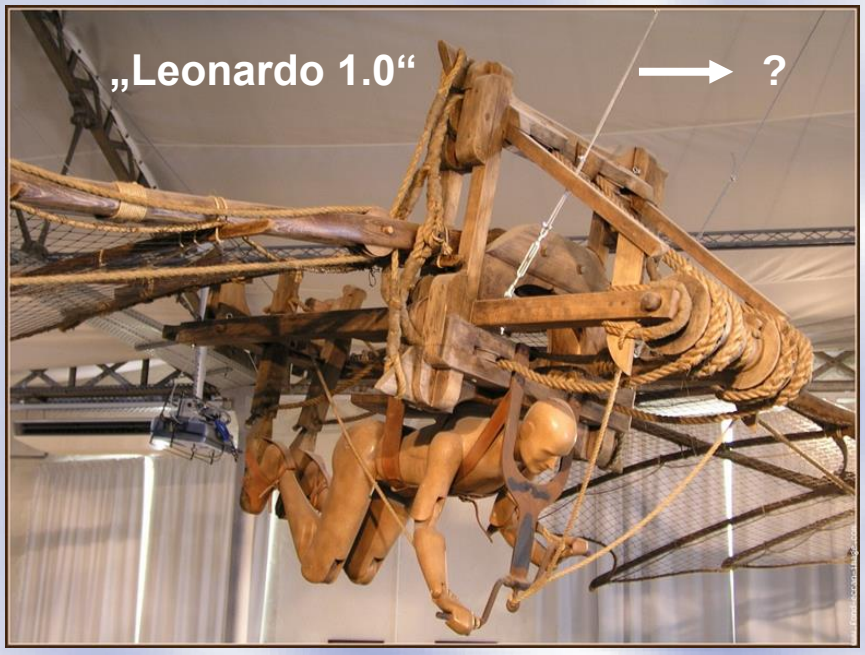
Leonardo 2.0: Zur Evolution des Fliegens

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

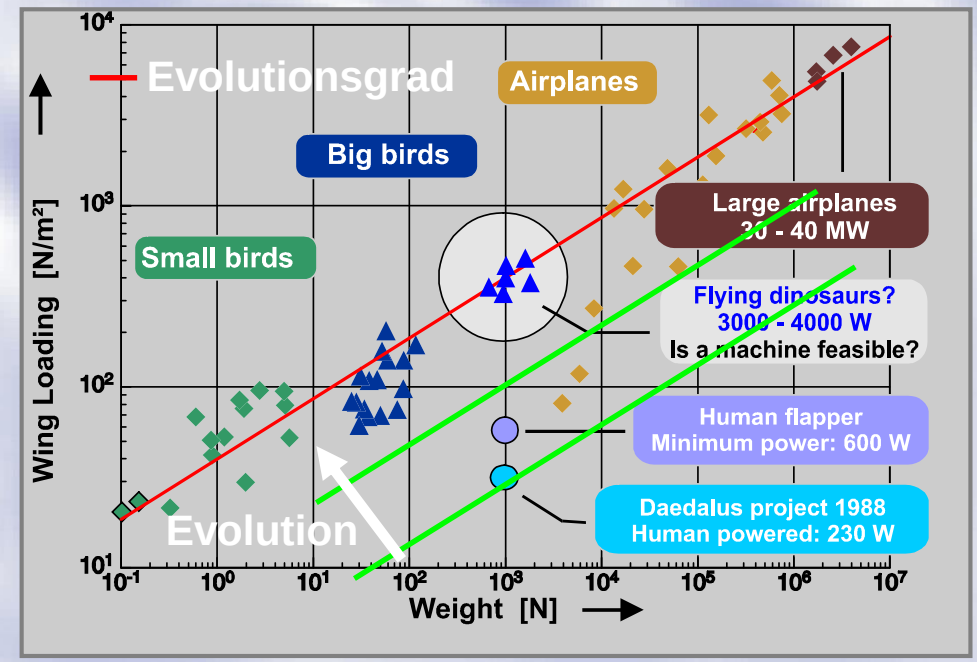
„Vorbild Natur“ - Experimentalvortrag am 15. September 2014 in Mainz

anlässlich der 128. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte e.V. (GDNÄ)



Ausstellung *Léonard de Vinci, projets, dessins, machines, exposition* - 23. Oktober 2012 bis 18. August 2013 in der *Cité des sciences et de l'industrie*, La Villette, Paris.

Foto: Cindy Manivet,Nice.



Normalfliegerdiagramm. Flächenbelastung *Wing Loading* aufgetragen **über** dem **Gewicht** *Weight* in Zehnerpotenzen. Kleine Vögel und große Flugzeuge verbindet eine **rote Linie**. Flieger in der Nähe dieser Linie sollen als **voll entwickelt** gelten.

W. Send, Der Traum vom Fliegen, Naturwiss. Rundschau 2/2003, 65-73

ANIPROP

Es geht im Vortrag um ganz elementare Dinge . . .

- **Wie hat sich das Beobachten des Fliegens entwickelt, das Fliegen nach Art der Vögel?**
  Leonardo da Vinci, Otto Lilienthal, Étienne-Jules Marey

- **Otto Lilienthal 1889: „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“.**
  Es ist anders gekommen. Triebwerke statt Schwingenflug bewegen Flugzeuge um den ganzen Erdball. Aber gibt es vielleicht doch noch eine technische Evolution dieser genialen Antriebsart, die „Mutter Natur“ in Millionen von Jahren zur Perfektion entwickelt hat?

- **Wie gut verstehen wir heute, wie die Vögel fliegen?**
  Versuche gab es schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Der künstliche Vogel **SmartBird*)** hat **2011** Medien und Menschen auf der ganzen Welt fasziniert mit bisher nie gesehener Wendigkeit und Natürlichkeit. Wurde ein Geheimnis aufgedeckt?

*) W. Send et al., ARTIFICIAL HINGED-WING BIRD WITH ACTIVE TORSION AND PARTIALLY LINEAR KINEMATICS, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS), 23-28 September 2012, Brisbane Australia

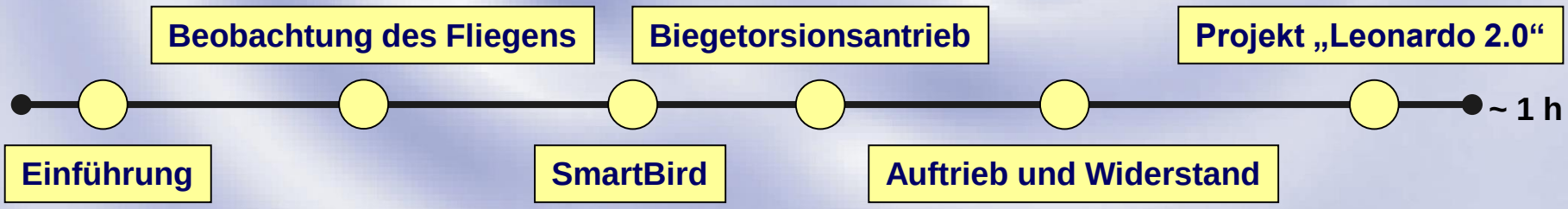
Es geht im Vortrag um ganz elementare Dinge . . .

. . . aber auch um die physikalischen Grundlagen

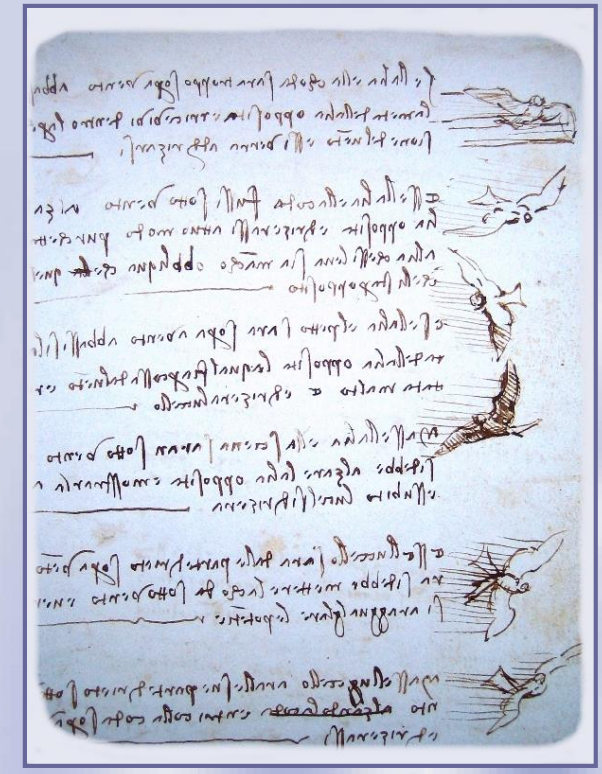
Ist Fliegen nach Art der Vögel effizient oder verschwenderisch?
Über **Wirkungsgrade** müssen wir reden, wenn diese Antriebsart eine Zukunft haben soll. Aber wie packt man das Thema **Leistung** an?

