

## Detektion und Beseitigung lokaler Vereisungen an einem Flugzeugtragflächendemonstrator

Dr.-Ing. M. Nestler



## Inhalt

- Motivation
- Stand der Technik
- Zielstellung
- Verbundaufbau und Fertigungstechnologie
- Eiserkennung und Enteisung an Demonstratoren
  - Biegeschwinger
  - Tragfläche
- Zusammenfassung und Ausblick

## Motivation

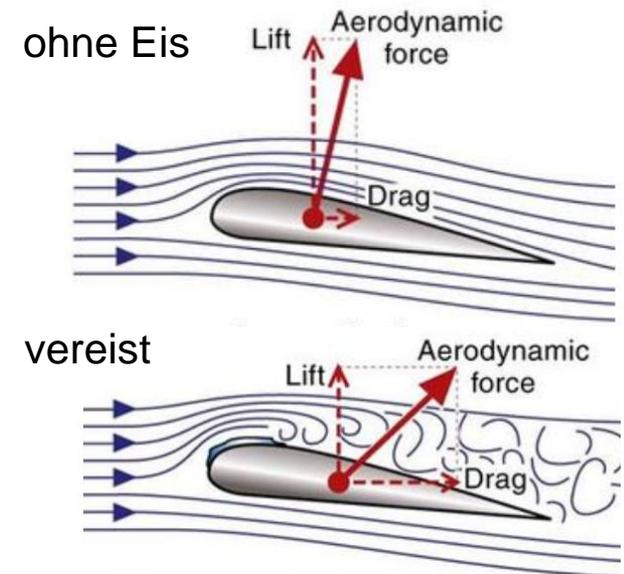
- signifikante Beeinflussung der Aerodynamik durch Vereisung an Flugzeugen bei Schlechtwetterbedingungen
- kritisch sind vor allem Start- und Landevorgänge
  - mehrere Unfälle und Flugzeugabstürze aufgrund einer Vereisung



Vereiste Tragflächen-  
vorderkante [1]



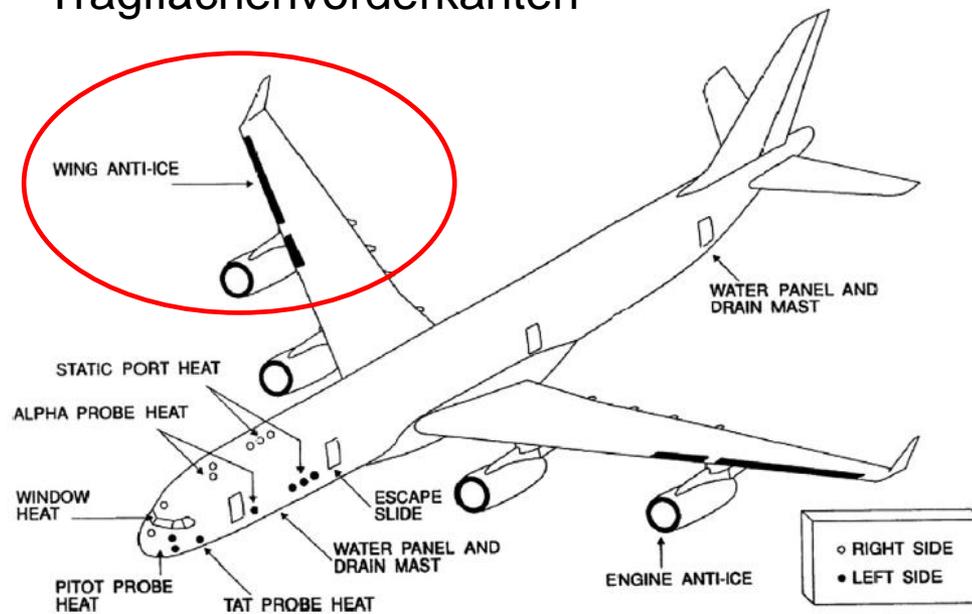
Vereiste Tragfläche [2]



