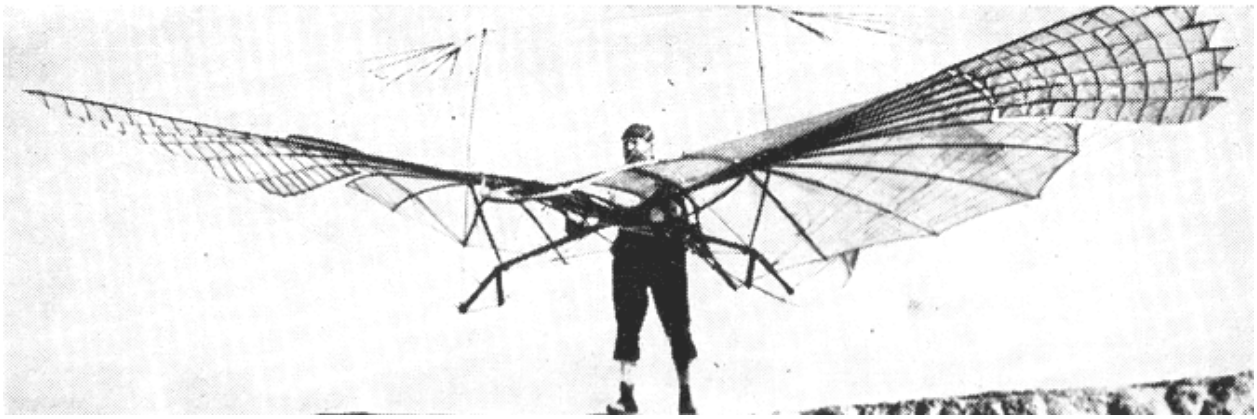
Slagvleugelvlucht in de Natuur en de Techniek

Vertaald vanuit de oorspronkelijke serie artikelen van
Karl Herzog in het blad “MECHANIKUS” (Duitsland 1963-1964)

Vertaald in het Nederlands door Louis van Telgen

Gepubliceerd door Model Aeronautical Press LTD, Groot Brittannië.
Aeromodeller Annual 1964-65 blz. 44-57



Afbeelding 1
Otto Lilienthal en zijn slagvleugel-zweefvliegtuig uit 1896.

Slagvleugelvlucht in de Natuur en de Techniek

Vertaald vanuit de oorspronkelijke serie artikelen van
Karl Herzog in het blad “MECHANIKUS” (Duitsland 1963-1964)

Experimenten in de geschiedenis van de luchtvaart

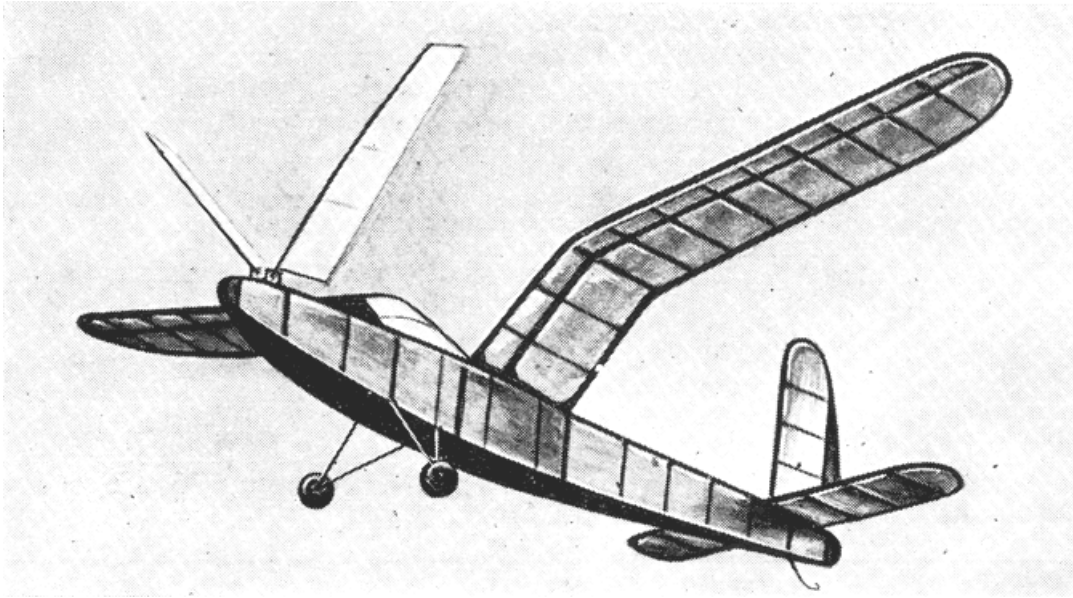
Al het onderzoek in de geschiedenis van de luchtvaart door de eeuwen heen heeft ons op een punt gebracht waarbij in bijna elk gebied de inspanningen van de mens met succes bekroond zijn.

Zweefvliegtuigen, zeilvliegtuigen en motorvliegtuigen hebben een stadium bereikt waarin alleen nog verbeteringen in prestatie en veiligheid mogelijk zijn.

Alle fundamentele wetten zijn bekend en begrepen. Alleen op één gebied is de mens er niet in geslaagd om succes te behalen en dat is het nabootsen van de slagvleugelvlucht van de vogel.

Otto Lilienthal bouwde een slagvleugelvliegtuig met een spanwijdte van 8 meter en een gewicht van 40 kg (afb. 1). Lilienthal maakte diverse glijvluchten maar stierf voordat hij slagvleugel-vluchten kon maken. Alexander Lippisch bouwde in de jaren voor WW II veel slagvleugel-modellen (afb. 2). In sommige gevallen werd de propeller vervangen door twee kleine vleugels die tijdens de opgaande slag in een negatieve stand en bij de neergaande slag in een positieve stand werden gedraaid.

De spanwijdte bedroeg 3 m en het gewicht 1,95 kg. Een 4 cc Kratmo-motor in de neus van de romp dreef de kleine vleugels aan met een frequentie van 280 slagen per minuut. Bij een grondstart werden hoogten van 4 tot 5 meter met een vliegtijd van 4 minuten gehaald. Een handstart vanaf een kleine hoogte resulteerde in een recordvlucht van 16 minuten en 8 seconden bij een hoogte van ca. 45 tot 50 meter.



Afbeelding 2

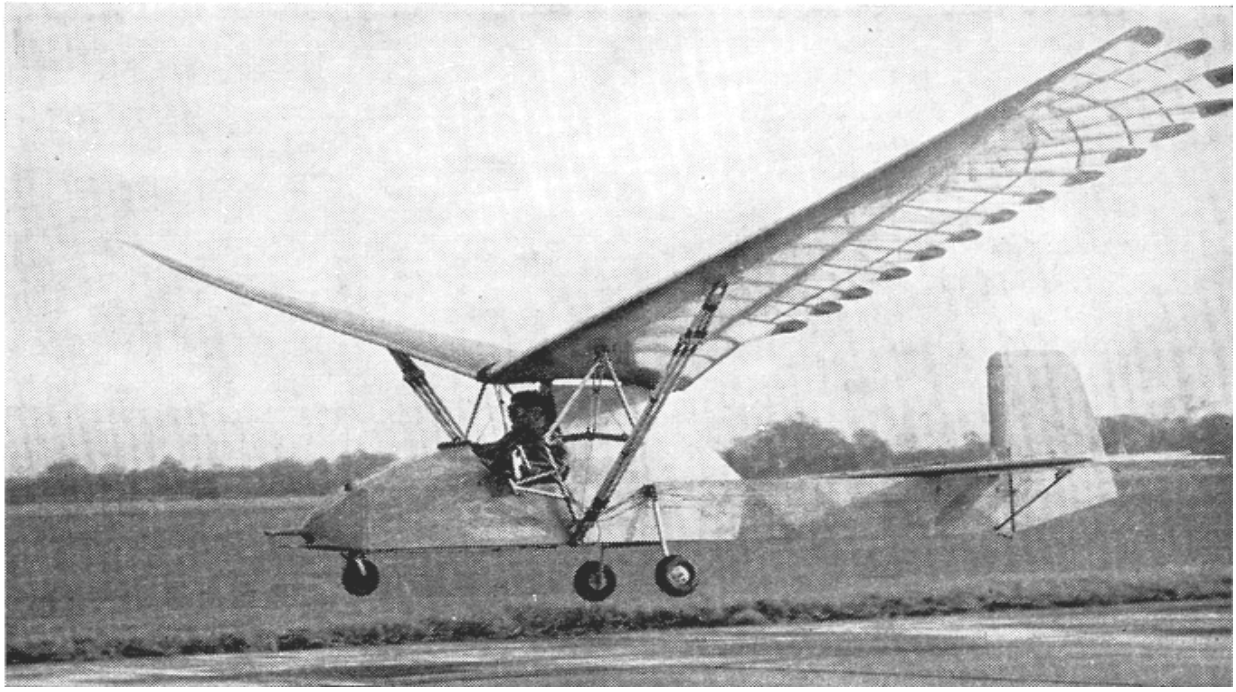
Een door een rubbermotor aangedreven slagvleugelmodel van Alexander Lippisch uit 1938.

