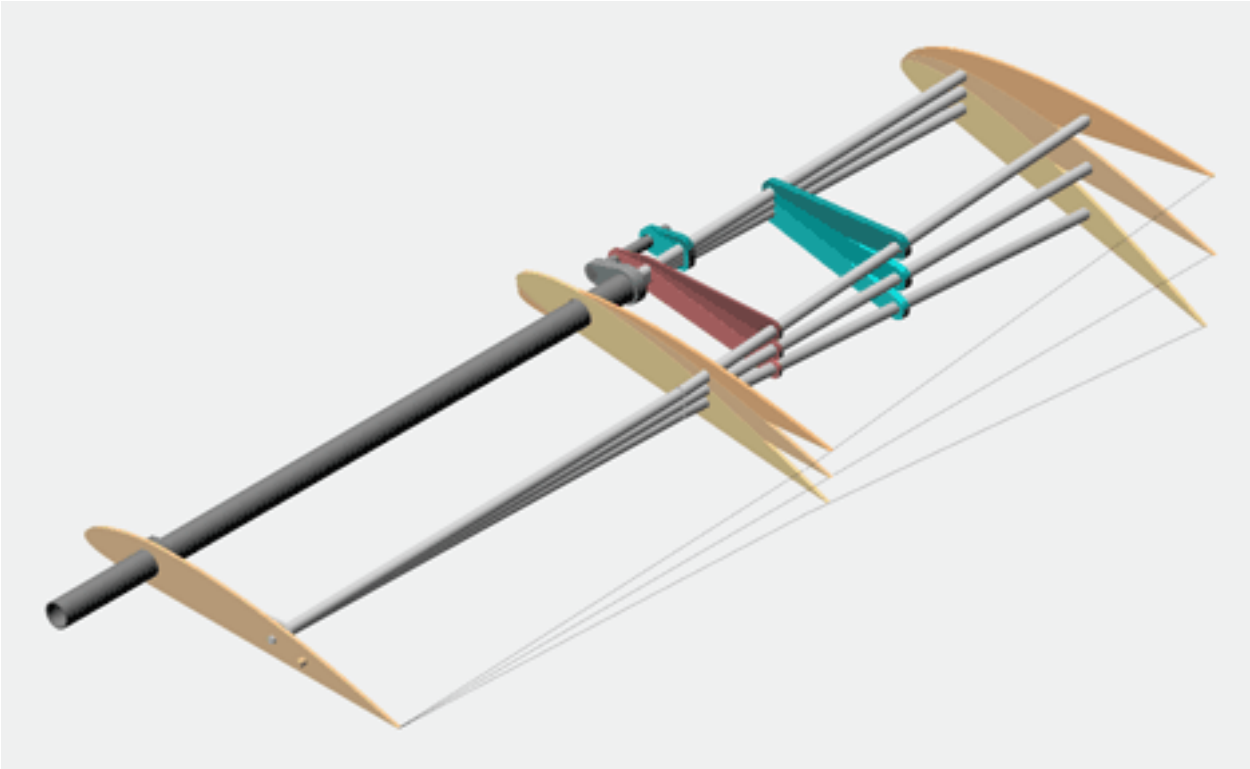

Gelenkschlagflügel

Horst Räbiger

Es werden hier Zielvorstellungen und technische Verfahren zur Gestaltung technischer Schlagflügel skizziert. Sie wurden im Zuge der **EV**-Modellreihe entwickelt.

Version 1.1

Inhaltsverzeichnis

1 Gestaltungsmerkmale eines technischen Schlagflügels 2

1.1 Allgemeine Gestaltungsmerkmale 2

1.2 Schlagflügelspezifische Anforderungen 3

1.2.1 Stark veränderliche Auftriebsverteilungen 3

1.2.2 Flügelprofil 4

1.2.3 Flügelumriss 5

1.2.4 Flügelverwindung 7

1.2.5 Lage und Richtung der Schlag- und der Verwindungsachsen 8

1.2.6 Dynamik des Schlagflügels 9

1.2.7 Zusammenstellung der Schlagflügeleigenschaften 10

2 Profilschlagflügel mit elastischer Bespannung 11

2.1 Grundlegendes Flügelgerüst 11

2.2 Bespannfolie 13

2.3 Nasenschale 13

2.4 Endleiste 14

2.5 Eigenschaften 15

3 Gelenkschlagflügel der EV-Modelle 15

3.1 Einstellbare Verwindung durch Aufteilung der Holmaufgaben [1] 15

3.1.1 Übersetzung der Verwindung 18

3.2 Schlagflügel mit Verwindungsanstieg 19

3.2.1 Gepfeilte Anordnung des Hilfsholms [1] 19

3.2.2 Gelenkig gelagerter Handflügel-Hilfsholm [1] 21

3.2.3 Schlagweite vergrößernder Holm [1] 22

3.3 Aeroelastisch gesteuerte Verwindung 24

3.3.1 Gelenkschlagflügel [1] 24

3.3.2 Handflügel-Federung [1] 26

3.3.3 Gelenkschlagflügel mit gesteuerter Handflügelverwindung [1] 29

3.3.4 Schnurzug zur Beeinflussung der Flügelverwindung [1] 34

3.3.5 Gelenkschlagflügel mit zur Flügelspitze hin ansteigender Verwindung [1] 37

[1] Dieses technische Verfahren wurde im Zusammenhang mit den EV-Schlagflügelmodellen entwickelt.

1 Gestaltungsmerkmale eines technischen Schlagflügels

Schlagflügel mit den hier beschriebenen Merkmalen sind vor allem für große und gewichtige Ornithopter geeignet. Das gilt speziell für solche, die sich zwar mit relativ langsamem Flügelschlag, aber dennoch schnell durch die Luft fortbewegen. Sie fliegen dabei im Horizontalflug oder im flachen Steigflug nach dem Prinzip „Fliegen mit dem Auftrieb“. Die dazugehörige Schlagflügeltheorie[2] wird als weitgehend bekannt vorausgesetzt.

Die Schlagflügel der **EV**-Modellreihe[3] wurden nach diesen Merkmalen konzipiert. Auf Ornithopter für kleine Reynolds Zahlen bzw. für das „Fliegen mit dem Schub“ sind diese Regeln nur sehr bedingt anwendbar.

1.1 Allgemeine Gestaltungsmerkmale

Um bei einem herkömmlichen Tragflügelmodell mit starren Flügeln gute Flugeigenschaften zu erreichen, muss man sich über eine ganze Reihe von Gestaltungsmerkmalen Gedanken machen. Das gilt beispielsweise für

- Größe der Flügelfläche, Flächenbelastung
- Spannweite, Streckung, Umrissform
- Profil bzw. Profilverlauf längs der Spannweite
- Profil-Veränderungsmöglichkeiten (z.B. Wölbklappen)
- Auftriebsverteilung bzw. Verlauf des Anstellwinkels längs der Spannweite
- Flächenfestigkeit bzw. Steifigkeit
- Gewicht und Gewichtsverteilung
- Oberfläche, Rauhigkeit, Bespannung, Beschichtung, Schutz gegen raue Betriebsbedingungen
- Flügelteilung für den Transport

In bestimmten Fällen sind auch Flügelknicke, Flügelpfeilungen, Bremsklappen, Winglets, Endscheiben, Grenzschicht-Beeinflussungsmaßnahmen usw. zweckmäßig.

Bei Schlagflügeln sind generell die gleichen Merkmale festzulegen. In vielen Punkten werden sich aber die konstruktiven Lösungen der beiden Flügelkategorien unterscheiden. Das gilt insbesondere für die folgenden, schlagflügelspezifischen Merkmale, die von unterschiedlichen Auftriebsverteilungen, schnell wechselnden Bewegungen und entsprechenden Anströmrichtungen beeinflusst werden. Über die zweckmäßige Gestaltung der übrigen, oben aufgezählten Merkmale gibt es bisher für Schlagflügel nur wenige oder gar keine gesicherten Aussagen. Sie lassen sich aber nach ähnlichen Überlegungen festgelegen, wie sie von herkömmlichen Tragflügeln her bekannt sind.

---

[2] Räbiger Horst: Wie Ornithoper fliegen. Siehe <http://www.ornithopter.de/daten/handbuch.pdf> 2001

[3] siehe <http://www.ornithopter.de>

1.2 Schlagflügelspezifische Anforderungen

1.2.1 Stark veränderliche Auftriebsverteilungen

Im Gegensatz zum herkömmlichen Tragflügel, sind beim Schlagflügel, mit seinen ständig wechselnden Schlagrichtungen, stark veränderliche Auftriebsverteilungen zu berücksichtigen. Es ist daher zweckmäßig, sich bei einer Neuentwicklung zunächst eine Vorstellung davon machen, wie der Verlauf des Auftriebs längs der Spannweite in den einzelnen Schlagtakten aussehen soll. Das Ergebnis dieser Überlegungen ist bei der Festlegung weiterer Schlagflügelparameter, insbesondere bei der Auswahl des Profils, der Flügelverwindung und der Antriebsdimensionierung recht nützlich. In folgendem Bild sind die grundsätzlichen Verteilungsformen in den einzelnen Arbeitstakten dargestellt.

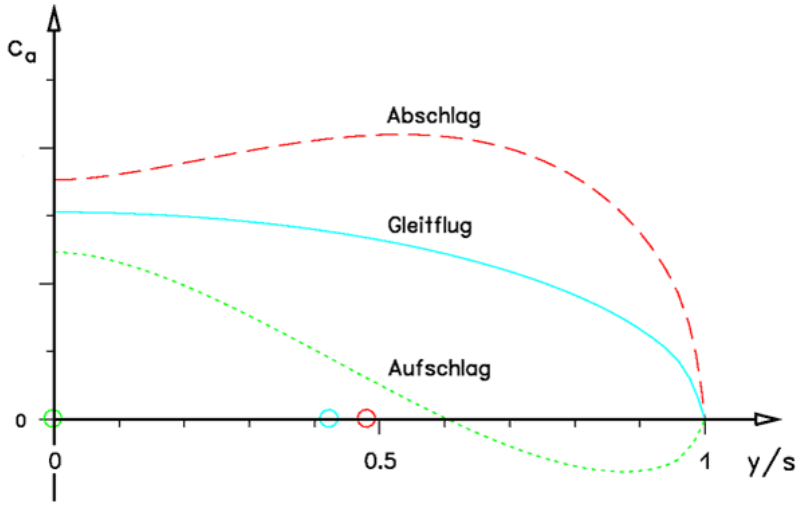

Bild 1.1 Grundsätzliche Auftriebsverteilungen für Schlagflügel mit begrenzter Spannweite längs der Halbspannweite und in Schlagmitte. Die Lage der Druckpunkte ist durch kleine Kreise markiert ($c_{\Gamma G} = 8$ $c_{\Gamma 1} = 0$ $c_{\Gamma 2} = 9{,}1$ Details siehe Handbuch).

Das zum Handbuch gehörende, kleine Rechenprogramm „Orni 1“ kann bei der Suche nach geeigneten Auftriebsverteilungen helfen. Mit etwas Erfahrung in der herkömmlichen Tragflügeltheorie ist es aber sogar schon hilfreich, die Auftriebsverteilungen der einzelnen Arbeitstakte nur schätzungsweise von Hand aufzuzeichnen. Selbst dann lassen sich noch gängige Literaturaussagen und Angaben über Schlagflügel, die oft nur das Geschehen an einem einzigen Flügelort betreffen, leichter einordnen und gewichten.

Beim **Gleitflug** herkömmlicher Tragflügel mit begrenzter Spannweite hat die elliptische Auftriebsverteilung den kleinsten induzierten Widerstand. Auch bei Ornithoptern wird man daher in dieser Flugphase eine derartige Verteilungsform anstreben. Deutliche Abweichungen davon gibt es dagegen bei den Auftriebsverteilungen von Auf- und Abschlag.

Beim **Aufschlag** ist der Auftrieb insgesamt kleiner als im Gleitflug. An der Flügelspitze wird er in der Regel negativ. Ob bei diesem Takt der Arbeitswiderstand im rumpfnahen Auftriebsbereich oder der Vortrieb im rumpffernen Abtriebsbereich überwiegt, hängt von der Form der Auftriebsverteilung ab.

Beim **Abschlag** ist der Auftrieb größer als im Gleitflug und mehr zur Flügelspitze verlagert. Auf diese Weise wird bei diesem Arbeitstakt generell längs der ganzen Spannweite positiver Auftrieb und Vortrieb erzeugt.

Um über eine ganze Schlagperiode gesehen möglichst viel Schub zu erzielen, muss der Unterschied zwischen den Auftriebsverteilungen von Auf- und Abschlag – insbesondere im Flügelspitzenbereich - möglichst groß gemacht werden. Bei entsprechenden Bemühungen wird der Aufschlagabtrieb im Flügelspitzenbereich immer weiter ins Negative reichen.

Gleichzeitig muss im zeitlichen Mittel einer Schlagperiode aber immer genau so viel positiver Auftrieb erzeugt werden wie im Gleitflug. In vorstehendem Diagramm kann man dies an Hand der Flächen unter den Kurvenzügen abschätzen. Die Abweichungen von Aufschlag und Abschlag gegenüber der Gleitflugverteilung müssen dafür etwa gleich groß sein. Aber auch die Fluggeschwindigkeit im Kraftflug und das Taktzeitverhältnis von Auf- und Abschlag beeinflussen die Auftriebserzeugung.

Darüber hinaus kann man den Schub auch noch durch eine höhere Schlagzahl bzw. einen größeren Schlagwinkel weiter steigern. Die damit rasch zunehmenden Flügelbeschleunigungskräfte setzen dem aber Grenzen. Außerdem nimmt wegen der sich ändernden Richtung der Luftkräfte bei höherer Schlagzahl oder mit steigendem Schlagwinkel auch der auf das Modell wirkende Auftrieb ab. Und mindestens genau so wichtig wie eine Maximierung der Schuberzeugung, ist eine Minimierung aller Widerstände des Fluggeräts.

Die Variationsmöglichkeiten der Auftriebsverteilung werden vor allem durch die maximal und minimal möglichen Auftriebsbeiwerte des verwendeten Profils begrenzt. Veränderliche Profile eröffnen dabei entscheidende Vorteile.

Die hier nicht näher betrachtete Flugweise „Fliegen mit dem Schub“ stellt recht extreme Anforderungen an die Veränderbarkeit der Auftriebsverteilungen. Zurzeit sind diese praktisch nur mit Membranflügeln zu erzielen.

1.2.2 Flügelprofil

Vergleicht man in vorstehender Abbildung die elliptische Auftriebsverteilung des Gleitfluges mit den Auftriebsverteilungen der beiden Arbeitstakte, so kommt man zu dem Schluss, dass bei Schlagflügeln eigentlich ein deutlich größerer Arbeitsbereich des Profil-Auftriebsbeiwertes erforderlich wäre als bei Tragflügeln. Man muss aber trotzdem mit den gleichen Profilen arbeiten.

Bei Schlagflügeln die mit einer einfachen Membrane bespannt werden, gibt es für die Erweiterung des Profil-Arbeitsbereiches verschiedene Möglichkeiten. Zum einen wechselt eine nicht zu stramm gespannte Membrane - genau wie ein Segel - bei wechselnder Anblasrichtung selbsttätig die Wölbungsrichtung. Schon alleine durch den damit verbundenen Auftriebsvorzeichenwechsel wird der c_a-Arbeitsbereich beträchtlich erweitert. Diesen Arbeitsbereich kann man dann durch geeigneten Membranzuschnitt, Membranspannung, Art der Membranbefestigung, Membranelastizität, besondere Segellatten usw. noch weiter vergrößern[4].

---

[4] Räbiger Horst: Schlagflügelkonstruktionen. Siehe <http://www.ornithopter.de/daten/fluegel.pdf > 2006

Bei dicken, auf der Flügelober- und -unterseite bespannten „Profilschlagflügeln“ sind dagegen die Möglichkeiten noch sehr begrenzt. Die den c_a-Arbeitsbereich vergrößernden Eigenschaften von Vorflügeln und Wölbklappen sind zwar bekannt. Auch die zirkulationsverändernden Möglichkeiten einer variablen Flügeltiefe wären hilfreich. Entsprechende konstruktive Lösungen für Schlagflügel fehlen aber noch. Da man bei Profilschlagflügeln also bis auf weiteres mit dem c_a-Arbeitsbereich starrer Profile auskommen muss, bleiben auf diesem Sektor nur noch wenige Maßnahmen zur Schubsteigerung übrig.

Grundsätzlich sollte man bei der Profilauswahl das Augenmerk auf einen großen c_a-Arbeitsbereich richten. In der Regel wird dies zu dicken Profilen mit großem Nasenradius führen. Entsprechende, schwach gewölbte Profile werden dann auch in einem begrenzten Bereich mit negativen Auftriebsbeiwerten ohne Strömungsabriss arbeiten und so die Aufschlagbedingungen erfüllen.

Bei gegebenem c_a-Grenzwert des Profils kann man den c_a-Spielraum für den Abschlag noch erweitern, indem man im Gleitflug einen relativ niedrigen, mittleren Auftriebsbeiwert als Ausgangsbasis verwendet. Das geht dann allerdings zu Lasten der Aufschlagmöglichkeiten.

In diesem Fall erhöht sich die Fluggeschwindigkeit, aber auch die Widerstände steigen an. Bei gegebener Modellmasse ist es in diesem Zusammenhang vorteilhaft, die mittlere Flügeltiefe zu vergrößern und so die Fluggeschwindigkeit wieder zu reduzieren. Maßgebend für vorstehend abgebildeten Auftriebskraftverlauf ist ja letztendlich der Zirkulationsverlauf und der wird aus dem Produkt aus Auftriebsbeiwert, Flügeltiefe und Anströmgeschwindigkeit bestimmt. Große Flügeltiefen sind also für die Schuberzeugung und damit auch für die Anpassung an unterschiedliche Flugsituationen oft vorteilhaft.

