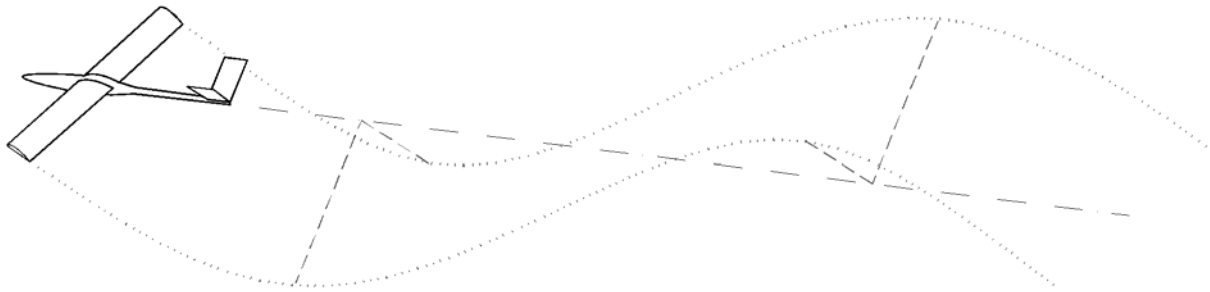
Vertaling van Louis van Telgen van “bericht_de.pdf”



De ontwikkeling van slagvleugelmodellen

Horst Räbiger, Neurenberg 2002

Samenvatting

De ongeveer 30-jarige ontwikkelingsgeschiedenis van de ornithopters type EV1 tot en met EV7 begint met het vervaardigen van verschillende soorten slagvleugelaandrijvingen. In het bijzonder wordt het werkingsprincipe van de kruktapmechanismen met een glij- naar krachtvluchtomschakeling iets uitvoeriger besproken. De voortdurende verdere ontwikkeling hiervan en de ontstaansgeschiedenis van de eerste slagvleugelmodellen staan met elkaar in nauwe samenhang. De trage ontwikkeling van het vlieggedrag, doorspekt met vele tegenslagen, wordt met diverse afbeeldingen getoond. Daarnaast komen ook de verdere ontwikkeling van de slagvleugeltheorie aan bod, tot en met de problemen die tot nu toe nog niet opgelost zijn.

Inhoud

1. Het begin 2
2. Slagvleugelaandrijving met behulp van een kruktapmechanisme 4
3. Mijn eerste elektrovogel (EV1) 5
4. Verscheidene dwaalwegen tijdens de ontwikkeling (EV2 t/m EV4) 9
5. Vooruitgang m.b.v. de theorie (EV5 en EV6) 13
6. Huidige stand van zaken (EV7) 17
7. Verdere ontwikkeling 20

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002
Vertaling van Louis van Telgen 2008

1. Het begin

In de jaren 1963/64 verscheen in het modeltijdschift “Mechanikus” een serie artikelen[1] met de titel “Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik” (de slagvleugelvlucht in de natuur en in de techniek). De schrijver was de heer Karl Herzog, de auteur van een boek[2] over de anatomie van vogels en de slagvleugelmodellen van prof. Erich Walther von Holst. De in de artikelen beschreven problemen bij de bouw van een aandrijfmechanisme voor slagvleugels fascineerden mij zozeer dat ik, ondanks de tragikomische beschrijvingen van een ornithopterontwikkelaar, al snel besloot om zelf ook zo’n model te maken.

Het zou een volledig werkend slagvleugelmodel moeten worden met een vleugelspanwijdte van ongeveer drie meter en met een gewicht van ten hoogste vijf kilogram. Bij deze afmetingen leek mij een radiografisch bestuurde omschakeling van krachtvlucht naar glijvlucht noodzakelijk. Bovendien stelde ik mij een ornithopter voor, die, anders dan de dan toe bekende, membraan-beplakte en met hoge slagfrequentie bewegende orni’s, voorzien zou zijn van een met een hoge efficiëntie werkende geprofileerde slagvleugel. Als eerste doel werd alleen gestreefd naar de eenvoudigste manier van vliegen, n.l. de stationaire horizontale krachtvlucht en later misschien naar de mogelijkheid van een lichte stijgvlucht. Als voorbeelden kwamen in het bijzonder grote langzaam klapwiekende vogels met een gewicht van meer dan een kilogram in aanmerking.

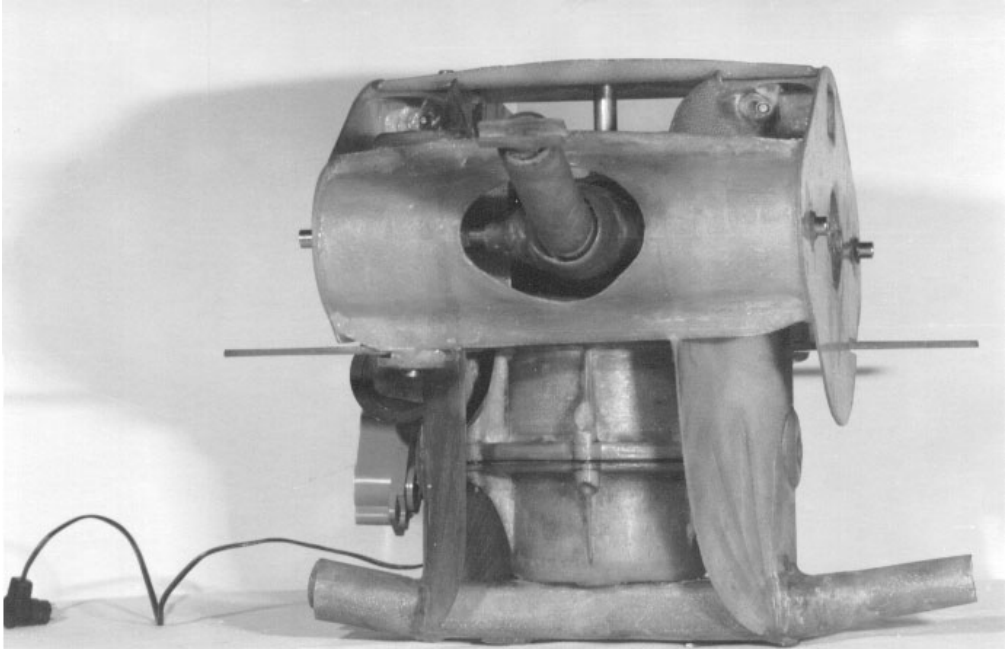
Op de inspanningen die volgden op de serie artikelen, werd geprobeerd, oplossingen c.q. voorstellen uit het verleden opnieuw vorm te geven. Het eerste aandrijfmechanisme dat boven het stadium van schetsen uitkwam was een constructie van glasvezelversterkte polyester onderdelen (zie volgende afbeelding). Deze zou op basis van het principe van een stoommachine met een druk van ongeveer 1,5 bar moeten werken. Als aandrijfbron werd echter geen waterdamp, maar de bij ongeveer +25 graden Celsius kokende, nu als milieuonvriendelijke beschouwde vloeistof “Freon” toegepast. De enkelwerkende onder druk gezette cilinder werd met een rolmembraan van 4 cm doorsnede afgedicht.

---

[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



Afbeelding 1 Met gasdruk aangedreven slagvleugelmechanisme (1968)

Na beoordeling van het gemaakte mechanisme was het al snel duidelijk dat het geheel veel te gecompliceerd en te zwaar geworden was. Nog voor de bouw van het drukvat is daarom de verdere ontwikkeling afgebroken.

Ook het volgende werkingsprincipe was al eens bij eerdere slagvleugelmodellen toegepast. Dat was een stoommachine waarbij als aandrijfbron koolzuur werd gebruikt. De Tjechische modelbouwer Chalupsky[3] had zo'n aandrijving in 1935 bij zijn 2 en 3,5 kilo wegende slagvleugelmodellen al met succes toegepast. Hij bereikte hiermee al aanzienlijke vlieghoogten.

Voor mijn doeleinden waren er toen kleine CO_2-drukpatronen met een drukreduceerventiel op de markt, die voor de aandrijving van prothesen gebruikt werden. Ze leken mij als energieaccu's wel geschikt. Zo ongeveer in 1972 was het daarbij behorende mechanisme klaar. Maar ook deze aandrijving vertoonde veel zwakke punten. Deze waren op de eerste plaats op mijn gebrekkige vervaardigingsmethoden van de pneumatiekonderdelen terug te voeren.

Hierop volgde de constructie van een dieselaandrijving. Daar de dieselmotor tijdens de vlucht was af te stellen, maar niet meer aangezet kon worden, werd een kruktapmechanisme bedacht, waarbij het omschakelen van krachtvlucht naar glijvlucht mogelijk gemaakt werd. Echter ook de dieselversie kwam niet verder dan het ontwerpstadium. Omdat echter de kruktap bij mijn hiernavolgende ontwikkelingen een belangrijke rol speelde, zal hier wat uitvoeriger op de werkingswijze worden ingegaan.

