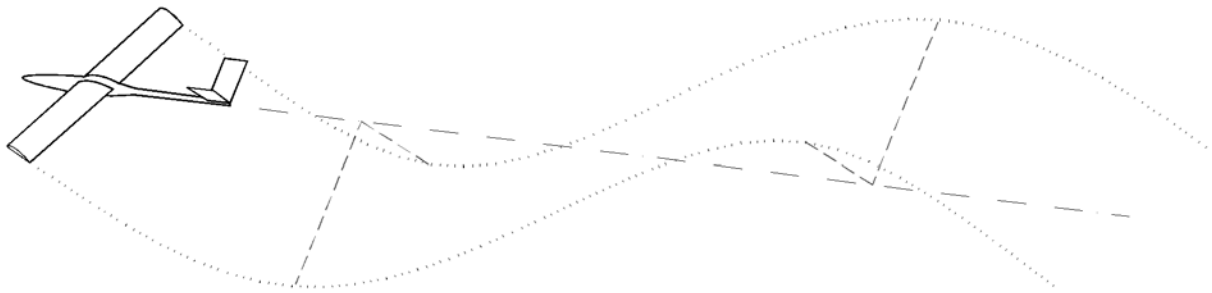

Die Entwicklung der EV-Schlagflügelmodelle

Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Zusammenfassung

Die etwa 30-jährige Entwicklungsgeschichte der Ornithopter vom Typ EV1 bis EV7 beginnt mit der Herstellung verschiedener Schlagflügelantriebe. Hier wird insbesondere das Funktionsprinzip eines elektrischen Kurbelantriebes mit Gleitflug-Kraftflug-Umschaltung etwas ausführlicher beschrieben. In engem Zusammenhang mit seiner ständigen Weiterentwicklung steht der Werdegang der ersten Schlagflügelmodelle. Die langsamen Fortschritte der Flugleistungen, durchsetzt mit diversen Fehlschlägen, werden mit Bildern dokumentiert. Daneben kommen auch Weiterentwicklungen der Schlagflügeltheorie zur Sprache, bis hin zu den Problemen die nach wie vor ungelöst sind.

Inhalt

1. Erste Anläufe 2
2. Schlagflügelantrieb mit Kardankurbel 3
3. Mein erster Elektrovogel (EV1) 5
4. Verschiedene Irrwege der Entwicklung (EV2 bis EV4) 8
5. Fortschritt mit Hilfe der Theorie (EV5 und EV6) 13
6. Derzeitiger Stand (EV7) 17
7. Weitere Entwicklung 20

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

1. Erste Anläufe

In den Jahren 1963/64 erschienen in der Modellzeitschrift "Mechanikus" eine Artikelserie [1] mit dem Titel "Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik". Verfasser war Herr Karl Herzog, der Autor eines Buches [2] über die Anatomie der Vögel und die Schlagflügelmodelle von E. v. Holst. Die in dem Aufsatz beschriebenen Probleme beim Bau einer Schlagflügel-Antriebsmechanik fesselten mich so sehr, dass ich trotz des tragisch-komischen Images eines Ornithopter Bastlers alsbald beschloss, selbst mal solch ein Modell zu bauen.

Es sollte ein Vollschwingen-Modell mit etwa drei Meter Spannweite sein und ein Gewicht von höchstens fünf Kilogramm haben. Bei diesen Abmessungen erschien mir eine fernsteuerbare Umschaltung zwischen Kraft- und Gleitflug unverzichtbar. Außerdem stellte ich mir einen Ornithopter vor, der - anders als die bis dahin bekannten, relativ schnell schlagenden Hautflügler-Ornis - mit profilierten Flügeln möglichst effektiv arbeiten sollte. Als erstes Etappenziel wurde nur die einfachste Flugart, der stationäre, horizontale Kraftflug und später vielleicht ein flacher Steigflug angestrebt. Vorbilder waren insbesondere große, langsam schlagende Vögel mit einem Gewicht ab etwa einem Kilogramm.

Den Anregungen der Artikelserie folgend, wurde zunächst versucht, Lösungen bzw. Vorschläge aus der Vergangenheit neu zu gestalten. Die erste Mechanik, die über das Stadium von Skizzen hinaus kam, war eine Konstruktion aus glasfaserverstärkten Polyester-Bauteilen (folgendes Bild). Sie sollte nach dem Prinzip einer Dampfmaschine mit einem Überdruck von etwa 1,5 bar arbeiten. Als Treibmittel war allerdings nicht Wasserdampf, sondern ein bei etwa +25 Grad Celsius kochendes, heute als umweltschädlich erkanntes "Frigen" vorgesehen. Der nur einseitig mit Druck beaufschlagte Kolben wurde mit einer Rollmembrane von 4 cm Durchmesser abgedichtet.

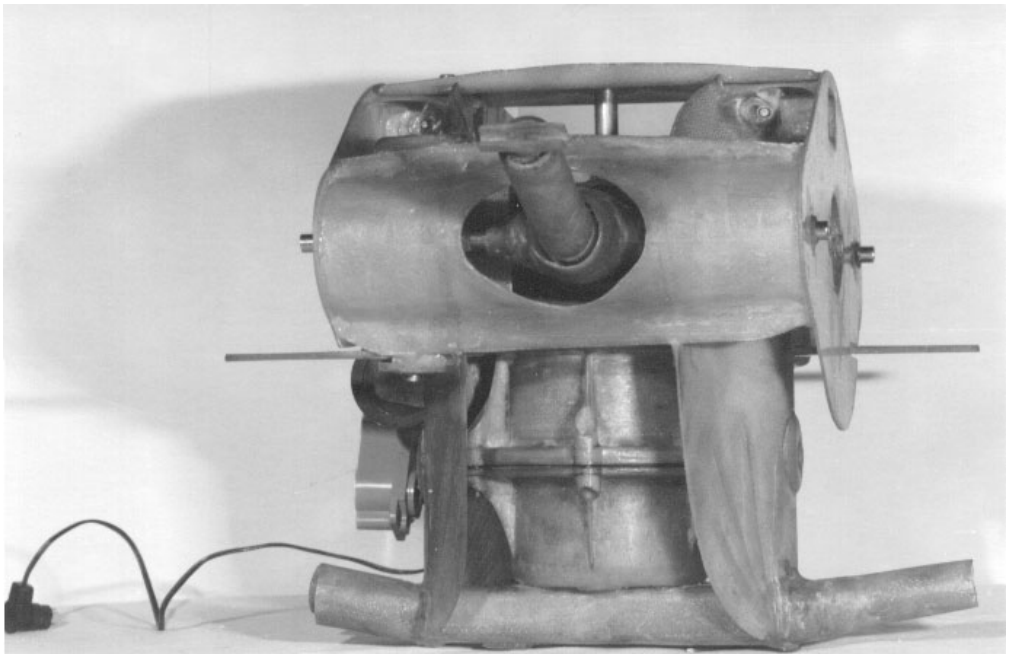

Bild 1 Gasdruck-betriebener Schlagflügelantrieb 1968

[1] Herzog Karl: Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik.
Mechanikus, Heft 1-4/1963; 10-12/1963 und 1-3/1964, Verlagsort Esslingen am Neckar

[2] Herzog Karl: Anatomie und Flugbiologie der Vögel. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1968

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

In Anbetracht der fertigen Mechanik war aber bald klar, dass das Ganze viel zu kompliziert und zu schwer geworden war. Noch vor dem Bau des Kessels wurde daher die Entwicklung abgebrochen.

Auch das nächste Antriebsprinzip hatte bei früheren Schlagflügelmodellen schon mal Verwendung gefunden. Es war eine Dampfmaschine bei der als Treibmittel Kohlensäure eingesetzt wurde. Der tschechische Modellbauer Chalupsky [3] hatte so einen Antrieb bereits 1935 bei seinen 2 bzw. 3,5 kg schweren Schwingenflugmodellen erfolgreich verwendet. Er erreichte damit beachtliche Flughöhen.

Für meine Zwecke gab es da so kleine CO_2-Druckgasflaschen mit Druckminderer auf dem Markt, die für den Antrieb von Prothesen verwendet wurden. Sie schienen mir als Energiespeicher geeignet. Etwa 1972 wurde die dazugehörige Mechanik fertig. Aber auch dieser Antrieb hatte zu viele Schwächen. Sie waren wohl in erster Linie auf meine primitiven Fertigungsmethoden der Pneumatikteile zurück zu führen.

Es folgt die Konstruktion eines Dieselantriebs. Da sich ein Dieselmotor während des Fluges damals zwar abstellen, aber nicht wieder anwerfen ließ, wurde eine Mechanik mit einer Kardankurbel erdacht, die eine Umschaltung zwischen Kraft- und Gleitflug auch bei laufendem Motor zuließ. Zwar kam auch diese Dieselversion nicht über das Stadium von Skizzen hinaus. Da aber die Kardankurbel bei meinen nachfolgenden Entwicklungen eine bedeutende Rolle spielte, soll deren Wirkungsweise hier etwas ausführlicher beschrieben werden.

2. Schlagflügelantrieb mit Kardankurbel

Das Prinzip der Kardankurbel wird in der Technik häufig verwendet. Sie besteht im vorliegenden Fall aus einem Innenzahnrad und einem Planetenrad. Der Teilkreisdurchmesser des Planetenrades ist genau halb so groß wie der des Innenzahnrades. Ein Kurbelzapfen, dessen Achse genau auf dem Teilkreisdurchmesser des Planetenrades liegt, hat dann eine eigentümliche Eigenschaft. Beim Abrollen des Planetenrades im Innenzahnrad, bewegt er sich geradlinig auf einem Teilkreisdurchmesser des Innenzahnrades hin und her. So ein Kardankurbelzapfen bietet also die Möglichkeit, die Antriebsbewegung für den Schlagflügel genau senkrecht in Rumpfmitte auf und ab verlaufen zu lassen. Man spart sich dadurch gewichtige mechanische Führungen.

Wie so ein Schlagflügelantrieb im Prinzip aussehen kann, zeigt nachstehende Abbildung. Sie ist meiner Patentschrift DE 26 28 846 (Anmeldung 1976) entnommen.