Auch die Anwendung verschiedener, dem örtlichen Bedarf längs der Halbspannweite angepasste Profile, verbessern die Ausgangslage zur Schuberzeugung. Die Profilauswahl erfolgt dabei an Hand von Auftriebsverteilungen, wie sie in Bild 1.1 abgebildet sind.

Darüber hinaus ist es sehr empfehlenswert, bei der Profilauswahl die Druckpunktwanderung längs der Flügeltiefe bzw. den Drehmomentverlauf im Zusammenhang mit der Lage der Verwindungsachsen im Auge zu behalten (siehe Bild 1.4).

1.2.3 Flügelumriss

Bei der Festlegung des Flügelumrisses ist zunächst zu klären, ob die Spannweite begrenzt ist oder nicht. Bei der Beschreibung der Auftriebsverteilung im Abschnitt 1.2.1 wurde stillschweigend eine begrenzte Spannweite voraus gesetzt.

Für nicht begrenzte Spannweite sind andere Auftriebsverteilungen optimal. Dabei geht man nicht mehr von einer elliptischen, sondern von einer mehr glockenförmigen Auftriebsverteilung im Gleitflug aus. Sie verbindet die Vorteile eines relativ geringen Drehmoments um die Schlagachse mit einem besonders kleinen induzierten Widerstand.

Zur Erleichterung der Profilauswahl wird man bei der Festlegung des Flügelumrisses vor allem die Auftriebsverteilung des Abschlags mit seinen Maximalanforderungen als Grundlage verwenden.

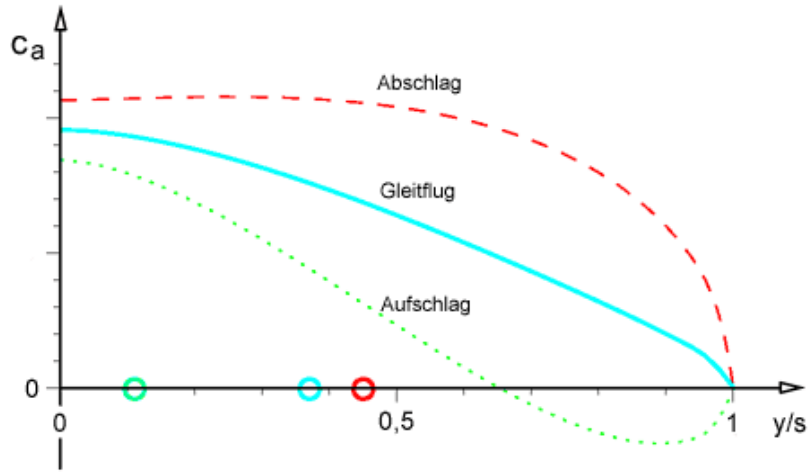

Bild 1.2 Grundsätzliche Auftriebsverteilungen für Schlagflügel mit nicht begrenzter Spannweite in Schlagmitte ($c_{\Gamma G} = 7$ $c_{\Gamma 1} = 2$ $c_{\Gamma 2} = 8{,}4$).

Vorteilhaft erscheint aus derzeitiger Sicht ein Flügelumriss, bei dem das Produkt aus örtlicher Flügeltiefe mal örtlichem c_a-Grenzwert des Profils etwa dem Verlauf der geplanten Abschlag-Auftriebsverteilung gleicht. Etwas Reserve in Form einer größeren Flügeltiefe kann dabei aber nicht schaden.

Durch die Verteilung der Reserve längs der Halbspannweite lässt sich wiederum beeinflussen, wo die Strömung mit großer Wahrscheinlichkeit zuerst abreißt. Bei herkömmlichen Tragflügeln hat es sich als vorteilhaft herausgestellt, wenn der Strömungsabriss zuerst in Spannweitenmitte auftritt. Das Modell bleibt dann bei Strömungsabriss trotz verminderter Leistung weiter steuerbar. Bei Schlagflügeln ist allerdings besonders die Flügelspitze vom Strömungsabriss gefährdet. Das Gewicht einer großen Flügeltiefe stört dort aber womöglich mehr als sie nutzt.

Der Schlagflügelumriss mit begrenzter Spannweite wird also etwa rechteckförmig sein, mit einer kleinen Flächenabnahme im Bereich der Flügelspitze (Bussardflügel). Bei nicht begrenzter Spannweite erfolgt zweckmäßig eine starke Zuspitzung der Flügelfläche ab der Halbspannweitenmitte nach außen hin (Möwenflügel).

Für einen eventuell angestrebten Gangartwechsel[5] zwischen dem Fliegen mit dem Auftrieb und dem Fliegen mit dem Schub wären zusätzlich entsprechende c_a-Reserven bzw. größere Flügeltiefen in den Problemzonen des Flügels zu berücksichtigen. Das widerspricht allerdings der Forderung nach einem geringen induzierten Widerstand bzw. einer großen Flügelstreckung. Vorhersagen oder Erfahrungen über entsprechende Kompromisslösungen liegen darüber aber nicht vor.

Anmerkung

In dem zum Handbuch gehörenden Rechenprogramm „Orni 1“ ist der Flügeltiefenverlauf rechteckförmig vorgegeben. Er lässt sich aber mit einfachen Mitteln ein weinig anpassen. Dazu werden nur in der Zeile „Flügeltiefe“ $l_{(y)}$ an den einzelnen Flügelorten die gewünschten Flügeltiefen eingetragen. Dabei sind aber nur sanfte Übergänge der Flügeltiefe vorzusehen. Den Einfluss einer Flügelpfeilung kann das Programm aber nicht berücksichtigen.

[5] Horst Räbiger: Gangartwechsel der Ornithopter. Siehe <http://www.ornithopter.de/daten/gangart.pdf> 2005

1.2.4 Flügelverwindung

Der Unterschied zwischen einem Trag- und einem Schlagflügel ist in Bezug auf die Flügel-Torsionssteifigkeit besonders krass. Infolge der am Schlagflügel stark unterschiedlichen Anströmrichtungen unterscheiden sich die daran anzupassenden Einstellwinkelverläufe der beiden Arbeitstakte erheblich. Der Schlagflügel muss also - im völligen Gegensatz zum Tragflügel - relativ leicht verwindbar sein. Das aber nicht etwa in beliebiger Weise, sondern ganz gezielt. Schon vom herkömmlichen Tragflügel ist bekannt, dass seine Flugleistung deutlich nachlässt, wenn der Anstellwinkel beispielsweise nur 3 Grad vom Optimum abweicht.

Um eine ungefähre Vorstellung von den erforderlichen Einstellwinkeländerungen längs der Halbspannweite zu bekommen, ist im folgenden Bild der theoretische Verlauf des Einstellwinkels für vorstehenden Auftriebsverteilungen mit dem Profil CLARK-Y (11.3) abgebildet. Natürlich ist dieser Verlauf stark von der Flug- und der Schlaggeschwindigkeit abhängig, darüber hinaus auch noch vom Profil sowie verschiedenen anderen Faktoren. Nachfolgende Abbildung kann aber doch einen groben Anhaltspunkt liefern. Auch mit dem Rechenprogramm „Orni 1“ lassen sich solch theoretische Flügelverwindungsverläufe beschreiben.

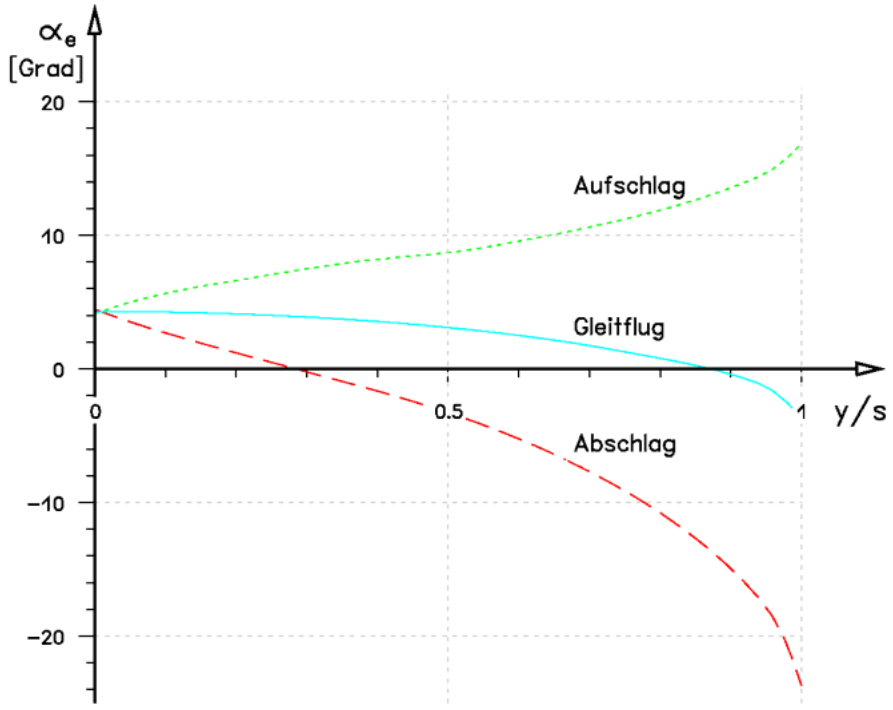

Bild 1.3 Beispiel für die verschiedenen Einstellwinkelverläufe längs der Halbspannweite in Schlagmitte, unter den Bedingungen der Auftriebsverteilungen von Bild 1.1 (mit beschränkter Spannweite).

Letztendlich wird mit diesem Diagramm die vom Vogelflug bekannte Regel bestätigt, dass beim Aufschlag der Einstellwinkel zur Flügelspitze hin größer und beim Abschlag kleiner werden muss. Mir erscheint aber auch wichtig, dass die Flügelverwindung im Bereich der Flügelspitze deutlich ansteigen soll und zumindest hier an der Flügelwurzel keine Flügelverdrehung stattfindet. Nur bei sehr hohen Schubanforderungen ist eine Flügelwurzelverdrehung sowie eine Neigung der Schlagebene angebracht (siehe Handbuch, Abschnitt 6.6, 6.7 und 8.8).

Diese recht allgemeinen Anforderungen an die Verwindung in Schlagmitte sollen hier genügen. Ob sich dann der Flügel passiv, aktiv, vom Antrieb gesteuert oder aeroelastisch an die unterschiedlichen Anströmrichtungen während einer Schlagbewegung anpasst, ist zunächst nicht so wichtig – Hauptsache er tut es. Auch ob neben der Flügelverwindung zusätzlich eine Flügelverdrehung anzuwenden ist, soll hier offen bleiben. Einige der nachfolgenden Schlagflügelsysteme beinhalten aber auch diese Möglichkeit.

Weitere wichtige Gestaltungspunkte der Flügelverwindung sind deren **Anpassungsmöglichkeiten** vor und während des Fluges. Eine ganz bestimmte Verwindung zu erlangen, ist ja ohne Einstellmöglichkeiten bautechnisch recht schwierig. Außerdem wurde mit den eingangs aufgeführten Auftriebsverteillungen nur ein ganz bestimmter Kraftflugzustand beschrieben. In der Flugpraxis soll das Schlagflügelmodell aber viele Flugzustände meistern. Neben dem einfachsten Flugzustand, den horizontalen Reiseflug, zählen dazu vor allem Steigflüge mit unterschiedlichen Flügelschlagfrequenzen und die Umschaltung auf den Gleitflug. Auch ungewollte Flugsituationen mit womöglich kleineren Fluggeschwindigkeiten gehören dazu.

1.2.5 Lage und Richtung der Schlag- und der Verwindungsachsen

Schlag- und Verwindungsachsen werden meist einfach nach folgendem Schema festgelegt: Die Flügelschlagachse liegt an der Flügelwurzel, parallel zur Rumpfachse. Senkrecht dazu und weit vorn im Flügel wird die Flügelverwindungsachse angeordnet. Auch in der Vogelflugtheorie und bei früheren Schlagflügeln wird fast immer so getan, als ob nur diese Konfiguration infrage kommt. Die einzelnen Bewegungen sind halt dabei am leichtesten überschaubar. Schief im Raum liegende Flügelachsen bieten aber sicher noch eine ganze Reihe weiterer Möglichkeiten. Die Schlagflügelstudie von Karl Herzog[6] ist dafür ein erstes Beispiel.

Dass auch die Lage der Verwindungsachse gegenüber der Flügelvorderkante sehr bedeutsam ist, soll nachstehendes Bild verdeutlichen. Darin ist die Größe des Normalkraftbeiwertes c_n (rot) im Zusammenhang mit der Lage der Auftriebs- bzw. Normalkraft längs der relativen Flügeltiefe „e/l“ dargestellt. Gleichzeitig wurden damit die Drehmomente M_D bezogen auf drei verschiedene Drehpunkte entlang der Flügeltiefe ermittelt.

Insbesondere der Drehmomentverlauf mit dem Drehpunkt beim ¼-Punkt des Profils ist recht aufschlussreich (blau). Er zeigt, dass bei diesem relativ weit hinten liegenden Drehpunkt das Drehmoment um die Flügelverwindungsachse mit zunehmendem Auftriebs- bzw. Normalkraftbeiwert c_n auch kleiner werden kann (Gefahr durch Flügelflattern). Es ändert sich gegebenenfalls sogar die Drehmomentrichtung.

Mit dem Drehpunkt bei 0,15·l steigt das Drehmoment in diesem Beispiel dagegen kontinuierlich auf etwa den doppelten Anfangswert an. Liegt die Drehachse im Flügelnasenbereich (bei 0,05·l), so ist der Drehmomentanstieg sogar deutlich überproportional zur Druckpunktwanderung.

---

[6] Räbiger Horst: Schlagflügelkonstruktionen.
Siehe <http://www.ornithopter.de/daten/fluegel.pdf> Kapitel 2.2, 2006

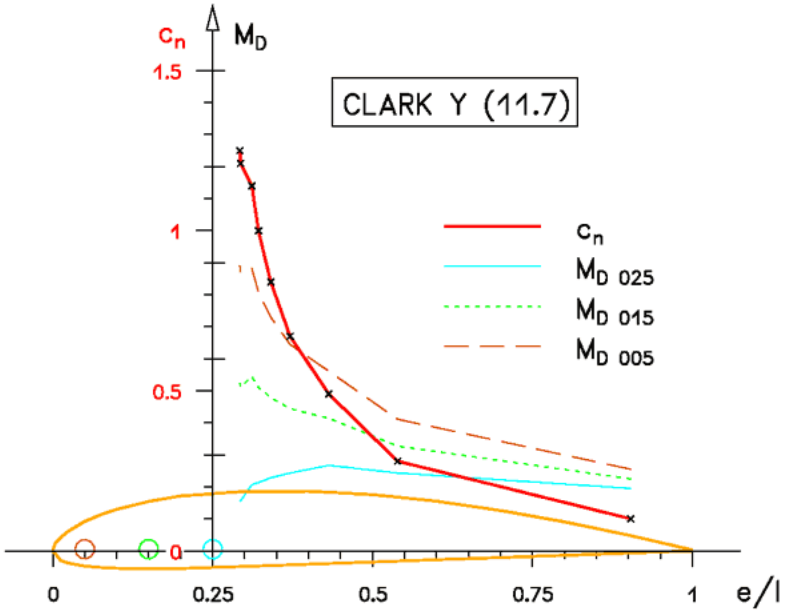

Bild 1.4 Drehmomentverlauf M_D längs der Flügeltiefe bei drei verschiedenen Drehpunkten. Die Lage dieser Drehpunkte ist durch kleine Kreise auf der x-Achse markiert.

Bei Profilen deren Drehmomentbeiwerte nicht bekannt sind, ist also Vorsicht geboten. Will man einigermaßen sicher gehen, dass die Verwindungskräfte mit zunehmendem Auftrieb auch wirklich ansteigen, sollte man die Verwindungsachse des Flügels soweit wie möglich nach vorne verlegen. Dass dies wiederum Probleme mit der Flügelflächenträgheit bringen kann (Überschwingen des Einstellwinkels), ist bei den Schlagflügelmodellen **EV6** und **EV7** zusehen.

1.2.6 Dynamik des Schlagflügels

Während der Flügelschlagbewegung wird die Masse des Schlagflügels im Bereich der oberen und unteren Endlage immer wieder abgebremst und in Gegenrichtung beschleunigt. Dabei wirken relativ große dynamische Kräfte. Sie müssen entweder mechanisch oder aerodynamisch mit entsprechendem Kraftaufwand ausgeglichen werden. Dies ist ein recht bedeutender Faktor bei der Konstruktion der Schlagflügel und des Antriebs.

Diese dynamischen Kräfte werden bei den meisten bisher bekannten Schlagflügelmodellen scheinbar völlig unbeachtet gelassen. Nur selten ist ein Hinweis darauf zu finden. Dies lässt sich eigentlich nur damit erklären, dass es sich fast immer um sehr kleine Schlagflügelmodelle handelt, bei denen die Flügelkräfte sowieso nicht theoretisch ermittelt werden. Mechanisch beanspruchten Teile werden in diesen Fällen einfach großzügig überdimensioniert. Moderne Antriebe bringen die erforderlichen Beschleunigungsenergien dann ohne Probleme auf. Bei großen und gewichtigen Modellen darf die Dynamik des Schlagflügels aber nicht unbeachtet bleiben.

