

# Schlagflügelkonstruktionen

Horst Rübiger

## Vorbemerkungen

Bei der Konstruktion von Schlagflügelmodellen gibt es vor allem zwei Entwicklungsschwerpunkte, die Antriebsmechanik und die Schlagflügel. Das größere Interesse gilt im Allgemeinen den Antriebsmechanismen. Es gibt auch schon eine ganze Menge davon. Sie sind zwar technisch noch lange nicht ausgereift, einige erfüllen ihre Aufgabe aber schon recht ordentlich.

Dagegen entsprechen die Schlagflügel bisher nur ansatzweise den Zielvorstellungen bzw. den Vorbildern in der Natur<sup>1</sup>. Wohl auf kaum einem anderen Konstruktionsgebiet klaffen Wunsch und Wirklichkeit noch so weit auseinander. Für die weitere Schlagflügelentwicklung ist die Kenntnis bisher schon bekannter Schlagflügelsysteme aber trotzdem hilfreich.

Es wird hier der Versuch unternommen, bekannte Schlagflügelsysteme nach ihren Konstruktionsmerkmalen zu ordnen und ihre spezifischen Eigenschaften hervor zu heben. Dabei kann aber jeweils nur auf einige Hauptmerkmale eingegangen werden. Über ihre Konstruktion im Einzelnen, wie z.B. verwendete Materialien, Abmessungen usw. ist meist auch gar nichts bekannt.

---

<sup>1</sup> Titelbild: Möwenflügel von Karl Herzog, mit nachträglich eingetragenen Flügelachsen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Schlagflügelkonstruktionen .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Membranschlagflügel .....</b>	<b>3</b>
1.1 Das Segel als Vorlage .....	3
1.2 Einfacher Membranschlagflügel .....	4
1.3 Einfacher Membranschlagflügel mit Segellatten.....	6
1.4 Längslattung der Flügelspitze.....	6
1.5 Aktive Flügelverwindung durch Holmdrehung .....	7
1.6 Verwindung durch Holmtorsion.....	9
1.7 Verwindung durch Hilfsholmschlagbewegung .....	12
1.8 Membranschlagflügel in Tandemanordnung .....	13
1.9 Triebflügel.....	14
1.10 Schuberzeugung mit oszillierendem Flügel.....	17
1.11 Rotationsflügel.....	19
1.12 Schlagflügel mit nicht-verwindbarem Armflügelabschnitt .....	21
<b>2. Profilschlagflügel.....</b>	<b>22</b>
2.1 Mit aufgefächerter Flügelspitze .....	23
2.2 Schlagflügel mit schräger Handflügelachse.....	25
2.3 Mit stufiger Verwindung .....	28
2.4 Verwindung durch Holmdrehung .....	30
2.5 Scherverwindungsprinzip .....	30
2.6 Schalenflügel .....	34
2.7 Gelenkschlagflügel .....	36
<b>3. Methoden zur Schlagflügelverwindung .....</b>	<b>36</b>

# 1. Membranschlagflügel

Schlagflügel deren Flügelfläche wie ein Segel nur aus einer einfachen Membrane besteht, beispielsweise aus Papier, Tuch oder Folie, werden hier als „Membranschlagflügel“ bezeichnet.

Membranflügel haben ein relativ geringes Gewicht und sie können wegen der bei Auf- und Abschlag wechselnden Profilwölbung viel Schub entwickeln. Außerdem sind sie robust und leicht herstellbar. Diesen Vorteilen gegenüber den Profilschlagflügeln stehen aber auch Nachteile gegenüber.

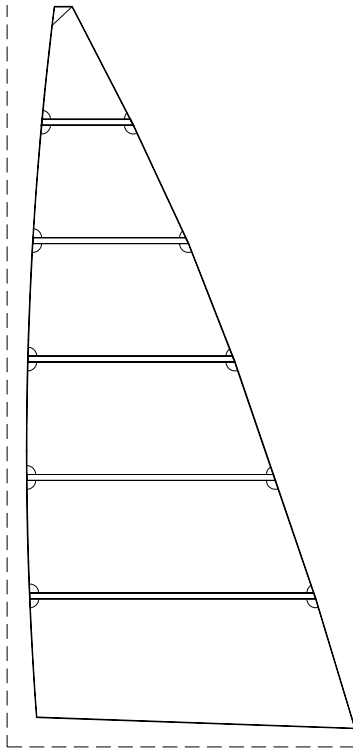
Die Gestaltung der Profilwölbung, der Flächenform und der Verwindung erfolgt empirisch und ohne jede Berechnungsmöglichkeit. Eine gezielte Vorgehensweise ist schwierig. Der Widerstand ist recht hoch und der Gleitwinkel dadurch relativ groß. Dennoch gibt es recht erfolgreiche Modelle.

Es wurden zwar schon eine ganze Menge Membranschlagflügelsysteme entwickelt, es gibt aber kaum detaillierte Informationen darüber. Sie stehen offensichtlich noch am Anfang ihrer Entwicklung.

## 1.1 Das Segel als Vorlage

Ein Segel hat - unter anderen Bedingungen - etwa die gleiche Aufgabe wie ein Schlagflügel. Es soll bei wechselnden Anströmungsrichtungen möglichst viel Schub erzeugen.

Im Gegensatz zum Membranschlagflügel lassen sich beim Herstellen, Rigggen und Trimmen des Segels die Eigenschaften recht gut vorhersagen. Zum Teil liegt das wohl auch an den unterschiedlichen Größenverhältnissen von aerodynamisch wirksamer Fläche und den zu treffenden Maßnahmen. Bisher bekannte Membranschlagflügel sind ja gegenüber Segeln geradezu winzig. Die damit zusammenhängenden Rezahlunterschiede machen es auch schwierig, Segelerfahrungen einfach Eins zu Eins zu übertragen. Nachdem aber die Entwicklung von Segeln schon einige tausend Jahre älter ist als die von Ornithoptern, kann man sich bei Bootsbauern und Segelmachern sicherlich eine Menge Anregungen holen. Die Anmerkungen zu nachstehendem Bild sind nur einige Beispiele aus den umfangreichen Erfahrungsschatz der Segelmacher.



### Segel allgemein

- Schon alleine durch leicht bauchiges Schneiden der Vorderkante und ggf. auch der Unterkante des Segeltuches erhält man eine gewölbte Form des Segels.
- Durch Zusammensetzung des Segels aus mehreren Tuchabschnitten lässt sich die Wölbung weiter beeinflussen.

### Lattensegel

- Durchgehende Latten halten das Segel straff. Sie wirken wie ein Korsett. Sie geben dem ganzen Segel mehr Stabilität und ein optimales Profil.
- Die Latten sind elastisch und zweckmäßiger Weise nach vorne verjüngt, um die Profilform wirkungsvoll zu unterstützen.
- Im Vergleich zu Segeln mit kurzen Latten erhöht sich bei durchgehender Lattung die Segelfläche.
- Ein solches Segel flattert nicht und steht insgesamt ruhiger.

Bild 1.1 Das Lattensegel

## 1.2 Einfacher Membranschlagflügel

Ein besonders einfacher Schlagflügel lässt sich aus einem schlagenden Holm und einer etwa dreieckförmigen Membranfläche z.B. aus Tuch oder Folie herstellen. Die Membrane wird an ihrer Vorderkante durchgehend mit dem Flügelholm verbunden. Die zweite, etwa senkrecht dazu liegende Dreieckseite bildet die Flügelwurzel und ist entweder auf der vollen Länge oder beispielsweise nur an ihrem hinteren Ende fixiert. Die dritte Dreieckseite bildet die Flügelhinterkante.

Bei diesem Schlagflügelkonzept lässt sich die Größe der Flügelwölbung bzw. -verwindung insbesondere durch den Membranzuschnitt und die Membranvorspannung beeinflussen. Auch elastische Membranen und/oder eine elastische Halterung der Membrankante kommen zum Einsatz. Beispielsweise kann ein biegeweicher Holm oder eine elastische Halterung an der Flügelwurzel eingesetzt werden. Mit den damit bei Auf- und Abschlag erzielbaren Profilveränderungen lassen sich ganz passable Flugleistungen erzielen.

Die wohl bekannteste Anwendung und gleichzeitig der erste industriell gefertigte Ornithopter ist der nachstehend abgebildete künstliche Vogel „Tim“.



Bild 1.2 „Tim“, ein mit Gummimotor betriebener Spielzeug-Ornithopter

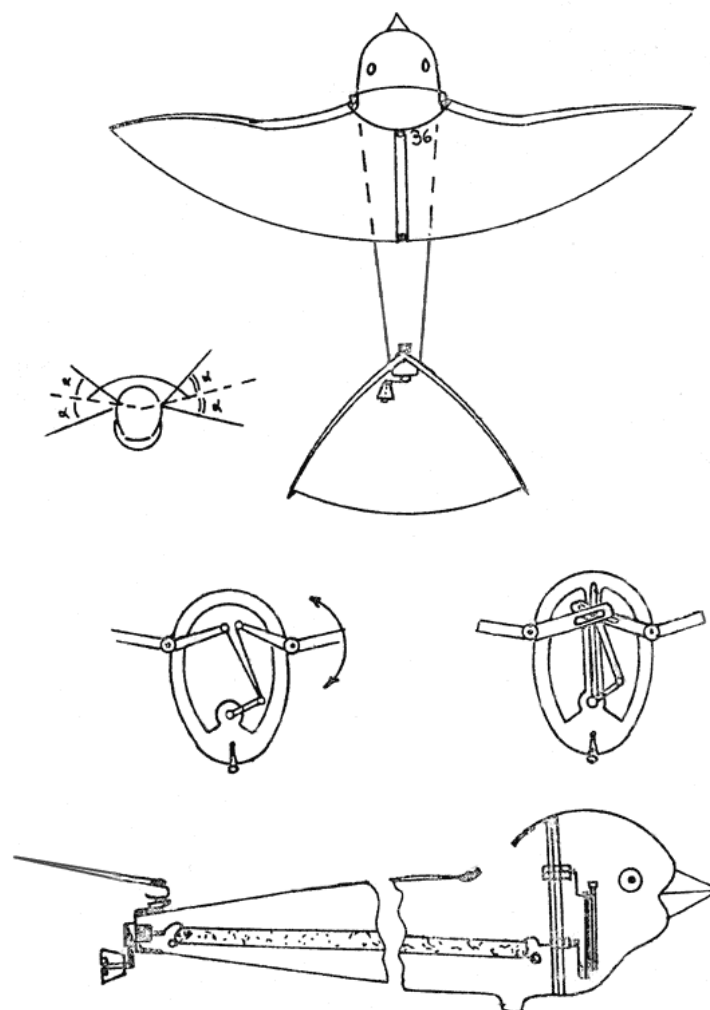


Bild 1.3 Zeichnungen vom Spielflugzeug „Tim“, heute meist „Tim Bird“ genannt, zum Patent angemeldet von Albertini Prosper, Marseille (Frankreich) 1969

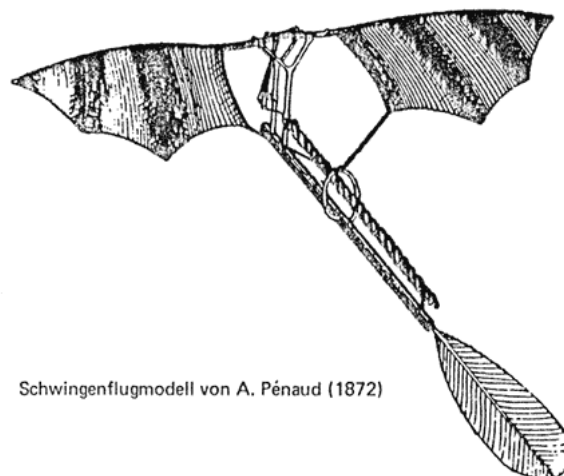
Dieses Modell ist auch heute noch in verschiedenen Ausführungen im Handel erhältlich.

### 1.3 Einfacher Membranschlagflügel mit Segellatten

Eine Verbesserung des einfachen Membranflügels stellt die „Lattung“ nach dem Vorbild eines Lattensegels dar. Schon A. Pénaud nutzte sie für eines der ersten flugfähigen Schwingenflugmodelle (nächste Bild).

Bei Schlagflügeln können die Latten lose, elastisch oder auch fest mit dem Flügelholm verbunden sein. Innerhalb der Membranfläche sind auch unterschiedliche Lattenrichtungen möglich. Die Schlagflügelbespannung muss ja schließlich nicht gerefft werden. Außerdem können im Armflügelbereich, mit seinen nur wenig sich ändernden Anströmbedingungen, vorgeformte Latten bzw. starre Profile verwendet werden.

Durch die Latten, die bei so kleinen Modellen natürlich nur aus feinsten Leisten bestehen, kann auch die Flügelhinterkante einer bauchig geschnittene Membrane als tragende Fläche genutzt werden. Diese Vergrößerung der Flügeltiefe - insbesondere im äußeren Flügelbereich wo der meiste Schub erzeugt wird - wirkt sich sehr positiv auf die Flugleistungen aus.



Schwingenflugmodell von A. Pénaud (1872)

Bild 1.4 Der Ornithopter von dem Franzosen Alphonse Pénaud aus dem Jahre 1872

### 1.4 Längslattung der Flügelspitze

Bei Membranflügeln kann man eine weitere Variante der Lattung für einen Verwindungsanstieg an der Flügelspitze nutzen. Es ist dies der Übergang von einer auf den Flügelholm bezogenen Querlattung auf Längslattung. Dieser Übergang ermöglicht trotz wechselnder Profilwölbung einen relativ gezielten Anstieg der Verwindung zur Flügelspitze hin.

Diese Art der Lattung ähnelt der Befestigung von Schwungfedern in Vogelflügeln. Deren Federkiele werden an ihren Wurzeln durch einen hautartigen Saum ähnlich geführt, wie hier die ganzen Latten durch die Membrane. Die einzelnen Segellatten können an ihrer Wurzel, je nach Bedarf, sowohl elastisch als auch leicht beweglich gelagert werden.

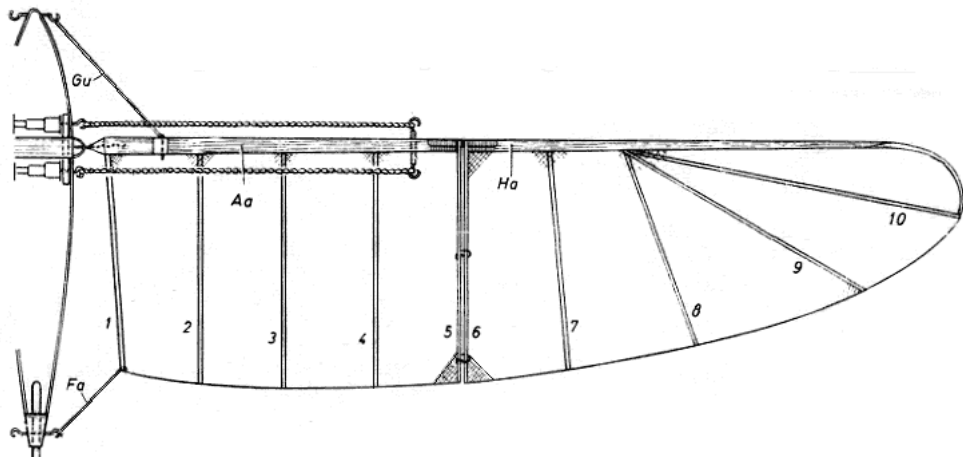


Bild 1.5 Membranflügel mit einem Übergang von Quer- auf Längslattung an der Flügelspitze (Modell „Bussard“ von E. v. Holst, 1943).

