

# DER INTEGRIERTE SCHLAGFLÜGEL – Erprobung eines Modells mit zwei Flügeln

Karl-Heinz Helling  
Modellflugclub Rossendorf e. V.  
Bautzner Landstr. 26, 01454 Radeberg /OT Rossendorf  
Tel. 0351 – 2 68 06 77, e-mail: mfcf@fz-rossendorf.de

## ÜBERSICHT

Die Entwicklung des Integrierten Schlagflügels wird in Theorie und Praxis vorgestellt. Für die Erprobung des Prinzips habe ich insgesamt 9 Modelle konzipiert und zum Teil in der Praxis getestet. Zunächst entwickelte ich Modelle mit nur einem Flügel. Diese hatten den Nachteil, dass der Rumpf sich nicht auf einer geraden Flugbahn bewegt, sondern „tanzt“, wenn der Flügel schlägt. M. F. Neef und D. Hummel lieferten mit ihrer Veröffentlichung 2001 [4] die theoretische Basis für meine aktuelle Lösung. Ich erkannte zwei im Gegentakt mit Hub/Drehbewegung schlagende Flügel liefern auch ohne Regelung immer konstanten Auftrieb. Dieses Prinzip habe ich mit dem Modell HE 209 umgesetzt und erfolgreich erprobt. So verhindern zwei übereinander angeordnete Schlagflügel das „Tanzen“ des Rumpfes.

## 1 Der Anstoß zu dieser Arbeit

Als es Paul Mac Cready und seiner Mannschaft 1979 gelang, mit dem Muskelkraftflugzeug Gossamer Condor eine Acht um eine Meile zu fliegen, und mit dem Gossamer Albatros gar den Ärmelkanal zu überqueren, war ich hellauf begeistert. 1988 flog der am MIT gebaute Daedalus sogar 115 km über die Ägäis, Bild 1.



BILD 1: Der am MIT gebaute Daedalus88 fliegt 1988 muskelkraftgetrieben 115km über die Ägäis

Meine Gedanken kreisten damals um das Problem, ob es auch mit weniger als 200-300W Antriebsleistung ginge.

Größere, untersetzte Propeller steigern den Wirkungsgrad, da die von ihnen erfasste Luftsäule mit größerem Querschnitt nicht so stark beschleunigt werden muss. Der Vergrößerung sind aber durch Masse, Getriebe, Reaktionsmoment und Fahrwerkshöhe Grenzen gesetzt. Die Reibung der beschleunigten Luftsäule an der umgebenden Luft und am Rumpf und die Drallverluste führen bei kleinen Propellern dazu, dass bis zu 50% der zugeführten Leistung als Reibungswärme verloren gehen, obwohl gute Propeller selbst Wirkungsgrade um 80% erreichen.

## 2 Die alternative zum Propeller

### 2.1 Klassische Schlagflügel

Beim Schlagflügel der Vögel ist der erfasste Strömungsquerschnitt bedeutend größer, da er die gesamte Spannweite nutzt.

Wie kommt der Vortrieb beim Flügelschlag der Vögel zustande? Sie verdrehen während des Abschlages um ihre Schultergelenke die Flügel längs der Spannweite mit der Profilnase nach unten so, dass zwar der Auftrieb in der Summe konstant bleibt, aber zur Flügelspitze hin durch die Neigung der Luftkraft in Flugrichtung eine Vortriebskomponente resultiert. Damit beim folgenden, in der Regel langsameren Aufschlag, kein Abtrieb entsteht, wird der Flügel in die Gegenrichtung verdreht, d. h. mit der Profilnase nach oben, wodurch nur ein kleiner zusätzlicher Widerstand entsteht, der Auftrieb aber etwa konstant bleibt. Vortrieb entsteht also nur beim Abschlag!

Erste eigene Gedanken gingen 1986 zunächst in diese Richtung.

Die Kinematik des Flügelschlages der Vögel mit ihrem torsionsweichen Flügeln lässt sich aber nicht mit der heute üblichen Profiltreue und Oberflächengüte verwirklichen.

