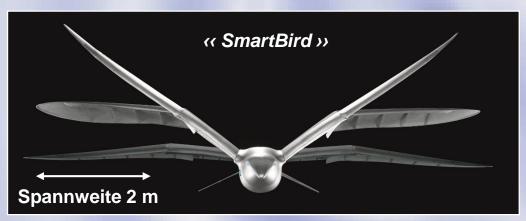
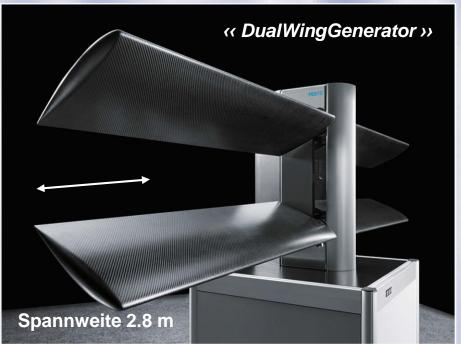
## **SmartBird und DualWingGenerator**

- Die beiden Seiten schwingender Tragflächen -

Dr. rer. nat. Wolfgang Send ANIPROP GbR, Göttingen

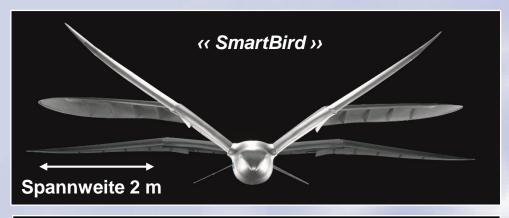
STAB-Workshop 2015
10. – 11. November 2015, Göttingen
Plenarvortrag

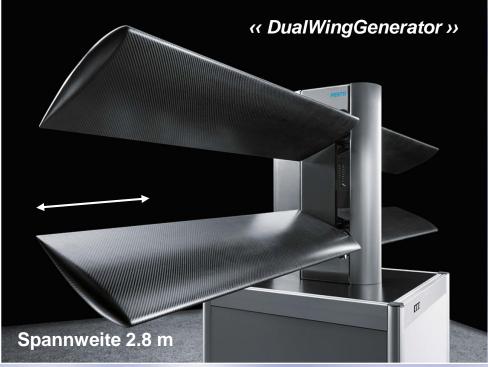




Quelle: Festo AG – Hannovermesse 2011 (SmartBird), Hannovermesse 2014 (DWG)







#### **SmartBird und DualWingGenerator**

- Die beiden Seiten schwingender Tragflächen -

- SmartBird und DualWingGenerator
   Zur Einführung einige Eindrücke
- Physik schwingender Tragflächen
  - Entweder Schubkraft oder Leistungsentnahme
  - Jeweiliger aerodynamischer Wirkungsgrad
  - Mittlere Leistungsbeiwerte
- The Making of ...
  - Labormaschine HFG tl Experimente
  - Entwicklung *DualWingGenerator*
- SmartBird und die aktive Torsion
  - Kinematik von SmartBird
  - Entwicklung von SmartBird: MG, MGX, MGX2
  - Schub aus Querkraft auch aus Nasenschub?
- Perspektiven und Ziele
  - Biegetorsionsantrieb
  - Leonardo 2.0 mit BigBird als Zwischenschritt
  - Testzentrum Neues Fliegen

Quelle: Festo AG – Hannovermesse 2011 (SmartBird), Hannovermesse 2014 (DWG)









SmartBird auf der «Hannovermesse» 2011

Flugschau - Freitag, 8. April 2011, 2 pm - HD 1:12 min

Quelle: W. Send – Archive\Casio\_FH25\CIMG0462.AVI



## **DualWingGenerator – Hannovermesse\* 2014**



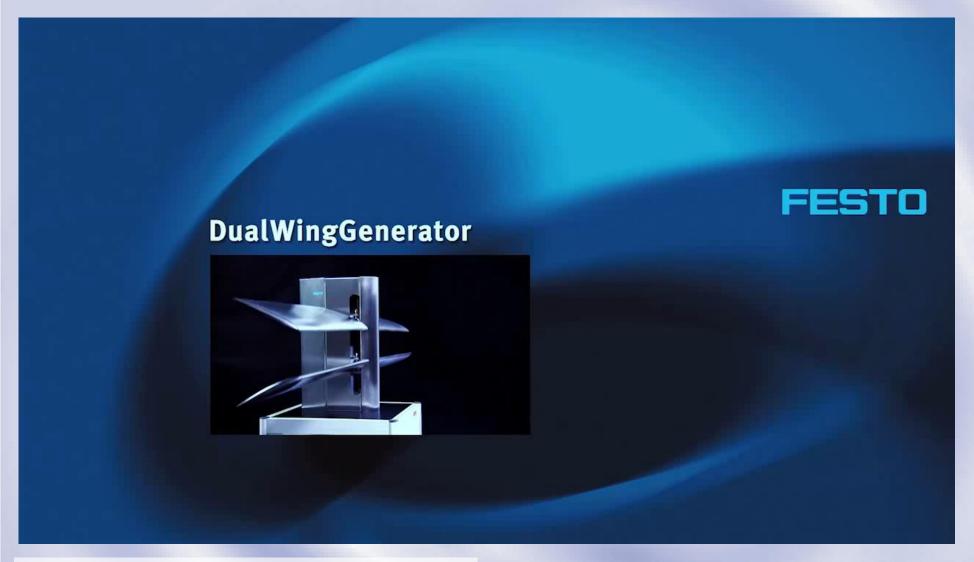


## Der DualWingGenerator entnimmt einem Luftstrom Leistung.

Wind erzeugt mit zwei Gebläsen (links) – Test für den Messeaufbau (rechts)

\* Hannovermesse: Jährliche internationale Industriemesse, Hannover, Deutschland

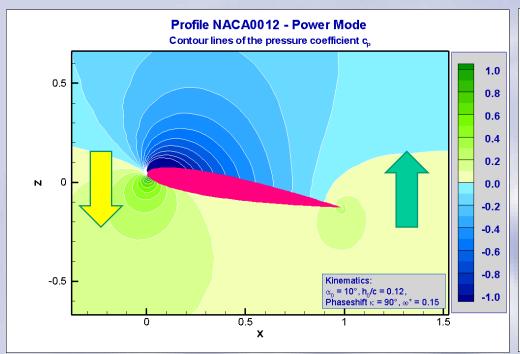


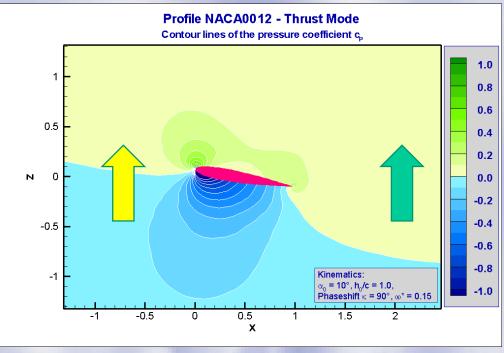


Trailer "Eindrücke und Inspiration"