In vorstehender Konstruktion ist auch die Befestigung der Flügelwurzelrippe interessant. Vorne ist sie verdrehungselastisch mit dem Flügelholm verbunden und an ihrem hinteren Ende durch einen längeren nach hinten gespannten Faden gehalten. Zusammen mit der Holmdrehung bewirkt das eine kleine Flügelwurzelverdrehung synchron zur Flügelverwindung.

Der Übergang auf eine Längslattung lässt sich, zum Beispiel an der Flügelwurzel beginnend, auch auf den ganzen Flügel anwenden. Insbesondere bei sehr kleinen Ornithoptermodellen wird das gerne praktiziert.

## 1.5 Aktive Flügelverwindung durch Holmdrehung

Wird bei einem Schlagflügel die sich rhythmisch ändernde Verwindung durch einen Antrieb mechanisch bewirkt, so spricht man von „aktiver Flügelverwindung“. In nachfolgendem Bild ist das Prinzip eines derartigen Schlagflügels zu erkennen.

Die äußere Rippe des Armflügels ist fest mit dem Flügelholm verbunden. Die übrigen Armflügelrippen sind elastisch oder leicht drehbar am Holm befestigt. Der Antrieb erzeugt am Holm eine zyklisch wechselnde Schlag- und eine dazu phasenverschobene Drehbewegung. Dadurch entsteht im Armflügelbereich während der Schlagbewegung eine entsprechende Verwindung. Der Einstellwinkel der Handflügelwurzel wird durch einen nach Flügelmitte-hinten gespannten Faden gehalten. Er gibt der Drehbewegung des Holms etwas nach. Im übrigen Handbereich ist hier die Verwindung weitgehend passiv, d. h. sie wechselt durch aerodynamische Kräfte leichtgänglich zwischen zwei Endlagen. Zur Flügelspitze hin wird sie größer.

## Das Schwingenflugmodell II von Erich v. Holst

Rumpflänge 1200 mm, Spannweite 2450 mm  
 Flächeninhalt 52 dm<sup>2</sup>  
 Fluggewicht 185 gr  
 Flächenbelastung ca 3,5 g/dm<sup>2</sup>

Rumpfgewicht mit Getriebe 131 gr  
 Gewicht der beiden Flügel 44 gr  
 Gewicht des Schwanzes 10 gr  
 Gummimotor-Antrieb 9 gr

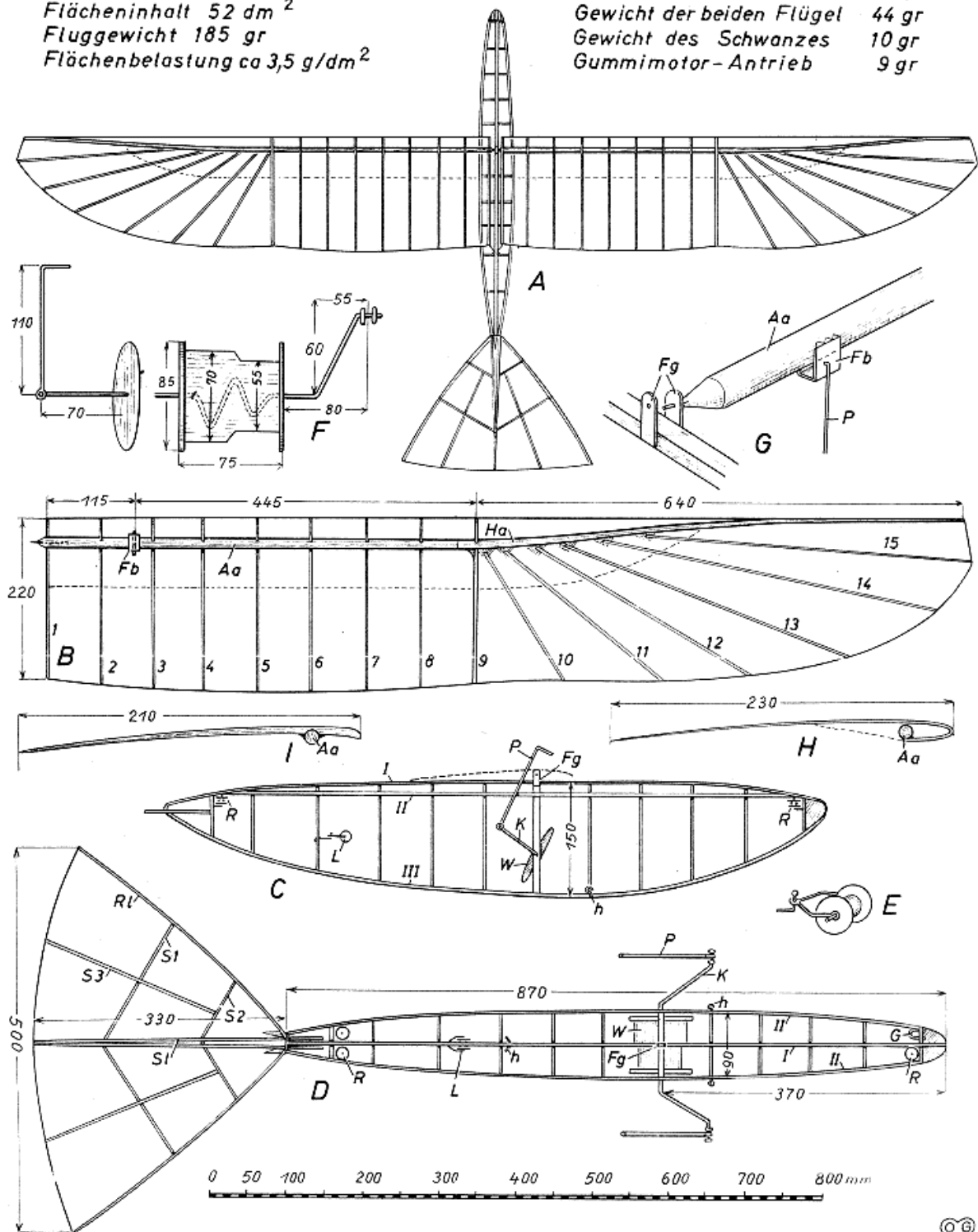


Bild 1.6 Übersichtszeichnung<sup>2</sup> vom künstlichen Vogel „Schwan“ von E. v. Holst, 1943

<sup>2</sup> Herzog Karl: Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik, Teil IV. Mechanikus, Heft April 1963, Verlag J. F. Schreiber, Esslingen am Neckar 1963

Eine Antriebsmechanik für größere Ornithopter, mit aktiver und zusätzlich fernsteuerbarer Holmverdrehung zeigen die beiden nachstehenden Bilder.

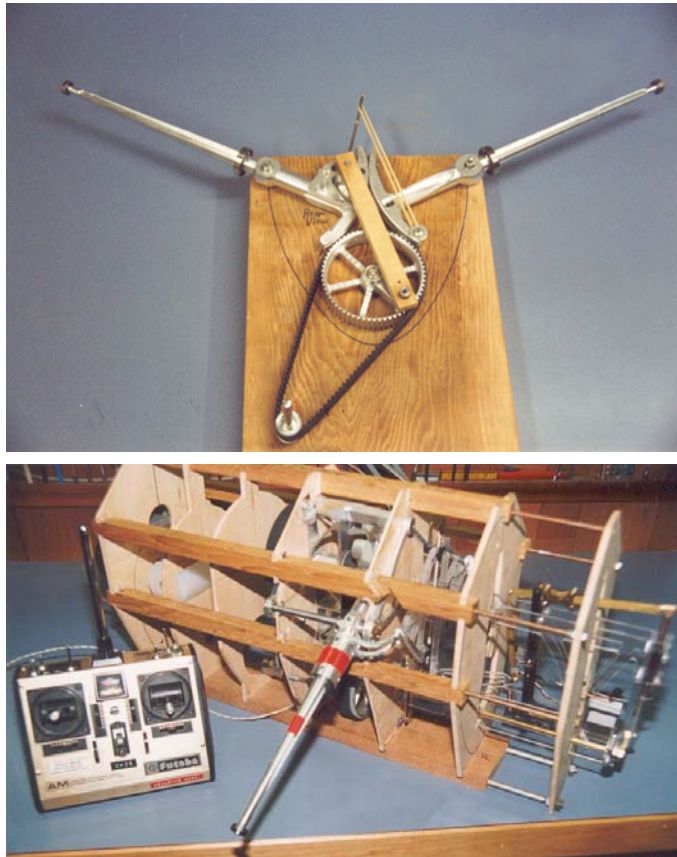


Bild 1.7 Ornithopter-Antriebsmechanik als „Iron Bird“ (nicht flugfähiger Versuchsaufbau), von Francis Reynolds, USA 1995.

Die Flügelverwindung wird vom Antrieb aktiv gesteuert und ist zusätzlich fernsteuerbar.

oben: Antriebsmechanik der Schlagarme. Beide Flügelseiten werden über Kreuzbänder an den Kreissegmenten der Flügelinnenhebel synchronisiert. Auf den Schlagarmen sind die Kugellager für eine leichtgängige Drehung der Flügelholme gut zu sehen.

unten: Antrieb und Steuerung der in obigem Bild gezeigten Schlagarme. Der Steuerhebel für die Holmverdrehung ist an der Flügelwurzel deutlich erkennbar. Die umfangreiche Mechanik dient insbesondere der Fernsteuerbarkeit der Holmdrehung zur 3-Achsensteuerung des Modells.

Für eine aktive und gleichzeitig fernsteuerbare Verwindung ist also ein gewisser Aufwand erforderlich. Sie bietet aber in der Flugpraxis große Vorteile, vor allem die Möglichkeit zum Experimentieren.

## 1.6 Verwindung durch Holmtorsion

Bei Membranschlagflügeln verhindern schon die unbekanntenen Profildaten die theoretische Vorhersage der erforderlichen Flügelverwindung. Beim Bau von Schlagflügeln, deren Verwindung durch die Holm-Torsionselastizität bewirkt werden soll, kommen weitere Schwierig-

keiten hinzu. Die Holmfestigkeit ist meist unbekannt und die Verwindung ist auch noch vom Belastungsverlauf längs der Spannweite abhängig. Dennoch war der Tscheche Cenek Chalupsky mit diesem Prinzip recht erfolgreich. Seine Modelle hatten beachtliche Startgewichte.

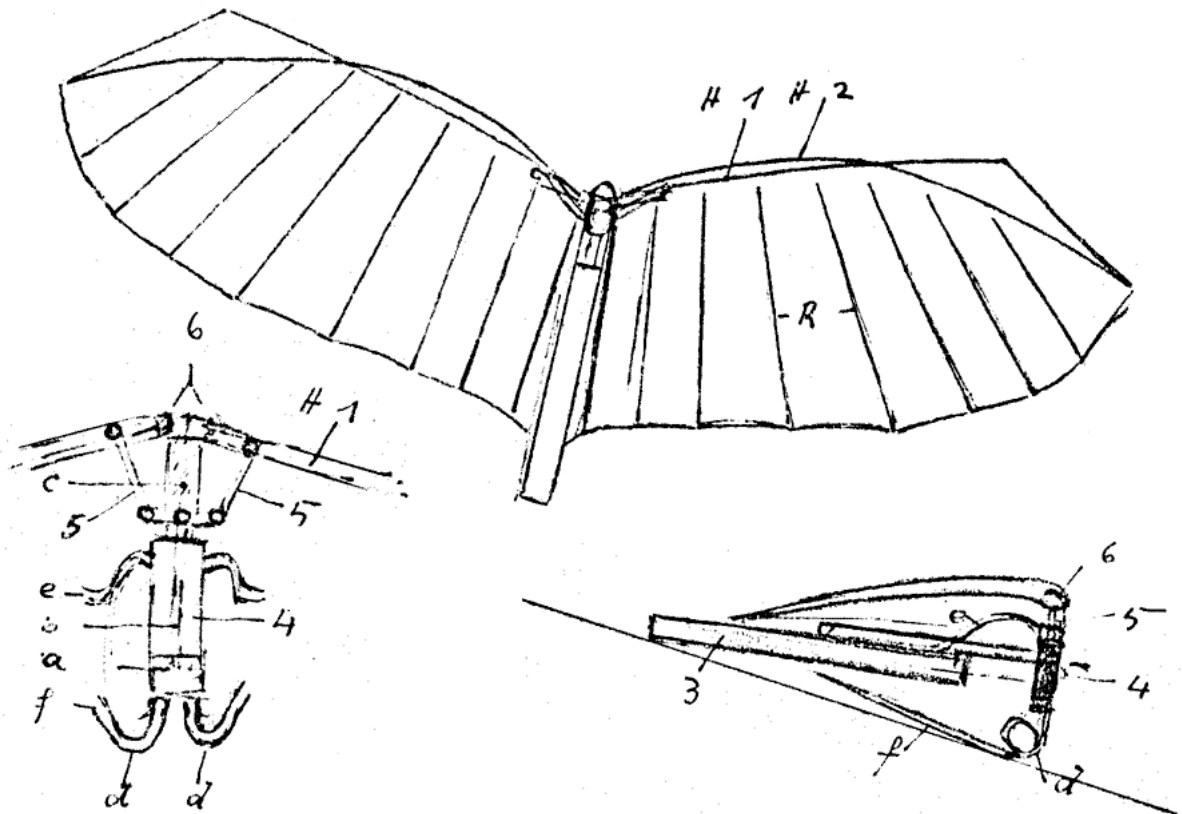


Bild 1.8 Skizze des Schlagflügelmodells von Cenek Chalupsky

- H1 Längsträger-Holz aus Kiefernholz
- H2 elastisches Rohr
- R Rippen aus sehr biegsamen Material, innen Bambusspäne, außen Tonkinstäbe

Flügeltiefe	50 cm
Flügelgewicht	1 kg (beide Flügelhälften)
Schlagwinkel	70 Grad
Bespannung	Leinen

Diese Skizze von Chalupsky zeigt, dass er schon damals zwei Flügelholme verwendete, einen für die Übertragung des Schlagmoments (1) und einen für das Drehmoment des Flügels (2).

Der Hilfsholz (2) wird an den Kreuzungspunkten der beiden Holme, also an der Flügelwurzel und etwa in der Mitte des Flügels („Handgelenk“) gehalten. Während des Flügelabschlags verwindet er sich nicht nur, sondern seine Spitze biegt sich auch nach oben. Infolge der Hilfsholmlagerung am äußeren Einspannpunkt („Handgelenk“), geht die von ihm gebildete Flügelvorderkante im Armflügelbereich verstärkt nach unten. Der Hilfsholz biegt sich dort nach unten durch. Dies ist eine Bewegung zusätzlich zur normalen Flügelverwindung<sup>3</sup>. Auf diese

<sup>3</sup> Man kann sich das leichter vorstellen, wenn der Hilfsholz im Handflügelbereich nicht so sehr nach hinten gebogen, sondern mehr gestreckt ist.

Weise vergrößert der Hilfsholm während des Abschlags die Profilwölbung im Armflügelbereich. Die Profilform an der Flügelwurzel ist davon nicht betroffen.