Van speciaal belang is de “Zwaan 1” van Dipl. Ingenieur Walter Filter (afb. 3). Deze was uitgevoerd met een hele korte romp met slagvleugels in het midden van de vleugelspanwijdte. De vleugel was verdeeld in twee afzonderlijke delen, een robuuste vaste binnenvleugel waarbij aan de vleugeluiteinden slagvleugels werden gemonteerd met een slaghoek van 75°. Elke slagvleugel bestond weer uit zes smalle stroken. Deze stroken overlapten elkaar niet maar lagen naast elkaar en konden om hun lengteas draaien zodat tijdens de neergaande slag de achterlijst enigszins naar boven kon draaien en tijdens de neergaande slag weer neerwaarts bewoog. Het vliegtuig was voorzien van een 4 pk motor, die achteraf gezien niet sterk genoeg bleek te zijn. Recente experimenten werden ook de U.S.A. en Engeland uitgevoerd.

Afbeelding 3

Het slagvleugelmodel van W. Filter, getoond tijdens de Hannover Messe, bleek onvoldoende vermogen te hebben.

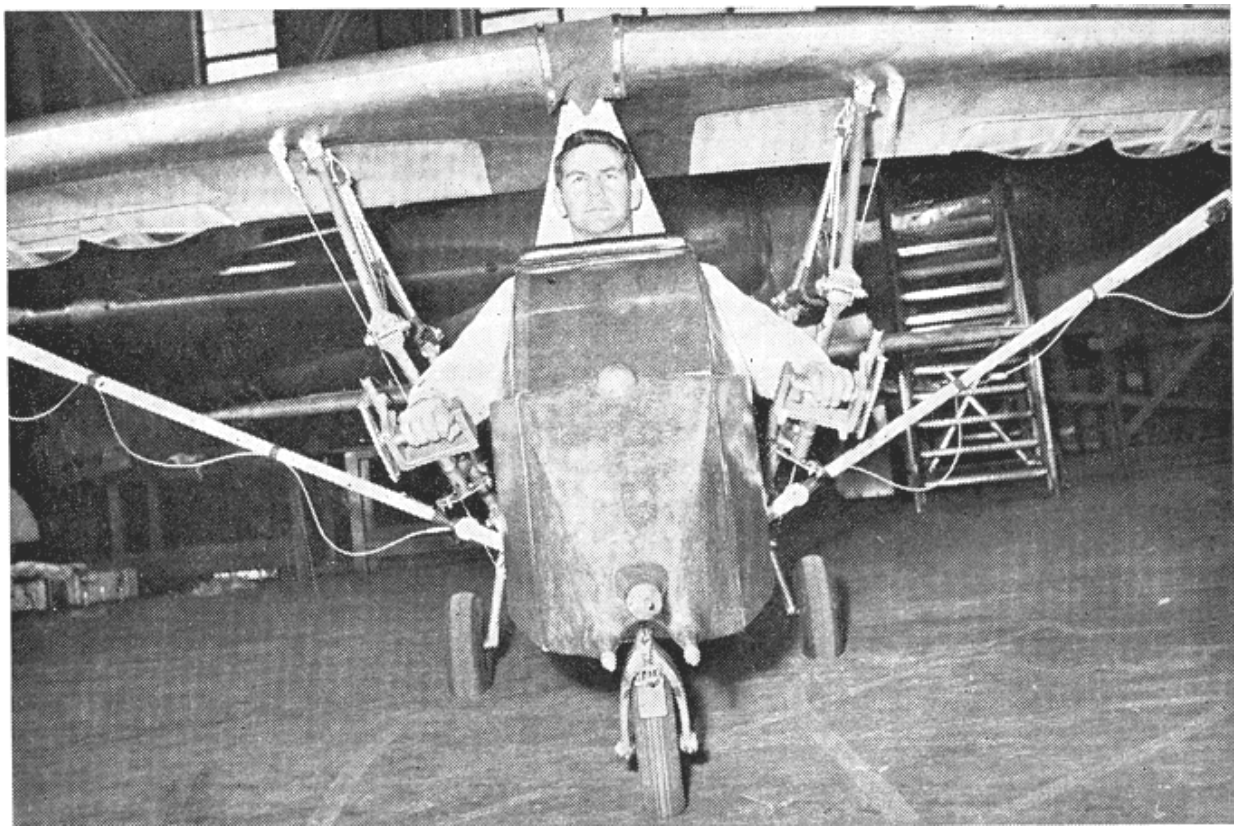
Een voortreffelijk voorbeeld hiervan is de “Ikarus” ontworpen door Emil Hartmann. De “Ikarus” werd voor hem gebouwd in 1959 en getest in het voorjaar van 1960 (afb. 4). Tijdens de test werd slechts een hoogte van 3 meter gehaald, maar het was niettemin een behoorlijke stap voorwaarts op de weg naar het vliegen met mankracht.



Afbeelding 4

Bovenstaand wordt het slagvleugelvliegtuig “Ikarus” van Emil Hartmann in glijvlucht, voortgetrokken door een auto, afgebeeld.

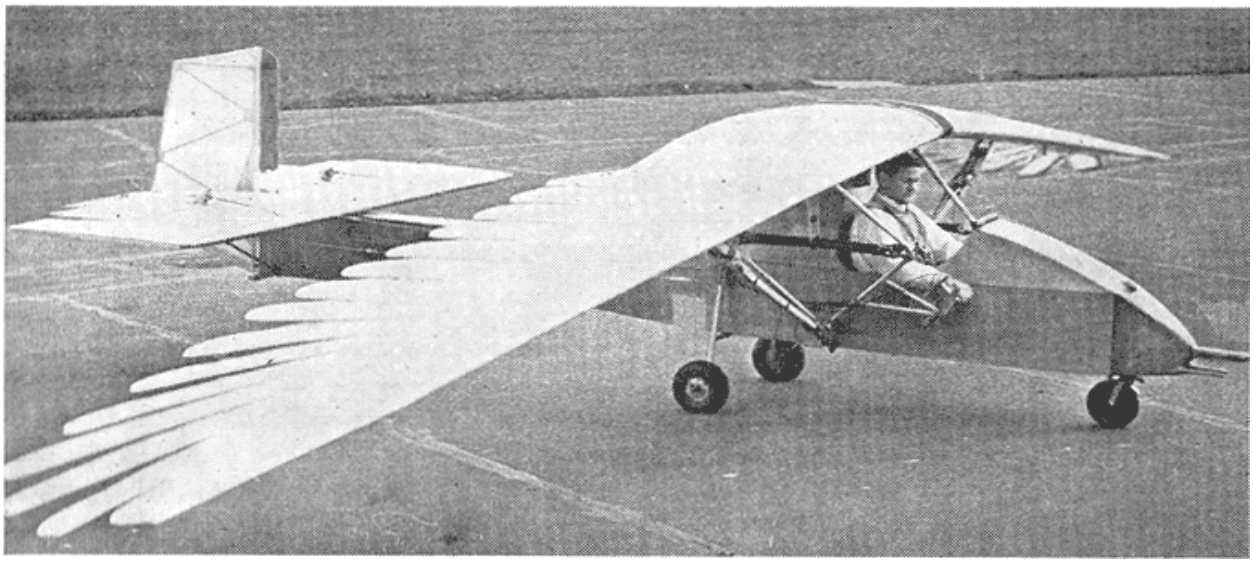
Beide vleugels waren opgehangen ter hoogte van het zwaartepunt. Een schaarachtige hefboom, die door middel van een rubberband en veren werd geactiveerd, zorgde ervoor dat de vleugels tege hun eigen gewicht in omhoog werden gehouden (afb. 5).



Afbeelding 5

Toont de manier van aandrijven door een roeibeweging.

De vleugels werden naar beneden getrokken door vijf sterke koorden die in het midden van de spanwijdte waren bevestigd (afb.6).



Afbeelding 6

Toont de vleugels in de onderste stand.

Gedurende de op- en neergaande slag wedren de vingers gedraaid en wel zodanig dat het deel achter de hoofdvleugel meer washout kreeg.

De slagvleugelbeweging werd gerealiseerd door middel van handkracht.

De start werd ondersteund door een sterke elastische kabel.

Tijdens de proeven werden hoogten van 3 tot 3,5 meter gehaald met handkracht waarna het vliegtuig weer naar beneden zweefde. De meeste proeven werden uitgevoerd met auto-starts.

