INTEGRIERTER SCHLAGFLÜGEL FÜR FLUGZEUGE

Karl-Heinz Helling

Vortag, gehalten auf der DGLR-NW-Tagung Braunschweig, 08. November 2006

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, Bild 1, war ich, obwohl ich zu diesem Zeitpunkt keinen Zugang zu Einzelheiten hatte, hellauf begeistert. Neben der sportlichen Leistung des Piloten faszinierte mich das Konzept und die Lösung mit hochfesten neuen Werkstoffen. Das Fluggerät wog nur 30 kg bei 30 m Spannweite und hatte, einen Propellerdurchmesser von knapp 4 m. Die Antriebsleistung lag bei 200 bis 300W. An Fliegen bei Wind war nicht zu denken. 1988 flog der am MIT gebaute Daedalus sogar 115 km über die Ägäis, Bild 2.

BILD 1: Der Gossamer Albatros überquert 1979 den Ärmelkanal

Meine Gedanken kreisten danach um das Problem, ob es auch mit weniger Leistung ginge, ohne das Gerät noch größer oder leichter zu bauen.

Größere, untersetzte Propeller steigern den Wirkungsgrad, da die von ihnen erfasste Luftsäule mit größerem Querschnitt nicht so stark beschleu-nigt 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.

BILD 2: Der am MIT gebaute Daedalus88 fliegt 1988 muskelkraftgetrieben 115km über die Ägäis

2 DIE ALTERNATIVE ZUM PROPELLER

2.1 Klassische Schlagflügel

Beim Schlagflügel der Vögel ist dieser Querschnitt bedeutend größer, da er die gesamte Spannweite nutzt, Bild 3. Ich sah im Schlagflügel deshalb eine Alternative zum Propeller.

Wie kommt der Vortrieb beim Flügelschlag der Vögel zustande? Sie verdrehen während des Abschlages um ihre Schultergelenke die Flügel längs der Spannweite 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, wodurch nur ein kleiner zusätzlicher Widerstand entsteht, der Auftrieb aber konstant bleibt. Vortrieb entsteht also nur beim Abschlag!

BILD 3: Die Möwe als klassisches Vorbild für den Schlagflügel

Erste eigene Gedanken gingen 1986 zunächst in diese Richtung. Es wurden verschiedene Getriebe und torsionsweiche Flügel konzipiert, Bilder 4 und 5.

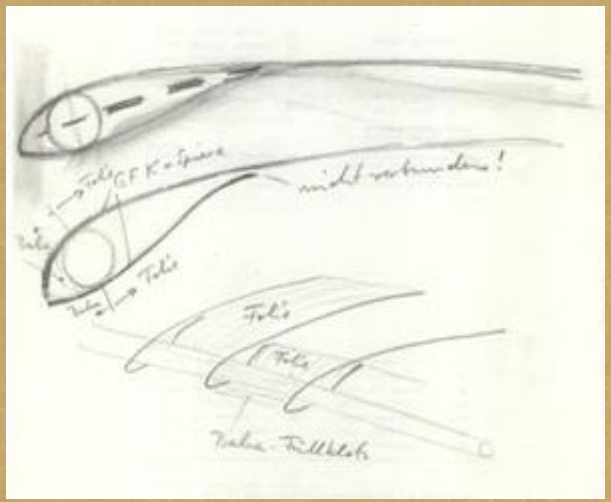

BILD 4: Entwurf eines torsionsweichen Flügels

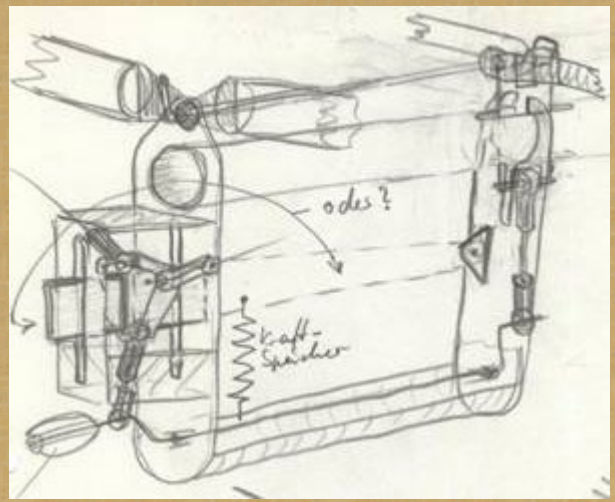

BILD 5 : Antrieb für Torsionsflügel

Die Kinematik des Flügelschlages der Vögel mit ihrem torsionsweichen Flügeln lässt sich aber nicht mit der heute üblichen Profiltreue umsetzen. An diesem Umstand sind alle bisherigen Versuche, Schlagflügel zur Vortriebserzeugung einzusetzen, gescheitert. Dazu gehören u. a. die in den 30er Jahren von Lippisch angestellten Versuche