---

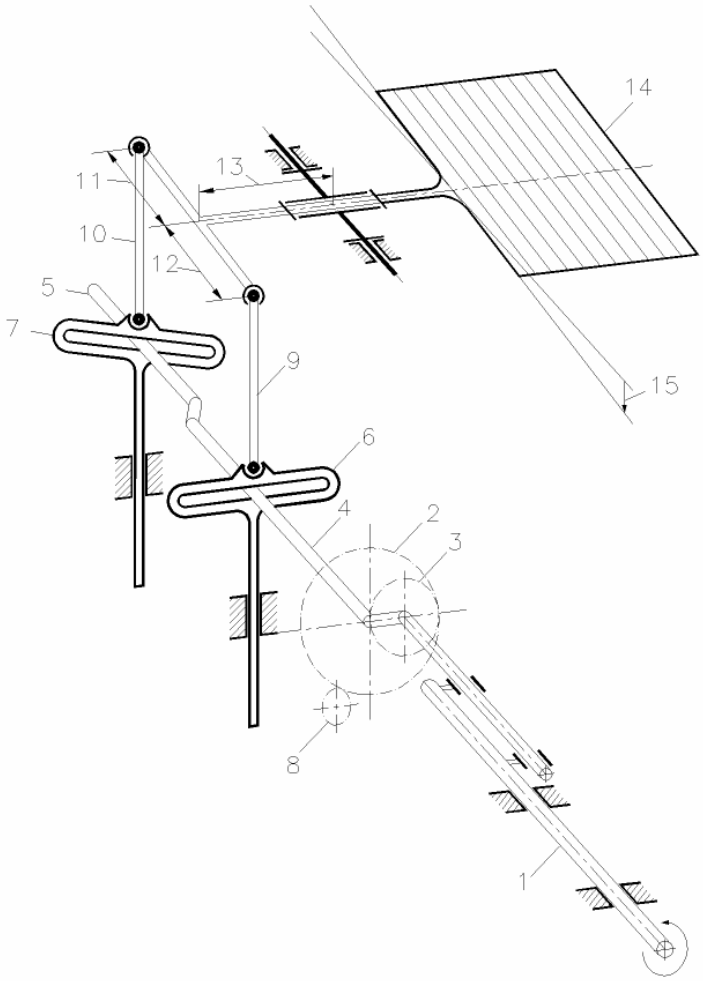
[3] Chalupsky Cenek: Preßluft-Schwingenflugmodell Chalupsky. Der Sportflieger, Juni 1938 (28) S. 28; und Piskorsch Adolf: Bewegte Schwingen. Selbstverlag, Sontheim an der Brenz, 1975, S. 74 bis 78

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

2. Slagvleugelaandrijving met behulp van een kruktapmechanisme

Het principe van het kruktapmechanisme wordt in de techniek regelmatig toegepast. Dit mechanisme bestaat in ons geval uit een tandwiel met binnenvertanding en een planeetwiel. De steekcirkel van het planeetwiel is precies de helft van de steekcirkel van het tandwiel met binnenvertanding. Een kruktap, waarvan het hart precies op de steekcirkel van het planeetwiel ligt, bezit dan een typische eigenschap. Bij het afrollen van het planeetwiel in het tandwiel met binnenvertanding beweegt de kruktap zich in een rechte lijn langs een steekcirkeldiameter heen en weer. Zo'n kruktapmechanisme biedt op die manier de mogelijkheid om de aandrijfbeweging van een slagvleugel precies vertikaal t.o.v het midden van de romp op en neer te laten gaan. Men kan op deze manier belangrijke mechanische geleidingen uitsparen.

Hoe zo'n slagvleugelaandrijving er in principe uitziet toont de onderstaande afbeelding. Deze afbeelding is overgenomen uit mijn patent DE 26 28 846 (aangemeld 1976).



Afbeelding 2 Slagvlak met kruktapmechanisme

Het mechanisme bestaat m.n. uit een aandrijfas 1, een tandwiel met binnenvertanding 2, een planeetwiel 3 , alsmede twee op het planeetwiel in verzet gemonteerde kruktappen 4 en 5. Deze kruktappen grijpen, middels glijblokken, in de kruissleuven 6 en 7. De kruispositie van de sleuven is precies afgestemd op de baanbewegingen van de twee kruktappen (in de afbeelding zijn deze 90 graden verdraaid). De kruissleuven bewegen via de koppelstangen 9 en 10, net als de hefbomen 11, 12 en 13 het slagvlak 14.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Door het verzet van de kruktappen ontstaat er een faseverschoven beweging. Deze wordt op het slagvlak overgedragen in de vorm van een 90 graden faseverschoven draaibeweging 15 t.o.v de slagbeweging. Door het variëren van de genoemde hefbomen kan de combinatie de instellingen van de slag- en de draaibeweging aanzienlijk gevarieerd worden.

Bij een aandrijving met een dieselmotor kan de beweging van het slagvlak d.m.v. de stelunit 8 door verdraaiing van de tandring gewijzigd worden. Het instelbereik ligt tussen de 0 en 90 graden. Als het tandwiel met binnenvertanding bijvoorbeeld op 0 graden staat dan bewegen de beide kruktappen zich horizontaal in de bestemde kruissleuven. De beide kruissleuven staan daarbij, ondanks de mogelijk nog draaiende motor, onbewegelijk en precies in de middenpositie. Als het tandwiel met binnenvertanding nu langzaam 90 graden wordt verdraaid dan begint bij een draaiende motor de op- en neergaande beweging van de kruissleuven.De slaghoek en de draaibeweging van het slagvlak nemen toe met de hoek van het verstelmechanisme van het tandwiel met binnenvertanding tot zijn maximale waarde bereikt is.

In de getoonde 90 graden positie, dus bij een volledige slaghoek, beweegt de kruktap 4, precies in het midden van de kruissleuf, op en neer. Tegelijkertijd beweegt kruktap 5 wegens het verzet t.o.v kruktap 4 zich in zijn kruissleuf 7 enigszins heen en weer. Deze kruissleuf volgt vrijwel volledig in verticale richting de lineaire beweging van kruissleuf 6.

Bij toepassing van een elektrische hoofdaandrijving bestaat de mogelijkheid de verstelbeweging van het tandwiel met binnenvertanding ook zonder toegevoegde verstelaandrijving te realiseren. Het tandwiel met binnenvertanding moet dan slechts om 90 graden tussen twee aanslagen draaibaar gelagerd te zijn. Als dan bij een enkelzijdige belasting de draairichting van de hoofdaandrijving wordt omgekeerd, dan wisselt het tandwiel met binnenvertanding zijn eindpositie. Op deze wijze schakelt de beweging van het slagvlak automatisch van nul naar maximaal en terug. Dit was bij de toenmaals ter beschikking staande motorregelaars een eenvoudige manier om om te schakelen van kracht- naar glijvlucht.

Natuurlijk kan men de elektrische hoofdaandrijving in de glijvluchtpositie van het tandwiel met binnenvertanding ook uitschakelen. Geschiedt het omschakelen echter op een tijdstip waarbij de kruktap 4 precies in het kruktapmidden staat, dan staat deze tevens in het dode punt van de kruk. Een aanvullende vergrendeling van de slagvleugel is in deze glijvluchtpositie, bijv.oorbeeld tijdens de landing, dan niet gewenst.

Het kruktapmechanisme was een zeer eenvoudig toe te passen en betrouwbaar werkende constructie. Jammer genoeg was deze kompleet uit metaal gemaakt en daardoor zwaar.

3. Mijn eerste elektrovogel (EV1)

Bij mijn eerste slagvleugelmodel heb ik een elektrisch aangedreven kruktapmechanisme met omschakeling tussen kracht- en glijvlucht d.m.v. omkering van draairichting toegepast.

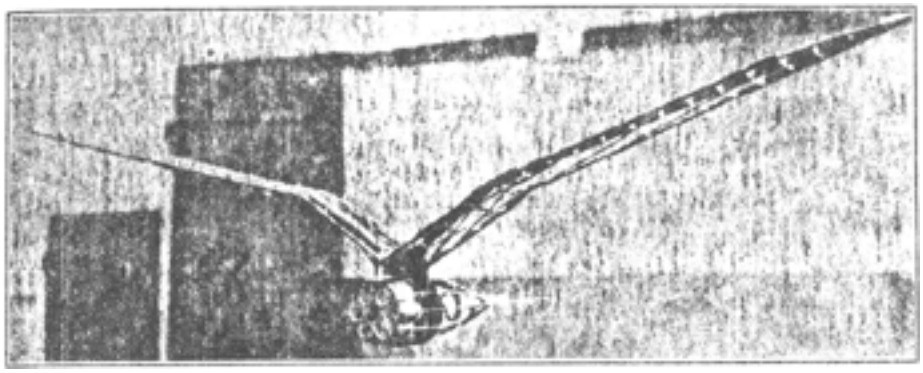
© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Afbeelding 3 Kruktapaandrijving van de EV1, bestaande uit

- een kruktapmechanisme, slag 40 mm, kracht in
- het midden van de slag ca. 200 N.
- Drietraps-planetaire tandwieloverbrenging, Vertraging 126:1, gewicht 150 g,
- klokankermotor ca. 90 W, gewicht 275 g,
- totaalgewicht 890 g.

Het model heb ik, ter onderscheid van de voorgaande stoom- en dieselversies, de titel “EV1” gegeven. EV1 staat voor “Elektro-Vogel Nr. 1”.

Het idee om een elektrische aandrijving te kiezen was geenszins nieuw. Jacob Goedecker uit Mainz heeft al in 1932 een elektrische 30-Watt slagvleugelaandrijving voor zijn “Albatros” gebouwd. Dit slagvleugelmodel met profielvleugels woog 1,9 kg en had een spanwijdte van 2,7 meter.



Afbeelding 4 De eerste elektrisch aangedreven ornithopter van de luchtvaartpionier Jacob Goedecker[4] uit Mainz-Gonsenheim (1932)

De EV1 woog ca. 5,4 kg, had een spanwijdte van 2,9 m en werkte theoretisch met een slag-periodeduur van ca. 0,8 s. Het vleugelprofiel kwam overeen met de profielaanbevelingen

[4] Goedecker Jacob: De slagvleuglvlucht. FLUGSPORT. Nr. 26, Seite 561-563,
Verschenen ongeveer in 1932/33 (de (her)uitgever is helaas niet bekend)

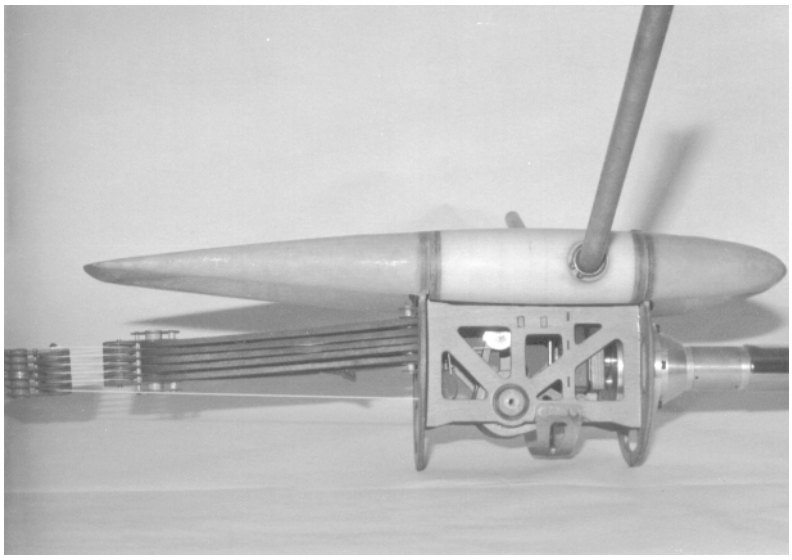
© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

van Karl Herzog en was daarom tenminste in het armvleugelbereik in het voorste vijfde deel sterk gewelfd. De vleugelkoorde aan de vleugelwortel bedroeg zeker 440 mm.

