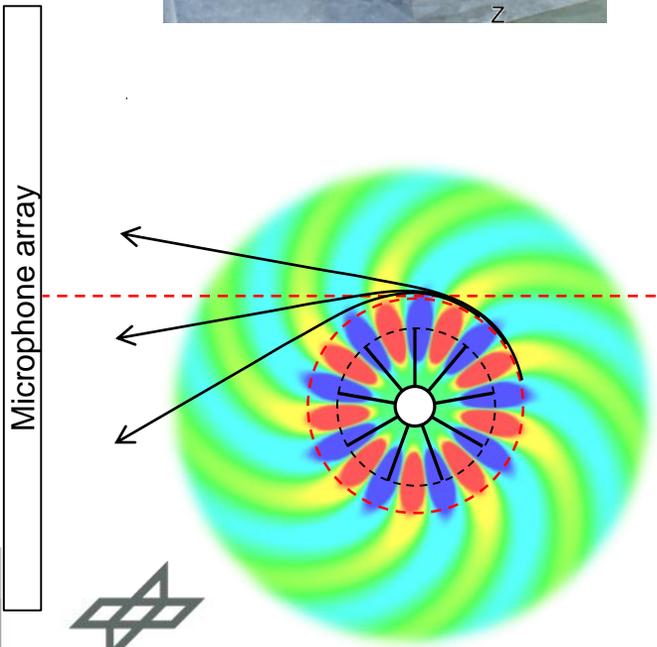
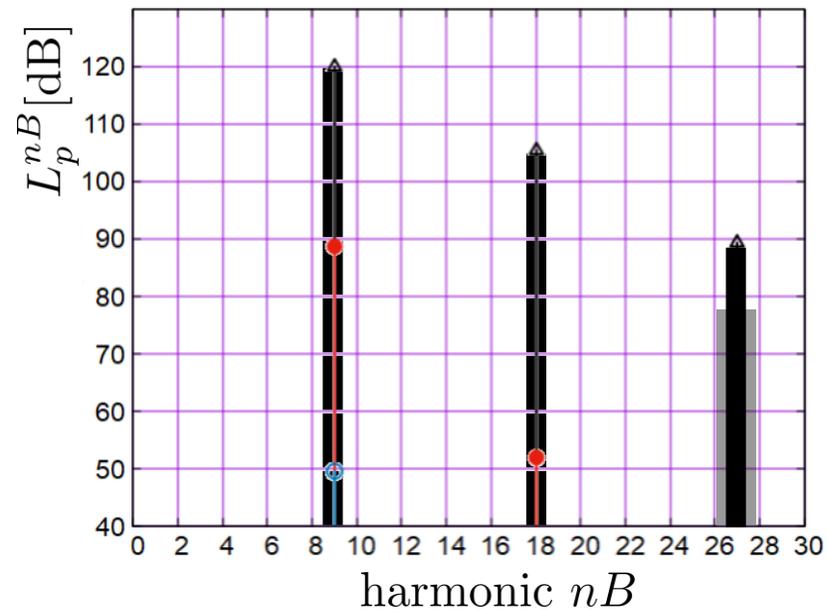