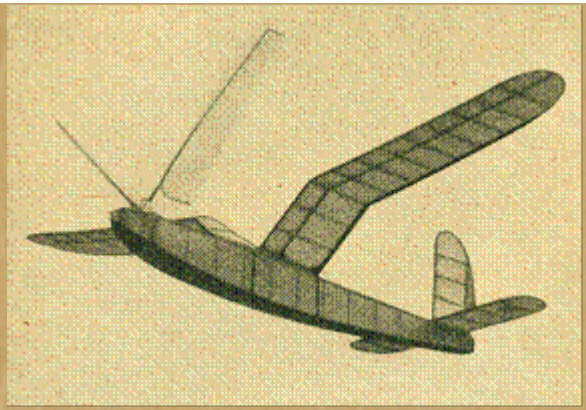

BILD 6 : Modell von Lippisch mit Triebschwingen

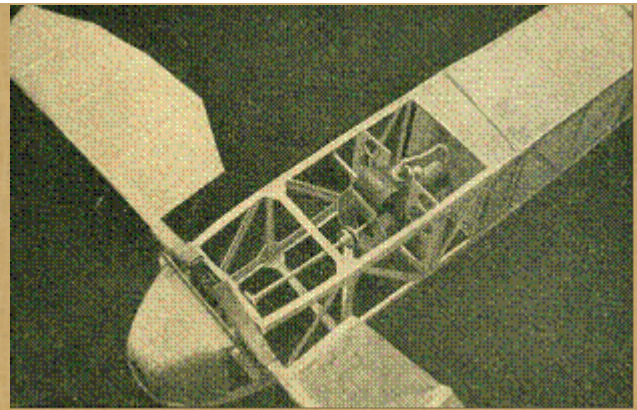

BILD 7 : Schwingen-Antrieb mit Benzinmotor

mit reinen Triebschwingen, Bilder 6 und 7 [5] sowie die in den 40er Jahren von Arno Vogel im freien Luftstrom durchgeführten Messungen mit einer Komponenten-Waage, Bild 8, die 1942 bei Hartenstein im Erzgebirge zum Muskelkraftschwingenflug auf

BILD 8 : 3m-Schwinge in der großen Komponentenwaage

BILD 9: Muskelkraft-Schwingenflugzeug 1942 im Fluge bei Hartenstein im Erzgebirge: ein modifizierter SG38

einem modifizierten SG 38 führten[6], Bild 9. Diese Versuche führte Arno Vogel mit dem VOX-1 1953 in Hartenstein und 1954 in Ballenstedt fort, Bild 10. Sein Projekt VOX-2 mit einem modifizierten Baby2b wurde nicht mehr realisiert, Bild 11.

BILD 10: Versuchsflugzeug Vox-1 vor dem Start in Ballenstedt

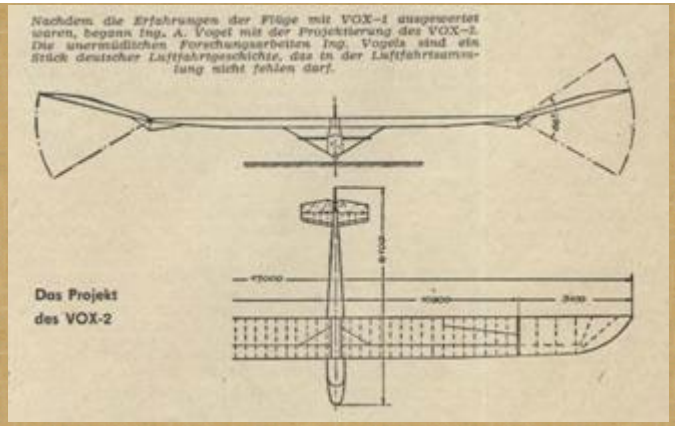

BILD 11: Vox-2

Nach Ende des 2. Weltkrieges rüstete Flugzeugbau-meister A.Schmid für französische Militärangehörige Grunau-Babys mit Triebschwingen aus. Diese wurden von einem 3,6 PS Sachsmotor mit 60 – 100 Schlägen pro Minute angetrieben, Bild 12. Eine andere Variante im Flug zeigt Bild 13.