Overeenkomstig de vogelvluchttheorie van E. v. Holst[5] werkte het model met armvleugel-verdraaiing (zie de vleugelwortel in afbeelding 7). Dit heeft de aandrijving actief opgebracht. De relatieve beweging tussen de vleugelwortelprofiel en het profiel aan de romp werd vervolgens voor de aandrijving van de actieve handvleugelverdraaiing gebruikt. De handvleugel zelf was aëro-elastisch te verdraaien maar bleek echter te veel weerstand tegen draaiing te hebben.

Als bekleding diende een dunne huishoudfolie, die gedeeltelijk met een over de vleugel getrokken nylon-dameskous op zijn plaats gehouden werd. Voor het eerst werd bij de overgang van romp naar vleugel met op de slagas liggende symmetrisch geprofileerde rollen toegepast. Deze zorgden voor een stromingsdichte en stromingsgunstige romp-vleugelovergang.

Om met een laag aandrijfvermogen uit te komen werd, ter compensatie van de eenzijdig op de vleugel werkende liftkrachten, een 20-voudige gummistreng met behulp van een trekhaak via de langsas van de romp naar achteren toe opgespannen. Deze drukte met ca. 500 N via een kniehefboom tegen de binnenste vleugelhefboom aan en daarmee de vleugel tegen de liftkracht in naar beneden. Om de trekkracht van de rubberstrengen op te kunnen nemen moest de romp in de langsrichting overeenkomstig druksterk, uit Rohacell-ringen, met een wanddikte van ca. 10 mm, opgebouwd worden.



Afbeelding 5 Aandrijfmechanisme van de EV1 met vleugelaansluitrollen en een set rubberstrengen als compensatieveer.

In 1975 ben ik begonnen met het testen van de glijvlucht en vleugelaandrijving. De glijhoek en het stuurgedrag waren redelijk goed. Ook de slagbewegingen, terwijl ik met het model door de omgeving rende, verliepen naar tevredenheid.

---

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

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Afbeelding 6 Looptest met de EV1 (1975)

Toen was er de eerste krachtvlucht. Mijn jarenlange vrees, dat de romp van zo'n model tijdens de krachtvlucht duidelijk zichtbaar op en neer zou bewegen en tevens in de onderste vleugelpositie instabiel zou vliegen, werd niet bewaarheid. In tegendeel, de verticale pendelbeweging van de romp was ondanks de niet-elastische vleugel nauwelijks zichtbaar en was de vluchtpositie erg stabiel. Bovendien functioneerde het kruktapmechanisme probleemloos.

Afbeelding 7 De EV1 tijdens zijn eerste krachtvlucht (1975)

Jammer genoeg kon het model, als gevolg van zijn glijhoek, door de vleugelslagen slechts bij een paar vluchten overgaan naar een horizontale vlucht. Ondanks zijn slechts korte krachtvluchten, met ca. 10 vleugelslagen, was de EV1 voor mij echter een goed begin van de nu intensief bedreven hobby.

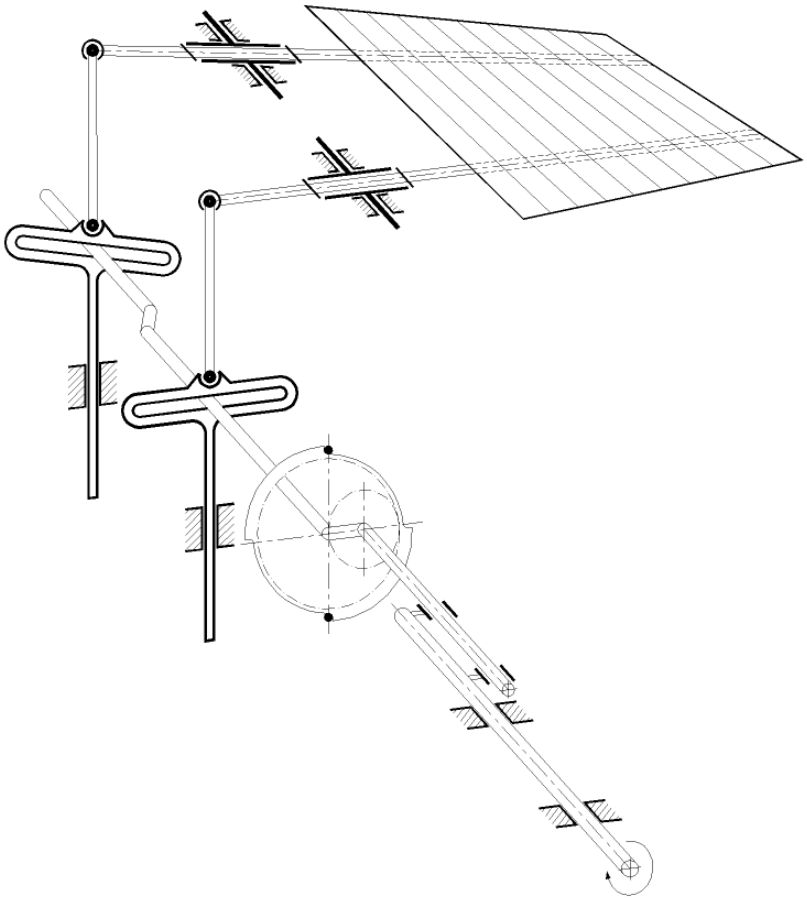
© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

4. Verscheidene dwaalwegen tijdens de ontwikkeling (EV2 t/m EV4)

Het hoofdprobleem bij de EV1 was het gebrek aan vleugelverdraaiing. Mijn vader heeft toen een elastische folie van verschillende leveranciers opgespoord en ik ontdekte bij toeval het tegenwoordig bij iedere bouwmarkt verkrijgbare dubbelzijdige plakband, waarmee ik de folie op de ribben kon bevestigen. Daarbij kwam ik op het idee de ribben slechts los op de hoofd- en de hulpligger te schuiven en deze uitsluitend met de folie op afstand te houden. Daarmee werd een doorbraak bereikt t.a.v. bijna alle verdraaibare draagvlakken met een glad oppervlak

Werden nu bovendien de hoofdligger en de hulpligger, zoals hieronder getoond, onafhankelijk van elkaar aangestuurd, dan ontstond op deze manier een slagvleugel met gestuurde verdraaiing. De verdraaiing was gebaseerd op het kruktapmechanisme voor de glijvluchtinstelling die overeenkwam met het gemiddelde instelhoekverloop.

Met behulp van een servobediening van de voorste stuurstang was het toen mogelijk de verdraaiing radiografisch te beinvloeden. Als ook nog buig-elastische vleugelliggers werden toegepast dan kon men op een soepel bewegingspatroon rekenen.



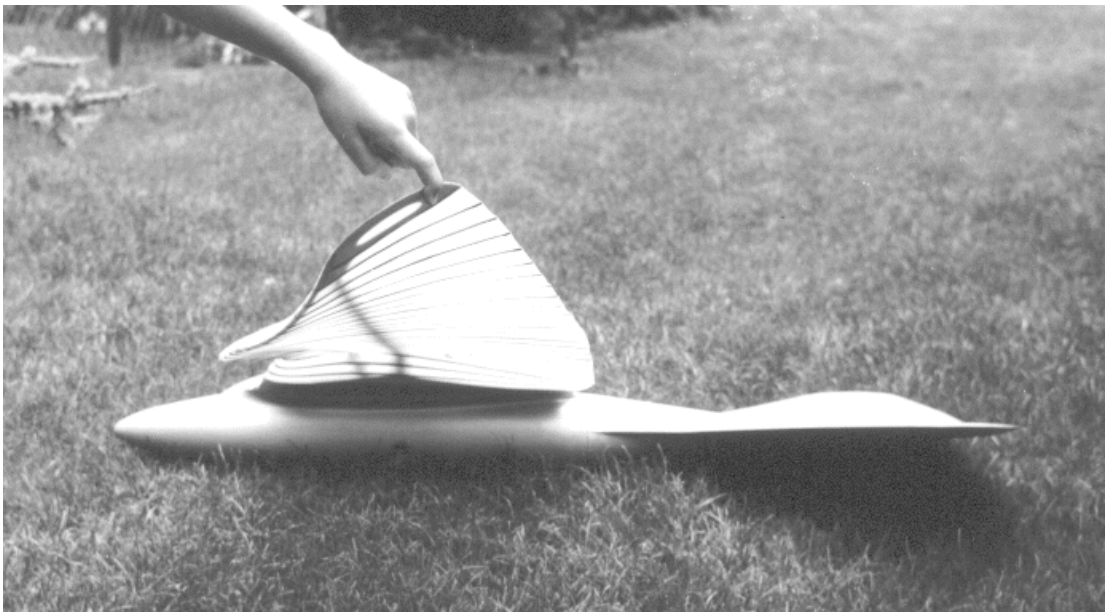
Afbeelding 8 Kruktapmechanisme voor de gestuurde vleugelverdraaiing van de EV2, met een omsturing van glij- naar krachtvlucht d.m.v. omkering van draairichting.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Tijdens de eerste euforie over deze nieuwe mogelijkheden werd de EV2 geconstrueerd. Door het blind nastreven om het model zoveel mogelijk op een vogel te laten lijken werd dit een regelrechte mislukking.

Zelfs met een richtingsroer kwam het model niet eens door de glijvluchtfase heen. De elastische vleugelverdraaiing, die eigenlijk de vliegpositie had moeten stabiliseren, was door de naar buiten toe verjongde vleugelliggers (GFK-vishengeluiteinden) moeilijk te controleren. De voor de glijvlucht benodigde instelhoek was eenvoudigweg niet reproduceerbaar in te stellen. Bovendien werkte de beïnvloeding van de vleugelverdraaiing door de servo's als gevolg van de krachten door de vleugelbespanning niet naar wens.