Die Veränderung der Profilwölbung ist wahrscheinlich nicht sehr groß, trotzdem ist es eine wirklich raffinierte Konstruktion.

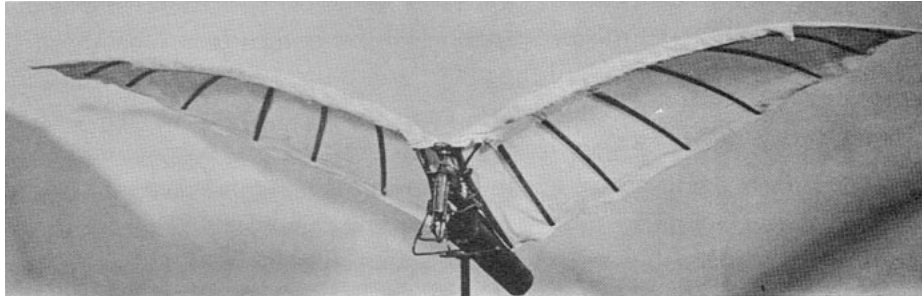


Bild 1.9 Eines der Schlagflügelmodelle von Cenek Chalupsky, 1934, mit Kohlesäureantrieb und verbesserter Flügelkonstruktion.

Startgewicht	3,1 kg
Spannweite	2 m
Steighöhe	15 bis 20 Meter



Bild 1.10 Cenek Chalupsky mit einem seiner Modelle  
Beide Bilder aus dem Buch „Bewegte Schwingen“<sup>4</sup> von Adolf Piskorsch

Das Modell flog ohne Leitwerk stabil (siehe Video [http://ovirc.free.fr/Clips\\_video.php](http://ovirc.free.fr/Clips_video.php)).

Eine Leinenbespannung mit starker Profilwölbung verhält sich ähnlich, wie eine lange Flügelschale mit gewölbtem Querschnitt. Sie lässt sich trotz vernachlässigbarer Elastizität annähernd faltenfrei verwinden.

Neben dieser Schlagflügelkonstruktion mit einem Haupt- und einem Hilfsholm, ist hier kein erfolgreiches Membranschlagflügelmodell bekannt, dessen Verwindung längs der ganzen Spannweite durch die Torsionselastizität nur eines Holms bestimmt wird.

---

<sup>4</sup> Adolf Piskorsch: Bewegte Schwingen. Selbstverlag, Sontheim an der Brenz 1975

## 1.7 Verwindung durch Hilfsholmschlagbewegung

Bei einem Schlagflügel mit einem Haupt- und einem Hilfsholm verursacht die Flügelverwindung eine zur Flügelspitze ansteigende Verdrehung der Flügelrippen und damit eine kleine Schlagbewegung des Hilfsholms gegenüber dem Hauptholm.

Man kann nun Ursache und Wirkung auch vertauschen. Dazu lässt man den Hilfsholm vom Antrieb gesteuert, aktiv eine kleine Schlagbewegung gegenüber dem Hauptholm ausführen. Dadurch werden die Flügelrippen um den Hauptholm gedreht und erzeugen so eine Flügelverwindung. Beim natürlichen Libellenflügel ist anzunehmen, dass die verschiedenen Längsrippen ihrer Flügel in gleicher Weise an der Flügelwurzel beeinflusst werden.

Ein alter Vorschlag für eine derart aktiv gesteuerte Schlagflügelverwindung stammt von Emile Räuber. Bei ihm werden Haupt- und Hilfsholm getrennt über zwei phasenverschobene Kurbeln angetrieben.

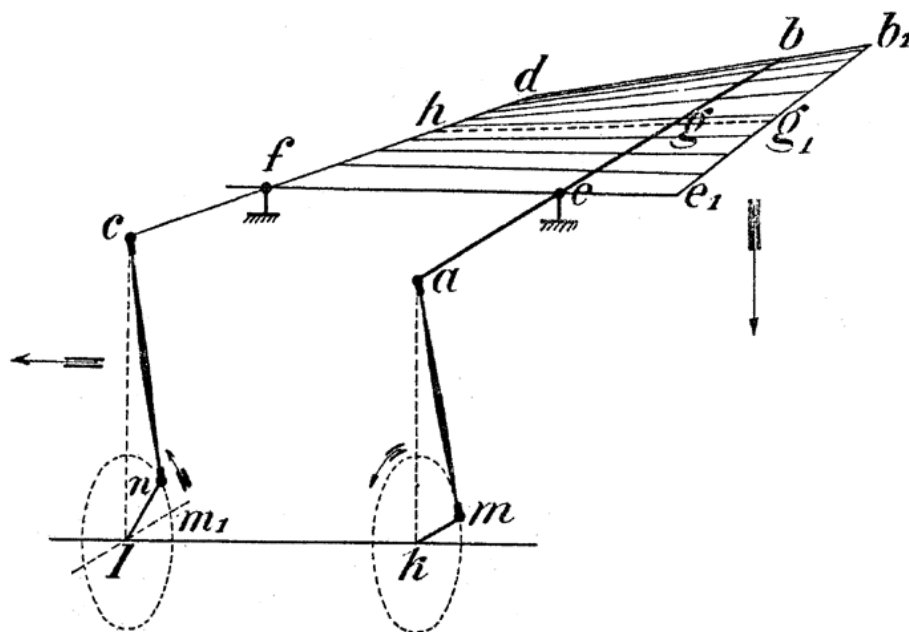


Bild 1.11 Aktive Schlagflügelverwindung durch phasenverschobene Haupt- und Hilfsholm-Schlagbewegung. Zum Patent angemeldet von Emile Räuber aus Saint André lez Lille, Frankreich 1909

Dieses Verwindungsprinzip wurde auch beim **EV2** verwendet<sup>5</sup>. Es eignet sich allerdings wahrscheinlich nur für Ornithopter mit kleiner Spannweite (etwa bis 1,0 oder 1,5 Meter). Darüber hinaus wirkt sich ein kleines Spiel in der Mechanik, die Elastizität der Flügelholme und die Kräfte der Bespannung zu störend auf die Reproduzierbarkeit des Einstellwinkels im äußeren Flügelabschnitt aus. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Ornithopter auch den Gleitflug beherrschen soll. Für die letztgenannte Anforderung ist auch noch ein spezieller Kardankurbelantrieb erforderlich<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Horst Rübiger: Die Entwicklung der EV-Schlagflügelmodelle.

Siehe <<http://www.ornithopter.de/daten/bericht.pdf>> 2002

<sup>6</sup> Siehe <<http://www.ornithopter.de/kurbel.htm>>

## 1.8 Membranschlagflügel in Tandemanordnung

Durch ein gegenläufig schlagendes Flügelpaar soll insbesondere die schwellende Auftriebs-erzeugung bzw. die daraus resultierende, senkrechte Rumpfpendelbewegung vermieden werden.

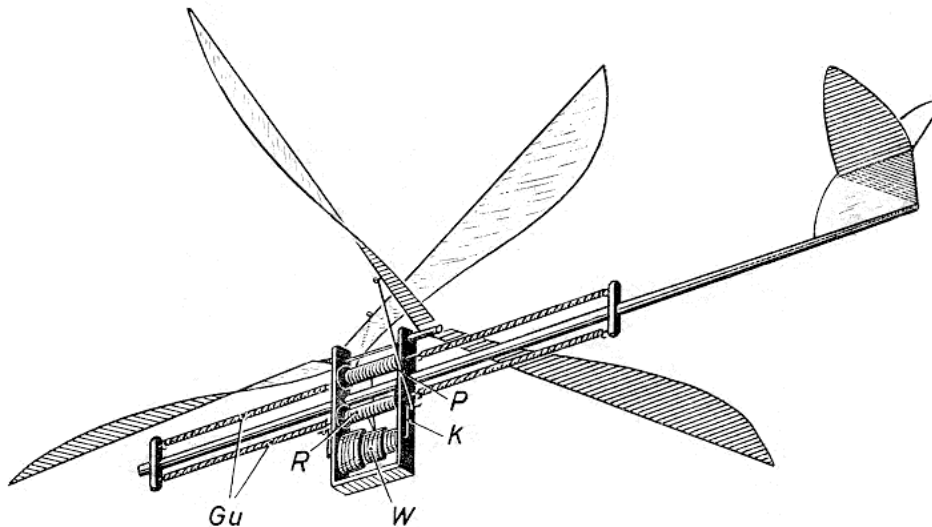


Bild 1.12 Ornithopter mit einem einer Libelle nachempfundenen Schlagflügelpaar, entwickelt von Erich von Holst<sup>7</sup> (ca. 1943).

Zur Vereinfachung der Mechanik sind bei diesem Modell die gegenüberliegenden Flügelhälften jeweils zu einer starren Einheit verbunden. Dadurch kommt der Kraftangriffspunkt immer zwischen den beiden Flügelpaaren zu liegen. Auch die Pendelbewegung um die Querachse wird dadurch vermieden.

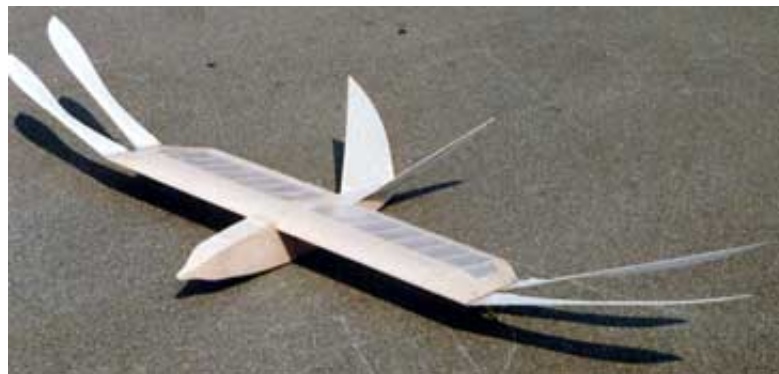


Bild 1.13 Schlagflügel in Tandemanordnung bei einem Schlagflügelmodell von Horst Händler, 1988.

Das hat aber den Nachteil, dass sich der hintere Schlagflügel in der verwirbelten Nachlaufströmung des vorderen befindet. Nur bei sehr kleinen Flügeln bzw. bei sehr kleinen Rezahlen ist dies eventuell von Vorteil.

---

<sup>7</sup> Herzog Karl: Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik, Teil IV. Mechanikus, Heft März 1963, Verlag J. F. Schreiber, Esslingen am Neckar 1963

## 1.9 Triebflügel

Für Erich von Holst lag es nahe, das Flugprinzip der Libelle als Ausgangspunkt für technische Anwendungen des Schlagflügels zu wählen. Die Realisierung großer, bemannter Ausführungen soll dadurch erleichtert werden.

Lässt man bei der künstlichen Libelle in Abbildung 1.12 das vordere und hintere Flügelpaar konstant und gegenläufig um die Schlagachse rotieren, so erhält man ein Modell mit so genannten „Triebflügeln“ (E. v. Holst 1940). Durch Anwendung von drei Flügelblättern wird dabei der Auftrieb vergrößert. Start und Landung sollen auf dem Leitwerk stehend erfolgen. So entstand der Focke-Wulf Triebflügeljäger.

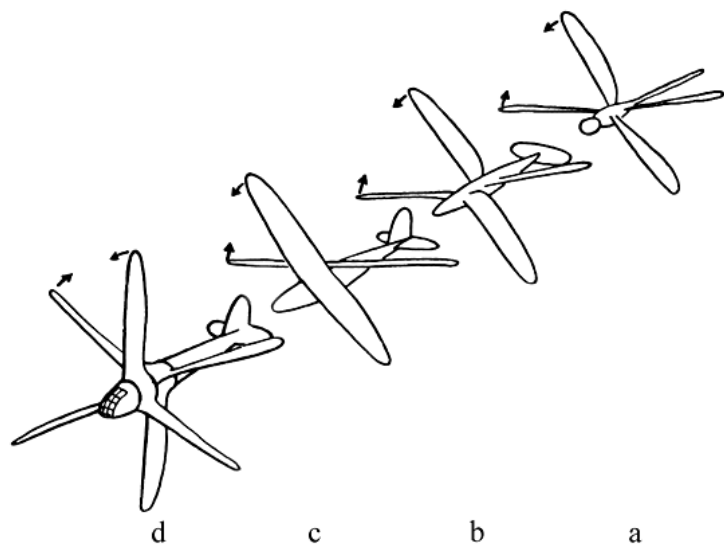
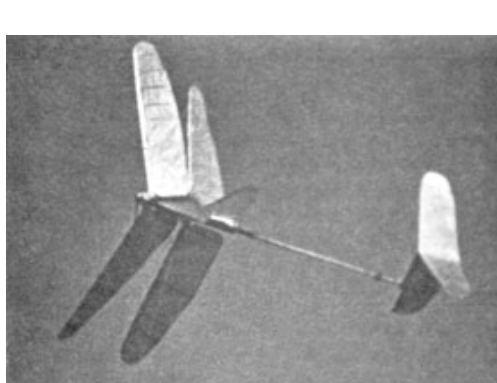


Bild 1.14 Entwicklungsweg des Triebflügels (d), angefangen von der Libelle (a), über drei Stufen fortschreitender Technisierung.

Aber schon bei der künstlichen Libelle in Bild 1.12 gibt es einen prinzipiellen Unterschied gegenüber dem biologischen Vorbild. Die beiden Hälften eines Flügels bewegen sich bei der künstlichen Libelle – bezogen auf eine gemeinsames, rechtwinkeliges Koordinatensystem - in entgegengesetzte Richtungen. Die eine Flügelhälfte bewegt sich beispielsweise nach oben, die andere nach unten. Die Zirkulation der Luftströmung um die beiden mechanisch verbundene Flügelhälften ist daher prinzipiell entgegengesetzt gerichtet. Bei der biologischen Libelle ist dagegen die Zirkulation beider Flügelhälften immer gleich gerichtet.

Bei der künstlichen Libelle erfolgt also - bei Anströmung genau von vorne - ein Nulldurchgang der Zirkulationsverteilung an der Flügelwurzel. Im Handbuch „Wie Ornithopter fliegen“ wird ein entsprechender Vergleich mit einem Propellerblatt gezeigt (nächstes Bild).

Bei der biologischen Libelle endet zwar die zarte Membrane jeder Flügelhälfte an der Flügelwurzel. Ohne weiteres Umfeld wäre also die Zirkulation an dieser Stelle ebenfalls gleich Null. Der Rumpf-Flügelübergang ist aber relativ dicht und die inneren Flügelenden liegen nahe beieinander. Infolge der gemeinsamen Zirkulationsrichtung beider Flügelhälften kann so vermutlich die Zirkulationsverteilung in Rumpfnähe sogar völliger sein als bei der künstlichen Libelle. Die Auftriebserzeugung wäre dann etwas besser.

Die Zirkulationsverteilung der künstlichen Libelle wird also in Rumpfnähe zumindest klein sein (in Schlagmitte). Sie ist aber dort solange nicht gleich Null - und es entsteht demzufolge Auftrieb - solange der gemeinsame Mittelwert aus den Zirkulationsverteilungen der beider Flügelhälften nicht gleich Null ist.