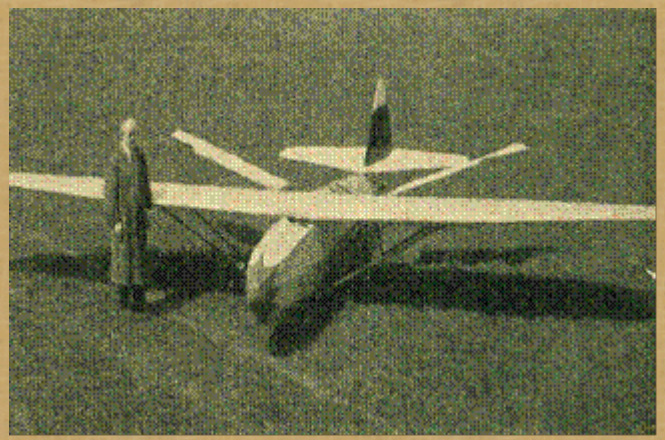

BILD 12: Adelbert Schmid vor seinem erfolgreichen Flugzeug

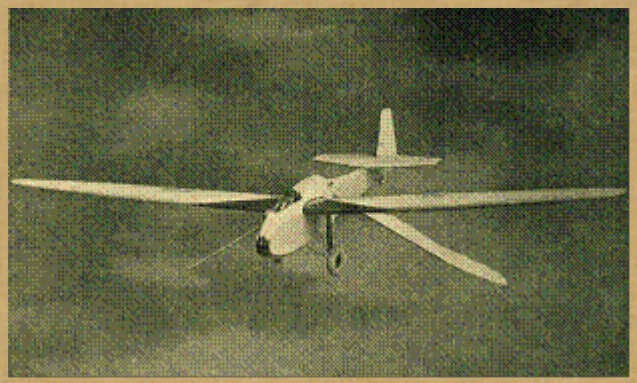

BILD 13: Baby mit Triebschwingen im Flug

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, mit einem durchgehenden starren Flügel ohne Schultergelenke auszukommen. Dieses Prinzip des Integrierten Schlagflügels ließ ich mir 1990 patentieren [1], Bild 14, nachdem eine Förderung durch die Patentstelle für die Deutsche Forschung abgelehnt wurde. Die Flugzeugindustrie zeigte kein Interesse an diesem Antriebskonzept, da es nur im unteren Geschwindigkeitsbereich sinnvoll einsetzbar ist. Lediglich Herr Köhler, damals Technischer Leiter der HOFFMANN AIRCRAFT, fand das Prinzip bestechend und machte mir Mut zur Weiterentwicklung.

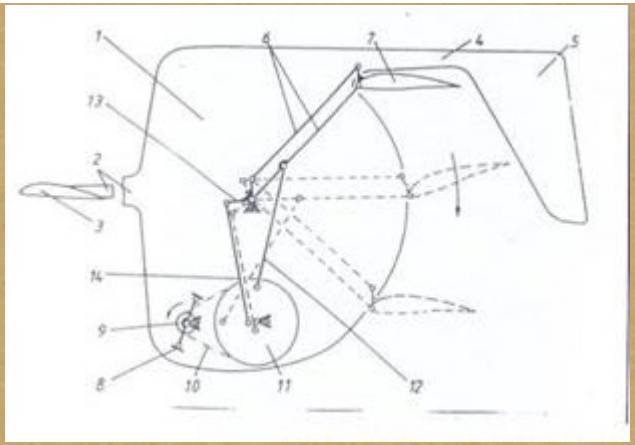

BILD 14: Prinzip des Integrierten Schlagflügels [1]