# Bedeutung von Propeller-Installationsquellen

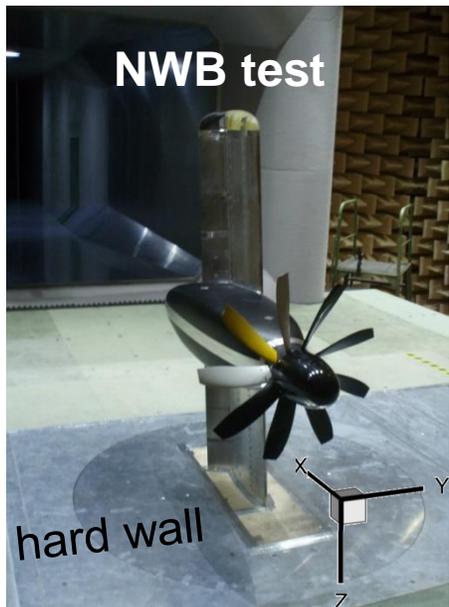


$$V_\infty = 51 \text{ m/s}, N_P = 7144 \text{ rpm}, \beta = 28^\circ$$

$$M_{tip} = 0.73$$

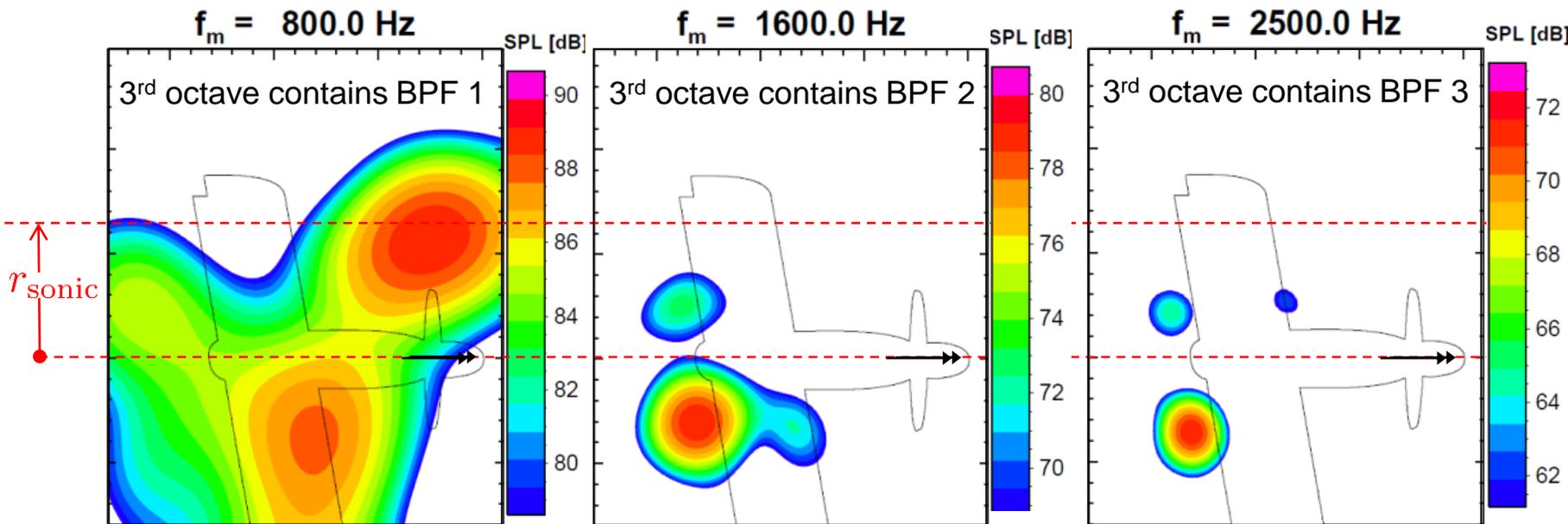
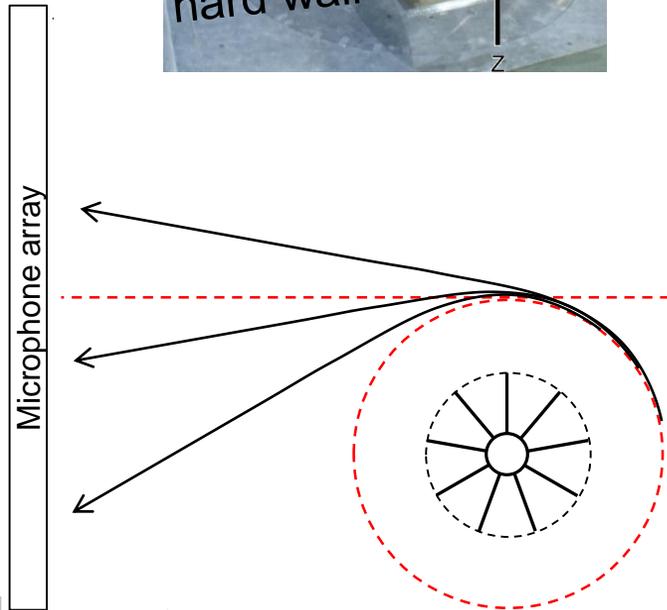
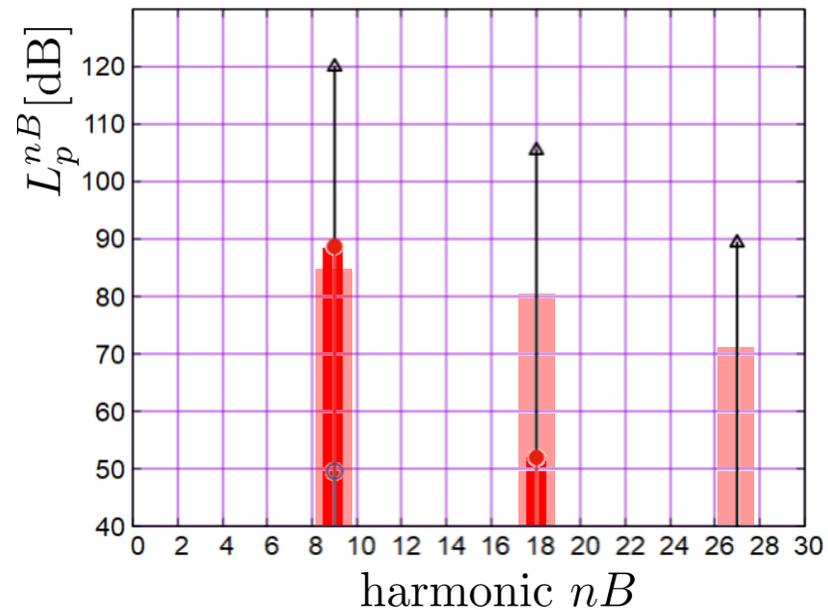