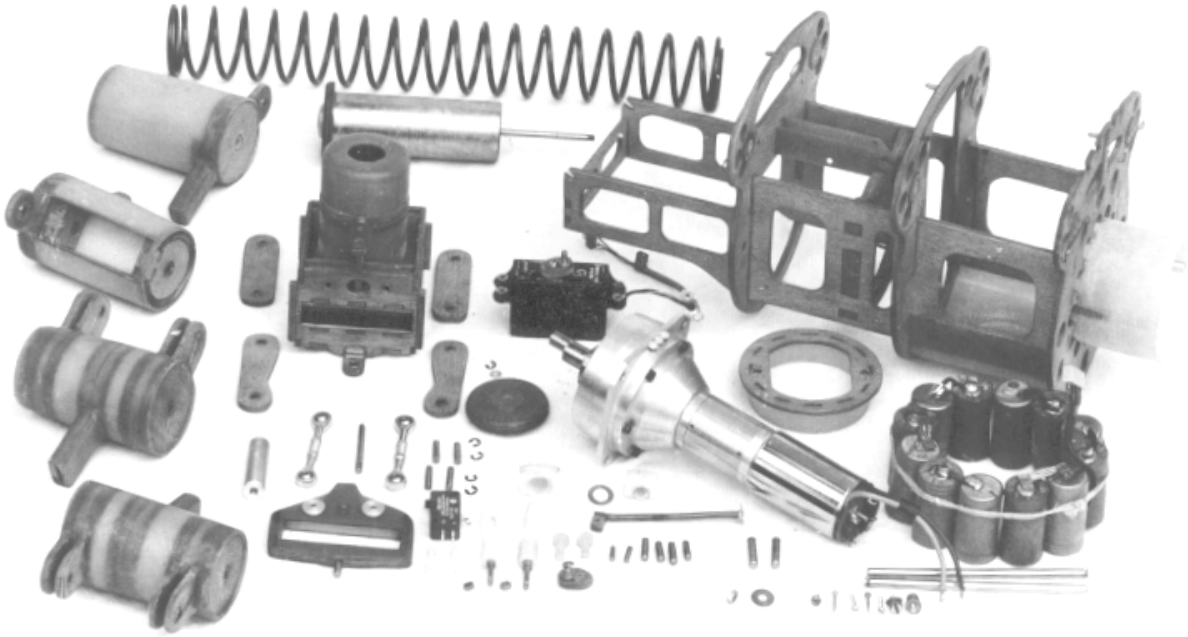
Afbeelding 9 De vleugelverdraaiing van de EV2 voor de opgaande slag



Afbeelding 10 De vleugelverdraaiing van de EV2 voor de neergaande slag. Voor de aëro-elastische verdraaiing is er voor de krachtvlucht nog de gestuurde verdraaiing toegevoegd.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Van dit model werd alleen de elastische vleugelconstructie en de loodrechte bevestiging van de compensatieveer (staal, 250 g) nog gebruikt. Ook het daarbijbehorende principe voor de kracht-overbrenging tussen de aandrijving en de vleugel met twee evenwijdige verbindingen per vleugelzijde bleef in gebruik. Daar bovenop wordt ik nog steeds beïnvloed door de ervaring dat het vrijwel niets oplevert om de natuurlijke voorbeelden wat betreft essentiële delen slechts bij benadering na te bouwen, zonder tenminste enigszins begrepen te hebben hoe ze werken.

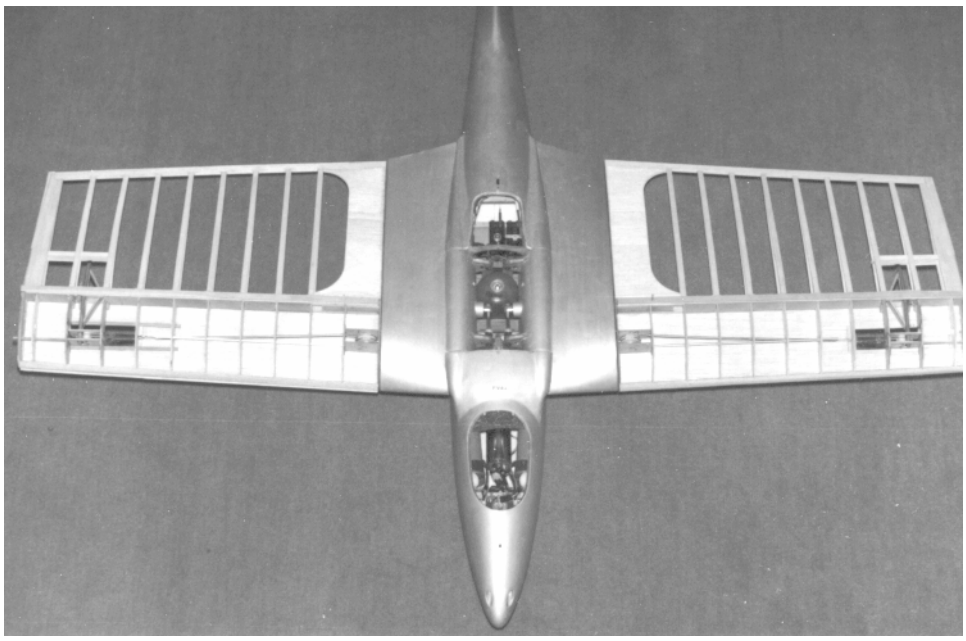


Afbeelding 11 De onderdelen van het aandrijfmechanisme van de EV2

De EV3 leverde echter weer een ordner vol met schetsen op. Wegens de noodzaak steeds compacter te moeten bouwen werd het idee in 1978 losgelaten. Ik had toen echter nog geen CAD-ondersteuning, waardoor men de tekeningen op een eenvoudige manier kon splitsen. Ik werkte toen nog steeds met potlood en radeergummi.

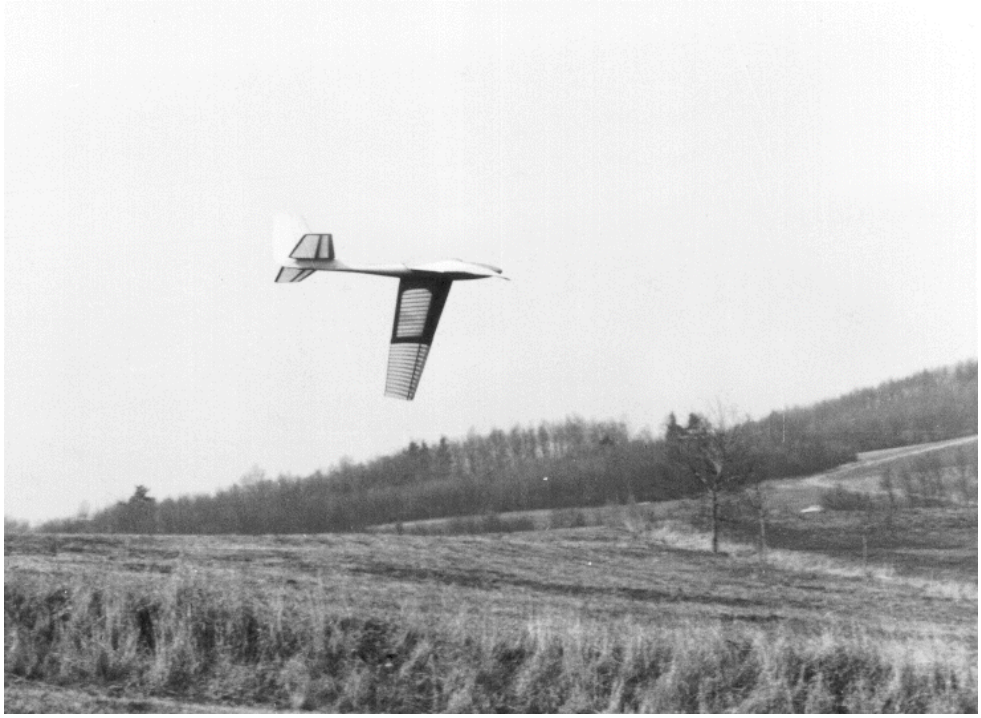
Nu was de EV4 aan de beurt, die weer werd gebouwd een kleine vooruitgang opleverde. Bij deze uitvoering werd in plaats van een stalen compensatieveer een lichtere drukluchtveer toegepast. Deze bestond uit een gesloten drukvat en een met een rolmembraan afgedichte zuiger, zoals ik die nog van mijn Freon-stoommachine kende (zie afbeelding 1). De cilinder kon met en fietspomp tot een druk (ca. 4,5 bar) worden opgepompt. De variatie van de luchtdruk voor de start, was de slagtijdverhouding tussen de opgaande en de neergaande slag te beïnvloeden.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002



Afbeelding 12 Middendeel van de vleugel van de EV4
Men ziet in het voorste deel van de vleugel het stuurmechanisme voor de verdraaiing van de handvleugels door gebruikmaking van de relatieve beweging tussen de wortelribbe en de romp

De hoogelastische vleugelverdraaiing van de EV2 werd bij de EV4 voorzichtigheidshalve alleen nog in het handvleugelbereik toegepast. De armvleugel werkte alleen met een verdraaiing, maar was verder net zo star als een normale draagvleugel. De slaglijn had een neiging van 3,5 graad in de richting van boven-achter naar onder-voor. Het kruktapmechanisme van de voorgangers werd weer onveranderd toegepast.



Afbeelding 13 De EV4 met de vleugels in de onderste eindpositie (1979)

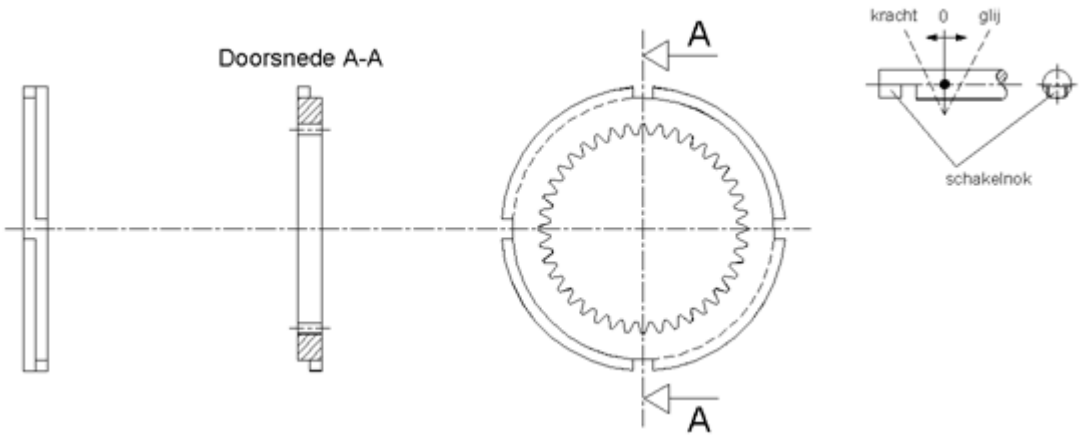
© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

De EV4 volbracht een klein aantal krachtvluchten. De langste aaneengesloten gevlogen afstand met krachtvlucht bedroeg ongeveer 300 meter. Hoewel de elasticiteit van de handvleugel bij deze vogel niet meer zo groot was, was deze echter nog steeds te ongecontroleerd. De krachtvluchten van de EV4 moesten steeds weer na korte tijd worden afgebroken. Het vliegvermogen liet zich ondanks diverse veranderde instellingen aan het mechanisme en de vleugel niet verbeteren. Er werd daarom een grote ombouw uitgevoerd.