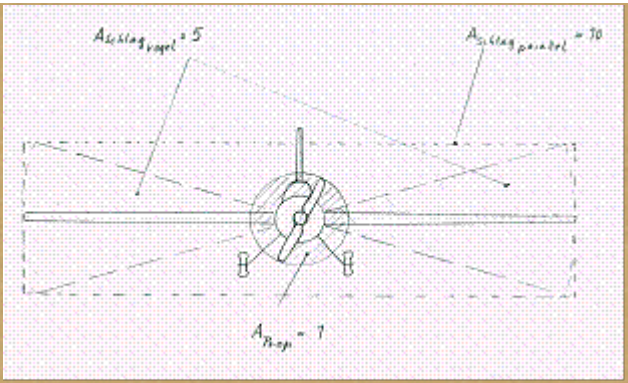

BILD 15: Die Strömungsquerschnitte von Propeller, Vogelflügel und integriertem Schlagflügel

Der Integrierte Schlagflügel erfasst einen gegenüber dem Vogelflügel nochmals verdoppelten Strömungsquerschnitt, Bild 15. Weiterhin kommt der große Vorteil hinzu, 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 im Gegensatz zum Verstellpropeller, bei welchem nur ein Flügelschnitt mit optimaler Steigung arbeitet, alle Flügelschnitte exakt an das Flugregime angepasst. Da die instationäre Strömung höhere Auftriebsbeiwerte erlaubt, ist eine große Streckung sinnvoll.

ERPROBUNG IM MODELL

Erster erfolgreicher Flug

Bei meinem ersten Modell HE 101 von 1988, Bild 16, das heute im Besitz des Lilienthalmuseums in Anklam ist, habe ich versucht, alle bis dahin gewonnenen Erkenntnisse umzusetzen.

BILD 16: HE 101 im Flug

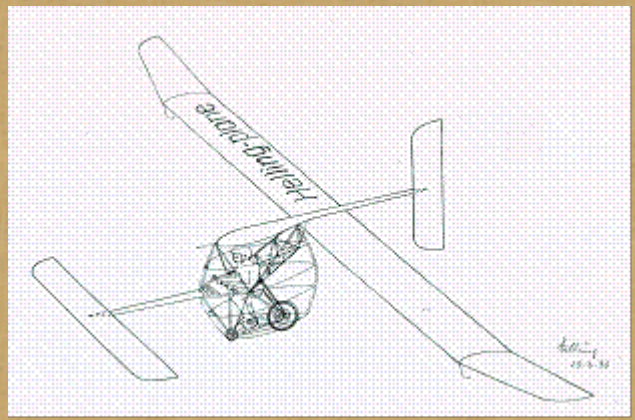

BILD 17: Muskelkraftflugzeug mit Federspeicher

Neben dem konstruktiven Problem, den Einstellwinkel während des Schlages zu ändern, was ich mit einem Parallelogrammlenker gelöst habe und dem Problem, einen

Kraftspeicher für den Flügelaufschlag einsetzen zu müssen, gibt es die bis heute nur unvollständig geklärte Frage, wie die Bewegungsabläufe von Schlag- und Drehamplitude verlaufen müssen, um immer einen konstanten Auftrieb zu erzeugen. Der Kraftspeicher für den Flügelaufschlag 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 vermutlich schneller erfolgen als der Aufschlag. Beim Modell HE 101 habe ich das mittels überdimensionierten Kraftspeichers gelöst.

Vom ersten erfolgreichen Flug 1992, dem mehrere Umbauten und Änderungen vorausgingen, existiert ein Video.

Ich habe mich mit dem Konzept des Integrierten Schlagflügels um den „Berblinger-Preis 1992“ des Kulturamtes der Stadt Ulm beworben. Die Bilder 17 - 20 zeigen Entwürfe für diesen Wettbewerb. Die Teilnahme war jedoch erfolglos, da der Preis zugunsten des für 1996 ausgeschriebenen ersten eigenstartfähigen Solarflugzeuges ausgesetzt worden war.