# Bedeutung von Propeller-Installationsquellen

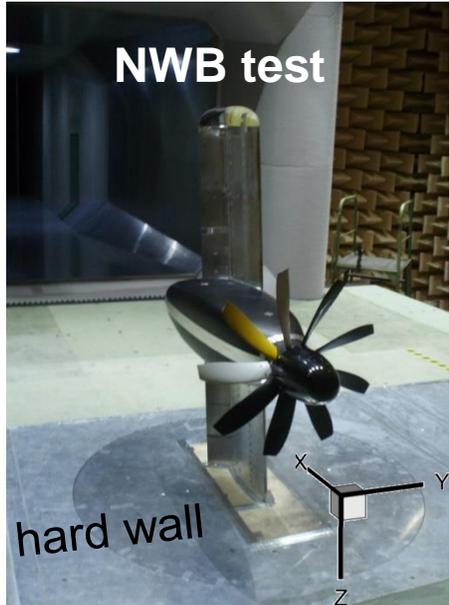


$$V_\infty = 51 \text{ m/s}, N_P = 5105 \text{ rpm}, \beta = 28^\circ$$

$$M_{tip} = 0.52$$

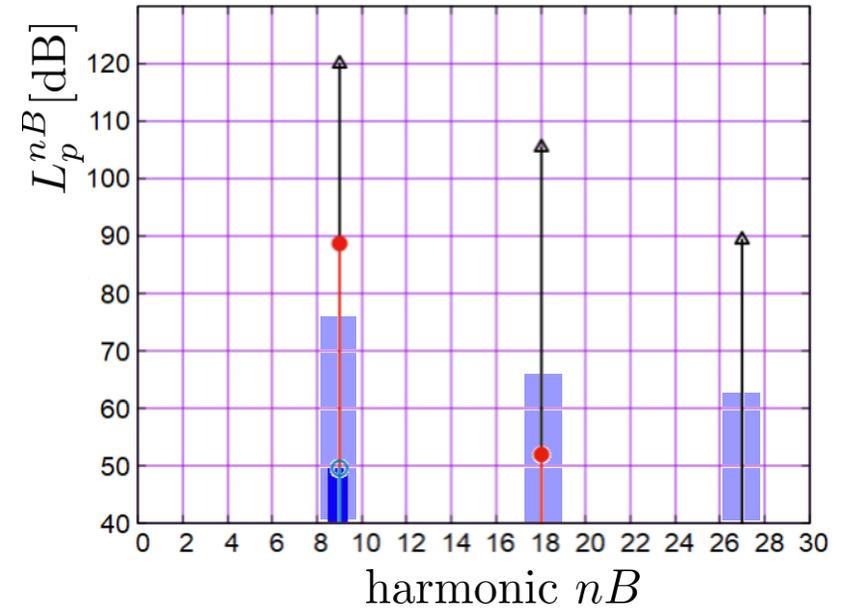