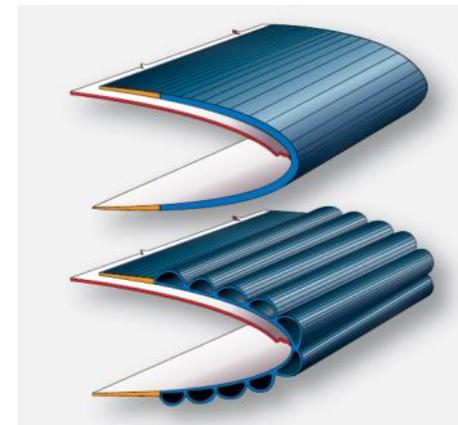
Aerodynamik Tragfläche [3]

## Stand der Technik

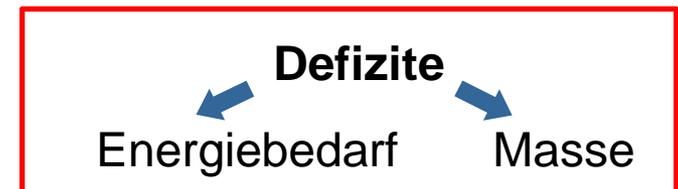
- verschiedenste Systeme zur Eiserkennung und Enteisung im Einsatz
- Vereisungsdetektion: Nutzung von mehreren externen Sensoren
- Enteisung: durch elektrische Heizung, Chemikalien oder aufblasbare Tragflächenvorderkanten



Lösungen gegen Vereisung an Airbus A340-400 [3]



Enteisung durch Absprengen [1]



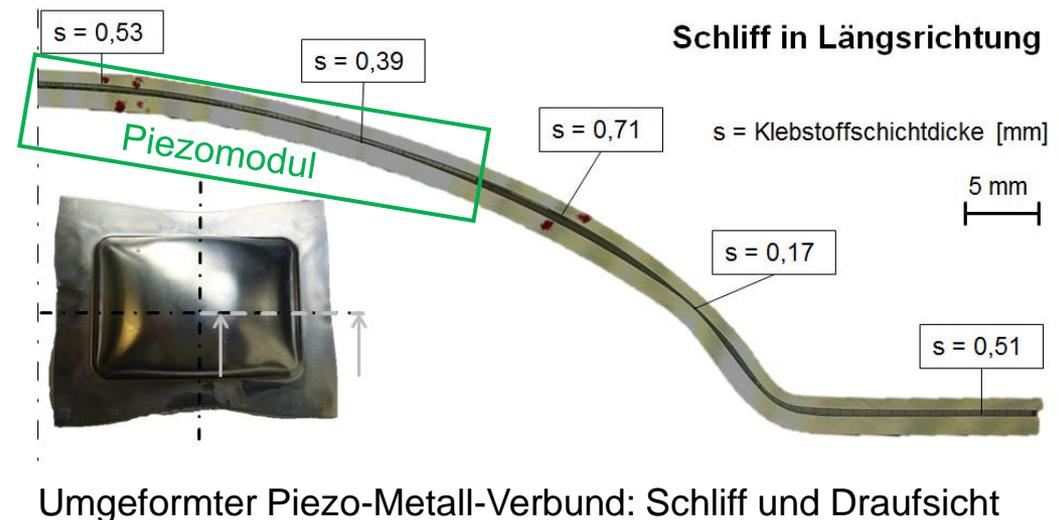
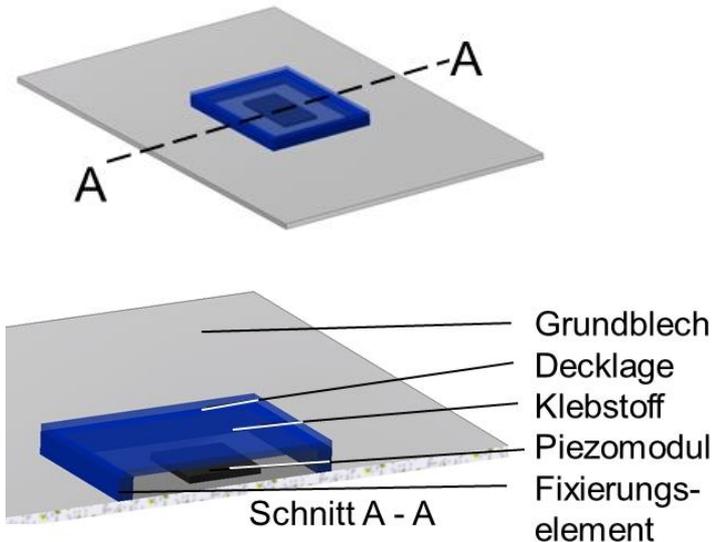
## Zielstellung