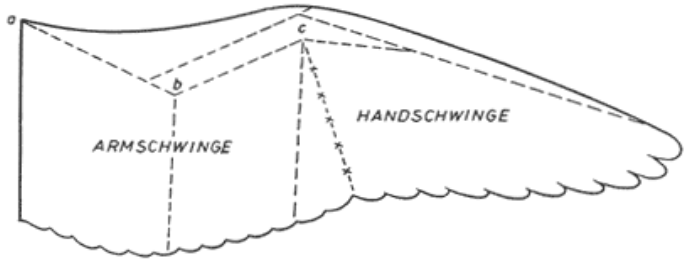
Biofysica van de vogelvlucht

Een vogel is in staat zich door de lucht te bewegen door te klapwieken met zijn vleugels. Hiervoor gebruikt hij zeer sterke borstspieren die ongeveer 1/8 van het gewicht van kleine vogels bedragen. Men zou denken dat het lichaam van de vogel zou stijgen bij de neergaande slag en zou dalen bij de opgaande slag. Zoals bekend gebeurt dit echter niet en volgt het lichaam een rechte weg met een nagenoeg constante snelheid.

Om ons te helpen de vogelvleugel te begrijpen, die in het algemeen niet veel verschilt van de menselijke arm, zal het helpen als we een vleugel malen van stevig papier(karton) compleet met de vouwlijnen. De tekening wordt getoond in afbeelding 6 en kan direct op het papier(karton) worden gekopieerd. Na het pas knippen moet de vleugel langs de gestreepte lijnen naar beneden gevouwen worden.

Afbeelding 7

De arm- en handgebieden van een slagvleugel.



Dit zorgt ervoor dat het gedeelte erlangs terugbuigt. Bij de gestreepte lijnen met kruisjes moet het ernaastgelegen deel naar voren worden gebogen.

Het smalle driehoekige gebied naast de gestreepte lijn met de kruisjes verdeelt de vleugel in twee delen, n.l. de arm en de hand.

Punt a is de schouderbevestiging, punt b de elleboog en punt c de pols. De elleboog zit iets hoger dan punt a en c. Als men zich nu voorstelt dat onze papieren vleugel is bedekt met veren dan zijn de scherpe hoeken niet meer belangrijk. De vleugel is nu convex aan de bovenzijde en concaaf aan de onderzijde waarbij de maximale kromming vrij vooraan ligt.

Deze kromming wordt snel vlakker achter het hoogste buigpunt zowel richting achterlijst als langs de spanwijdte. Een vogelvleugel kan worden vergeleken met een gebogen plaat die gemonteerd is op een trapeziumvormige vleugel waarvan de kromming afneemt richting de vleugeltip.

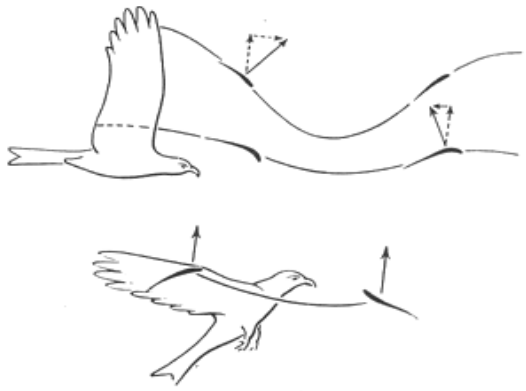
De verdeling tussen het armdeel en het handdeel van de vleugel is erg belangrijk.

Aangezien de hand draaibaar is in het polsgewricht kan deze een ander instelhoek innemen dan het armdeel.

Zodra de weerstand de achterrand van de hand bereikt dan zal deze naar beneden buigen tijdens de opgaande slag en omhoog tijdens de neergaande slag van de vleugel.

Afbeelding 8

Vleugelinstelling tijdens de slagbewegingen.



Deze beweging wordt tussen bepaalde grenzen gehouden door sterke spieren en zijn volledig bestuurbaar. Zodoende kan een rustige of sterke slagbeweging, of een glijvlucht worden gerealiseerd. De vogel gebruikt verschillende delen van zijn vleugels om zijn lichaamsgewicht te dragen tijdens de opgaande of neergaande slag.

Gedurende de neergaande slag draagt hij zijn gewicht met de delen van zijn vleugels die het dichts bij zijn lichaam bevinden en tijdens de neergaande slag de buitenste delen van de vleugel. (afb. 8). De binnenste delen van de vleugel zijn bijna altijd naar de vliegrichting toe gericht, terwijl de buitenste draaien.

De arm levert de benodigde liftkracht om de vogel te dragen, terwijl de hand zich gedraagt als een propeller. Voor de grondstart is de vogel in staat zijn vleugels zodanig te draaien dat de vleugels zich achterwaarts bewegen in plaats van op en neer. De horizontale propellerkracht wordt dan omgezet in een verticale en de vogel stijgt op. Een vergelijking tussen het profiel van een vogelvleugel en laten we zeggen het Clark Y-profiel laat zien dat het vogelprofiel veel meer gekromd is dan het Clark Y-profiel, waarbij de maximale kromming van het vogelvleugelprofiel meer aan de voorkant een veel grotere welving heeft. Om bij de neergaande slag dezelfde lift bij minimale weerstand te realiseren heeft het Clark Y-profiel een invalshoek nodig van - 26° tegen

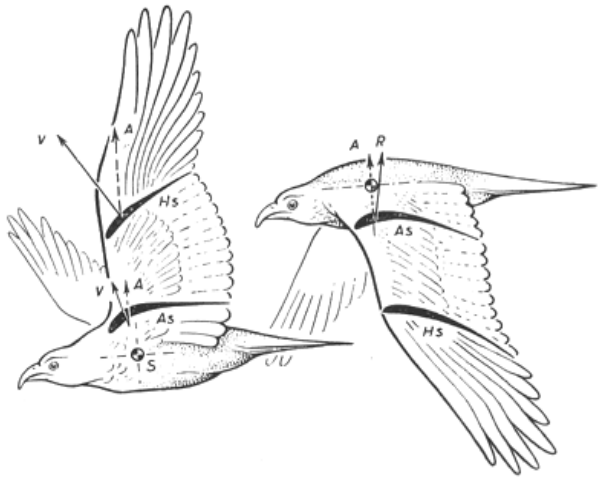
een invalshoek van -10° van het vogelvleugelprofiel. Tijdens de opgaande slag zijn de getallen respectievelijk + 40° en + 17°.

Erich Jedelsky uit Wenen heeft jarenlang geëxperimenteerd met sterk gewelfde vleugelprofielen. De beste resultaten werden bereikt met profielen waarbij het laatste 1/3 deel van de koorde de afstand tussen de boven- en onderzijde van de koorde nagenoeg de dikte van een vel papier had.

Bij deze zeer gewelfde profielen ontstaat er een aanzienlijke verplaatsing van het drukpunt waardoor de vleugel erg gevoelig is voor wisselende luchtstromingen, hetgeen bij glijvluchten zeer nadelig is. Bij de glijvlucht gelden dezelfde wetten voor zowel de vogel als het model. Het zwaartepunt ligt beneden het aangrijpingspunt van de lift als de vogel zich in de glijvluchtpositie bevindt en vliegt dan redelijk stabiel. Echter gedurende de slagvlucht ligt het aangrijpingspunt soms boven of onder het zwaartepunt. Het lichaam bevindt zich dan soms in een stabiel, labiel of instabiel evenwicht.

Afbeelding 9

Krachtverdeling op een vogelvleugel tijdens de slagvleugelvlucht. Tijdens de neergaande slag (afbeelding links) wordt het gewicht van de vogel hoofdzakelijk gedragen door de handvleugels (Hs). De krachten tonen een voorwaartse component (A = lift, V = voorwaartse kracht). Bij de opgaande slag (afbeelding rechts) is de handvleugel omhoog-gedraaid.
Het gewicht wordt nu gedragen door de armvleugels (As). De liftcomponent is nu iets naar achteren gericht. Gedurende de slagbeweging blijft de draagkracht gelijk, de voorwaarts gerichte kracht is altijd groter. S is het zwaartepunt.