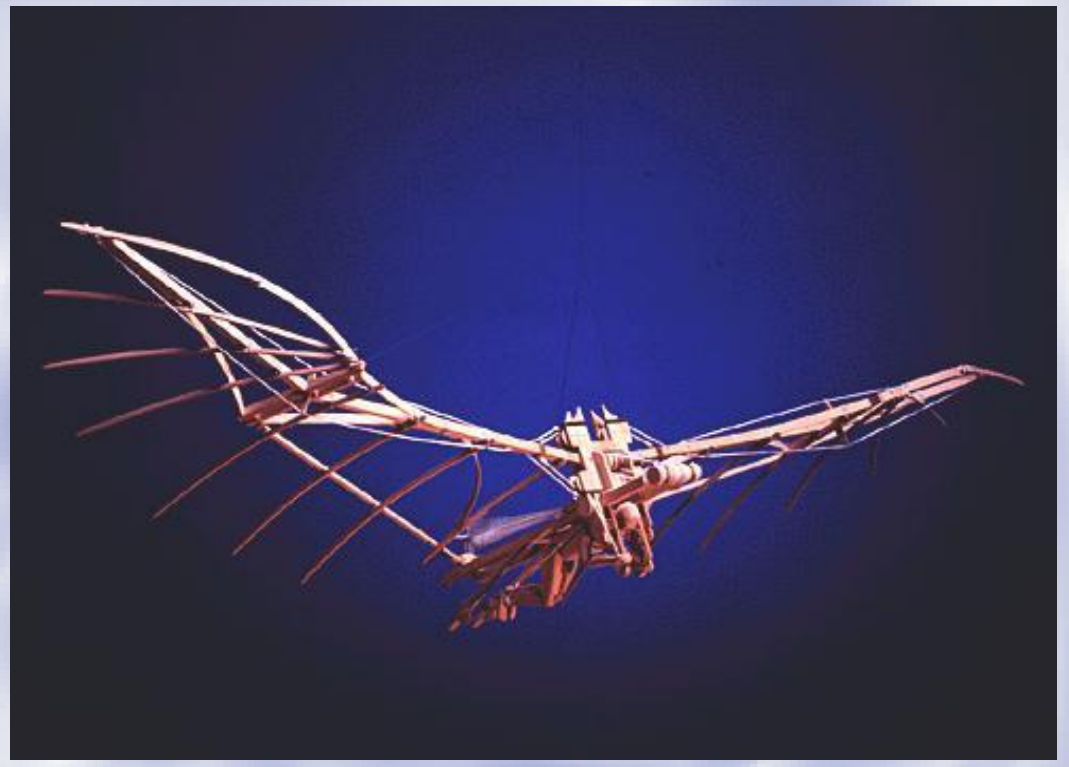
Wir machen einen Prinzipversuch mit einem künstlichen Vogel.
Der Kern des Fliegens: starten, steigen, vorwärts fliegen, getragen werden. Dazu entfalten auch die Vögel **Schubkraft**.

Luft ist unsichtbar, aber auch ohne Eigenschaften?
Natürlich nicht. Ohne ihre **Zähigkeit** wäre Fliegen gar nicht möglich – weder für Flugzeuge, noch für Vögel. Denn die Flügel entwickeln nicht nur Schubkraft, sie halten die Flieger auch in der Luft.
Dynamischer Auftrieb macht es möglich.



ANIPROP





Quelle: Instituto e Museo di Storia della Scienza, Florenz

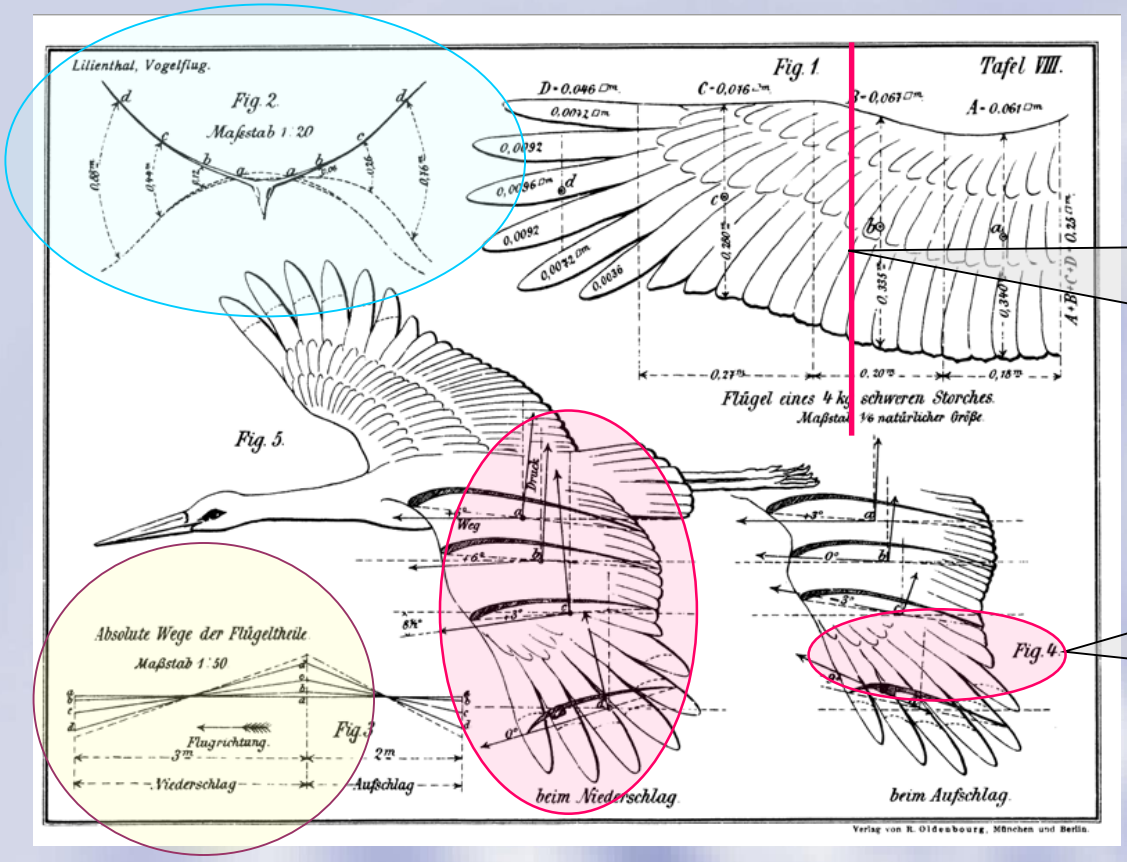
Leonardo da Vinci (1452-1519) hat umfangreiche Studien zum Schwingenflug erstellt. Seine Entwürfe sind nachgebaut worden und funktionieren – im Prinzip. Unsere heutigen Kenntnisse von den Kräften Auftrieb und Widerstand bei der Umströmung von Tragflächen sind erst zu Anfang des 20. Jahrhunderts entstanden.

Der Traum vom Fliegen

ANIPROP

Der kleine Schlagflügelapparat am Fliegeberg 16.08.1894 - Fotograf Ottomar Anschütz, Bild-Nr.: OLM F0089LF

ANIPROP



Otto Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, Berlin 1889

Lilienthals Beobachtungen

Im 2D Flügelschnitt reduziert sich die räumliche Biege- und Torsions-bewegung auf eine gekoppelte Schlag- und Drehbewegung.

Die Phasenvoreilung des Schlages vor der Drehung:

Der größte positive Anstell-winkel stellt sich beim Aufschlag ein.

Wesentlich:
Das Amplitudenverhältnis von Schlagen zu Drehen.

Zentrale Freiheitsgrade des Schwingenflugs

- zunehmende Biegung von der Flügelwurzel zur Spitze (Fig. 2)
- zunehmende Torsion von der Flügelwurzel zur Spitze (Fig. 4,5)
- gleichförmige Translation in Bahnrichtung
- Schwenken vor und zurück (indirekt Fig. 3 zu entnehmen)

ANIPROP

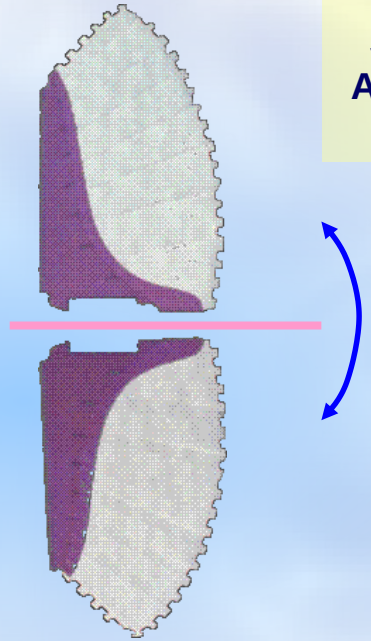
Ist Fliegen nach Art der Vögel effizient oder verschwenderisch?
Über **Wirkungsgrade** müssen wir reden, wenn diese Antriebsart eine Zukunft haben soll. Aber wie packt man das Thema **Leistung** an?

Jetzt werden die Flügel mit einem Motor zum Schlagen gebracht.

Leistung wird eingespeist. Die umgebende Luft gerät in Bewegung und nimmt immer mehr Energie auf.

Die Struktur der Flügel sei so beschaffen, dass sie sich durch die Bewegung gegen die Luft zugleich leicht verwinden (drehen) können.

Das Drehen erfolgt dadurch, dass über die Luft ein Teil der Leistung des Schlags an die Flügel, genauer gesagt an die Torsion, zurückgegeben wird.



Das reicht zum Fliegen!

Schlagen und Drehen in passendem Ausmaß zueinander erzeugen bereits eine Schubkraft.

Wir sehen uns den genauen Ablauf in einem Experiment mit einem künstlichen Vogel im Rundlauf an.

Ein großes Gebiet mit ruhender Luft.
Darin ruht ein Flügelpaar.
Es gibt keinerlei Bewegungsenergie.