---

[3] Chalupsky Cenek: Preßluft-Schwingenflugmodell Chalupsky. Der Sportflieger, Juni 1938 (28) S. 28; und Piskorsch Adolf: Bewegte Schwingen. Selbstverlag, Sontheim an der Brenz, 1975, S. 74 bis 78

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

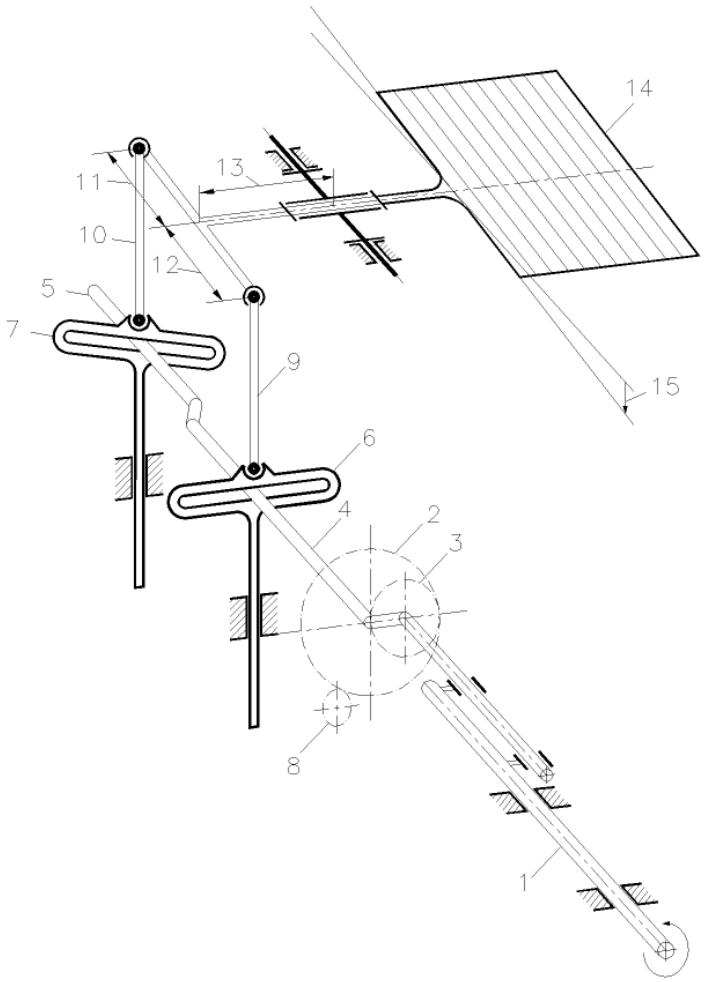

Bild 2 Schlagfläche mit Kardankurbelantrieb

Die Mechanik besteht insbesondere aus der Antriebswelle 1, dem Innenzahnrad 2, dem Planetenrad 3, sowie zwei auf dem Planetenrad-Teilkreis versetzt angeordnete Kurbelzapfen 4 und 5. Letztere greifen - zweckmäßig über Gleitsteine - in die Kreuzschleifen 6 und 7 ein, deren Schleifenachsen im gleichen Maße gekreuzt sind wie die Bahnlinien der beiden Kurbelzapfen (im Bild aber um 90 Grad gedreht). Die Kreuzschleifen wirken über die Lenker 9 und 10, sowie den Hebelarmen 11, 12 und 13 auf die Schlagfläche 14.

Aus dem Versatz der Kurbelzapfen ergibt sich deren phasenverschobene Bewegung. Diese überträgt sich auf die Schlagfläche in Form einer gegenüber der Schlagbewegung um 90 Grad phasenverschobene Drehbewegung 15. Durch Variation der genannten Hebelarme kann die Größenkombination von Schlag- und Drehbewegung in weiten Grenzen variiert werden.

Bei einem Antrieb mit Dieselmotor lässt sich die Bewegung der Schlagfläche über den Stellantrieb 8 durch Drehung des Innenzahnrades verändern. Die Einstellung erfolgt nur in einem Drehwinkelbereich zwischen Null und 90 Grad. Steht das Innenzahnrad z. B. auf Null Grad, verlaufen beide Kurbelzapfen entlang der jeweiligen Kreuzschleifenachse. Beide Kreuzschleifen stehen dabei - trotz vielleicht laufendem Motor - unbeweglich genau in Mittelstellung. Dreht man nun mit dem Stellantrieb das Innenzahnrad langsam um bis zu 90 Grad, so beginnt bei laufendem Hauptantrieb die Auf- und Abbewegung der Kreuzschleifen. Die Schlagweite und die Drehbewegung der Schlagfläche vergrößern sich mit dem Verstellwinkel des Innenzahnrades bis zu einem Maximalwert.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

In der dargestellten 90 Grad-Stellung - also bei voller Schlagweite - bewegt sich der Kurbelzapfen 4 genau in Kreuzschleifenmitte stehend auf und ab. Gleichzeitig bewegt sich zwar der Kurbelzapfen 5 um den Kurbelzapfenversatz in seiner Kreuzschleife 7 etwas hin und her, diese folgt aber in senkrechter Richtung praktisch vollständig der Linearbewegung von Nr. 6.

Bei Verwendung eines elektrischen Hauptantriebes besteht die Möglichkeit, die Verstellbewegung des Innenzahnrades auch ohne zusätzlichen Stellantrieb zu bewerkstelligen. Das Innenzahnrad muss dazu nur um 90 Grad zwischen zwei Anschlägen frei drehbar gelagert sein. Wenn man dann, bei einseitig wirkender Last, die Drehrichtung des Hauptantriebes umgekehrt, wechselt das Innenzahnrad seine Endlage. Es schaltet damit automatisch die Bewegung der Schlagfläche vom Wert Null auf den Maximalwert oder zurück. Dies war bei den damals zur Verfügung stehenden Motorstellmitteln ein einfaches Verfahren zur Umschaltung zwischen Kraft- und Gleitflug.

Natürlich kann man den elektrischen Hauptantrieb in der Gleitflugstellung des Innenzahnrades auch abschalten. Erfolgt die Abschaltung dabei zu einem Zeitpunkt, in dem der Kurbelzapfen 4 gerade in der Kardankurbelmitte steht, so steht er gleichzeitig in einem Totpunkt der Kurbel. Eine zusätzliche Verriegelung der Schlagflügel in dieser Gleitflugstellung, beispielsweise für die Landung, ist dann nicht erforderlich.

Dieser Kardankurbelantrieb war eine sehr einfach zu handhabende und sicher arbeitende Konstruktion - leider aber komplett aus Metall und daher recht schwer.

3. Mein erster Elektrovogel (EV1)

Bei meinem ersten Schlagflügelmodell verwendete ich eine elektrisch betriebene Kardankurbel mit Umschaltung zwischen Kraft- und Gleitflug durch Drehrichtungswechsel.

Bild 3 Kardankurbelantrieb des EV1, bestehend aus
Kurbel, Hub 40 mm, Kraft in Schlagmitte ca. 200 N
Planetengetriebe dreistufig, Untersetzung 126:1, Gewicht 150 g
Glockenankermotor ca. 90 W, Gewicht 275 g
Gesamtgewicht 890 g

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Dem Modell gab ich, zur Unterscheidung gegenüber den vorhergehenden Dampf- und Dieselversionen, die Bezeichnung "EV1", die sich von "Elektro-Vogel Nr. 1" ableitet.

Die Idee einen Elektroantrieb zu verwenden war dabei aber keineswegs neu. Jacob Goedecker aus Mainz hat bereits 1932 einen elektrischen 30 Watt-Schlagflügelantrieb für seinen "Albatros" gebaut. Dieses Vollschwingenmodell mit profilierten Flügeln wog 1,9 kg und hatte eine Spannweite von 2,7 Meter.

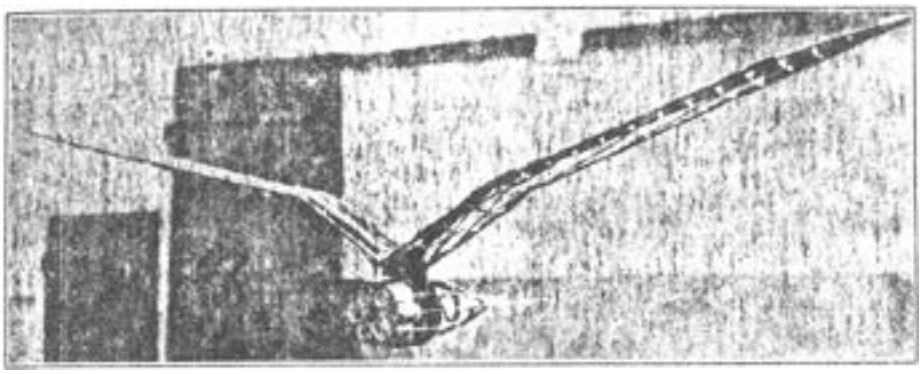

Bild 4 Der erste elektrisch betriebene Ornithopter von dem Luftfahrtpionier Jacob Goedecker [4] aus Mainz-Gonsenheim 1932

Der EV1 wog etwa 5,4 kg, hatte eine Spannweite von 2,9 m und arbeitete theoretisch mit einer Schlagperiodendauer von etwa 0.8 Sekunden. Das Flügelprofil entsprach den Profilempfehlungen von Karl Herzog und war daher zumindest im Armflügelbereich im vorderen Fünftel stark gewölbt. Die Flügeltiefe an der Flügelwurzel betrug immerhin 440 mm.

Entsprechend der Vogelflugtheorie von E. v. Holst [5] arbeitete das Modell mit einer Armflügelverdrehung (s. Flügelwurzel in Bild 7). Diese hat der Antrieb aktiv erzeugt. Die Relativbewegung zwischen der Flügelwurzel- und dem Rumpfanschlussprofil wurde dann zum Antrieb einer aktiven Handflügelwurzel-Verdrehung weiter verwendet. Die Handflügel selbst sollten sich aeroelastisch verwinden, waren aber leider sehr verwindungssteif geraten.