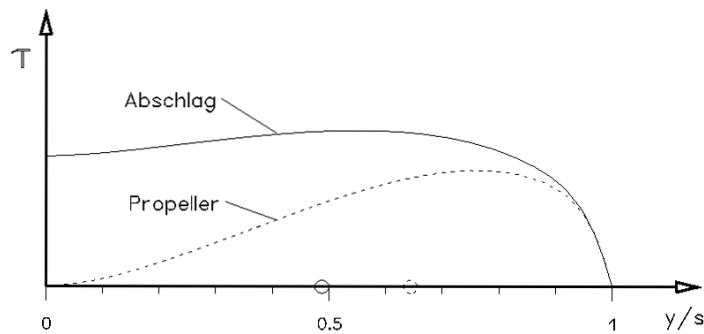


Bild 1.15 Vergleich der Zirkulationsverteilungen von Propeller und Schlagflügel (Abb. 1.8 aus dem Handbuch „Wie Ornithopter fliegen“)

Eine ungleiche Zirkulationsverteilung an beiden Flügelhälften und damit die Erzeugung von Auftrieb erreicht man durch Schräganblasung. Zweckmäßig ist in diesem Falle eine Anströmung aus der Flugrichtung, leicht von unten. Dazu muss die Drehachse des Flügels nur einen positiven Anstellwinkel gegenüber der Flugrichtung aufweisen. Insbesondere die Anstellwinkel beider Flügelseiten unterscheiden sich dann. Auf der abschlagenden Seite wird er größer und bei der aufschlagenden Seite kleiner.

Der Effekt einer Auftriebserzeugung zusätzlich zum Schub ist jedoch nur bei sehr großen Fortschrittsgraden ( $\lambda=v/u$ ) wirksam. An einem schnell laufenden Propeller ist bei Schräganblasung kaum mit einer nennenswerten Kraft senkrecht zur Schubrichtung zu rechnen.

Anmerkungen zu nachfolgendem Bild:

- Die Darstellung zeigt die Querkraftverteilungen an einem zweiblättrigen Triebflügel in seiner waagrechten Flügelstellung, mit und ohne Anstellwinkel der Triebflügelachse (Die Querkraftverteilung entspricht der Zirkulationsverteilung).
- Der Verlauf der Querkraft- bzw. Zirkulationsverteilungen ist geschätzt.
- Ohne Anstellwinkel der Achse wirkt der Triebflügel auch beim Durchgang durch seine waagrechte Stellung nur wie ein Propeller. Die nach oben und unten gerichteten Auftriebskräfte beider Flügelseiten heben sich gegenseitig auf. Es wird nur Schub erzeugt.
- In senkrechter Flügelstellung ist der Anstellwinkel der Triebflügelachse ohne nennenswerte Auswirkungen. Er sieht dort immer etwa so aus wie „ohne Anstellwinkel“. Zwischen den verschiedenen Zirkulationsverteilungen in senkrechter und waagrechter Flügelstellung erfolgt ein stetiger Übergang.

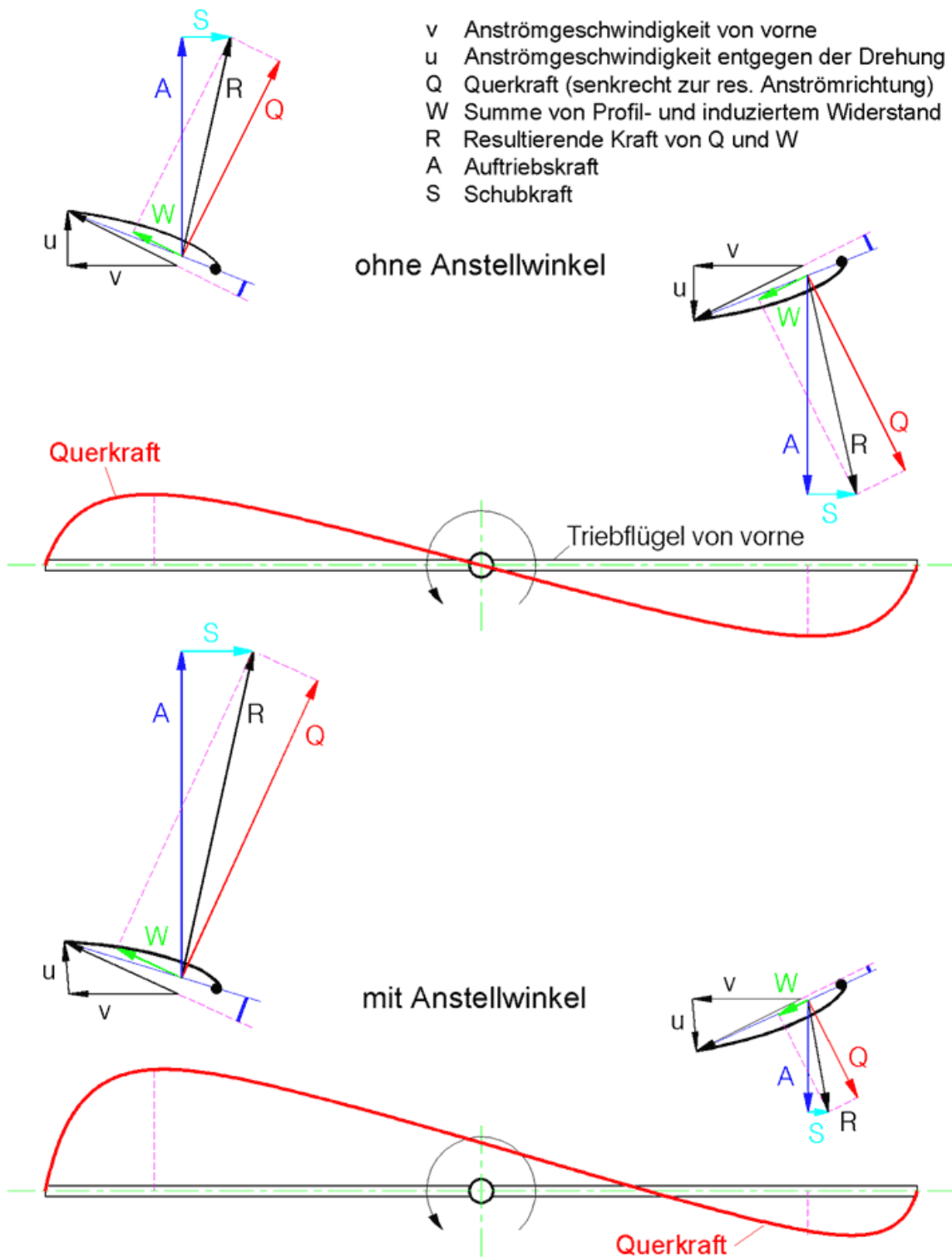


Bild 1.16 Prinzipielle Verteilung der Querkraft<sup>8</sup> eines zweiblättrigen Triebflügels, mit durchgehender Fläche längs der ganzen Spannweite. Es ist je ein Beispiel für den Querkraftverlauf mit und ohne positivem Anstellwinkel der Achse dargestellt. Man sieht außerdem die Anordnung der Kräfte an einem Ort jeder Flügelseite.

<sup>8</sup> „Querkraft“ ist die Luftkraft quer zur Anströmrichtung. Sie wird sonst üblicher Weise als „Auftrieb“ bezeichnet.

- Zusammen mit dem Anstellwinkel der Triebflügelachse ändert sich insbesondere die Einstellung der Triebflügelfläche gegenüber der anströmenden Luft. Bei positivem Anstellwinkel der Achse wird der Anstellwinkel der Triebflügelfläche längs der ganzen Spannweite größer. Es überwiegt dann der positive Anteil der Querkraft und damit der positive Auftrieb. Die zulässigen Grenzwerte des Profil-Auftriebsbeiwertes sind bei der Wahl des Anstellwinkels zu beachten.
- Bei positivem Anstellwinkel der Triebflügelachse gibt es beim „Aufschlag“ eines Triebflügelblattes in dessen Achsnähe einen Flügelbereich mit positiver Querkraft. Dort wird, genau wie bei einem schlagenden Flügel, Arbeitswiderstand anstelle von Schub erzeugt.
- Der prinzipielle Verlauf der Querkraftverteilung einer Flügelhälfte bzw. eines Flügelblattes beim Durchlaufen seiner waagrecht Stellung ist weitgehend unabhängig von der Blattzahl.

Der Zirkulationsverläufe längs des ganzen Flügels von biologischer und künstlicher Libelle sind sehr unterschiedlich. Betrachtet man aber nur eine Flügelseite bei gleicher vertikaler Bewegungsrichtung, so ähneln sich die Zirkulationsverteilungen in starkem Maße. Für einen genauen Vergleich wären allerdings Berechnungen erforderlich. Ohne detaillierte Kenntnis der Triebflügelzirkulationsverteilung sind diese aber leider nicht möglich.

Den induzierten Widerstand kann man gegenüber der Bauform von Bild 1.14 vielleicht noch etwas verringern. Dazu müssen die Flügelspitzen beim Abschlag nach oben gebogen sein. Die Randwirbel der Flügelspitzen werden dann nach außen beschleunigt. Dadurch vergrößert sich die scheinbare Spannweite. Dies führt zu einer Verringerung des induzierten Widerstands<sup>9</sup>.

Die theoretische Energienutzung ist bei einem Triebflügel vielleicht nicht ganz so effektiv wie bei einem Schlagflügel. Die Umsetzung des Schlagflügelprinzips (Schub und Auftriebserzeugung mit dem gleichen Bauteil) in die Technik ist aber wahrscheinlich leichter. Ein Triebflügelmodell ist jedenfalls eine hochinteressante Sache. Das von Erich von Holst flog in faszinierender Weise<sup>10</sup>.

## 1.10 Schuberzeugung mit oszillierendem Flügel

Vortrieb entsteht auch durch Auf- und Abbewegung eines starren Flügels im Flug. Dazu muss aber der Auftrieb bei der Aufbewegung des Flügels kleiner sein als bei der Abbewegung. Auf diese Weise erfolgt zwar keine Verlagerung der Zirkulation längs der Spannweite, aber eine Änderung ihrer Größe. Je größer und schneller diese Änderung ist, umso stärker ist die Vortriebserzeugung.

Damit der zulässige Anstellwinkel nicht überschritten wird, ist im Regelfalle eine ständige Anpassung des Einstellwinkels erforderlich. Das gilt vor allem dann, wenn die oszillierende Bewegung des Flügels gegenüber der Fluggeschwindigkeit sehr schnell und sehr groß ist.

Die Einstellwinkeländerung des Flügels sollte gerade so groß sein, dass ein Abreißen der Strömung verhindert wird. Eine zu weiche Einstellung wirkt der geforderten Zirkulations-

---

<sup>9</sup> siehe Animation einer Möwe im Flug <http://www.ornithopter.de/moewe.htm>

<sup>10</sup> siehe Video in <http://www.ornithopter.org/video.shtml> (2007)

änderung entgegen. Ist sehr wenig Vortrieb erforderlich und das Profil für einen große ca-Bereich geeignet, kann man eventuell auf die Einstellwinkelanpassung verzichten. Eine Flügelpfeilung verringert den Auftriebsanstieg zusätzlich.

Bei sehr hoher Schlagfrequenz kommt ein weiterer Effekt in Betracht. Die Strömung am Flügel hat dann vielleicht gar keine Zeit um abzureißen, selbst wenn der Anstellwinkel kurzzeitig über den zulässigen Wert hinausgeht. Man arbeitet dann mit dem so genannten Böeneffekt, bei dem der Maximalauftrieb deutlich höher sein kann als im stationären Zustand.

Hier eine verblüffend einfache Erzeugung einer oszillierenden Flügelbewegung mittels einer exzentrisch gelagerten, rotierenden Masse. Sie besteht aus der Antriebsfeder und dem Getriebe. Der Flügel ist hier an der Vorderkante gelagert und verwindet sich aeroelastisch (Eigentlich wäre eine aeroelastische Verdrehung um die Vorderkante ausreichend).

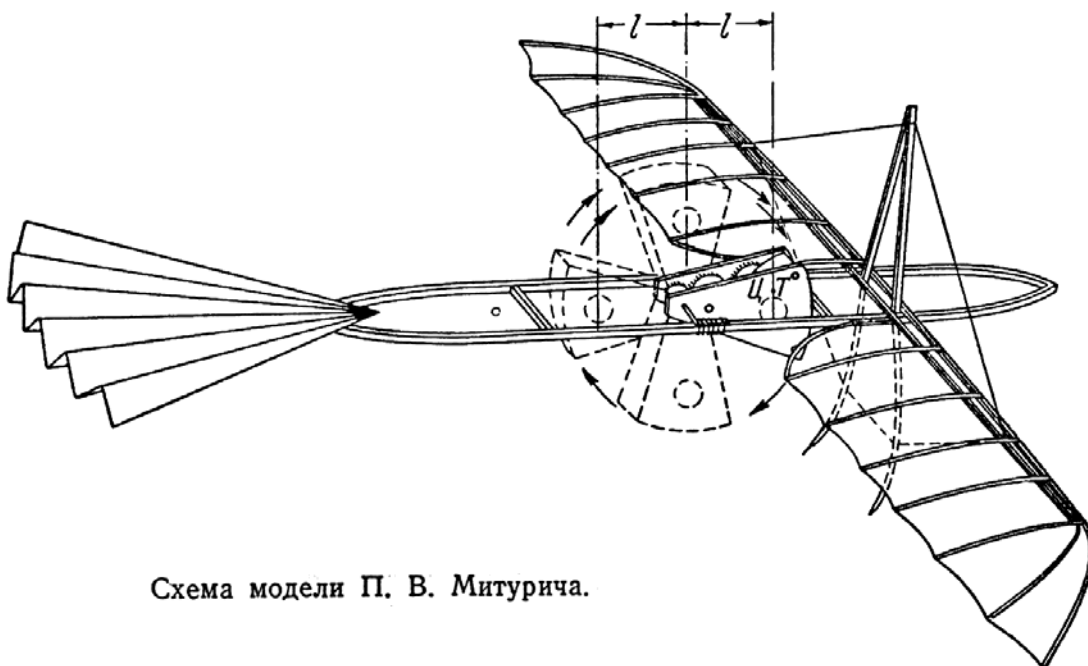


Схема модели П. В. Митурича.