ANIPROP

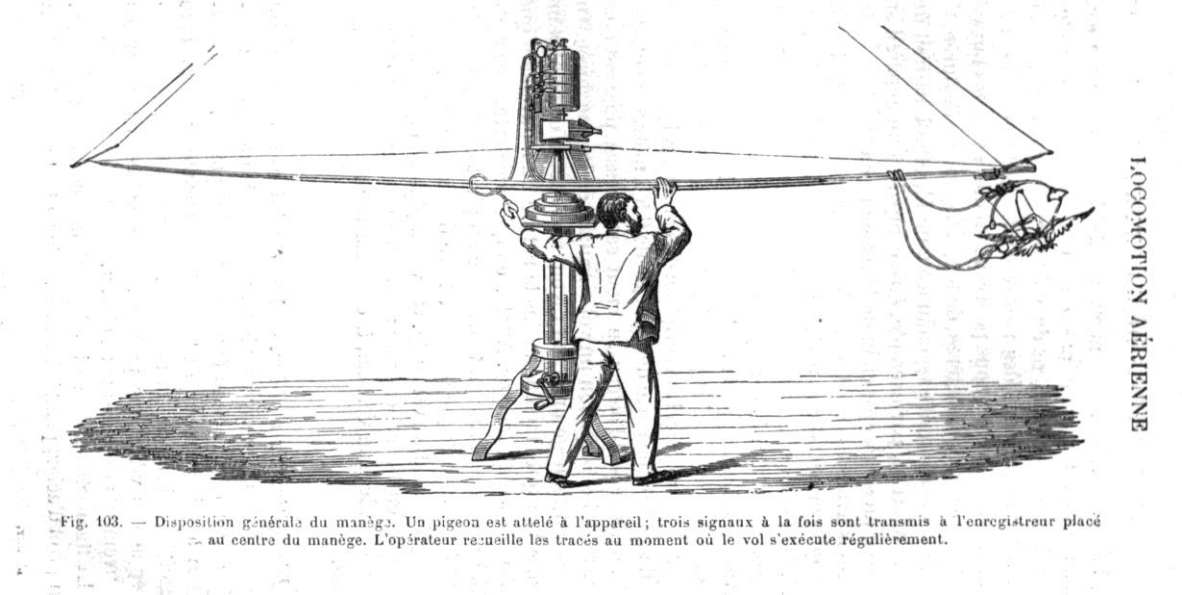
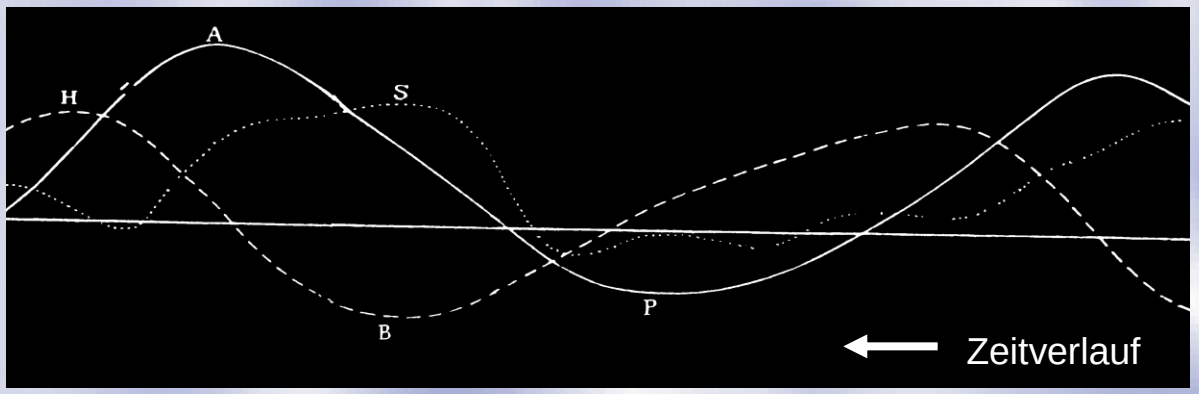


Fig. 103. — Disposition générale du manège. Un pigeon est attelé à l'appareil; trois signaux à la fois sont transmis à l'enregistreur placé au centre du manège. L'opérateur recueille les tracés au moment où le vol s'exécute régulièrement.

Étienne-Jules Marey

Französischer Physiologe (1830-1904) in Paris.
Entwickelte die **Chronophotographie** für bewegte Vorgänge und untersuchte vor allem auch den Vogelflug.

***Le Vol des Oiseaux*,**
Éd. G. Masson, Paris 1890.



La Machine Animale
Éd. F. Alcan, Paris 1891.
Fig. 110 mit den drei Freiheitsgraden der Bewegung Das Schwenken wird wie bei Lilienthal auch indirekt sichtbar durch den längeren absoluten Weganteil des Abschlags. Die Spuren der Nadeln seiner Druckmesser auf Rußwalzen sind ein bedeutendes historisches Zeugnis.

Bewegungsformen: Schlagen (HB), Drehen (S) und Schwenken (AP), gemessen an einem Bussard.

AB Mouvement de haut en bas
S Torsion de l'articulation scapulo-humérale
AP Avant et arrière (le bord postérieur est relevé)

ANIPROP

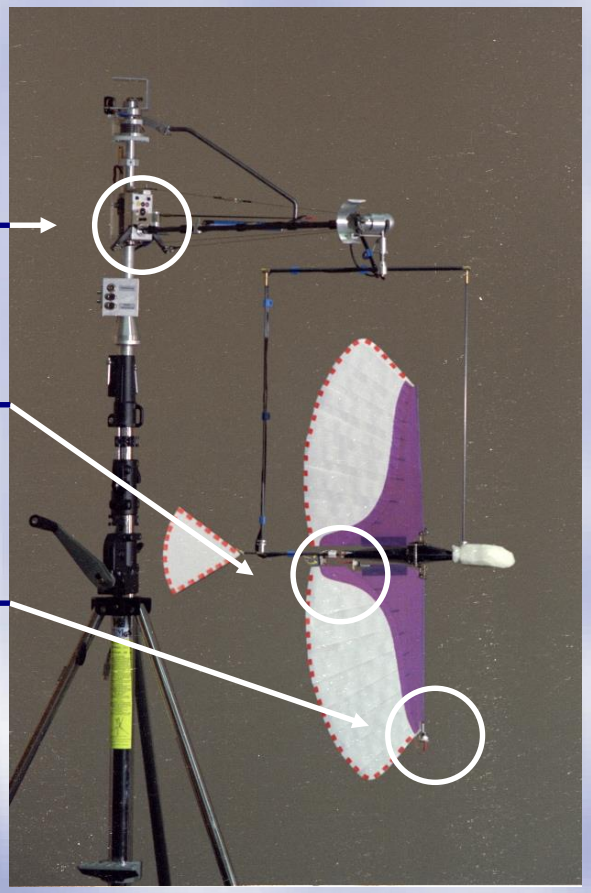
Wir machen einen Prinzipversuch mit einem künstlichen Vogel.
Der Kern des Fliegens: starten, steigen, vorwärts fliegen, getragen werden. Dazu entfalten auch die Vögel **Schubkraft**.

Rundlauf mit Sensoren ausgestattet

Translation (Strichscheibe)

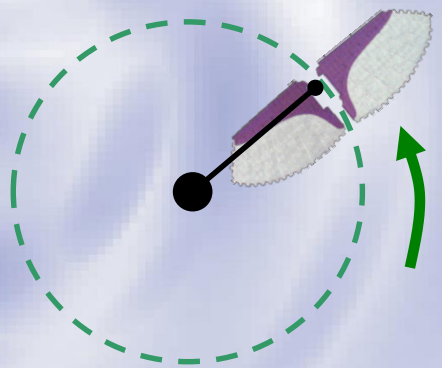
Schlagen (Winkelsensor)

Drehen (Winkelsensor)



Freiheitsgrade der Bewegung:

- **Schlagen (Biegung)**
- **Drehen (Torsion)**
- **Vorwärtsbewegung (Translation)**

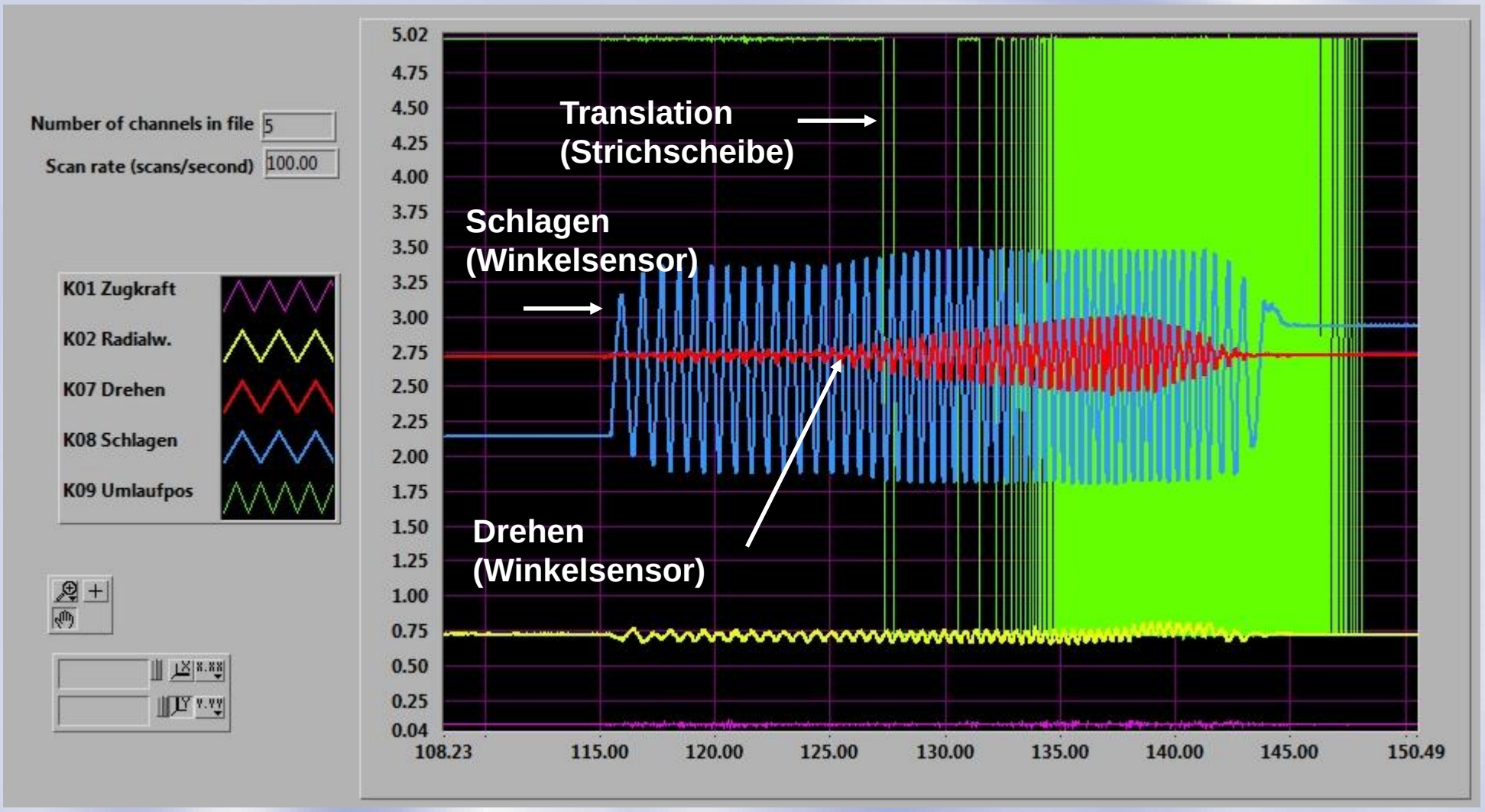


Aufsicht auf den Rundlauf
Gleichförmige Bewegung durch Kreisbahn genähert.