Als Bespannung diente eine dünne Frischhaltefolie aus der Küche, die teilweise mit einem über den Flügel gezogenen Nylon-Damenstrumpf gehalten wurde. Erstmals wurde ein Rumpf-Flügel-Übergang mit einer in der Schlagachse liegenden, symmetrisch profilierten Walze verwendet. Sie ermöglicht einen strömungsdichten und -günstigen Flügel-Rumpf-Übergang.

Um mit einer kleinen Antriebsleistung auszukommen, wurde - zur Kompensation der einseitig auf den Flügel wirkenden Auftriebskräfte - ein 20-facher Gummistrang über einen kleinen Flaschenzug entlang der Rumpfachse nach hinten gespannt. Er drückte mit etwa 500 N über einen Winkelhebel gegen den inneren Flügelhebelarm und damit den Flügel entgegen der Auftriebskraft nach unten. Zur Aufnahme der Gummizugkräfte musste der Rumpf in Längs-

---

[4] Goedecker Jacob: Der Schwingenflug. FLUGSPORT. Nr. 26, Seite 561-563, erschienen etwa 1932/33 (der Herausgeber ist hier leider nicht bekannt)

[5] v. Holst Erich: Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen. Gesammelte Abhandlungen Band II, R. Piper & Co Verlag, München, 1970

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

richtung entsprechend druckfest - aus Rohacell-Ringen - mit etwa 1 cm Wandstärke aufgebaut werden.

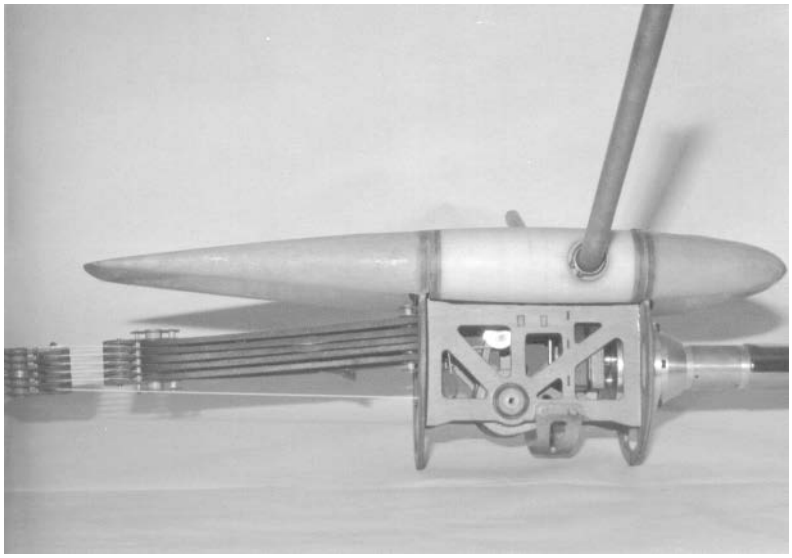

Bild 5 Antriebsmechanik des EV1 mit Flügelanschlusswalze und einem Gummistrang als Kompensationsfeder

1975 begann ich mit den Gleit- und Laufversuchen. Der Gleitwinkel und das Steuerungsverhalten waren recht ordentlich und auch die Schlagversuche, während ich mit dem Modell durch die Gegend rannte, verliefen zufriedenstellend.

Bild 6 Laufversuche mit dem EV1 1975

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Dann der erste Kraftflug. Meine jahrelang gehegten Befürchtungen, dass sich der Rumpf eines derartigen Modells im Kraftflug deutlich auf- und ab bewegen und in der unteren Flügelstellung instabil fliegen würde, bewahrheiteten sich nicht. Im Gegenteil, die senkrechte Rumpfpendelbewegung war trotz der unelastischen Flügel kaum sichtbar und die Fluglage recht stabil. Außerdem zeigte der Kardankurbelantrieb erstmals seine problemlose Funktionsfähigkeit.

Bild 7 Der EV1 bei seinem ersten Kraftflug 1975

Leider ließ sich der Gleitwinkel des Modells durch die Flügelschläge nur bei wenigen Flügen kurzzeitig bis zum Horizontalflug steigern. Trotz seiner nur kurzen Kraftflüge von etwa 10 Flügelschlägen war der EV1 für mich aber ein guter Einstieg in das nun immer intensiver betriebene Hobby.

4. Verschiedene Irrwege der Entwicklung (EV2 bis EV4)

Das Haupthandicap des EV1 war seine mangelnde Flügelverwindung. Mein Vater machte aber dann eine dünne, elastische Folie samt Lieferanten ausfindig und ich entdeckte per Zufall die heute in jedem Baumarkt angebotenen, doppelseitig klebenden Klebestreifen, mit denen man die Folie auf den Flügelrippen befestigen konnte. Dazu kam die Idee, die Rippen nur noch lose auf Haupt- und Hilfsholm zu stecken und sie lediglich mit der Bespannfolie auf Abstand zu halten. Damit war ein Durchbruch zu fast beliebig verwindbaren Tragflächen mit glatter Oberfläche gelungen.

Lenkte man darüber hinaus Haupt- und Hilfsholm - wie nachstehend dargestellt - getrennt an, so entstand ein Schlagflügel mit gesteuerter Verwindung, der in der Kardankurbel-Gleitflugstellung einen mittleren Einstellwinkelverlauf aufwies. Durch Zwischenschaltung eines Servos beim vorderen Lenker war es dabei möglich, die Verwindung per Fernsteuerung zu beeinflussen. Wurden dann auch noch biegeelastische Flügelholme eingesetzt, so war mit einem weichem Bewegungsablauf zu rechnen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

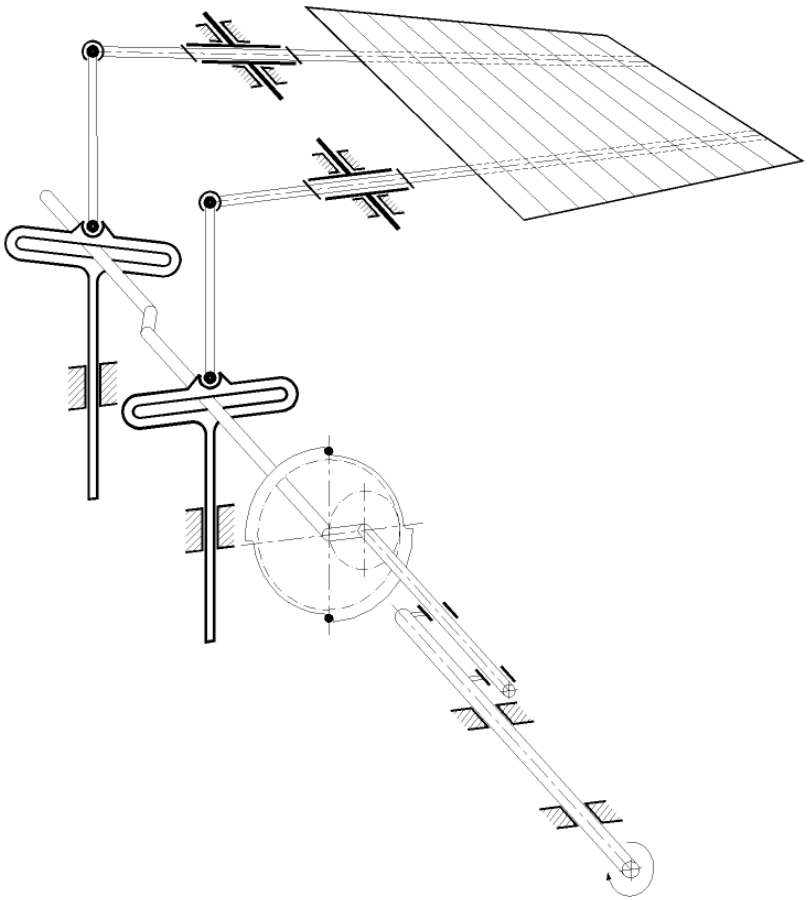

Bild 8 Kardankurbel für die gesteuerter Flügelverwindung des EV2, mit Gleit-Kraft-Umsteuerung durch Drehrichtungswechsel

In der ersten Euphorie über diese neuen Möglichkeiten wurde der EV2 konstruiert. Durch das blinde Bestreben das Modell vogelähnlich zu gestalten wurde es aber ein glatter Reinfall.

Selbst mit Seitenleitwerk kam es nicht über die Gleitflugversuche hinaus. Die elastische Flügelverwindung, die eigentlich die Fluglage hätte stabilisieren sollen, war durch die nach außen verjüngten Flügelholme (GfK-Angelruten) viel zu unkontrolliert. Der für den Gleitflug erforderliche Einstellwinkel ließ sich einfach nicht reproduzierbar einzustellen. Außerdem funktionierte die Beeinflussung der Flügelverwindung durch die Servos infolge der Flügelbespannungskräfte nicht wie gewünscht.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Bild 9 Die Flügelverwindung des EV2 für den Aufschlag 1976

Bild 10 Die Flügelverwindung des EV2 für den Abschlag. Zur aeroelastischen Verwindung wäre beim Kraftflug noch die gesteuerte Verwindung hinzugekommen.

Von diesem Modell wurden insbesondere die elastische Flügelkonstruktion und die senkrechte Anordnung der Kompensationsfeder (Stahl, 250 g) weiter verwendet. Auch das dazugehörige Kraftübertragungsprinzip zwischen Antrieb und Flügel mit zwei parallelen Lenkern je Flügelseite blieb weiter im Einsatz. Darüber hinaus beeinflusst mich wohl noch heute die Erfahrung, dass es wenig bringt die natürlichen Vorbilder in wesentlichen Teilen einfach nur ungefähr nachzubauen, ohne sie wenigstens einigermaßen verstanden zu haben.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Bild 11 Zerlegte Antriebsmechanik des EV2

Vom EV3 gab es dann wieder nur einen Ordner voller Skizzen. Wegen zu starker Kompaktheit im Mechanikbereich wurde die Planung 1978 abgebrochen. Damals hatte ich ja noch keine CAD-Unterstützung, mit der man die Zeichnungen hätte einfach auseinander ziehen können. Ich arbeitete noch mit Bleistift und Radiergummi.