An diesem Umstand sind alle bisherigen Versuche,

Schlagflügel zur Vortriebserzeugung einzusetzen, gescheitert. Dazu gehören u. a. auch die in den 30er Jahren von Lippisch angestellten Versuche mit reinen Triebsschwingen, die durch einen Benzinmotor angetrieben wurden. Der Wirkungsgrad war aber schlechter als der eines gut ausgelegten Propellers.

## 2.2 Integrierter Schlagflügel

Von der Fluke eines Wales inspiriert, kam ich auf die Idee, den Flügel am Rumpf nicht mehr direkt zu befestigen, sondern an einem Lenker oder einer Geradführung auf und ab zu schlagen. Damit war es möglich, einen durchgehenden starren Flügel ohne Schultergelenke zu benutzen. Dieses Prinzip des Integrierten Schlagflügels ließ ich mir 1990 patentieren [1], Bild 2.

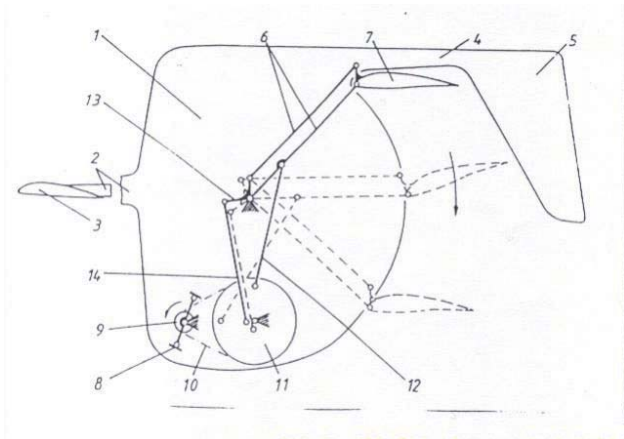


BILD 2: Prinzip des Integrierten Schlagflügels [1]

Die Patentzeichnung basiert auf einem in Entenkonfiguration ausgelegten Muskelkraftflugzeug, wie es mir damals vorschwebte. Bild 3.

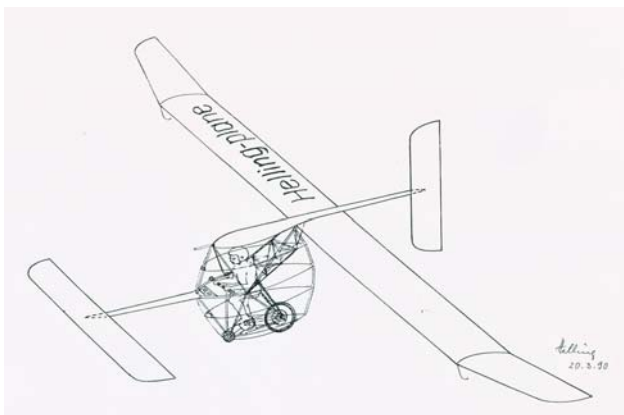


BILD 3: Muskelkraftflugzeug mit Federspeicher

Die Flugzeugindustrie zeigte kein Interesse an diesem Antriebskonzept, da es nur im unteren Geschwindigkeitsbereich sinnvoll einsetzbar ist. Lediglich der damalige Technische Leiter der HOFFMANN AIRCRAFT (jetzt DIAMONT AIRCRAFT), fand das Prinzip bestechend und

machte mir Mut zur Weiterentwicklung.

Der Integrierte Schlagflügel erfasst einen gegenüber dem Vogelflügel nochmals verdoppelten Strömungsquerschnitt, Bild 4.

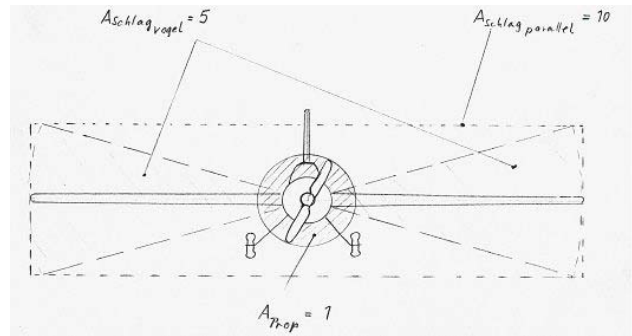


BILD 4: Die Strömungsquerschnitte von Propeller, Vogelflügel und integriertem Schlagflügel