5. Vooruitgang m.b.v. de theorie (EV5 en EV6)

De ook bij de EV4 uit Rohacell-ringen opgebouwde romp werd verder gebruikt, echter de staartboom werd langer gemaakt. In plaats van een kruis-staart leek een T-staart mij meer geschikt. Misschien hing de instabiliteit tijdens de slagbeweging mogelijk samen met de veranderde luchtstroming langs de staart.

Ook het oude kruktapmechanisme vond weer toepassing. De tandring (afbeelding 2, pos.2) kreeg aan de buitenzijde sleuven zoals een stappenschakelaar voor constante stappen van 90 graden. De omsturing tussen kracht- en glijvlucht vond nu plaats, met instandhouding van de draairichting van hoofdaandrijving, eenvoudig met een hefboom die met een servo-aandrijving verbonden was.

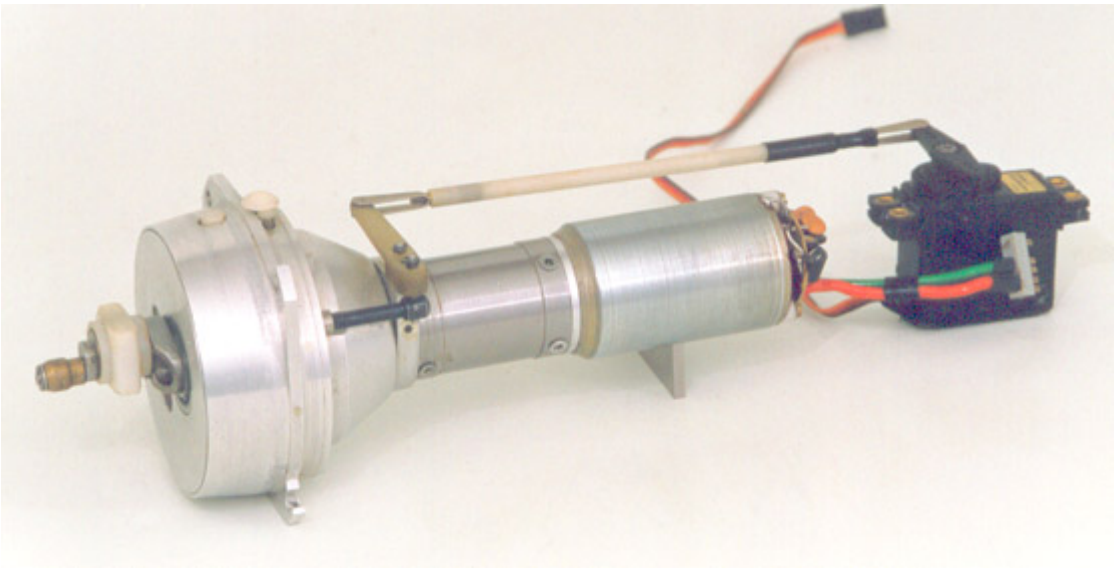


Afbeelding 14 Tandring voor een kruktapmechanisme met een 90 graden stappensturing voor omschakeling van glij- naar krachtvlucht

Deze verandering kon op een eenvoudige manier aan het reeds beschikbare kruktapmechanisme worden uitgevoerd (zie de volgende afbeelding).

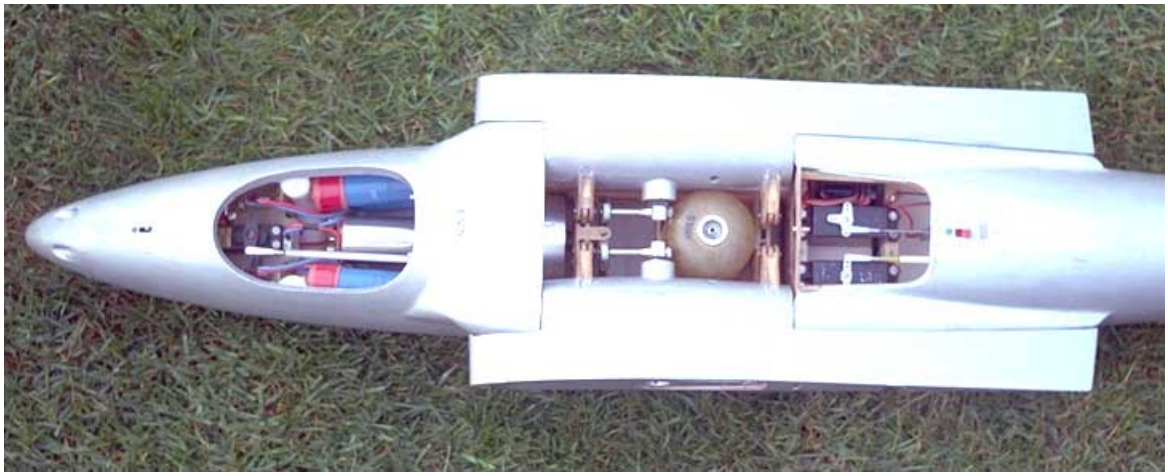
De door E. v. Holst en Karl Herzog aanbevolen vleugelverdraaiing leek mij, op grond van slowmotionopnames van de biologische voorbeelden op de televisie al enige tijd niet beslist noodzakelijk. Hiervan werd nu van af gezien en bij alle volgende modellen werd de instelhoek aan de vleugelwortel voortaan constant gehouden. Dit vereenvoudigt het mechanisme.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002



Afbeelding 15 Kruktapmechanisme van de EV5 met glij- naar krachtomschakeling m.b.v. een servohefboom

De vleugel is nu over de gehele lengte verdraaibaar, waarbij de verdraaiing in het armvleugeldeel nog door de aandrijving wordt bestuurd en deze alleen in het handvleugelbereik aëro-elastisch was. Daarbij vertoont de handvleugel het eerst de neiging om te verdraaien. Dit is later ook bij de EV7 nog toegepast. De uit deze ombouw gecreëerde EV5 had een spanwijdte van 2,7 meter en een gewicht van 5,2 kilogram.



Afbeelding 16 De geopende romp van de EV5

De vliegverbeteringen waren t.o.v. de EV4 weliswaar niet al te groot maar toch duidelijk te herkennen. Ogenschijnlijk had de al tijdens de bouw gestarte intensieve bestudering van de slagvleugeltheorie toch resultaat opgeleverd.

Bij de eerste benadering werd daarbij aangenomen, dat het zich wisselende stromingsgedrag aan de slagvleugel op elk tijdstip van de slagbeweging zich zo verhoudt, zoals die van de betreffende stromingsvoorwaarden al langere tijd bekend zijn. Tijdens de berekening werd van zogenaamde quasi-stationaire voorwaarden uitgegaan. Op deze manier kunnen de bekende vergelijkingen van de gebruikelijke draagvleugeltheorie voor de beschrijving van de veranderingen bij een slagvleugel worden gebruikt.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Er bestonden vroeger al programmeerbare zakrekenmachines, die ook met meerdere regels programmatekst konden werken. Daarvoor moest men kleine datastroken met een lengte van ca. 7 cm, met de hand, na elkaar door een sleuf in de rekenmachine trekken. Ook omvangrijke rekenprogramma's konden op deze wijze worden gerealiseerd. Het gebruik was nogal moeizaam. Alle resultaten moesten van een éénregelige display afgelezen worden en opgeschreven worden om daarna zo mogelijk in diagrammen te worden omgezet. In 1982 waren er ca. 30 datastroken nodig die mijn broer Wolfgang, die overigens ook alle foto's heeft gemaakt, voor zijn rekenmachine nodig had om op basis van mijn vergelijkingen een krachtenevenwicht te bepalen. Daaruit werden dan de constructiegegevens van de vleugel afgeleid.

Afgezien van het rekenen, kreeg ik ondertussen ook door mijn vanaf 1980 bestaande briefwisselingen met andere ornithopterenthousiasten steeds weer nieuwe ideeën. Hierdoor kwam ik in contact met de heer Karl Herzog en de heer Adolf Piskorsch. Kort daarop tevens met de heer Horst Händler die al langere tijd contacten onderhield met de beide andere heren.

Afbeelding 17 Karl Herzog (links) als adviseur tijdens de testvluchten van de EV5 (1981)

Het bezig zijn met de theorie toonde het volgende aan. Door de resultaten uit de berekeningen kreeg ik een gevoel van zekerheid omtrent welke onderdelen van het model al redelijk goed waren en bij welke de juiste oplossingen nog ontbraken. In het bijzonder lag er de constructiedoelstelling, hoe een geëigende liftverdeling en de daarbij behorende vleugelverdraaiing er uit zou moeten zien, nu vrij duidelijk vast en hoefde ik helemaal niet meer zo veel aannames te doen. Het werd ook steeds gemakkelijker om de zich vaak tegensprekende informatie in de literatuur over slagvleugelbewegingen op waarde te schatten. Uiteindelijk monde het vele rekenwerk uit in de constructie van een geheel nieuwe vleugel.

De romp en de staart van de EV5 werden weer gebruikt. Met dynamische slingereigenschappen van de vleugelmassa werd beperkt rekening gehouden. In ieder geval werd hiervoor in de bovenste vleugelpositie een z.g. eindstandveer toegepast om de daar optredende slagvleugelmassa's af te remmen en deze massa's in de tegenovergestelde slagrichting weer te versnellen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

Daarnaast zag ik verder af van de toepassing van het “fantasie-vogelprofiel”. Sindsdien werden alleen nog profielen met bekende technische gegevens toegepast.