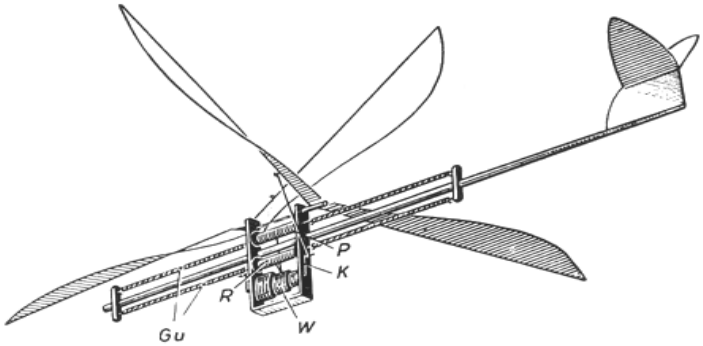
Men zou denken dat de vogel daaraan iets zou moeten doen, maar dat hoeft helemaal niet zoals te zien is in afbeelding 9. Gedurende de neergaande slag wordt het gewicht grotendeels gedragen door de naar voren gerichte buitenste vleugels (handvleugels). Echter hun aangrijpingspunt van de lift nu enigszins voor het zwaartepunt ligt en de vogel daardoor een beetje staartlastig is. Het vleugelkoppel werkt dit echter tegen. Tijden de opgaande slag wordt het gewicht gedragen door de binnenste vleugelhelften (armvleugels) en wordt de vleugel op een zodanige manier omhoog bewogen dat het zwaartepunt en het aangrijpingspunt van de lift op één lijn liggen.

Afbeelding 10

De “Libelle” en zijn aandrijfsysteem.

Gu	rubbermotor,
R	draadrol,
W	getrapte afrolplaat,
K	kruk,
P	drijfstang.

Dit is een ontwerp van E. von Holst.

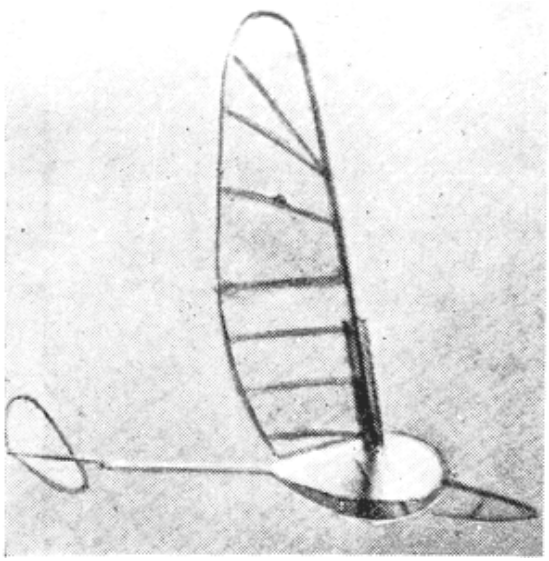


Ornithopters van E. v. Holst

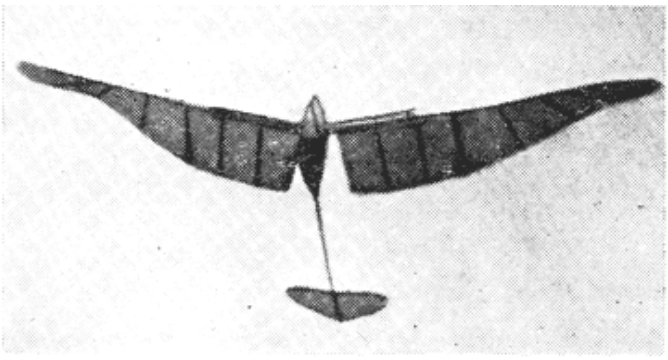
Dr. Erich von Holst bestudeerde jarenlang het vliegen van insecten en zwaluwen. In 1939 bouwde hij een insectmodel om zijn waarnemingen te bewijzen. Het model had een spanwijdte van 35 cm en woog 7 g. Het model was geconstrueerd van pitriet, naaigaren en japanpapier.

Ondanks de kleine rubbermotor werd een hoogte van 2 m en een vliegduur van 44 s behaald.

In 1940 bouwde Von Holst een libelle (afb. 10) Het model had een spanwijdte van 53 cm, een lengte van 48 cm en had een totaalgewicht van 12 g. Evenals het insectmodel bezat de libelle twee stel vleugels, die draaiden gedurende de slagbeweging. Beide vleugels waren geknikt en zaten vast aan een gemeenschappelijke as. Aandrijfvermogen werd geleverd door een rubbermotor die de vleugels aandreef door middel van een systeem van rollen en draden. Door het systeem van draden ging de ene vleugel omhoog en de andere vleugel naar beneden en omgekeerd.



Afbeelding 12
De “Buizerd” tijdens een horizontale vlucht.

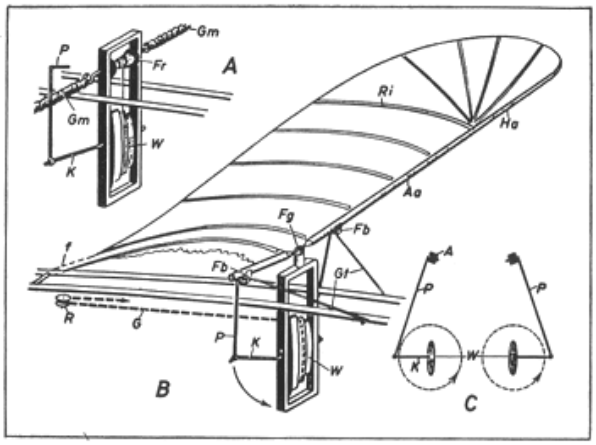


Afbeelding 11
De “Buizerd” tijdens de klimvlucht.

De buizerd van prof. E. von Holst (afb.11) had een totale lengte van 45 cm, een spanwijdte van 97 cm en een gewicht van 24 g. Twee sterke rubbermotoren, één vóór de vleugels en de andere er achter, dreven het model aan. De stijghoek bedroeg ongeveer 45° (afb. 12).

Het meest interessante deel van de modellen van Von Holst is het aandrijfmechanisme (afb. 13).

Het hart van het mechanisme (afb 13a) is een draadaandrijving die bestaat uit een getrapt of conisch gevormde trommel (Fr) en een getrapte excentrische afrolplaat (W). Door de excentriciteit is er bij de neergaande slag een grotere kracht beschikbaar dan bij de opgaande slag. Als de afrolplaat (W) met de hand wordt rondgedraaid.dan rolt de draad van de trommel af (Fr) en op de afrolplaat (W) en tegelijkertijd wordt de rubbermotor (Gm) opgewonden. Zodra de afrolplaat (W) wordt losgelaten wordt de trommel (Fr) door de rubbermotor rondgedraaid en wordt de draad weer de andere kant op opgedraaid. De afrolplaat (W) drijft de kruktappen (K) aan die op hun beurt weer middel drijfstangen (P) de twee vleugelhelften aandrijven.



Afbeelding 13

Aandrijfmechanisme met een rubbermotor zoals ontwikkeld door Prof. E. von Holst.

Von Holst heeft dit mechanisme in een later stadium vereenvoudigd en toegepast in de Zwaan (afb. 13B). Hier werd een lange rubberstreng over verschillende rollen (R) door de romp geleid. Het uitgerekte rubber (niet opgewonden) werd om de gerapte (verschillende diameters) van de afrolplaat gedraaid. De licht uitgerekte streng werd om de grootste diameter gewikkeld en bij toenemende trekkracht om de kleinere diameter. In afbeelding 13B wordt de draairichting van de kruktappen (K) getoond.

Afbeelding 13C toont het deel met de verbindingsstangen aan het vaste punt (A) op de voorkant van de vleugel door middel van koppelstukken (Fb). De rubberstrengen (Gt) zijn bevestigd aan punt (Gb) en aan een punt op de romp om te zorgen dat de neergaande slag sterker is dan de opgaande slag, aangezien ze zowel naar voren als naar buiten worden gerekt. Slecht één rib (Ri) zit vast aan de voorlijst, alle andere ribben zitten alleen vast aan de voorlijst door de vleugelbekleding. Het eind van de binnenste rib zit vast aan de romp. Daardoor is het binnenste deel van de vleugel niet volledig vrij om de beweging van de voorlijst te volgen. Wanneer er een slagbeweging plaatsvindt draagt het buitenste deel van de voorlijst door middel van rib (Ri) de beweging over naar de handvleugel, terwijl de armvleugel naar achteren gehouden wordt. Hierdoor wordt een draaiing over de gehele spanwijdte gerealiseerd.

Bij de bouw moet er zeer nauwkeurig gewerkt worden.