Ganz allgemein gilt: das Massenträgheitsmoment eines kleinen Teilchens steigt quadratisch mit seinem Abstand von der Drehachse. Auf den Schlagflügel angewandt kann man daraus ableiten, dass sich bei großem Abstand von der Drehachse schon eine kleine Masse deutlich auf die Flügelkräfte bemerkbar macht. Man sollte also unbedingt bestrebt sein, weit von der Achse entfernte Teile des Schlagflügels besonders leicht zu bauen – möglichst sogar

„federleicht“. Das gilt sowohl bezogen auf die Schlagachse an der Flügelwurzel, als auch bezogen auf die Drehachse, die meist vom Flügelholm gebildet wird.

Mir selbst ist dieser Leichtbau bei den **EV**-Modellen nur recht unzureichend gelungen. Die Schlagflügel der **EV**-Modelle waren immer relativ schwer. Dafür war die Schlagbewegung dieser Modelle sehr langsam (Spannweite ca. 3 Meter, Flügelmasse beider Flügelhälften zusammen ca. 0,9 kg, Schlagperiodendauer 0,7 sec). Trotz der langsamen Flügelbewegung lagen aber die vom Antrieb zu überwindenden Beschleunigungskräfte in der gleichen Größenordnung wie die Auftriebskräfte – oder waren sogar größer.

Nun lassen sich zwar Beschleunigungskräfte in Schlagrichtung relativ einfach mit so genannten „Endlagenfedern“ auffangen (siehe Handbuch Abschnitt 5.3 und Modell **EV7**[7]). In der unteren Schlagendlage wurden auch schon aerodynamische Kräfte bewusst für diesen Zweck eingesetzt (siehe Modell **EV8**[8]). In Drehrichtung des Flügels fehlen aber noch geeignete, konstruktive Lösungen. Die in diesem Zusammenhang von mir verwendeten Dämpfungszylinder innerhalb der Flügel sind sicher noch keine optimale Lösung. Sie kostet Energie. Außerdem ließ sich das Überschwingen des Anstellwinkels in der oberen Flügelendlage damit nur sehr begrenzt beeinflussen (siehe Modell **EV6** und **EV7**).

Da man die Flügelmasse leider nicht beliebig reduzieren kann, ist es in jedem Falle vorteilhaft, sie möglichst symmetrisch zur Flügelverwindungsachse anzuordnen. Dadurch vermeidet man das Überschwingen des Anstellwinkels. Dazu aber vor der Verwindungsachse zusätzliche Gewichte anzubringen, erscheint mir aber auch kein geeigneter Weg zu sein.

1.2.7 Zusammenstellung der Schlagflügeleigenschaften

Insgesamt sollte ein Schlagflügel etwa folgende Eigenschaften aufweisen.

- Flügelprofil und Flügelumriss sind geeignet für einen großen c_a-Arbeitsbereich.
- Geringer Profil- und induzierter Widerstand, sowie ein strömungsgünstiger Rumpf-Flügelübergang.
- In gezielter Weise leicht verwindbar, ohne Neigung zum Flattern.
- Einstellmöglichkeiten der Verwindung, auch nach Fertigstellung des Flügels.
- Geringes Massenträgheitsmoment um die Schlag- und um die Verwindungsachse.
- Anpassungsmöglichkeit der Flügelverwindung bei gestreckt stehendem Flügel an optimale Gleitflugeinstellungen.

Darüber hinaus ist eine Beeinflussungsmöglichkeit der Flügelverwindung per Fernsteuerung erwünscht.

---

[7] Horst Räbiger: Wie Ornithopter fliegen. Siehe <http://www.ornithopter.de/daten/handbuch.pdf> 2001

[8] siehe <http://www.ornithopter.de/funktion.htm>

2 Profilschlagflügel mit elastischer Bespannung

Für gezielt verwindbare Schlagflügel mit technischem Profil und unter zumindest teilweiser Einhaltung der übrigen vorstehender genannter Schlagflügelanforderungen, gibt es bisher nur wenige konstruktive Möglichkeiten. Nach meiner Einschätzung sind dafür nur Schlagflügel nach dem Scherverwindungsprinzip[9], die Schalenflügelbauweise und Profilschlagflügel mit elastischer Bespannung geeignet. Letztere wurden zusammen mit den **EV**-Modellen entwickelt und sollen hier näher beschrieben werden.

2.1 Grundlegendes Flügelgerüst

Die Herstellung eines Profilschlagflügels mit elastischer Bespannung lässt sich in Kurzform wie folgt beschreiben. Man wählt zunächst einen runden Hauptholm aus. Diesen verbindet man fest mit der Flügelwurzelrippe. An der Flügelspitze wird die Endrippe am Hauptholm leicht drehbar montiert, im Übrigen aber in ihrer rechtwinkeligen Lage zum Holm gehalten. Damit ist das grundlegende Flügelgerüst bereits fertig.

Alle Zwischenrippen werden nun lose zwischen den Endrippen aufgereiht und alles zusammen mit der elastischen Folie bespannt. Man erhält so einen leicht verwindbaren Flügel.

Bild 2.1 Prinzip eines verwindbaren Profilschlagflügels mit lose aufgereihten Flügelrippen, ausgenommen Flügelwurzelrippe.

Um nicht nur eine konstante Verwindung längs der Spannweite zu erzielen, lässt sich dieses Flügelgerüst in geeigneter Weise abzuwandeln. Das wird in den nachfolgenden Abschnitten noch näher beschrieben. Hier soll vorher aber noch auf einige Besonderheiten der Bauweise mit elastischer Bespannung eingegangen werden.

Damit bei einer elastischen Bespannung das Einfallen zwischen den Flügelrippen nicht zu groß wird, muss man mit relativ kleinem Rippenabstand arbeiten (hier ca. 50 mm).

---

[9] Horst Räbiger: Schlagflügelkonstruktionen. Siehe <http://www.ornithopter.de/daten/fluegel.pdf> 2006

Bild 2.2 Schlagflügelmodell EV7 (1989) mit einer Spannweite von 3,14 m und mit elastischer Bespannung.

Die Flügelrippen erhalten etwa 6 bis 9 mm breite „Aufleimer“. Das ergibt Rippen mit einem Doppel-T-Träger-Querschnitt. Die Folie wird darauf mittels eines dünnen, beidseitig haftenden Klebebandes befestigt.

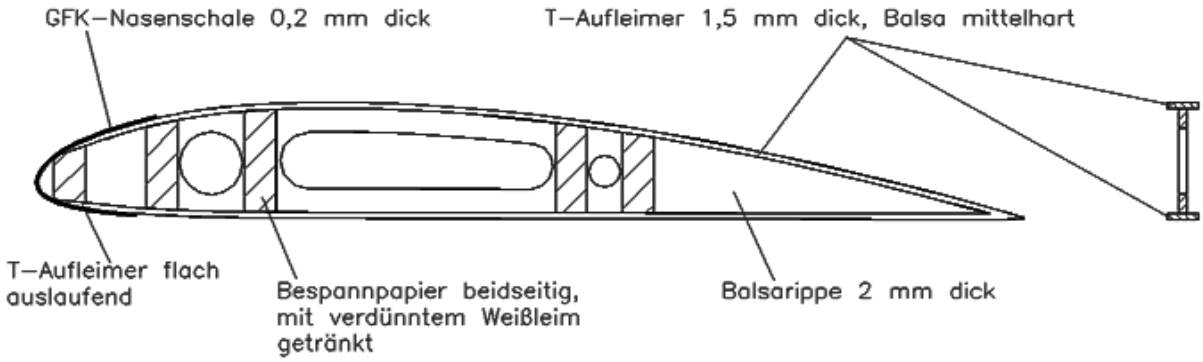

Bild 2.3 Aufbau einer Flügelrippe vom Schlagflügelmodell **EV6**.

Die Hauptzugrichtung der Bespannfolie verläuft längs des Flügels. Zur Aufnahme der Zugspannung wird die Flügelwurzel- und die Flügelspitzenrippe mit etwa 20 mm breiter Oberfläche bzw. Haftfläche ausgestattet. Besonders effektiv sind diese Haftflächen, wenn sie zusätzlich um die Flügelkanten herum reichen oder konvex sind. Die Folie ziehen sich dann dort von alleine auf den Haftklebestreifen fest. Mit den heutigen Klebstoffen (z. B. UHU por) lässt sich das aber womöglich noch verbessern.

2.2 Bespannfolie

Bei den **EV**-Ornithoptermodellen wurde meist die gummiartige, farblose Folie vom Typ „PLATILON U04“ der Firma Plate Bonn GmbH verwendet. Die dünnsten lieferbaren Folienstärken liegen bei 0,050 bzw. 0,025 mm mit einer Dichte von 1,19g / cm^3.

2.3 Nasenschale

Um die Folie faltenfrei zu bekommen, muss man sie auch in Richtung der Flügeltiefe etwas spannen. An der Flügelvorderkante reichen dann aber selbst sehr kleine Rippenabstände nicht mehr aus, ein deutliches Einfallen der Bespannung zu verhindern. Um dieser Profilverfälschung entgegen zu wirken, sind vorne, auf ca. 10% der Flügeltiefe, dünne, so genannte „Nasenschalen“ einzusetzen. Diese werden ca. 0,2 mm dick, aus GFK, über einer Form im Handauflegeverfahren hergestellt. Diese Nasenschalen stützen die Folie von innen ab und gewährleisten mit ihrer Oberflächenkrümmung im strömungsempfindlichen Profilnasenbereich eine sehr gute Formtreue.

Bild 2.4 Form zur Herstellung der Profilnasenschalen (zwischen Hostaphan-Folien).

Durch die offene U-Form der Nasenschalen ist ihr Einfluss auf die Flügelverwindungskräfte praktisch vernachlässigbar. Um die Leichtigkeit der Flügelverwindung nicht zu beeinträchtigen, werden die Nasenschalen auch weder mit der Folie noch mit den Rippen verklebt. Infolge der Adhäsionskräfte liegen sie aber dennoch unverrückbar unter der Folie.

Die Nasenschalen sind exakt entsprechend dem Profil vorzuformen. Insbesondere bei längs der Spannweite veränderlichem Profil ist dies recht aufwändig. Es muss dann für den linken und den rechten Flügel je eine Nasenschalenform hergestellt werden.

Die elastische Folie wird längs der ganzen Halbspannweite in einem Stück, von der Hinterkante, um die Nasenleiste herum und wieder zur Hinterkante gespannt. Die dafür bei den **EV**-Modellen praktizierte Bespanntechnik ist anderweitig[10] beschrieben.

---

[10] Räbiger Horst: Schlagflügelbespannung mit elastischer Folie.
Siehe <http://www.ornithopter.de\daten\gelenk.pdf> 2006

2.4 Endleiste

Ist die Flügellänge durch die Hauptholmlänge fixiert und stehen Flügelwurzel- und Flügelspitzenrippe immer senkrecht dazu, so muss sich bei einer Flügelverwindung die Flügelhinterkante etwas längen können (nur wenige Millimeter). Die Hinterkante liegt ja dann etwa wie ein großer Gewindegang um den Hauptholm und ist entsprechend länger als dieser.

Bei den mit elastischer Folie bespannten **EV**-Ornithoptern wurde anfangs völlig ohne Endleiste gearbeitet (**EV2**, **EV6**). Hinten am Flügel lagen dann die Folien von Flügelober- und Unterseite nur lose aufeinander. Wegen stellenweiser Faltenbildung bzw. sehr lockerer „Hinterkante“ bin ich davon aber wieder abgekommen.

Mit im Querschnitt V-förmigen Endleisten habe ich dagegen recht brauchbare Ergebnisse erzielt (**EV7**). Diese Endleisten wurden am Flügelhandgelenk unterteilt, ohne Klebstoff auf die Rippenenden gesteckt und nur von der Bespannfolie gehalten.

Eine neuere Idee ist die „elastische Endleiste“ aus einer dünnen Angelschnur. Sie passt besser zur elastischen Struktur des Flügels und bringt auch ganz passable Gestaltungsergebnisse. Im Detail sind aber noch Verbesserungen erforderlich.

Bild 2.5 Nylon-Angelschnur als „Endleiste“. Sie wird durch V-förmig vorgeformte GfK-Umleimer an den Rippenenden geführt.
Zur besseren Formgebung und Vereinfachung des Bespannvorgangs wurden Füllstücke aus Balsa eingesetzt. Alternativ dazu ist auch ein V-förmig vorgeformtes GFK-Profil einsetzbar (beide Muster im Bild).

Es wurde auch schon mit einem um die Angelschnur herum geschlagenen, etwa 15 mm breiten Klebefilm experimentiert, der wiederum mit Haftklebestreifen beklebt wurde.

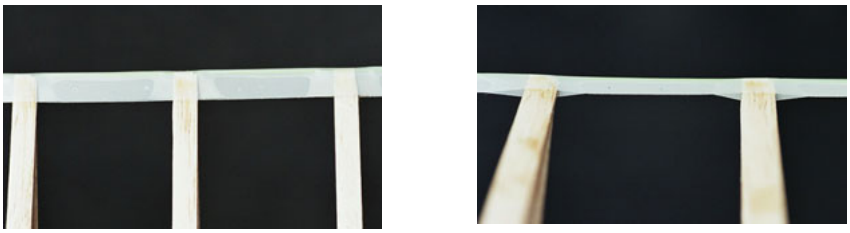

Bild 2.6 Angelschnur, mit Klebefilm umklebt, als elastische Endleiste.

Eine „Endleiste“ die nur aus einem stramm gespannten, der Länge nach umgeschlagenen und miteinander verklebten Filmstreifen besteht, wurde noch nicht ausgeführt. Eine derartige Konstruktion erscheint aber Erfolg versprechend.

2.5 Eigenschaften

Bei der Flächengestaltung mit elastischer Folie ist die starke Folien-Längsspannung ein deutlicher Nachteil. Der Flügel muss praktisch bis zur Flügelspitze hin solide gebaut sein. Nur so kann er die Längsspannung ohne größere, unbeabsichtigte Verformung aufnehmen. Eine besondere Leichbauweise ist daher an der Flügelspitze kaum möglich.

Außerdem verfälschen die Bespannungskräfte womöglich die mit dem Flügelholmgerüst konzipierte Verwindung. Man kann diese Kräfte aber auch - zumindest teilweise – ganz gezielt für eine bestimmte Verwindungsrichtung nutzen.

Das Aufbringen der Bespannung auf den Flügel ist nicht allzu aufwändig[11].

Vorteilhaft an dieser Art der Schlagflügel-Flächengestaltung ist die große Anpassungsfähigkeit an die verschiedensten Schlagflügelformen. Die Profiltreue ist ganz passabel. Außerdem sind derartig elastische Flügel im rauen Flugbetrieb recht robust und ermöglichen ohne große Öffnung in der Bespannung kleinere Eingriffe im Innern des Flügels.

3 Gelenkschlagflügel der EV-Modelle

3.1 Einstellbare Verwindung durch Aufteilung der Holmaufgaben [1]

Mit aeroelastischen Schlagflügeln, bei denen nur der Hauptholm die Flügelverwindung bestimmt, ist es schwierig, eine bestimmte Flügelverwindung zu erzielen. So ein Holm muss ja gleichzeitig Biege- und Verwindungskräfte aufnehmen. Das erschwert die Angelegenheit. Außerdem lässt sich eine ungeeignete Flügelverwindung nur durch einen Flügelneubau korrigieren. Ordnet man aber jeder dieser Kraftarten einen Holm zu, so wird es übersichtlicher und sogar möglich, auch noch nach der Flügelfertigstellung die Verwindung mit einfachen Mitteln zu verändern.

Um so ein Schlagflügelkonzept zu verwirklichen, wird beispielsweise ein im Profilnasenbereich liegender Hauptholm mit rundem Querschnitt fest mit der Flügelwurzelrippe verbunden. Dieser Holm überträgt die Schlagbewegung und die Schlagkräfte auf den Flügel. Er muss also insbesondere biegefest sein.

Im hinteren Teil der Flügelfläche wird parallel zum Hauptholm ein Hilfsholm, ebenfalls mit rundem Querschnitt, angeordnet. Der Hilfsholm soll die Kräfte der Flügelverwindung übernehmen und muss entsprechend torsionselastisch sein.

Am inneren Ende des Hilfsholms setzt rechtwinkelig ein „Torsionshebel“ an. Ebenso im Handflügelbereich einen „Außenhebel“. Letzterer kann als Flügelrippe ausgeführt sein. Er wird

---

[11] Horst Räbiger: Schlagflügelbespannung mit elastischer Folie.
Siehe <http://www.ornithopter.de\daten\gelenk.pdf> 2006

mit einer Bohrung zur Drehlagerung am Hauptholm ausgestattet. Haupt- und Hilfsholmbaugruppe werden nun - am Außenhebel leicht drehbar - zusammengesteckt.

Der innere Torsionshebel soll an der Flügelwurzelrippe nach oben und unten etwas kippbar und in Drehrichtung verstellbar fixiert werden (Ausführung z.B. mit einer Schraube ein einem kreisbogenförmigen Schlitz eines verwindungsweichen Torsionshebels).