Quelle: FESTO AG - HD 2:47 min









Richtung der Systemkraft – Gegenkraft zur Fluidkraft



Anfängliche Richtung der Bewegung (t = 0, Phase 0°)

Phasenvoreilung Schlagen vor Drehen:  $\kappa = 90^{\circ}$ 

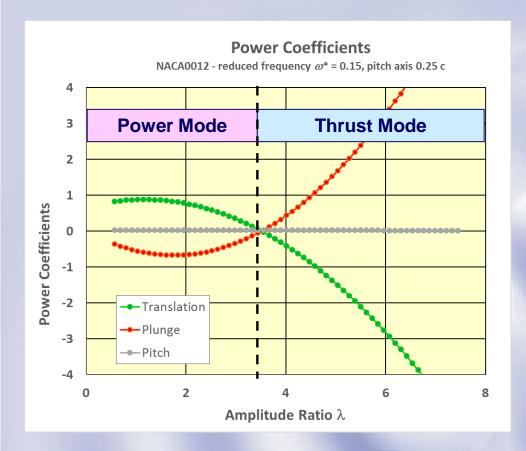
Leistungsentnahme (Power Mode) und Schuberzeugung (Thrust Mode):

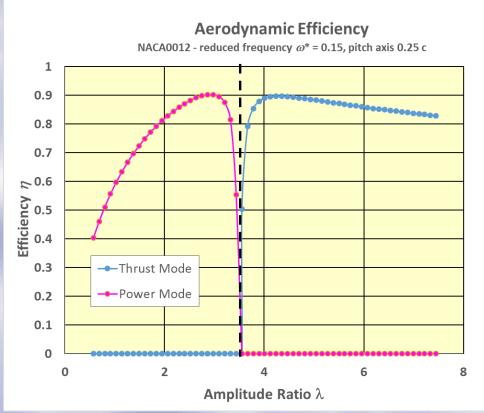
Die beiden Seiten der gleichen Münze

Unterschied in den beiden Moden:

Amplitudenverhältnis der beiden Freiheitsgrade Schlagen und Drehen.







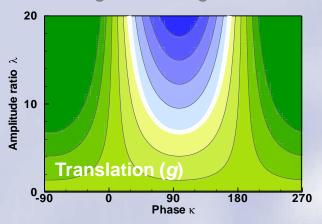
### Amplitudenverhältnis $\lambda$ als entscheidender Parameter

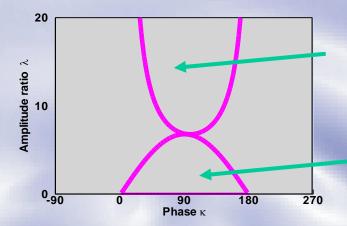
Leistungsentnahme (Power Mode): kleines  $\lambda$  - d.h. große Drehung, kleiner Schlag Schuberzeugung (Thrust Mode): großes  $\lambda$  - d.h. kleine Drehung, großer Schlag

$$\lambda = \frac{h_0}{\alpha_0 \cdot c/2}$$

 $h_0$  Schlagamplitude  $\alpha_0$  Drehamplitude







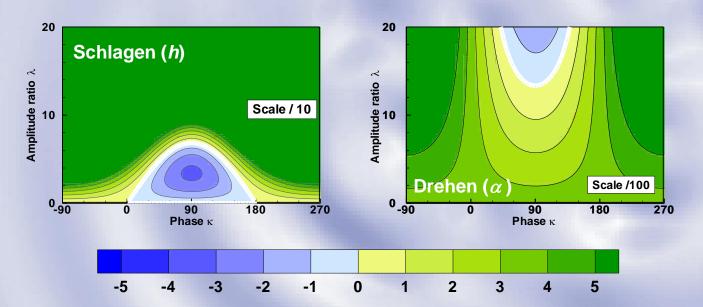
Leistung wird entnommen am Freiheitsgrad Translation.

Schub wird erzeugt

Leistung wird entnommen am Freiheitsgrad Schlagen.

- Flugzeugflattern\*
- Hubflügelgenerator

\* erst für  $\omega^* \leq 0.10$  und  $\xi_P > 0.25$ 



Horizontale Achse: Phase  $\kappa$  (um 90°) (Schlagen vor Drehen)

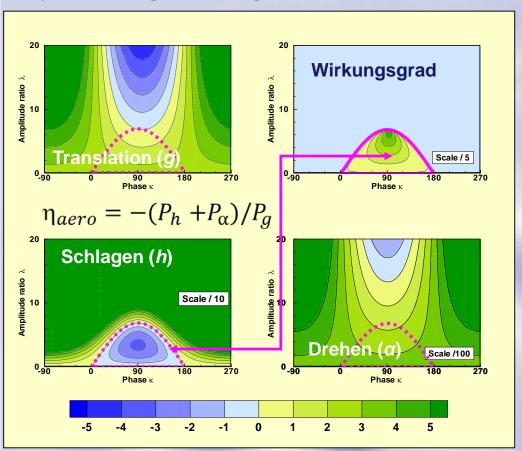
Vertikale Achse: Amplitudenverhältnis λ Schlagen zu Drehen)

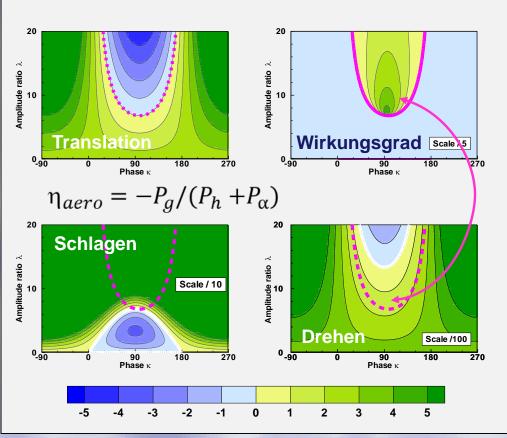
Blau: Leistung entnommen Grün: Leistung eingespeist

Mittlere Leistungsbeiwerte  $< c_{\prod,x} >$ mit  $x = \{g,h,\alpha\}$ 

Theorie der schwingenden Platte von 1935/36 -  $\omega^*$  = 0.15,  $\xi_P$  = 0.25







#### Leistungsentnahme (Power Mode):

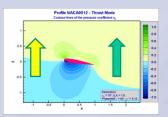
- Leistung am Freiheitsgrad Schlagen entnommen
- Leistung > 0 bei der Drehung stets erforderlich
- Größte Leistungsentnahme nicht am Arbeitspunkt mit höchstem Wirkungsgrad