Bouwinstructies voor de Buizerd (afb. 14)

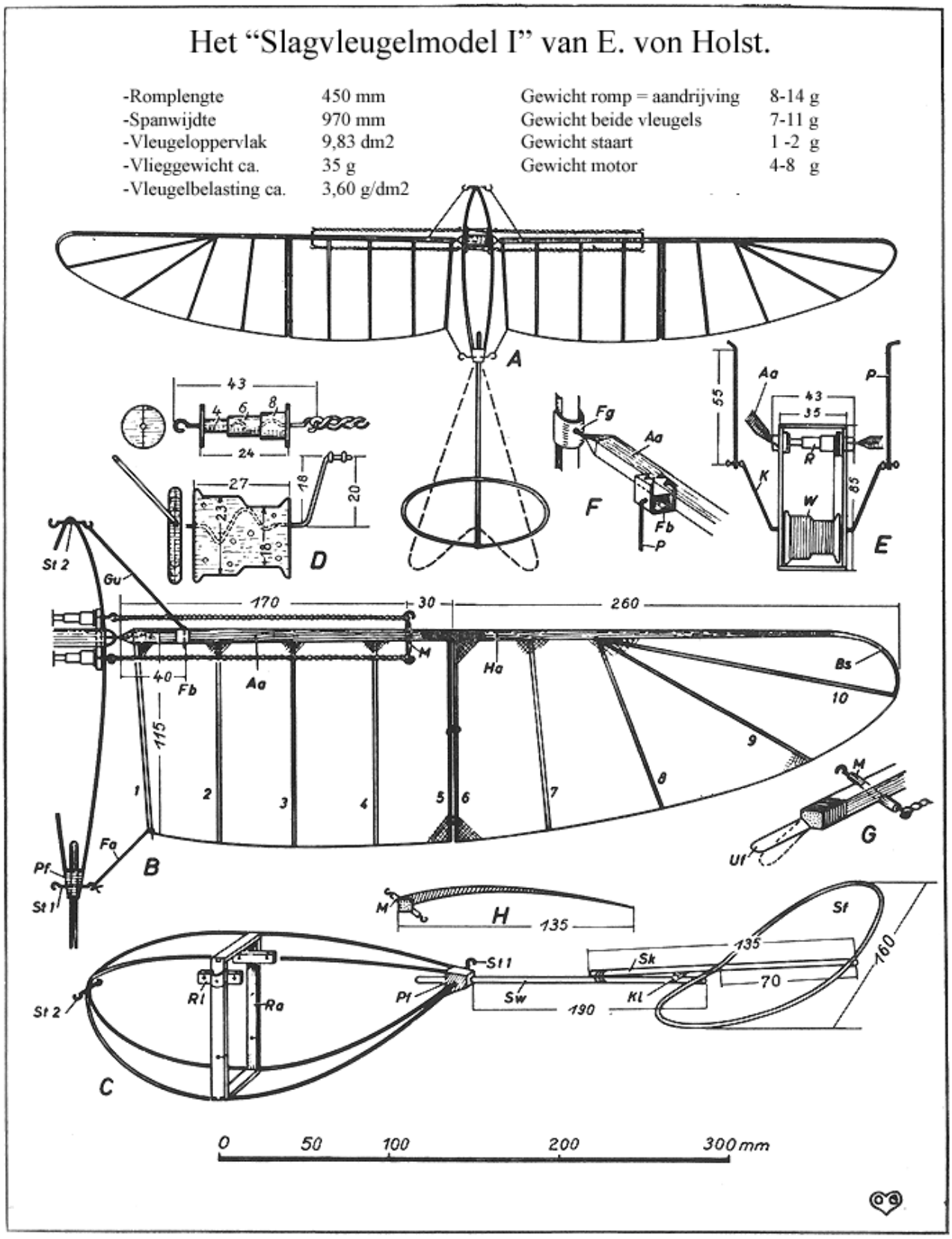
De bouw begint met de hoofdspant (Ra) (7x2 mm balsa) van de romp. De lagers (RI) voor de draadrollen zijn gemaakt van hetzelfde materiaal en bovenaan de binnenzijde van de spant vastgelijmd. De twee draadrollen (afb. E) hebben assen voor 0,5 mm pianodraad terwijl de afrolplaat is voorzien van een 1,5 mm as. Zoals te zien is in afbeelding D zijn in beide gevallen de assen voorzien van een zigzagprofiel om de kans op losdraaien te voorkomen en daarom is het aan te bevelen om de rollen en plaat uit lagen van hard balsa op te bouwen. De uiteinden van zowel de spoelen als de plaat zijn versterkt met 0,3 mm triplex.De rollen en de afrolplaat worden in de lagers (RI) gedrukt, die voorzien zijn van sleuven aan de bovenkant om dit mogelijk te maken. Na het plaatsen worden de sleuven gevuld met lijm (Araldite of UHU-hart) en worden de rollen en de afrolplaat losgemaakt nadat de lijm voldoende droog is en lagers van voldoende harde lijm zijn gerealiseerd.

De rest van de romp bestaat uit 0,8 mm bamboe waarbij deze aan beide zijden in kleine balsablokjes zijn gelijmd. De staartboom (Sw) is gemaakt van balsa en de staarthouder (Sk) van een strootje dat bevestigd en gelijmd wordt aan de staartboom. Tussen de staartboom en de staarthouder wordt een kegje (Kl) gestoken en met een elastiekje geborgd. Dit maakt het mogelijk de instelhoek van het staartvlak (Sf) aan te passen door het verschuiven van het kegje

(Kl). De staartvorm bestaat uit gebogen pampagras dat in een ellipsvorm wordt gebogen en op de staarthouder (Sk) wordt gelijmd.

Afbeelding 14

De bouwtekening van de “Buizerd”van E. von Holst met de originele Duitse tekst zoals deze is gepubliceerd in het tijdschrift “Mechanikus”. Alle maten zijn in millimeters.



De romp en de staart worden beplakt met Japanse zijde. De vleugel (afb. 14B) heeft een vierkante ligger die zowel dienst doet als voorlijst als hoofdligger. Deze is gemaakt van balsa en wordt conisch gemaakt richting de vleugeltip. Deze bestaat uit twee delen, het armdeel(Aa) en het handdeel (Ha). Beide delen zijn met elkaar verbonden door een 2 mm brede en 0,25 mm dikke, strook horlogeveer (Uf) (afb. 14G).

Bij de schouderkoppeling wordt de ligger afgeschuind tot een punt (afb. 14F) waarin een klein stukje pianodraad wordt gelijmd. Deze wordt in een lager (Fg) gestoken dat is gemaakt van een plaatje blik.

De haken voor de rubbermotoren zijn bevestigd aan een stuk balsa (M) dat diagonaal vanaf de onderkant van de ligger naar de bovenkant van de ligger loopt. De verbindingsstangen (P) zitten verbonden met de ligger door middel van lagers uitgevoerd in een U-vorm (Fb) (afb. 14F).

De vleugelribben één tot en met tien, met uitzondering van nr. 5 en 6, zijn bamboestokjes of strootjes en zijn bevestigd aan de voorlijst met dunne strookjes stof.

Rib 5 is een 2 mm dik vurenhouten stokje dat aan het eind van het eerste deel van de voorligger is gelijmd. Rib 6 is ook aan de voorligger gelijmd maar is alleen een bamboestokje. De ribben 5 en 6 zijn door middel van kleine S-haakjes met elkaar verbonden. Aangezien de vleugel tijdens de constructie moeilijk zijn vorm behoudt totdat de vleugel met Japanpapier is bekleed, wordt aangeraden de vleugel met behulp van een mal te bouwen. Als de vleugel klaar is en aan de romp is gemonteerd is, dan wordt deze door een rubber streng (Gu) tussen de rompneus (St 2) en (Fb) en een draad (Fa) tussen de achterlijst en (Pf) en de haken (St 1) bevestigd.

Vrije vlucht vogelmodellen

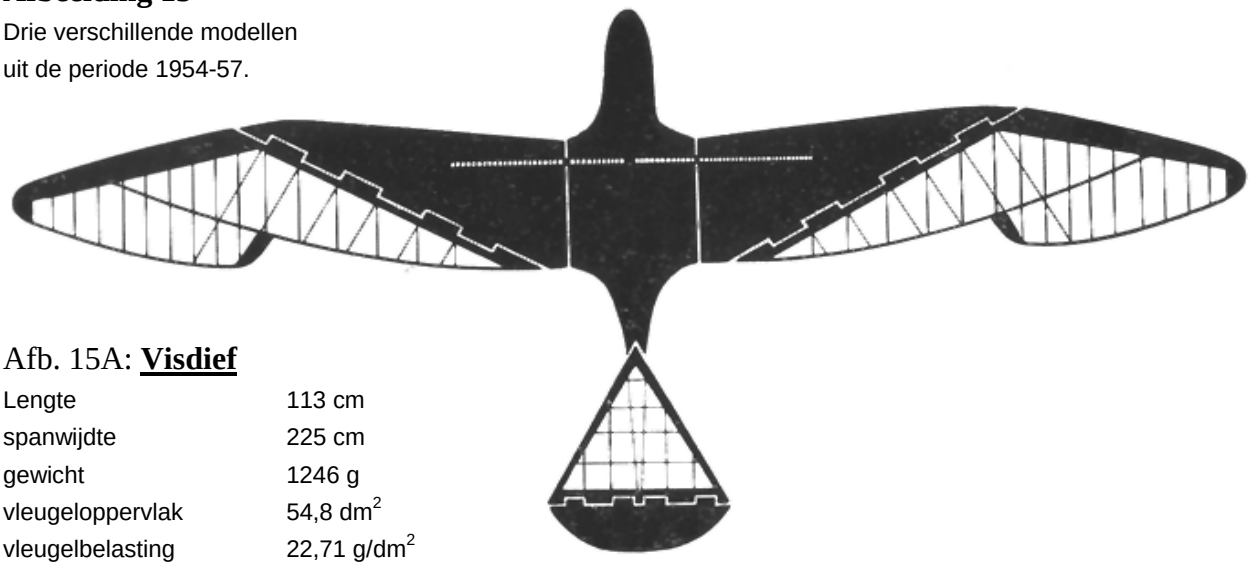
Het zal duidelijk zijn dat de voorste vleugelligger zowel in de vliegrichting als de slagrichting stijf moet zijn, de vleugel zelf moet echter elastisch blijven. Bij normale modelvleugel-constructies kan aan de laatste voorwaarde nauwelijks worden voldaan. De enige uitweg bij dit dilemma is om de vleugel in tweeën te delen en deze met scharnieren aan elkaar te bevestigen. Nu echter is het probleem te beslissen hoe en op welke as de vleugel gedeeld moet worden. Als resultaat van talrijke experimenten zijn er drie typen vleugelconstructies ontstaan. (afb. 15.)