Es folgte der EV4, der wieder zur Bauausführung kam und einen kleinen Fortschritt brachte. Bei ihm wurde statt der Kompensationsfeder aus Stahl eine leichte Luftdruckfeder verwendet. Sie bestand aus einem geschlossenen Druckkessel und einem mit einer Rollmembran abgedichteten Kolben, so wie ich das von meiner Freon-Dampfmaschine her kannte (s. Bild 1). Der Zylinder konnte mit einer Fahrradluftpumpe auf etwa 4,5 bar aufgepumpt werden. Durch Variation des Luftdrucks vor dem Start, ließ sich das Schlagzeitverhältnis von Auf- und Abschlag beeinflussen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

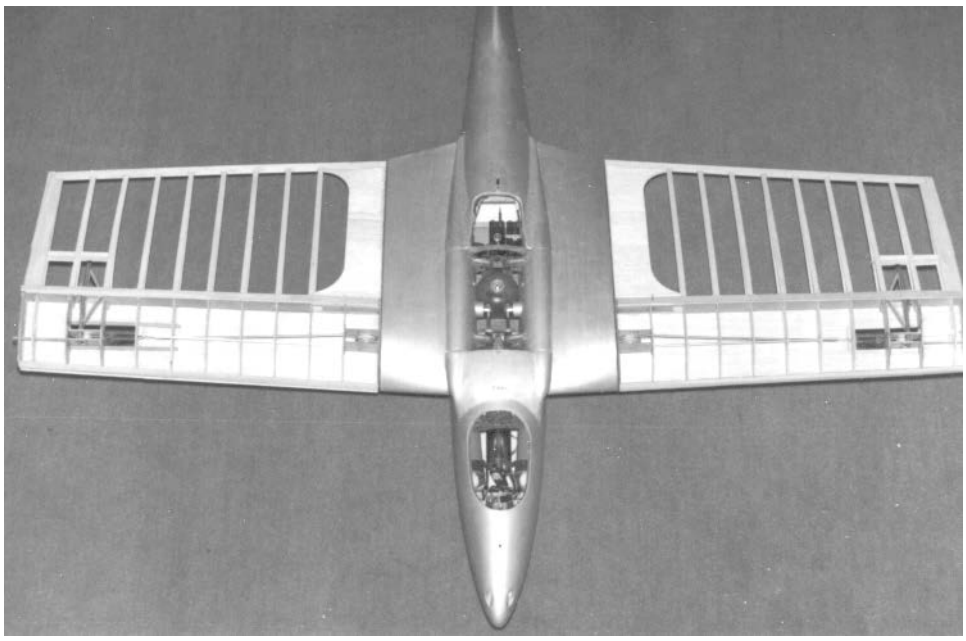

Bild 12 Flügelmittelteil des EV4.
Man sieht im vorderen Teil des Flügels die Steuerungsmechanik zur Verwindung des Handflügels durch Nutzung der Relativbewegung zwischen Wurzelrippe und Rumpf

Die hochelastische Flügelverwindung des EV2 wurde beim EV4 vorsichtshalber nur noch im Handflügelbereich angewandt. Der Armflügel arbeitete wieder nur mit einer Verdrehung, war aber sonst starr wie ein herkömmlicher Tragflügel. Die Schlagebene hatte eine Neigung von 3,5 Grad in Richtung oben-hinten nach unten-vorn. Die Kardankurbel der Vorgängertypen wurde unverändert weiter verwendet.

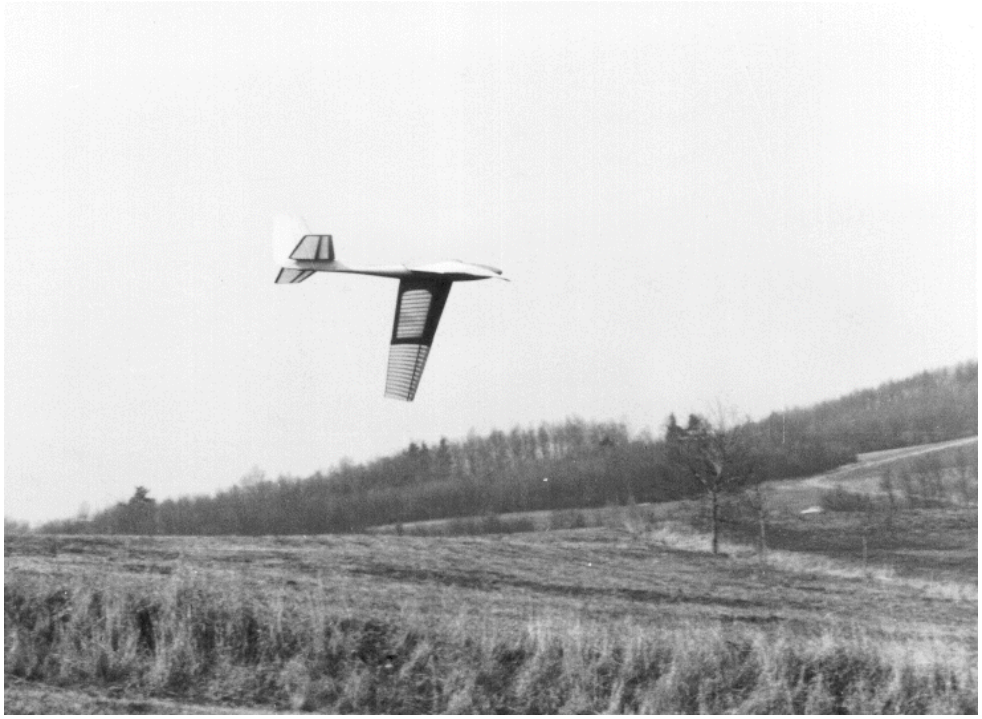

Bild 13 Der EV4 mit den Flügeln in der unteren Endlage 1979

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Der EV4 absolvierte eine Reihe kleinerer Kraftflüge. Die längste zusammenhängende Kraftflugstrecke betrug vielleicht 300 Metern. Letztendlich war bei diesem Vogel die Elastizität der Handschwinge zwar nicht mehr zu groß, aber immer noch zu unkontrolliert. Die Kraftflüge des EV4 mussten immer wieder schon nach kurzer Zeit abgebrochen werden. Die Flugleistung ließ sich trotz diverser Einstellungsänderungen an Mechanik und Flügel einfach nicht verbessern. Es folgte daher ein größerer Umbau.

5. Fortschritt mit Hilfe der Theorie (EV5 und EV6)

Der auch beim EV4 aus Rohacell-Ringen aufgebaute Rumpf wurde weiter verwendet, der Leitwerkhebelarm aber verlängert. Statt einem Kreuzleitwerk erschien mir nun ein T-Leitwerk als geeigneter. Vielleicht hing ja die Instabilität mit der während der Schlagbewegung veränderlichen Leitwerkanströmung zusammen.

Auch die alte Kardankurbel gedieh weiter. Das Innenzahnrad (Bild 2, Pos. 2) erhielt nun außen Nuten wie ein Schrittschaltwerk für fortlaufende 90°-Schritte. Die Umsteuerung zwischen Kraft- und Gleitflug erfolgte jetzt - unter Beibehaltung der Hauptantriebsdrehrichtung - einfach über einen Hebel der mit einem Servoantrieb verbunden war.

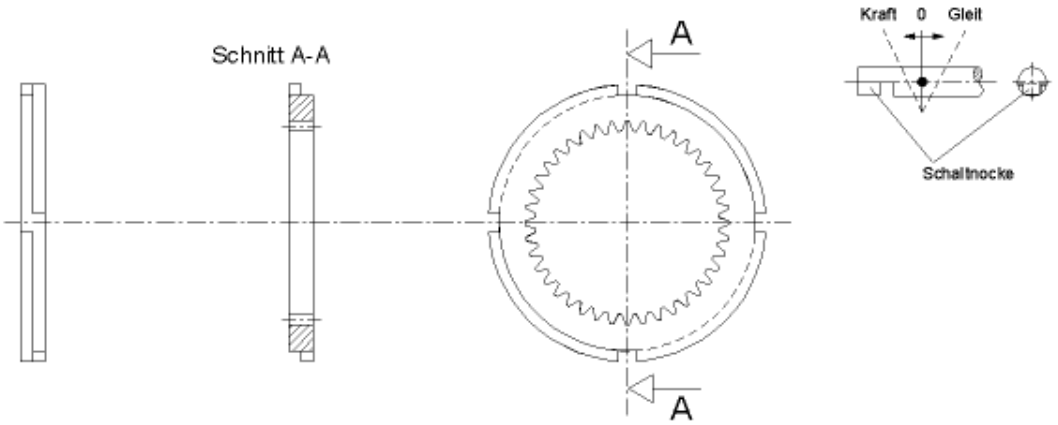

Bild 14 Innenzahnrad für eine Kardankurbel mit 90°- Schrittschaltsteuerung zur Gleit-/Kraft-Umschaltung

Diese Änderung konnte mit einfachen Mitteln an dem vorhandenen Kardankurbelantrieb durchgeführt werden (s. nächstes Bild).