#### **Schuberzeugung (Thrust Mode):**

- Leistung am Freiheitsgrad Schlagen aufgebracht
- Hoher Wirkungsgrad nur für Leistungseintrag auch beim Freiheitsgrad Drehen (aktive Torsion)

Aerodynamischer Wirkungsgrad  $\eta_{\text{aero}}$  Definition: Entnommene Leistung zu aufgebrachter Leistung



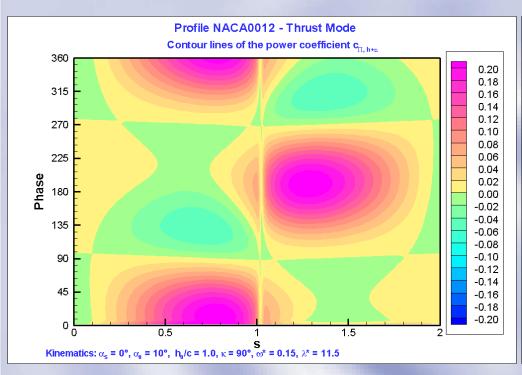


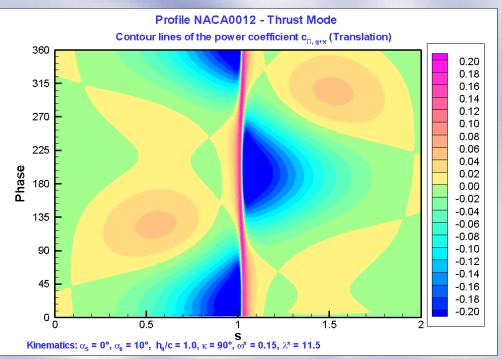
Start t = 0 s Phase =  $0^{\circ}$ 

$$\eta_{aero} = -P_{g+x}/(P_h + P_\alpha)$$

## Schuberzeugung (Thrust Mode)

CFD Rechnung mit Eulercode





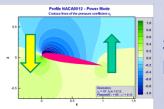
Leistungsbeiwert: Schlagen + Drehen

**Leistungsbeiwert: Translation** 

## Verteilung der Leistung über dem Umfang und über der Zeit

Tragfläche von Hinterkante unten (s = 0), Vorderkante (s = 1) bis Hinterkante oben (s = 2)



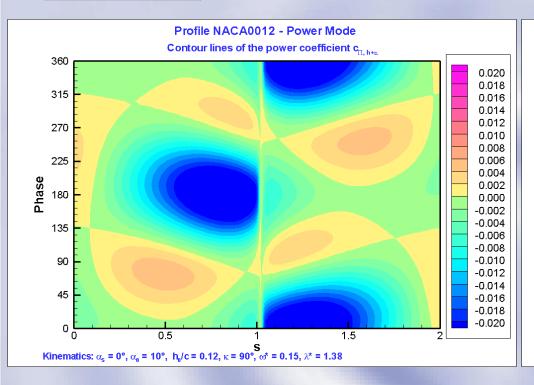


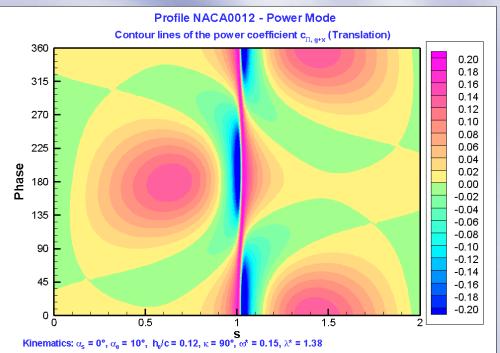
Start t = 0 s Phase =  $0^{\circ}$ 

$$\eta_{aero} = -(P_h + P_\alpha)/P_{g+x}$$

## Leistungsentnahme (Power Mode)

CFD Rechnung mit Eulercode





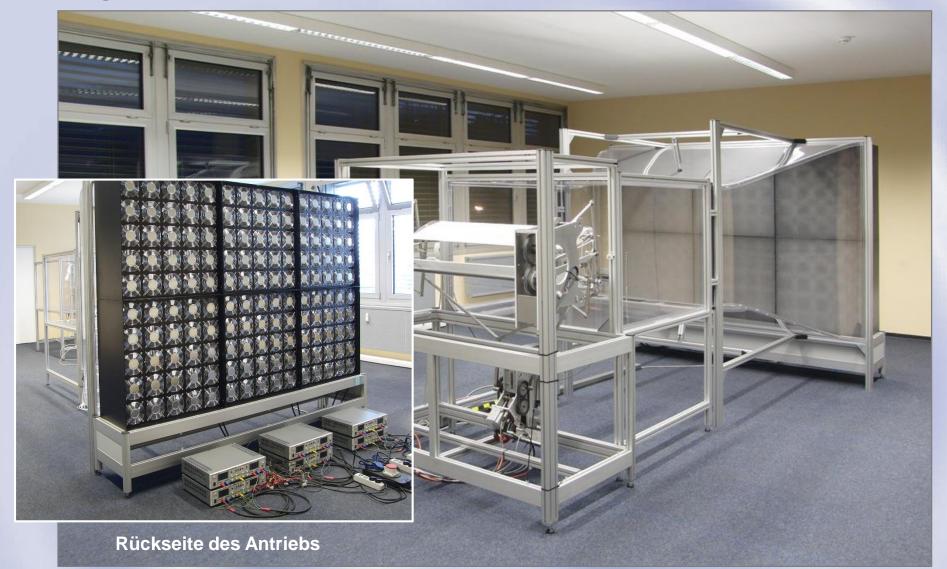
Leistungsbeiwert: Schlagen + Drehen

**Leistungsbeiwert: Translation** 

## Verteilung der Leistung über dem Umfang und über der Zeit

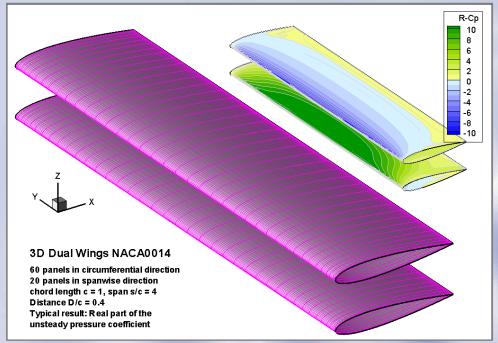
Tragfläche von Hinterkante unten (s = 0), Vorderkante (s = 1) bis Hinterkante oben (s = 2)