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass die elliptische Auftriebsverteilung und damit der geringst mögliche induzierte Widerstand in allen Schlagphasen erhalten bleibt. Beim Schlag der Vogelflügel ist die Auftriebsverteilung in der Mitte eingesattelt, was einen erhöhten induzierten Widerstand verursacht. Außerdem sind beim integrierten Schlagflügel, im Gegensatz zum Verstellpropeller, bei welchem nur ein Flügelschnitt mit optimaler Steigung arbeitet, alle Flügelschnitte exakt an das Flugregime anpassbar. Da die instationäre Strömung auch höhere Auftriebsbeiwerte erlaubt, ist zudem eine große Streckung sinnvoll.

## 3 Erprobung im Modell

### 3.1 Erster erfolgreicher Flug

Bei meinem ersten Modell HE101 von 1988, Bild 5, das heute wie auch die weiteren realisierten Modelle im Besitz des Lilienthalmuseums in Anklam sind, habe ich alle bis dahin gewonnenen Erkenntnisse umgesetzt.

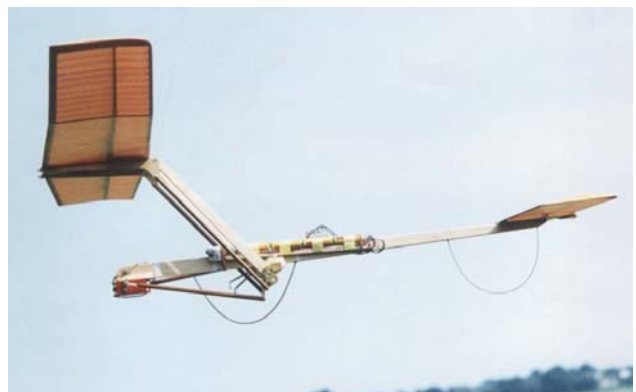


BILD 5: HE101

Neben dem konstruktiven Problem, den Einstellwinkel während des Schlages zu ändern und dem Problem, einen geeigneten Kraftspeicher für den Flügelaufschlag einzusetzen ist die bis heute nur unvollständig geklärte Frage, wie die für verschiedene Flugregime optimalen Bewegungsabläufe von Schlag- und Drehamplitude exakt verlaufen müssen, um immer einen konstanten Auftrieb zu erzeugen.

Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, „tanzt“ der Rumpf auf und ab. In diese Betrachtung sind auch die Massenträgheitskräfte mit einzubeziehen!

Der Kraftspeicher für den Flügelaufschlag ermöglicht einen kleineren Motor und verhindert ein negatives Antriebsmoment in dieser Schlagphase und damit auch einen gegenüber dem Abschlag schnelleren Aufschlag. Um einen großen Vortrieb beim Abschlag und nur einen geringen zusätzlichen Widerstand beim Aufschlag zu erhalten, muss der Abschlag bei diesem Konzept schneller erfolgen als der Aufschlag. Beim Modell HE101, HE105 und HE107 habe ich das mittels überdimensioniertem Feder-speicher gelöst.

### 3.2 Weitere Modelle

Nach dem HE101 habe ich 1993 das Modell HE202 konzipiert und im Rohbau fertig gestellt. HE202 ist ein Entenmodell mit 2 Schlagflügeln an einem gemeinsamen Lenker, Bild 6. Ich hatte dabei an ein Zubringerflugzeug für Kurzstreckenbetrieb gedacht, das Modell aber nicht vollendet, da es mir für den Anfang zu komplex erschien.

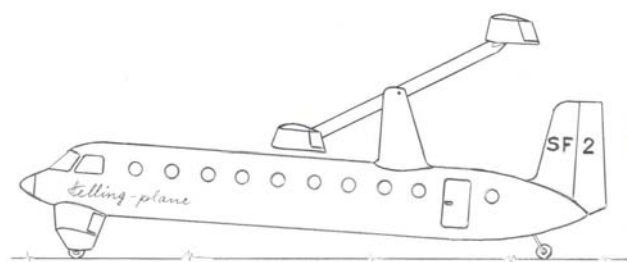


BILD 6: Enten-Kurzstreckenflugzeug HE202

Das Konzept erfordert zwar keinen Kraftspeicher, hat aber den Nachteil, dass der hintere Schlagflügel sich in der Nachlaufströmung des vorderen befindet.