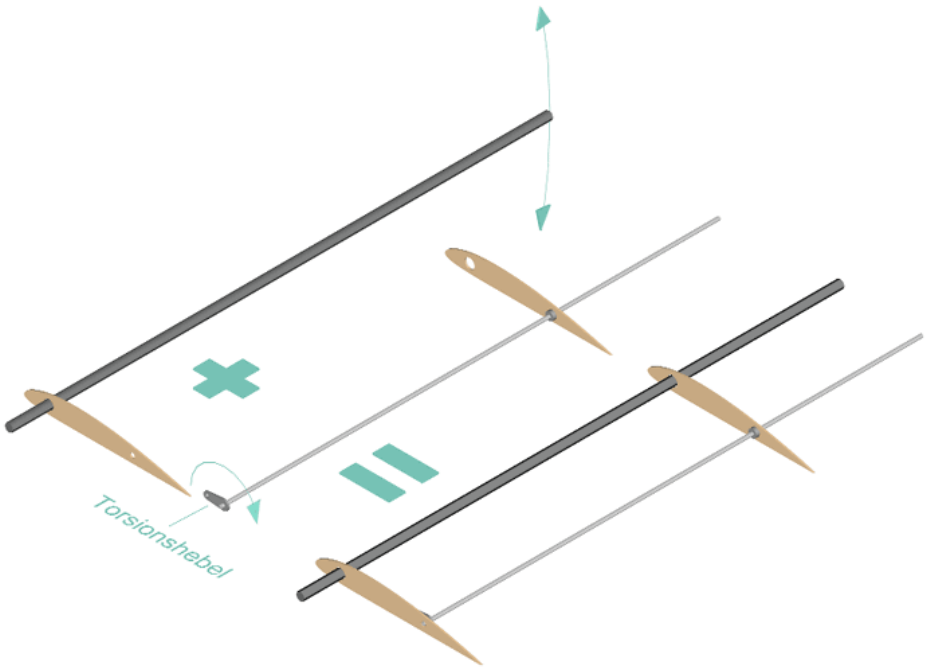

Bild 3.1 Holmgerüst für einen aeroelastisch verwindbaren Profilschlagflügels mit einstellbarem Torsionsmoment. Der Hauptholm überträgt die Schlagkräfte des Antriebs und der Hilfsholm bestimmt, zusammen mit den Flügelkräften, die Flügelverwindung.

Alle übrigen Flügelrippen werden im gewünschten Abstand leicht drehbar auf die beiden Holme aufgereiht. Die Rippe an der Flügelspitze ist gegen Längszug zu sichern. Dazu wird sie z. B. auf Holm verlängernde, eingesetzte Stifte gesteckt. Die Zwischenrippen werden durch die Bespannung auf Abstand gehalten. Zusätzlichen Halt bekommen sie durch die Endleiste und die Nasenschale.

Mit dem Hilfsholm-Torsionshebel kann man nun - auch nach Fertigstellung des ganzen Schlagflügels - das Torsionsmoment einer bestimmen Flügelverwindungslage einstellen und fixieren. Um beispielsweise im Ruhezustand des Schlagflügels die Aufschlagstellung einzustellen, wird die Schlagflügel in die gewünschte Aufschlag-Verwindungsstellung gebracht und dann der Innenhebel an der Flügelwurzelrippe fixiert (Konstruktionsbeispiele siehe nächstes Bild).

Der Abstand zwischen Haupt- und Hilfsholm hat auf die Größe des Flügel-Torsionsmoments keinen Einfluss, wohl aber der Abstand des Außenhebels von der Flügelwurzel. Bei gleichem Hilfsholm-Torsionsmoment wird das Flügel-Torsionsmoment umso größer, je weiter außen der Außenhebel angeordnet wird (Übersetzungseffekt für das Torsionsmoment; siehe hierzu auch nächsten Abschnitt).

Die Federrate der Flügelverwindung wird durch die Hilfsholmabmessungen und die Länge zwischen seinen Einspannstellen festgelegt. Ist der Außenhebel beispielsweise an der Flügelspitze angeordnet, so entspricht die Federrate der Flügeltorsion genau derjenigen des Hilfsholms. Diese Federrate lässt sich nachträglich nicht verändern. Man kann aber zu Begrenzung der Verwindung am Hilfsholm-Außenhebel den Hauptholm mit entsprechenden Verdrehungsanschlägen versehen – gegebenenfalls auch einstellbar.

Bild 3.2 Innerer Torsionshebel mit Verstellung durch eine Schraube.

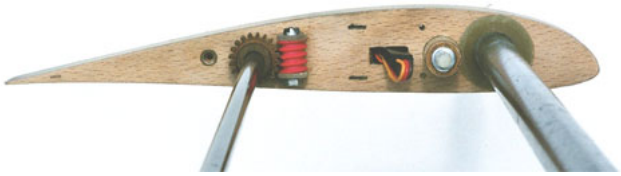

Bild 3.3 Verstellung des Flügel-Torsionsmomentes durch ein Schneckenrad.

Eine weitere Ausführungsvariante erhält man, wenn man den Hauptholm als Rohr ausführt und den Hilfsholm in seinem Innern anordnet (nächstes Bild). Der Hilfsholm-Außenhebel ist dann an der Flügelspitze in Drehrichtung einstellbar mit der dortigen Flügelrippe zu verbinden.

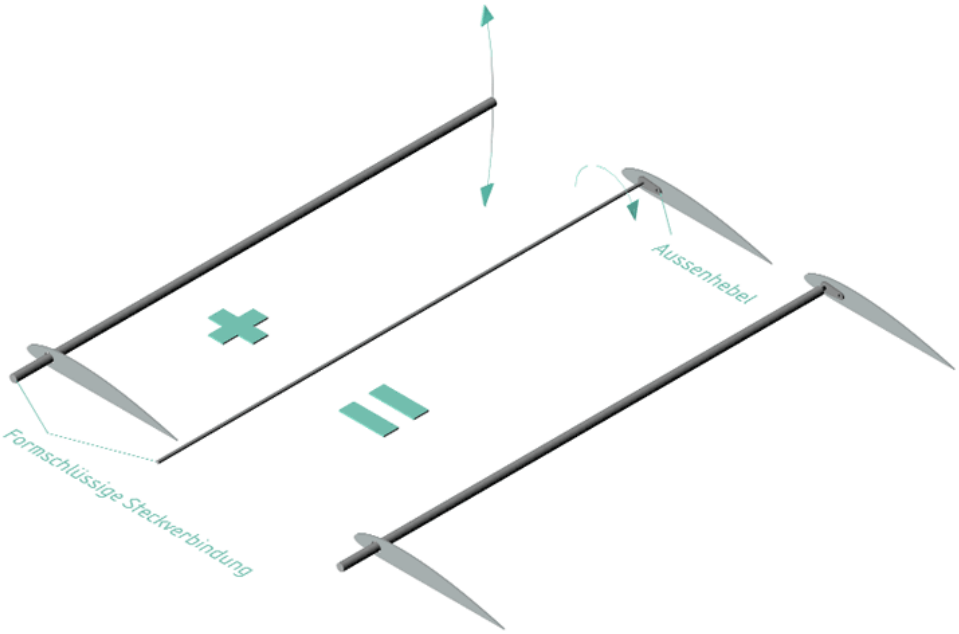

Bild 3.4 Holmgerüst für einen „aeroelastisch verwindbaren Profilschlagflügels mit einstellbarem Torsionsmoment“ mit einem Torsionsfederstab im Innern des Hauptholms.

Dabei lässt sich der Hilfsholm an der Flügelwurzel auch steckbar gestalten - beispielsweise mit einem Vierkantprofil. Zusätzlich ist in diesem Falle der Außenhebel von außen her an der Flügelspitzenrippe zu arretieren. Der Hilfsholm ist dann von der Flügelspitze aus auswechselbar und es lässt sich nicht nur mit der Federkraft, sondern auch mit der Federrate experimentieren.

Eine Anordnung des Hilfsholms vor dem Hauptholm ist ebenfalls denkbar – z.B. als Nasenleiste oder in einer Nasenleiste. Diese Anordnung ist günstig für eine gleichmäßigere Massenverteilung um die Drehachse. Dadurch wird der Einfluss der Flügelbeschleunigungskräfte auf die Flügelverwindung kleiner. Es fehlt dann allerdings die Abstützung des hinteren Teils der Flügelspitzenrippe gegen den Längszug der Bespannung.

3.1.1 Übersetzung der Verwindung

Bei aktiver Verwindung durch den Schlagflügelantrieb wird in der Regel die außen liegende Flügelrippe mit dem drehenden Hauptholm verbunden. Diese aktiv gedrehte Rippe muss aber nicht unbedingt am äußersten Ende des zu verwindenden Flügelabschnitts liegen. Wird eine mittlere Flügelrippe dafür verwendet (siehe nächstes Bild oder Bild 3.1) und ein Hilfsholm eingesetzt, so ist bei gleicher Hauptholmverdrehung die Verwindung insgesamt größer. Diese Art der Übersetzung der Größe der Flügelverwindung ermöglicht eine Anpassung an womöglich relativ kleine Steuerdrehbewegungen des zur Verfügung stehenden Antriebs.

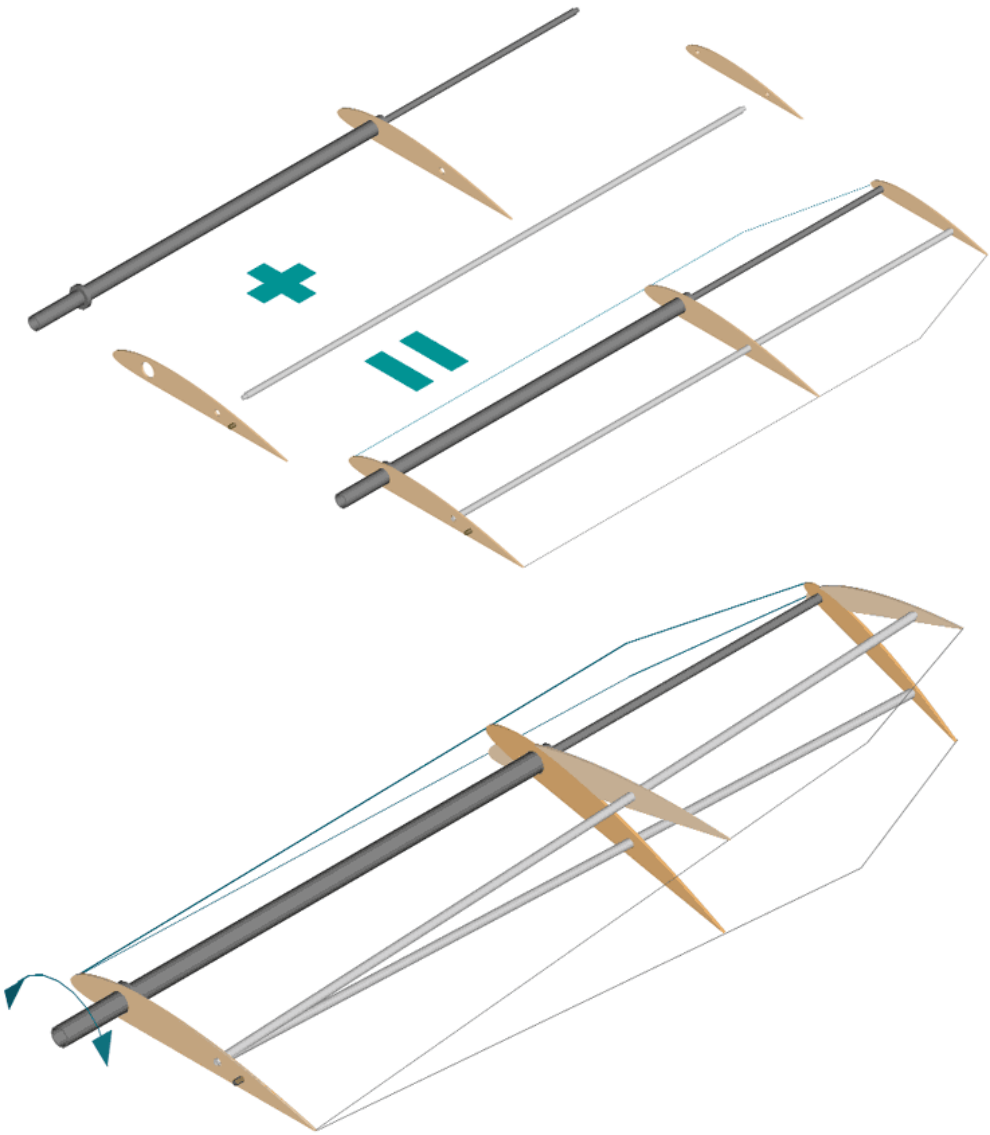

Bild 3.5 Aufbau eines Flügels mit aktiver Flügelverwindung durch Holmdrehung.
Nur die mittlere Flügelrippe wird dabei vom Hauptholm aktiv gedreht.
Der Hilfsholm übersetzt diese Bewegung bis zur Flügelspitze.

3.2 Schlagflügel mit Verwindungsanstieg

Verändert sich der Anstellwinkel eines Schlagflügels proportional zum Abstand von der Flügelwurzel, so ist die Verwindung längs der Halbspannweite konstant. Für eine optimale Auftriebsverteilung soll aber laut Bild 1.3 die Verwindung zur Flügelspitze hin ansteigen, bzw. der Anstellwinkel überproportional zunehmen.

3.2.1 Gepfeilte Anordnung des Hilfsholms [1]

Beim Holmgerüst von vorstehendem Bild lässt sich der Hilfsholm außerhalb der aktiv gedrehten Flügelrippe auch zum Hauptholm hin abwinkeln. Der Höhenunterschied zwischen den beiden Holmenden an der Flügelspitze bleibt dann bei der Verwindung zwar gleich, ihr Abstand wird aber kleiner. Die Verwindung nimmt auf diese Weise deutlich zu. Zur Erzielung des Effektes muss allerdings der Hilfsholm an der Flügelwurzelrippe gegen Verdrehen gesichert und in der aktiven Flügelrippe drehbar gelagert werden.

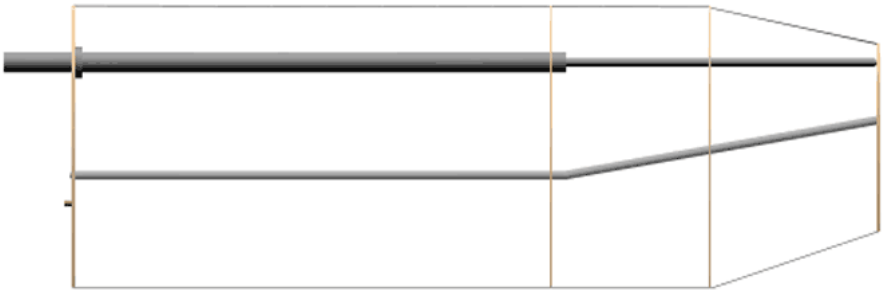

Bild 3.6 Flügel mit aktiver Flügelverwindung und überproportionalem Anstellwinkelanstieg im äußeren Flügelabschnitt durch Abwinkelung des Hilfsholms.

Der gewünschte Verwindungsanstieg wird bei dieser Variante leider durch die hohe Torsionselastizität des im Allgemeinen relativ schwach ausgelegten Hilfsholms beeinträchtigt. Außerdem steigen die Bauschwierigkeiten beim Auffädeln der Zwischenrippen auf die beiden Flügelholme bei Abwinkelung des Hilfsholmes deutlich an (siehe z.B. nicht parallel verlaufende Holme beim **EV2, EV5** und **EV6**). Man kann dieses Problem etwas verringern, wenn der Hilfsholm an der Knickstelle steckbar ausgeführt wird.

Der Effekt des Verwindungsanstiegs stellt sich bei dieser Anordnung auch dann ein, wenn der Schlagflügel nach Bild 3.1 aeroelastisch ausgeführt wird. Bei so einer Ausführung sollte aber die große Verwindung im Bereich der Flügelspitze sehr leichtgängig sein. Bei einem Folienbespannten Profilschlagflügel ist dies nur schwerlich zu erreichen.

3.2.2 Gelenkig gelagerter Handflügel-Hilfsholm [1]

Ein Schlagflügel, bei dem der Haupt- bzw. Führungsholm im Flügel sehr weit vorne liegt, wird zweckmäßig mit einem Hilfsholm ausgestattet. Das verbessert seine Stabilität. Der Hilfsholm kann in der Länge aus zwei gelenkig oder auch elastisch miteinander verbundenen Teilen hergestellt werden. Der innere Holmabschnitt kennzeichnet mit seiner Länge den Armflügel und der äußere den Handflügel.

Der Schlagflügel des **EV5** war im Prinzip so aufgebaut. Bei ihm wurde der abgewinkelte, vorne liegende Hauptholm mit Hilfe der Antriebsmechanik aktiv gedreht und mit ihm die fest verbundene Handgelenk-Rippe. Im nachstehenden Bild ist dies die breite weiße Rippe, links neben dem weißen Punkt. Durch die Drehung der Handgelenk-Rippe um den feststehenden Hilfsholm entstand die Flügelverwindung im äußeren Armflügelabschnitt. Gleichzeitig resultierte daraus eine Drehung der Handflügelwurzel.

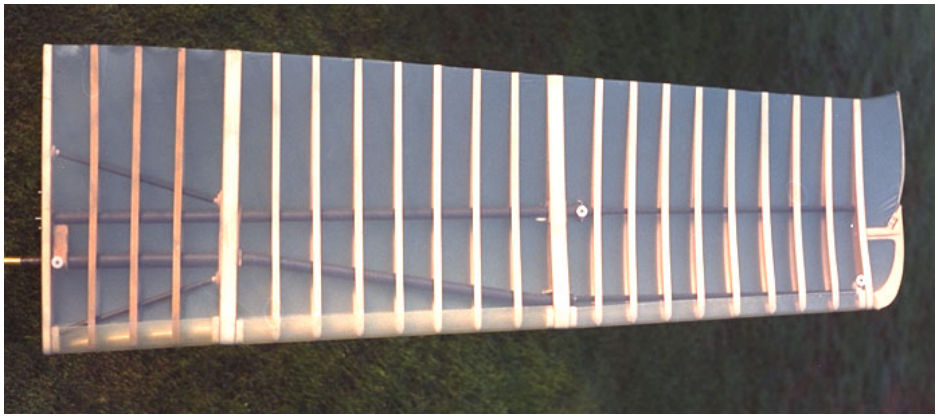

Bild 3.7 Rippenflügel des **EV5** mit Verwindungsanstieg im Handflügelbereich durch eine in Schlagrichtung bewegliche Lagerung (weißer Punkt) des hinteren Handflügelholms.