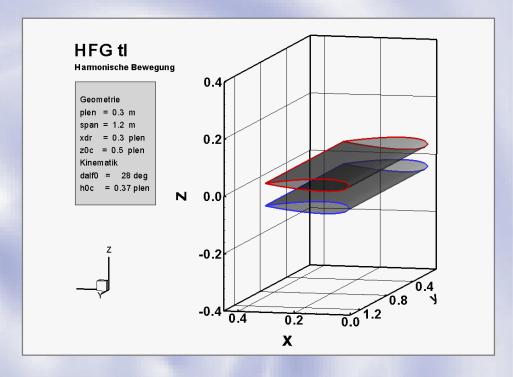


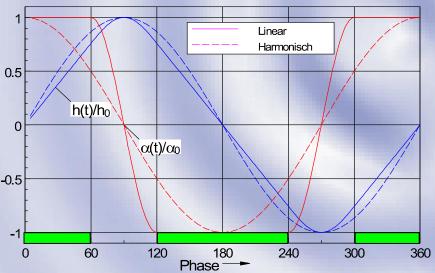


## Labormaschine HFG tl im Strömungslabor in Göttingen

mit Windkanal und Steuerstand (Projektzeit 2011 – 2014) – Bau HFG tl: F. Scharstein





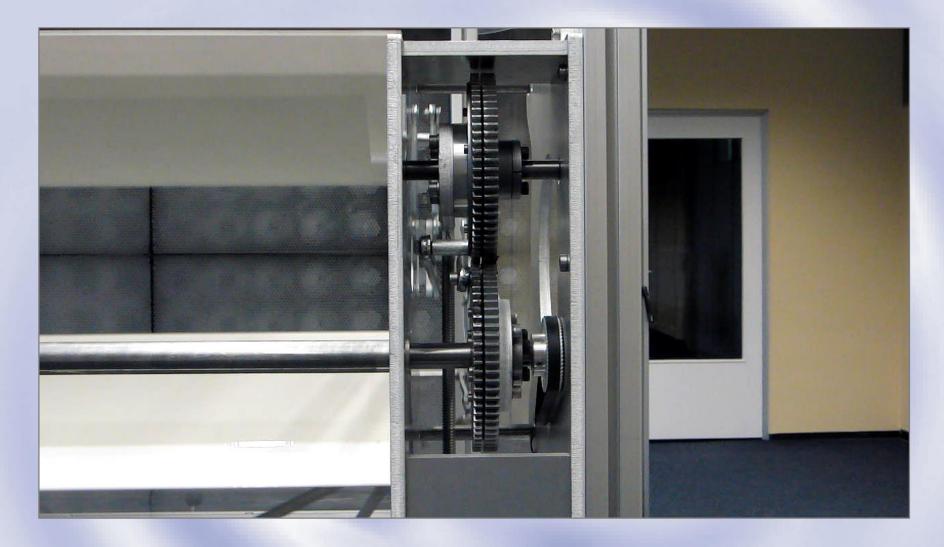


Die tatsächliche Kinematik ist eine "partiell linear" genannte. Der Anstellwinkel bleibt lange konstant und ändert nur im oberen und unteren Umkehrpunkt sein Vorzeichen.

## Rechnungen für Leistungsbeiwerte

3D Panelverfahren höherer Ordnung- Theorie kleiner Amplituden, Bezug auf  $\alpha_0$ 

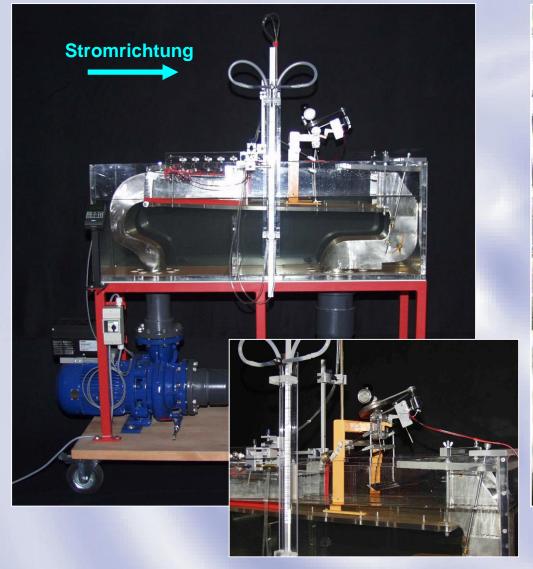




## Labormaschine HFG tl im Strömungslabor in Göttingen

Tragflächen mit Getriebefach rechts - Blick gegen die Anströmung







Film: ANIPROP HFG3 in Betrieb – Entwurf und Bau F. Scharstein

Labor Modell ANIPROP HFG1 (2001) - HFG 3 in Augsburg (2004)

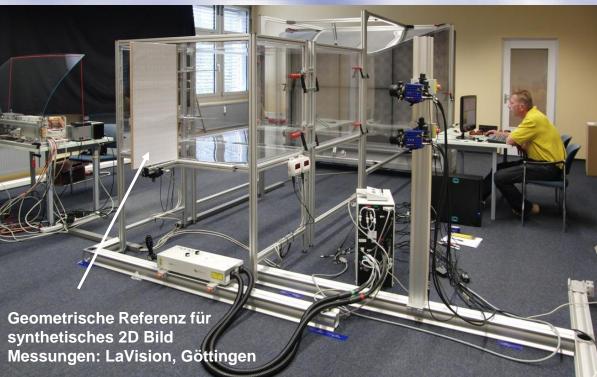






Die gleichzeitigen Bilder zweier Kameras werden zu einem Bild zusammengesetzt. Aus realen 3D Aufnahmen mit Perspektive wird synthetisch ein 2D Flügelschnitt.

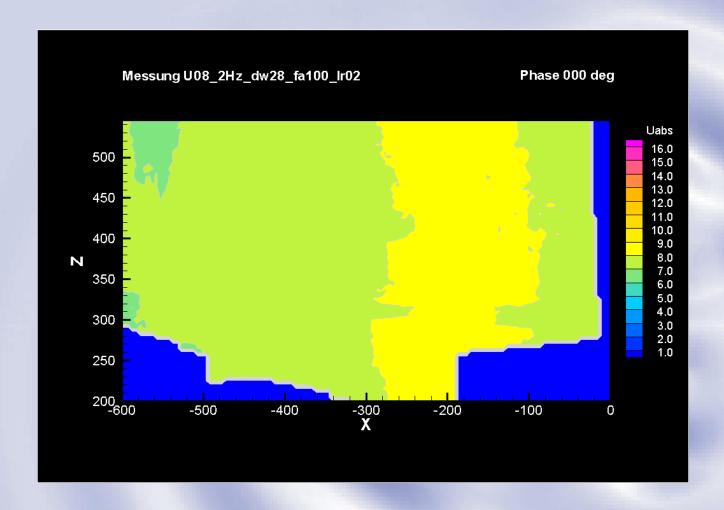




## Messungen Particle Image Velocimetry (PIV)

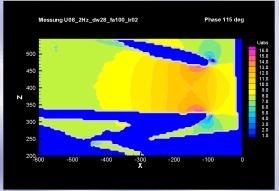
Messungen Juni 2013 – Zentrale Einsichten in Strömungsverhalten

