

# „Eine richtige Theorie ist das Praktischste, was es gibt.“ \*)

Prolog zur Vorlesung „Theoretische Strömungslehre“

Prof. Dr. Steffen Risius – Fachhochschule Kiel

Wintersemester 2025/26 - Beginn: 16. September 2025

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

## Darum geht es in der Einführung zur Vorlesung

- Einige grundsätzliche Bemerkungen vorab. Ein historischer Versuch zu Beginn: **Schuberzeugung** bei den fliegenden Lebewesen – Flügel sind die „Triebwerke“ der Vögel.

Gibt es auch das Gegenteil: Können schwingende Tragflächen einem anströmenden Fluid auch Leistung entnehmen – so wie Propeller **Leistung aufbringen** und Windräder **Leistung entnehmen**?

## Kern der Theoretischen Strömungslehre: Die Lösung des Umströmungsproblems

- Die Lösung: das Geschwindigkeitsfeld (m/s) um einen Körper.
- Druck und Schubspannung (N/m<sup>2</sup>) des Fluids liefern die Kräfte und Momente auf diese Struktur. Zusammen mit der Relativbewegung auch den Leistungsaustausch (N m/s). Luft, Wasser, allgemein Newtonsche Fluide.
- Randbedingung: Körper werden immer tangential umströmt. „Fluidpartikel“ sind keine Schrotkugeln.
- Wie beschreibt man diese Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur? **Wo fängt man an???**

\*) F. W. Dörpfeld (1824-1893), Motto seines Buches *Grundlinien einer Theorie des Lehrplans*, Verlag C. Bertelsmann, Gütersloh 1873.  
*There is nothing as practical as a good theory.* - Quelle der Recherche: ChatGPT 5.

Bei der Lösung von Umströmungsproblemen geht es im Kern stets um das Ziel, die Reaktionskraft des Fluids auf einen darin bewegten Körper zu bestimmen. Die Erhaltungssätze für Impuls, Masse und Energie sind zu lösen. Es gibt dabei zwei wesentlich verschiedene Möglichkeiten:

### Die integrale Darstellung der Erhaltungssätze

... verwendet die Feldfunktionen

- Quelldichte  $\delta = \text{div } \mathbf{v}$  und
- Wirbeldichte  $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{v}$ .

Nach dem Fundamentalsatz der Vektoranalysis kann jedes Vektorfeld durch Potentiale mit den beiden Dichten dargestellt werden. Dabei beschreibt die Quelldichte die stoffliche Eigenschaft Kompressibilität. Die Wirbeldichte beschreibt die stoffliche Eigenschaft Viskosität.

Lösungsverfahren sind beherrscht von der globalen Diskretisierung der Feldfunktionen und ihrer Fernwirkung auf die Lösung.

### Die differentielle Darstellung der Erhaltungssätze

... verwendet die Stromdichten

- Massenstromdichte  $\rho \mathbf{v}$ ,
- Impulsstromdichte  $p\mathbf{n} + \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})$  und
- Energiestromdichte  $\rho \mathbf{v}(v^2/2 + e + p/\rho)$ .

Alle drei Flüsse bleiben stets erhalten und eignen sich deshalb für lokale Diskretisierung. Das sind numerische Verfahren: CFD (Computational Fluid Dynamics). Die stofflichen Eigenschaften bleiben bestehen neben der festen Zahl der Variablen.

Lösungsverfahren sind beherrscht von der lokalen Diskretisierung des Raumes. Nahwirkung der Flüsse überträgt Lösung auf benachbarte Gebiete.

## Integrale und differentielle Darstellung der Erhaltungssätze

$\mathbf{v}$  Geschwindigkeit,  $p$  Druck,  $\rho$  Dichte,  $e$  innere Energie

**Leonardo da Vinci**  
**Die Sintflut**



**Eine wichtige Feststellung:  
Die inkompressible\*) Strömung bis in den Unterschall hinein  
ist allein Wirbeldynamik.**

**\*) Geschwindigkeiten klein gegenüber Schallgeschwindigkeit**



**Über die Strömungsmechanik hinaus spielen wirbelförmige Strukturen eine bedeutende Rolle als Ordnungsmuster der Materie.**

The Whirlpool Galaxy — M51



HUBBLESITE.org

**Physikalische Eigenschaften:**

- Schubviskosität
- [Druckviskosität]
- Wärmeleitung
- Kompressibilität

**Dynamik: Erhaltungssätze**

- Impuls
- Energie
- [Masse]