Über weitere konzipierte und zum Teil gebaute Modelle mit einem Schlagflügel ist in den Vorträgen zur DGLR-Nachwuchstagung Braunschweig 2006 [2] und Berlin 2007 [3] berichtet. Die Erprobung des Modells HE108 hat ergeben, dass das „Tanzen“ des Rumpfes nur mit einer Konstantauftriebsregelung zu verhindern ist. Da auch die schnellste Rudermaschine als Stellglied des Regelkreises zu

langsam ist, habe ich das Konzept mit einem Schlagflügel wieder verlassen.

### 3.3 Das neue Modell HE209

#### 3.3.1 Theoretische Grundlagen

Nach den grundlegenden Versuchen von Hertel [4] und Clauss [5] setzen sich die Schlagflügelbewegungen aus einer harmonischen Bewegung senkrecht zur Flugrichtung und einer um ca. 90° Grad phasenverschobenen harmonischen Drehbewegung zusammen. Diese Kinematik wird als gekoppelter Parallel-Drehschlag bezeichnet. M. F. Neef und D. Hummel haben dazu Modellrechnungen durchgeführt [6]. Der zu erwartende Wirkungsgrad liegt mit einem symmetrischen Profil bei etwa 90%, Bild 7.

$\alpha_0$	$\bar{c}_L$	$\bar{c}_T$	$\eta$
0 (deg)	0.000	0.065297	0.89556
2 (deg)	0.258	0.065270	0.89540
4 (deg)	0.515	0.065158	0.89443
6 (deg)	0.769	0.064441	0.88945

BILD 7: Wirkungsgrad  $\eta$  sowie mittlerer Auftriebs- und Schubbeiwert  $c_L, c_T$  abhängig von  $\alpha_0$ .

Nach dieser Rechnung ist beim Schlagflügel auch der Einfluss des induzierten Widerstandes dominant. Anfahr- und Stoppwirbel sind im Reiseflug großer Vögel nahezu vernachlässigbar. M. F. Neef und D. Hummel haben mit ihrer Veröffentlichung die Grundlage für meine Lösung geschaffen. Ich erkannte, dass zwei im Gegentakt mit Hub/Drehbewegung schlagende Flügel auch ohne Regelung immer konstanten Auftrieb liefern.

Mit dem Wissen um diese Zusammenhänge habe ich das Modell HE209 konzipiert und gebaut, Bild 8.

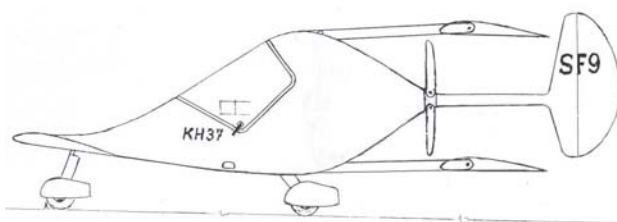


BILD 8: HE209 in Start/Landekonfiguration mit aufgeklapptem Faltpropeller

Entgegen älteren Konzepten mit 2 und 4 Schlagflügeln, die alle hintereinander lagen, hat es 2 übereinander angeordnete Flügel, die gegensinnig und in ungestörter Strömung arbeiten. Grundlage dieses Konzeptes sind zwei Diagramme, Bild 9, über den Auftriebsbeiwert und den Schubbeiwert der unter [6] genannten Veröffentlichung. Deren

Bewegungsabläufe sind in den Bildern 10 und 11 dargestellt.

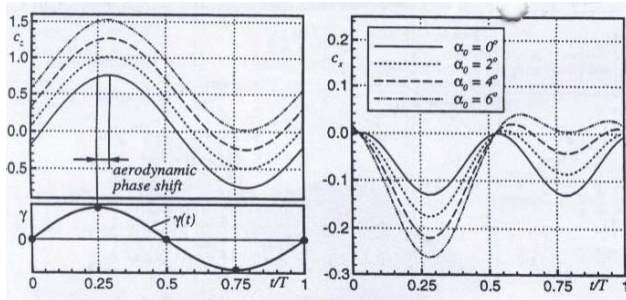


BILD 9: Auftriebs- und Schubbeiwert über einen Schlagzyklus in Abhängigkeit vom Einstellwinkel  $\alpha_0$  des Profils NACA 0012.