Rundlauf mit künstlichem Vogel

passive Torsion (allein durch Elastizität der Flügel)

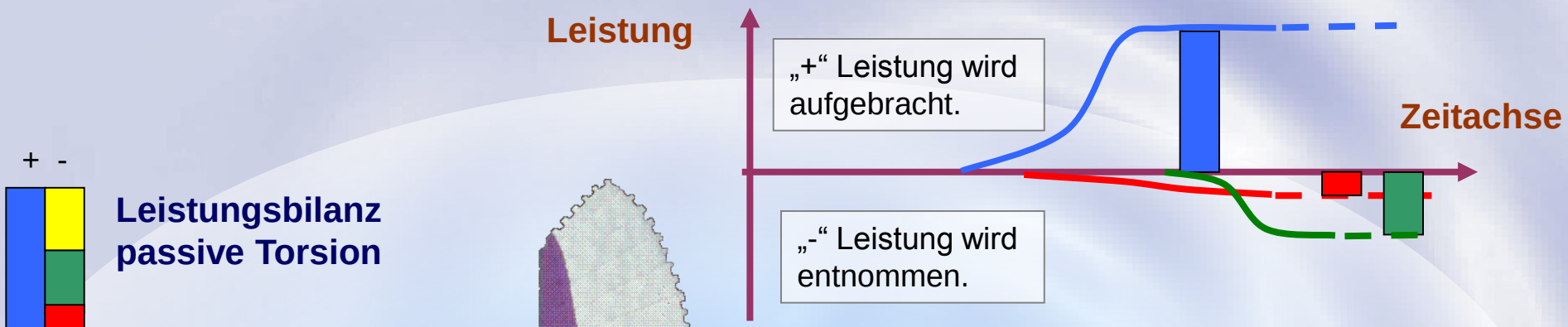
ANIPROP



Start des künstlichen Vogels

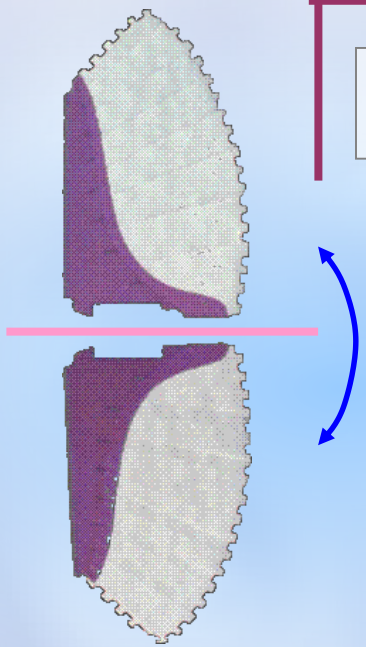
passive Torsion (allein durch Elastizität der Flügel)

ANIPROP



Leistungsbilanz passive Torsion

Verlustleistung, abgegeben an ungeordnete Bewegung der Luft



Freiheitsgrade der Bewegung:

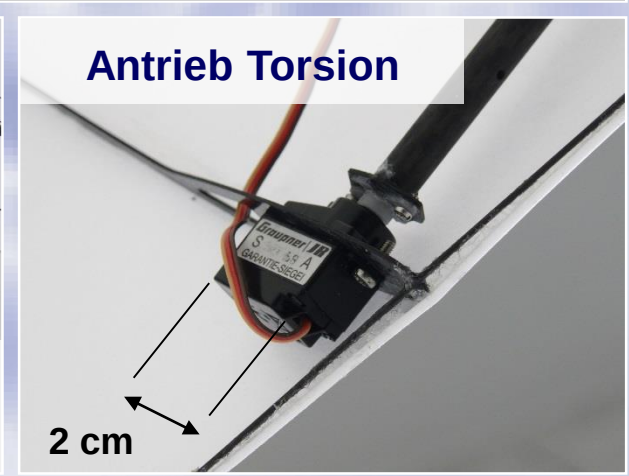
- **Biegung (Schlagen)**
- **Torsion (Drehen)**
- **Vorwärtsbewegung (Translation)**

$$\text{Aerodynamischer Wirkungsgrad} = \frac{-\ \text{Erzielte Schubleistung}}{\text{Leistung Schlagen} + \text{Leistung Drehen}}$$

Leistungsbilanz für die Erzeugung der Schubkraft

bei passiver Torsion (allein durch Elastizität des Flügels)

ANIPROP



Dana Mackenzie, *A Flapping of Wings*, SCIENCE 23 MARCH 2012 VOL 335

ANIPROP

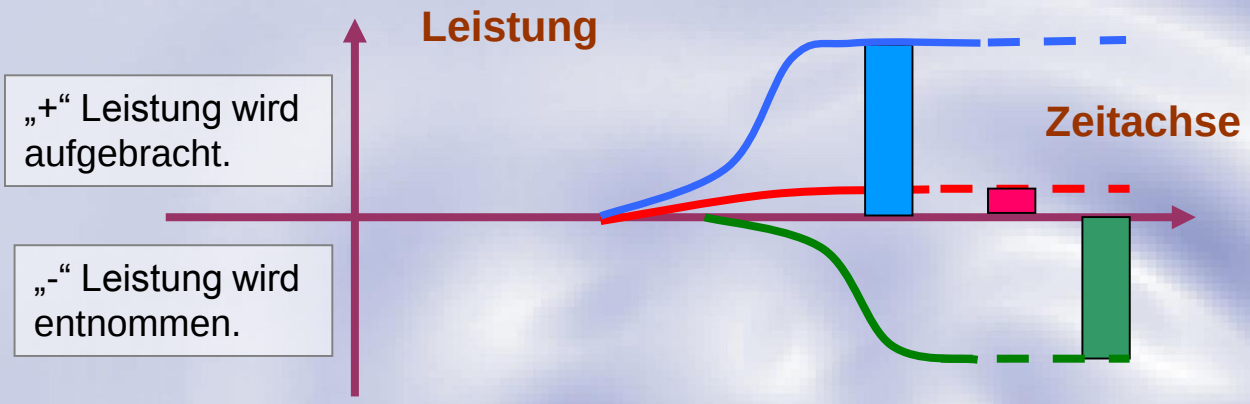
SmartBird Team - Hannovermesse 2011

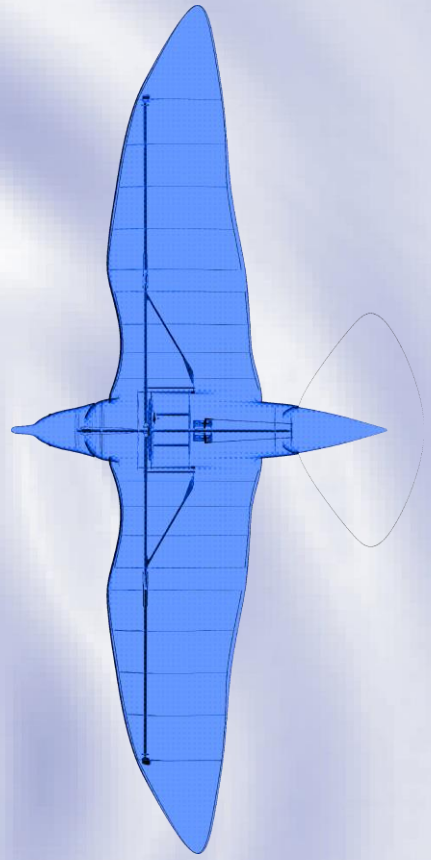
Entwicklung 2008 – 2011 im Rahmen des *Festo Bionic Learning Network* der Festo AG, Esslingen

ANIPROP

Quelle: W. Send, Archiv\Casio_FH25 - CIMG0317,CIMG0319

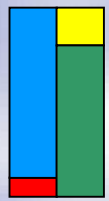
ANIPROP





Freiheitsgrade der Bewegung:

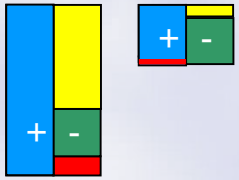
- **Schlagen (Biegung)**
- **Drehen (Torsion)**
- **Vorwärtsbewegung (Translation)**



Leistungsbilanz aktive Torsion

Verlustleistung, abgegeben an ungeordnete Bewegung der Luft

Vergeich der Leistungsbilanzen für passive/aktive Torsion bei gleicher Schubleistung



Viel weniger Schlagleistung ist erforderlich.
Theorie sagt: Wirkungsgrad geht hoch bis auf 80 - 90 %

Leistungsbilanz für Erzeugung der Schubkraft

bei SmartBird mit aktiver Torsion (geringe Leistung aufgebracht)

ANIPROP

Biegetorsionsantrieb – Das Prinzip

- 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**.