**Newtonsches Fluid**

- Kontinuum  $\rho(\vec{x}, t)$ ,  $p(\vec{x}, t)$ ,  $\vec{v}(\vec{x}, t)$  -

**Thermodynamik**

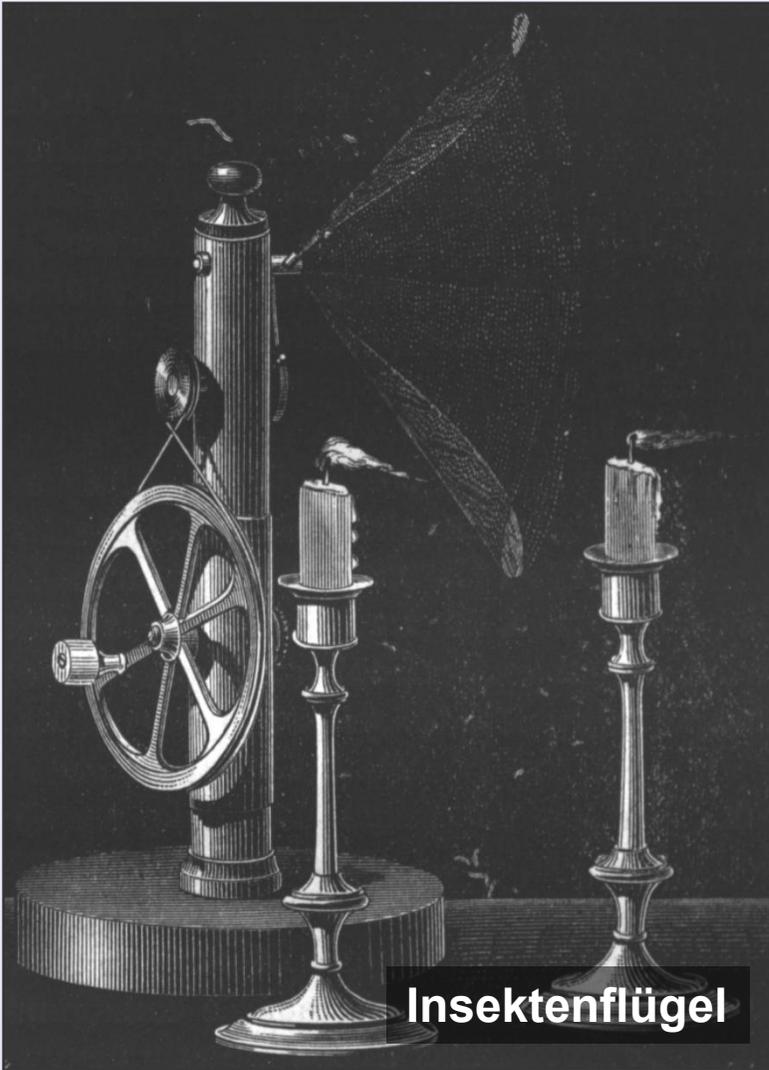
**Kinematik:  
Differentialgeometrie**

**Feldeigenschaften:  
Vektoranalysis**



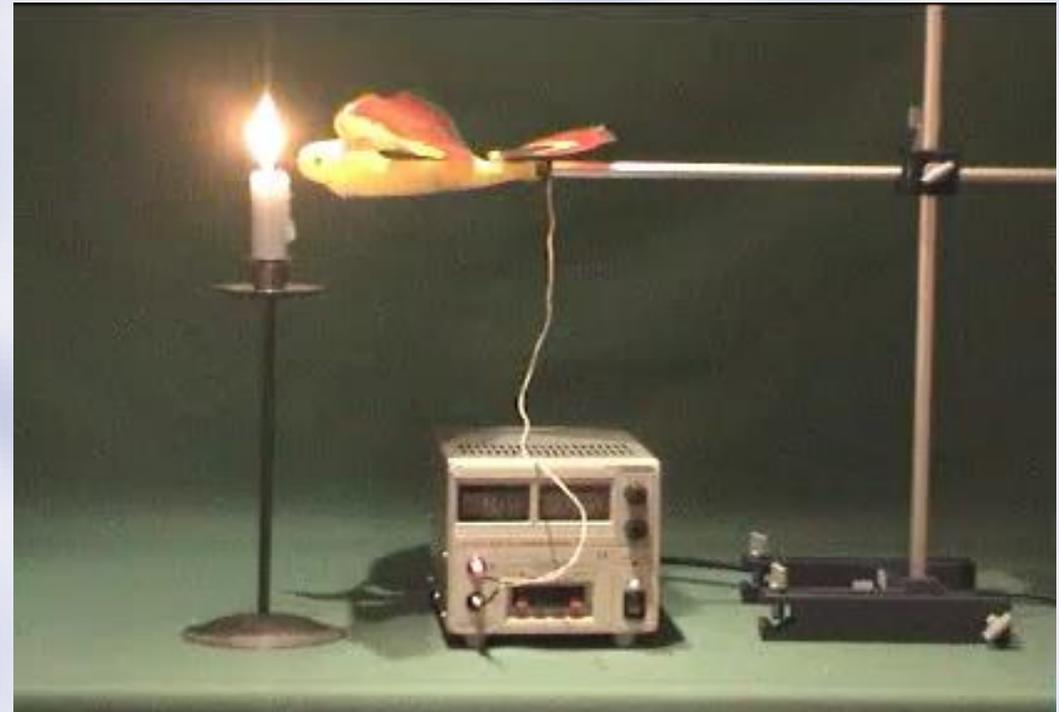
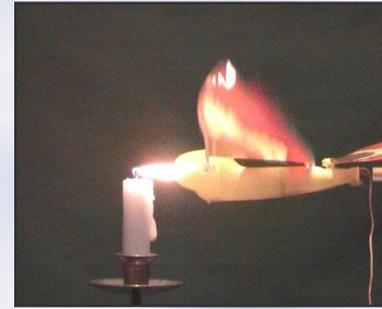
*Und über alle Ordnung hinaus  
die Unordnung:*

*Turbulenz!*

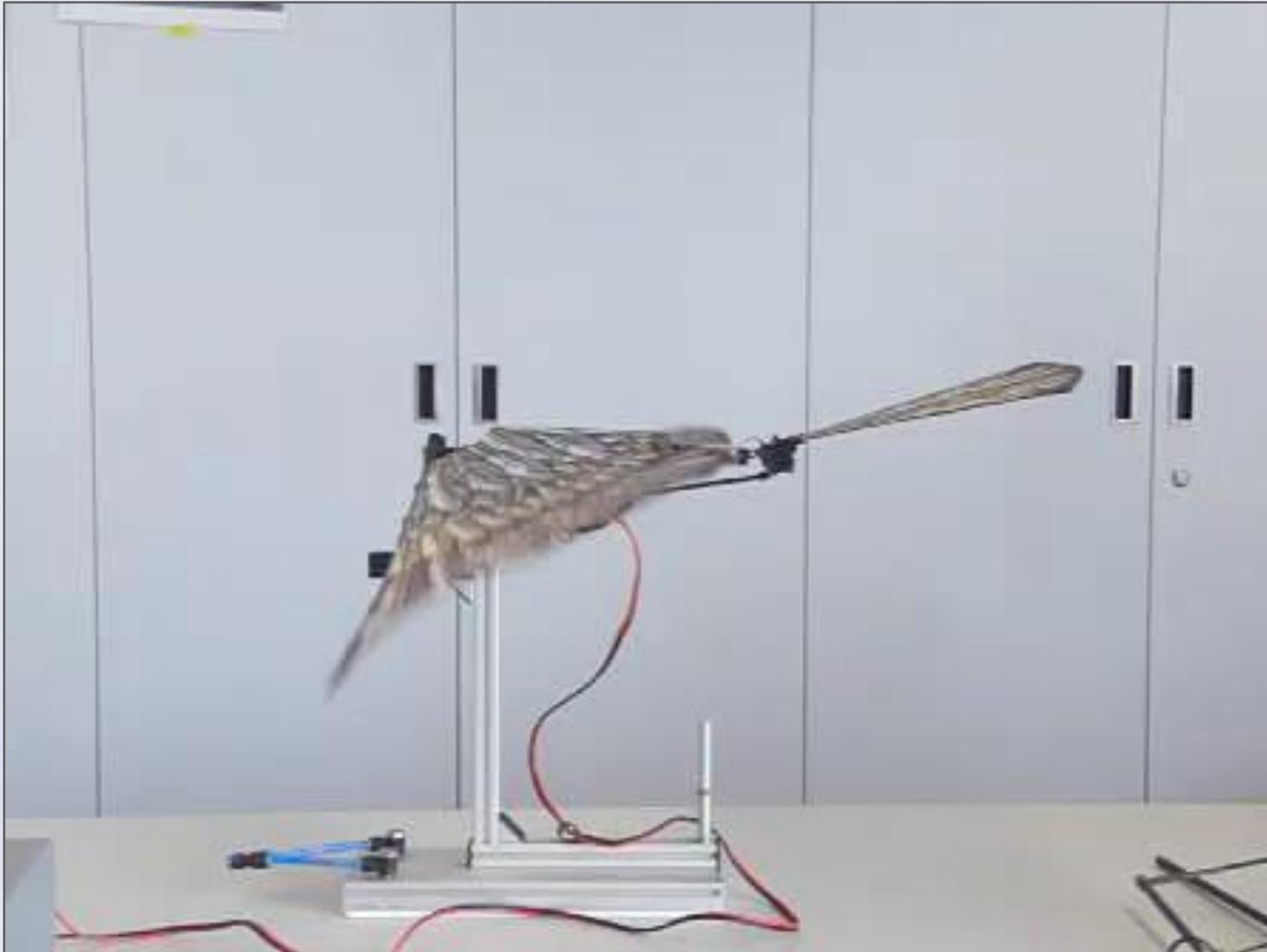


Insektenflügel

Étienne-Jules Marey,  
*La Machine Animale*  
Éd. F. Alcan, Paris 1891. Fig. 84



Künstlicher Vogel mit Elektromotor



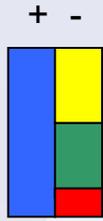
## Passive Torsion

Verformung unter dem Einfluss der Luftlast auf dem Flügel.

Maximale positive Verdrehung beim Durchgang des Flügels durch die Mittellage des Schlagens.

Zur Messung der Schubkraft sitzt die Halterung auf einem Luftkissen.