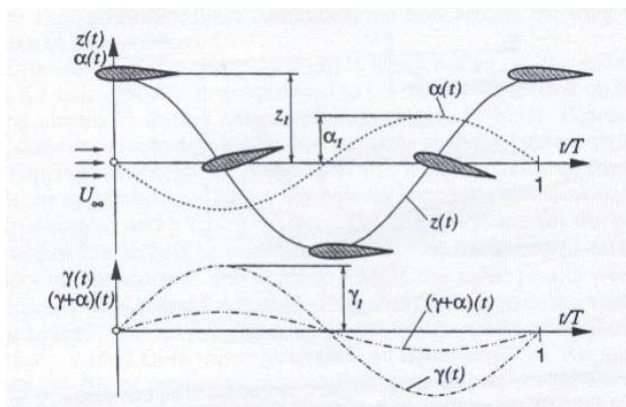


BILD 10: Zeitverlauf für gekoppelten Parallel-Drehschlag bei  $90^\circ$  Phasenverschiebung und  $\alpha_0 = 0^\circ$

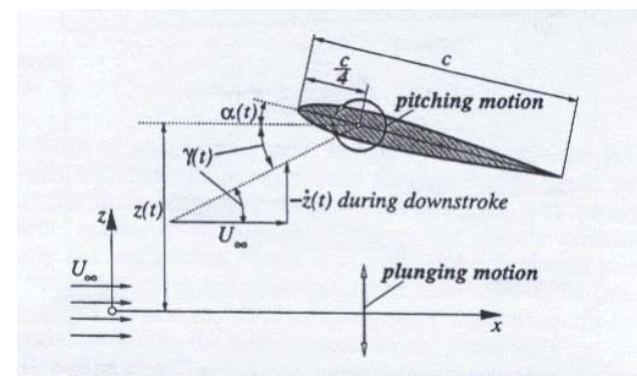


BILD 11: Darstellung des gekoppelten Parallel-Drehschlages um die  $c/4$ -Linie. Der große Anstellwinkel  $\gamma$  wird durch die nach unten gerichtete Schlagbewegung hervorgerufen

Überlagert man die Auftriebsbeiwerte zweier Flügel mit  $180^\circ$  Phasenverschiebung für einen Einstellwinkel von  $6^\circ$ , erhält man konstanten Auftrieb. Da ich alle meine Modelle mit gewölbten Profilen ausgerüstet habe, ist der erforderliche Winkel entsprechend kleiner. Der Mittelwert des Schubbeiwertes verdoppelt sich.

Diese Lösung ermöglicht einen perfekten Massenausgleich aller bewegten Bauteile, benötigt keinen Kraftspeicher für den Flügelaufschlag und führt durch eine Verdoppelung der Antriebspulsfrequenz zu einem geringeren Ungleichförmigkeitsgrad der Momentangeschwindigkeit. Der durch die wechselnde Lage des Schubvektors gestörte Nickmomentenhaushalt ist vermutlich vernachlässigbar. Notfalls kann er durch zyklische Modulation des Höhenruderausschlags ausgeglichen werden.

HE209 sollte ursprünglich einen Faltpropeller auf dem Seitenleitwerksträger erhalten, der in Mittelstellung der Flügellenker aktiviert werden kann und problemloses Starten auch mit niedrigem Fahrwerk ermöglicht. Diese Lösung ist für ein mannttragendes Elektro-UL sicher sinnvoll, damit es nur mit einem Motor auskommt. Für das Modell HE209 habe ich mich der Einfachheit halber für einen zweiten Motor vor dem Entenleitwerk entschlossen. Er arbeitet jetzt auf einen Faltpropeller, Bilder 12, 13, 14, 15.



BILD 12: Schlagflügelantrieb



BILD 13: Start- und Landekonfiguration

Ich habe mich beim Projekt HE209 für den gleichen Antrieb wie beim HE108 entschieden, obwohl das Gewicht etwa doppelt so hoch ist. Das Risiko eines neu dimensionierten Antriebsstranges war mir zu hoch, beim alten waren die Kinderkrankheiten bereits ausgemerzt.