- strukturelle Integration von Piezomodulen
- Nutzung der Piezomodule zur Eiserkennung:
  - Impedanzmessung: Ermittlung der Änderung der Eigenfrequenzen durch zusätzliche Massen bei Vereisung
- Nutzung der Piezomodule zur Enteisung:
  - aktorische Anregung von Eigenfrequenzen zum Absprengen von Eis



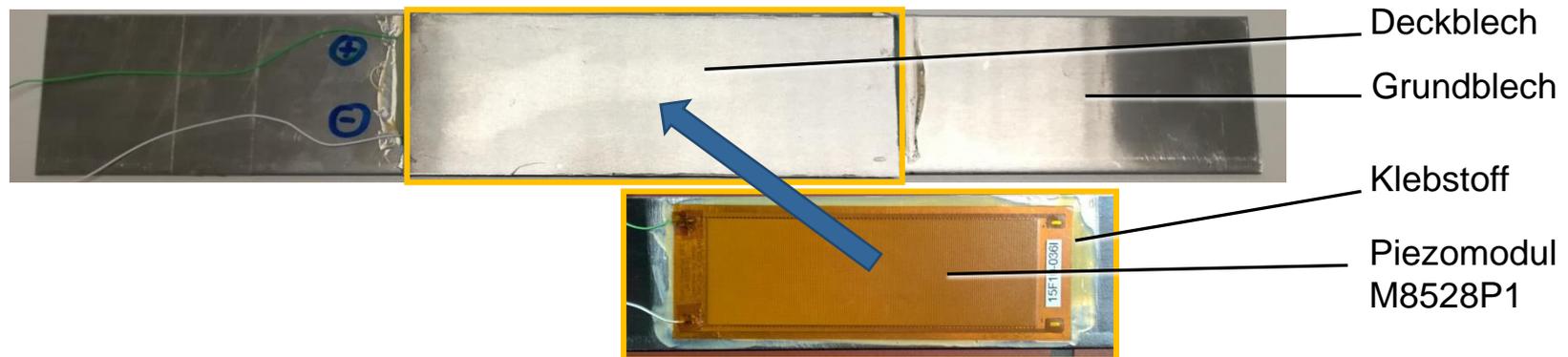
## Verbundaufbau und Fertigungstechnologie

- Entwicklung serienfähiger Fertigungstechnologie abgeschlossen
- Integration von Piezomodulen in Sandwichaufbau durch Kleben
- lokaler/vollflächiger Sandwichaufbau ist möglich
- Besonderheit: Werkstoffverbund ist umformbar



## Demonstratoren zur Eiserkennung und Enteisung: Biegeschwinger

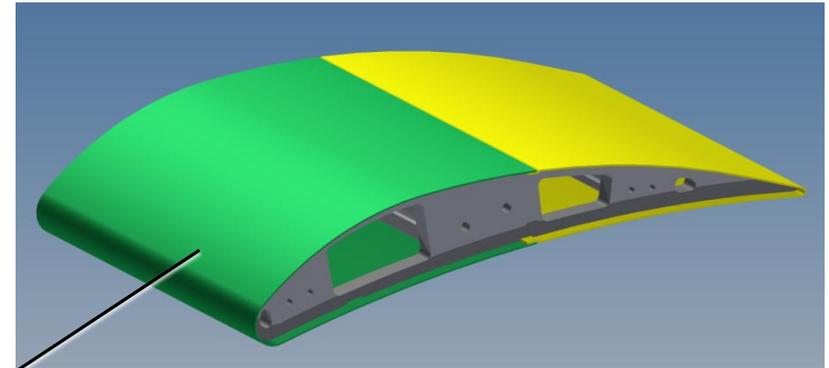
- Aufbau:
  - Grundblech: EN AW 5083, 300 mm x 40 mm x 1,5 mm
  - Decklage: EN AW 5083, 120 mm x 40 mm x 0,5 mm
  - Klebstoff: 2K-Epoxidharz 3M DP 410, Schichtdicke 0,6 mm
  - Piezomodul: MFC M8528 P1