## Künstlicher Vogel mit Elektromotor – Zeitlupe 8-fache Dehnung Schlagen und Drehen



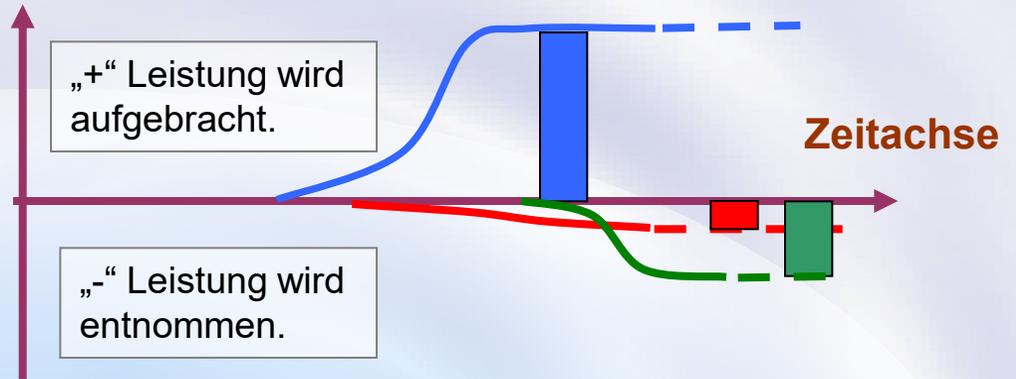
**Leistungsbilanz  
passive Torsion**



**Verlustleistung,  
abgegeben an  
ungeordnete  
Bewegung der Luft**



**Leistung**



„+“ Leistung wird  
aufgebracht.

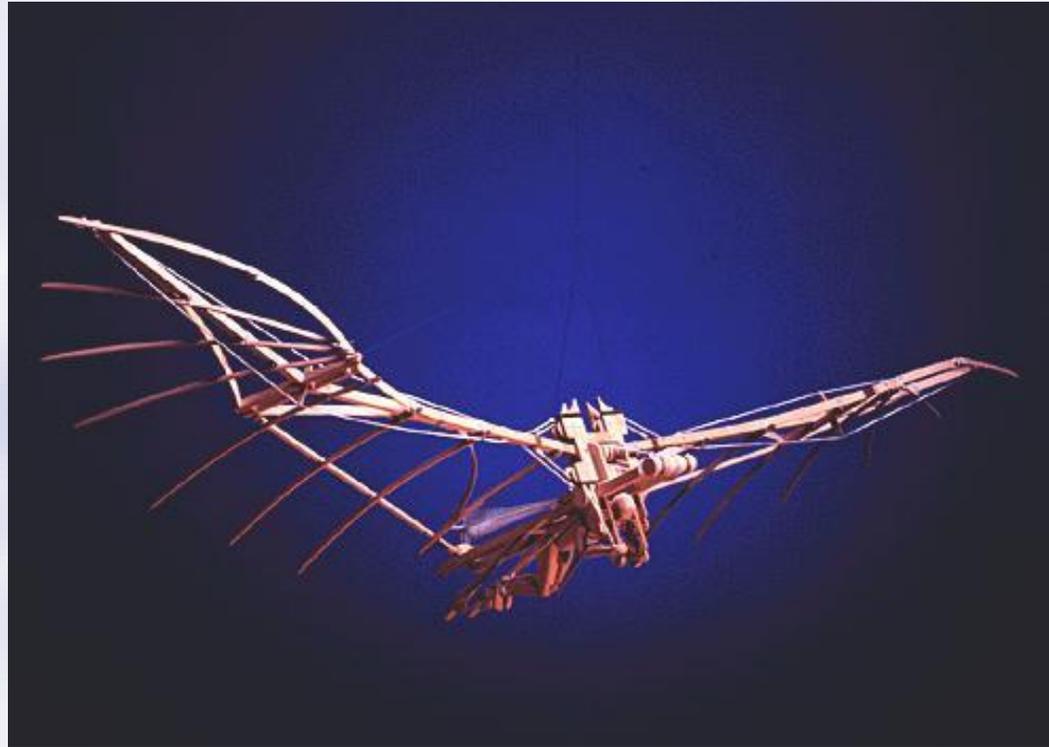
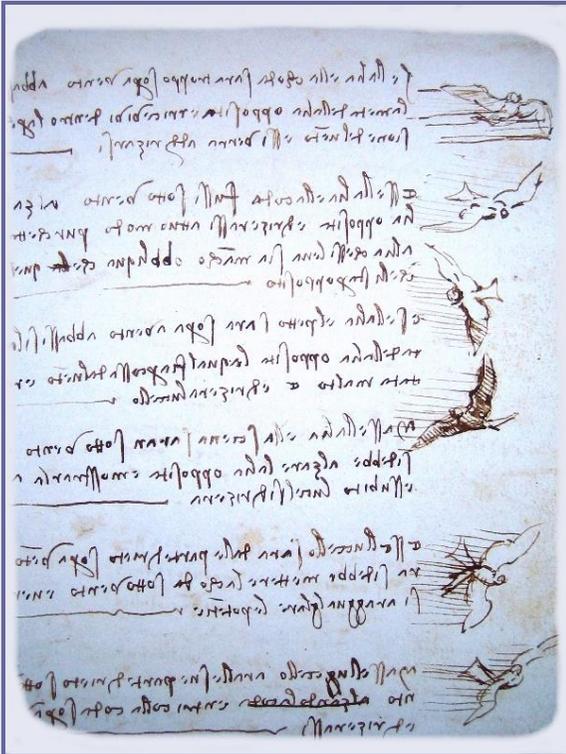
„-“ Leistung wird  
entnommen.

**Freiheitsgrade der Bewegung:**

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

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

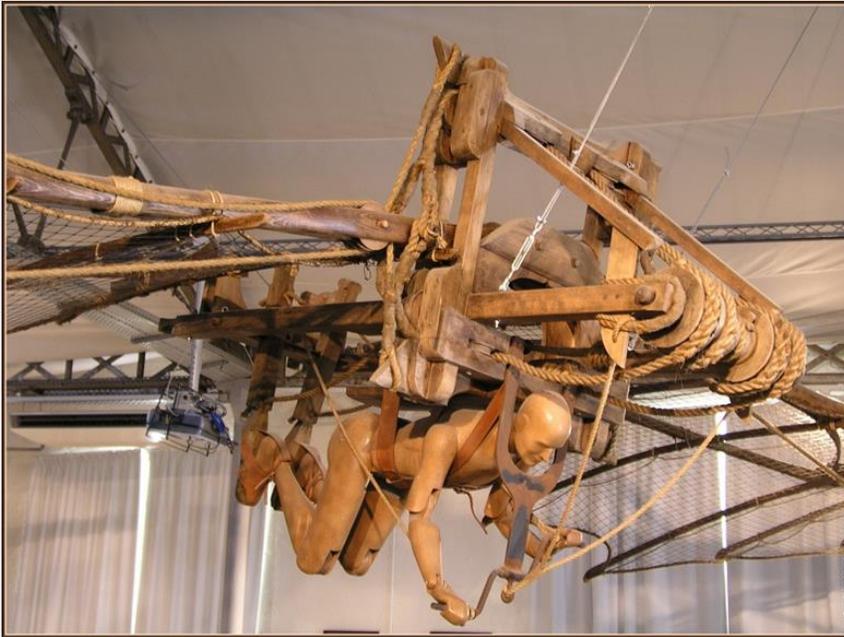
## Leistungsbilanz für die Erzeugung der Schubkraft bei passiver Torsion (allein durch Elastizität des Flügels)