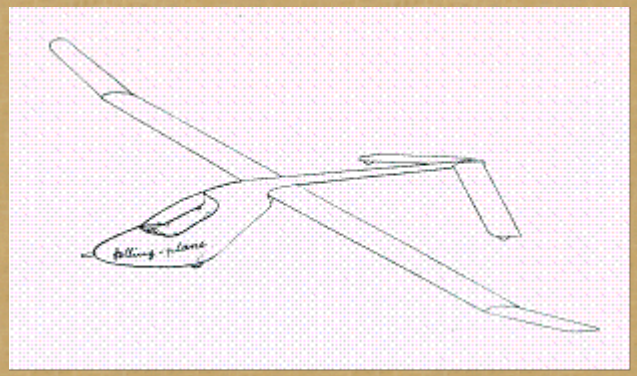

BILD 18: Elektro-Motorsegler

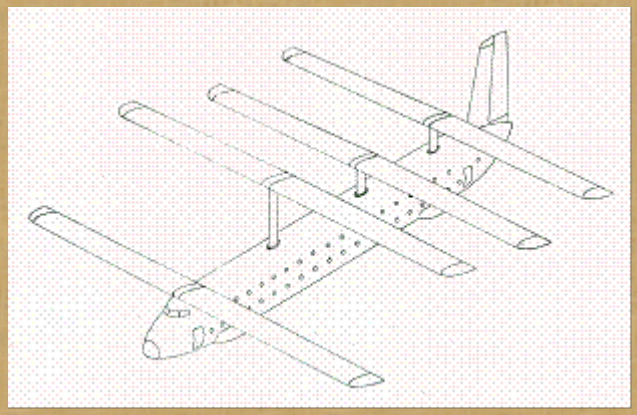

BILD 19: Zubringerflugzeug

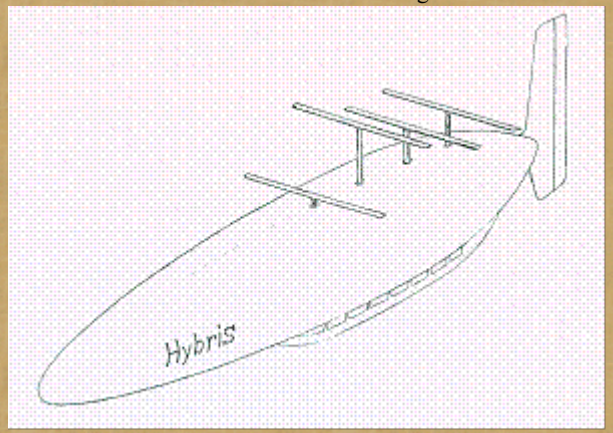

BILD 20: Hybrid-Luftschiff

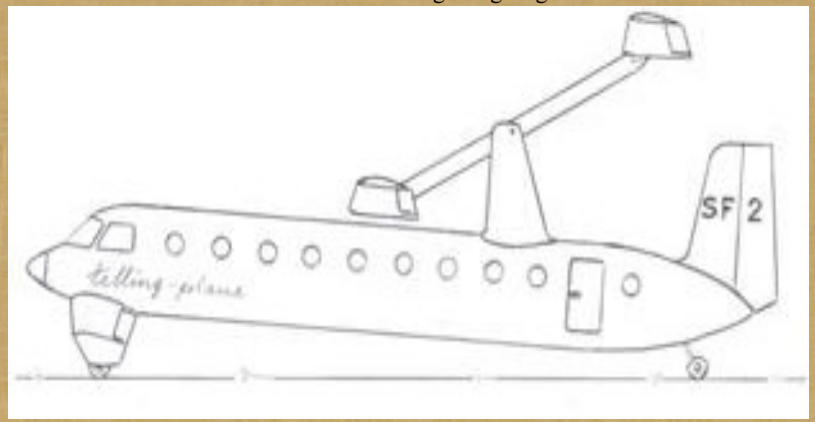

BILD 21: Enten-Kurzstreckenflugzeug HE 202

Weitere Modelle

Nach dem HE 101 habe ich 1993 das Modell HE 202 konzipiert und zusammen mit Karl-Heinz Wagler und Hans Langenhagen im Rohbau fertig gestellt. HE 202 war ein Entenmodell mit 2 Schlagflügeln an einem gemeinsamen Lenker, Bild 21.

Dieses Konzept erfordert keinen Kraftspeicher, hat aber den Nachteil, dass der hintere Schlagflügel sich in der Nachlaufströmung des ersteren befindet. Aus dem gleichen

Grunde erscheinen auch Konzepte mit 2 paarigen Schlagflügeln, die 90 Grad phasenverschoben arbeiten, problematisch. Der Vorteil eines solchen Konzeptes wäre ein nahezu konstanter Schub.

HE 106 und HE 107 sind 2 Demonstrationsmodelle, die einem Schulprojekt zum Thema: “Warum die Vögel fliegen“ dienten, aber wegen der vereinfachten Antriebskinematik nur als Flugspiel geeignet erscheinen.