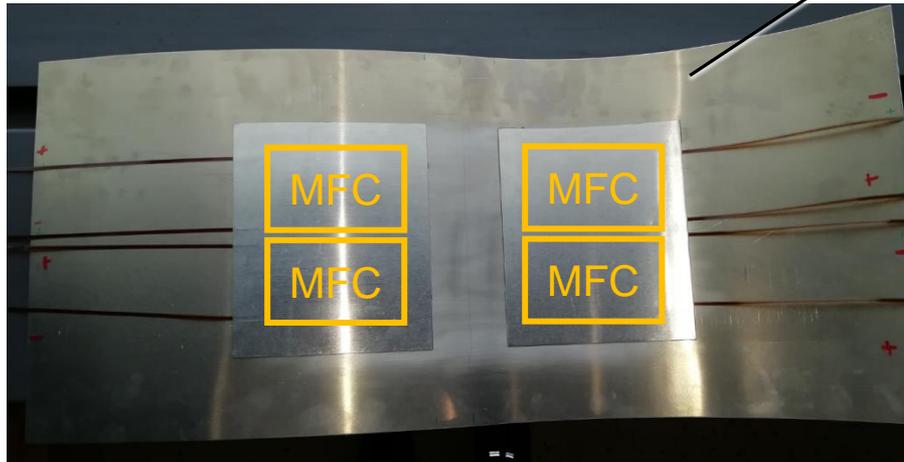
Verbundaufbau Biegeschwinger

## Demonstratoren zur Eiserkennung und Enteisung: Tragfläche

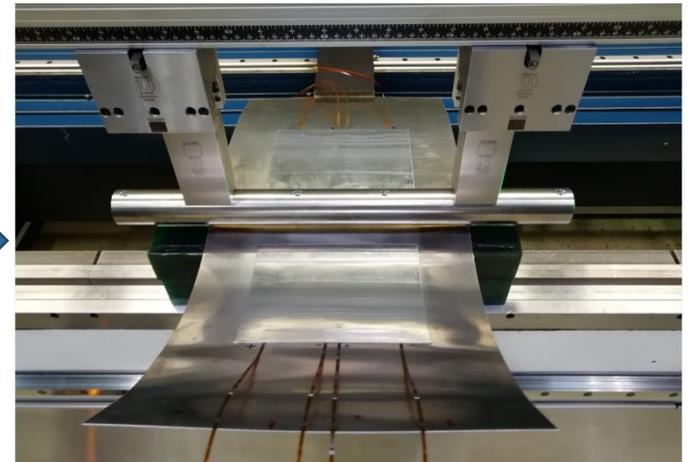
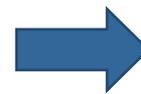
- Aufbau:
  - Abmessung ca. 600 x 300 x 100 mm
  - 4 Piezomodule MFC M8557 P1 vorn
  - Verschraubung von vorderem und hinterem Blech auf Trägerstruktur



Zusammenbau Demonstrator Tragfläche



Halbzeug nach Rollbiegen mit applizierten Deckblechen



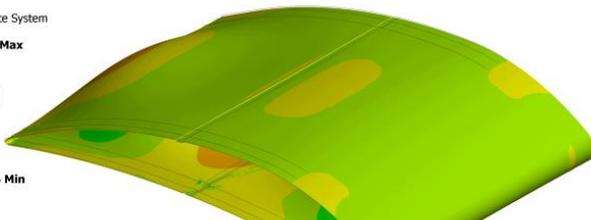
Halbzeug in Biegevorrichtung

# Demonstratoren zur Eiserkennung u. Enteisung: Simulation Tragfläche

- Bestimmung geeigneter Positionen für Piezomodule
  - Modalanalyse der ersten 6 Eigenmoden
  - multiplikative Superposition