Die von E. v. Holst und Karl Herzog empfohlene Flügelverdrehung erschien mir, auf Grund von Zeitlupenaufnahmen der biologischen Vorbilder im Fernsehen schon seit längerem als nicht unbedingt erforderlich. Sie wurde daher fallen gelassen und bei allen Folgemodellen der Einstellwinkel an der Flügelwurzel immer konstant gehalten. Dies vereinfacht die Mechanik.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

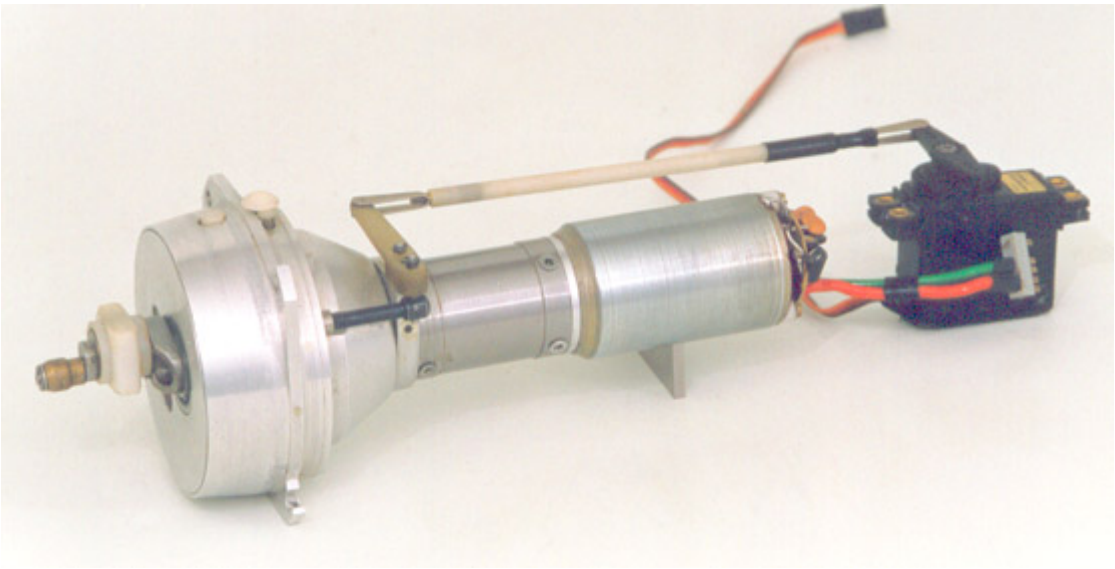

Bild 15 Kardankurbelantrieb des EV5 mit Gleit-Kraft-Umschaltung durch Servohebel

Der Flügel war nun auf der ganzen Länge verwindbar, wobei die Verwindung im Armflügelteil aber noch der Antrieb steuerte und nur im Handflügelbereich aeroelastisch erfolgte. Dabei zeigen sich im Handflügel die ersten Ansätze einer Verwindungsgestaltung, wie sie auch später beim EV7 noch eingesetzt wurde. Der aus diesem Umbau resultierende EV5 hatte 2,7 Meter Spannweite und wog 5,2 Kilogramm.

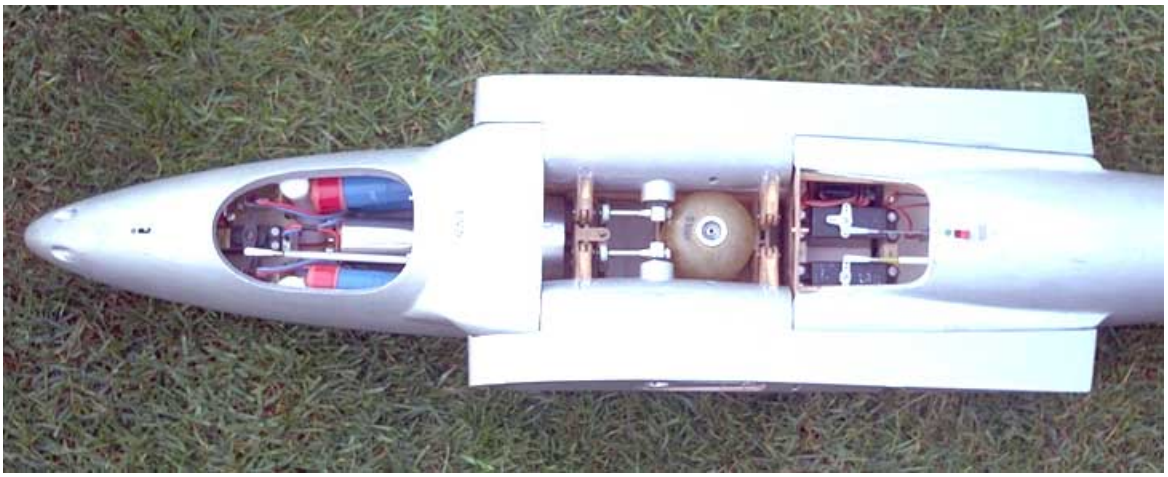

Bild 16 Geöffneter Rumpf des EV5

Die Flugverbesserungen gegenüber dem EV4 waren zwar nicht all zu groß, aber doch deutlich erkennbar. Offensichtlich hatte auch die schon während des Baus des EV5 begonnene, intensive Beschäftigung mit der Schlagflügeltheorie weiter geholfen.

In einer ersten Näherung wurde dabei angenommen, dass sich die schnell wechselnden Strömungsvorgänge am Schlagflügel zu jedem Zeitpunkt der Schlagbewegung so verhalten, wie wenn die betreffenden Strömungsbedingungen schon längere Zeit vorliegen. Bei der Berechnung wurde sozusagen mit "quasistationären" Bedingungen gearbeitet. Auf diese Weise können bekannte Gleichungen der herkömmlichen Tragflügeltheorie zur Beschreibung der Veränderungen am Schlagflügel angewandt werden.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Es gab damals schon erschwingliche Taschenrechner, die auch mehrere mehrzeilige Rechenprogramme abarbeiten konnten. Dazu musste man nur kleine Datenträgerstreifen von etwa 7 cm Länge nacheinander mit der Hand durch einen Schlitz am Taschenrechner ziehen. Auch umfangreiche Rechenaufgaben ließen sich damit bewältigen. Die Auswertung war allerdings recht mühsam. Alle Ergebnisse mussten von einem kleinen einzeiligen Display abgeschrieben und dann möglichst in Diagramme umgesetzt werden. 1982 waren es etwa 30 Datenstreifen die mein Bruder Wolfgang - der übrigens auch alle Fotos aufgenommen hat - mit seinem Rechner und meinen Gleichungen brauchte, um bis zu einem Kräftegleichgewicht vorzudringen. Daraus wurden dann die Flügel-Konstruktionsdaten ermittelt.

Außer von der Rechnerei, bekam ich inzwischen auch durch meine ab 1980 bestehenden Brieffreundschaften mit anderen Ornithopterbegeisterten immer wieder neue Denkanstöße. Zunächst kam ein Kontakt mit Herrn Karl Herzog und Herrn Adolf Piskorsch zustande. Kurz darauf dann auch mit Herrn Horst Händler, der schon längere Zeit mit den beiden anderen Herrn in Verbindung stand.

Bild 17 Karl Herzog (links) als Berater bei Flugversuchen mit dem EV5 1981

Die Beschäftigung mit der Theorie zeigte erste Erfolge. Mit den Rechenergebnissen bekam ich ein Gefühl der Sicherheit, welche Teile des Modells schon annähernd in Ordnung waren und wo noch geeignete Lösungen fehlten. Besonders das Konstruktionsziel, wie eine geeignete Auftriebsverteilung und die dazugehörige Flügelverwindung auszusehen hat, lag nur klar vor und ich brauchte nicht mehr gar so viele Annahmen zu treffen. Es wurde auch leichter, die oft recht widersprüchlichen Literaturangaben über Schlagflügelbewegungen zu bewerten. Letztendlich mündete das ganze Rechenwerk in eine Neukonstruktion des Flügels.

Rumpf und Leitwerk des EV5 blieben im Einsatz. Die dynamische Schwingungseigenschaft der Schlagflügelmasse wurde teilweise berücksichtigt. Zumindest in der oberen Schlagflügelendlage kam dafür eine sogenannte "Endlagenfeder" zur Anwendung, welche die Aufgabe hatte, die dort bei jedem Schlag ankommende Schlagflügelmasse abzubremsen und in die entgegen gesetzte Schlagrichtung wieder zu beschleunigen. Darüber hinaus verließ ich auch die Anwendung der

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

"Fantasie-Profile nach Vogelart". Seit dem kommen nur noch Profile mit bekannten technischen Daten zur Anwendung.

Das Ergebnis der ganzen Bemühungen war der EV6, der im Frühjahr und Herbst 1983 eine Vielzahl schöner, wenn auch nach wie vor kurzer Flüge absolvierte. Weiterhin wurden Kraftflugzeiten von kaum einer Minute erreicht. Immer wieder musste wegen instabiler Flugzustände vorzeitig auf Gleitflug umgeschaltet werden. Die Umschaltung zwischen Kraft- und Gleitflug und umgekehrt war aber schon direkt sehenswert. Sie verdeutlichte in wunderschöner Weise den Wechsel zwischen schwerer Flugarbeit und schwerelosem Gleiten. Immer öfter gelang auch die Umschaltung auf Gleitflug bei noch ausreichender Flughöhe - wenn nicht, so kam es auch weiterhin zu den üblichen "Punktlandungen".

Bild 18 EV6 beim Aufschlag 1983

Auch in der Folgezeit habe ich das Heil in der Theorie gesucht. Ich durchstöberte die Bibliotheken um die Berechnungsmethoden zu verbessern. Außerdem erhielt ich von meinen Brieffreunden immer wieder mal alte und neue Fachliteratur.

1984 kaufte ich mir einen sündhaft teuren Handheld-Computer mit immerhin 24 kB RAM und einem langen, einzeiligen Display. Die Datenträgerstreifen waren nun, trotz erhöhter Speicherdichte, schon 24 cm lang und mussten nicht mehr gar so oft durch den Leseschlitz gezogen werden. Das Rechenprogramm war allerdings komplett zu überarbeiten, die Schlagflügelberechnung aber dann schon fast ein Kinderspiel.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

6. Derzeitiger Stand (EV7)

All das angesammelte Know How wurde nun in die Entwicklung des EV7 gesteckt. Das erste Mal verließ ich die bewährte Kardankurbel. Kurbeln haben ja für Schlagflügel leider eine etwas ungünstige Bewegungscharakteristik. Die Schlaggeschwindigkeit steigt damit im Bereich der einen Endlage zunächst an, erreicht in Schlagmitte ihr Maximum und fällt zur anderen Endlage hin wieder auf Null zurück. Nur in Schlagmitte liegt die maximale Schlaggeschwindigkeit vor.