Im Handflügelbereich konnte der gelenkig gelagerte Hilfsholm gegenüber dem Hauptholm eine kleine Schlagbewegung ausführen. Dadurch wurde im Handflügel eine größere Verwindung ermöglicht als im Armflügel. Darüber hinaus lässt sich durch eine elastische Hilfsholmlagerung und/oder elastische Bespannung ein aeroelastisches Verhalten des Handflügels erzielen.

Mit seinem gelenkig gelagerten Handflügel-Hilfsholm war dies die Vorläuferkonstruktion für den „aeroelastisch gesteuerten Gelenkschlagflügel“ von Abschnitt 3.3.

3.2.3 Schlagweite vergrößernder Holm [1]

Ein überproportionaler Anstellwinkelanstieg im Handflügelbereich wird auch durch einen selbsttätig „die Schlagweite vergrößernden Holm“ erzielt. Sein Prinzip ist aus nachstehendem Bild ersichtlich.

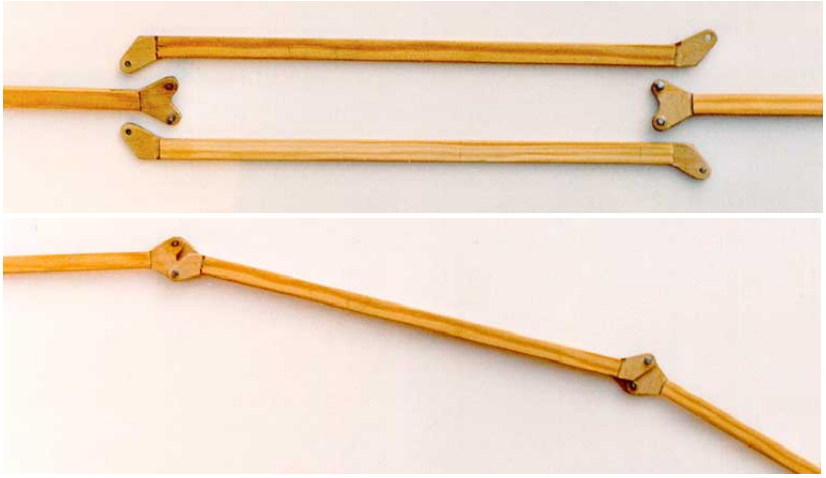

Bild 3.8 Gebrauchsmuster des Schiebegestänges eines selbsttätig „die Schlagweite vergrößernden Holms“
- oben Einzelteile
- unten montiert

Der mittlere Holmabschnitt besteht aus zwei Schubstangen an deren Enden wechselseitig je ein Lager angebracht ist. Die Schubstangen werden mit überkreuzender Lageranordnung montiert. Am rumpfnahen Ende sind sie dann an der Flügelwurzel (hier linke Holzleiste) in Schlagrichtung schwenkbar gelagert und am äußeren Ende in einem Lagerkopf der Holmfortsetzung (rechte Holzleiste).

Ein derartiges Schiebegestänge wird nun beispielsweise als Flügelhilfsholm eingesetzt. Bei Verwindung des Flügels führt dieser Hilfsholm dann - bezogen auf den Hauptholm bzw. die Flügelwurzel - eine kleine Schlagbewegung aus. Auf diese Schlagbewegung reagieren die beiden Schubstangen mit einer gegenläufigen Verschiebung in Längsrichtung. Dadurch wird die äußere Holmfortsetzung im Bereich der Flügelspitze gezwungen eine zusätzliche Schlagbewegung auszuführen.

Die Schlagbewegung der Schubstangen kann beispielsweise, wie in folgendem Bild, durch die aktive Drehung einer mittleren Flügelrippe wie in Bild 3.5 erfolgen.

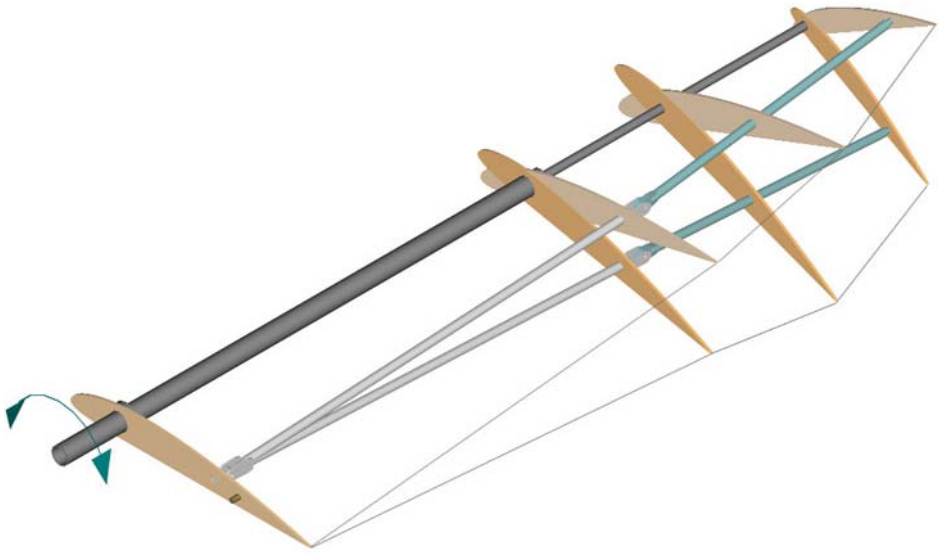

Bild 3.9 Flügel mit aktiver Flügelverwindung durch Hauptholmdrehung (vergleiche Bild 3.5) und Verwindungsanstieg im äußeren Flügelabschnitt durch einen die Schlagweite vergrößernden Hilfsholm.

Das Gewicht einer solchen, nachstehend abgebildeten Hilfsholmmechanik ist etwa doppelt so groß wie das eines einfachen Hilfsholmes.

- CFK-Rohr D = 7 mm, d = 6 mm, l = 70 cm, Gewicht = 13 g
- Schlagweite vergrößernder Hilfsholm gleicher Gesamtlänge Gewicht = 27 g

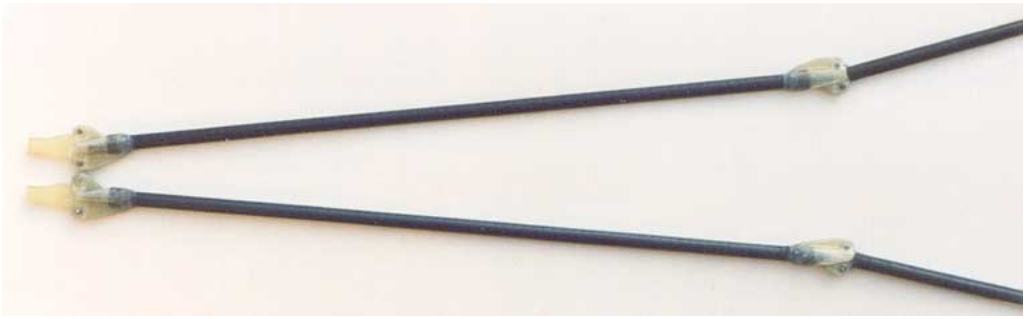

Bild 3.10 Die Schlagweite vergrößernder Hilfsholm mit koaxialem Schiebegestänge.

Diese Gewichtszunahme im hinteren Flügelabschnitt ist – wenn auch nur im Armflügelbereich – wegen der höheren Massenträgheit bei der Flügelschlagbewegung leider recht nachteilig. Sie lässt sich aber durch verbesserte Konstruktionen sicher noch verringern.

Durch unterschiedliche Lagerabstände innerhalb der beiden Gelenkköpfe des Schiebegestänges kann man die Schlagbewegung auch übersetzen. Diese Möglichkeit wird allerdings durch die geringe zur Verfügung stehende Bauhöhe innerhalb des Flügelprofils eingeengt. Selbst bei gleichem Lagerabstand beträgt aber der Schlagwinkel des äußeren Hilfsholmabschnitts immerhin schon das Doppelte des inneren.

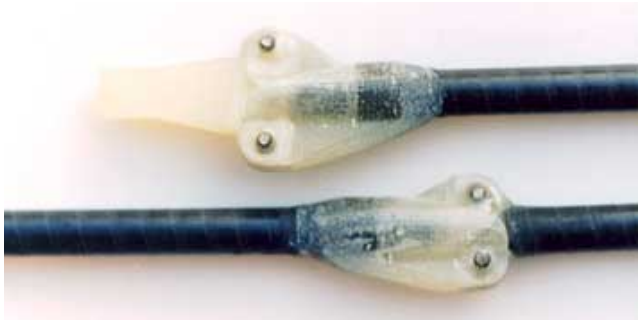

Bild 3.11 Innerer und äußerer Gelenkkopf des Schiebegestänge mit unterschiedlichen Achsabständen (1:1,5-fach) für eine Übersetzung.

Auch diese Konstruktionsvariante mit Verwindungsanstieg ist nicht nur bei aktiver, sondern auch bei aeroelastischer oder passiver Verwindung wirksam (beispielsweise wie Bild 3.1).

3.3 Aeroelastisch gesteuerte Verwindung

Die Flugeleganz großer Vögel zeigt sich insbesondere in der gleichmäßig fließenden Schlagbewegung ihrer Flügel. Deren Bewegungsablauf beinhaltet neben der reinen Schlagbewegung eine fast peitschenförmige Durchbiegung und Knickung der Flügel längs der Halbspannweite. Die Knickstelle liegt am Handgelenk des Schlagflügels, also an der Trennlinie zwischen Arm- und Handflügel. Diese Knickung steht bei Vögeln mechanisch in enger Verbindung mit der Verwindung des Flügels[12].

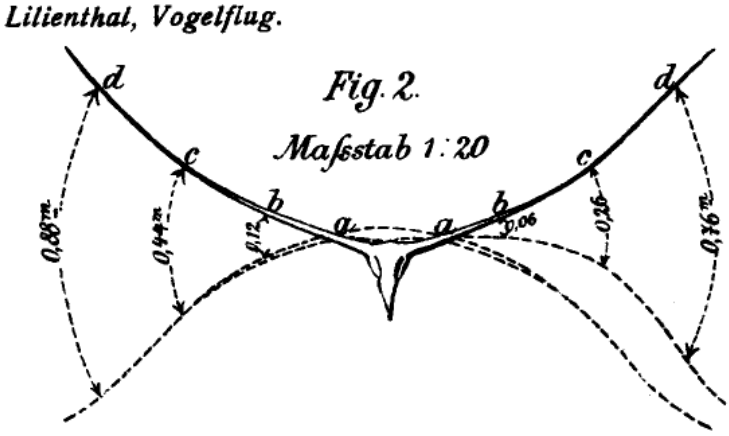

Bild 3.12 Flügeldurchbiegung während der Schlagbewegung bei einem Storch

3.3.1 Gelenkschlagflügel [1]

Man kann die zwangsläufige Verwindung des Vogelflügels bei einer Knickbewegung im Handgelenk technisch nachbilden, indem man zunächst Arm- und Handflügel-Hauptholm in Schlagrichtung gelenkig miteinander verbindet. Schon eine kleine Relativbewegung der beiden Holmabschnitte untereinander lässt sich dann zur Erzeugung der Flügelverwindung nutzen. Das Grundprinzip ist dem nachstehenden Bild zu entnehmen.

---

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

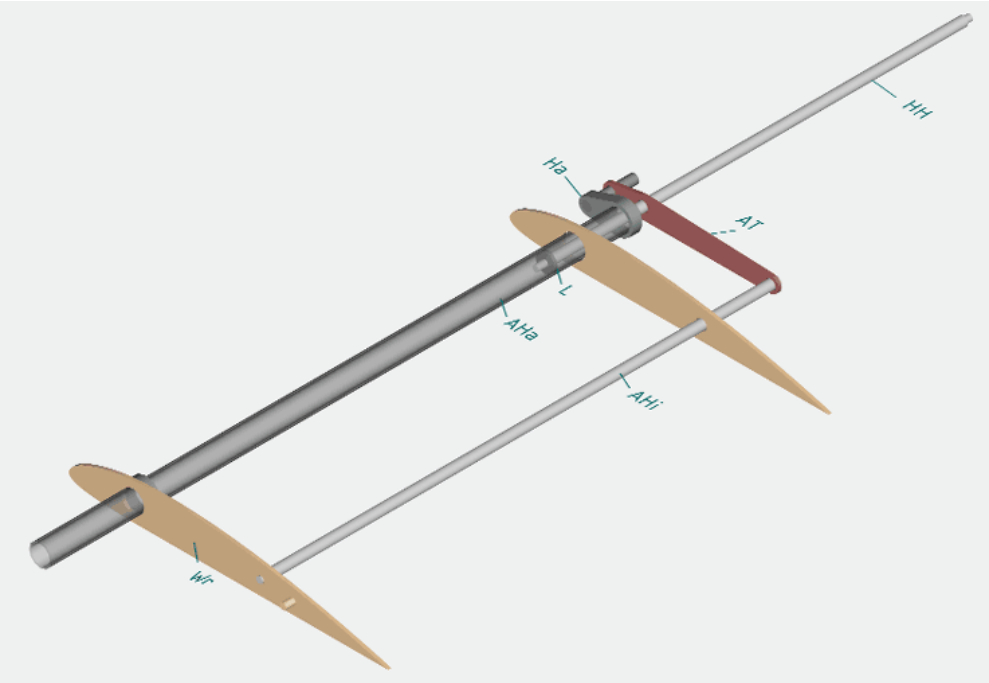

Bild 3.13 Grundlegender Aufbau eines Gelenkschlagflügels.
Er besteht insbesondere aus folgenden Teilen.

Wr Wurzelrippe des Schlagflügels
AHa Armflügel-Hauptholm
AHi Armflügel-Hilfsholm
HH Handflügelholm
Ha Holmausleger
AT Armflügel-Torsionshebel
L Lochscheibe

Zur besseren Übersicht sind hier längs der Halbspannweite nur die Wurzelrippe **Wr** und eine Armflügel-Beispielrippe abgebildet. Die übrigen Armflügelrippen muss man sich dazwischen aufgereiht vorstellen.

Um zu zeigen, wie der Handflügelholm im Armflügel-Hauptholm **AHa** gelagert ist, wurde dessen Rohr hier durchsichtig dargestellt. In seinem Innern ist eine eingeklebte Lochscheibe **L** zu sehen. Darin lagert ein Stahlstift, der stirnseitig im Handflügelholm eingelassen ist. Dieser kann so gegenüber dem Armflügel eine kleine Schlagbewegung ausführen.

Die Handflügelschlagbewegung ist durch den Innendurchmessers des Armflügelrohrholms und die Dicke des Handflügelholmes begrenzt. Die Schlagweite wird so durch die Eintauchtiefe des Handflügelholms im Armflügelholm bestimmt. Für die Verwindungssteuerung genügt in der Regel ein Handflügelschlagwinkel von etwa ± 2 bis 3 Grad. Dies erleichtert die Unterbringung der ganzen Flügelmechanik innerhalb der Kontur des Flügelprofils.

Am äußeren Ende des Armflügel-Hauptholms **AHa** ist nach vorne ein Holmausleger **Ha** angebracht, der einen Lagerzapfen trägt. Dies ist die Lagerung für den so genannten Armflügel-Torsionshebel **AT.** Durch eine zweite Bohrung im vordern Teil diesem Hebel verläuft drehbar

der Handflügelholm **HH.** In einer dritten Bohrung am hinteren Ende des Torsionshebels steckt lose oder auch fest der Armflügel-Hilfsholm **AHi**.

Bei einer Schlagbewegung des Handflügels führt der Armflügel-Torsionshebel **AT** eine kleine Drehbewegung um seinen vorderen Lagerzapfen aus. Das Ende des Armflügel-Hilfsholms **AHi** bewegt sich dadurch auf und ab. Dies führt zu einer Verwindung des Armflügels, so wie das in folgendem Bild zu sehen ist.