BILD 14: Maximaler Flügelhub



BILD 15: Autor mit Modell

Der Kurbelwelle, die den Flügelantrieb antreibt, habe ich eine weitere Kurbel für den zweiten Lenker hinzugefügt. Der Motor arbeitet über ein Reisenauer-Planetengeräte und eine Eigenbau - Getriebestufe auf die Kurbelwelle.

Technische Daten des Modells:

- Masse: 1,78kg
- Spannweite Flügel: 2m
- Spannweite Höhenleitwerk: 1,43m
- Flügelfläche: 75,7dm<sup>2</sup>
- Höhenleitwerksfläche: 28,0dm<sup>2</sup>
- Flügelhub: 0,225m
- Verhältnis Hub/Flügeltiefe: 1:1,25
- Antrieb:
  - Graupner Compact 300/9,6V (740U/V)
  - 260/8,4V (1080U/V)
  - 260/7,2V (1420U/V)
- Antriebsakku: 4 (3) Zellen Lithium-Ion 1200mAh (LiFe 2300mAh)

- Getriebe: Reisenauer Micro Edition light 13:1 (5:1)
- Gesamtübersetzung: 65:1 (25:1)
- Maximale Schlagfrequenz: ca. 5Hz

### 3.3.2 Flugerprobung

Die Flugerprobung des Modells ergab, dass die maximale Schlagfrequenz von 3Hz mit Compact 300 und Getriebe 13:1 nicht für einen ausreichenden Steigflug ausreichte. Da die mögliche Schlagamplitude bei zwei Flügeln nur noch 50% beträgt, muss für gleiche Vertikalgeschwindigkeit die Schlagfrequenz verdoppelt werden. Um höhere Schlagfrequenzen ausprobieren zu können, wurden nacheinander zwei verschiedene Motoren Compact 260 mit unterschiedlichen Akkuspannungen kombiniert. Die Flüge mit zweistufigem Planetengetriebe 13:1 haben wir zum Teil mit einem Datenlogger dokumentiert. Ein typisches Diagramm zeigt Bild 15. Mit vier LiPo's bei 1780g Fluggewicht ergibt sich eine Steigrate von knapp 0,45m/s.

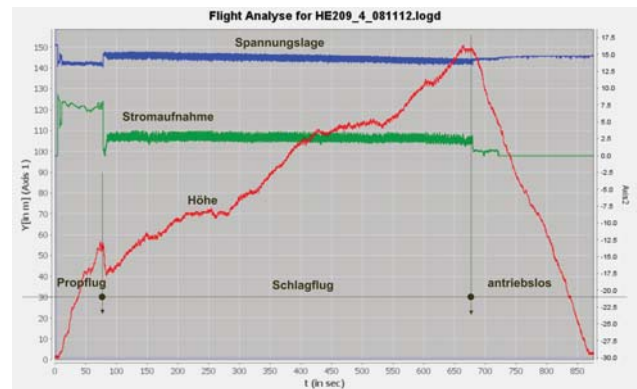


BILD 15: Viertes Logger-Diagramm des HE209 vom 12.11.08.

Das Diagramm zeigt eine Steigflugphase mit Propellerantrieb (ca. 80sec), danach eine Steigflugphase mit Schlagflügelantrieb (ca. 590sec) und einen Antriebslosen Sinkflug (ca. 200sec). Während im Propellersteigflug nahezu mit maximal möglicher Steigrate geflogen wurde, habe ich die Geschwindigkeit im Schlagflug mehrfach variiert, um ein Gefühl für das Flugverhalten des Modells zu bekommen. In der sicheren Höhe zwischen 50 und 100m habe ich dann auch versucht die maximale Steigrate zu erfliegen. Dabei war der Input aus Strom und Spannung, wie auch in der Propellerflugphase, in etwa konstant. Der Flug wurde bei Sonnenuntergang und Windstille Mitte November 2008 durchgeführt, so dass man thermische Einflüsse weitgehend ausschließen kann. Das ist auch aus der antriebslosen Gleitphase zu erkennen, die bei Normalfluggeschwindigkeit eine nahezu konstante Sinkrate aufweist. Einen detaillierten Auszug aus dem sechsten Logger-Diagramm zeigt Bild 16.