Quelle: Instituto e Museo di Storia della Scienza, Florenz

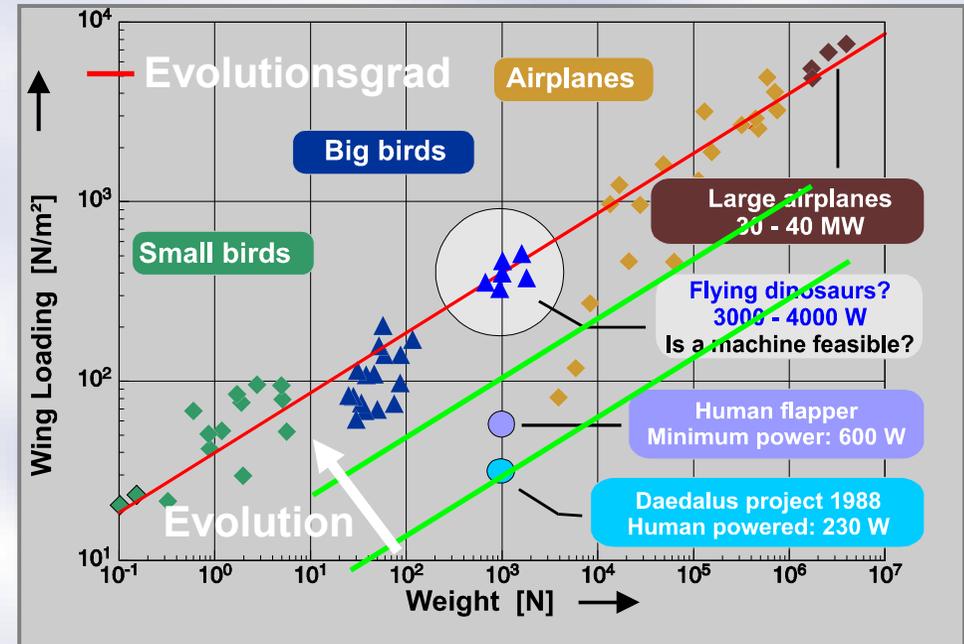
**Leonardo da Vinci (1452-1519)** hat umfangreiche Studien zum Schwingenflug erstellt. Seine Entwürfe sind nachgebaut worden und funktionieren – im Prinzip. Unsere heutigen Kenntnisse von den Kräften Auftrieb und Widerstand bei der Umströmung von Tragflächen sind erst zu Anfang des 20. Jahrhunderts entstanden.

## Der Traum vom Fliegen



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

**Könnte diese Maschine mit Muskelkraft jemals fliegen? – Nein!**

**Wie ordnet man fliegende Lebewesen und Fluggeräte ein?**

**Otto Lilienthal (1848-1896)**

**1889: Veröffentlichung seines Buches „Der Vogelflug ...“**

**1891: Beginn der erfolgreichen Flugversuche mit seinen Gleitern**

**1894: Erste (vergebliche) Versuche mit Schubkraft**



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

“Alles Fliegen beruht auf Erzeugung von Luftwiderstand,  
alle Flugarbeit besteht in Überwindung von Luftwiderstand.“

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

„Wenn ein Körper sich durch die Luft bewegt, so werden die Luftteile vor dem Körper gezwungen, auszuweichen und selbst gewisse Wege einzuschlagen. Auch hinter dem Körper wird die Luft in Bewegung geraten.

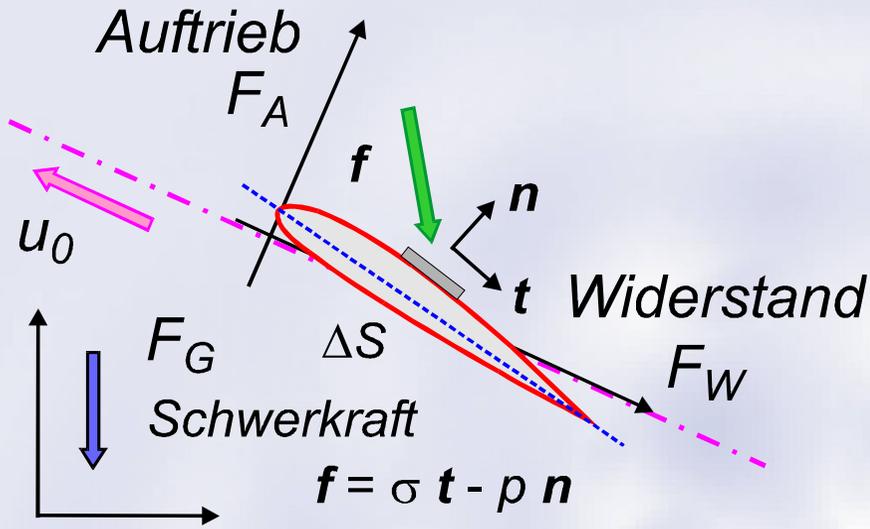
Die hinter dem Körper befindliche Luft wird teilweise die Bewegungen des Körpers mitmachen, und außerdem werden gewisse regelmäßige Wirbelbewegungen in der Luft entstehen, welche sich noch eine Zeit lang auf dem von dem Körper in der Luft beschriebenen Wege vorfinden werden und erst allmählich durch die gegenseitige Reibung aneinander zur Ruhe kommen.

**Der vorher in Ruhe befindlichen Luft müssen alle diese Bewegungen, die für das Hindurchlassen des Körpers durch die Luft nötig sind, erst erteilt werden; und deshalb setzt die Luft dem in ihr bewegten Körper einen gewissen meßbaren Widerstand entgegen, zu dessen Überwindung eine gleich große Kraft gehört.“**

## Plausible Erklärung des Widerstands

Otto Lilienthal, Luftfahrtpionier und „Großmeister“ der Fliegekunst

$$\vec{F}_{fluid} = \begin{bmatrix} F_W \\ 0 \\ F_A \end{bmatrix}$$



Kraftdichte $f$ Komponente	aus Druck $p$	aus Schubspannung $\sigma$
in Bahnrichtung	Effekt klein	(bahnbezogener)W iderstand $F_W$
quer zur Bahnrichtung	(bahnbezogener) Auftrieb $F_A$	Effekt klein

### Kinematische Betrachtung

Die Reaktionskraft  $F$  des Fluids wird in eine Komponente in Richtung der Trajektorie (Widerstand) und eine senkrecht dazu (Auftrieb) zerlegt.

Die vom mechanischen System aufgebrauchte Systemkraft ist  $-F$ .

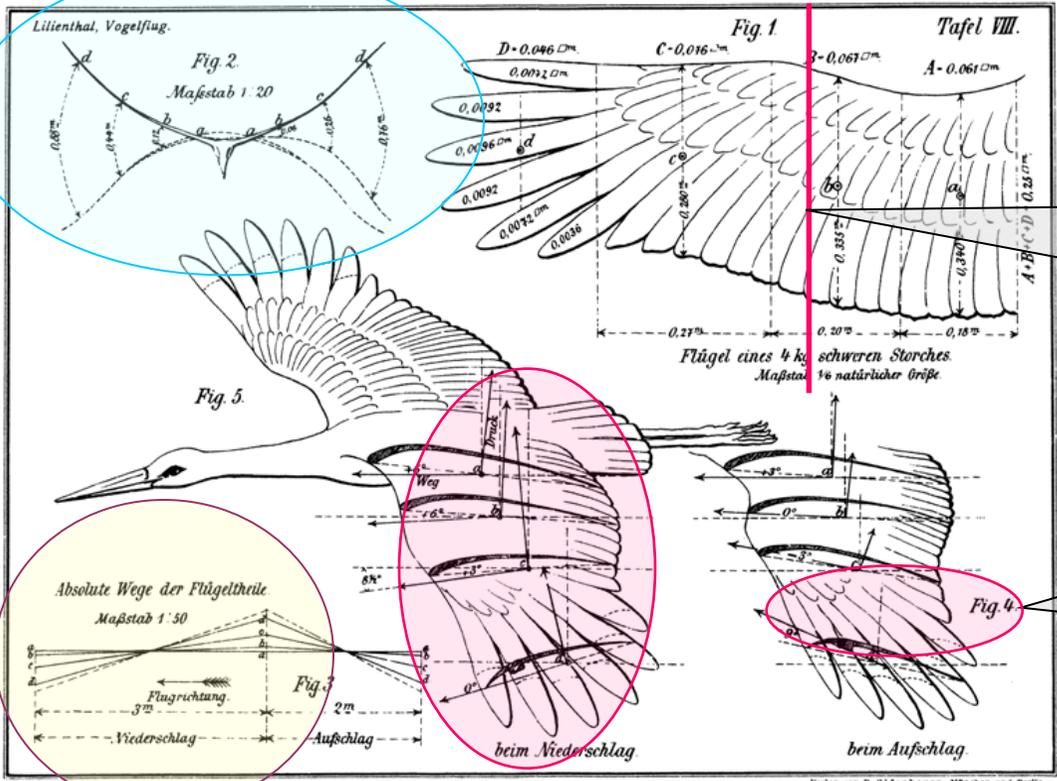
### Physikalische Betrachtung

Die örtliche Reaktionskraft des Fluids lässt sich aufteilen in eine Komponente senkrecht zur Oberfläche, den Druck  $p$ , und eine parallel dazu, die Schubspannung  $\sigma$ .