Bild 1. 17 Schlagflügelmodell von B. W. Mituritscha (vermutlich Russland, 1953)

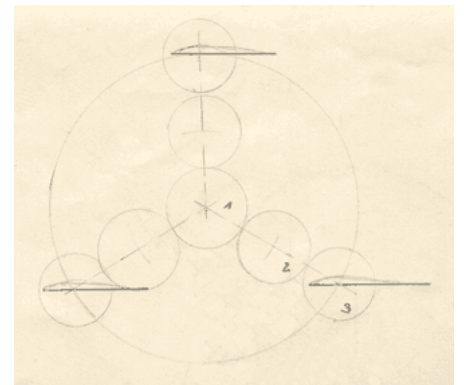
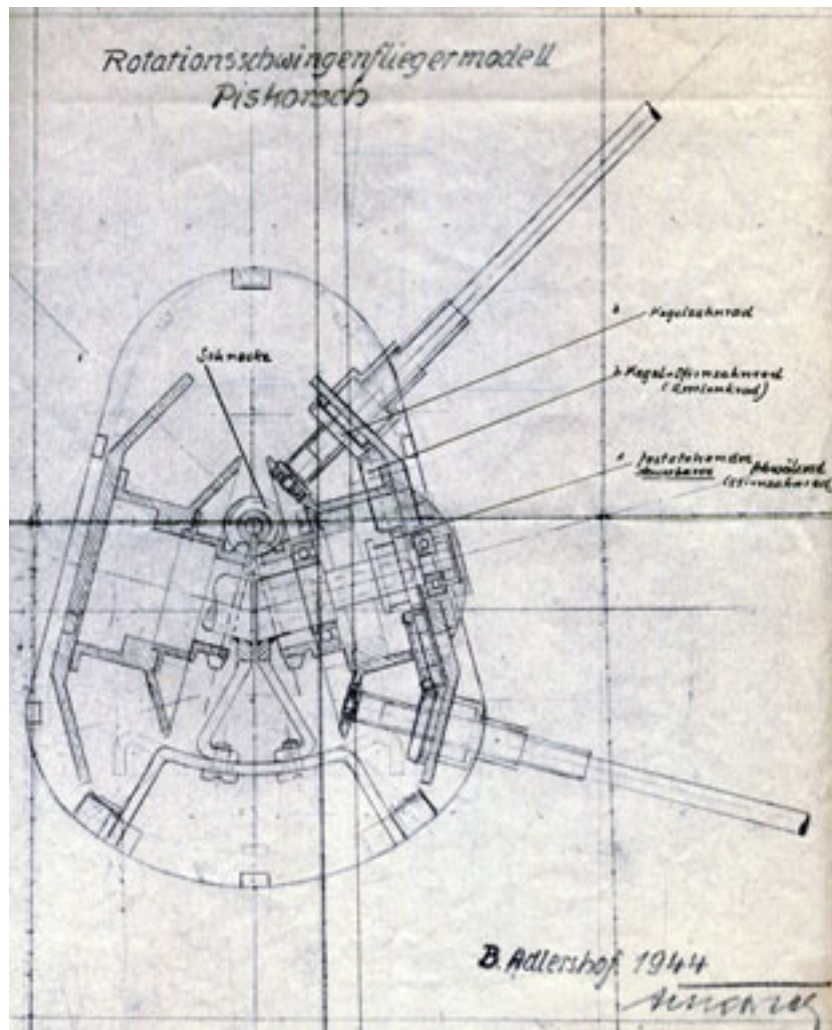
Leider erfolgt in der abgebildeten Weise auch eine Vor- und Rückbewegung des Flügels. Davon ist vor allem die Rückbewegung schädlich für die Zirkulation am Flügel. Das ist jedoch durch eine zweite, gegenläufige Masse vermeidbar. Beide Massen müssen so angeordnet sein, dass sie bei gleicher Richtung ihrer Exzentrizität nach oben oder unten weisen. Ihr Antrieb wird entsprechend mechanisch gekoppelt.

Es gibt diverse Vorschläge, eine oszillierende Flügelbewegung von einem Piloten zu erzeugen, der in einem Hängegleiter oder einem anderen, ultraleichten Fluggerät fliegt - z. B. durch schnelle Liegestützen oder Kniebeugen. Bei einigen anderen Vorschlägen wird fälschlicherweise angestrebt, den Auftrieb konstant zu halten. Vortrieb und Arbeitswiderstand sind aber dann gleich groß<sup>11</sup>. Eine Schuberzeugung wird damit verhindert.

<sup>11</sup> siehe Arbeitswiderstand und Vortrieb im Vektordiagramm von <http://www.ornithopter.de/prinzip.htm>

## 1.11 Rotationsflügel

Um die Beschleunigungskräfte in den Schlagendlagen zu umgehen, hat man verschiedentlich „Schlagflügel“ gebaut, die auf einem Kegelmantel rotieren.



Anstellwinkel im Horizontalflug

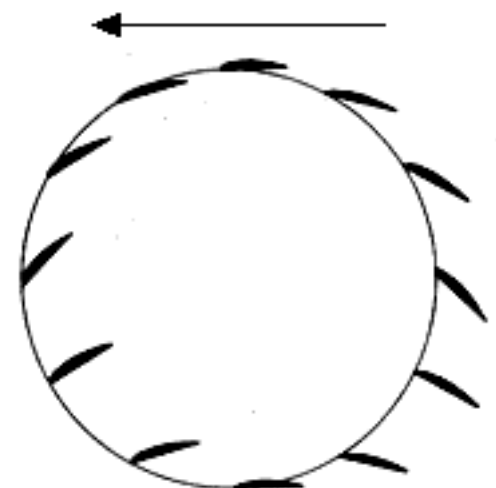


Bild 1.18 Rotationsflügelantrieb von Adolf Piskorsch<sup>12</sup>, 1944. Die Holme der drei Schlagflügel auf jeder Modellseite rotieren auf einem Kegelmantel. Der Flügelwurzel-Einstellwinkel wird durch ein raffiniertes Getriebe zunächst konstant gehalten. Durch torsionselastische Montage der einzelnen Membranflügel sollen aber dann im Horizontalflug etwa die dargestellten Einstellwinkel erzielt werden (aeroelastisch).

<sup>12</sup> Piskorsch Adolf: Bewepte Schwingen. Selbstverlag, Sontheim an der Brenz, 1975

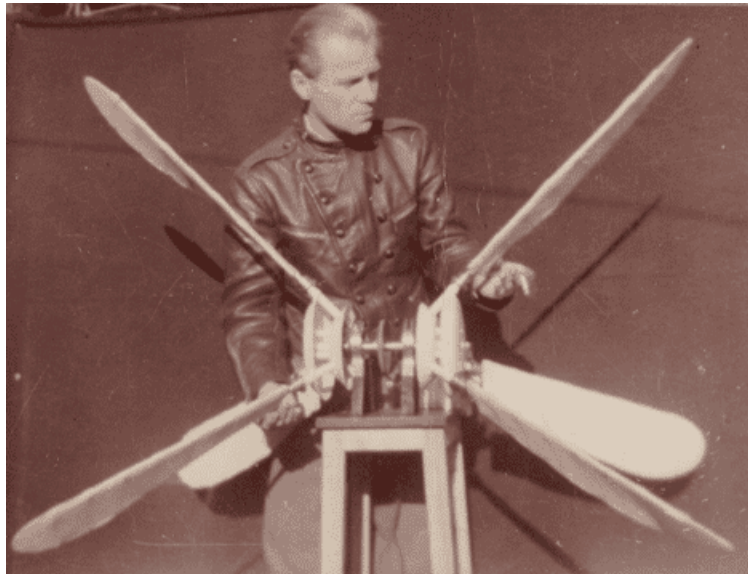


Bild 1.19 Adolf Piskorsch in Berlin Adlershof 1944 mit einem Vorläufermodell seiner Rotorlibelle



Bild 1.20 Rotationsschlagflügel von Adolf Piskorsch, noch in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt in Berlin (DVL) als „iron bird“ gebaut und nach 45 Jahre mit Membranflügeln auf dem Prüfstand.

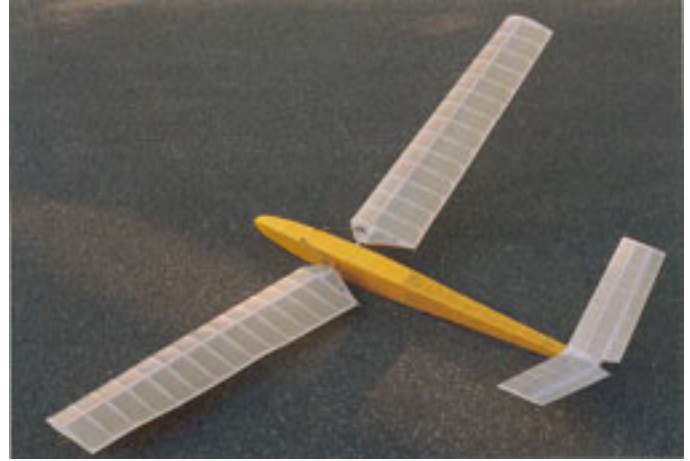


Bild 1.21 Rotationsflügelmodell von Horst Händler, 1989.  
Die Profilflügel stecken jeweils auf einem abgewinkelten Ende der angetriebenen Welle. Durch Hebel wird der Einstellwinkel immer an die jeweilige "Schlagrichtung" angepasst.

In der oberen Flügellage bewegen sich die Rotationsflügel nach vorne und in der unteren nach hinten. Bei schneller Flügelrotation überwiegen womöglich die Nachteile der Rückwärtsbewegung des Schlagflügels in der unteren Lage die Vorzüge dieses Flügelkonzeptes.

### 1.12 Schlagflügel mit nicht-verwindbarem Armflügelabschnitt

Ein besonderes erfolgreiches Holmgerüst für Membranflügel hat Percival Hopkins Spencer mit seiner „Seagull“ entwickelt. Der Armflügel ist dreieckförmig und mit festen Leisten umrahmt. Der Handflügel ist ebenfalls dreieckförmig, aber ohne steife Hinterkante. Die Membranen von Arm- und Handflügel überlappen sich längs der Spannweite.

Der hauptsächlich Auftrieb erzeugende, rumpfnahere Armflügel behält bei diesem Flügelsystem seinen Einstellwinkel während der Schlagbewegung bei. Lediglich die Profilwölbung kann sich dort bei nicht zu straff gespannter Membrane verändern. Der insbesondere Schub erzeugende Handflügel passt sich dagegen mit seinem Einstellwinkel an die wechselnden Strömungsbedingungen an.

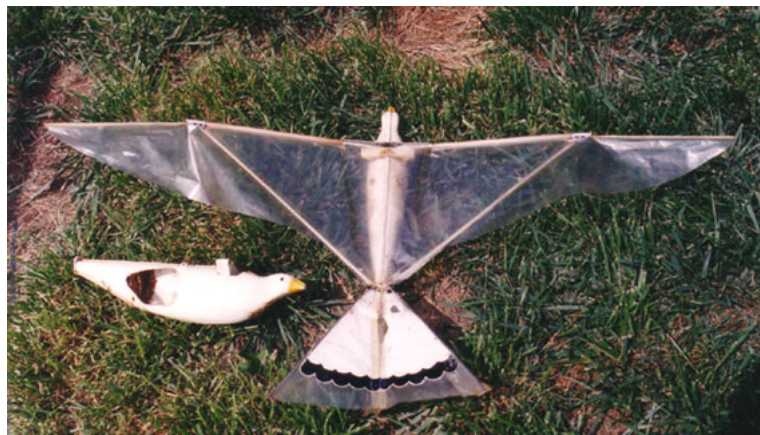


Bild 1.22 „Seagull“ von Percival H. Spencer, USA 1958

Das Flügelkonzept von P.H. Spencer wurde durch kleine Änderungen des Zuschnittes und durch vollständige Lattung des Handflügels weiter verbessert und bis zur Serienreife entwickelt. Mit Verbrennungs- oder Elektromotoren angetrieben erreicht man damit eine kräftige Schubentwicklung und sehr gute Steigflugergebnisse.



Bild 1.23 Flügel vom „Skybird“, hergestellt von Sean Kinkade, USA, Fotos von Robert Korobelnik, Paris 2003

## 2. Profilschlagflügel

Schlagflügel mit technischen Profilen, sind auf Ober- und Unterseite der Profilform beplankt oder bespannt. Auch aus Schaumstoff lässt sich die Oberfläche oder auch der ganze Flügelquerschnitt formen. Derartig „dicke“ Flügel werden hier als „Profilschlagflügel“ bezeichnet.

Bei Flügelprofilen mit bekannten aerodynamischen Daten lässt sich - zumindest unter quasi-stationären Bedingungen - der Auftriebs- und Torsionsmomentverlauf längs der Spannweite theoretisch vorherbestimmen. Wenn es dann in der Praxis noch gelingt, die Flügelverwindung im zeitlichen Verlauf entsprechend den theoretischen Vorgaben zu gestalten, kann man damit bessere Wirkungsgrade erwarten als mit Schlagflügelmodellen, die nur empirisch bzw. nach der Methode von Versuch und Irrtum gebaut werden.

## 2.1 Mit aufgefächerter Flügelspitze

Eine bei der Natur abgeschauter Möglichkeit für einen kräftigen Verwindungsanstieg an der Flügelspitze ist deren Auffächerung in einzelne „Federn“. Mit den einzelnen, schmalen Flächen lassen sich insbesondere große Anstellwinkeländerungen leichter erzielen als mit der durchgehenden Flügelfläche. Den deutlich größeren Profilwiderstand im Bereich der Federn muss man dabei allerdings in Kauf nehmen. Vögel sollen aber sogar die Möglichkeit besitzen, mit der Auffächerung des Flügels den induzierten Widerstand zu verringern<sup>13</sup>.

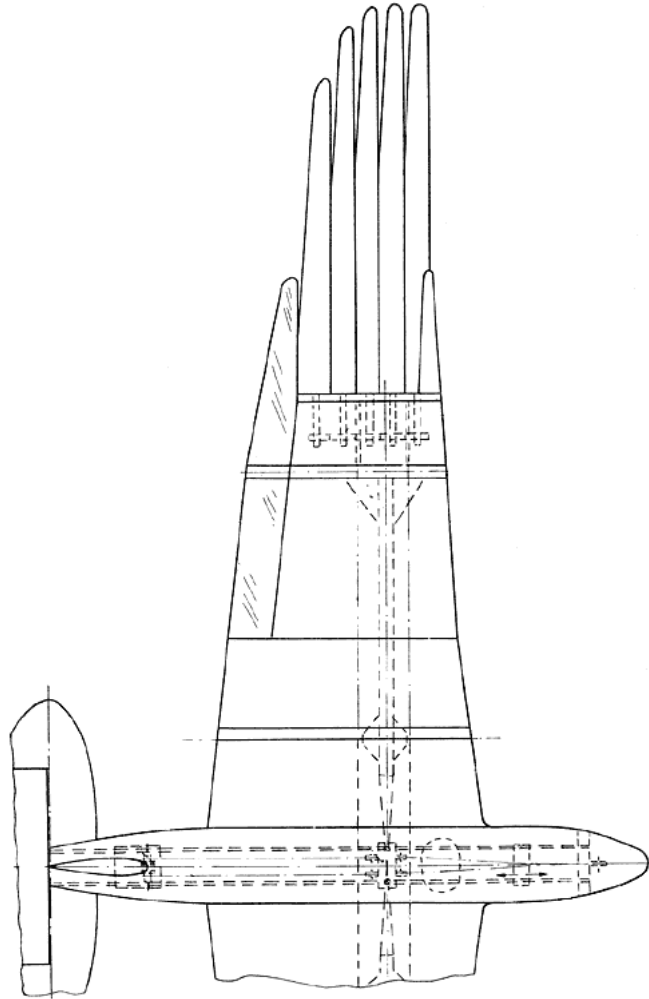


Bild 2.1 Beispiel für eine aufgefächerte Flügelspitze mit stabilen „Federn“ die um ihre Längsachsen dreh- und sogar steuerbar waren.  
Erfinder von diesem mantragenden „Schwan 1“ war Walther Filter, 1956.  
Ein Baumuster stand 1958 auf der Deutschen Industriemesse in Hannover<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup> Rechenberg Ingo: Verminderung des Randwiderstands durch aufgefächerte Tragflügelspitzen.  
Fachgebiet Bionik und Evolutionstechnik, TU Berlin, 1981  
Siehe auch <<http://www.bionik.tu-berlin.de/user/michaels/projekt.html>>

<sup>14</sup> Herzog Karl: Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik, Mechanikus, Heft Januar 1963 Seite 13,  
Verlag J. F. Schreiber, Esslingen am Neckar 1963

Eine weitergehende Differenzierung der Flügelspitzen-Auffächerung zeigt eine andere Idee. Bei ihr werden sogar Möglichkeiten der Schwenk- und Spreizbarkeit der einzelnen „Flügelfedern“ aufgezeigt.