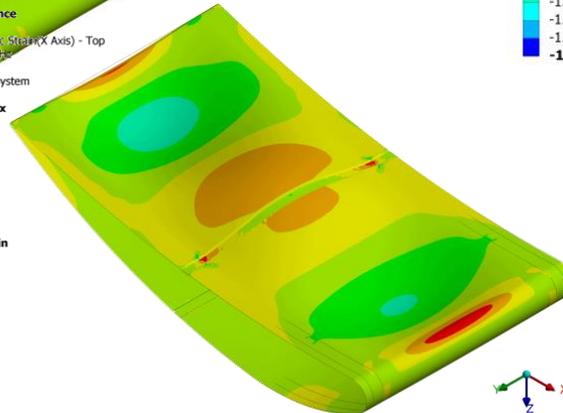
B: Modal: Reference  
Figure EPSX 01 TOP  
Type: Normal Elastic Strain(X Axis) - Top  
Frequency: 298.06 Hz  
Unit: mm/mm  
Global Coordinate System

0.024602 Max  
0.016688  
0.0087738  
0.00085954  
-0.0070547  
-0.014969  
-0.022883  
-0.030798  
-0.038712  
-0.046626 Min



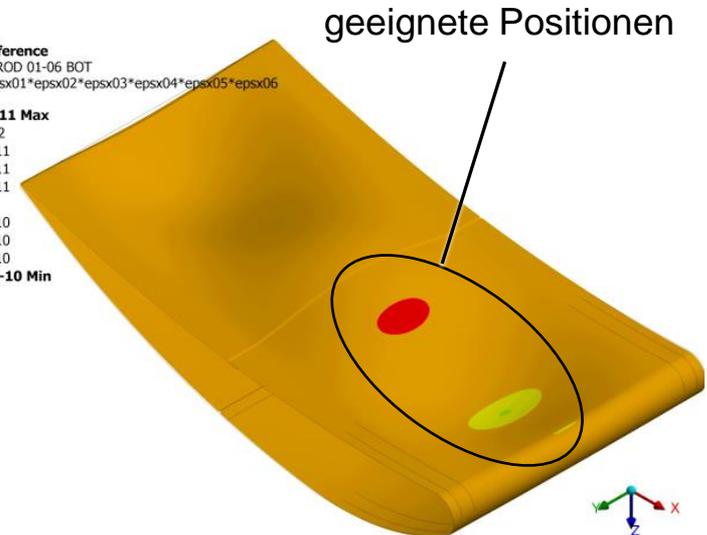
B: Modal: Reference  
Figure 2  
Type: Normal Elastic Strain(X Axis) - Top  
Frequency: 298.06 Hz  
Unit: mm/mm  
Global Coordinate System

0.024602 Max  
0.016688  
0.0087738  
0.00085954  
-0.0070547  
-0.014969  
-0.022883  
-0.030798  
-0.038712  
-0.046626 Min



B: Modal: Reference  
Figure EPSX PROD 01-06 BOT  
Expression: epsx01\*epsx02\*epsx03\*epsx04\*epsx05\*epsx06

3.3118e-11 Max  
7.8943e-12  
-1.7329e-11  
-4.2553e-11  
-6.7776e-11  
-9.3e-11  
-1.1822e-10  
-1.4345e-10  
-1.6867e-10  
-1.9389e-10 Min

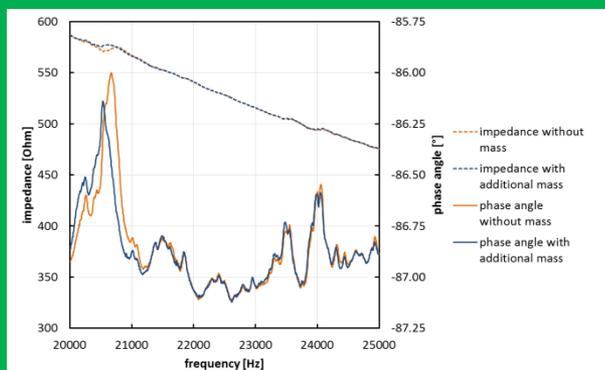


In-plane Dehnungen in x-Richtung für erste Eigenmode

Dehnungen in x-Richtung bei multiplikativer Superposition der ersten 6 Eigenmoden