Beide gemessen in der Einheit  $N/m^2$

## Reaktionskraft der Strömung – Kinematische Betrachtung Auftrieb und Widerstand

# Lilienthals Beobachtungen



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

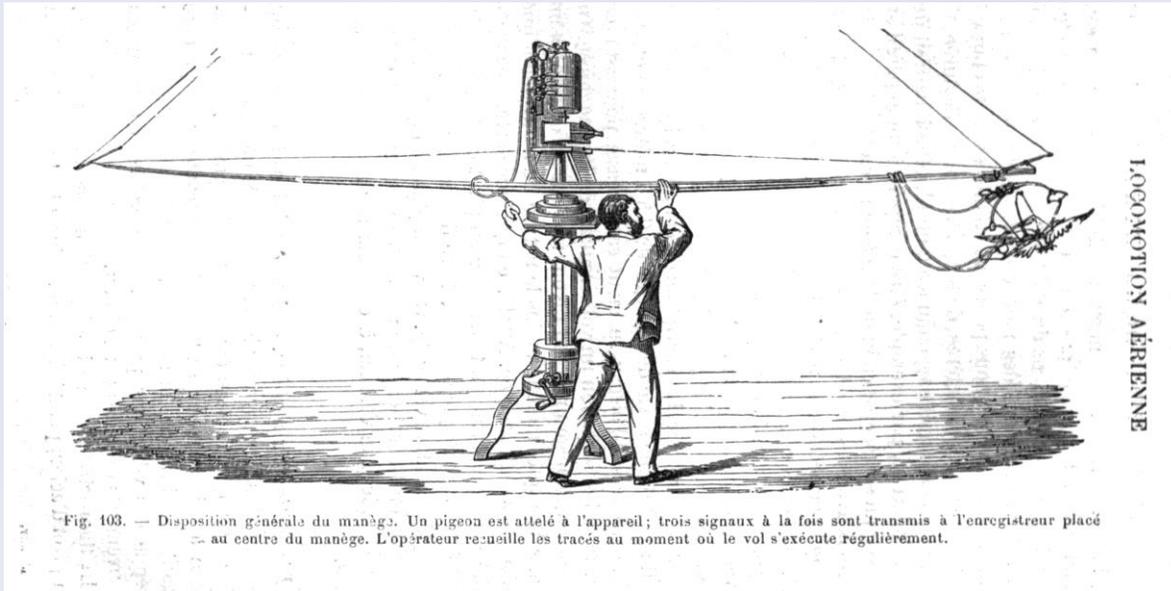
Die **Phasenvoreilung** des Schlages vor der Drehung: Der größte positive Anstellwinkel stellt sich beim Aufschlag ein.

Wesentlich: Das **Amplitudenverhältnis** von Schlägen zu Drehen.

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

## 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)



## Étienne-Jules Marey

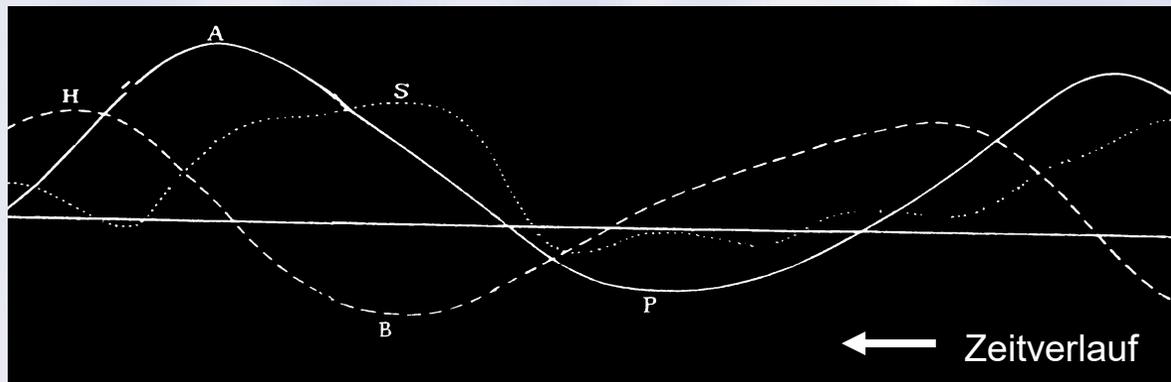
Französischer Physiologe (1830-1904) in Paris.

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)*

## Die Entwicklung von SmartBird (2009 – 2011): W. Send und Team



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



## SmartBird auf der «Hannovermesse» 2011

Waage für Auftrieb, Widerstand und Schub (unten rechts)

Windkanal 1.6 m x 2.4 m, 5 m/s (oben rechts)