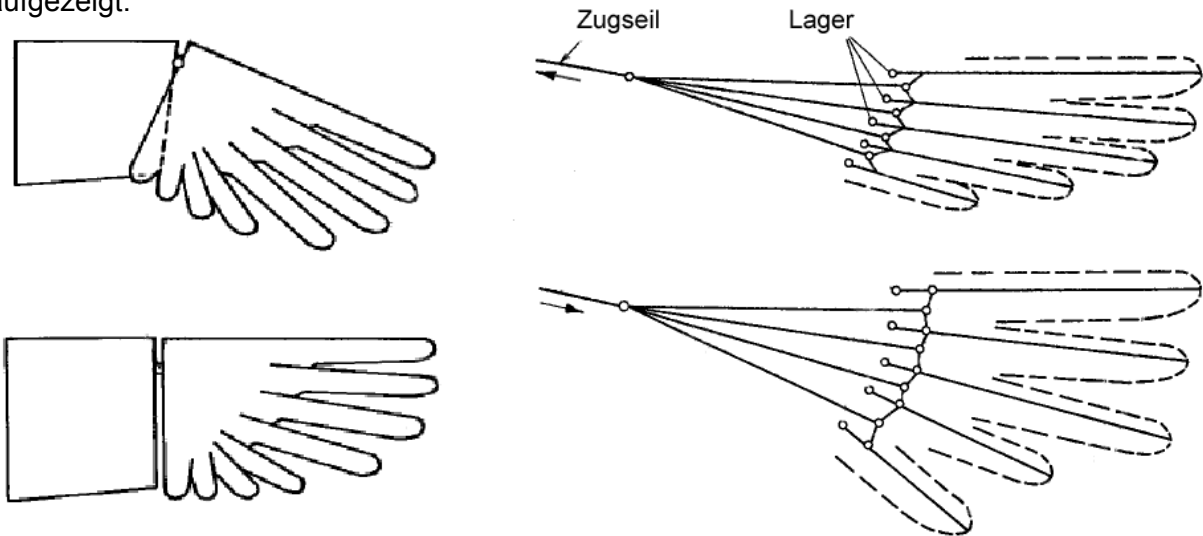


Bild 2.2 Schwenk- und spreizbare Flügelfedern, nach einem Vorschlag von Oskar Dinort, zum Patent angemeldet, Köln-Riehl 1956.

Auch auf den Aufbau der einzelnen Federn wird in der Patent-Auslegeschrift etwas eingegangen. Es wird eine leicht gewölbte Federfahne gezeigt, die durch je einen Gurt (Holm) auf ihrer Ober- und Unterseite stabilisiert wird. Dabei reichen die Gurte nicht immer bis zur Federspitze.

Auch bei meinen **EV**-Modellen habe ich Versuche mit aufgefächerten Flügelspitzen durchgeführt.



Bild 2.3 Flügel des Schlagflügelmodells **EV7b**, ein Beispiel für eine aufgefächerte Flügelspitze mit einfachen, aeroelastischen Membranfedern.

Als strömungsgünstiger Übergang von der durchgehenden Flügelfläche auf die einzelnen Federn habe ich dünne, etwa 6 cm breite GFK-Schalen hergestellt. Nach außen hin blieb entlang der Profilmittellinie ein schmaler Spalt frei. Darin sind die Federn aufgereiht.

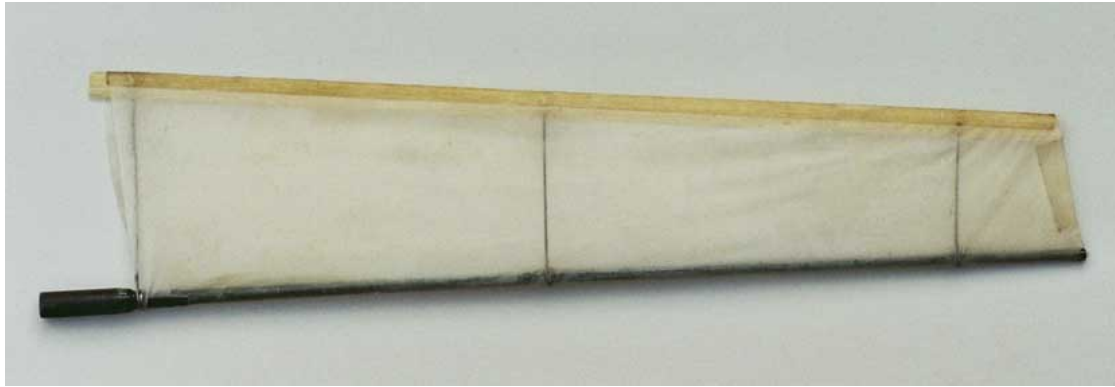


Bild 2.4 Eine Membranfeder vom **EV7b**, Länge über alles 31 cm

Der „Federkiel“ besteht aus einem konischen GFK-Rohrholm (Angelrutenspitze), der an seiner Wurzel mit einer 6 mm Hülse versehen ist. Die Endleiste der Feder wird durch drei, vom Holm ausgehende, 0,8 mm starke Stahldrähte auf Abstand gehalten. Der Stahldraht umschlingt zunächst zweimal den Rohrholm und ist dort verklebt. Mit seinem anderen Ende steckt er in einer feinen Bohrung der GFK-Endleiste, die bei der Endleistenherstellung mit eingearzt wurde. Die elastische Bespannfolie vom Typ Platilon U ist ohne Spannung, ausgehend von Endleiste um den Holm herum, wieder bis zur Endleiste gelegt und nur dort verklebt.

Die einzelnen Federn sind zur leichten Auswechselbarkeit auf 6 mm Buchenzapfen stramm steckbar am Flügel montiert. Trotz heftiger Landungen war aber ihr Austausch nur selten erforderlich.

## 2.2 Schlagflügel mit schräger Handflügelachse

Ein früher Vorschlag für die Gestaltung eines „verwindbaren“ Profilschlagflügels stammt von Karl Herzog. Er ersetzt die Flügelverwindung durch Scharniere bzw. Knicke in einer sonst verwindungssteif aufgebauten Flügelfläche.

Um entsprechend der Holst'schen Theorie an der Flügelwurzel eine Anstellwinkeländerung zu ermöglichen, schlägt Herzog vor, das Schlagscharnier des Flügels um eine Rumpfquerachse drehbar zu lagern.

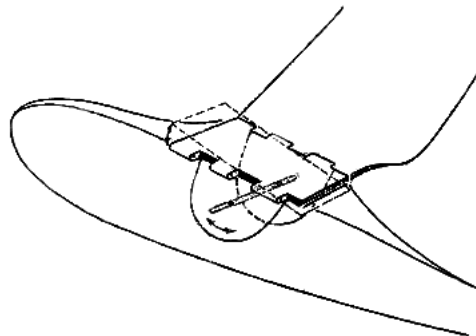


Bild 2.5 Drehbares Schlaglager nach einem Vorschlag von Karl Herzog <sup>15</sup>

<sup>15</sup> Herzog Karl: Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik, Teil IV. Mechanikus, Heft Oktober 1963, Verlag J. F. Schreiber, Esslingen am Neckar 1963

Der Flügel selbst war in Arm- und Handflügelabschnitte unterteilt, die sich über Scharniere gegenseitig bewegen konnten (nächstes Bild). Herzog experimentierte mit verschiedenen Scharnieranordnungen. Die dabei sich ergebenden Knicke in der Profilkontur hat er in Kauf genommen. Sie lassen sich ja vielleicht noch etwas kaschieren.

Bei der Flügelvariante „A“ waren auf der Flügelunterseite zwischen Arm- und Handflügel Gummifäden gespannt, die den Handflügel ein wenig nach unten zogen. Dadurch wurden zumindest ansatzweise aeroelastische Eigenschaften geschaffen.

An dieser Schlagflügelstudie von Herzog finde ich bemerkenswert, dass er, der viele biologische Vogelflügel untersucht und gezeichnet hat, bei zwei von seinen technischen Vorschlägen die Flügelverdrehungsachse schräg zur Schlagachse legte. In der übrigen Literatur stehen Schlag- und Drehachse sonst immer nur senkrecht zueinander. Favorisiert hat Herzog allerdings seinen Vorschlag „C“, da er fälschlicherweise annahm, dass die Schubkraft des Handflügels durch die schräg liegende Handflügelachse beeinflusst wird und etwas zur Rumpfachse geneigt sei. Zu Flugversuchen mit diesen Schlagflügeln ist es mangels geeigneten Antriebs leider nicht gekommen.

Vergleicht man Variante „A“ mit dem erfolgreichen Membranschlagflügel von P. H. Spencer (Bild 1.22), so erkennt man eine relativ große Ähnlichkeit der Grenzlinie bzw. der Knickgestaltung zwischen Arm- und Handflügel. Spencers Modell flog allerdings ohne Armflügelverdrehung und mit stark vergrößerter Flügelwurzeltiefe.

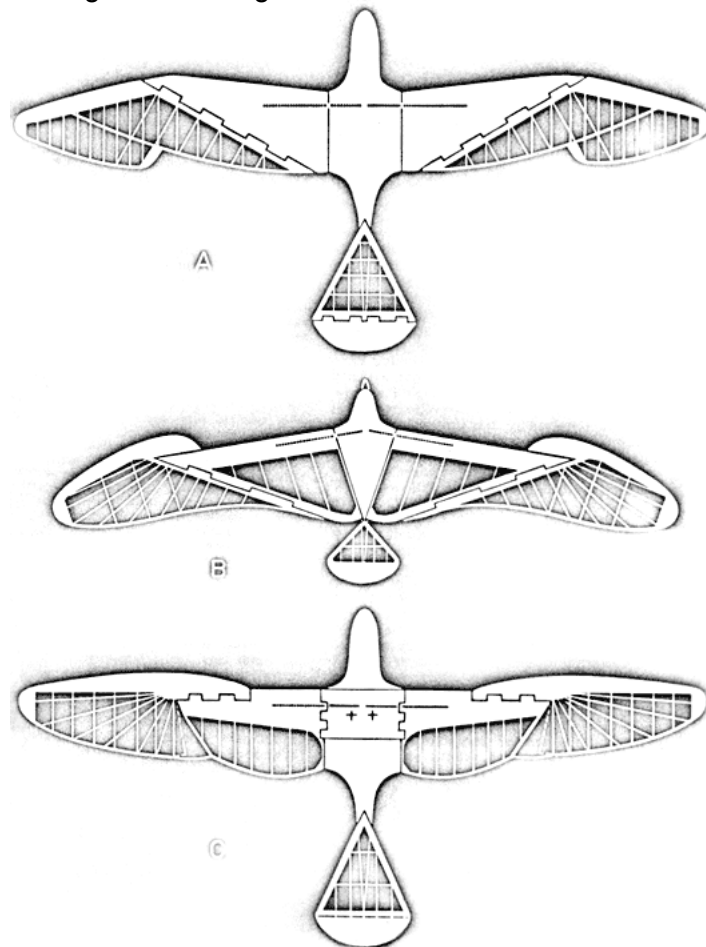
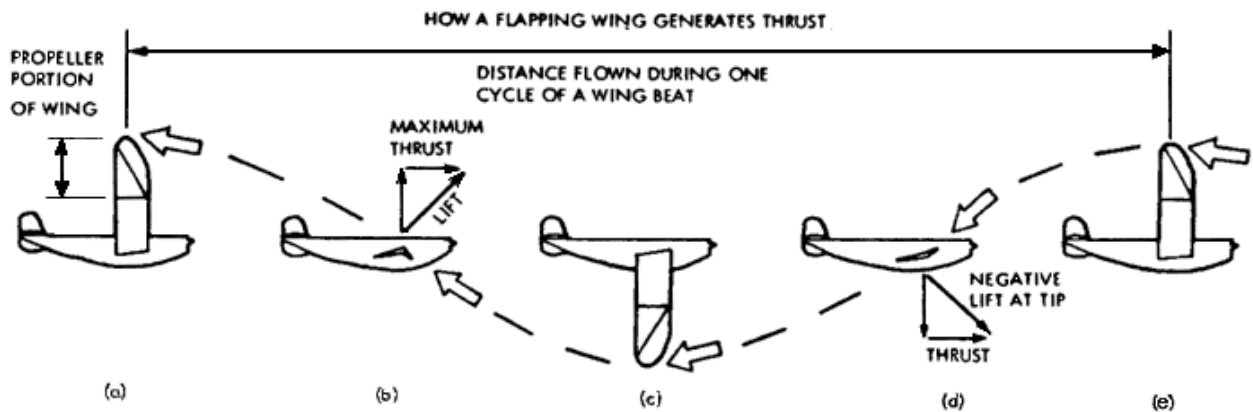


Bild 2.6 Flügelstudie von Karl Herzog, aus der Zeit von 1954 bis 1957.

Im Allgemeinen erfolgt bei Schlagflügeln die Flügelverwindung durch Verdrehung der Flügel­fläche um eine vorne, in der Nähe der Flügel­nase liegende Achse. Die hauptsächliche Verwindungsbewegung führt dabei also die Flügel­end­fahne aus. Eine ganz andere Möglichkeit um eine Einstellwinkeländerung zu erzielen verdeutlicht nachstehende Zeichnung. Sie zeigt das Bewegungsschema einer im Handflügelbereich synchron zur Schlagbewegung aktiv vom Antrieb gesteuerten Flügel­nase. Dieses Prinzip wurde von M. W. Saunders<sup>16</sup> beschrieben und von John Drake in die Praxis umgesetzt.



Diese fünf Szenen zeigen die Flügelspitze in der oberen, mittleren und unten Schlagstellung während einem Zyklus. Die strichlierte Linie markiert dabei den Weg der Flügelspitze während diesem Zyklus. Die breiten Pfeile zeigen deutlich den Winkel mit welchem der Luftstrom im jeweiligen Moment auf die Flügelspitze trifft.

Die Eintrittskante des Flügelpropellerteils wird dazu gebracht, sich synchron mit der Flügelstellung auf und ab zu bewegen, so dass es dem Luftstrom möglich wird, die voreilende Kante sauber anzuströmen. So merkwürdig es auch erscheinen mag, die zusätzliche Wirkung eines während der Vorwärtsbewegung auf und ab schwingenden Flügels Schub zu erzeugen wird dadurch bewirkt, dass der Auftrieb immer im rechten Winkel zum Luftstrom steht. Dadurch, dass in der Stellung (b) der Auftrieb nach vorne gerichtet ist, entsteht Schub. Zwischen den Stellungen (a) und (c) wird Schub erzeugt, der sein Maximum in der Stellung (b) erreicht. Bei (a) und (c) gibt es keinen Schub, aber es entsteht bei (d) ein kleiner Vortrieb, wenn man im äußeren Propellerabschnitt einen kleinen negativen Auftrieb zulässt.