Model A (afb.15A) is gebaseerd op de visdief (meeuw). De slanke romp verdikt zich aanzienlijk rond het zwaartepunt en vormt daarmee een sterke middensectie. De vleugels zijn scharnierend opgehangen aan het middendeel op assen die parallel lopen met de romplengte-as. Echter, zoals we al eerder hebben geconstateerd, is het niet voldoende de vleugels zo te bevestigen omdat er geen verdraaiing van de vleugels kan plaatsvinden over de lengteas van de vleugel. Deze draaiing is nodig voor de opwekking van voorwaartse stuwkracht. Daarvoor is dezelfde soort vleugelophanging benodigd die we hiervoor al hebben beschreven. De aandrijving hiervan is ook al eerder beschreven. Als we zowel een scharnier- als draaibeweging hebben van de vleugelwortel dan zal de opening zich tijdens de slagbeweging zich enigszins openen en sluiten. Om verstoring van de gelijkmatige luchtstroom langs de romp te voorkomen wordt deze opening met een dun stukje rubberplaat afgedicht.

Een eenvoudiger oplossing is om de handvleugel op te hangen aan de armvleugel. Aangezien het oppervlak van de armvleugel nagenoeg overeenkomt met een rechthoekige driehoek wordt het rotatie-effect door de handvleugel scharnierend aan de basislijn van de driehoek te bevestigen.

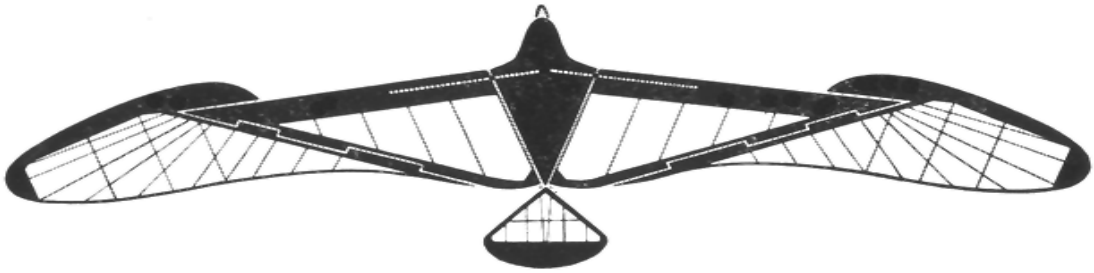
Afbeelding 15

Drie verschillende modellen
uit de periode 1954-57.



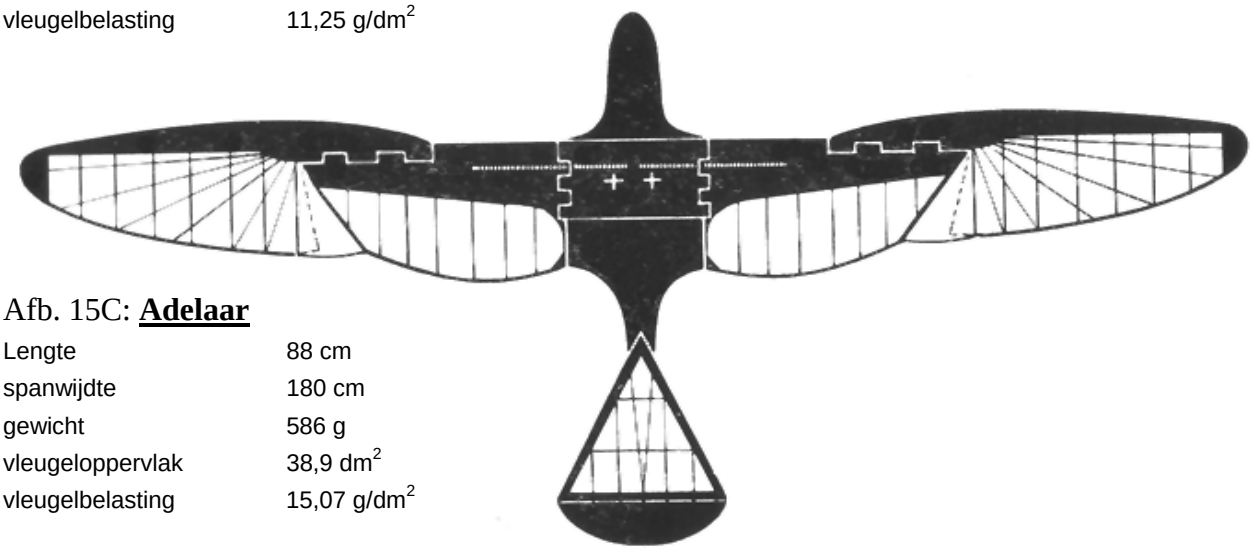
Afb. 15A: **Visdief**

Lengte	113 cm
spanwijdte	225 cm
gewicht	1246 g
vleugeloppervlak	54,8 dm^2
vleugelbelasting	22,71 g/dm^2



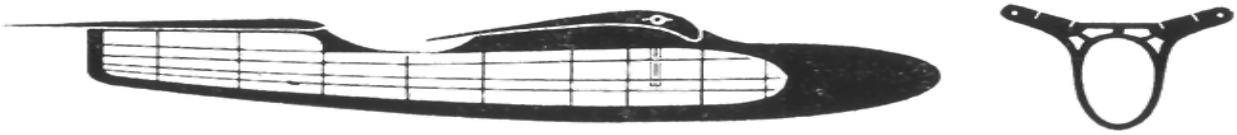
Afb. 15B: **Buizerd**

Lengte	51 cm,
spanwijdte	150 cm
gewicht	360 g
vleugeloppervlak	32 dm^2
vleugelbelasting	11,25 g/dm^2



Afb. 15C: **Adelaar**

Lengte	88 cm
spanwijdte	180 cm
gewicht	586 g
vleugeloppervlak	38,9 dm^2
vleugelbelasting	15,07 g/dm^2



Wanneer de armvleugel omhoog beweegt dan zal de handvleugel door de weerstand van de langsstromende lucht enigszins naar onder bewegen. Als de vleugel echter naar beneden beweegt, dan levert de draaibeweging de voortstuwing.

De romp van de adelaar in zij- en vooraanzicht. Het middendeel van de vleugel heeft een vleugelhoek (dihedral).

Als de handvleugel met een vaste hoek ten opzichte, van de relatief recht toe recht aan, werkende armvleugel, dan werken de krachten ook onder een hoek ten opzichte van de vliegrichting. Deze moet dan op de één of ander manier tussen deze twee vleugeldelen worden opgeheven.

Een betere oplossing is de vleugelvorm zoals getoond in afbeelding 15 B en die gebaseerd is op de buizerd. Beide vleugels zijn naar achteren gericht en waardoor is het scharnier tussen de arm- en handvleugel onder een minder scherpe hoekstaat. De voorwaarts gerichte kracht is echter nog steeds niet parallel aan de vliegrichting gericht waardoor er nog steeds verliezen door de zijwaarts gerichte component ontstaan maar de positie is wel beter dan bij uitvoering 15A.

Een groot deel van de verbetering komt omdat een deel van de handvleugel voor een deel voor de armvleugel ligt..

Er werd wel een probleem geconstateerd, namelijk dat de luchtstroom bij de overgang van de arm- naar de handvleugel wegbreekt. Tijdens de neergaande slag worden er wervels gevormd zowel aan de onder- en bovenzijde van de vleugel.