# Eiserkennung an Demonstratoren

## Frequenzsweep der Impedanz

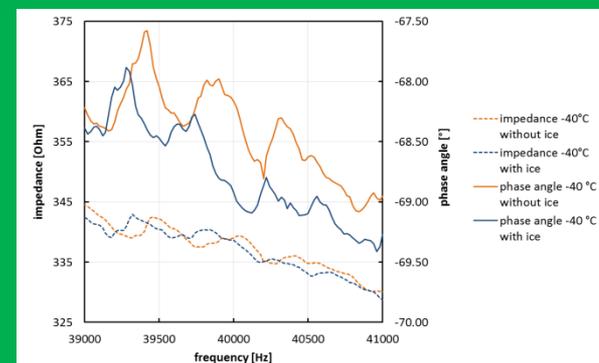


$\Delta m, \Delta T$

Vereisung



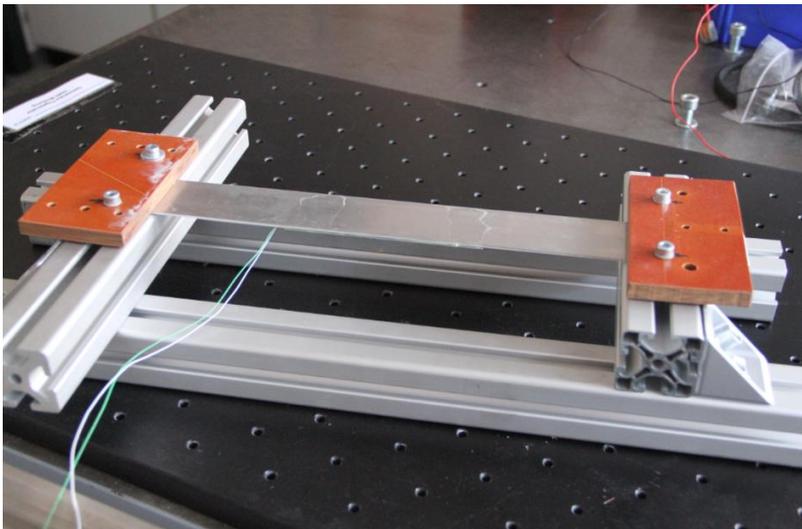
## Erneuter Frequenzsweep der Impedanz



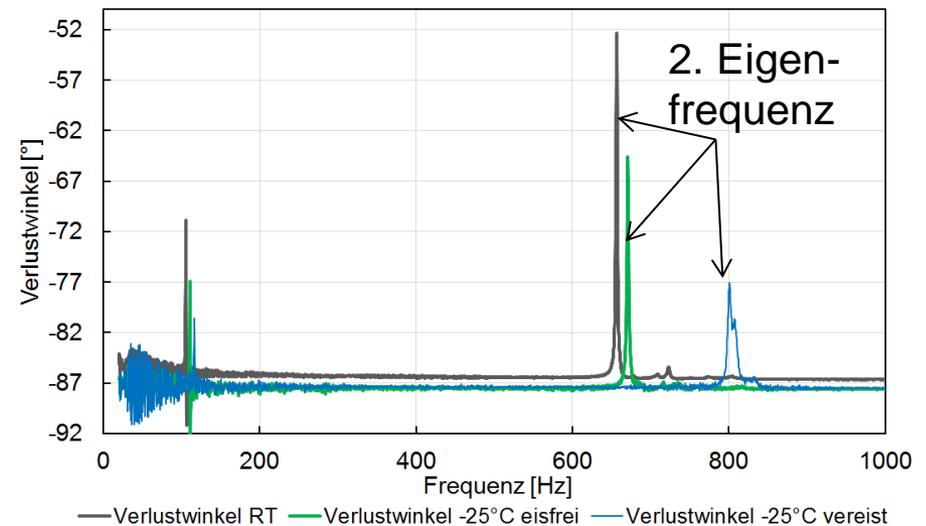
- Vergleich beider Frequenzgänge, Ermittlung von Resonanzstellen, die signifikant durch die Vereisung beeinflusst werden
- Nutzung dieser Frequenzbereiche für Vereisungsdetektion

## Eiserkennung an Demonstrator Biegebalken

- Einspannung der Probe, Messung Impedanz und Verlustwinkel
- deutliche Verschiebung der zweiten Eigenmode in Abhängigkeit von Temperatur und zusätzlicher Masse durch Vereisung