BILD 22: Flugspiel HE 107

BILD 23: HE 107 im Flug

Konstantauftriebsregelung

Dafür habe ich das Modell HE 108 unter Mitwirkung von Claus Thiele als leichten und langsamen Erprobungsträger (geringes Bruchrisiko) gebaut, Bild 24 und 25.

An diesem flügelgesteuerten Entenmodell soll mit Hilfe eines Kreisels, der die Drehbewegung des Rumpfes um die Querachse erfasst und auf die Höhenrudermaschine wirkt, die

BILD 24: Autor mit HE 108

BILD 25: HE 108

Konstantauftriebsregelung realisiert werden. Eines der Vorgängermodelle, HE 105, mit 3,2 m Spannweite bei 4kp Abfluggewicht, Bilder 26, 27, 28 soll erst wieder fliegen, wenn der Bewegungszusammenhang zwischen Schlag- und Drehamplitude ermittelt ist. Zuvor will ich durch einen leichteren Flügel und Lithiumpolymerakkus die Flächenbelastung von 50 auf 30gr/dm² reduzieren. Das Modell hat schon 3 Abstürze hinter sich, deren Ursachen aber nicht der Schlagflügelantrieb, sondern zunächst fehlende Querruder, die Entenbauweise und eine nicht erkannte Einstellwinkelveränderung nach dem 2. Absturz waren.

BILD 26: Startvorbereitung HE 105

BILD 27: HE 105 im Fluge

α_0	$\bar{c}_L$	$\bar{c}_T$	η
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 28: HE 105-Getriebe

BILD 29: Wirkungsgrad h sowie mittlerer Auftriebs- und Schubbeiwert c_L , c_T abhängig von a_o

Neues Projekt

Nach den grundlegenden Versuchen von Hertel [2] und Clauss [3] setzen sich die Schlagflügel-bewegungen aus einer harmonischen Bewegung senkrecht zur Flugrichtung und einer phasenverscbobenen harmonischen Drehbewegung zusammen. Diese Kinematik wird als gekoppelter Parallel-Drehschlag bezeichnet. Neef und Hummel haben dazu Versuche und Modellrechnungen durchgeführt [4]. Danach liegt der zu erwartende Wirkungsgrad schon mit einem symmetrischen Profil bei etwa 90%, Bild 29..

Beim Schlagflügel ist der Einfluss des induzierten Widerstandes dominant (höherer Auftriebsbeiwert infolge instationärer Strömung möglich). Anfahr- und Stoppwirbel sind im Reiseflug großer Vögel aber nahezu vernachlässigbar.

Im Einklang mit diesen Erkenntnissen habe ich inzwischen ein neues Modell HE 209 konzipiert.

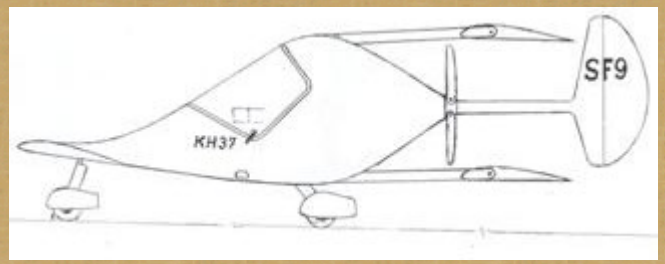

BILD 30: HE 209 in Start/Landekonfiguration mit aufgeklapptem Faltpropeller

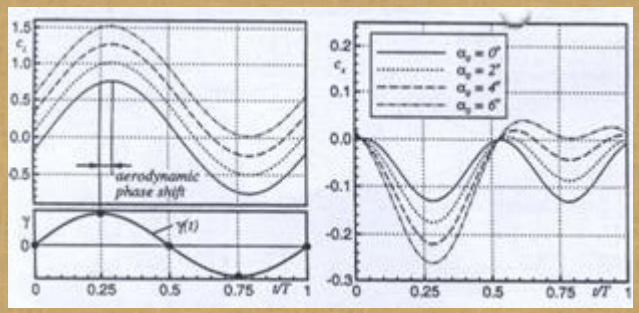

BILD 31: Auftriebs- und Schubbeiwert über einen Schlag-zyklus in Abhängigkeit vom Einstellwinkel a_o .