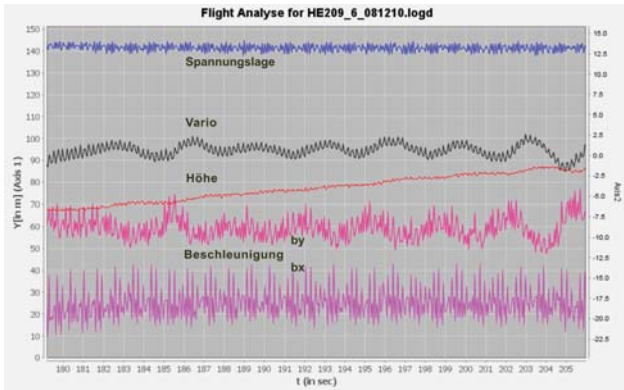


BILD 16: Hier sind zusätzlich die horizontale und vertikale Beschleunigung zu sehen. Obwohl die Auflösung von 16Hz ungenügend ist, kann man daraus trotzdem die Schlagfrequenz ablesen.

Das Modell hat inzwischen statt des zweistufigen ein einstufiges Planetengetriebe wieder mit Compact 300 erhalten. Das ermöglicht eine höhere Schlagfrequenz und damit auch eine bessere Steigleistung. Damit sollen die bisherigen Erprobungsflüge fortgesetzt werden. Mit der Methode Versuch und Irrtum wollen wir die passende Drehamplitude und die optimale Phasenlage der Flügel zur Schlagfrequenz finden.

**Fazit:**

Das Ergebnis der bisherigen Erprobung lässt erkennen, dass das Modell im Schlagflugmodus beim Horizontalflug gegenüber dem Propellerflug nur die halbe Eingangsleistung benötigt. Damit steht fest, dass der Integrierte Schlagflügel im unteren Geschwindigkeitsbereich durchaus eine Alternative zum Propeller sein kann!

**3.3.3 Wirkungsgrad**

Die Ausgangsleistung des angetriebenen Modells ist

$$P_{out} = m \cdot g \cdot (v_{sink} + v_{steig})$$

Die Größen m, g, v<sub>sink</sub> sind für prop- wie für schlagflügelgetriebene Steigphasen konstant.

$$m = 1,78 \text{ kg} \quad , \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad ,$$

$$v_{sink} = \frac{145 \text{ m}}{200 \text{ s}} = 0,73 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Nach Bild 15 die Steiggeschwindigkeiten

- propellergetriebene Steigphase:

$$v_{steig.prop} = \frac{53 \text{ m}}{73 \text{ s}} = 0,73 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- maximale schlagflügelgetriebene Steigphase:

$$v_{steig.schlag} = \frac{17,5 \text{ m}}{40 \text{ s}} = 0,44 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Damit die Ausgangsleistung

- propellergetriebene Steigphase:

$$P_{out.prop} = m \cdot g \cdot (v_{sink} + v_{steig.prop})$$

$$P_{out.prop} = 27,07 \text{ W}$$

- maximale schlagflügelgetriebene Steigphase:

$$P_{out.schlag} = m \cdot g \cdot (v_{sink} + v_{steig.schlag})$$

$$P_{out.schlag} = 20,43 \text{ W}$$

Nach Bild 15 die Eingangsleistung

- propellergetriebene Steigphase:

$$P_{in.el.prop} = 13,7 \text{ V} \cdot 7,5 \text{ A}$$

$$P_{in.el.prop} = 102,75 \text{ W}$$

$$\eta_{mot.prop} = 0,8$$

$$P_{in.welle.prop} = P_{in.el.prop} \cdot \eta_{mot.prop}$$

$$P_{in.welle.prop} = 82,2 \text{ W}$$

- maximale schlagflügelgetriebene Steigphase:

$$P_{in.el.schlag} = 14 \text{ V} \cdot 2,5 \text{ A}$$

$$P_{in.el.schlag} = 35,0 \text{ W}$$

$$\eta_{mot.schlag} = 0,75$$

$$\eta_{getr.schlag} = 0,97 \cdot 0,97 \cdot 0,92$$

$$\eta_{getr.schlag} = 0,87$$

$$P_{in.kurbelwelle.schlag} = P_{in.el.schlag} \cdot \eta_{mot.schlag} \cdot \eta_{getr.schlag}$$

$$P_{in.kurbelwelle.schlag} = 22,84 \text{ W}$$

Damit die Wirkungsgrade

- für den Propeller:

$$\eta_{prop} = \frac{P_{out.prop}}{P_{in.welle.prop}} = \frac{27,07}{82,20} = 0,33$$