# Bedeutung von Propeller-Installationsquellen



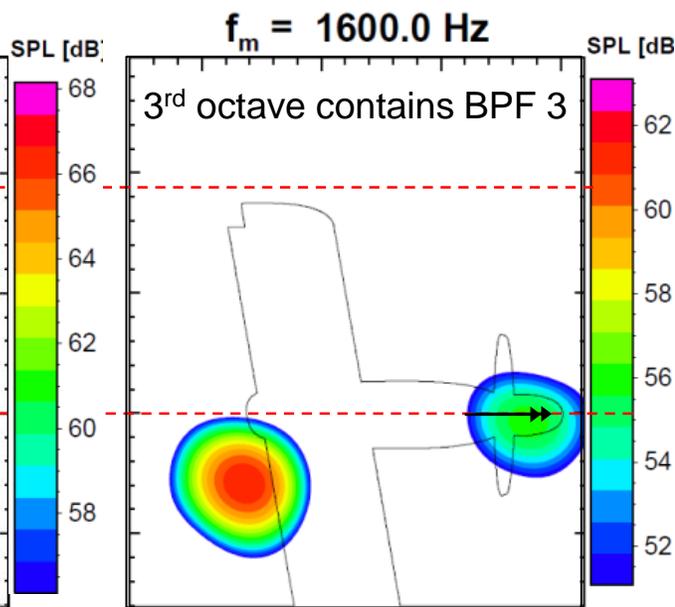
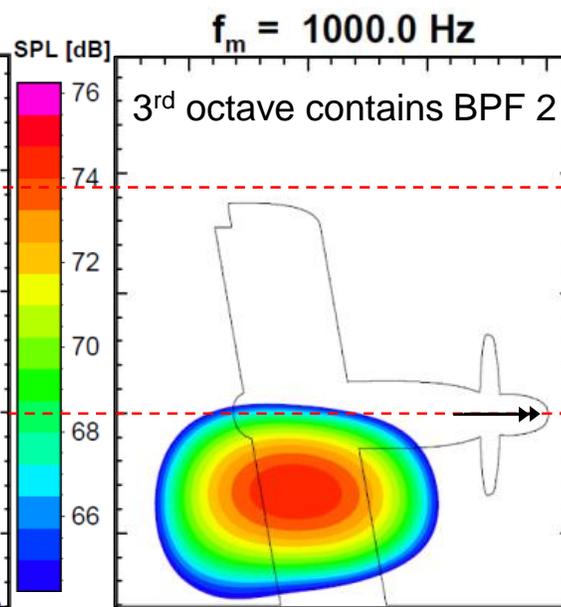
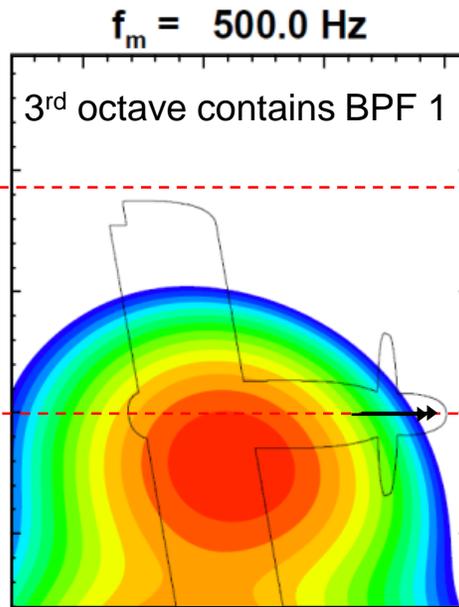
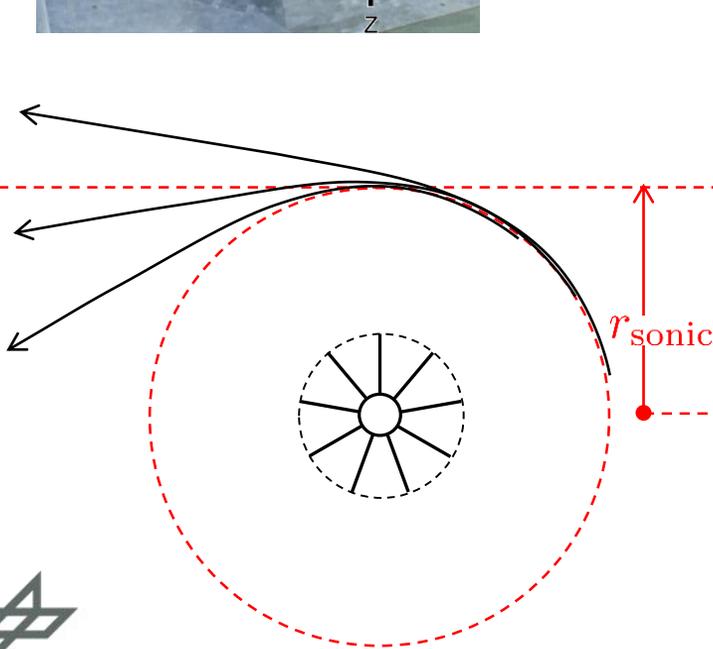
$$V_\infty = 51 \text{ m/s}, N_P = 3450 \text{ rpm}, \beta = 28^\circ$$