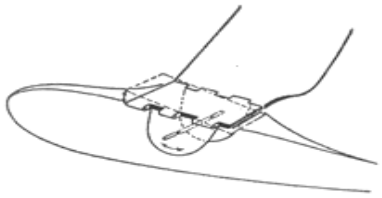
Het wegbreken is onafhankelijk van de slagfrequentie maar het effect is wel groter bij een langzame slag dan bij een snelle slag. Het is duidelijk dat bij elk model moet worden gezorgd voor een zo vloeiend mogelijk verloop van de luchtstroom. De beste oplossing werd gevonden bij het adelaarmodel model 15 C. Daar het kogelscharnier problemen gaf bij model 15 A is een andere oplossing geprobeerd. Deze bestond uit een ophanging met een beperkte uitslag waarbij de armvleugels, vastgezet aan het binnendeel, een op- en neergaande beweging konden maken.

In tegenstelling tot het vorige model werd er een beter gedrag van de handvleugels gerealiseerd. Een deel van de handvleugel overlapt de voorligger van de armvleugel. Wanneer de handvleugel om zijn as draait dan gedraagt deze zich als een hefboom met zijn korte arm aan de voorkant en zijn lange arm aan de achterzijde. Bij de neergaande slag beweegt een deel achter de as omhoog en een deel aan de voorzijde naar beneden. Tijdens de opgaande slag vindt het omgekeerde plaats.Op deze manier wordt de vleugelbeweging vrij goed op een natuurlijke manier nagebootst.

Bij het adelaarmodel moet het mogelijk zijn de benodigde verdraaiing van de armvleugels te realiseren.

Het principe lijkt vrij eenvoudig. De constructie is echter niet zo eenvoudig. Een mogelijkheid zou kunnen zijn het middenstuk beweegbaar te maken en dit op de één of andere manier aan te drijven. Afbeelding 16A toont dit met het deel dat de mogelijkheid heeft om te draaien rond een centrale as. Er blijft nog wel een probleem, namelijk dat de as waarom de arm- en de handvleugels draaien haaks ten opzichte van elkaar staan en er dan een spleet tussen de vleugelhelften ontstaat. Tevens moet de beweging van de armvleugels licht zijn terwijl de handvleugels gedempt moeten worden.

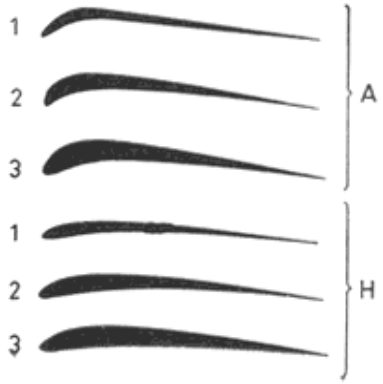
Afbeelding 16
Voorgestelde oplossing voor
het realiseren van vleugeldraaiing
bij de vleugelwortel.



Beide problemen kunnen worden verholpen door een flexibele verbinding tussen de arm- en handvleugel te monteren.

Testvluchten toonden aan dat model 15C superieur is aan de modellen 15A en 15B tijdens de motorvlucht. De modellen 15A en 15B presteren weer beter bij het zweven en bij een thermiekvlucht. Daar de vleugel constant beweegt moet er goed gekeken worden naar de gewichtsverdeling. Als we richting vleugeltip kijken moet het gewicht gestaag afnemen.

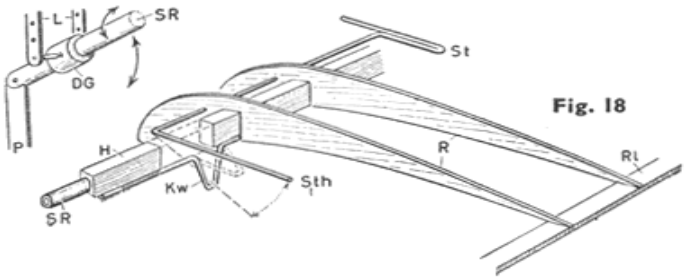
De vleugelprofielen van de armvleugel moeten meer gewelfd zijn dan die van de handvleugel (afb. 17A en 17H). Bij kleinere modellen voldoen de hoge gewelfde profielen het best, bij grote modellen kan met minder welving worden volstaan. Het meest belangrijke verschil tussen de vleugelprofielen van de armvleugel ten opzichte van de handvleugel is dat bij de armvleugel de neus sterk naar beneden gaat terwijl voor de handvleugel een meer normaal profiel benodigd is. De handvleugel heeft een ingebouwde washout van 3°.



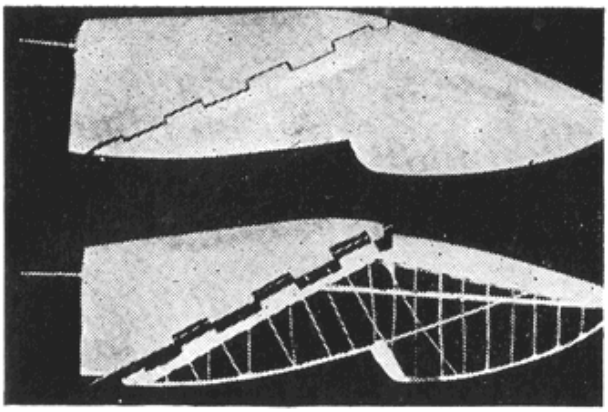
Afbeelding 17

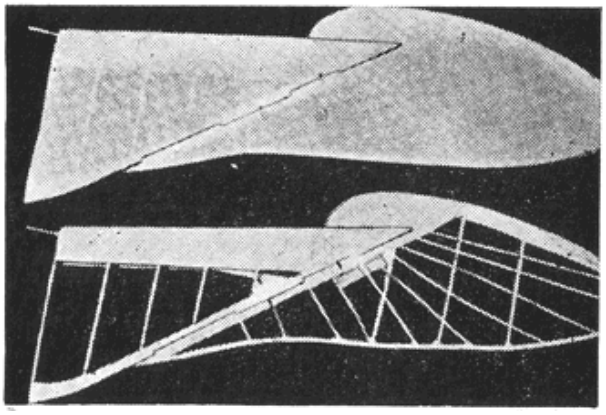
Voorbeelden van vleugeldelen.
A = Armvleugel H = Handvleugel
1. Vleugelprofiel voor modellen met een spanwijdte van 60-80 cm
2. Vleugelprofiel voor modellen met een spanwijdte van 90-150 cm
3. Vleugelprofiel voor modellen met een spanwijdte van 160-220 cm

Afbeelding 18
Vleugelmechanisme.



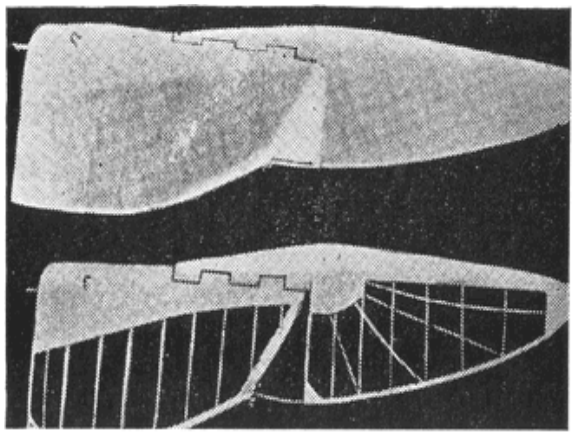
H Vleugelligger met
SR stalen buis,
DG universele bevestiging, afstandstukken,
P Verbindingsstang,
KW stop voor stang Sth en tevens voor de rotatie van St (scharnieras van de handvleugel),
R rib van de armvleugel,
RI achterlijst.





Afbeelding 19
Bovenstaande afbeelding toont de handvleugel geplaatst onder een hoek.

Afbeelding 20
Vleugelvorm van de buizerd.