- für den Schlagflügel:

$$\eta_{schlag} = \frac{P_{out.schlag}}{P_{in.kurbelwelle.schlag}} = \frac{20,43}{22,84} = 0,89$$

Otto Lilienthal hatte sowohl den Gleitflug als auch den Schlagflug (Ruderflug) mit bewegten Flügeln zum Gegenstand seines Patentes von 1895

gemacht. Der vogelgleiche Flug mit schlagenden Flügeln war die erste Idee in der Fliegerei. Es war auch die letzte bisher nicht effektiv gelöste Aufgabe. Ich würde mich freuen, wenn Hochschulen und Universitäten, oder auch entsprechende Forschungseinrichtungen sich dieser Thematik annehmen würden. Eine Optimierung der Bewegungsabläufe ist nur mit Hilfe von Computersimulationen möglich. Auch ist zu untersuchen, wie ein für unterschiedliche Aufgaben ausgelegtes Gesamtkonzept aussieht. Hier gibt es Stoff für viele Diplomarbeiten und Promotionen.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorstehende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Antriebes, der mit höherem Wirkungsgrad arbeitet als der Propeller. Ursprünglich gedacht für Muskelkraftflugzeuge, könnte er aber auch der Weiterentwicklung von UAV's – eventuell mit Solarantrieb - und Elektro-UL's dienen.

Der Kerngedanke des vom Autor 1990 vorgeschlagenen Integrierten Schlagflügels besteht in der Nutzung des starren, Auftrieb erzeugenden Tragflügels als Schlagflügel. Gegenüber dem Rumpf ist er in der Vertikalen beweglich geführt. Durch den Einsatz von zwei übereinander angeordneten Flügeln, die gegensinnig schlagen, ist eine Reduzierung des Ungleichförmigkeitsgrades möglich. Sie ergibt auch ohne Regelung immer konstanten Auftrieb. Die Erprobung des HE209 ergab, dass der Wirkungsgrad bei etwa 90% liegt.

Die Vorteile des Integrierten Schlagflügels sind:

- höchster Wirkungsgrad im Vergleich mit bekannten Antrieben,
- optimale Anpassung an alle Flugregime: im Gegensatz zum Verstellpropeller gilt dies für alle Flügelschnitte,
- hohe Umweltverträglichkeit durch niedrigen Fluglärm.

Für die langjährige Unterstützung bei diesem Projekt bin ich meinen Freunden Hans Langenhagen, Claus Thiele und Heino Iwe zu Dank verpflichtet, und nicht zuletzt möchte ich meiner Frau Elke für ihre Geduld mit meinem Steckenpferd danken.

#### 5 LITERATUR

- [1] Helling, K-H.  
Schlagflügelflugzeug, Patent DD292186 A5
- [2] Helling, K-H., Modellflugclub Rossendorf e. V.  
Integrierter Schlagflügel für Flugzeuge  
Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2006  
(DGLR-2006-079NW)
- [3] Helling, K-H., Modellflugclub Rossendorf e. V.  
The Integrated Flapping Wing - Trying out a  
New Concept  
European Air and Space Conference  
(CEAS-2007-043)
- [4] Hertel, H.  
Biologisch-technische Forschungen über  
Strukturen, VDI-Z.(1967), 1133ff., 1215ff.
- [5] Clauss, G.  
Schlagflügel und Wirbelstraße  
Dissertation VDI-Fortschr. Bericht Reihe 7,  
Nr. 7 (1968)
- [6] Neef, M. and Hummel, D.  
Euler Solutions for a Finite-Span Flapping Wing  
Technical University of Braunschweig