Leistung Schlagen bzw. Biegung + **Leistung Drehen bzw. Torsion** = **Leistung Translation (Schub)** + **Verlust in Wirbeln**

Hoher Wirkungsgrad!

ANIPROP

Der Zwischenschritt mit Hybridantrieb

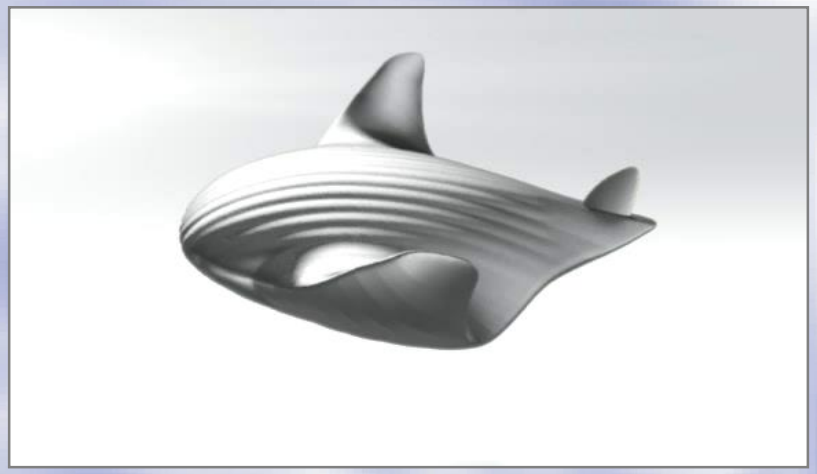
- konventionelle Triebwerke (90 %)
- Biegetorsionsantrieb (10 %)

W. Send 1998/99

1999 Vorstellung des Konzepts *A³Technologies* (A³T)

ANIPROP

Moderne Transportflugzeuge sind die eine Option, andere Flugzeugkonzepte wie „Blended Wing Body“ eine zweite.



Air Ray
Quelle: Festo AG

Realisierung als Luftschiff mit Heliumfüllung.

Animation „A³T“: Felix Schaller
www.felixschaller.com

Boeing Modell X-48B

ANIPROP

Ein bemerkenswerter Fortschritt im Fluid Wasser

Ein Einwand gegen den Biegetorsionsantrieb beruht auf dem Argument, dass er nicht beliebig skalierbar sei. Die Natur könne nun einmal keine Drehungen hervorbringen. Daher sei im Verlauf der Evolution das Fliegen mit der Schlag- und Drehbewegung von Flügeln entstanden und auf diese Größenordnung beschränkt.

Seit einiger Zeit (2013) ist mit dem Projekt „O-Foil“ die Leistungsgrenze praktisch erprobter Antriebe mit schwingenden Tragflächen erheblich angehoben worden:

MS Triade auf Fahrt in Binnengewässern (72 kW)
Quelle: www.ofoil.nl

Kleinere Projekte wie die „Suntory Mermaid II“ (2008) haben schon früher stattgefunden.

ANIPROP

Luft ist unsichtbar, aber auch ohne Eigenschaften?
Natürlich nicht. Ohne ihre **Zähigkeit** wäre Fliegen gar nicht möglich – weder für Flugzeuge, noch für Vögel. Denn die Flügel entwickeln nicht nur Schubkraft, sie halten die Flieger auch in der Luft.
Dynamischer Auftrieb macht es möglich.

Widerstand
Längskraft der Strömung
durch Reibung bei jeder Bewegung - wegen des Auftriebs zusätzlich durch die Randwirbel an den Flügelspitzen

Auftrieb
Querkraft der Strömung wirkt auf die Tragflächen
Überwindet das Gewicht!

Schub
Schubkraft der Triebwerke
Überwindet den Strömungswiderstand!

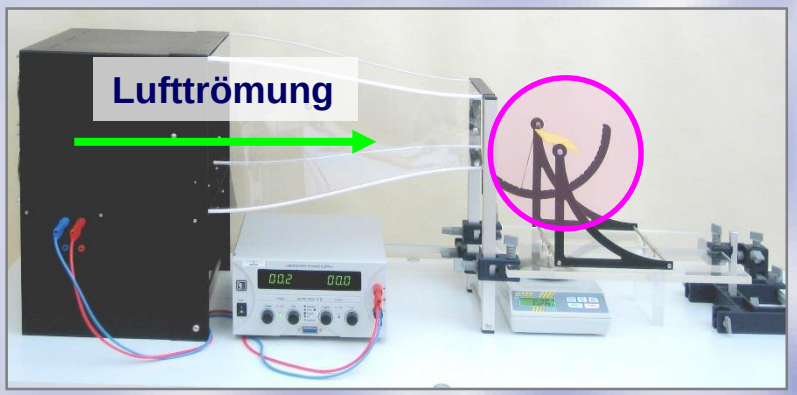
Gewicht
Gewichtskraft des Flugzeugs

Gleichgewicht der Kräfte

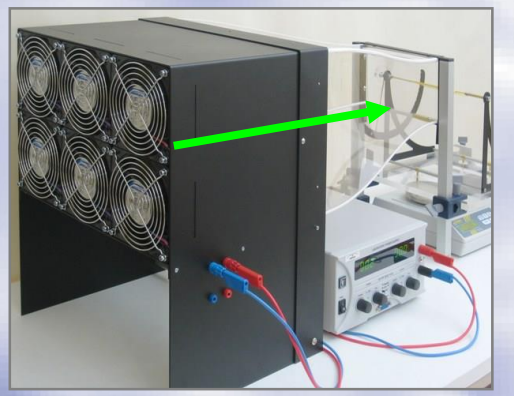
ANIPROP

Auftriebskraft als als Gegenkraft zum Gewicht

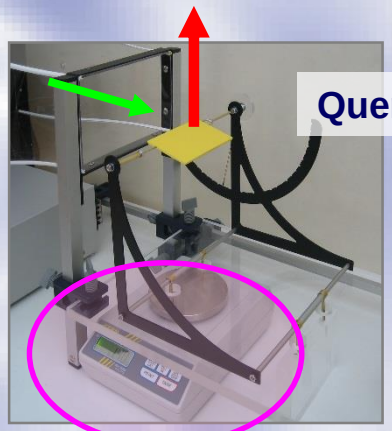
. . . entsteht bei Bewegung gewölbter Flächen oder ebener Flächen mit etwas Neigung. Dazu wird ein kleiner Windkanal verwendet:



Kleiner Windkanal
Von links wird Luft angesaugt, in der Verengung beschleunigt und gegen eine kleine angestellte Platte gelenkt.



Die Antriebseinheit
Sechs Lüfter saugen die Luft an. Die Geschwindigkeit ist regelbar.



Der Messtisch
Platte und Halterung stehen auf einer Waage. Der Wind hebt die Platte an.

Messung!

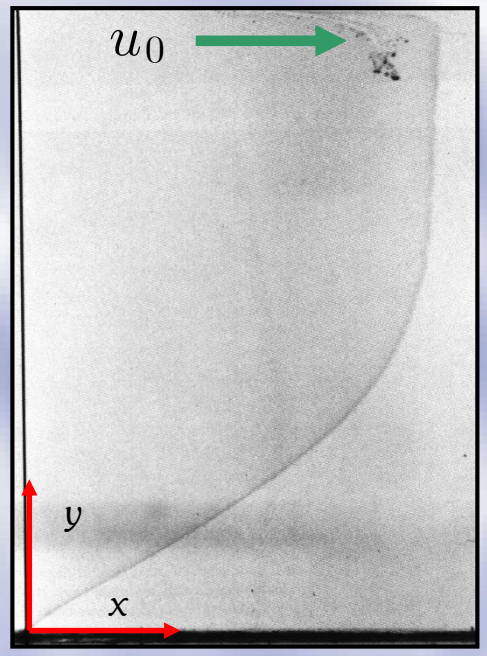
Dynamischer Auftrieb einer einfachen ebenen Fläche, die ein wenig gegenüber der Bewegung geneigt ist (Anstellwinkel)

ANIPROP

Strömungswiderstand als Folge der Zähigkeit der Luft

Der epochale Schritt für die richtige Ermittlung des Widerstands geht auf Ludwig Prandtl zurück.
1904 auf dem III. Internationalen Mathematiker-Kongress in Heidelberg hielt er einen Vortrag mit dem Titel:

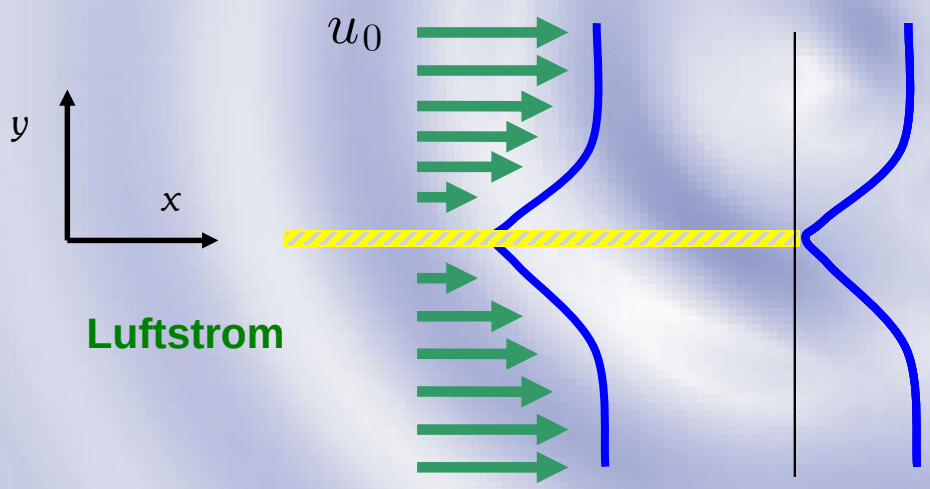
Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung



Experimentelle Bestätigung der Theorie erstmals von J. Nikuradse (1942).