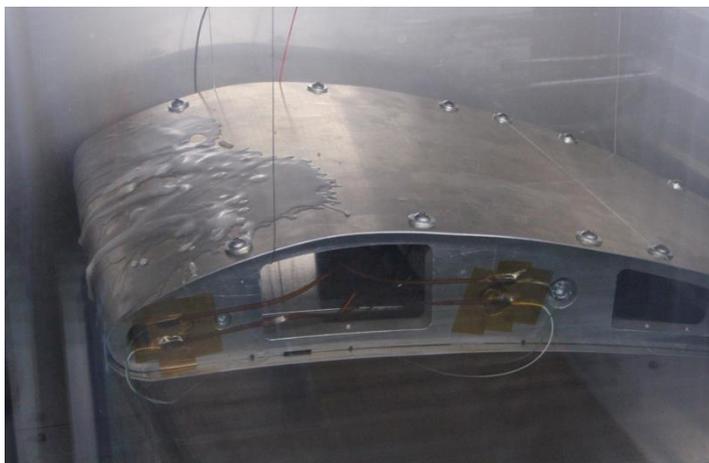
*Biegebalken gespannt in Aluminiumrahmen*



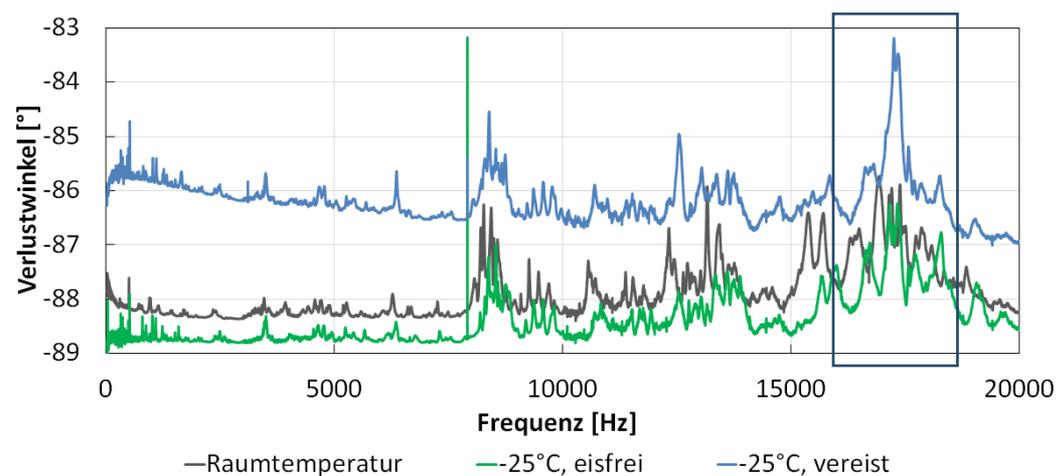
*Frequenzgang des Verlustwinkels im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 1 kHz für verschiedene Temperaturen und Vereisungszustände*

## Eiserkennung an Demonstrator Tragfläche

- Parallelschaltung der vier MFC
- indifferenter Frequenzgang bei allen Temperaturen und Vereisungszuständen
- nur geringfügige Änderung der Resonanzfrequenzen und der Amplituden bei Vereisung



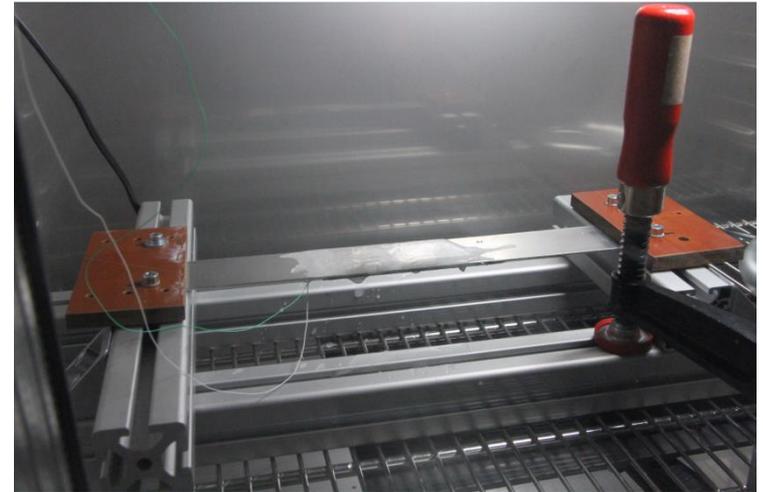
*Demonstrator Tragfläche mit Eisablagerung in Kältekammer*