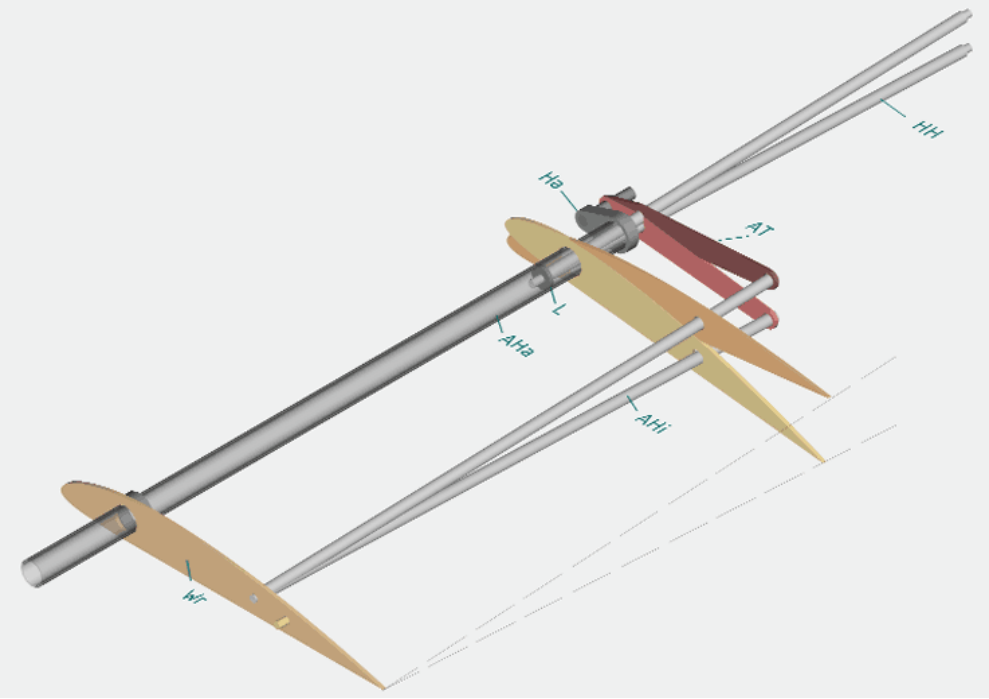

Bild 3.14 Armflügelverwindung bei einer kleinen Schlagbewegung des Handflügelholms.

Diese Verwindungssteuerung ist besonders betriebssicher, weil sie nicht von der Druckpunktwanderung längs der Profiltiefe (hierzu Bild 1.4), sondern von der während der Schlagbewegung eindeutigen Druckpunktwanderung längs der Halbspannweite abhängt (hierzu Bild 1.1). Zusätzlich unterstützen bei jedem Schlagrichtungswechsel die Handflügel-Massenträgheitskräfte die Verwindung.

Außerdem wird die Flatterneigung des Flügels reduziert. Eine eventuelle Flatter-Drehbewegung eines Flügelabschnitts um den vorderen Holm führt zu einer Schlagbewegung des Handflügels und damit zur Schuberzeugung. Auf diese Weise wird Energie abgebaut und es kommt nicht so leicht zum Aufschaukeln der Flügelmassenkräfte.

3.3.2 Handflügel-Federung [1]

Vorstehender Schlagflügel soll nun aber während der Schlagbewegung nicht immer nur mit seiner maximalen Verwindung bzw. Abwinkelung arbeiten. Zur Anpassung an sich ändernde Auftriebskräfte infolge unterschiedlicher Schlag- und Fluggeschwindigkeiten ist eine aeroelastische Flügelverwindung von Vorteil. Sie wird hier durch eine Federung der Holmabwinkelung erreicht. Gleichzeitig sollte die Verwindungselastizität nach Möglichkeit auch noch

nach Fertigstellung des Flügels einstellbar sein. Zwei Varianten zur Federung der Holmabwinkelung wurden bisher verwirklicht.

a) Zugfedern mit Seilzug

b) Hebelkräfte eines torsionselastischen Hilfsholms

Eine Ausführung mit Zugfedern ist in folgendem Bild zu sehen. Es zeigt einen am Armflügel-Holmende gelagerten Winkelhebel. Dieser umgreift den Handflügelholm vorn und hinten und kann ihn mit seiner dazwischen liegenden Druckrolle nach unten drücken.

Betätigt wird der Winkelhebel über einen Seilzug mit Hilfe von Federn, die an der Flügelwurzel im Innern des Armflügelholms untergebracht sind. Die Federspannung lässt sich durch eine Schraube am rumpfseitigen Hauptholmende einstellen.

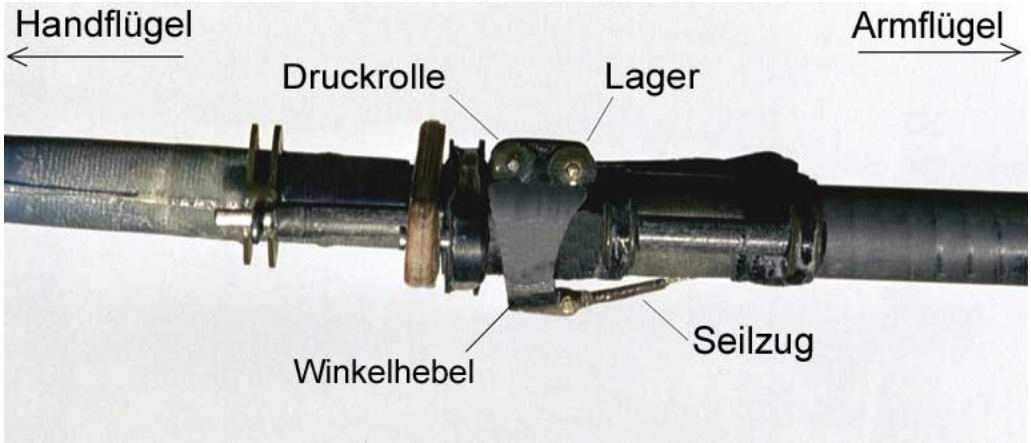

Bild 3.15 Handgelenk zur elastischen Abwinkelung des Hauptholms vom **EV7**.
Die Elastizität wird mit einem Winkelhebel bewirkt, der über einen Seilzug mit federnden Bauelementen im Holminneren verbunden ist (s. Bild 3.18).

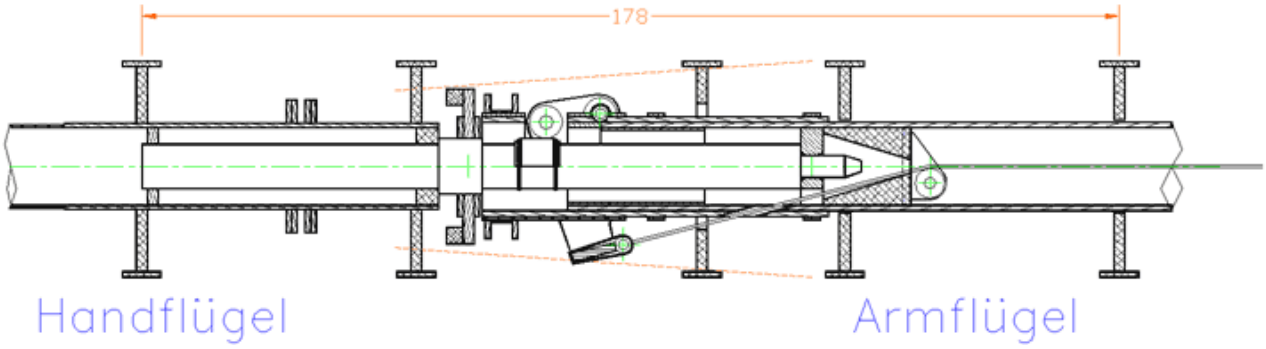

Bild 3.16 Zeichnung von oben abgebildetem Handgelenk.
Die hier abgebildete Stift-in-Loch-Lagerung des Handflügels im Armflügel wurde stattdessen meist mit einem spielfreien 3 mm Gelenkstangenkopf ausgeführt.

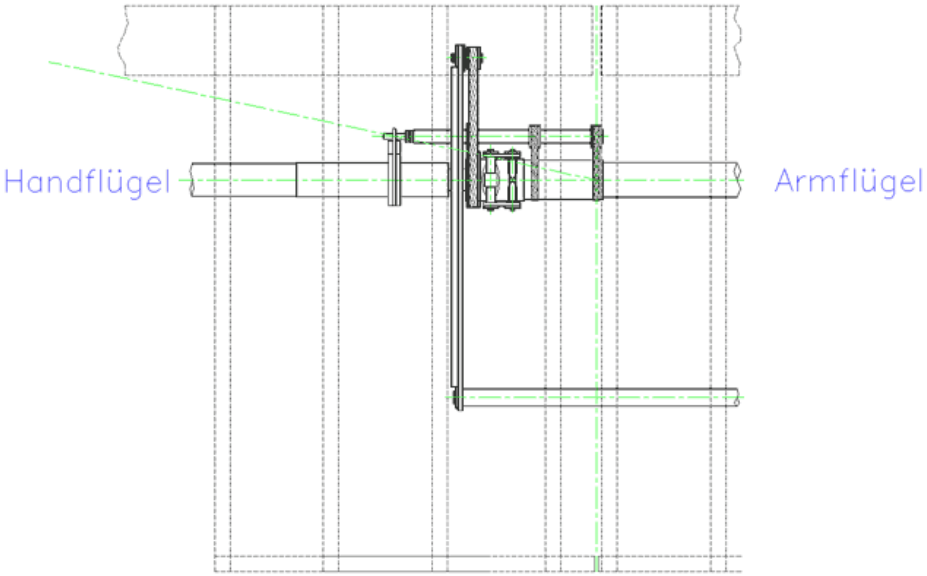

Bild 3.17 Draufsicht auf vorstehend abgebildetes Handgelenk,
mit separatem Lagerzapfen für den vorderen Handflügel-Torsionshebel.

Die oben erwähnte Federanordnung wurde, ausgehend von einer einfachen Zugfeder, zu einem relativ komplexen Federverbundsystem weiter entwickelt. Ziel war es dabei, die mittlere Gleitflugstellung durch eine Art Rastpunkt zu fixieren. Reibung in der Flügelmechanik führt sonst im Gleitflug gelegentlich zu ungleicher Verwindung von linkem und rechtem Flügel. Diese Rastung wurde erzielt, indem neben einer ständig im Eingriff befindlichen, schwachen Zugfeder für die Aufschlagkräfte, beim Abschlag ab der Gleitstellung des Handflügels, zusätzlich eine kräftige Druckfeder zum Eingriff kam. Bei den letzten Entwicklungen dieser Art wurden dann auch noch Dämpfungszylinder eingesetzt, um das Überschwingen des Anstellwinkels in den Schlagendlagen zu reduzieren (siehe Handbuch, Kapitel 6.8).

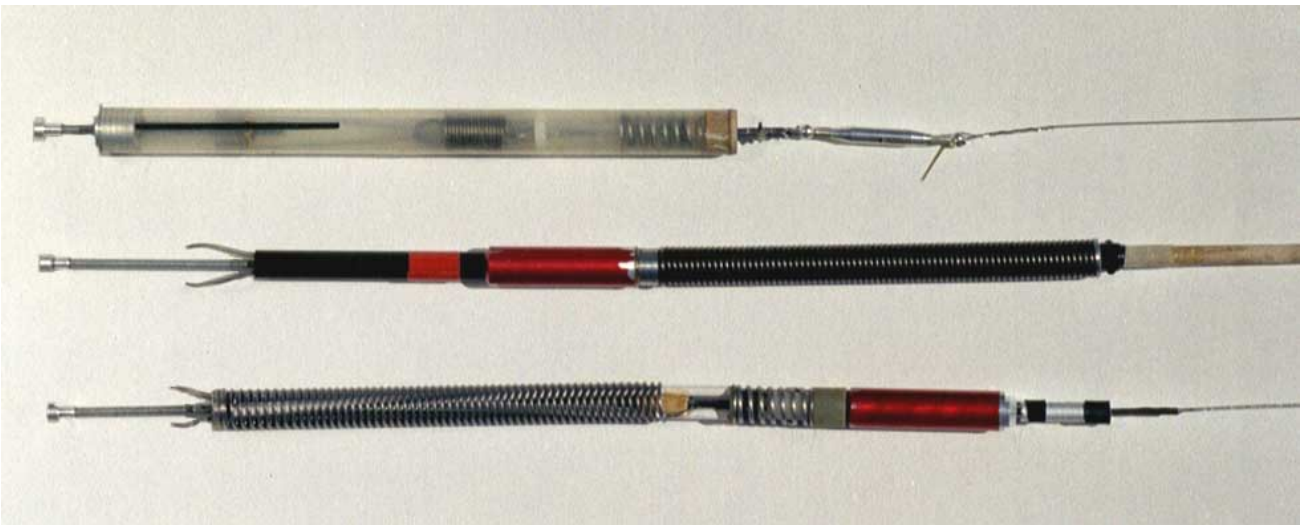

Bild 3.18 Verschiedene Zug- und Druckfedervorrichtungen zur elastischen Holmabwinkelung mittels Winkelhebel.
oben vom Modell **EV6**, in einem GfK-Rohr, 1 Stück 23 g
Mitte vom Modell **EV7a**, mit Stoßdämpfer mittig (rot), 1 Stück 66 g
unten vom Modell **EV7b**, mit Stoßdämpfer rechts (rot), 1 Stück 48 g

Die andere Ausführungsart der Holmfederung, mit einem torsionselastischen Hilfsholm, ist aus nachstehendem Bild ersichtlich. Der Unterschied gegenüber der Ausführung in Bild 3.14 liegt praktisch nur in dem jetzt an beiden Enden eingespannten Armflügel-Hilfsholm AHi. Am Handgelenk ist er nun mit dem Armflügeltorsionshebel AFT fest verbunden und an der Flügelwurzel mit einem Innenhebel InH versehen.

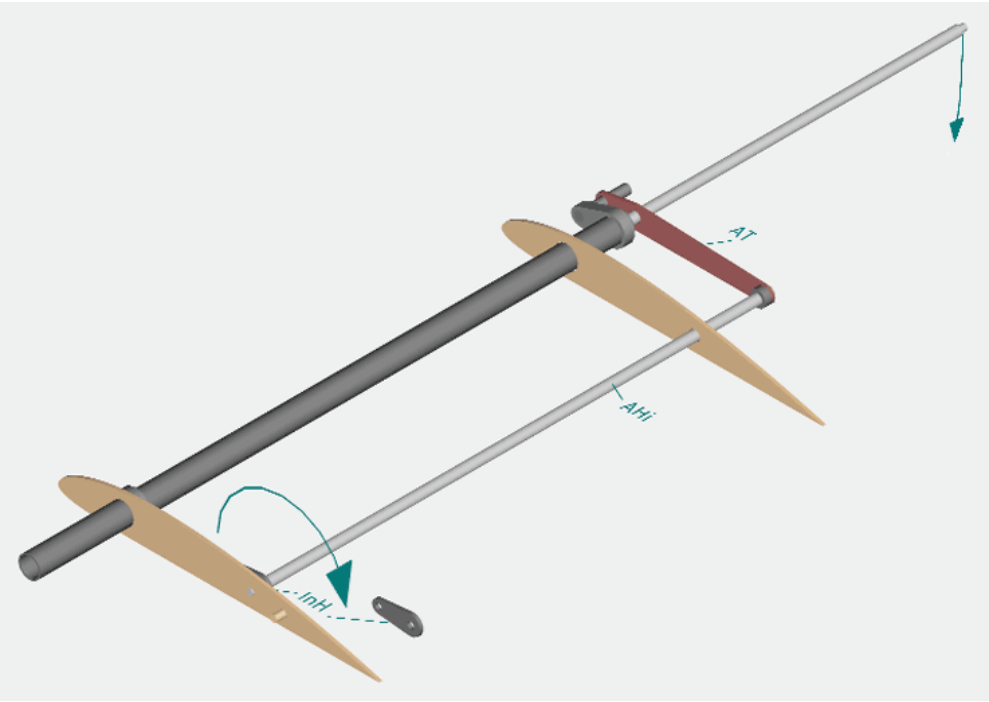

Bild 3.19 Gelenkschlagflügel mit Federung durch Hilfsholmtorsion vom **EV8**.

Dreht man am Innenhebel InH in der dargestellten Richtung, so wirkt das betreffende Drehmoment auch am Armflügel-Torsionshebel AT. Der dreht sich dadurch hinten um sein vorderes Lager nach unten. Gleichzeitig überträgt er diese Abwärtsbewegung auch auf den Handflügelholm, so dass der in Richtung Flügelaufschlagstellung nach unten geht.

Wird bei ansteigender Auftriebskraft das aerodynamische Handflügelschlagmoment größer als das durch den Hilfsholm erzeugte, so schlägt der Handflügel federnd nach oben. Der Armflügel steht dann mit seiner Verwindung in eine Zwischenstellung bzw. in der obern Endlage der Abschlagverwindung. Damit erhält man eine vom Handflügelholm gesteuerte Armflügelverwindung, die von der Auftriebsverteilung abhängt. Eine zusätzliche Federvorrichtung ist nicht mehr erforderlich.

3.3.3 Gelenkschlagflügel mit gesteuerter Handflügelverwindung [1]

Bei einfachen Schlagflügelausführungen kann man vorstehend abgebildetes Profilschlagflügelgerüst im Handflügelbereich mit einer einfachen Membranfläche ausstatten. Will man aber gleichzeitig den Handflügel mit einem Profil ausführen, so ist auch bei ihm eine gezielte, aktiv gesteuerte Verwindung zweckmäßig. Dies wird möglich, wenn man die Schlagbewegung des Handflügelholms auch zu seiner Drehung nutzt.

Dazu ordnet man einen, mit dem Handflügel-Hauptholm fest verbundenen, nach vorne ragenden Handflügel-Torsionshebel in einem größeren Abstand vom Handflügelschlaglager an (nächstes Bild; kurzer, grüner Hebel). Dieser Hebel wird an seinem vorderen Ende zunächst auf der gleichen Achse gelagert wie der Armflügel-Torsionshebel - wegen geringfügig veränderlichem Lagerabstand aber mit einem Langloch. Bei einer Schlagbewegung des Handflügels führt der vordere Handflügel-Hauptholm nun eine Drehbewegung aus.