Het resultaat van alle inspanningen was dat de EV6, die in de lente en de herfst van 1983 werd getest, een stuk beter presteerde tijdens de zoals vroeger toegepaste korte testvluchten. Verder werden er krachtvluchttijden van nauwelijks één minuut gehaald. Steeds moest vanwege instabiele vliegposities voortijdig teruggeschakeld worden van kracht- naar glijvlucht. De omschakeling van kracht- naar glijvlucht en terug zag er meteen al heel goed uit. Op dat moment was goed te zien hoe mooi de overgang plaatsvond van de energieke krachtvlucht naar het rustige zweven. Steeds vaker lukte het om op voldoende hoogte over te schakelen naar de glijvlucht en dan rustig te landen. Als dat echter niet lukte dan was een onvermijdelijke “puntlanding” het resultaat.

Afbeelding 18 EV6 tijdens de opgaande vleugelslag (1983)

Ook hierna heb ik mijn heil gezocht in de theorie. Ik snuffelde hiervoor bij bibliotheken om de berekeningsmethoden te verbeteren. Bovendien kreeg ik van mijn correspondentievrienden steeds weer oude en nieuwe vakliteratuur.

In 1984 heb ik een verschrikkelijk dure hand-held computer met een 24 kB-RAM en een lange éénregelige display gekocht. De datastroken waren nu, ondanks de grotere opslagcapaciteit, al 24 cm lang en hoefden niet meer zo vaak door de leessleuf te worden gehaald. Het rekenprogramma moest in ieder geval compleet opnieuw bewerkt worden, maar de slagvleugelberekening was daarna kinderspel.

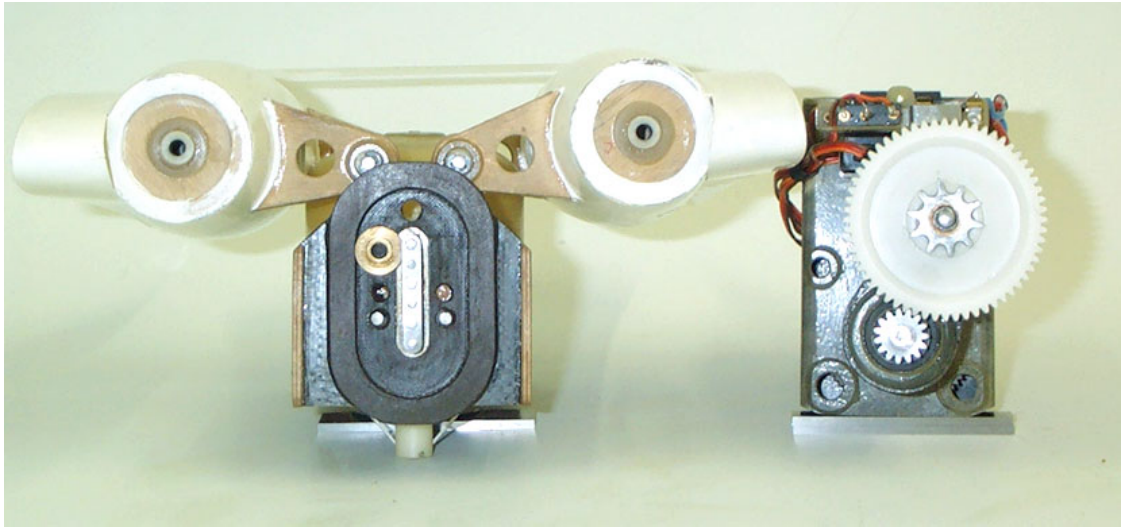
© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

6. Huidige stand van zaken (EV7)

Alle verzamelde Know How werd in de ontwikkeling van de EV7 gestoken. Voor de eerste keer verliet ik het bewezen principe van het kruktapmechanisme. Kruktappen hebben immers bij vleugels jammer genoeg een ietwat ongunstige bewegingskarakteristiek.De slagsnelheid neemt vanaf een eindpositie van de vleugel naar het midden van slag toe om daarna weer tot nul af te nemen tot de volgende eindpositie is bereikt. Alleen in het midden van de slag wordt de maximale slagsnelheid gehaald.

De maximaal haalbare trekkrachten worden slecht een kort moment opgewekt. Voor en na de middenpositie van de vleugel neem de energieomzetting duidelijk af. Dit betekent ook, dat het vermogen van de aandrijving,de daarbij behorende zware tandwielkast en stabiel mechanisme, de maximale toelaatbare liftcoëfficïent van het gebruikte profiel, evenals de optredende vleugelverdraaiing bij elke slag slechts heel even maximaal benut worden.

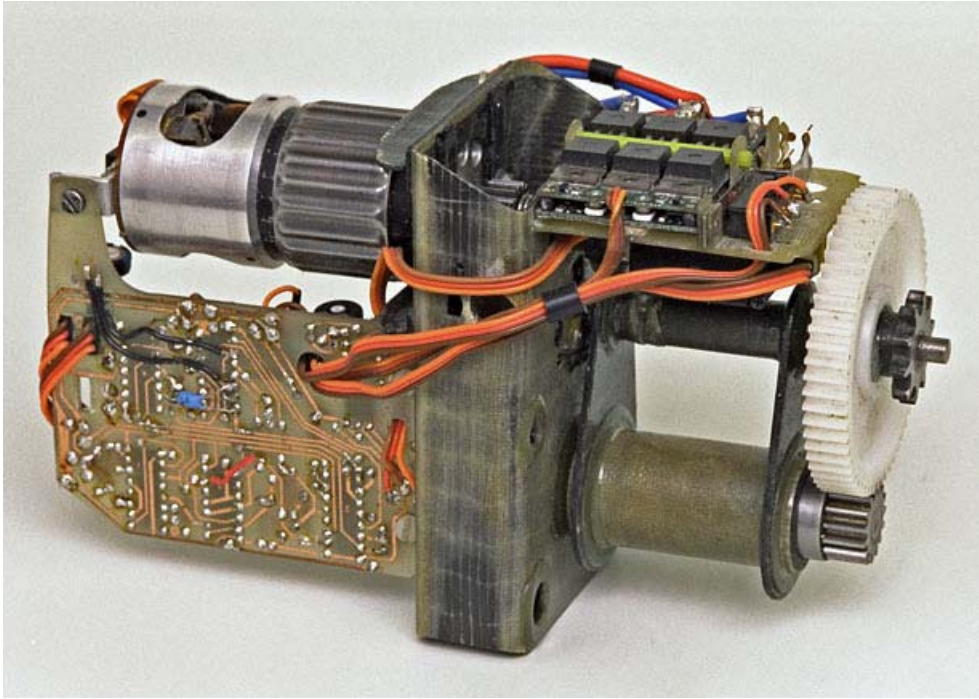
Dergelijke kritische bedenkingen leidden tot de ontwikkeling van een tandheugelaandrijving. Hierbij wordt een rondsel om een dubbelzijdig getande stang, de tandheugel d.m.v. een rollenbaan omheen geleid. De rondselas kan zich tijdens het ronddraaien alleen zijdelings heen en weer bewegen waardoor dan een rechtlijnige op- en neergaande beweging van de tandheugel ontstaat. Verdere details worden duidelijk uit de onderstaande foto's.



Afbeelding 19 Vooraanzicht van de opgedeelde tandheugelaandrijving van de EV7

Een dergelijke aandrijving is in staat de maximale slagsnelheid gedurende een beweging voor langere tijd constant te houden. Daarmee wordt de krachtimpuls dan overeenkomstig groot.Iets complexer is daarbij de elektronische omschakeling tussen de kracht- en glijvlucht het bereiken van de precieze glijvlucht instelling. Zo moet er bij stilstand, in het bijzonder tijdens de landing, voor worden gezorgd dat de vleugel niet uit de glijvluchtinstelling kan geraken. Daar is weliswaar wat elektronica voor nodig, maar dat levert in het geheel genomen een gewichts-besparing op. Ten opzichte van het kruktapmechanisme wordt om zo maar te zeggen mechanica door elektronica vervangen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002



Afbeelding 20 Zijaanzicht van de tandheugelaandrijving (gewicht 500g)

Naast de grote luchtdruk-compensatieveer, zoals in de EV4, kwam nu, op basis van de goede ervaringen bij de EV5, weer de eindpositieveer, maar dit keer voor de beide eindposities in aanmerking. Het nominale vermogen van de e-motor werd uit voorzorg naar 180 W verhoogd. De theoretische slagperiodeduur bedroeg ca. 0,7 s. De EV7 woog bij een spanwijdte van bijna 3 meter, afhankelijk van het experimentele stadium, 4,5 tot 5 kilogram.

Daarnaast kreeg de EV7 een V-staart. Het verdraaiingsmechanisme van de aëro-elastische vleugel liet zich verder verbeteren. De rekenkundige inmiddels voordelige neiging van de slaglijn is om redenen van vereenvoudiging weer los gelaten. Voor het overige komt de EV7 sterk overeen met zijn voorgangers, ook wat betreft zijn landingsgedrag.

Afbeelding 21 Één van de gebruikelijke “puntlandingen”. Wegens de verregaande modulaire opbouw veroorzaakt dit maar zelden grote schade.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

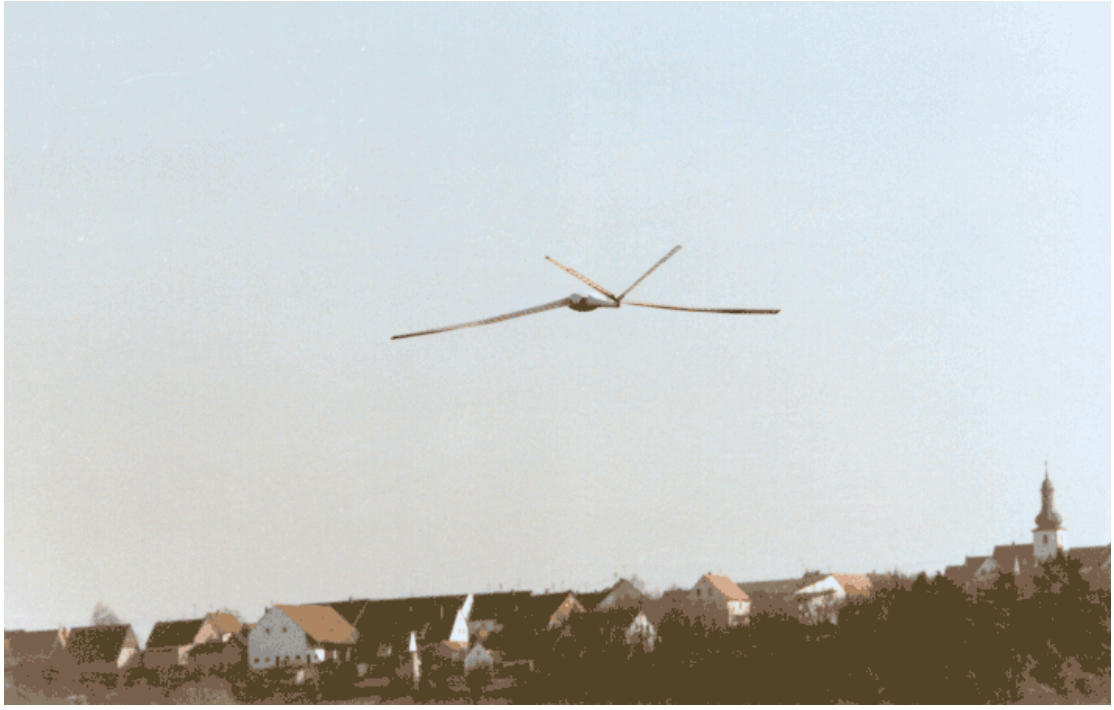
De EV7 vloog in de jaren 1989 tot 1995 en kon voor diverse experimenten gebruikt worden. Er werden bijvoorbeeld de eerste hoogtestarts mee uitgevoerd, gesegmenteerde vleugeltips en verschillende vleugelprofielen (NACA-types, CLARK-Y 11,7) toegepast. Langs de spanwijdte werd bij gelegenheid ook met verdraaiing-demperconstructies geëxperimenteerd.