## SmartBird auf der «Hannovermesse» 2011

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

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

# SmartBird Team – Hannovermesse\* 2011



Kristof und Agalya Jebens

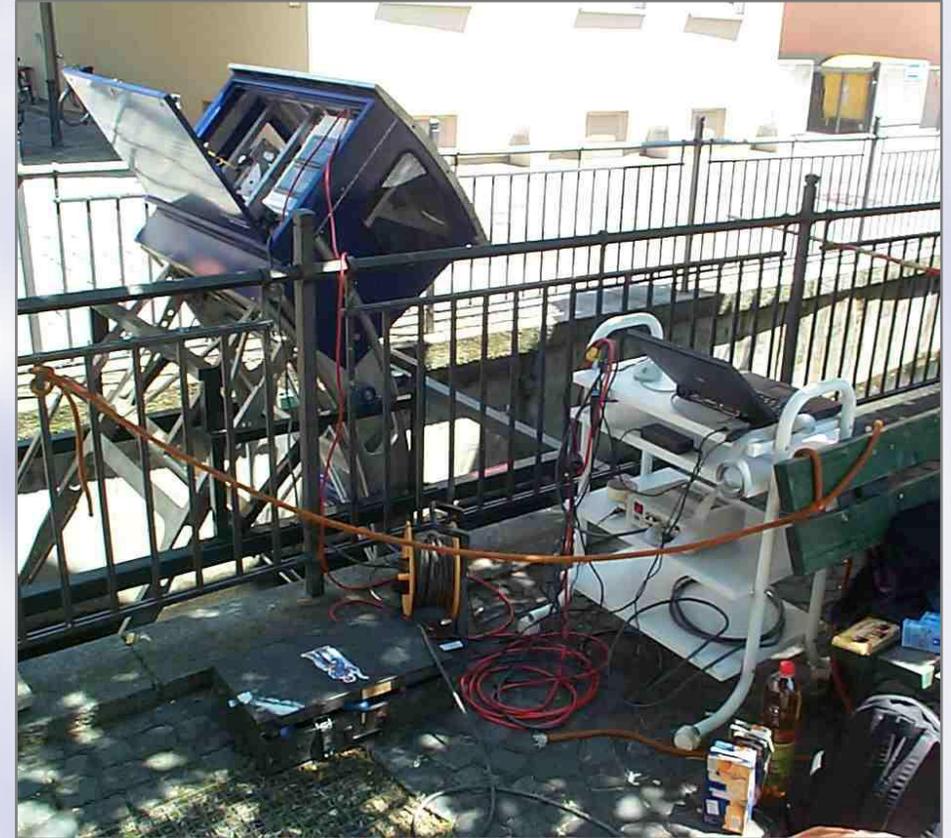
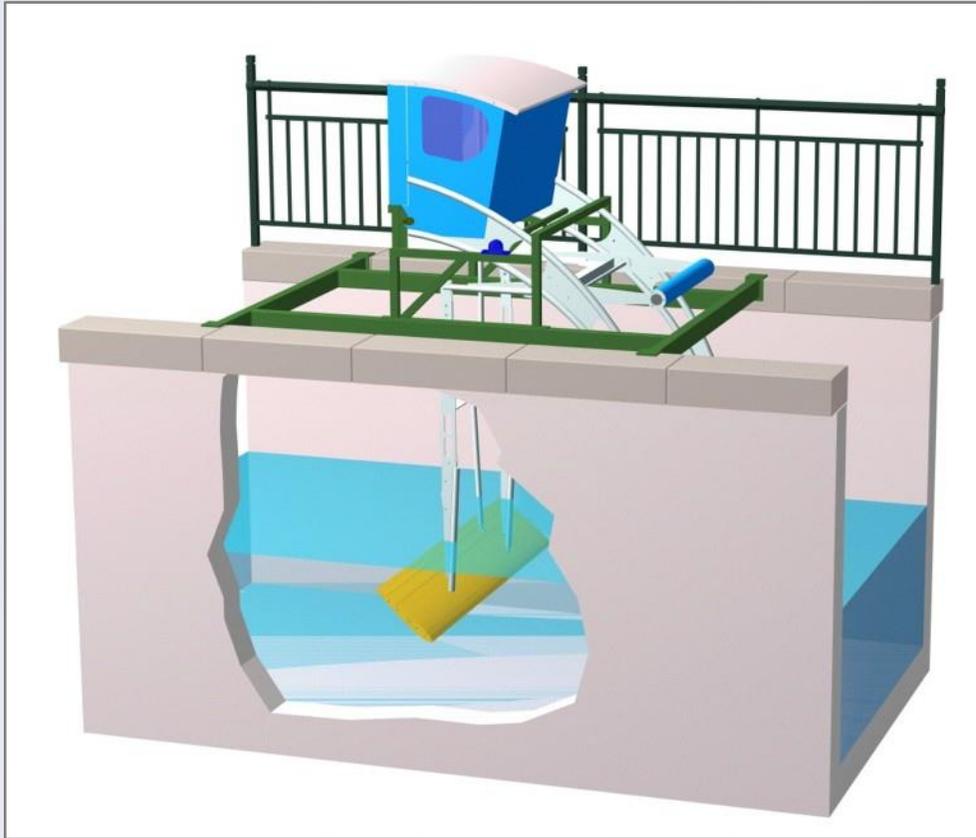
*Electronics und Integration*

Günter und Rainer Mugrauer  
*Design and Manufacturing*

Markus Fischer, Festo AG  
*Team Leader*

Wolfgang Send  
*Concept, Theory  
and Experiments*

\* **Hannovermesse: Annual International Industry Fair, Hannover, Germany**



**Bild rechts: Während der Leistungsmessungen am 11.09.2004; Flügel ist gerade ausgeklappt.  
Auf 2 Jahre begrenzte wasserrechtliche Genehmigung: Mittlerer Lech im Zentrum von Augsburg**

## **ANIPROP HFG3: Entwurf 2003 mit CAD – Versuch 2004-2006**

**Auslegung 1 kW bei 2 m/s, Spannweite 1.9 m, Flügeltiefe 0.4 m, Hubhöhe 0.6 m**



Im eigenen Licht!



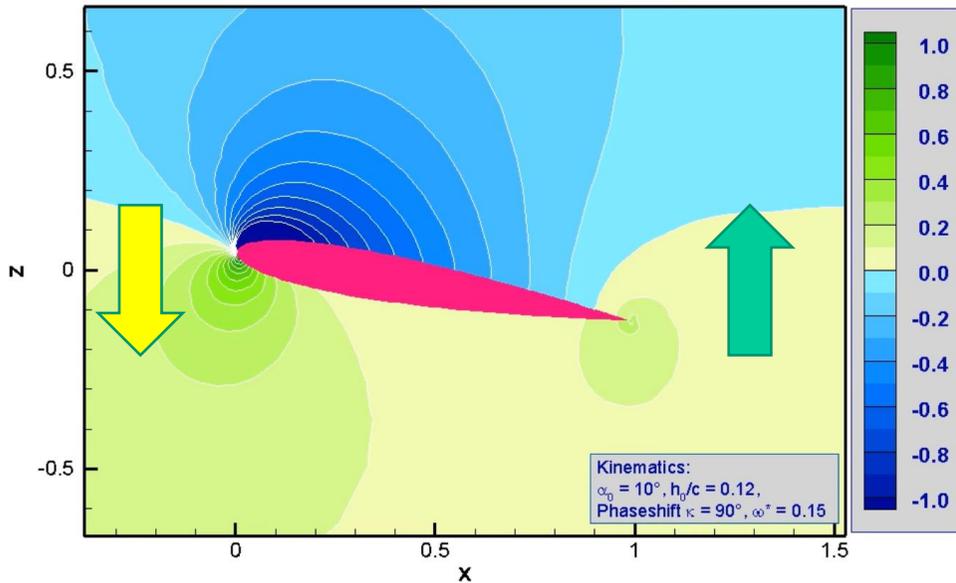
## Hubflügelgenerator in Augsburg Mittlerer Lech (2004-2006)

Die welterste Installation in einem Gewässer!  
Nennleistung 1 kW bei 2 m/s Fließgeschwindigkeit

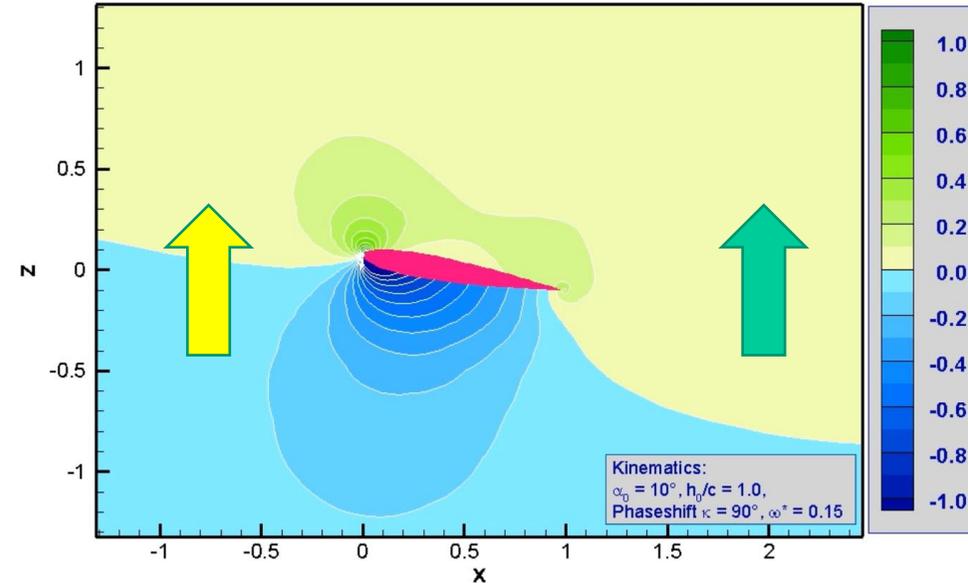
### Der Hubflügelgenerator ANIPROP HFG3

Erzeugung regenerativer Energie aus Flüssen als Anwendung der Physik des Flugzeugflatterns mit der perfekten Kinematik des Schwingenflugs von Insekten.