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. Die Grund-lage dafür geht aus 2 Diagrammen, Bild 31, über den Auftriebsbeiwert und den Schubbeiwert der unter [4] genannten Veröffentlichungen hervor. Deren Bewegungsabläufe sind in den Bild 32 und 33 dargestellt.

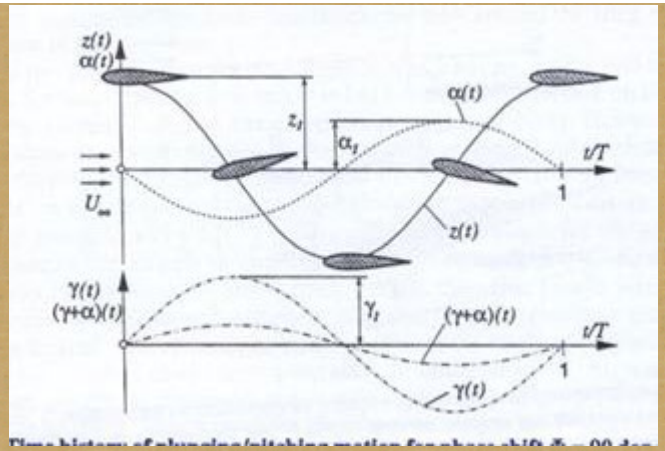

BILD 32: Zeitverlauf für gekoppelten Parallel-Dreh-schlag bei 90^0 Phasenverschiebung und $a_o = 0^0$

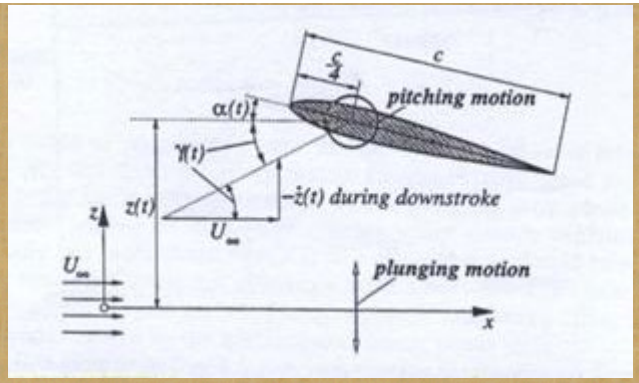

BILD 33: Darstellung des gekoppelten Parallel-Drehschlages um die c/4-Linie. Der große An-stellwinkel g wird durch die nach unten gerichtete Schlagbewegung hervorgerufen

Überlagert man die Auftriebsbeiwerte dieser Flügel für einen Einstellwinkel von 6 Grad, erhält man konstanten Auftrieb. 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.

HE 209 erhält einen Faltpropeller, der in Mittelstellung der Flügellenker aktiviert werden kann und problemloses Starten und Landen ermöglicht.

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 MAV`s, UL's und Solar-Flugzeugen dienen.

Zur Theorie des Schlagflügels haben HERTEL [2] und CLAUSS [3] 1967 grundlegende Erkenntnisse gewonnen. NEEF und HUMMEL [4] führten dazu Rechnungen und Messungen durch. Sie ermittelten Wirkungsgrade für das Reiseflugregime um 90%.

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. Bewegungsablauf und Anstellwinkel werden so gesteuert oder geregelt, dass in allen Schlagphasen ein konstanter Auftrieb und beim Abschlag Vortrieb entsteht. Nachteilig ist die Schwankung der Momentangeschwindigkeit. Eine Reduzierung des Ungleichförmigkeitsgrades ist durch zwei gegensinnig schlagende Flügel möglich. Die Vorteile des vorgeschlagenen Antriebs 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.

LITERATUR

[1] Helling, K-H., Schlagflügelflugzeug, Patent DD292186 A5

[2] Hertel, H., Biologisch-technische Forschungen über Strukturen, VDI-Z.(1967), 1133ff., 1215ff.

[3] Clauss, G., Schlagflügel und Wirbelstraße Dissertation VDI-Fortschr. Bericht Reihe 7, Nr. 7 (1968)

[4] Neef, M. and Hummel, D., Euler Solutions for a Finite-Span Flapping Wing Technical University of Braunschweig

[5] A. Lippisch, Gedanken zur Entwicklung des Schwingfluges, Modellflug Bd. 3N.1 (1938)

[6] L. Beranek, Der Schwingenflug, eine technische Realität, Deutsche Flugtechnik, 12/1959