*Frequenzgang des Verlustwinkels im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz für verschiedene Temperaturen und Vereisungszustände*

## Enteisung an Demonstrator Biegebalken

- Ansteuerung der ersten beiden Resonanzfrequenzen (96 Hz / 640 Hz)
- Ermittlung der maximalen Auslenkungen (1 mm / 0,2 mm)
- MFC-Ansteuerung mit erster/zweiter Eigenfrequenz → teilweise Enteisung
- Ansteuerung mit Frequenzsweep (95 Hz - 120 Hz) → vollständige Enteisung



*Biegebalken gespannt in Aluminiumrahmen*



vereist



Eisablösung



enteist

*Enteisung an Biegebalken*

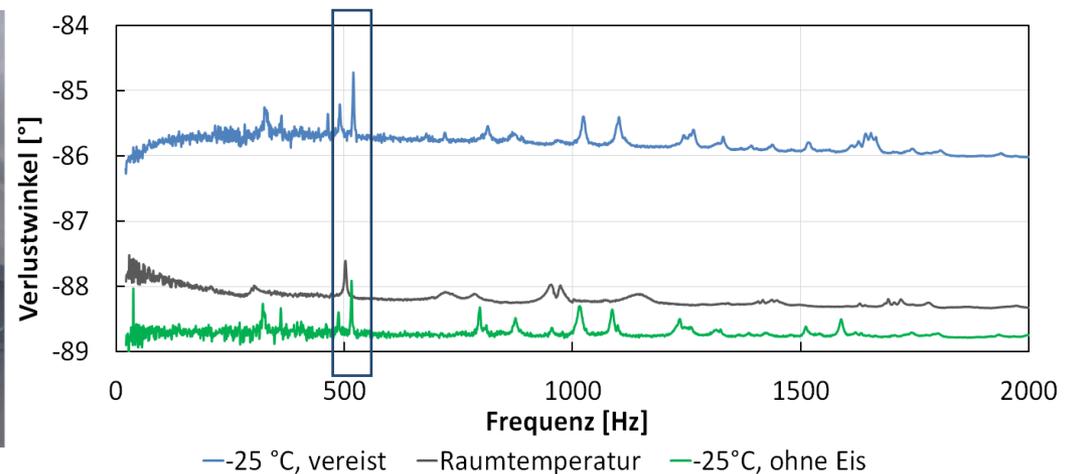
## Enteisung an Demonstrator Biegebalken



*Enteisung an Biegebalken*

## Enteisung an Demonstrator Tragfläche

- Ansteuerung mit Frequenzsweep im Bereich der ersten Eigenfrequenz
- Daten: Sinussignal, -200 V...800 V, 510 Hz - 530 Hz
- akustische Schallabstrahlung wahrnehmbar  
→ keine Abspaltung des Eises



Demonstrator Tragfläche in Kältekammer

Frequenzgang des Verlustwinkels zwischen 20 Hz und 20 kHz für verschiedene Temp. und Vereisungszustände

## Zusammenfassung und Ausblick

- Fertigung von Demonstratoren im Sandwichaufbau mit integrierten Piezomodulen
- Messung von Impedanz und Verlustwinkel ist prinzipiell zur Erkennung einer Vereisung geeignet
- für Enteisung ist deutliche mechanische Auslenkung der Struktur erforderlich
  - Biegeschwinger: Enteisung erfolgreich
  - Flügel: zu hohe Steifigkeit, keine sichtbare Auslenkung, keine Absprengung von Eis möglich
- Potenzial für großflächige Tragflächenstrukturen ist durch geringere Steifigkeit im Vergleich zum Demonstrator gegeben → Folgeuntersuchungen erforderlich

## Literatur

- [1] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration: Aviation Maintenance Technician Handbook Airframe, Vol. 2, Chapter 15, 2012
- [2] Wang, Zhenjun: Recent progress on ultrasonic de-icing technique used for wind power generation, high-voltage transmission line and aircraft. In: Energy and Buildings 140, S. 42–49
- [3] <https://www.pilotwings.org/airfoil-contamination.html>