$$M_{tip} = 0.35$$



Installation

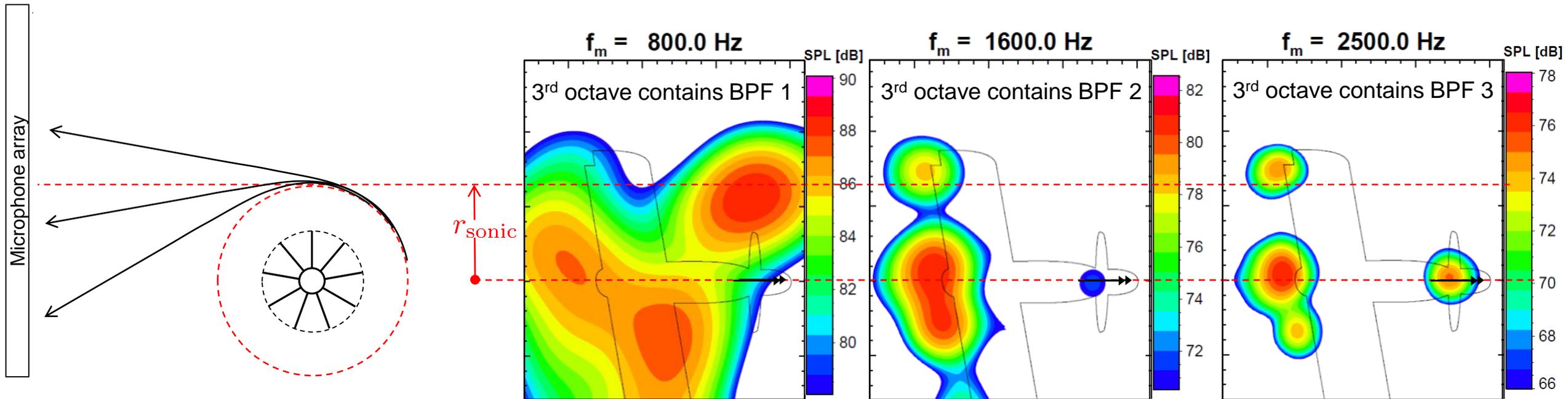
Microphone array



# Bedeutung von Propeller-(Installations)quellen tonal/breitbandig

$V_\infty = 51 \text{ m/s}, N_P = 5105 \text{ rpm}, \beta = 28^\circ$

$M_{tip} = 0.52$



→ Prop-noise reduction by reduced rpm → propeller noise induced airframe noise (installation)