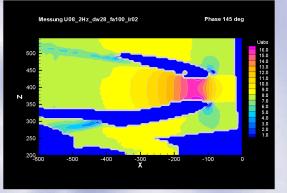


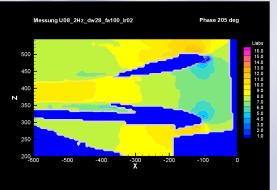


## **Messungen Particle Image Velocimetry (PIV)**

Hohe Übergeschwindigkeiten zwischen den Tragflächen, U = 8 m/s







Betrag U (Uabs) in m/s







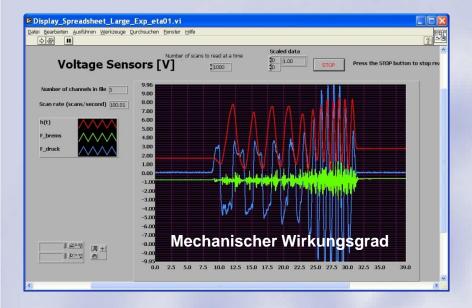


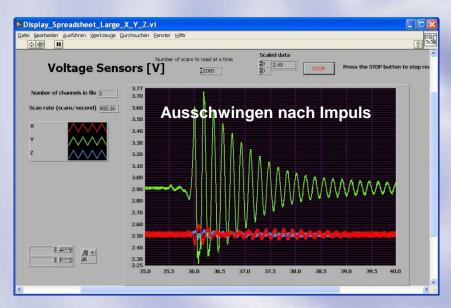
## Weiterentwicklung zum DualWingGenerator (HFG tl 2.0)

Messungen mechanischer Wirkungsgrad, dynamisches Verhalten Komplizierte Mechanik durch Linearführung und Drehmotoren vereinfacht



#### The Making of ... (Hubflügelgenerator)





Vertikale Hubbewegung

Druckkraft auf Handknauf

Kraftmesser Bremsdynamometer



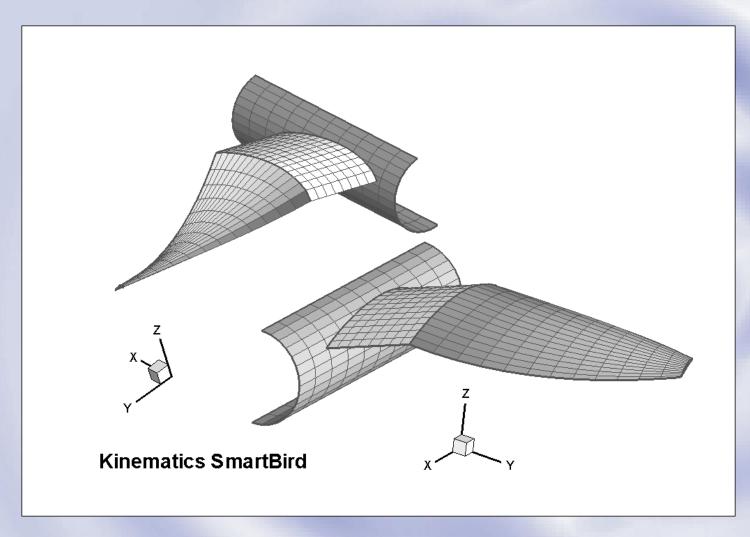
## Messungen

- mechanischer Wirkungsgrad (oberes Bild)
- dynamisches Verhalten (unteres Bild)

Vertikalbewegung Seitliche Schwenkbewegung



## Kinematik SmartBird mit Arm- und Handschwinge



#### **Parameter**

**Geschwindigkeit Schlagfrequenz** 

Rumpfbewegung aus Momentengleichgewicht

- Amplitude
- Referenzphase

#### **Armschwinge**

- Amplitude Schlag
- Phasenlage Schlag

#### Handschwinge

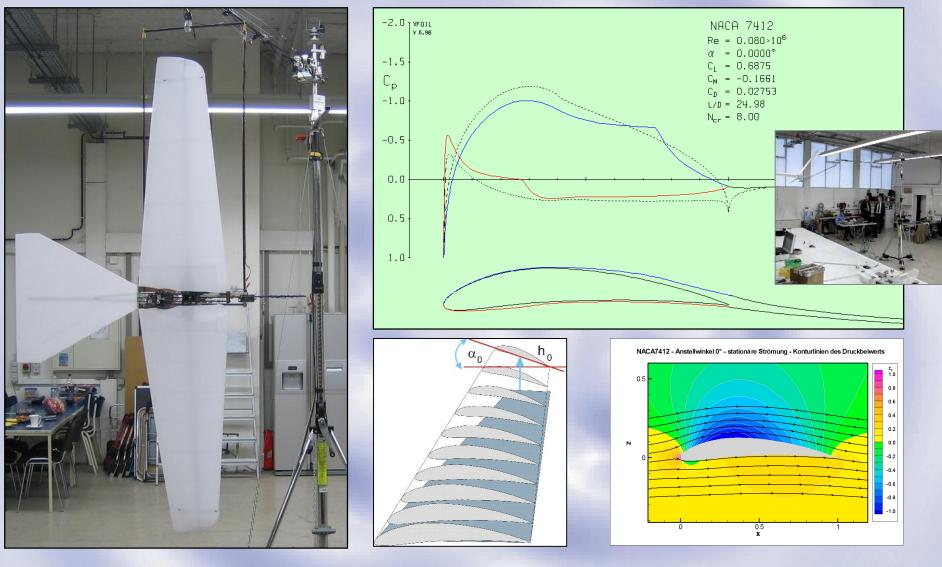
- Amplitude Schlag
- Phasenlage Schlag
- Amplitude Torsion
- Phasenlage Torsion
- Linearbereich PLK\*
- Formfunktion PLK