Die Spitzengeschwindigkeit der Flügelspitze während des Abschlags muss wenigstens 1/3 der Vorwärtsgeschwindigkeit betragen, damit genügend Nutzs Schub entsteht das Modell in der Luft zu halten. Die Schlagfrequenz von drei Schlägen pro Sekunde ist der voraussichtliche Bedarf um das Modell zu fliegen.

Bild 2.7 Bewegungsschema des aktiv gesteuerten Verstellpropeller-Schlagflügels von John Drake<sup>17</sup>, England 1978.

<sup>16</sup> Saunders M. W.: Flight and nature. printed in Great Britain, 1971 (Verlag ist hier nicht bekannt)

<sup>17</sup> Drake John: An Experimental R/C Ornithopter.

Model Aeronautical Press LTD, Great Britain., Aeromodeller Annual, about 1978



Bild 2.8 John Drake mit seinem Experimental R/C Ornithopter.

Interessant an Drake's Modell ist auch die Startmethode. Das Modell flog mit einem Verbrennungsmotor der beim Start zunächst einen Propeller antrieb. Damit wurde das Modell auf Höhe gebracht. Erst dort sollte dann per Fernsteuerung der Schlagflug ein- und gleichzeitig der Propellers ausgeschaltet werden. Für die Landung war eine fail-safe-Gleitflugposition der Flügel vorgesehen. 1978 wurde das Modell mit dem Propeller auf etwa 60 Meter Höhe gebracht und dann auf Krafftflug umgeschaltet. Nach einer schnellen Rolle gelang eine glückliche Landung in der fail-safe-Flügelposition.

### 2.3 Mit stufiger Verwindung

Die Gestaltung profilierter Schlagflügel mit gezielter Verwindung war zunächst schwierig. Eine zumindest angenäherte Flügelverwindung wird aber auch erreicht, wenn man längs der Spannweite einzelne, relativ steife Flügelabschnitte stufenweise verdreht. Je kleiner dabei die einzelnen Abschnitte sind, umso besser ist die Annäherung an eine stetige Verwindung. Um die aerodynamisch ungünstigen Stufen zwischen den einzelnen Abschnitten zu vermeiden wurden verschiedene Verfahren gefunden.

Auch die Schlagflügel des **EV4** waren nach diesem Prinzip gebaut.



Bild 2.9 Schlagflügelmodell **EV4** mit stufiger Verwindung, 1979.

Die Verdrehung der einzelnen Flügelabschnitte wurde bei diesem Modell vom Antrieb aus gesteuert (aktive Verwindung). Dies war insbesondere für die Umschaltung auf Gleitflug erforderlich. Während der Schlagbewegung wurde der Armflügel vom Antrieb aktiv gedreht und die Relativbewegung zwischen Flügelwurzel und Rumpf für die Steuerung der Handflügel-Drehbewegung genutzt.

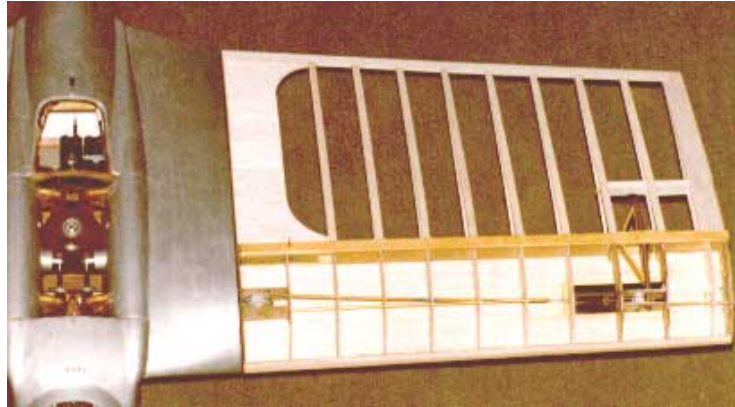


Bild 2.10 Armflügelmechanik vom **EV4** zur aktiven Steuerung des Handflügels.

Ein typischer Vertreter einer stufigen Flügelverwindung ist der Step-Twister von Karel Pustka. Bei seinem Modell ist der Spalt zwischen den einzelnen Flügelabschnitten mit einer Membrane überbrückt. Die stufenweise Verwindung kommt der Verwendung relativ harter Schaumstoffe (DEPRON) entgegen.



Bild 2.11 Styropor-Schlagflügel mit „Verwindung“ von Karel Pustka, München 2004.

## 2.4 Verwindung durch Holmdrehung

Steht eine Antriebsmechanik zur Verfügung, die zusätzlich zur Schlagbewegung eine um 90 Grad phasenverschobene Drehbewegung des Flügelholms erzeugen kann<sup>18</sup>, so lässt sich dies für eine aktive Flügelverwindung nutzen (siehe Schlagflügelmodelle **EV1**, **EV4** und **EV5**, angetrieben von einer Kardankurbel mit zwei versetzt angeordneten Kurbelzapfen).

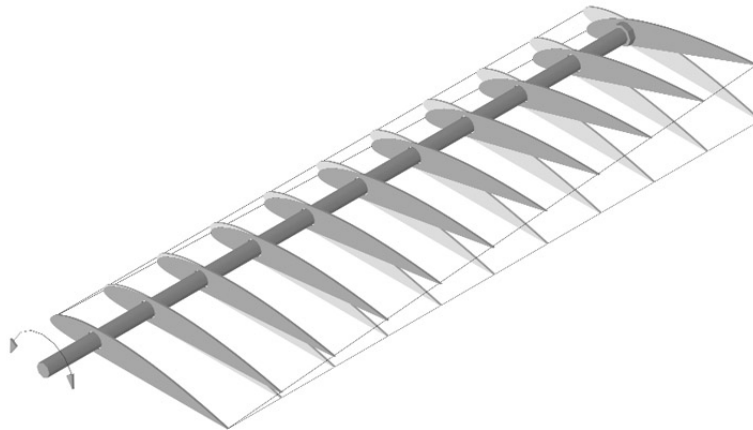


Bild 2.12 Beispiel für eine aktive Flügelverwindung mit aktiver Drehung der Flügelspitzenrippe durch Holmdrehung.

In vorstehender Abbildung ist die Flügelwurzelrippe am Rumpf in ihrem Anstellwinkel fixiert. Mit dem Holm wird nur die Endrippe an der Flügelspitze gedreht. Die dazwischen liegenden Rippen werden auf dem Holm leicht drehbar angeordnet. Durch die Bespannung sowie durch Nasen- und Endleiste oder einem Hilfsholm geführt, erfolgt ein linearer Übergang des Anstellwinkels zwischen den beiden Flügelenden.

Derartige Verwindungssteuerungen wurden bei den künstlichen Vögeln von E. v Holst insbesondere im Armflügelbereich eingesetzt (siehe

Bild 1.6).

## 2.5 Scherverwindungsprinzip

Eine interessante Lösung für einen Schlagflügel mit glatter Oberfläche zeigt die folgende Abbildung. Es ist ein Schlagflügel, der aus der Entwicklung des manntragenden Ornithopters von DeLaurier und Harris<sup>19</sup> hervor ging.

---

<sup>18</sup> siehe Antriebsmechanik von Erich von Holst oder Albert Kempf

<sup>19</sup> DeLaurier James D.: The development of an efficient ornithopter wing.  
The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, May 1993, Figure 6,  
hier mit geänderten Eintragungen

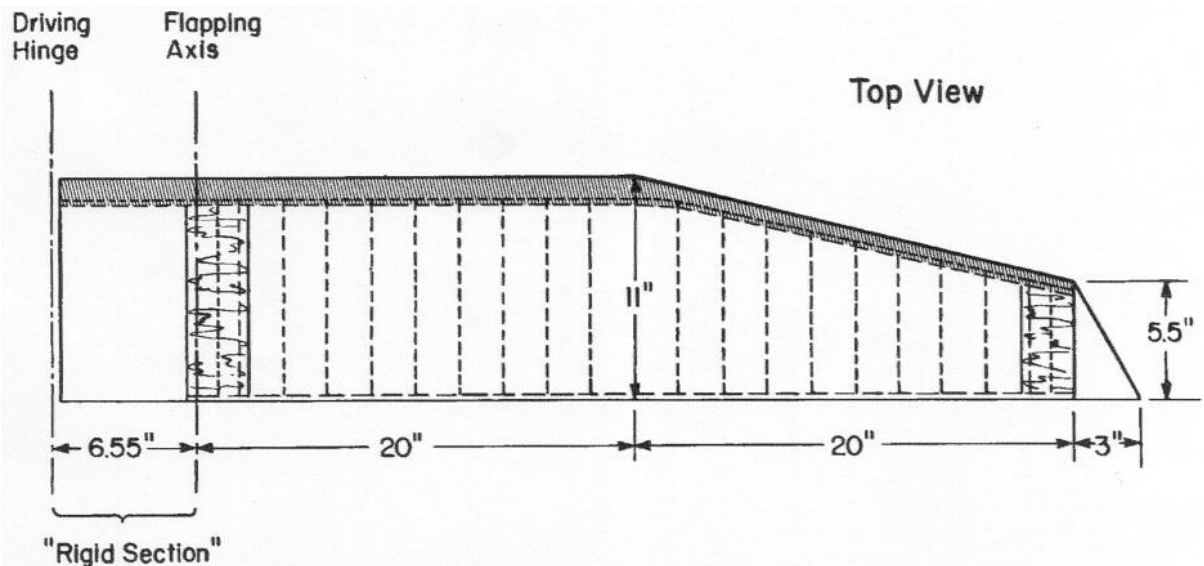


Bild 2.13 Draufsicht auf Schlagflügel nach dem Scherverwindungsprinzip<sup>20</sup>  
(Maßangaben in Zoll).

Das mantragende Fluggerät hat bei Rollversuchen zumindest die Abhebegeschwindigkeit von ca. 80 km/h erreicht. Unterstützt durch einen Modellbau-Düsenantrieb absolvierte es dann 2006 einen Flug von 14 Sekunden. Ein Flugmodell mit einem derartigen Schlagflügel<sup>21</sup> ist auch erfolgreich geflogen<sup>22</sup>.

Besondere Merkmale dieser Scherverwindungs-Tragfläche sind:

- Verwendung des relativ dicken Profils S1020 von M. Selig, mit linearem Übergang im äußeren, zugespitzten Flügelabschnitt auf das symmetrische Profil SD8020.
- Aeroelastische Verwindung durch Holmtorsion (siehe auch Abschnitt 1.6)
- Der Holm liegt sehr weit vorn und bildet gleichzeitig die Nasenleiste.
- Weitgehend unelastische Bespannungen auf Ober- und Unterseite.
- Kein Hilfsholm, aber zwei Endleisten, die gleit- bzw. scherfähig miteinander verklammert sind.
- Nur jede zweite Flügelrippe ist mit der Bespannung der oberen bzw. unteren Flügelseite verklebt.
- Bei nicht zu großer und konstanter Verwindung längs des Flügels ist die Profiltreue relativ gut, so dass man den theoretisch zulässigen Arbeitsbereich des Profilauftriebsbeiwertes wahrscheinlich voll nutzen kann.

<sup>20</sup> DeLaurier J.: The development of an efficient ornithopter wing. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, May 1993, Figure 6 mit geänderten Eintragungen

<sup>21</sup> DeLaurier James D. and Harris Jeremy M. : A study of mechanical flapping-wing flight. The Aeronautical Journal, Vol. 97, October 1993, pp. 277-286

<sup>22</sup> Siehe <[http://www.ornithopter.net/MediaGallery/Videos/index\\_e.html](http://www.ornithopter.net/MediaGallery/Videos/index_e.html)>

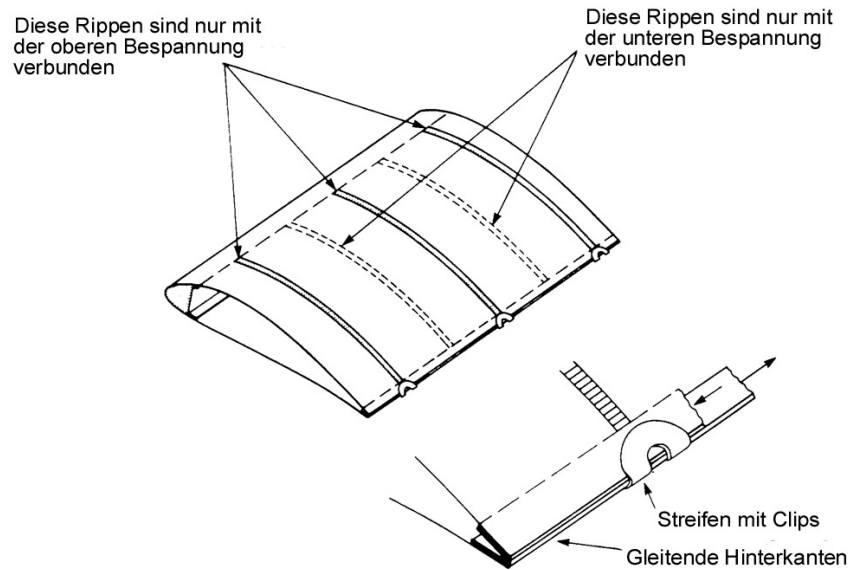


Bild 2.14 Tragfläche nach dem Scherverwindungsprinzip, entwickelt von James D. DeLaurier<sup>23</sup> und Jeremy M. Harris, zum US-Patent angemeldet 1994.

Durch die an der Flügelhinterkante erfolgte Trennung von Ober- und Unterseite ist die Außenhaut im Querschnitt wie ein liegendes, hinten offenes „U“ aufgebaut und setzt so den Verwindungskräften kaum Widerstand entgegen.

Der prinzipielle Holmaufbau wird wie folgt angegeben.

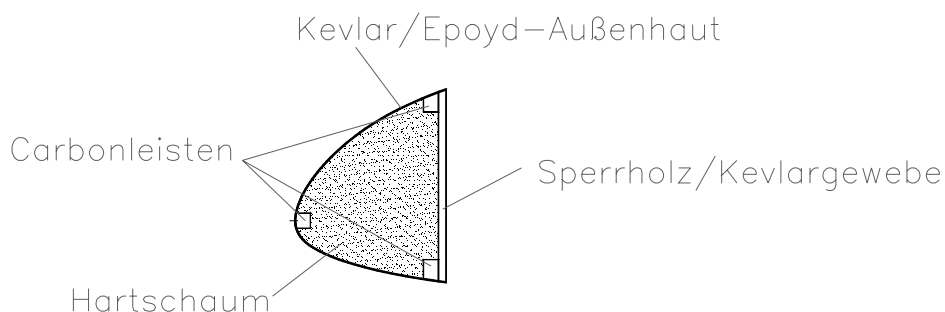


Bild 2.15 Querschnitt einer als Flügelholm verwendeten Flügelnasenleiste, nach einer Zeichnung von DeLaurier<sup>24</sup>.

Vorteilhaft bei dieser Lösung ist auch die große Vorlage des Flügelholms innerhalb der Flügeltiefe. Bei sehr leichter Flügelfläche kann man so erwarten, dass die Verwindung durch

<sup>23</sup> DeLaurier James D.: An ornithopter wing design.

Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 40, No.1, March 1994

<sup>24</sup> DeLaurier James D.: The Development and Testing of a Full-Scale Piloted Ornithopter.

Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol. 45, No.2, June 1999, pp. 72-82.

aerodynamische Kräfte etwa proportional zu den Auftriebskräften ist. Die Massenträgheit der Flügelfläche beeinflusst aber auch hier die Flügelverwindung.