Die maximal erzielbaren Schubwerte werden also nur in einem ganz kurzen Augenblick erzeugt. Vor und nach der Mittelstellung der Flügel fällt die Energieumwandlung deutlich ab. Dies bedeutet auch, dass die Leistung des Antriebs mit entsprechend schwerem Getriebe und stabiler Mechanik, der maximal zulässigen Auftriebsbeiwert des verwendeten Profils, sowie die maximal bereit gestellte Flügelverwindung bei jedem Schlag nur für einen ganz kurzen Moment voll genutzt werden.

Derartig kritische Überlegungen führten zur Entwicklung eines Triebstock-Antriebs. Bei diesem wird ein Ritzel um eine beidseitig gezahnte Zahnstange - dem Triebstock - durch eine Rollenbahn zwangsweise herum geführt. Kann sich bei Ritzeldrehung die Ritzelachse nur seitlich hin und her bewegen, so folgt daraus eine geradlinige Auf- und Abbewegung des Triebstocks. Nähere Einzelheiten sind aus nachstehenden Fotos ersichtlich.

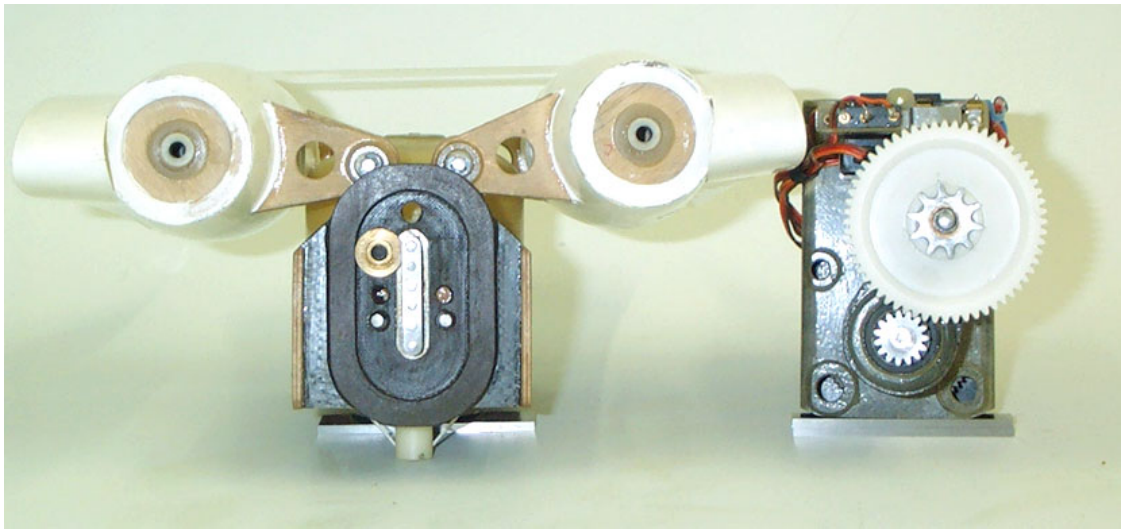

Bild 19 Frontansicht auf den geteilten Triebstock-Antrieb des EV7

Ein derartiger Antrieb ist in der Lage, die maximale Schlaggeschwindigkeit während eines Taktes über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten. Entsprechend groß wird der damit erzeugte Schubimpuls. Etwas aufwendig ist dabei die elektronische Umschaltung zwischen Kraft- und Gleitflug mit dem Anfahren der genauen Gleitflugstellung. Außerdem muss vor und nach dem Kraftflug auch noch eine mechanische Verriegelung aus- und eingefahren werden. Sie soll im Stillstand - insbesondere bei der Landung - ein Verlassen der Flügel aus der Gleitflugstellung verhindern. Das erfordert zwar etwas Elektronik, bringt aber insgesamt weniger Gewicht auf die Waage. Gegenüber der Kardankurbel wurde sozusagen Mechanik durch Elektronik ersetzt.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

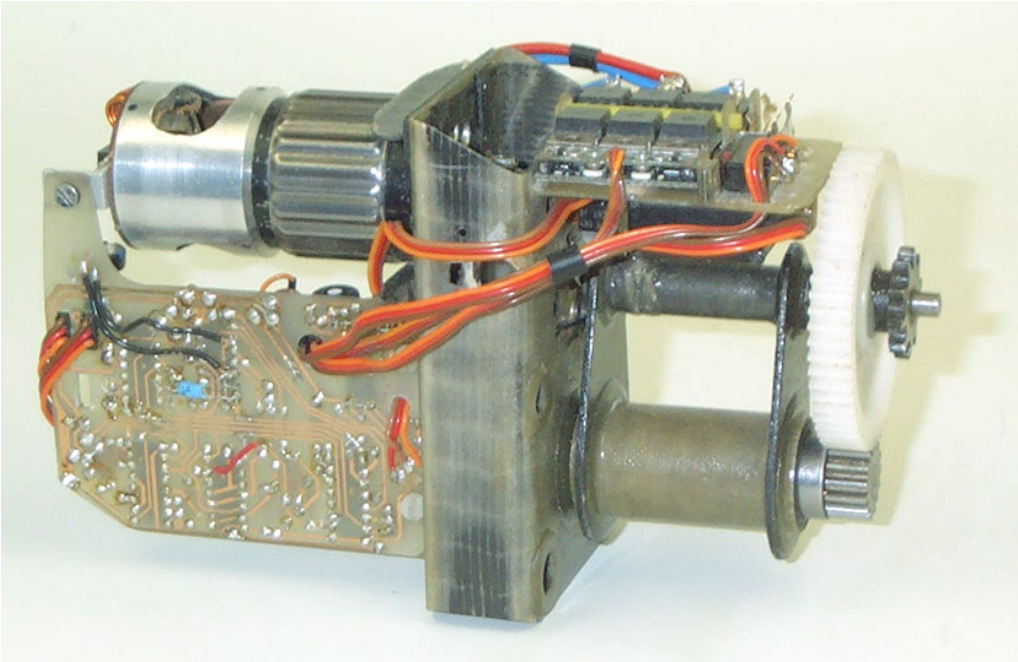

Bild 20 Seitenansicht des Triebstock-Antriebs (Gewicht 500 g)

Neben der großen Luftdruck-Kompensationsfeder, wie im EV4, kam nun - nach den guten Erfahrungen beim EV5 - wieder die Endlagenfeder, diesmal aber für beide Flügelendlagen zum Einsatz. Die Nennleistung des E-Motors wurde vorsorglich auf 180 W erhöht. Die theoretische Schlagperiodendauer lag bei 0,7 sec. Der EV7 wog bei meist 3 Meter Spannweite - je nach Experimentierstadium - 4,5 bis 5 Kilogramm.

Daneben erhielt der EV7 ein V-Leitwerk. Die Verwindungsmechanik der aeroelastischen Flügel ließ sich weiter verbessern. Die rechnerisch inzwischen als vorteilhaft erkannte Neigung der Schlagebene wurde aus Vereinfachungsgründen wieder fallen gelassen. Im Übrigen ähnelt der EV7 stark seinem Vorgänger - auch bezüglich des Landeverhaltens.

Bild 21 Eine der üblichen "Punktlandungen". Wegen der weitgehenden Zerlegbarkeit kam es dabei nur selten zu größeren Schäden

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Der EV7 flog in den Jahren von 1989 bis 1995 und konnte für diverse Experimente verwendet werden. Beispielsweise wurden erste Hochstarts durchgeführt, aufgefächerte Flügelspitzen eingesetzt und verschiedene Profile angewendet (NACA-Typen, CLARK Y 11,7). Längs der Spannweite kamen auch mehrere, unterschiedliche Profile zum Einsatz. Im Flügelinneren wurde gelegentlich auch mit Verwindungs-Dämpfungseinrichtungen experimentiert.

Bild 22 EV7 auf Reisen 1989

Einmal habe ich versehentlich während des Kraftfluges einfach abgeschaltet, ohne die Gleitstellung anzufahren. Der Vogel kam mit zufällig stark positiver V-Flügelstellung im Sackflug herunter. Nach ca. 10 Meter Höhenverlust und Einschaltung des Antriebs flog er dann weiter, als wenn nichts gewesen wäre. Dieses Verhalten sieht gut aus und lässt sich vielleicht einmal als Landehilfe oder auch als Thermikbremse verwenden.

Bei den Flugleistungen gelang aber der entscheidende Durchbruch nach wie vor nicht. Den sehe ich erst dann gegeben, wenn die komplette Akkufüllung in nur einer Kraftflugphase voll genutzt werden kann. Die theoretische Kraftflugzeit bei sehr flachem Steigwinkel würde dann, mit der von mir verwendeten, einfachen Ausstattung (mit 2 Ah-Zellen), etwa 7 Minuten betragen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