Quelle: M. Van Dyke, *An Album of Fluid Motion*, 1982. Bild 30. F.X. Wortmann (1977) Technik: Tellur-Draht durch elektrischen Impuls stimuliert in Wasser bei 9 cm/s. *Re*=500

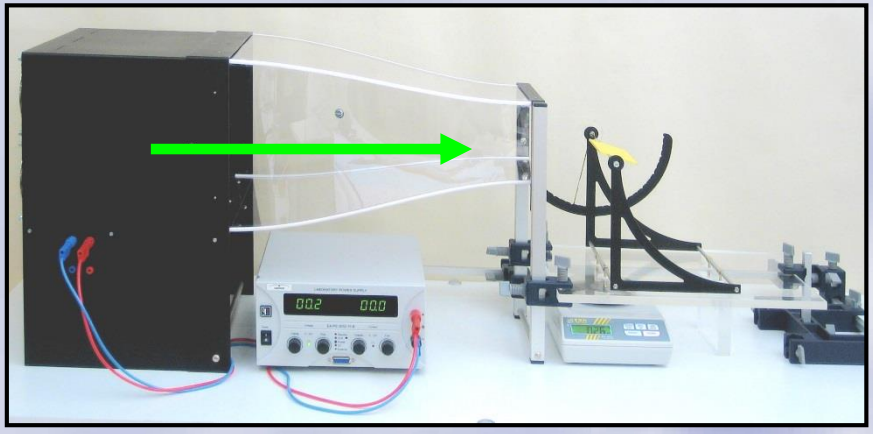
Grenzschicht an einer angeströmten Oberfläche:

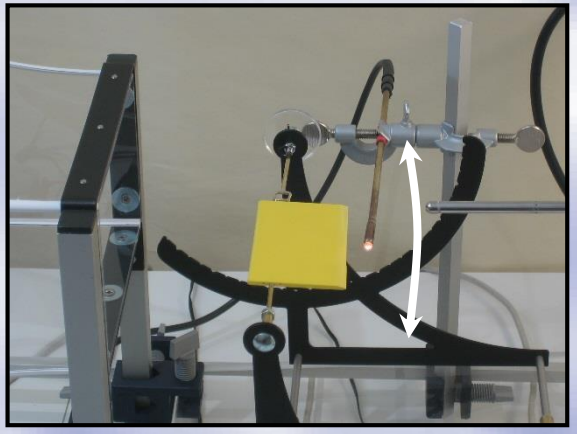


Geschwindigkeitsprofil hinter einer Platte

Durch die Zähigkeit der Luft haftet die Strömung an der Oberfläche, was sich als Reibungswiderstand äußert.

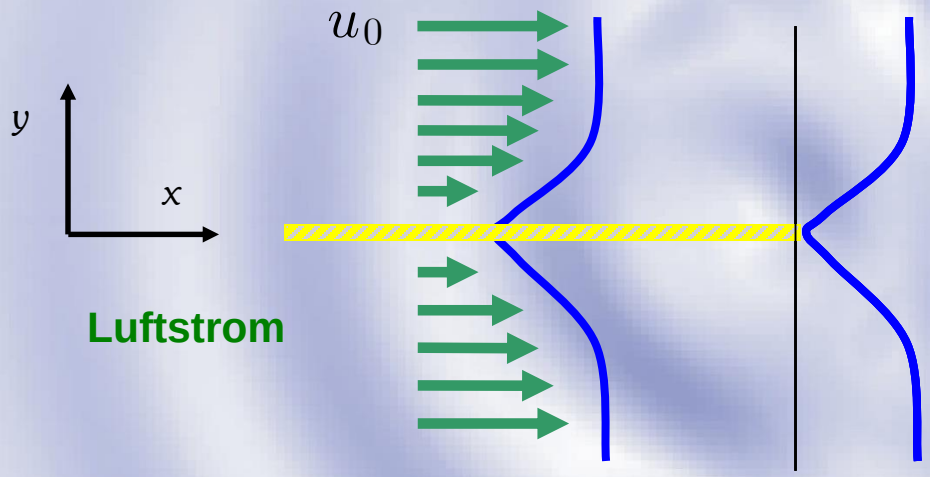
ANIPROP

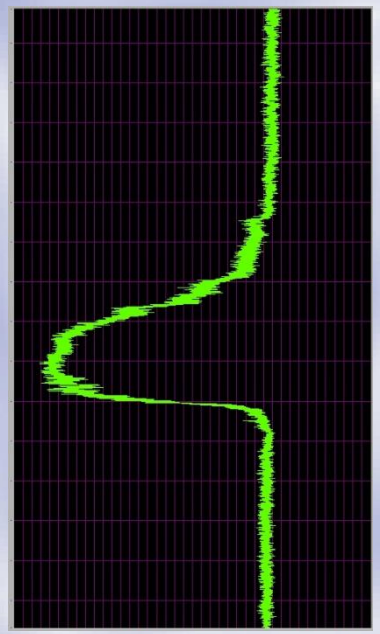




Weg des Geschwindigkeits-sensors

Sensor durch Licht markiert





Signal für die Geschwindigkeit zeigt deutlich die Abnahme hinter der Platte durch Reibung.

Anströmung 7.5 m/s

U in m/s

0 5 10

<u>Reibungskraft</u> der Luft als Folge der Zähigkeit.

ANIPROP

Projekt „Leonardo 2.0“ - Das Ziel

- Triebwerke statt Schwingenflug bewegen Flugzeuge um den ganzen Erdball. Aber gibt es vielleicht doch eine technische Evolution dieser genialen Antriebsart, die „Mutter Natur“ in Millionen von Jahren zur Perfektion entwickelt hat? **Könnte der Antrieb der Zukunft entstehen?**

- Das Fernziel einer technischen Nutzung ist nur denkbar, wenn der „weiße Fleck“ auf der Landkarte der Luftfahrzeuge zwischen natürlicher und technischer Evolution erobert werden kann.

- Vom ultraleichten SmartBird mit 5 N (0.5 kg) zum motorgestützten Schwingenflug eines Menschen sind **mehr als zwei Größen-ordnungen** im Gewicht zu überwinden. Das geht nicht in einem Schritt.
  - **Erstes Teilziel**: Großer Vogel „Big Bird“ im Bereich 100 N (10 kg)
  - **Zweiter Schritt**: Fliegender Mensch im Bereich 1000 N (100 kg)

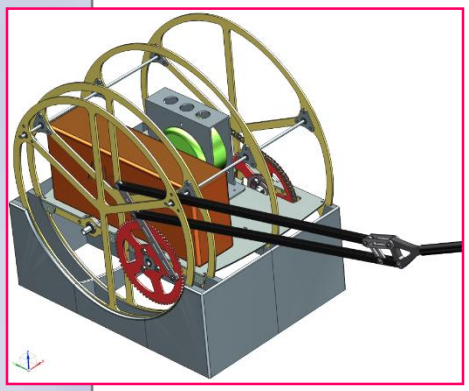
Technische Evolution des Biegetorsionsantriebs

Masterarbeit **„Skalierung und Auslegung eines Biegetorsionsantriebs“** M. Denuder an der ETH Zürich

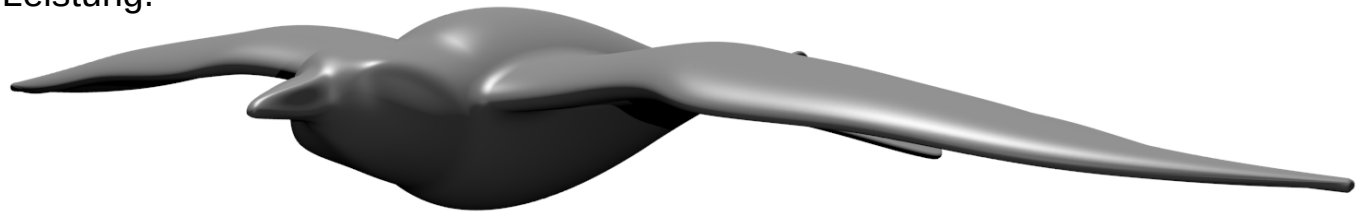
M. Denuder, W. Send, *Skalierung und Auslegung eines Biegetorsionsantriebs*,
Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, Augsburg, 16.- 18. September 2014

Skalierung (Gewicht / Flächenbelastung / Spannweite):

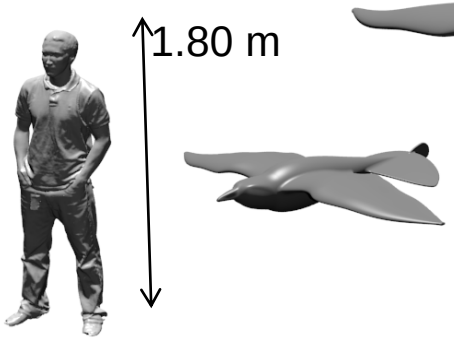
Quelle: Abschlusspräsentation M. Denuder am 14. Mai 2014 an der ETH Zürich

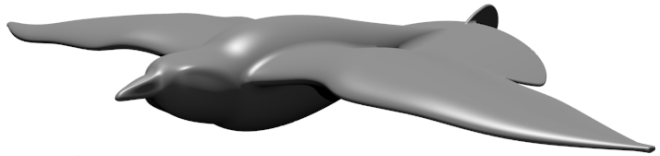


Skalierter Antrieb nach R. Mugrauer mit 400 W Leistung.



Leonardo 2.0
100 kg
185 N/m²
5 m





BigBird
10 kg
93 N/m²
3 m

SmartBird
0.5 kg
10 N/m²
2 m

BigBird als wichtiger Zwischenschritt zu einem Normalflieger im Leistungsbereich 3 – 4 kW.

ANIPROP

- Moderne bürstenlose Motoren bringen die notwendige elektrische Leistung im Bereich 3 – 4 kW auf. Akkumulatoren in Lithium-Polymer-Technik sind inzwischen so leicht, dass die Energie für kürzere Flugstrecken ausreicht.