Afbeelding 22 EV7 op reis (1989)

Één keer heb ik per ongeluk gedurende de krachtvlucht zomaar de boel uitgeschakeld, zonder eerst naar de glijvluchtpositie te gaan. De vogel kwam met een toevallig sterk positieve vleugel-V-stelling in een daalvlucht naar beneden. Na ongeveer 10 meter hoogteverlies en na inschakeling van de aandrijving vloog hij weer verder, alsof er niets gebeurd was. Dit gedrag zag er goed uit en kan misschien behalve als landingsrem ook als thermiekrem gebruikt worden.

Ongeacht de vliegprestaties heeft er bij het testen geen beslissende doorbraak plaatsgevonden. Die beschouw ik pas als gelukt, wanneer er een complete acculading voor alleen een krachtvlucht gebruikt kan worden. De theoretische vliegtijd bij een krachtvlucht en een geringe stijghoek, zou dan, met de door mij gebruikte accu's (2 Ah-cellen) ongeveer 7 minuten moeten bedragen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002



Afbeelding 23 EV7 tijdens de neergaande slag (1990)

Hoewel de EV7 twee keer een volledig rondje heeft gemaakt en volledig zelfstandig een wondermooie afstandsvlucht maakte , moest nog steeds wegens plotseling optredende vluchtinstabiliteit voortijdig naar de glijvluchtinstelling worden omgeschakeld. Enkele op zich zelf staande krachtvluchten haalde per keer een vliegduur van iets meer als een minuut. Net als bij de EV6 werden er slechts korte lichte stijgvluchten gemaakt. In de meeste gevallen gingen deze over in overeenkomstige daalvluchten. Gemiddeld kon de vlieghoogte daarmee constant gehouden worden.

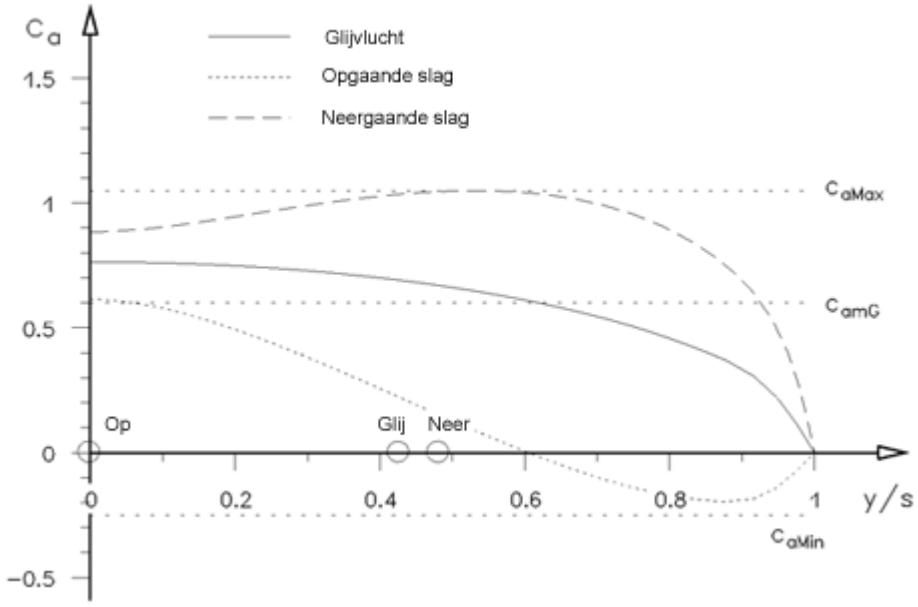
7. Verdere ontwikkeling

In 1990, nog tijdens de experimenten met de EV7 brak voor mij het PC-tijdperk aan. Het rekenprogramma werd opnieuw herschreven. Dit keer was de hiervoor bestemde software zo goed dat de datastroom gelijk getransformeerd konden worden naar diagrammen en diverse optimaliseringsmogelijkheden geautomatiseerd konden worden. Alleen al de broncode van het rekenprogramma(zonder grafieken) groeide daarbij al aan tot meerdere honderden kilobytes. Gaande al dit rekenwerk ontwikkelde zich ook mijn voorstelling van de gedragingen van de slagvleugel nog verder.

Analoog aan de propellertheorie kan zeker ook de slagvleugel met lineaire verdraaingsverdeling langs de spanwijdte zeker efficiënt werken. Bovendien is op grond na de waarnemingen met betrekking tot de natuurlijke voorbeelden relatief zeker, dat bij de horizontale kruisvlucht een verdraaiing bij de vleugelwortel niet noodzakelijk is c.q. doelmatig is. Als men deze voorwaarden accepteert dan kunnen op basis van de bekende vergelijkingen van de

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

aërodynamica[6] de liftverdelingen worden berekend en vervolgens daaruit conclusies worden getrokken.



Afbeelding 24 Gewenste liftcoëfficïentverdelingen van de EV7 langs de halve spanwijdte “s” bij een gestrekte vleugelstand voor een rechte stationaire stijgvlucht. De gemiddelde liftcoëfficïent bij de glijvlucht wordt weergegeven met de aanduiding $C_{amG.}$ Bovendien zijn de aangenomen grenswaarden van het toegepaste profiel CLARK Y (11,7)[7] voor een niet optimale vleugelvorm hierin meegenomen. Drukpunten op de halve spanwijdte zijn met kleine cirkels gemarkeerd.

Tijdens de **glijvlucht** wordt de elliptische liftverdeling met de bekende minimale geïnduceerde weerstand voor een draagvleugel met een begrensde spanwijdte toegepast. Bij deze vorm ligt het drukpunt op ongeveer op 0,42 maal de halve spanwijdte “s”.

Het getoonde functieverloop van de **neergaande slag** heeft de verdelingsvorm met het minste energieverlies, c.q. met de grootste trekkracht bij het gegeven slagmoment. De drukpuntsafstand ligt op 0,48 * ”s”van de vleugelwortel en ligt maar iets verder dan die van de elliptische verdeling. Al een kleine verplaatsing richting de vleugeltip leidt, onder de voorafgaande eisen, al tot een duidelijke verhoging van het Ca-maximum. De gemiddelde liftcoëfficïent is ca. 1,5-maal groter dan de glijvluchtverdeling.

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 Avisory Committee for aeronautics, Technical Note 2249, sept. 1950

7 Althaus Dieter: Profielpolaren für den Modellflug. Neckar-Verlag, VS Villinngen 1980

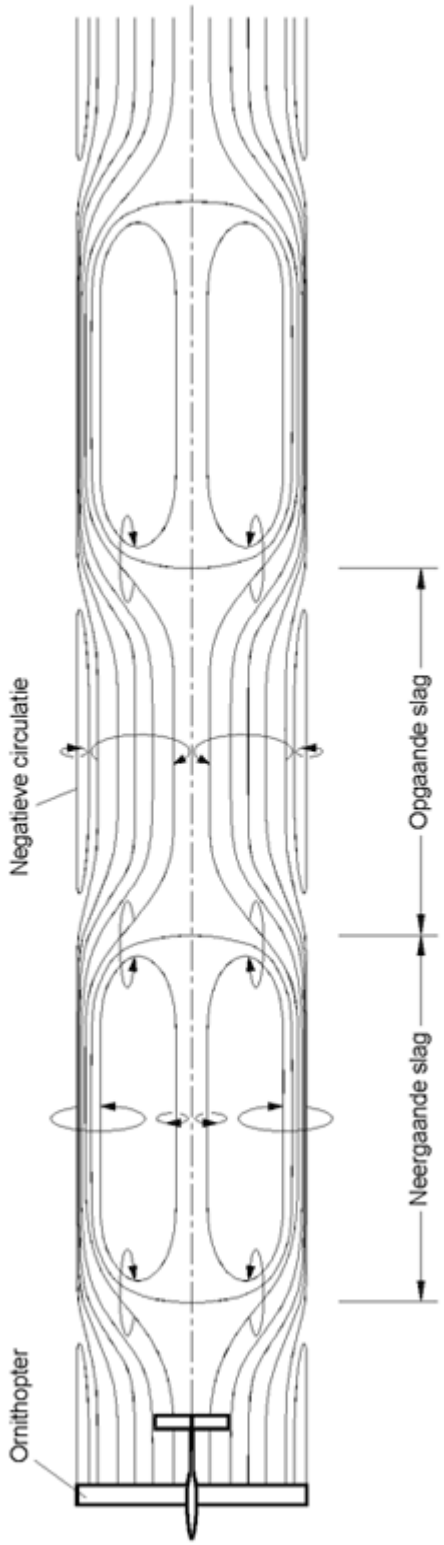
© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

De minimale geïnduceerde weerstand van de opgaande slag ligt ongeveer op een drukpuntsafstand van 0,27 * “s”. Dit maximum is echter zo uitgesproken zwak, dat zelfs, zoals bij het vorige geval een drukpuntverplaatsing tot aan de vleugelwortel, een verwaarloosbare weerstandsverhoging oplevert.