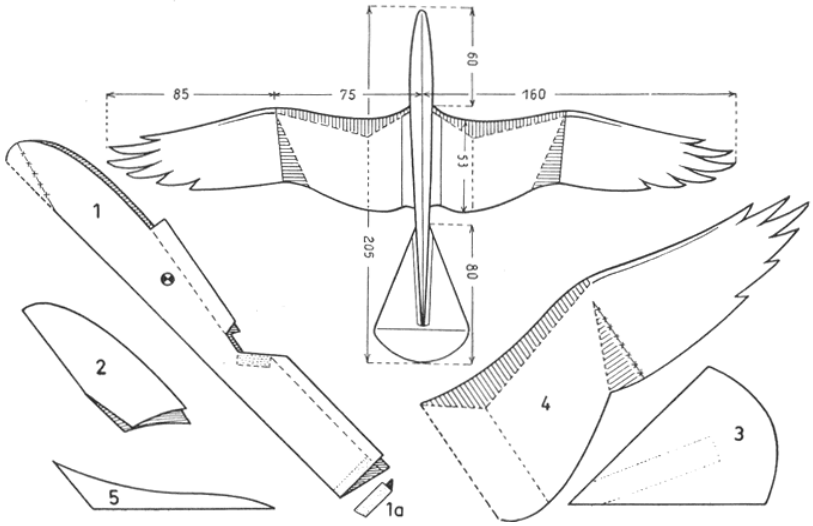
Afbeelding 21
Vleugelvorm van de adelaar (zie ook afb. 15)

Besturingsfuncties

De hoek die de handvleugel zou moeten kunnen maken moet worden aangestuurd. Bij mijn modellen gebruikte ik stukken pianodraad die werden bevestigd aan de handvleugel en doorliepen door de armvleugel waar ze werden begrensd door inbusbouten. Speciaal bij model 15C is een begrenzingsconstructie benodigd omdat hier de verdraaiing indirect plaatsvindt. Er is echter nog steeds een nadeel omdat de begrenzing alleen werkt als de motor draait. Gedurende de glijvlucht moet de handvleugel vastgezet zijn in zijn optimale invalshoek. Een mogelijke oplossing wordt getoond in afbeelding 18. Hier wordt de as gebruikt voor de bediening. Deze bestaat uit 2 mm pianodraad aan het vrije eind haaks (St) omgebogen is. Het andere eind loopt over de ophanging tussen de arm- en de handvleugel. Op deze manier wordt een kleine hefboom gemaakt warmee de vleugelverdraaiing kan worden beperkt. De bovenste begrenzing vormt de vleugelligger die tevens voor de juiste invalshoek zorgt tijdens de glijvlucht. Elastieken die de hefboom omhoog trekken zorgen ervoor dat de glijpositie automatisch wordt ingesteld zodra er geen grotere tegenwerkende krachten op werken. De actie hangt af van het gebruik van de ophanging als een torsiestang.

Tijdens de neergaande slag raakt het gebogen deel de vleugelligger. De vleugelweerstand werkt met name op het achterste deel van de handvleugel die dan probeert om naar boven te bewegen. Dit werkt de torsie tegen van de ophanging die dan toeneemt bij een toename van de deflectie en deze aldus opheft. Zodra de vleugel overgaat naar de opgaande slag werkt de weerstand op de bovenkant van de handvleugel waardoor deze neerwaarts beweegt. De enige tegenwerkende

kracht komt nu van de rubberstreng. De onderste begrenzing bestaat uit Kw die handmatig kan worden aangepast en daarmee de deflectie van de vleugel beperkt.Uit een serie experimentele modellen die werden gebouwd om het beste vleugeloppervlak en de omtrek te bepalen lijkt het model, getoond in afbeelding 21, het meest veelbelovend. In afbeelding 22 wordt een klein experimenteel model getoond dat gemaakt is van stevig tekenpapier. Met een model van dit type kunnen experimenten om de optimale invalshoeken te bepalen heel goed worden gebruikt. Allereerst wordt het model afgesteld voor de voorwaartse vlucht. Daarna kan het model worden afgesteld voor verschillende vliegbanen (afb. 23). De hoekinstelling van de buitenste vleugel bedraagt +3° - +5°. Met de handvleugels ingesteld op een invalshoek van 0° zal een rechte vluchtbaan worden gerealiseerd. Wanneer de linker handvleugel met de neus naar beneden wordt ingesteld, dus als de achterlijst omhoog draait, dan zal het model dan zal het model naar rechts draaien (afb. 23a). Als men de invalshoek vermindert van beide handvleugels dan zal het model rechtdoor blijven vliegen, maar wel sneller en in een steilere hoek naar beneden.



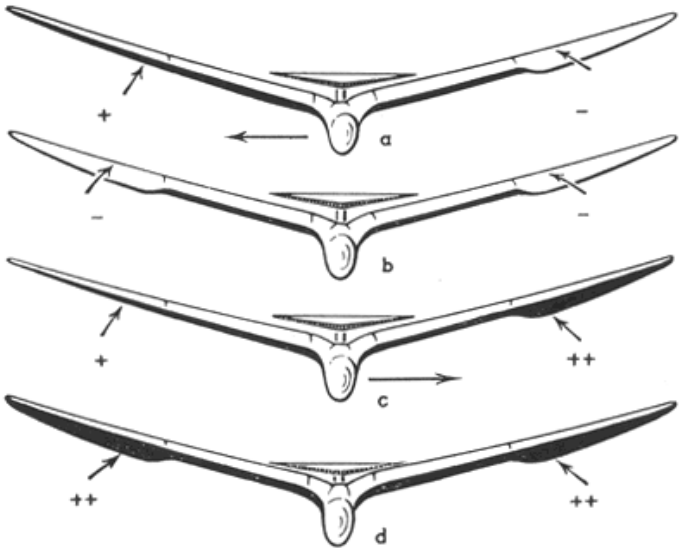
Afbeelding 22

Basisvorm van een model dat gemaakt is van stevig tekenpapier of dun karton.

Deze veranderingen aan de vliegbaan vinden alleen plaats als de invalshoeken gewijzigd zijn naar ca. -5°. Als deze waarde overschreden wordt bij één vleugel dan neemt de lift af en de vleugel aan die kant zal naar beneden bewegen. Het tegengestelde effect vindt plaats als de handvleugel zo wordt ingesteld dat de voorlijst van de vleugel omhoog en de achterlijst naar beneden gedraaid is. In dit geval wordt de vleugel geremd door de werking van de luchtstroom en wordt opgetild (afb. 23c).

Wanneer de linker handvleugel een negatieve verdraaiing heeft en positieve invalshoek dan zal het model naar links willen draaien als gevolg van het liften van de vleugel en de remwerking ontstaat een negatief draaimoment, dat een instabiele beweging veroorzaakt. Een positieve verdraaiing van de linkervleugel zal echter resulteren in een rustige rechter wending van het model (afb. 23a).

Een positieve verdraaiing van de beide vleugels zal resulteren in een landing zoals met flaps (afb. 23d). Bij ornithopters kan het klimmen, wenden en de voorwaartse snelheid alleen al door verandering van vleugelverdraaiing van de handvleugels worden gerealiseerd. Het zal duidelijk zijn dat dit soort experimenten alleen gelden voor glijvluchten omdat tijdens de krachtvlucht veel grotere variaties in de verdraaiing bestaat zonder dat het de vliegbaan erg beïnvloedt.



Afbeelding 23
Weegave van verschillende vleugelstanden.

Gedurende de krachtvlucht varieert de invalshoek tussen de +20° en de -12° zonder dat de luchtstroom wegbreekt. Dit komt omdat gedurende de krachtvlucht het model zich voorwaarts beweegt waardoor er andere krachten een rol spelen dan bij de glijvlucht.

Zoals bekend is de prestatie van een ornithopter sterk afhankelijk van de verdraaiing van de handvleugels. Bij het adelaarmodel (afb. 15c) is er een systeem bedacht waarmee de verdraaiing kon worden geregeld met een stuurstang. Het zelfde mechanisme werd gebruikt in het model uit afbeelding 21. Als de rotatie beperkt wordt tot een lage waarde dan zorgt een sterke vleugelslag voor snelle rechte vlucht gedurende een aanzienlijke afstand. Als de rotatie groter wordt dan wordt een steile klim gerealiseerd.

Er moet echter een keuze worden gemaakt tussen deze twee en tot dusver is het nog niet gelukt om een vleugel te ontwikkelen die zijn optimale gedrag automatisch regelt als een functie van de slagfrequentie. Ik heb echter het gevoel dat er een mogelijke oplossing bestaat. Er werd vaak gedacht dat de cirkelvluchten van een vogel kwamen door dat de ene vleugel sneller klapwiekte dan de andere. Dat dit niet waar was is bewezen door E. von Holst in 1943 toen hij een model testte waarvan slechts één vleugel op en neer kon bewegen.

Zolang het model werd vastgehouden klapwiekte de beweegbare vleugel over een hoek van 90° terwijl de andere vleugel stilstond. Echter zodra het model werd losgelaten maakten de vleugels een slag van 45° en vloog het model rechtuit. Hoewel er slechts één vleugel werd aangedreven bewoog de andere vleugel in dezelfde frequentie mee.

Hieruit kan worden afgeleid dat zowel tijdens de krachtvlucht als tijdens de glijvlucht elke wending het resultaat is van de vleugelverdraaiing van de handvleugels. Vaste roeren die ik uitprobeerde op sommige modellen hadden geen enkel effect.

Een steile klim of zelfs een bidvlucht die E. von Holst realiseerde met sommige van zijn modellen zijn mogelijk met mijn modellen. Ik hoop dat veel meer vliegtuigmodelbouwers zich gaan bezighouden met dit fascinerende aspect van de modelvliegtuigbouw wat de ontwikkeling van ornithopter zeer ten goede zou komen.