- Die konstruktive Herausforderung liegt im Bau des Getriebes mit den ultraleichten, gelenkigen Tragflächen.

- Viel Arbeit wird die Beherrschung des Wechselspiels zwischen Flugsteuerung und Sensorik verlangen.

- Der wichtige **Zwischenschritt** ist der „Große Vogel - BigBird“. Gewicht und Geschwindigkeit sind dabei nicht mehr ultraleicht, sondern **BigBird** fliegt wie ein „normaler“ Vogel.

- **Leonardo 2.0 ist also machbar.**

2012 habe ich kurze Zeit geglaubt, Leonardo 2.0 sei tatsächlich schon entwickelt worden . . .

Leonardo 2.0: Persönliche „Vision 2020“

Projekt als wissenschaftlich-technische Kulturleistung

ANIPROP

FINANCIAL TIMES
DEUTSCHLAND

für Klassiker (Home) | für Schnellleser | für Me

UNTERNEHMEN FINANZEN BÖRSE POLITIK MANAGEM

FTD.de » Lifestyle » Out of Office » Der fliegende Holländer

Empfehlen: 1 Gefällt mir +1

Schriftgröße: A

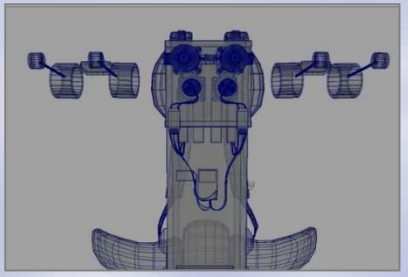
Out of Office

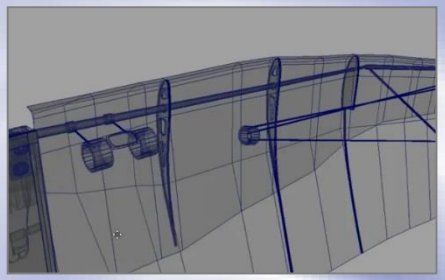
Der fliegende Holländer

Jarno Smeets will in den Himmel aufsteigen wie e Drachenstoff, zwei Leichtbaumotoren und Sensore
Klimpe, Hamburg

Es kann sehr entspannend sein, wenn man ein nicht ga Smeets Vorbild ist der Albatros, ein Vogel, der nicht un bekannt ist. "Es ist sehr ermutigend, jungen Albatrosse zuzusehen", sagt der 31-jährige Holländer, der gerade s Himmel gemacht hat.

Wie einst Leonardo da Vinci und Otto Lilienthal träumt





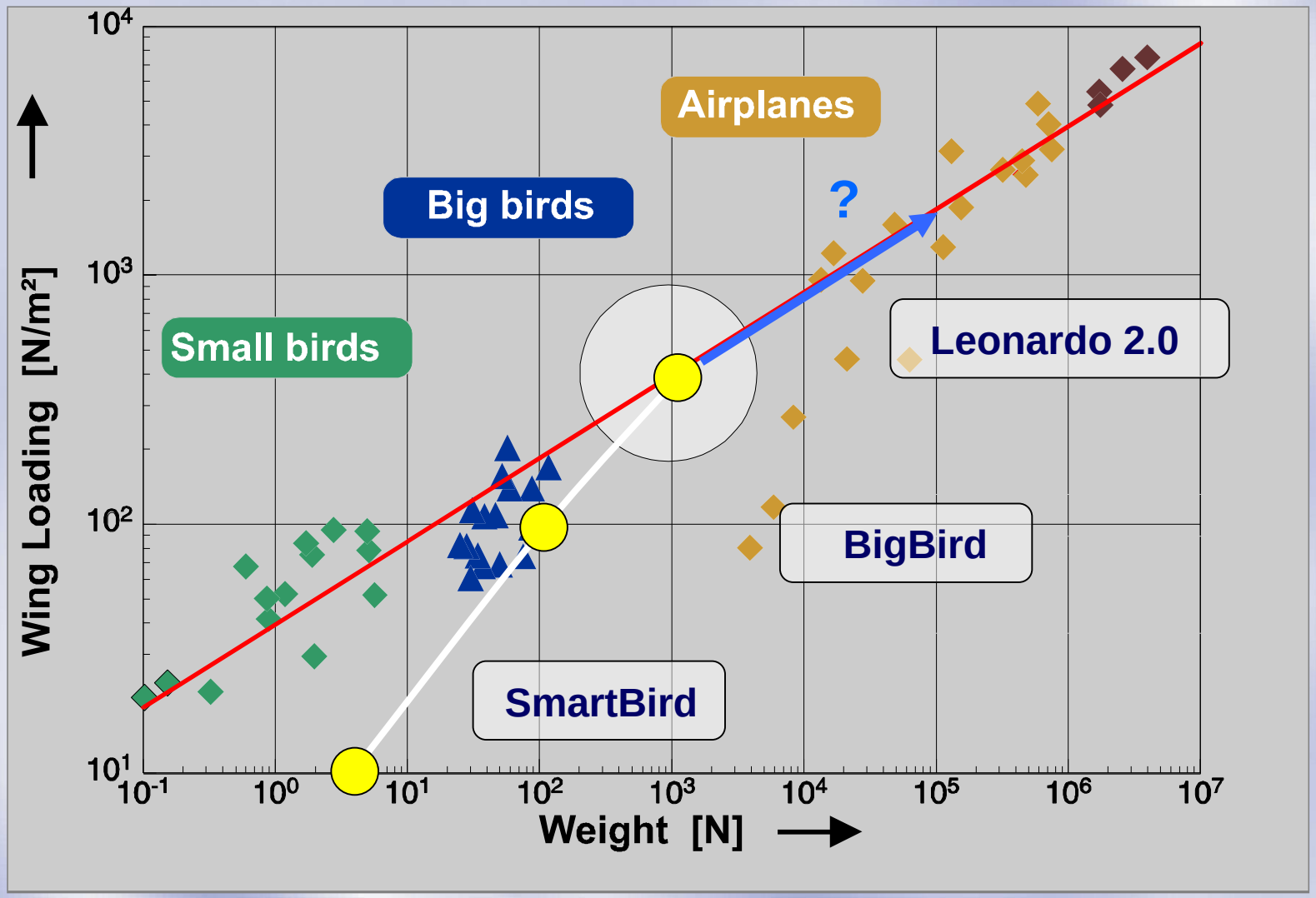
Posted on March 15, 2012
Ein sensationelles Ereignis von historischem Rang ging 2012 durch die Medien.
„Leonardo 2.0“ existiert bereits.

‘Bird Man’ Hoaxster Comes Clean on Dutch Television
By Dave Mosher and Daniela Hernandez - 03.22.12 4:06 PM
http://www.wired.com/wiredscience/2012/03/birdman-admits-hoax/

. . . aber so ähnlich könnte es tatsächlich gehen.