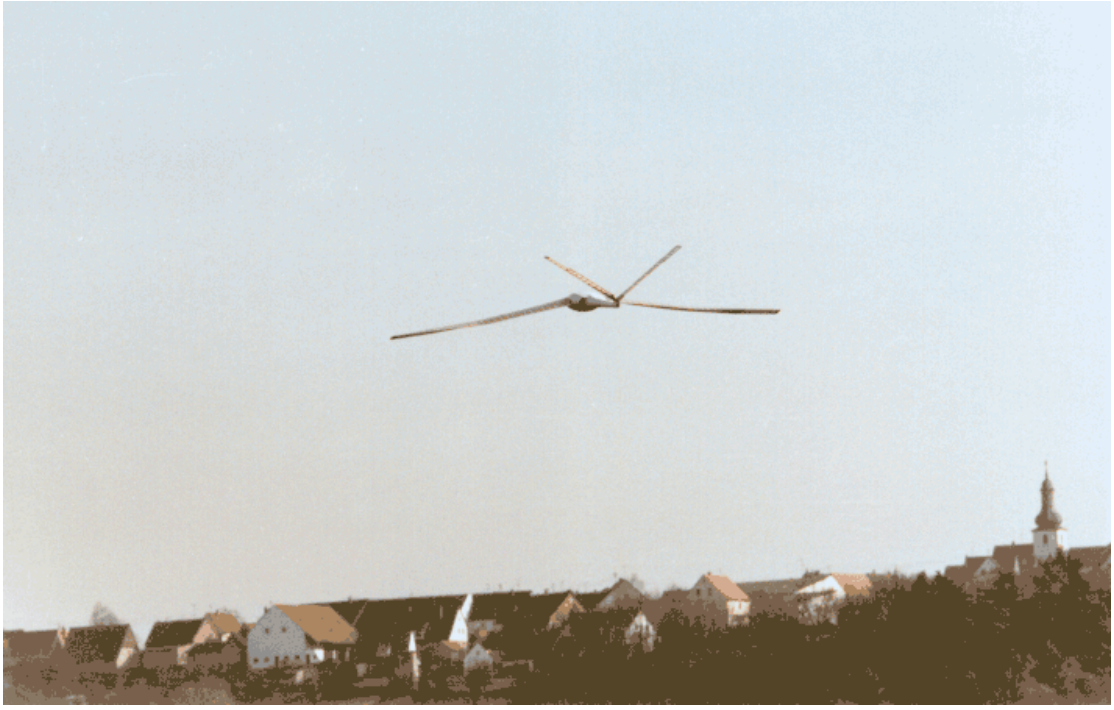

Bild 23 EV7 beim Abschlag 1990

Obwohl der EV7 zwei mal im Kraftflug einen ganzen Vollkreis geschafft hat und vereinzelt wunderschöne ruhige Streckenflüge absolvierte, musste dann doch immer wieder wegen plötzlicher Fluginstabilität vorzeitig auf den Gleitflug umgeschaltet werden. Lediglich einzelne Kraftflüge erreichten eine Dauer von etwas mehr als eine Minute am Stück. Ähnlich wie beim EV6 wurden zwar auch kurze, flache Steigflüge erzielt. Es schlossen sich aber meist entsprechende Sinkflüge an. Im Mittel reichte es nur zum Halten der Flughöhe.

7. Weitere Entwicklung

1990, noch während der Experimente mit dem EV7 brach für mich das PC-Zeitalter an. Das Rechenprogramm wurde erneut umgeschrieben. Diesmal war aber die zugrunde liegende Software so komfortabel, dass die Datenflut gleich in Diagramme umgesetzt und diverse Optimierungsmöglichkeiten automatisiert werden konnten. Allein der Quellcode des Rechenprogramms (ohne Grafiken) wuchs dabei auf einige hundert Kilobyte an. Im Zuge dieser Rechnerei entwickelten sich auch meine Vorstellungen von den Vorgängen am Schlagflügel weiter.

Analog zur Propellertheorie kann sicherlich auch der Schlagflügel mit längs der Spannweite geradlinigen Abwindverteilungen recht effektiv arbeiten. Außerdem ist auf Grund von Beobachtungen der natürlichen Vorbilder relativ sicher, dass im horizontalen Reiseflug eine Verdrehung der Flügelwurzel nicht erforderlich bzw. zweckmäßig ist. Stimmt man diesen Randbedingungen zu, so lassen sich auf der Grundlage bekannter Gleichungssysteme der Aerodynamik[6] die Auftriebsverteilungen berechnen und folgende Feststellungen dazu treffen.

[6] Jones Robert T.: The spanwise distribution of lift for minimum induced drag of wings having a given lift and a given bending moment. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 2249, Sept. 1950

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

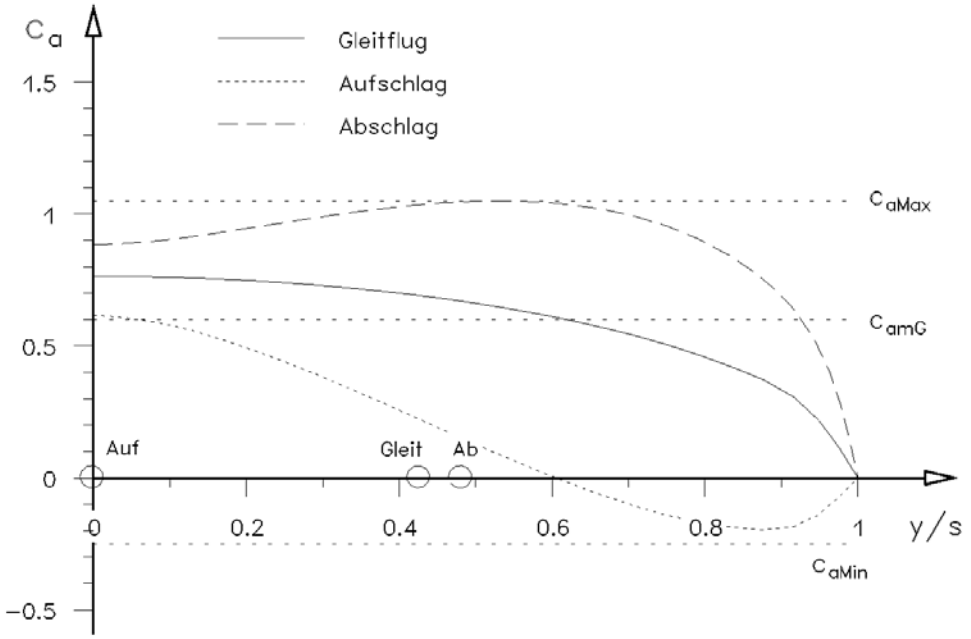

Bild 24 Soll-Auftriebsbeiwert-Verteilungen des EV7 längs der Halbspannweite "s" in gestreckter Flügelstellung für einen flachen, stationären Steigflug. Der mittlere Auftriebsbeiwert im Gleitflug ist mit c_{amG} bezeichnet. Außerdem sind die angenommenen Grenzwerte des verwendeten Profils CLARK Y (11,7) [7] bei nicht idealer Flügelkontur eingetragen. Die Druckpunkte längs der Halbspannweite sind durch kleine Kreise markiert.

Im **Gleitflug** wird die elliptische Auftriebsverteilung mit dem bekanntlich minimalen induzierten Widerstand für Tragflügel mit begrenzter Spannweite verwendet. Ihr Druckpunkt liegt etwa beim 0,42-fachen der Halbspannweite "s".

Der dargestellte Funktionsverlauf des **Abschlags** hat die Verteilungsform mit dem geringsten Energieverlust, bzw. mit dem größten Schub bei gegebenem Schlagmoment. Der Druckpunktabstand von der Flügelwurzel liegt mit 0,48×s nur wenig über dem der elliptischen Verteilung. Schon eine kleine weitere Verlagerung zur Flügelspitze hin führt aber unter vorstehenden Bedingungen zu einem deutlichen Anstieg des c_a-Maximums. Der mittlere Auftriebsbeiwert hat etwa die 1,5-fache Größe der Gleitflugverteilung.

Der minimale induzierte Widerstand des **Aufschlags** liegt ungefähr bei einem Druckpunktabstand von 0,27×s vor. Dieses Minimum ist aber so schwach ausgeprägt, dass selbst - wie im vorliegenden Fall - eine Druckpunktverlagerung bis hin zur Flügelwurzel, einen vernachlässigbaren Widerstandsanstieg bedeutet. Die Abweichung vom Minimalpunkt erfolgt dabei im Interesse einer Vergrößerung des Schubimpulses. Der mittlere Auftriebsbeiwert beträgt nur noch ungefähr das 0,3-fache des Gleitflugs.

[7] Althaus Dieter: Profilpolaren für den Modellflug. Neckar-Verlag, VS Villingen 1980

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Die trotz konstantem Einstellwinkel unterschiedlichen c_a-Werte an der Flügelwurzel ergeben sich aus den ungleichen Abwinden an dieser Stelle[8]. Durch die Lage der Maximalzirkulation etwa in Halbspannweitenmitte wird auch die von vielen Vögeln angewandten Flügelpfeilung und der Daumenfittich an diesem exponierten Flügelort plausibel.

Durch die Flügelpfeilung kann die Zirkulation bzw. der Auftrieb aus dem vorne liegenden Flügelabschnitt seitlich verlagert werden. Ein Übriges schafft der relativ kleine Daumenfittich mit seiner Eigenschaft als Vorflügel. Mit ihm wird eine größere Zirkulation an der Hochauftriebsstelle und damit längs des ganzen Flügels möglich.

Aus derartigen Auftriebsverteilungen kann man, nach Ermittlung des Kräftegleichgewichts mit ausgewählten Profildaten, die Eckdaten eines ganzen Fluges, wie z. B. Flugzeit, Steighöhe und Flugstrecke ermitteln. Außerdem lässt sich ein vereinfachtes Wirbelbild eines Ornithopters entwerfen (nebenstehendes Bild). Damit kann man wiederum erklären, warum einige Vogelarten in langen Linien bzw. V-Formationen fliegen.