De afwijking van het minimale punt levert dan een vergroting van de trekkrachtimpuls op. De gemiddelde liftcoëfficïent bedraagt nu nog ongeveer het 0,3-voudige van de glijvluchtcoëfficiënt.

De ondanks de constante instelhoek verschillende Ca-waarden aan de vleugelwortel ontstaat er door de ongelijke zogwinden op deze plaats[8] een wervelstraat. Door de plaats van de maximale circulatie , ongeveer in het midden van de halve spanwijdte, wordt dan ook de door vele vogels gebruikte pijlstelling van de vleugels en de duimvleugel op deze blootgestelde vleugelpositie aannemelijk

Door de pijlstelling van de vleugel kan de circulatie c.q. de lift in het aan de voorzijde liggende deel van de vleugel naar de zijkant verplaatst worden. Iets dergelijks veroorzaakt de relatief kleine duimvleugel met zijn eigenschap als voorvleugel. Met deze vleugel wordt een grotere circulatie aan de buitenste vleugelposities mogelijk en daardoor langs vrijwel de gehele vleugel. Met deze liftverdelingen kan men, na bepaling van het krachtenevenwicht, met de gekozen profielgegevens, de basisgegevens, zoals bijvoorbeeld de vliegtijd, stijghoogte en afstand bepalen. Bovendien kan dan een vereenvoudigd wervelbeeld van een ornithopter (zie de niernaast staande afbeelding) ontworpen worden. Daarmee kan men dan weer verklaren waarom sommige vogelsoorten in lange lijnen, zoals bijvoorbeeld in V-formaties vliegen.



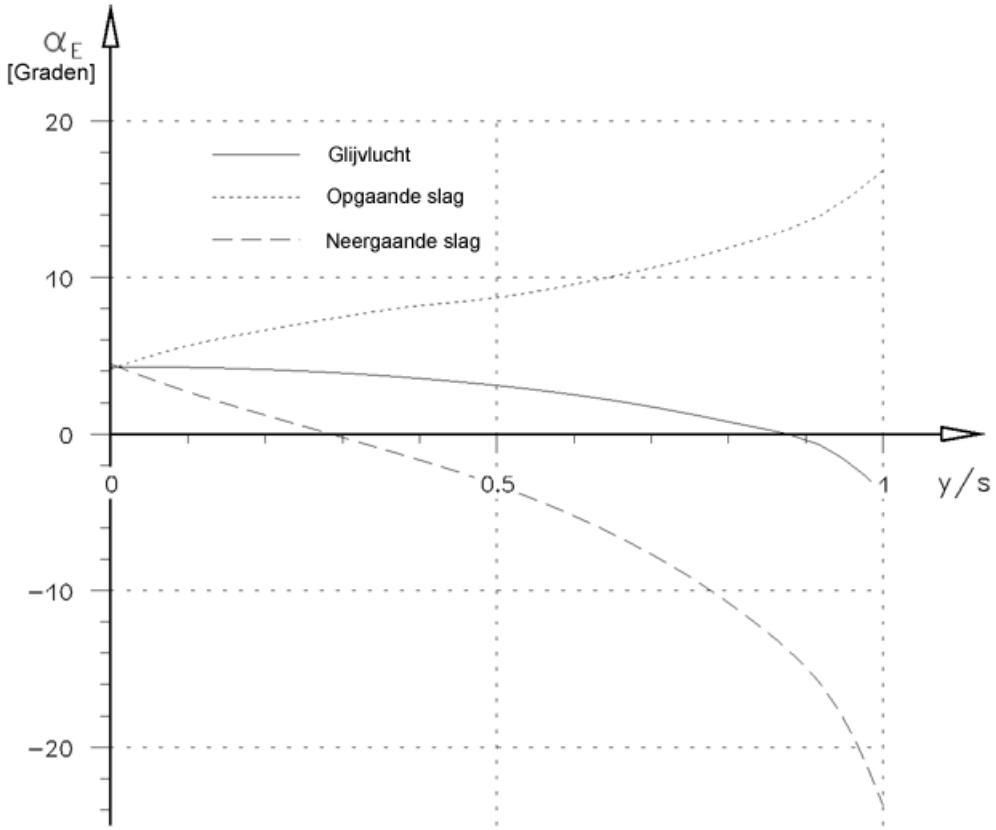
Afbeelding 25 Bovenaanzicht op het vereenvoudigde wervelbeeld achter een ornithopter

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

Een wezenlijk rekendoel is ook bij de gegeven vlieg- en slagsnelheid, het bepalen van het op dat moment benodigde verloop van de instelhoek[9] (de volgende afbeelding). Deze verandert van de vleugelwortel gezien naar buiten toe relatief lineair. Pas in het bereik van de vleugeltips neemt de verandering sterker toe. Het daar aanwezige verdraaiingsverloop in de praktijk evenwel na te doen is mij tot op heden nog niet gelukt. Misschien hangt de vluchtstabiliteit daar ook mee samen. Het theoretische rekenmodel wijst echter meer op het probleem van de krachtvlucht-instelling. Een discussie hieromtrent zou hier echter te ver voeren.



Afbeelding 26 Het theoretische verloop van de instelhoek $\alpha_{E(y)}$ bij de genoemde Ca-verdelingen, bij toepassing van het profiel CLARK Y (11,7), een rechthoekige vleugelvorm, gelijke op- en neergaand slagtijden en een slagperiodeduur van 0,7 s.

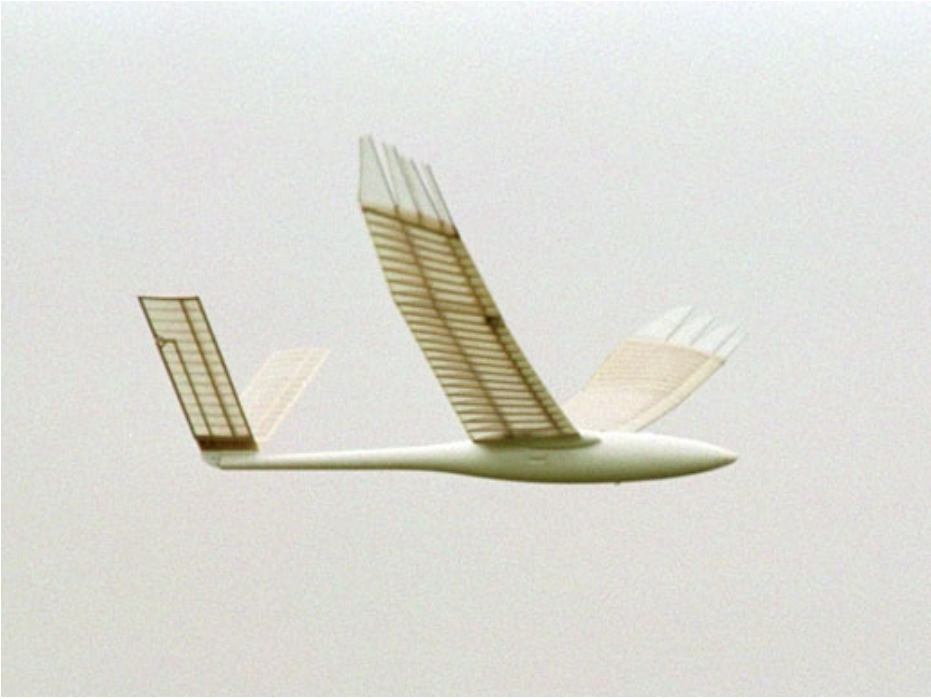
Een poging om de goede verdraaiing in de buurt van de vleugeltips op zo'n manier te realiseren als dat ook in de natuur plaatsvindt, laat de onderstaande foto zien. De separate "slagpennen"van de gesegmenteerde vleugeltips bestaan uit gemakkelijk verwisselbare gfk-pijpjes die als kleine scheepsmastjes van een soort zeil zijn voorzien. Deze waren in staat zich aan de veranderlijke aanstromende lucht aan te passen als een vleugel met doorlopende koorde. De zeker verhoogde weerstand tijdens de glijvlucht werd daarbij bewust op de koop toegenomen. Dit nadeel zou op zijn minst tijdens de krachtvlucht door de verhoogde trekkracht vereffend moeten worden.

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

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002

De vliegpraktijk met deze gesegmenteerde vleugeltips liet echter geen éénduidig resultaat zien. Noch werd de glijvlucht waarneembaar slechter, noch de krachtvlucht verbeterd. Tijdens de glijvlucht hadden de zeilen de neiging tot flutter, wat zich door het afstellen van de hoofdspant liet bijstellen. Terugkijkend duidden mijn vele , op de beschikbare foto's vertoonde praktische vluchten met "slagpennen" op een zomogelijke verbeterde vliegstabiliteit.

Hoewel bij de "slagpennen" met zeer primitieve middelen gewerkt werd, schijnt de segmentering van de vleugeltips zeker een succesvolle mogelijkheid te zijn om de vleugelverdraaiing aan de theoretische eisen aan te passen. Van de gelijktijdige vermindering van de geïnduceerde weerstand, die de bionici aan de segmentering van de vleugeltips toeschrijven, zal in ieder geval bij dit soort eenvoudige constructies verder moet worden afgezien.



Afbeelding 27 EV7 met gesegmenteerde vleugeltips tijdens de neergaande slag (1992)

Nadat het voor mij een lange tijd heeft ontbroken aan concrete voorbeelden, zijn nu weer ideeën voor de praktische toepassing benodigd. Juist deze wisselwerking tussen theorie en praktijk als ook het werk en het combineren van verschillende vakgebieden maakt de slagvleugelhobby zo interessant. Het is soms wel behoorlijk frustrerend, om op een zwalkende manier met de ontwikkeling vooruitgang te boeken. Alles overziend beleeft men er ondanks, of wel misschien dankzij, veel plezier aan.

De ornithopter-modelbouwhobby is ideaal voor mensen, die niet alleen maar oplossings-georiënteerd willen bouwen en knutselen. Met de speelse toepassing van de techniek verbonden, evolutionaire tegenslagen moet men zeer zeker kunnen en willen omgaan. Voor deze groep mensen zou het jammer zijn als de ornithopterontwikkeling zich te snel zou ontwikkelen. Goede industriële seriebouw zou de eigen ontwikkelinggeestdrift alleen maar ontmoedigen.

© Horst Räbiger, Nürnberg 2002