**Profile NACA0012 - Power Mode**  
Contour lines of the pressure coefficient  $c_p$



**Profile NACA0012 - Thrust Mode**  
Contour lines of the pressure coefficient  $c_p$



Richtung der Systemkraft –  
Gegenkraft zur Fluidkraft

**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.

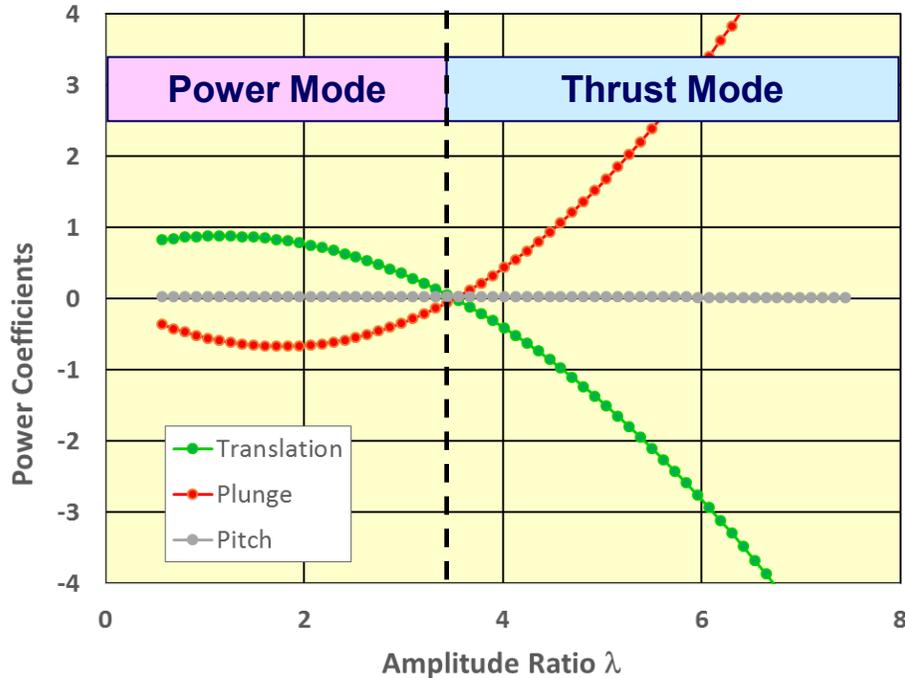


Anfängliche Richtung der  
Bewegung ( $t = 0$ , Phase  $0^\circ$ )

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

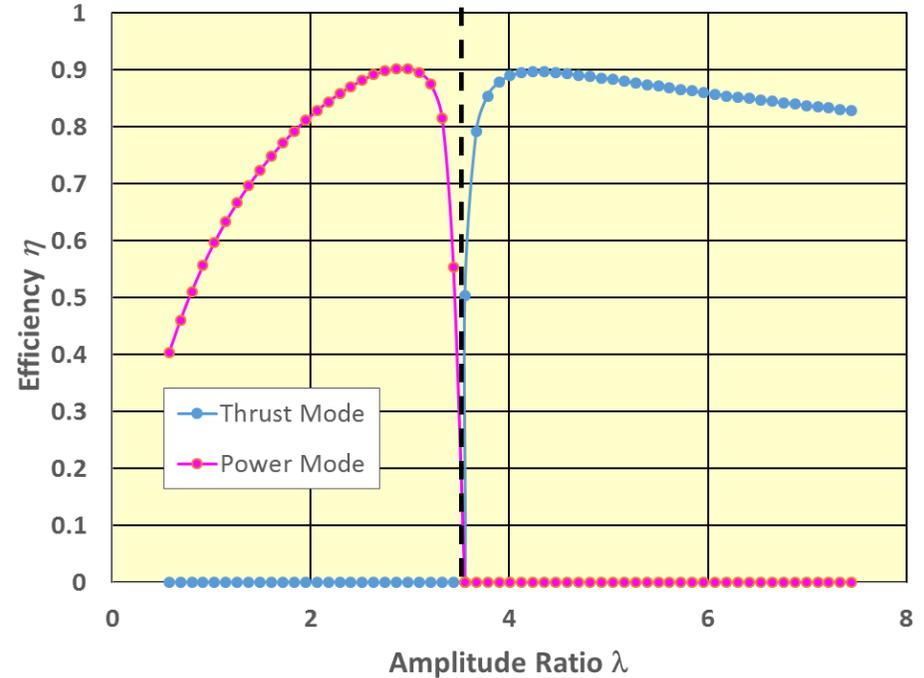
### Power Coefficients

NACA0012 - reduced frequency  $\omega^* = 0.15$ , pitch axis 0.25 c



### Aerodynamic Efficiency

NACA0012 - reduced frequency  $\omega^* = 0.15$ , pitch axis 0.25 c



## Amplitudenverhältnis $\lambda$ als entscheidender Parameter

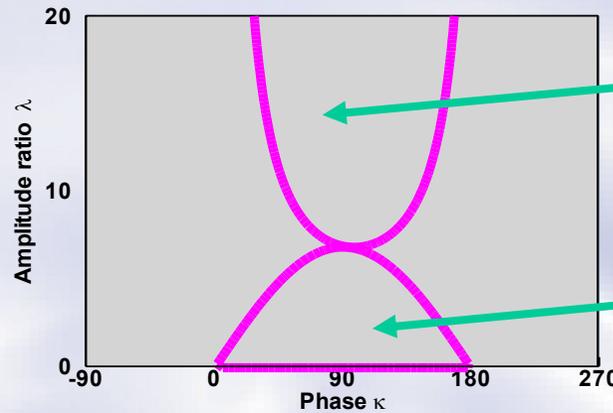
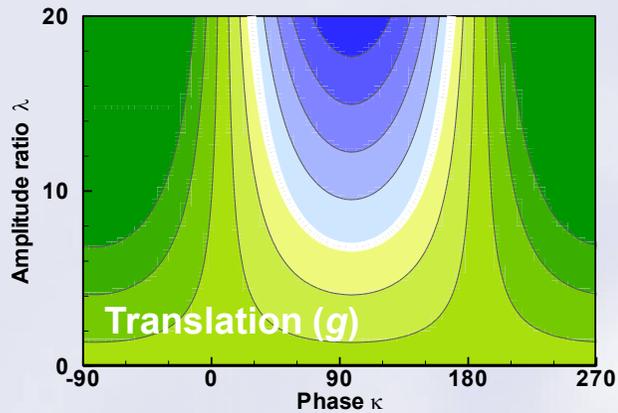
Leistungsentnahme (Power Mode): kleines  $\lambda$  - d.h. große Drehung, kleiner Schlag

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



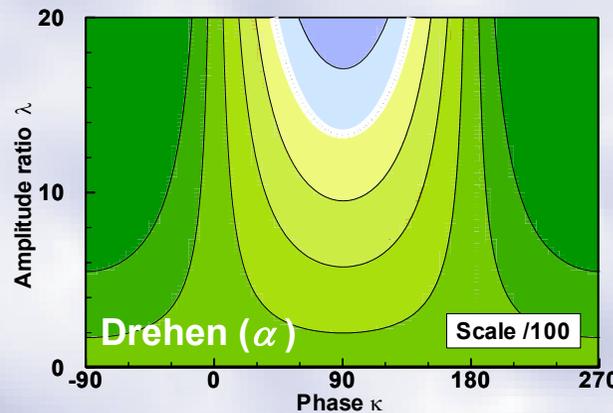
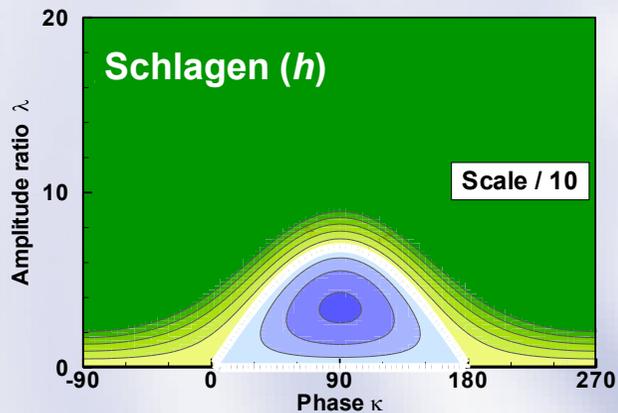
Leistung wird entnommen am Freiheitsgrad Translation.