\*) PLK

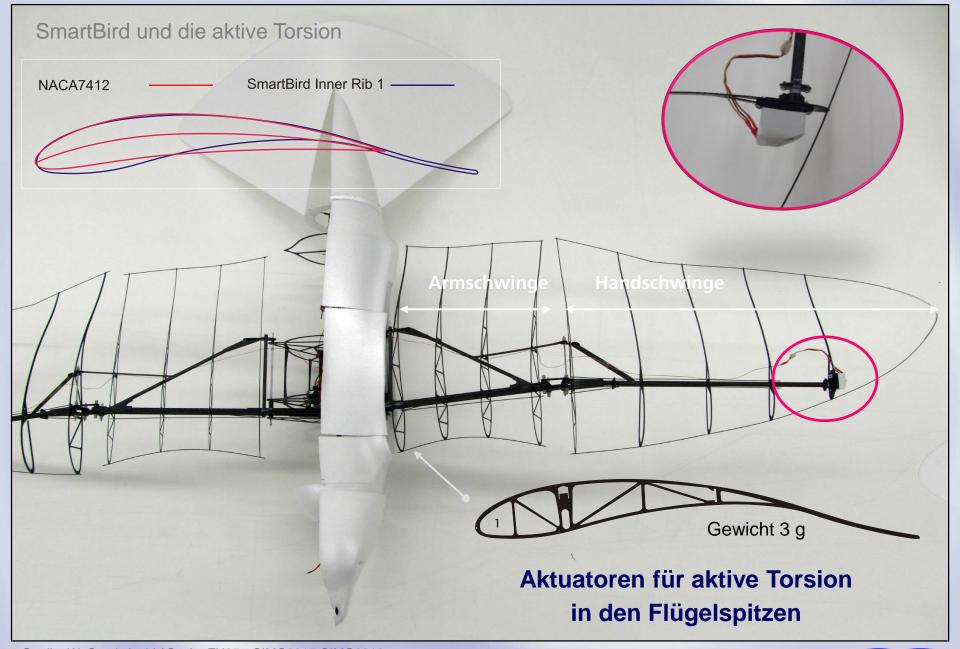
Partiell lineare Kinematik

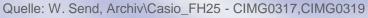


#### SmartBird und die aktive Torsion



Erste Konfiguration des Biegetorsionsantriebs (Modell MG) April 2010 Profil NACA7412, Spannweite 1.6 m, aktive Torsion über Hohlwelle



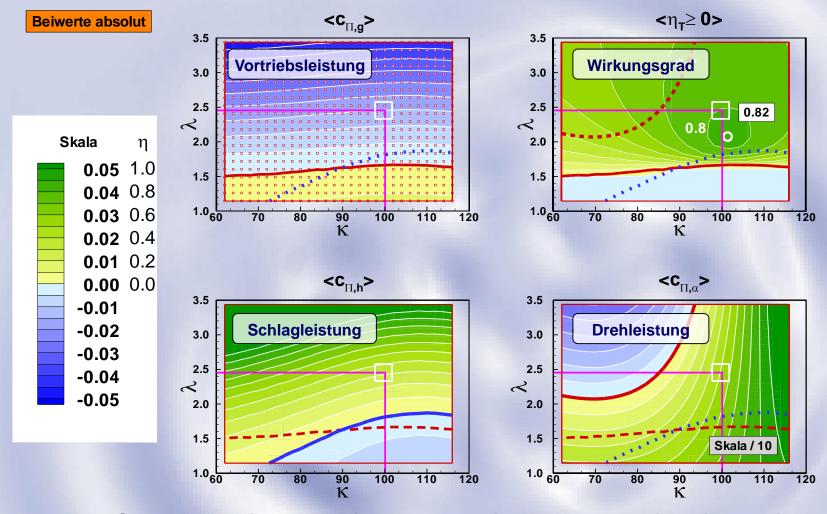






Film: Aktive Torsion und partiell lineare Kinematik Modell MGX2 mit Arm- und Handschwingen – Erste Tests





NACA7412 - Leistungsbeiwerte und Wirkungsgrad - Lin. Kinematik

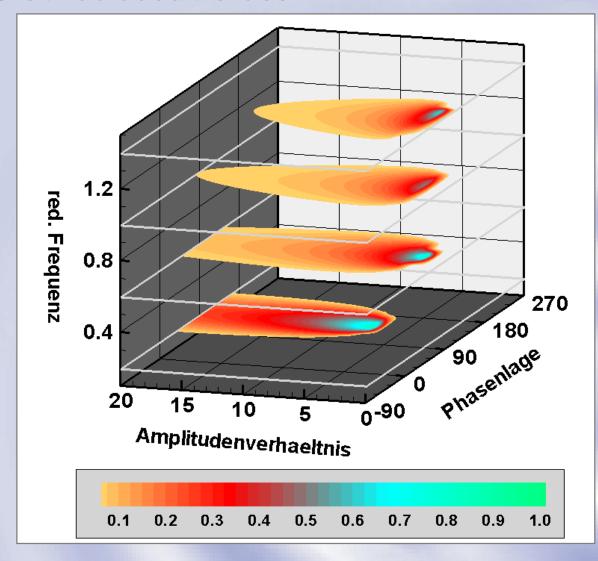
Gekoppeltes Schlagen und Drehen;  $\omega_c^* = 0.90$ ,  $\xi_p = 0.4$ , Beiwerte ohne Bezug

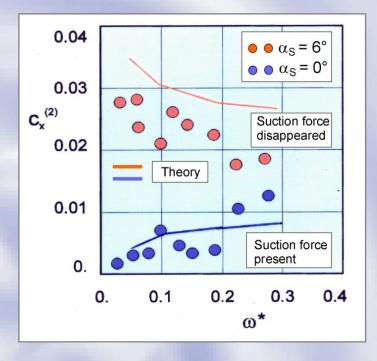
## Breites Plateau mit hohem Wirkungsgrad bei CFD-Rechnungen

Hier: Euler-Rechnung – Plateau im Flugversuch nicht bestätigt



#### SmartBird und die aktive Torsion



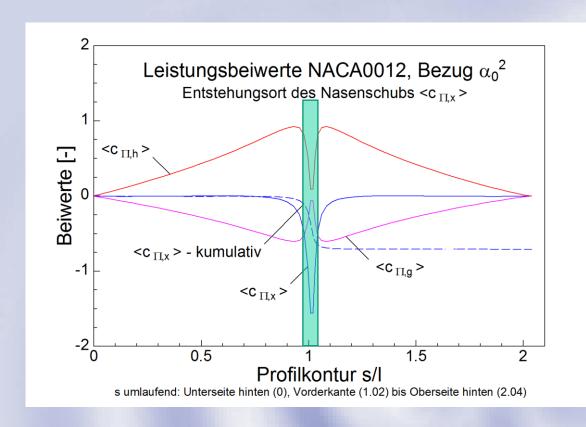


#### **Aufschlussreicher Hinweis in:**

Windsor R. I., Measurement of Aerodynamic Forces on an Oscillating Airfoil. *US Army Aviation Materiel Laboratories Fort Eustis VA*, USAAVLABS Technical Report 69-98, 1970.

## Hoher Wirkungsgrad ohne Nasenschub eng begrenzt





#### Entstehung der Schubkraft des Biegetorsionsantriebs aus zwei Anteilen:

- Als Nasenschub schon bei reiner Schlagschwingung  $\langle c_{\Pi,x} \rangle$
- Aus der Drehung der Querkraft bei gekoppelter Schlag- und Drehschwingung  $\langle c_{\Pi,g} \rangle$

#### **Nasenschub**

Dieser bildet sich aus in einem extrem schmalen Bereich an der Vorderkante.

 Nach Windsor bricht er schon bei Anstellwinkeln von 6° zusammen.

## Zur Ursache des Zusammenbruchs des Nasenschubs der Schlagschwingung bei größeren Amplituden



Für die weitere Entwicklung des Biegetorsionsantriebs ist die experimentelle Aufklärung dieses Effektes dringend erforderlich.