Weiter außen wird ein weiterer Handflügel-Torsionshebel (grün und lang) mit dem Handflügel-Hauptholm fest verbunden. Er ragt nach hinten, führt den Hilfsholm und wandelt die auf den Handflügelholm übertragene Drehung in eine Handflügelverwindung um. Der Hilfsholm des Handflügels muss dazu etwas beweglich am Armflügelhilfsholm ansetzen (z.B. nach dem Prinzip: Stift in Loch).

Die Rippe an der Flügelspitze ist zweckmäßig am Hauptholm mit grober Passung drehbar und am Hilfsholm gelenkig zu lagern. Auf diese Weise kann diese Rippe den Bewegungen des Flügelholmgerüsts leichtgängig folgen. Das ganze Flügelgerüst ist aus den beiden nachstehenden Bildern ersichtlich.

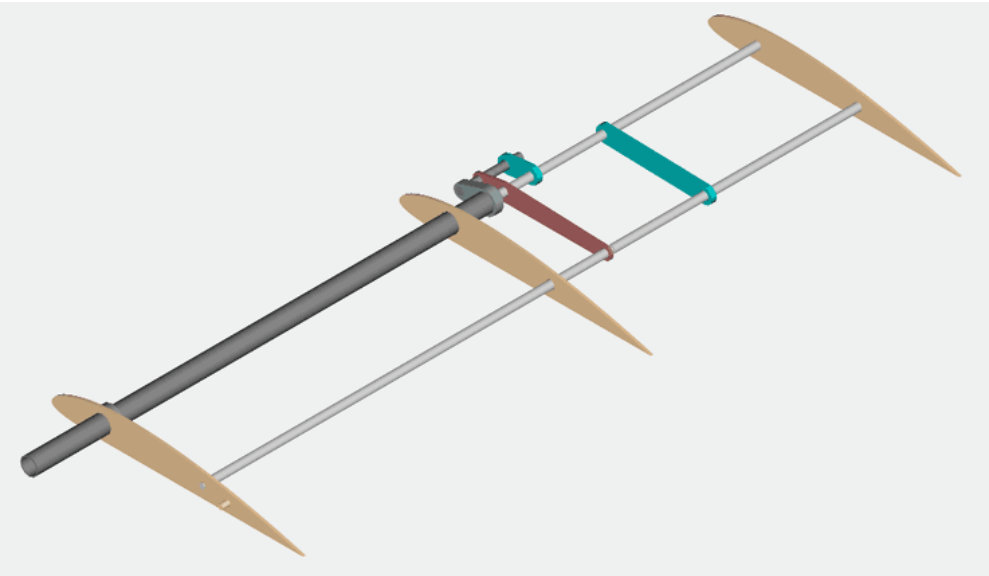

Bild 3.20 Im Handflügelbereich vorn und hinten liegende Handflügel-Torsionshebel (grün) mit Handflügelstellung in Schlagmitte (Gleitflugstellung).

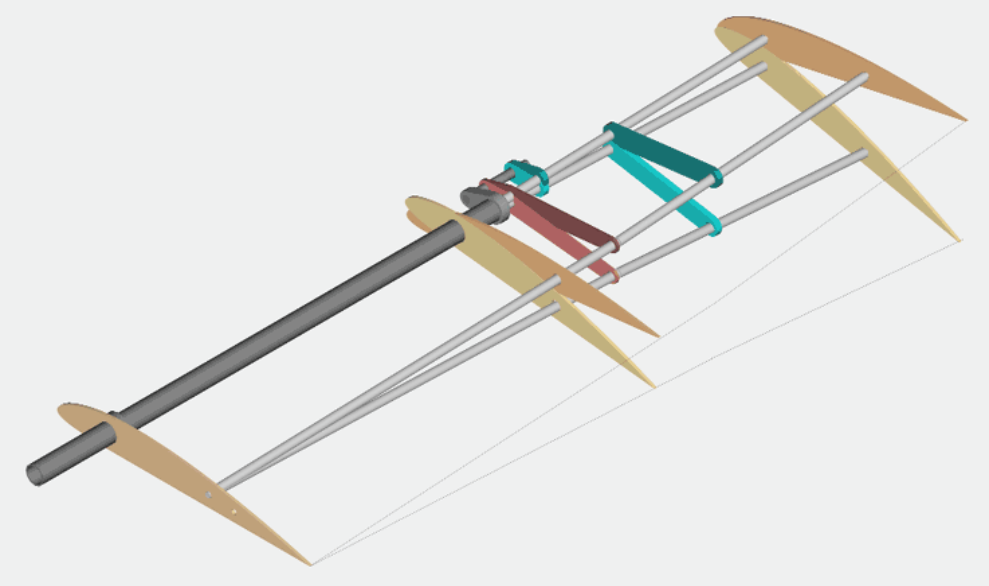

Bild 3.21 Handflügelverwindung durch am Hauptholm befestigte, nach vorn und hinten gerichtete Handflügel-Torsionshebel (grün).

Der Aufbau dieses Schlagflügelgerüstes ist etwas aufwändig, die Theorie dazu aber schon sehr komplex. Fast alle Abstände innerhalb des abgebildeten Flügelgerüstes sind für den Verwindungsverlauf längs der Spannweite mit bestimmend. Will man einen bestimmten Anstellwinkelverlauf erzielen, so ist das Schreiben eines nicht ganz einfachen Rechenprogramms fast unumgänglich. Die Schlagwinkel aller Holmabschnitte und die Anstellwinkel der Rippen an der Flügelwurzel, am Handgelenk und an der Flügelspitze sind darin einzubeziehen.

Schon allein die Festlegung der Trennlinie zwischen Arm- und Handflügel fällt nicht leicht. Nachstehend ist dazu eine Abbildung mit den bisher beschriebenen Trennstellen von Haupt- und Hilfsholm zu sehen.

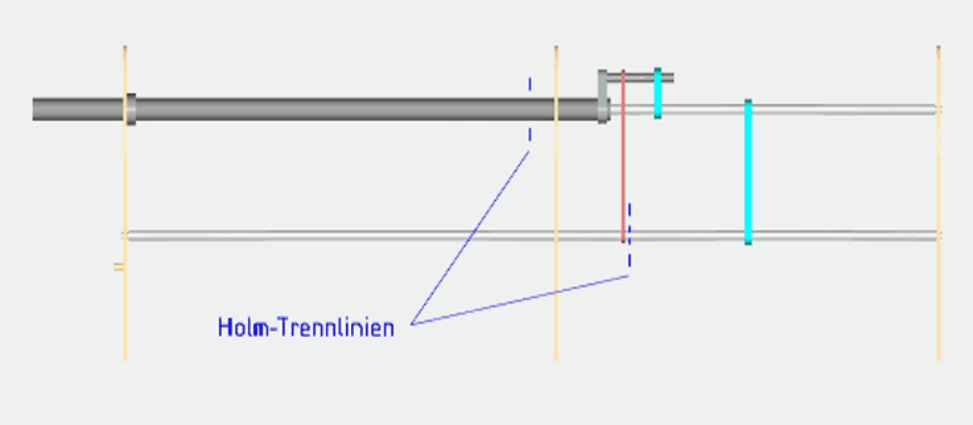

Bild 3.22 Draufsicht auf das Gelenkschlagflügelgerüst mit der Lage der Holm-Trennlinien bzw. den Orten der Abwinkelung nach den bisherigen Festlegungen.

Ein klein wenig übersichtlicher werden die Verhältnisse, wenn man die Abwinkelungen von Haupt- und Hilfsholm auf gleichen Abstand zur Flügelwurzel legt. Dies ist im folgenden Bild so ausgeführt.

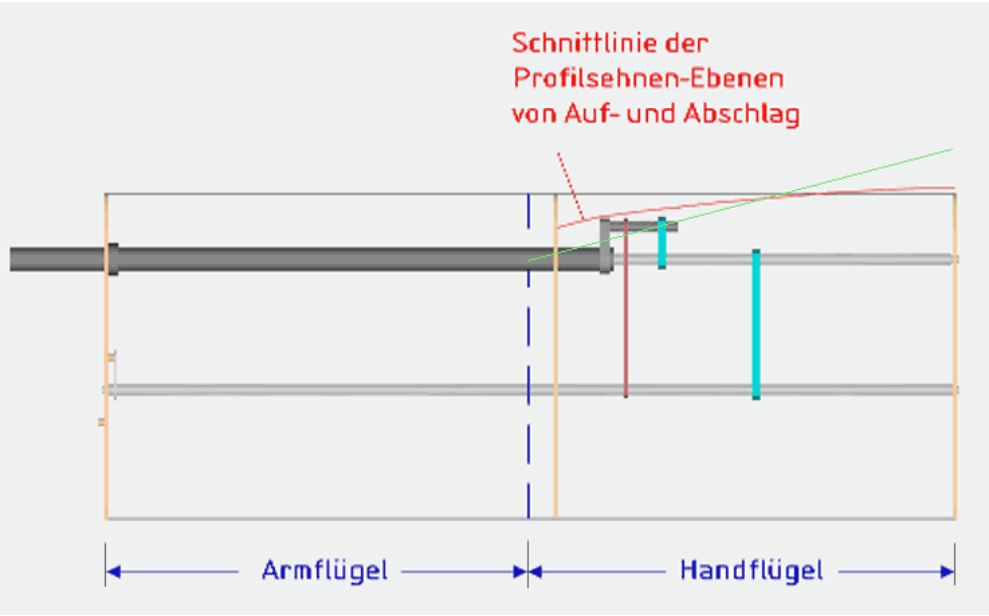

Bild 3.23 Schlagflügelgerüst-Draufsicht mit einer gemeinsamen Trennlinie (blau strichliert) von Haupt- und Hilfsholm.

Durch die jetzige Lage der Hilfsholmknickstelle ist die Drehmomentübertragung vom Armflügel-Hilfsholm auf den Armflügel-Torsionshebel (braun) aber unterbrochen. Die Armflügel-Hilfsholm-torsion lässt sich nun leider nicht mehr ohne weiteres für die Flügelgelenkelastizität nutzen. Man muss jetzt dafür entweder eine Zugfederkombination wie in Bild 3.18 oder eine Lösung mit Hintereinanderanordnung der Hilfsholme von Arm- und Handflügel wie in Bild 3.30 verwenden. Auch eine köcherförmige Aufweitung des Armflügel-Hilfsholmes im Bereich zwischen seiner Knickstelle und dem Armflügel-Torsionshebel wurden schon ausgeführt. Der Handflügel-Hilfsholm steckt dann in diesem Köcher und kann eine kleine Schlagbewegung ausführen. Das erfordert aber eine relativ große Profildicke. Solange man im Handflügel-Hilfsholmbereich keinen die Schlagweite vergrößernden Holm verwendet, ist an der Hilfsholmknickstelle auch ein Kardangelenk eine gute Lösung.

In vorstehendem Bild ist die Verbindungslinie zwischen dem Lager des Handflügel-Hauptholms und der Lagerstelle des vorderen Handflügel-Torsionshebels weiter nach außen verlängert (grün). Das ist die Achse der Handflügel-Hauptholm-Drehbewegung. Es ist aber nicht unbedingt gleichzeitig die Verwindungsachse der Handflügelfläche.

Legt man durch die Profilsehnen der dargestellten Handflügelrippen eine gedachte Ebene, so schneiden sich diese Ebenen von Auf- und Abschlag vor dem Hauptholm entlang einer Linie (rot). Diese Schnittlinie gibt eine mögliche Lage der einzelnen Rippendrehpunkte längs des Handflügels wieder und ist damit vielleicht eine Art Verdrehungslinie bzw. -achse (krumme Achse). Legt man die Ebenen allerdings durch die Druckseitentangenten der Profile, so verschiebt sich die Schnittlinie, ohne dass sich die Handflügelbewegung ändert.

Wo die für die Drehmomentberechnung relevante Verwindungsachse der Handflügelfläche tatsächlich verläuft, habe ich leider noch nicht endgültig bestimmen können. Das wäre mal eine lohnende Aufgabe für Profis der Darstellenden Geometrie. Meine theoretischen Berechnungen der Handflügelfederung unter Bezug auf die Handflügel-Hauptholm-Drehachse (grüne Linie),

mussten jedenfalls - selbst bei Einbeziehung der Auf- und Vortriebskräfte des ganzen Flügels - in der Praxis immer wieder drastisch korrigiert werden[13]. Sicherlich liegt die Verwindungssachse aber noch deutlich vor dem Hauptholm und im Bereich der Flügelspitze sogar noch vor dem Flügel.

Die Handflügelverwindung ändert sich nicht, solange die Lagerstelle des vorderen Handflügelhebels entlang der grünen Linie verschoben wird. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Lagerstelle weiter nach innen, z.B. in den Armflügel-Holmausleger zu verlagern. Nachstehend ist eine derartige Ausführung abgebildet.

Handflügelholm oben
(Abschlag)

Handflügelholm unten
(Aufschlag)

Bild 3.24 Handgelenk mit vorderem Handflügelhebel im Holmausleger, Blick Richtung Flügelwurzel. Man sieht vor dem Hintergrund einer hellen Armflügelrippe den vom Hauptholm nach vorn und hinten ragenden Holmausleger (mit schwarzen CFK-Fasern umrandet).

In einem von der Holmrohröffnung ausgehenden Schlitz nach vorn, ist der vordere Handflügel-Torsionshebel aus Messing zu sehen. Er umschließt den im Holminneren gelenkig gelagerten 6 mm CFK-Stab, auf den später der Handflügel-Hauptholm gesteckt wird. Die vordere Lagerung des Messinghebels ist als Kugelkopf zwischen zwei Gleitflächen aus Buchenholz ausgebildet. Er ist abgeflacht und mit einer Bohrung zur Gewichtsersparnis versehen. Rechts davon ragt der vordere Stahllagerzapfen des Armflügel-Torsionshebels aus dem Holmausleger.

Zum Auffädeln der Flügelrippen auf den Armflügelholmen ist die ganze dargestellte Hauptholmaufweitung mit dem Holmausleger auf dem Armflügel-Hauptholm lösbar montiert.

Der Ausleger reicht in diesem Bild vom Hauptholm aus gesehen nicht nur nach vorne, sondern auch nach hinten. In seinem hinteren Ende ist eine weiße Kunststoffrolle zu sehen. Die darüber

[13] Das kann aber auch mit Fehlern zusammen hängen, die bei der Berechnung des Profildrehmoments gemacht und erst Jahre später festgestellt wurden.

laufende Schnur ermöglicht die Beeinflussung der Armflügel-Torsionshebellage. Diese Steuereinrichtung wird im folgenden Abschnitt noch näher gezeigt.

Die aus dieser Hebelkonfiguration resultierenden Drehausschläge sind in den nachstehenden Bildern zu erkennen. Es ist vor der weißen Kunststoffrolle auch der Armflügel-Torsionshebel aus GFK zu sehen. Die Verdrehung des Handflügelholms beim Auf- und Abschlag wird durch den orangefarbenen Zeiger demonstriert. Als Bezugspunkt ist im Hintergrund, wenn auch unscharf, die Flügelwurzelrippe erkennbar.

Bild 3.25 Winkelausschläge am Handgelenk (oben Aufschlag, unten Abschlag).

Bei der Detailkonstruktion ist darauf zu achten, dass insbesondere der Holmausleger, aber auch die übrige Mechanik, während der Schlagbewegung nicht bzw. nicht allzu weit über die Profilkontur hinausragt.

3.3.4 Schnurzug zur Beeinflussung der Flügelverwindung [1]

Die Schnurführung der Verwindungssteuerung ist nachstehend zu sehen. Die Schnur umrundet zunächst - von der Flügelwurzel kommend - mit einem 90 Grad-Bogen die weiße Rolle und zieht dann in senkrechter Richtung nach oben. Anschließend umschlingt sie den Armflügeltorsionshebel komplett und zieht nach einem weiteren 90 Grad-Bogen um die Rolle wieder zur Flügelwurzel. Der Armflügel-Torsionshebel stützt sich während der Schlagbewegung in Flügellängsrichtung leichtgängig an den Rollenrändern ab.

Außen am Armflügel-Torsionshebel ist die Schnur an einem eingesetzten, ebenfalls umschlungenen Zapfen (CFK, schwarz) fest geklebt. Mit dem Schnurzug kann man nun die Lage des Armflügel-Torsionshebel und damit Verwindung des gesamten Schlagflügels beeinflussen.

Bild 3.26 Schnurführung um den Armflügel-Torsionshebel.

Werden die aerodynamischen Kräfte des Flügels durch die Armflügel-Hilfsholmtorsion etwa ausgeglichen, so genügt die Zugkraft eines mittelgroßen Fernsteuerservos, um die Flügelverwindung während des Fluges zu verändern. Damit nähert man sich der Erfüllung des lang gehegten Wunsches, den Ornithopter mit der Flügelverwindung steuern zu können.

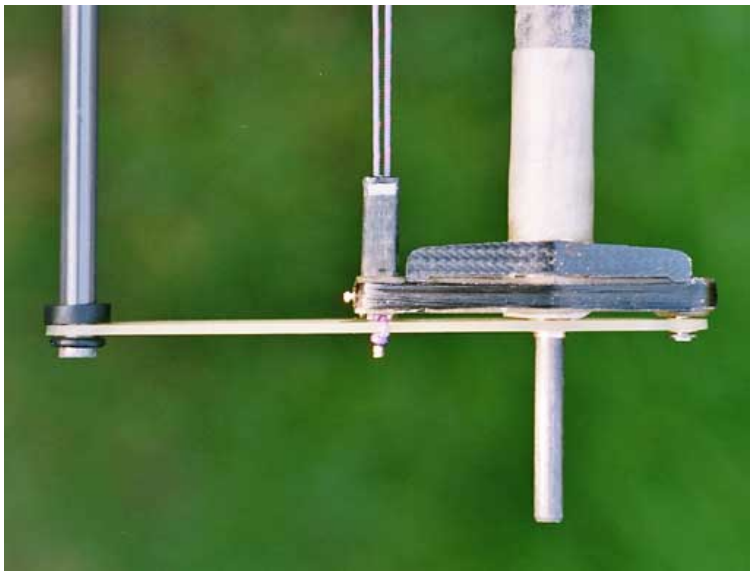

Bild 3.27 Draufsicht auf das Handgelenk (Flügelwurzel oben).
Handflügel-Haupt- und Hilfsholm sind noch nicht angesteckt.