- 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  $90^\circ$ )  
(Schlagen vor Drehen)

Vertikale Achse:  
Amplitudenverhältnis  $\lambda$   
Schlagen zu Drehen)

Blau: Leistung entnommen  
Grün: Leistung eingespeist



Mittlere Leistungsbeiwerte  $\langle c_{\Pi,x} \rangle$  mit  $x = \{g, h, \alpha\}$

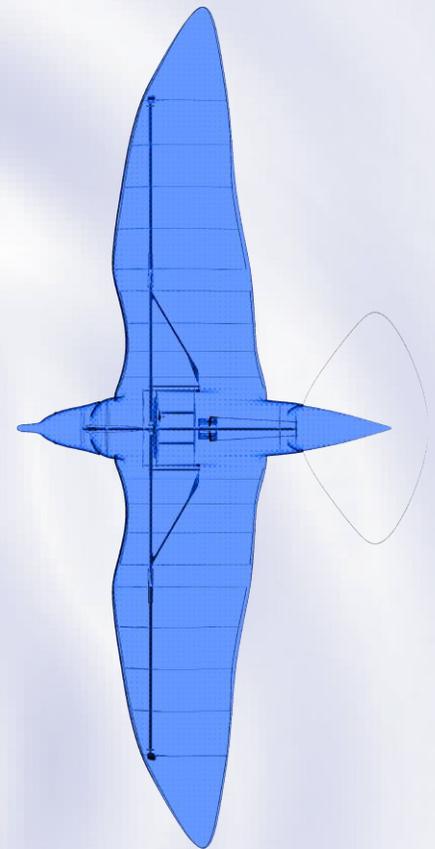
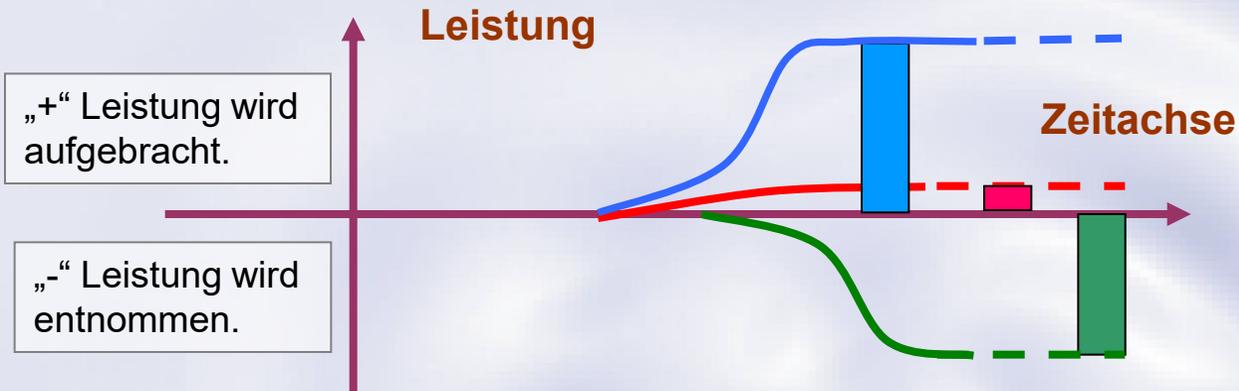
Theorie der schwingenden Platte von 1935/36 -  $\omega^* = 0.15$ ,  $\xi_p = 0.25$





## Aktive Torsion

Durch eine Hohlwelle wird die Leistung in die Flügelspitze übertragen.



### Freiheitsgrade der Bewegung:

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



**Leistungsbilanz  
aktive Torsion**

**Verlustleistung, abgegeben  
an ungeordnete Bewegung  
der Luft**

Vergleich 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)

„Eine richtige Theorie ist das Praktischste, was es gibt.“

... und durch eine falsche oder unvollständige Theorie kann man auch einmal Millionen Euro von Fördergeldern im wahrsten Sinne des Wortes „versenken“ ...

If we limit ourselves to considering the steady-state solution only, the equation simplifies to:

$$U \frac{\partial}{\partial x} (AU^2 \rho) = -\rho g UA \frac{\partial h}{\partial x} - UP_{er} \tau_0 - P_x A \quad (10)$$

**Nein, nur die instationäre Lösung liefert die richtige Leistungsausbeute!**



ELSEVIER

Applied Ocean Research 26 (2004) 198–204

Applied Ocean  
Research

[www.elsevier.com/locate/apor](http://www.elsevier.com/locate/apor)

Assessing the potential of a simple tidal channel to deliver useful energy

I.G. Bryden<sup>a,\*</sup>, T. Grinsted<sup>b</sup>, G.T. Melville<sup>a</sup>

<sup>a</sup>The Robert Gordon University, Aberdeen, Scotland, UK

<sup>b</sup>The Engineering Business Ltd, Riding Mill, Northumberland, UK

Received 16 May 2003; revised 22 April 2005; accepted 27 April 2005

Available online 5 July 2005

# Projekt „Stingray“

(aus einem britischen Parlamentsbericht Oktober 2003)

**Q2 1997 Q3 2001 - 384 £k**

Development of tidal stream technology, Smart award, development of Stingray concept, search for partners

**Q3 2001 Q1 2002 - 260 £k**

Stingray Phase 1- Feasibility Study

**Q1 2002 Q4 2002 - 1,972 £k**

Stingray Phase 2- Design, build, install, operate, recover and analyse 150kW demonstrator

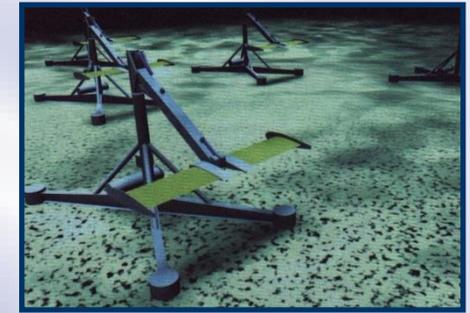
**Q1 2003 Q2 2003 - 682 £k**

Stingray Phase 2 extension for further analysis, time-critical Phase 3 items

**Q2 2003 Q4 2003 - 2,887 £k**

Stingray Phase 3—Modifications, reinstallation, operation and analysis of 150kW demonstrator

**Total funding to date 6,185 £k (~9.09 Mio. EUR)**



## Stingray Comes Home

Following the full decommissioning of the Shetland test site and completion of a post trial seabed survey, the Stingray demonstrator has been returned to North East England.

"This marks the end of the demonstration project - we have shown that the technology is feasible, validated our modelling and fully investigated the environmental impact of Stingray" ...

However, **EB** alone cannot fund such a project and after a thorough review **has put a hold on future development of Stingray until there are clear indications that the level of investment is likely to yield a satisfactory return for EB and any partners.**

"This has been a difficult decision but without a clear route to profitability in the next stage of the programme, **EB cannot sustain continued development of Stingray at this time**" - Tony Trapp, MD.

*EB-Firmenzeitschrift "Current Times" – Ausgabe 24, November 2004*

**„Stingray“ 150 kW (aber nur 90 kW erzielt)**  
**Engineering Business (England) - Projekt Mitte 2004 eingestellt**