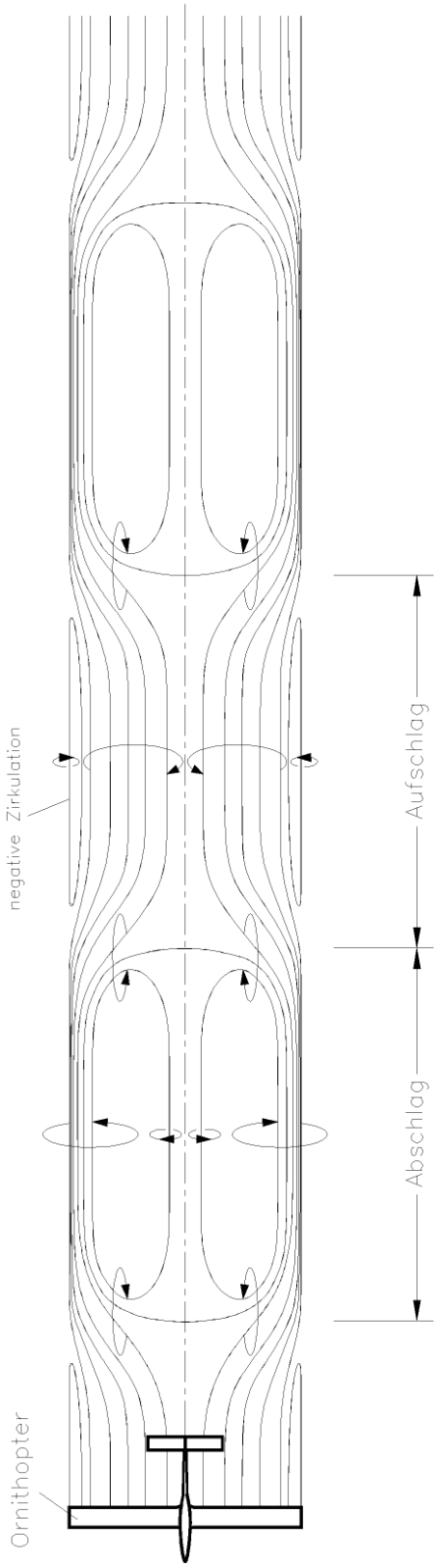

Bild 25 Draufsicht auf das vereinfachte Wirbelbild hinter einem Ornithopter

[8] Räbiger Horst: Report. Flapper Facts, Newsletter of the Ornithopter Modeler's Society, summer 1996. Issue #15, Industrial Evolution, PO Box 376, Arkville NY 12406, USA

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Ein wesentliches Rechenziel ist auch, bei gegebener Flug- und Schlaggeschwindigkeit dem jeweiligen Einstellwinkelverlauf [9] zu bestimmen (nächstes Bild). Dieser verändert sich von der Flügelwurzel ausgehend relativ linear. Lediglich im Bereich der Flügelspitze nimmt die Änderung immer stärker zu. Den dortigen Verwindungsverlauf in der Praxis einigermaßen nachzubilden ist mir bis heute nicht gelungen. Vielleicht hängen ja die Fluginstabilität auch damit zusammen. Das theoretische Rechenmodell weist aber mehr auf Probleme hin, die Kraftfluggeschwindigkeit richtig einzustellen. Eine Diskussion dieser Zusammenhänge würde hier aber zu weit führen.

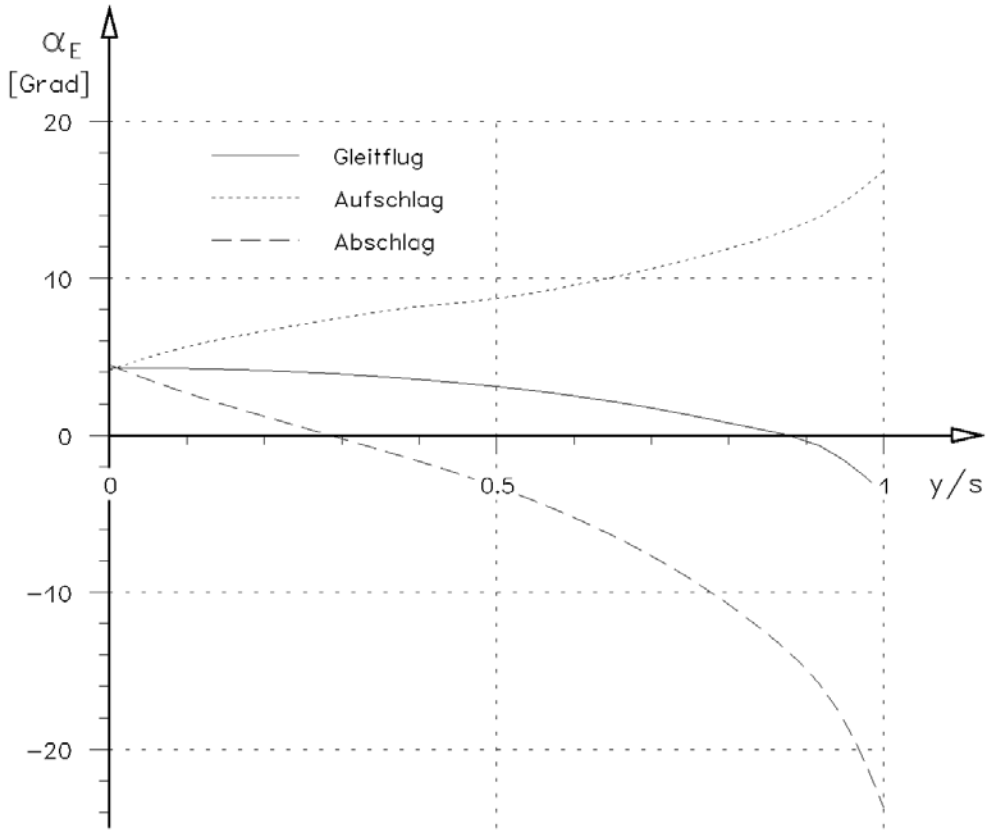

Bild 26 Theoretischer Einstellwinkelverlauf $\alpha_{E(y)}$ bei vorstehenden c_a-Verteilungen, unter Verwendung des Profils CLARK Y (11,7), rechteckigem Flügelumriss, gleichen Auf- und Abschlagzeiten und einer Schlagperiodendauer von 0,7 Sekunden

Einen Versuch die richtige Verwindung nahe der Flügelspitze in einer Weise zu erzielen, wie es die Natur in einigen Fällen vor macht, zeigt nachstehende Aufnahme. Die einzelnen "Schwungfedern" der aufgefächerten Flügelspitze bestanden aus leicht auswechselbaren GfK-Rohrholmen, die wie kleine Schiffsmaste mit einer Art Segel versehen wurden. Diese waren in der Lage, sich an die wechselnde Anströmrichtung besser anzupassen als der Flügel mit durchgehender Flügeltiefe. Der sicherlich erhöhte Widerstand während des Gleitfluges wurde dabei bewusst in Kauf genommen. Dieser Nachteil sollte aber beim Kraftflug durch vermehrten Schub zumindest ausgeglichen werden.

[9] Räbiger Horst: Wie Ornithopter fliegen. Selbstverlag, Nürnberg 2001, <http://www.ornithopter.de>

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Die Flugpraxis mit diesen aufgefächerten Flügelspitzen zeigte aber kein eindeutiges Ergebnis. Weder wurde der Gleitflug dadurch sichtbar schlechter, noch der Kraftflug verbessert. Im Gleitflug neigten die Segel anfangs zum Killen (Flattern), was sich aber durch Verstellen der "Großbäume" abstellen ließ. Rückblickend deuten meine vielen mit "Schwungfedern" vorliegenden Fotoaufnahmen auf entsprechend viele, praktische Flüge mit womöglich verbesserter Flugstabilität hin.

Nachdem bei den "Schwungfedern" mit sehr primitiven Mittel gearbeitet wurde, erscheint die Auffächerung der Flügelspitze durchaus als ein Erfolg versprechender Weg die Flügelverwindung an die theoretischen Forderungen anzupassen. Auf die gleichzeitige Verringerung des induzierten Widerstandes, welche die Bioniker der Flügelspitzenauffächerung zuschreiben, wird man allerdings bei derart einfachen Konstruktionen weiterhin verzichten müssen.

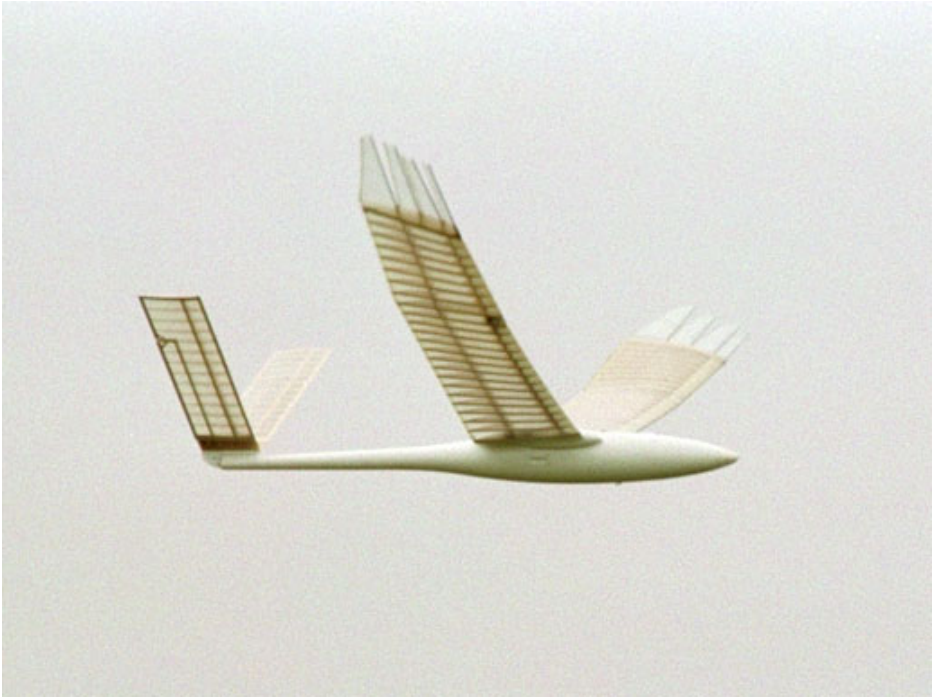

Bild 27 EV7 mit aufgefächerten Flügelspitzen beim Abschlag 1992

Nachdem für mich lange Zeit ein Defizit an konkreten theoretischen Vorgaben bestand, sind jetzt wieder Ideen bei der praktischen Umsetzung gefragt. Gerade dieses Wechselspiel zwischen Theorie und Praxis und die Arbeit an den Nahtstellen mehrerer Fachgebiete macht das Schlagflügelhobby so interessant. Es ist zwar schon manchmal frustrierend, nur in mäanderförmiger Weise mit der Entwicklung vorwärts zu kommen. Insgesamt macht es aber trotzdem - oder vielleicht gerade deshalb - großen Spaß.

Das Ornithopter-Modellbauhobby ist ideal für Leute, die nicht nur ergebnisorientiert gerne bauen und basteln. Die mit der spielerischen Anwendung der Technik verbundenen, evolutionären Rückschläge muss man dabei allerdings bereit sein hinzunehmen. Für diesen Personenkreis wäre es fast schade, wenn die Ornithopterentwicklung all zu schnell fortschreiten würde. Gut gemachte, industrielle Serienfertigungen würden die eigene Entwicklungsbegeisterung nur dämpfen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002