Der Querschnitt des Flügelholms ist der Berechnung mit einfachen Mitteln leider nicht zugänglich. Außerdem unterliegt die Festigkeit handgefertigter Holmkonstruktionen einer erheblichen Streubreite. Man ist also weitgehend auf Versuche bzw. Messungen angewiesen. Wird die gewünschte Flügelelastizität nicht erreicht - was sich meist erst in der Praxis zeigt - so ist ein Flügelneubau erforderlich.

Bemerkenswert an dem Ornithopter von DeLaurier und Harris sind auch die Dreiteilung des Flügels sowie die Konfiguration der Schlagflügelanlenkung und -Lagerung. Der mittlere Flügelabschnitt wird - entgegen der Flügelspitzen und parallel - auf und ab bewegt. Dadurch soll auch der Auftrieb vergleichmäßigt werden.

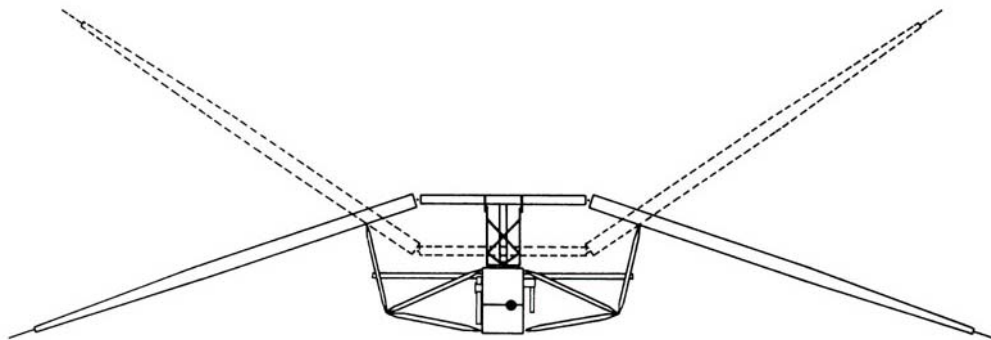


Bild 2.16 Schlagflügel-Konfiguration von DeLaurier und Harris.

Horst Händler hat diesen Ornithopter als wunderschönes Modell mit Elektroantrieb nachgebaut.

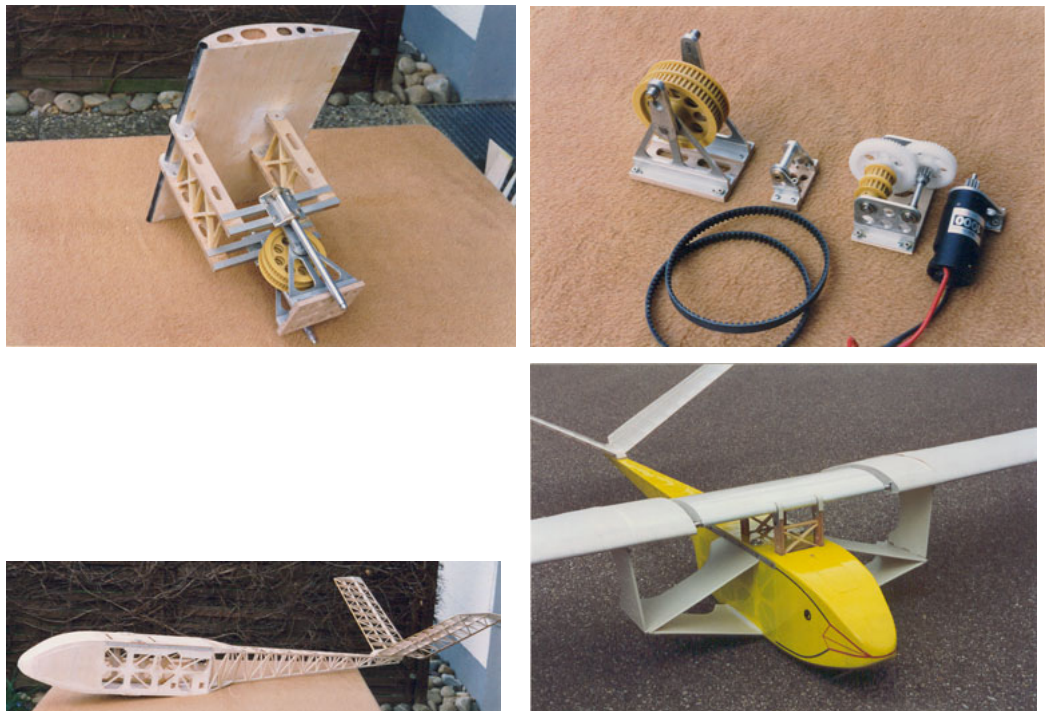


Bild 2.17 Nachbau-Einzelheiten des Schlagflügelmodells von DeLaurier, mit Elektroantrieb, von Horst Händler, 1992.



Bild 2.18 Nachbau des Schlagflügelmodells von DeLaurier, mit Elektroantrieb, von Horst Händler, 1992.

## 2.6 Schalenflügel

Verwendet man statt der Flügelmembrane eine lange, profolförmig gewölbte Schale, so lassen sich damit relativ einfach gebaute Schlagflügel herstellen. Im Gegensatz zur ebenen Platte kann sich eine gewölbte Platte in zumindest brauchbarer Weise auf der ganzen Länge verwinden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Schale etwas elastisch ist und dafür Sorge getragen wird, dass sich während der Verwindung das Wölbungsmaximum längs der Flügeltiefe nicht allzu sehr verlagert.

Die Flügel des „Truefly“ bestehen offensichtlich aus so einer dünnen, gewölbten Hartschale, die zur Profilierung und zur Ummantelung des Holmgerüsts auf der Unterseite mit Schaumstoff ausgekleidet ist.

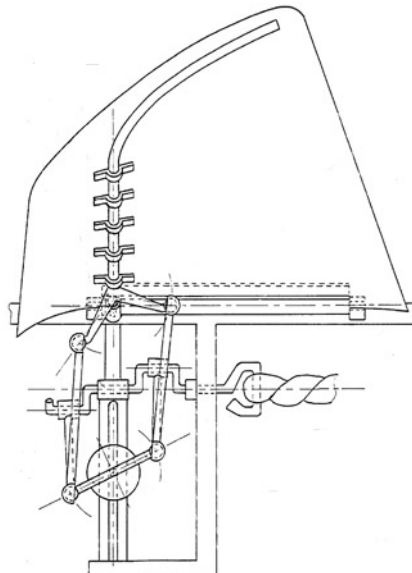


Bild 2.19 Antrieb mit Flügelansteuerung vom „Truefly“, aus der Patent-Publikation von Albert Kempf, Frankreich 1998.

Die Flügelverwindung wird durch Holmdrehung vom Antrieb aktiv gesteuert. In folgendem Flugbild ist auf der Flügelunterseite ganz schwach der Holmverlauf zu erkennen.



Bild 2.20 „Truefly“ von dem Albert Kempf<sup>25</sup>, Frankreich 2001.

Der „Truefly“ zeigt in Videos ein wunderschönes Flugbild.

Eine andere Möglichkeit eines Schalenflügels zeigt die folgende Aufnahme.



Bild 2.21 Ornithopter mit relativ schwach gewölbten Schalenflügeln hergestellt aus 3 mm dickem Schaumstoff (DEPRON) von Karel Pustka, München 2003.

Zur Einhaltung eines bestimmten Wölbungsverlaufes bei Schaumstoffflügeln verhilft vielleicht die Einlage von Rippen oder unter Umständen auch eine Wärmebehandlung. Dabei kann man auch versuchen das Profil der „Gewölbten Platte“ (Gö 417a) zu formen, um dann mit bekannten Profildaten zu arbeiten. Leider sind die bisher verwendeten Materialien recht bruchempfindlich. Neuere Vorschläge sprechen von EPP-Flügeln (**Ex**panzierbares **P**oly **P**ropylen), die diesen Nachteil nicht haben.

---

<sup>25</sup> Siehe Website von Albert Kempf: <<http://www.chez.com/truefly>> und seine Patent-Veröffentlichungsnummer FR2776937 vom 08. 10. 1999

## 2.7 Gelenkschlagflügel

Die im Zuge der **EV**-Modelle entwickelten, aeroelastisch gesteuerten Gelenkschlagflügel stellen eine weitere Schlagflügelkategorie dar. Sie ist an anderer Stelle detailliert beschrieben<sup>26</sup>.



Bild 2.22 Ornithoptermodell **EV6** mit seinen Gelenkschlagflügeln.

## 3. Methoden zur Schlagflügelverwindung

Bei Schlagflügelmodellen sind folgende Verfahren zur Flügelverwindung bekannt.

### a) Passive Flügelverwindung

- Die Verwindung kann im Regelfall nur zwischen zwei mechanisch vorgegebenen Verwindungs-Endlagen wechseln. Der Übergang erfolgt leichtgängig durch aerodynamische Kräfte (z. B. einfacher Membranflügel).
- Es erfolgt keine automatische Anpassung der Verwindungsstärke an unterschiedliche Anströmwinkel während der Flügelschlagbewegung.
- Der Flügel ist sehr einfach aufgebaut. Bei einigen Konstruktionen lassen sich die Verwindungs-Endlagen einstellbar gestalten.
- Beeinflussungsmöglichkeiten per Fernsteuerung sind bisher nicht bekannt. Der Übergang zu einer mittlerem Gleitflug-Verwindungsstellung ist nicht möglich.

---

<sup>26</sup> Rübiger Horst: Gelenkschlagflügel. Siehe <[www.ornithopter.de/daten/gelenk.pdf](http://www.ornithopter.de/daten/gelenk.pdf)> 2006

## b) Aktive Flügelverwindung

- Die Verwindung wird mechanisch durch den Schlagflügelantrieb oder einen zusätzlichen Servoantrieb gesteuert. Dabei erfolgt zyklisch eine zeitlich meist sinusförmige Veränderung der Verwindung während einer Schlagperiode.
- Es erfolgt automatisch eine Anpassung der Verwindungsstärke an unterschiedliche, aber nicht an unvorhergesehene Anströmwinkel während der Flügelschlagbewegung.
- Flügel und Verwindungsmechanik lassen sich relativ einfach konzipieren (siehe Modelle von E. v. Holst). Sie können aber auch recht komplex werden (Bild 2.19 oder **EV1** bis **EV5**<sup>27</sup>).
- Mit entsprechendem mechanischem Aufwand kann man die Verwindung einstellbar und sogar fernsteuerbar gestalten (siehe Bild 1.7). Der Übergang zu einer mittlerem Gleitflug-Verwindungsstellung ist möglich (z.B. mit der Kardankurbel oder der Klappkurbel<sup>28</sup>).

## c) Aeroelastische Flügelverwindung

- Der Flügel ist verwindungselastisch aufgebaut. Größe und Richtung der Verwindung werden durch die Torsionsfederung des Flügels und durch das Drehmoment der aerodynamischen Kräfte bestimmt.
- Es erfolgt automatisch eine Anpassung der Verwindungsstärke an unterschiedliche und auch an nicht vorhergesehene Anströmwinkel während der Flügelschlagbewegung.
- Der mechanische Flügelaufbau ist in der Regel relativ einfach. Meist wird der Flügelholm gleichzeitig als Torsionsfeder verwendet. Die Vorhersage der Flügelverwindung erfordert jedoch sehr gute Kenntnisse der Aerodynamik und der Festigkeitslehre. Die tatsächliche Verwindung ist dennoch nur selten berechnen- bzw. vorhersagbar. Im Normalfall muss sie durch Versuche ermittelt werden.
- Mit einem Hilfsholm lässt sich die Torsionsfederung des Flügels einstellbar gestalten (siehe Fußnote ). Beeinflussungsmöglichkeiten per Fernsteuerung sind nicht bekannt. Der Übergang zu einer mittlerem Gleitflug-Verwindungsstellung ist möglich.

## d) Aeroelastisch gesteuerte Flügelverwindung

- Arm- und Handflügelabschnitt sind federnd und durch ein Gelenk verbunden. Infolge sich ändernder Auftriebs- und Beschleunigungskräfte erfolgt eine Abwinkelung des Handflügels gegenüber dem Armflügel nach oben oder unten (aeroelastisch). Diese Bewegung wird zur Steuerung der Verwindung einzelner Flügelabschnitte oder des ganzen Flügels genutzt (siehe Gelenkschlagflügel<sup>29</sup> vom **EV6** bis **EV8**).
- Es erfolgt automatisch eine gewisse Anpassung der Verwindungsstärke an unterschiedliche große Anströmwinkel. Aber während einer Schlagperiode beeinflussen zeitweise Beschleunigungskräfte der Flügelmasse die Flügelverwindung.

---

<sup>27</sup> siehe <<http://www.ornithopter.de>>

<sup>28</sup> siehe <<http://www.ornithopter.de/herzog.htm>>

<sup>29</sup> Rübiger Horst: Gelenkschlagflügel. Siehe <<http://www.ornithopter.de/gelenk.htm>> 2006

- Der Flügel Aufbau und die theoretische Festlegung seiner Verwindung sind sehr komplex. Die Vorhersage bzw. Berechnung der Flügelverwindung erfordert gute Kenntnisse der Aerodynamik und der Technischen Mechanik.
- Die Verwindung lässt sich einstell- und fernsteuerbar gestalten. Der Übergang zu einer mittlerem Gleitflug-Verwindungsstellung ist möglich.

#### e) Fernsteuerbare Flügelverwindung

- Die Verwindung ist mit einem ferngesteuerten Servoantrieb regulierbar.
- Die Regulierung geschieht durch Verstellung der Verwindungsendlagen und/oder der Verwindungskräfte. Dies kann längs der ganzen Spannweite bzw. während einer ganzen Schlagperiode erfolgen - oder nur in Abschnitten davon.
- Bisher wurde das nur ansatzweise, z. B. beim **EV2** und **EV8**<sup>30</sup> praktiziert.

Die **gesamte Flügelverwindung** an einem Ort des Schlagflügels setzt sich meist - gewollt oder ungewollt - aus Anteilen mehrerer Verwindungsverfahren zusammen. Längs der Spannweite werden auch gezielt unterschiedliche Methoden eingesetzt.

Bei allen Methoden beeinflussen Massenbeschleunigungskräfte des Flügels bzw. seiner Einzelteile die Flügelverwindung - insbesondere bei aeroelastischer Verwindung.

Technische Verfahren die bei einer Schlagflügelausführung bewusst zur Erzeugung der Flügelverwindung eingesetzt werden, können bei einem anderen Verwindungskonzept einen ungewollten Einfluss haben. Dazu zählen z. B.

- zu kleine oder zu große Steifigkeit von einzelnen Bauteilen gegen Torsion, Biegung oder Dehnung,
- Kräfte in der Bespannung (z.B. Längs- oder Diagonalspannungen),
- Spiel oder Reibung der beweglichen Flügelteile,
- Massenträgheitskräfte.

Hat man ein Flügelkonzept mehrerer Male in die Praxis umgesetzt und Erfahrung gesammelt, lassen sich diese unerwünschten Effekte aber meist verringern oder sogar sinnvoll nutzen.

---

<sup>30</sup> Rübiger Horst: Gelenkschlagflügel. Siehe <<http://www.ornithopter.de/daten/gelenk.pdf>> 2006