Historischer Erstflug „Jarno Smeets“ 2012

ANIPROP

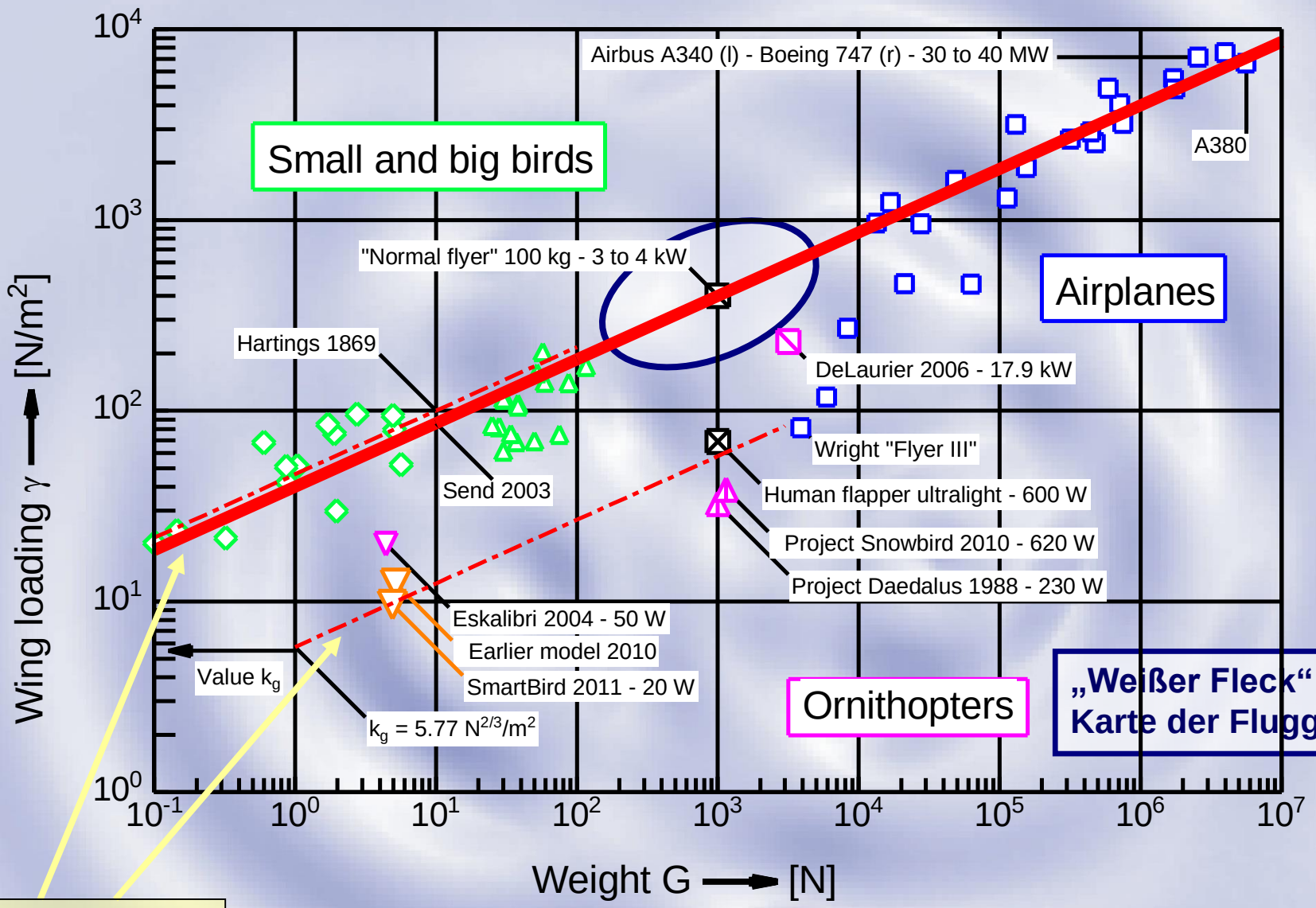


Leonardo 2.0: „Der Traum vom Fliegen“

ANIPROP

Anhang mit Ergänzungen

ANIPROP

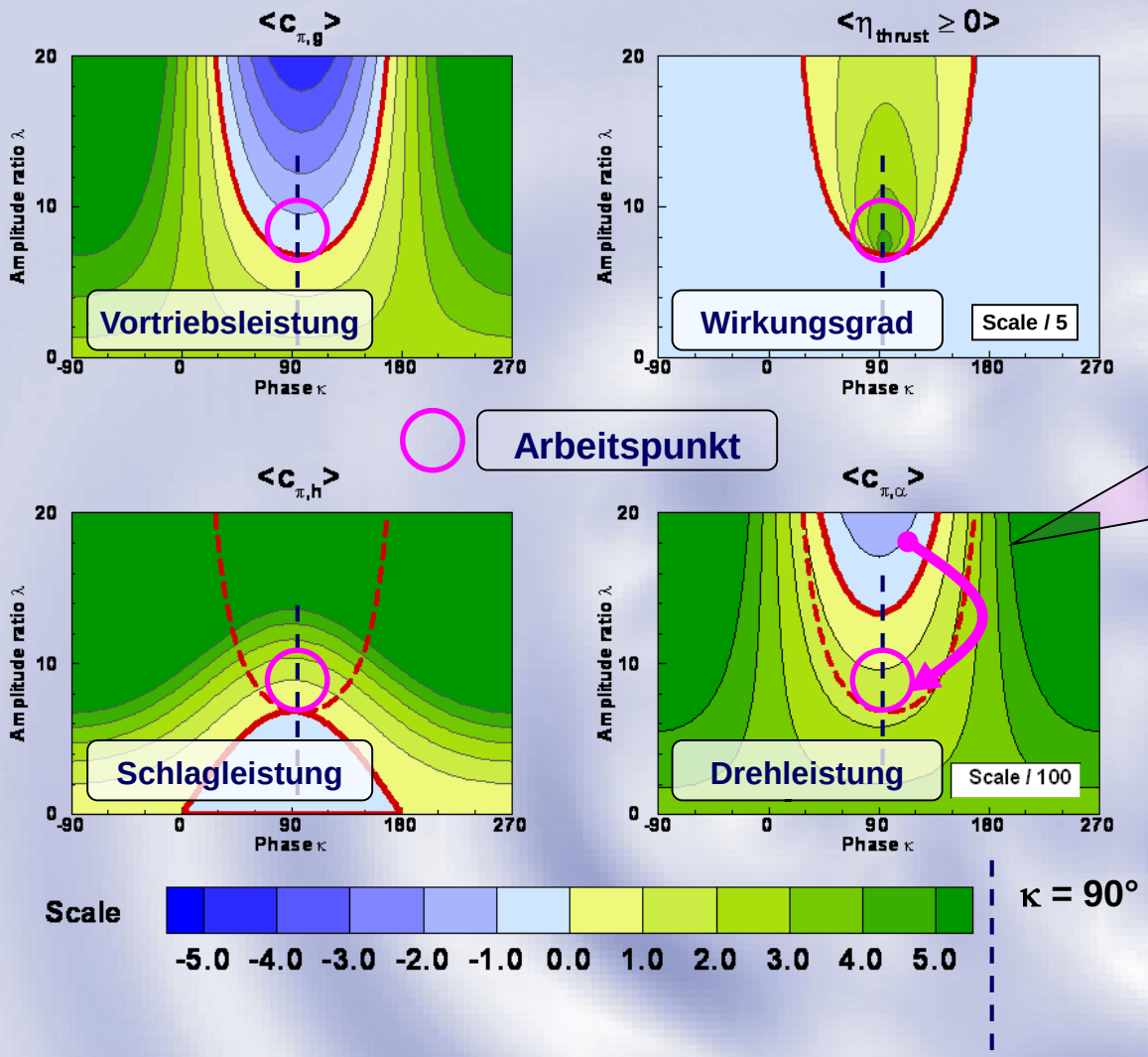


„Weißer Fleck“ auf der Karte der Fluggeräte

Verschiedene Evolutionsgrade

Normalfliegerdiagramm

ANIPROP



Aktive Torsion

Der Mechanismus:
Schlag- und Drehleistung werden umgesetzt in Schubleistung.

Erkenntnis:
Für einen hohen Wirkungsgrad muss die Drehung aktiv angesteuert werden.

Aber nicht umgesetzt! Das macht heute noch kein einziger Schwingenflieger.

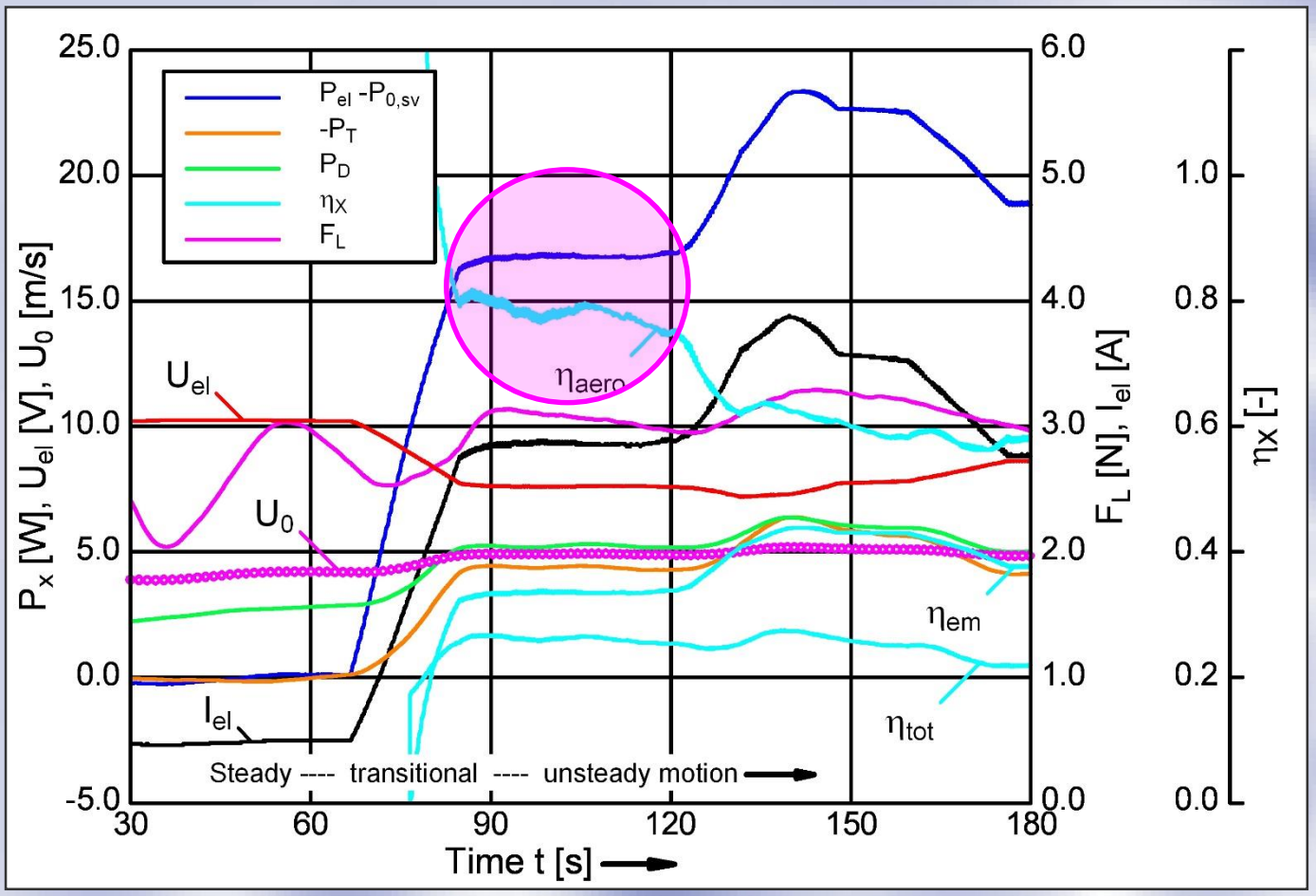
Leistung wird aufgenommen, d.h. bei der Vortriebsleistung Schubkraft erzielt:

Leistung wird aufgebracht:

Leistungsbilanz des Schwingenflugs – 2D Schnitt

Ungenutzte Theorie (entstanden 1935/36):
Hoher Wirkungsgrad bei aktiver Drehung

ANIPROP



Hoher Wirkungsgrad bis zu 80 % bei mittleren Leistungen

Messung an SmartBird im Rundlauf

Aerodynamic efficiency η_{aero} is computed from the measured total efficiency η_{tot} and the previous determination of the electromechanical efficiency η_{em}. $P_{el} - P_{0,sv}$ is the power consumed during the active flight. The almost constant power consumption $P_{0,sv}$ of the control servomotors given by U_{el} x I_{el} in the steady phase of the measurement amounts to about 5 W. U_0 is the velocity of the model.

ANIPROP

Ergänzungen zur möglichen Fragen

ANIPROP