## Perspektiven des Biegetorsionsantriebs Technisch zu nutzen? - Eine faszinierende Perspektive



Die Integration der beiden Funktionen

- "Tragen des Gewichts" und
- "Überwinden des Strömungswiderstands"

in den Tragflächen ohne weitere Triebwerke ist nur mit dem

Biegetorsionsantrieb möglich.



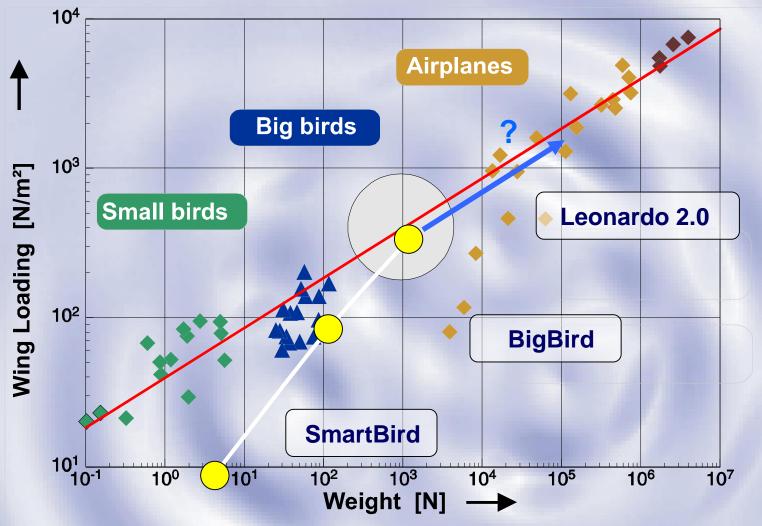
Die hohe Effizienz des Fliegens in der Natur beruht – so meine Deutung – auf einem strömungsmechanischen Prinzip, das von mir als **aktive Torsion** bezeichnet wird.



Die Bedeutung der aktiven Torsion ist in den bisherigen konstruktiven Ansätzen beim Bau der wenigen Kleinflugzeuge mit Antrieb durch schwingende Tragflächen übersehen worden.

- Die Biegung (Schlagen) dient als aerodynamischer Treibstoff.
- Erst durch aktive Torsion (Drehen) entsteht hoher Wirkungsgrad.

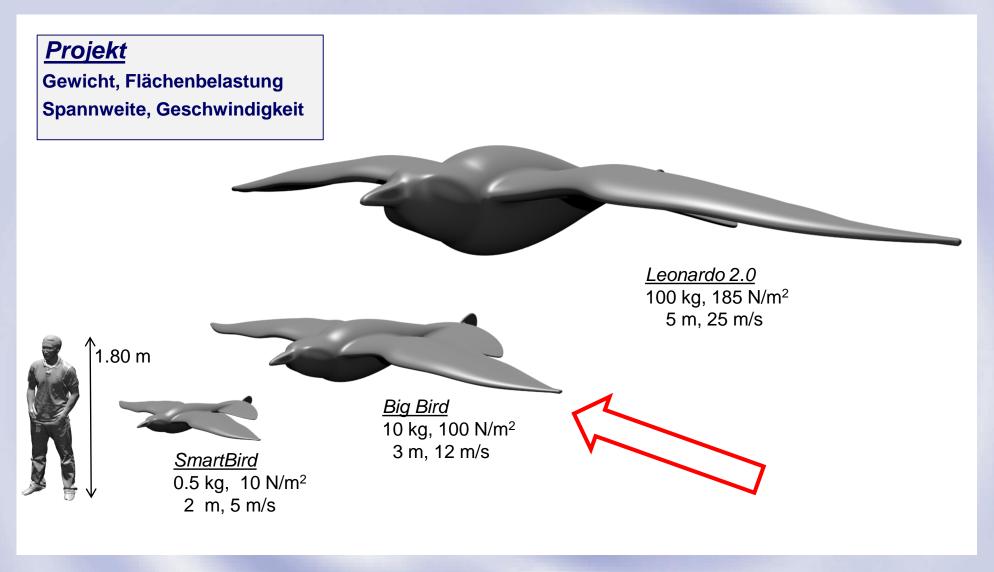




Persönliche Vision 2020: "Leonardo 2.0"

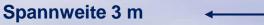
Schwingenflug → Biegetorsionsantrieb → Weg zur technischen Nutzung





Quelle: Marco Denuder, *Auslegung und Skalierung eines Getriebes für gekoppelte Schlag- und Drehschwingung* Präsentation seiner Masterarbeit an der ETH Zürich am 14. Mai 2014







## **BigBird Kinematik – Resultierende Schlagbewegung**

Quelle: Marco Denuder, Auslegung und Skalierung eines Getriebes für gekoppelte Schlag- und Drehschwingung Präsentation seiner Masterarbeit an der ETH Zürich am 14. Mai 2014 – Antrieb nach R. Mugrauer.

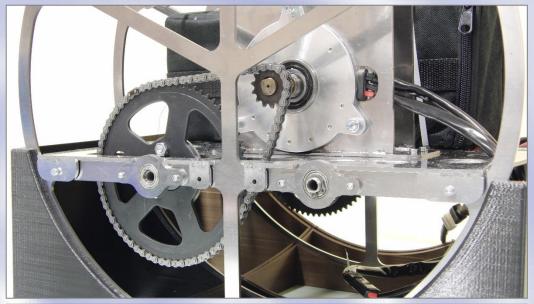


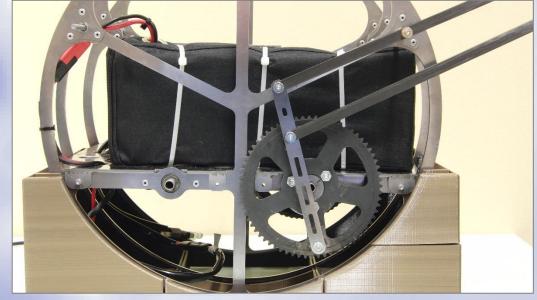
#### Perspektiven und Ziele



## Antrieb BigBird - Funktionsmodell -

- Antriebsleistung 400 W
- Spannweite 3 m
- Derzeit ein Flügelholm eingebaut
- Belastungstests mit dynamischer FE-Analyse





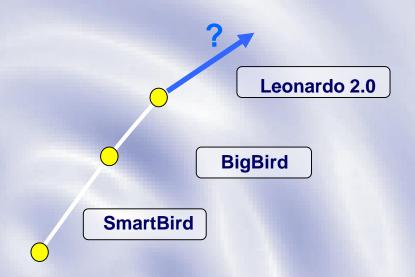


## Wie könnte es weitergehen?

### **Aktuelle Option:**

"Netzwerk Neues Fliegen"

am Luftfahrtstandort Hamburg





FuE-Projekt im Rahmen des ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand)

(Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie) Antragsteller: IWS Innovations- und Wissensstrategien GmbH, Hamburg

Ziel: Entwicklung eines effizienten Fluggeräts mit Biegetorsionsantrieb



#### Ganz praktisch und als Vorlauf dringend erforderlich:

- SmartBird revisited Messkampagne zur Verfeinerung der Eckdaten von SmartBird
- Messungen in einem offenen Windkanal (a) wegen des Einsatzes der Auslegermethode zur Bestimmung der Schubkraft, (b) wegen wünschenswerter PIV-Messungen am Außenflügel
- Querschnitt ungefähr 2.50 m x 2 m (Spannweite 2m, Auslenkung 1.60 m) und Geschwindigkeit im Bereich 4 - 6 m/s



## Ziele (I) mit anderen Partnern im "Netzwerk Neues Fliegen"



#### Strömungsmechanik und CFD

- Entwicklung eines 3D-Rechennetzes für den Halbflügel von BigBird mit der vollen Auslenkung bei Biegung und Torsion gemäß Auslegung.
- Strömungsmechanische Rechnungen mit folgenden Schwerpunkten:
  - (a) Bis zu welchen effektiven Anstellwinkeln entsteht Nasenschub und mit welchem aerodynamischen Wirkungsgrad?
  - (b) Umströmung der Flügelspitze im Hinblick auf optimalen Wirkungsgrad in Abhängigkeit von den Parametern Amplitudenverhältnis und Phasenlage.



#### **Flugmechanik**

- Entwicklung eines flugmechanischen Modells für ein Luftfahrzeug mit Biegetorsionsantrieb unter Verwendung von Näherungsmodellen für die instationären Luftkräfte (2D-Streifentheorie).
- Erarbeitung von Zulassungskriterien für ein solches Luftfahrzeug für den manntragenden Betrieb in Zusammenarbeit mit der EASA (European Aviation Safety Agency).
  - (a) Abbildung der projektspezifischen Vorgaben auf den Prozess der EASA Musterzulassung
  - (b) Verbindungsstelle zur EASA nach Fortschritt des Projektes



## Ziele (II) mit anderen Partnern im "Netzwerk Neues Fliegen"



#### Bau des Luftfahrzeugs mit Biegetorsionsantrieb (BTA)

- Bau eines flugfähigen Luftfahrzeugs in der Größen- und Gewichtsklasse von BigBird mit entsprechender Sensorik und Steuerung (SmartBird + autonome Flugregelung). Lenkung nach dem Prinzip Remotely Piloted Vehicle.
- Konstruktive Überlegungen zur Auswahl des Fluggeräts der nächsten Größen- und Gewichtsklasse mit Besatzung (ein bis zwei Personen bzw. entsprechende Nutzlast):
  - (a) Manntragende Konstruktion in engeren Sinne eines "Leonardo 2.0"
  - (b) Vorhandenes Segelflugzeug mit BTA im Außenflügel (vergleichbar zur "VOX 1")



#### Planung und Bau eines Windkanals mit Versuchshalle als "Testzentrum Neues Fliegen"

Eine Rohfassung des Gebäudekonzeptes liegt bereits vor.

- Auslegung und Bau des Windkanals in der Bauart als atmosphärischer Eiffelkanal
- Planung des gesamten Gebäudes in bautechnischer und betriebswirtschaftlicher Hinsicht
- Ermittlung möglicher Nutzer und ihrer jeweiligen Anforderungen
- Gespräche zur Realisierung mit möglichen Investoren



### Große Pläne – Packen wir's an!





# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Mehr unter: www.aniprop.de

Zwei SmartBirds im Flug – Kein Fotoshop! Aufnahme vom 18. April 2011 bei Schlaitdorf westlich von Esslingen





#### Warum ein neuer Windkanal?

#### **Merkmale**

Zur Untersuchung des Flugverhaltens von Drohnen allgemein sind folgende Flugbedingungen möglich:

- Flüge in stationärer Strömung
- Böengenerator mit wählbaren Amplituden
- Erzeugung von Scherwinden
- Geschwindigkeit je nach Kontraktionsstrecke (KS)
   ohne: 0 8 m/s im Querschnitt 6 m x 3.6 m

KS 3:1: 0 - 15 m/s im Querschnitt 3.6 m x 2 m \*)

\*) Auslegungsdimensionen von BigBird

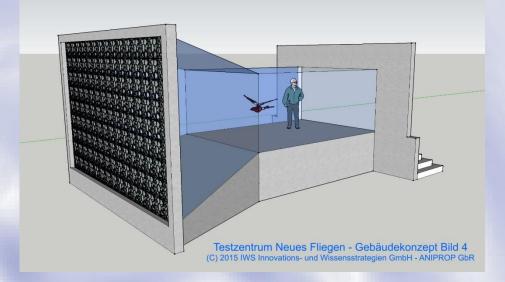
#### Gründe für den Bau u.a.

Fortschritte in der Entwicklung von Fluggeräten lassen sich in der Regel schwer terminieren.

Längere Versuchszeiten in gemieteten Windkanälen verursachen je nach Kanal hohe Kosten.

Rüstzeiten für Versuchsanordnungen können erheblichen Zeit- und Kostenaufwand bedeuten.

Vorhandende Windkanäle bieten keine Freiflugumgebung für Einflüge in Querströmungen.





Erste Skizzen von den Proportionen

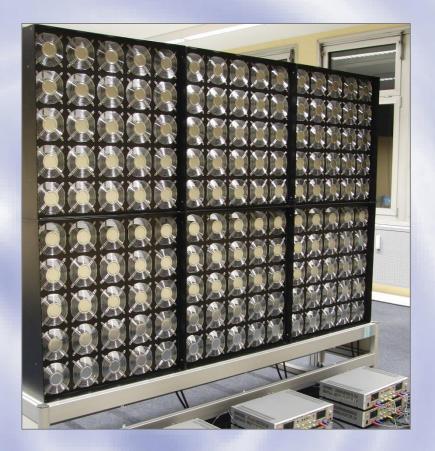


#### Perspektiven und Ziele



#### **Gebauter Kanal:**

Kanal mit Querschnitt 1.2 m x 0.8 m Kontraktion 4:1 von 2.4 m x 1.6 m Windgeschwindigkeit 12 m/s, 4.6 kW 150 Lüfter im Rastermaß 0.16 x 0.16 m<sup>2</sup>



#### **Geplanter Kanal:**

Kanal mit Querschnitt 3.6 m x 2.0 m Kontraktion 3:1 von 6.0 m x 3.6 m Windgeschwindigkeit 15 m/s, 60 kW 135 Lüfter im Rastermaß 0.4 x 0.4 m<sup>2</sup>

### ANIPROP MWK1 → Großer Eiffelkanal