Beim **EV8** wird aber mit dem Servo der Schlagflügel nur in der Verwindungsstellung des Gleitfluges arretiert. Dazu muss der Armflügel-Hilfsholm so eingestellt werden, dass der Schlagflügel ohne Beeinflussung durch den Servo im Gleitflug mit etwas zu geringem Anstellwinkel fliegt. Durch den Servo wird der Armflügeltorsionshebel dann in die exakte Segelstellung nach unten gezogen.

Das andere Schnurende wird an der Flügelwurzel mit einem Stoßdämpfer in einer Weise verbunden, welche die Abschlagverwindung dämpft. Dadurch soll das Überschwingen des Anstellwinkels in der oberen Schlagendlage gemildert werden. Die dazugehörige Geräteanordnung ist in folgendem Bild zu sehen.

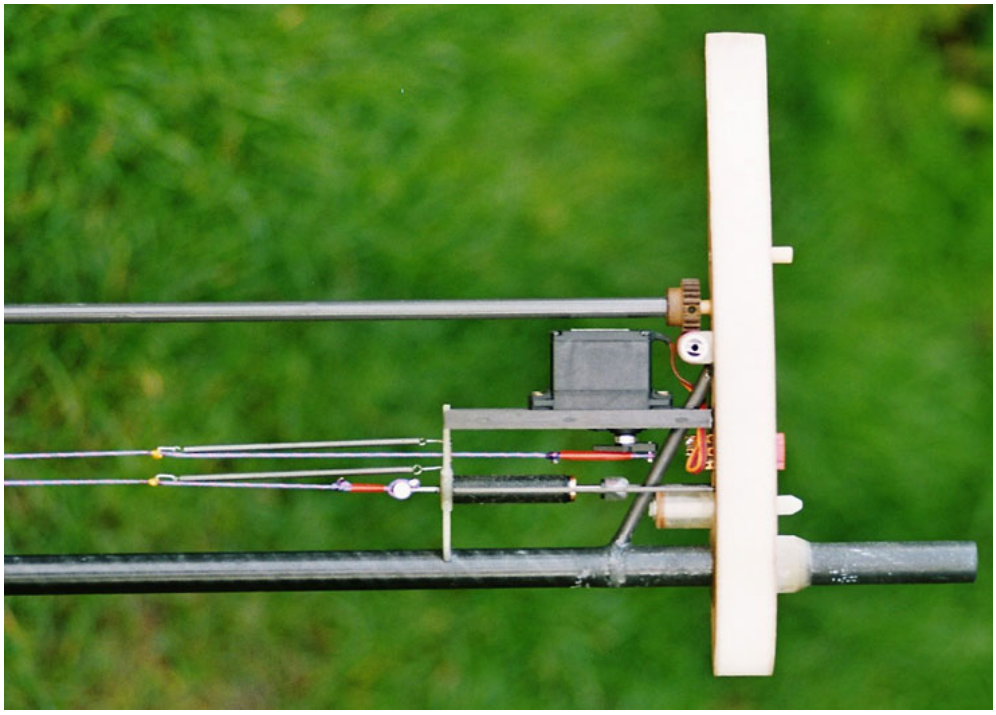

Bild 3.28 Armflügelwurzel mit Servo für die Gleitflugeinstellung und einem Stoßdämpfer zur Beeinflussung der Abschlagverwindung. Auch das Schneckenrad zur Einstellung der Hilfsholmtorsion ist zu sehen (s. auch Bild 3.3).

Der Servo-Hebelarm steht in dem Bild in einem Kurbeltotpunkt (zeigt nach rechts) und ist damit in der Gleitflugstellung. Entlastet der Servo den Schnurzug, so hat der Armflügel-Torsionshebel Bewegungsfreiheit. Er wird dann lediglich noch mit dem anderen Schnurende entgegen der Abschlagrichtung durch den Stoßdämpfer gebremst. Beim Aufschlag lässt der Schnurzug nach und der Stoßdämpfer fährt wieder aus.

Da hier nur Stoßdämpfer für Druckbeanspruchung zur Verfügung standen, musste die Zugkraft der Schnur erst in eine Druckkraft umgewandelt werden (siehe nächstes Bild).

Bei diesem Flügel wurden hochwertige, selbst einstellende Industrie-Stoßdämpfer eingesetzt. Deren Kraftverlauf ist über den ganzen Dämpferweg annähernd konstant. Stoßdämpfer aus dem Hobbybereich zeigen dagegen am Anfang der Dämpfungsbewegung eine große Kraftspitze. Wahrscheinlich sind aus letzterem Grunde beim **EV7** im Flug schon Stahlschnüre mit einer Zugfestigkeit von 300 N im Flügel zerrissen. Es gibt zwar heute sehr dünne Drachenschnüre mit deutlich höherer Zugfestigkeit, aber auch das Holmgerüst muss die Schnurzugkräfte aufnehmen und entsprechen dimensioniert werden.

Damit am Handgelenk die Schnur um die Rolle immer sauber liegen bleibt, wird sie durch die abgebildeten, langen dünnen Zugfedern-Stränge ständig unter leichter Spannung gehalten.

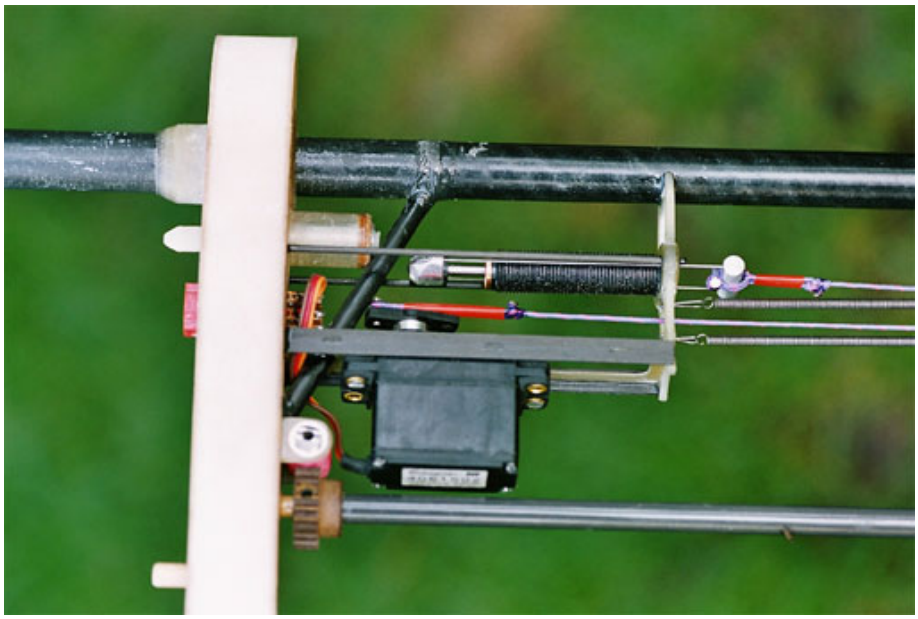

Bild 3.29 Armflügelmechanik unter anderem Blickwinkel

3.3.5 Gelenkschlagflügel mit zur Flügelspitze hin ansteigender Verwindung [1]

Um bei vorstehendem Gelenkschlagflügel im Bereich der Flügelspitze eine ansteigende Flügelverwindung zu erzielen, kann man im Handflügelbereich einen die Schlagweite vergrößernder Hilfsholm anwenden.

Zur eindeutigen Lagebestimmung des Flügelhandgelenks, wurden bei nachstehender Ausführung die betreffenden Gelenke von Haupt- und Hilfsholm im gleichen Abstand von der Flügelwurzel angeordnet (wie Bild 3.23). Die Hilfsholme von Arm- und Handflügel liegen dazu im Handgelenkbereich parallel und in Richtung der Flügeltiefe hintereinander. Das Torsionsmoment des Armflügel-Hilfsholms gelangt so ohne Unterbrechung direkt bis zum Armflügel-Torsionshebel[14]

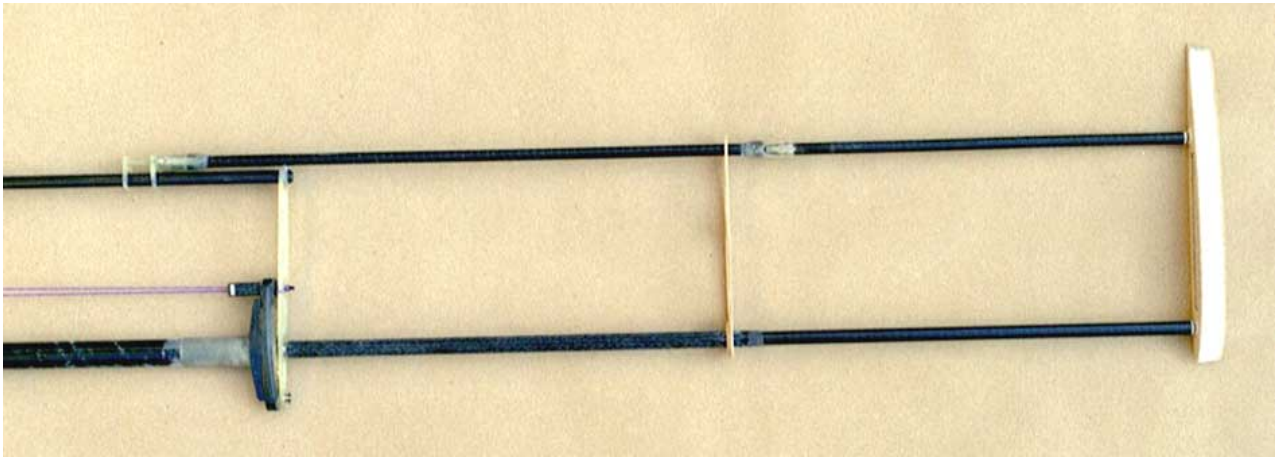

Bild 3.30 Handflügel-Holmgerüst des **EV8b**. Links das Handgelenk, etwa in der Mitte der Handflügel-Torsionshebel und rechts die Flügelspitze.

---

[14] Der Vorschlag, ein Kardangelenk zwischen Arm- und Handflügel-Hilfsholm zu verwenden, ist wahrscheinlich die bessere Lösung. Zur leichteren Rippenmontage sollte es steckbar sein.

Im Handbereich kommt als Hilfsholm das koaxiale Schiebegestänge von Bild 3.10 zum Einsatz. Die primäre Schlagbewegung des Hilfsholms erfolgt in diesem Bereich durch den hinteren Handflügel-Torsionshebel (etwa in Handflügelmitte). Gleich rechts davon ist das äußere Hilfsholmgelenk zu sehen, ab dem dann die Handflügelverwindung ansteigt.

Damit ist ein Holmgerüst zusammengestellt, das nahe an die Verwindungsanforderung entsprechend Bild 1.3 heran reicht. Zum Auffädeln der Flügelrippen ist es insbesondere am Handgelenk in geeigneter Weise zerlegbar.

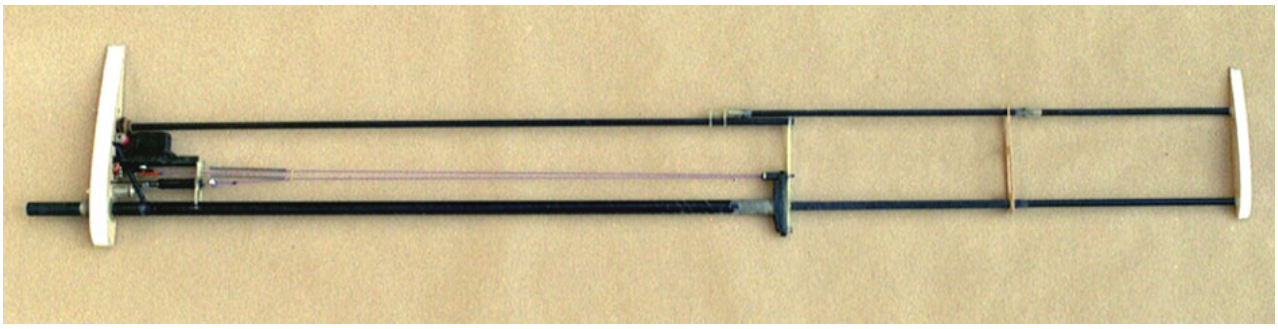

Bild 3.31 Beispiel des kompletten Gelenkschlagflügel-Holmgerüstes (**EV8b**) mit Verwindungsanstieg im Handflügelbereich.
Flügelwurzeltiefe 250 mm
Länge über alles 1430 mm
Gewicht 336 g

Bild 3.32 Zur Demonstration der inneren Vorspannung wurde hier das Flügelgerippe freitragend in der Rückenlage fotografiert.
An Hand der zunehmenden, sichtbaren Rippenbreite ist der Verwindungsanstieg zur Flügelspitze hin gut erkennbar.

Ohne Flügelbespannung wird die Soll-Verwindung recht gut wiedergegeben. Die Bespannkräfte behindern dann die Verwindung sicherlich ein wenig, was aber die großen aerodynamischen Kraftänderungen längs der Spannweite wieder ausgleichen können.

Abschließend noch zwei weitere Ansichten vom bespannfertigen Flügelgerippe des Schlagflügelmodells **EV8b**.

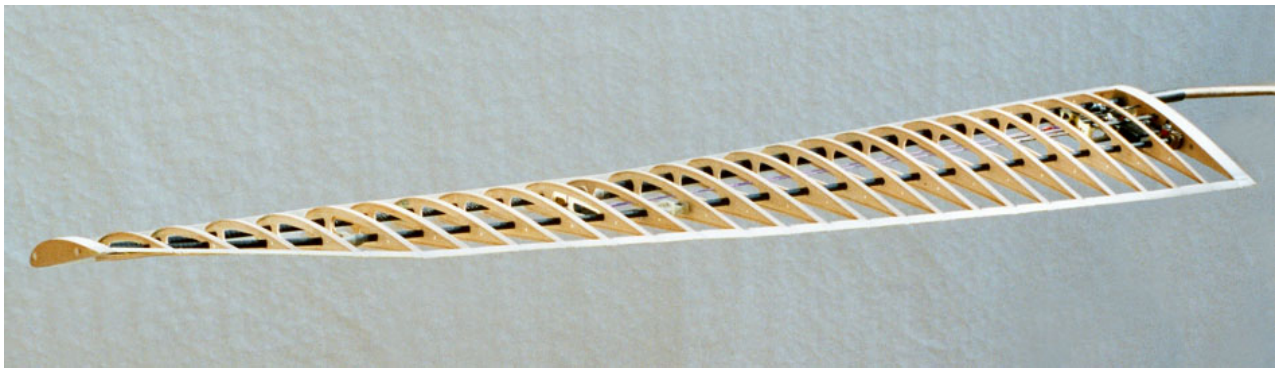

Bild 3.33 Die innere Flügelvorspannung kann auch auf „Abschlag“ eingestellt werden. Wenn man genauer hinsieht, kann man im Handflügelbereich Rippen erkennen, bei denen der Hilfsholm in einem nach vorne offenen Schlitz gelagert ist. Das erleichtert das Auffädeln der Rippen auf dem Holmgerüst.

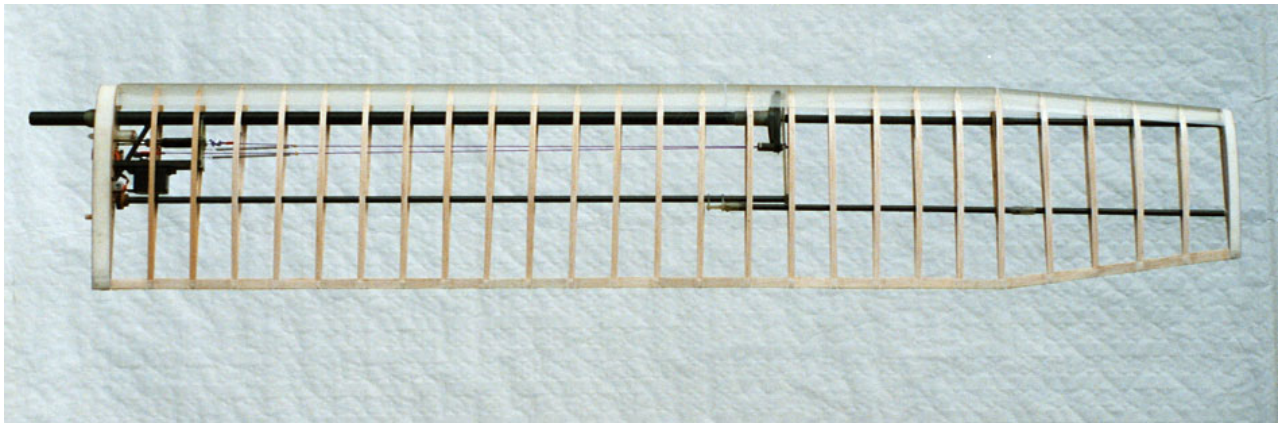

Bild 3.34 Draufsicht auf das fertiges Flügelgerippe mit Nasenschalen