

Norbert Brückner

### **Gedanken zum Bau einer Fernwelle**

Standardmäßig befindet sich der Motor eines RC-Flugzeugs vorn, zumindest bei den einmotorigen. Bei einem Nurflügel sieht es dahingegen ganz anders aus. Die meisten davon haben den Motor im Heck untergebracht, wie es aus flugmechanischer Sicht auch richtig ist, wenn auf Seitenleitwerk oder Winglets verzichtet wird. Wer das nicht glaubt, sollte sich den aufschlußreichen Artikel von John Jost „Die Horton IX-oder die Krux mit der Seitenstabilität“ einverleiben.

Mit der Montage am Flugzeugheck ist es allerdings noch nicht getan, denn jetzt ist die Schwerpunktlage des Modells zu beachten. Da Nurflügler sehr sensibel auf eine falsche, d.h. hecklastige Schwerpunktlage reagieren, ist dem rechtzeitig vorzubeugen. Aus dieser Not heraus ist bei einigen Nurflügelmodellen der Motor weit in Richtung Nasenleiste verschoben, und für die Luftschaube wurde die Tragfläche extra eingeschnitten. Da stimmt der Schwerpunkt, das Modell sieht aber etwas skuril aus und erfährt zudem eine mechanische Schwächung im Bereich der Flügelwurzel, was auch nicht erstrebenswert ist.

Somit ist der Gedanke naheliegend, den Motor soweit wie möglich nach vorn zu schieben und die Luftschaube mittels Fernwelle anzutreiben. Dann ist die korrekte Schwerpunktlage leichter zu erreichen, und die Luftschaube ist dort, wo sie hingehört. Die praktische Realisierung ist allerdings nicht so einfach, wie auch viele Beiträge in den entsprechenden Foren bezeugen. Bei genauer Betrachtung ergeben sich folgende Probleme:

1. Motor und Luftschaube benötigen ein Lagerschild. Während der Motor einfach stirnseitig an eine Halterung angeschraubt wird, sollte die Luftschaube über ein Kugellager geführt werden. Das bedingt aber eine Fluchtung der beiden Lagerstellen. Ein massiver und damit masseintensiver Materialeinsatz verbietet sich an dieser Stelle.
2. Die zum Einsatz kommende Fernwelle sollte leicht sein, zugleich aber eine beidseitig sichere Klemmverbindung garantieren. Überlegungen, als Welle einen Kohlenfaserstab einzusetzen schlugen fehl. Die Klemmverbindungen zum Motor und zur Luftschaube sind auf die Dauer nicht beständig, und der Kohlestab (Rohr) zerfällt. Ob ein Massivstab besser geeignet ist, wurde gar nicht erst versucht. Daher kommt der bewährte Stahldraht wieder zum Einsatz.
3. Aus berechtigtem Zweifel, dass die Lagerstellen nicht miteinander fluchten, formuliert sich der Wunsch nach einer elastischen Kupplung. Auch dazu wird in den Foren viel geschrieben. Aus dem Schiffsmodellbau sind Lösungen bekannt, deren Baugröße und Masse sind jedoch für ein Flugmodell größtenteils unakzeptabel. Daher bleibt nicht viel anderes übrig, als mit Gefühl und Augenmaß die Bauteile händisch auszurichten. Entscheidend dabei ist die Verbindung zwischen Motor und Fernwelle. Erste Versuche mit dem Klemmstück einer Lüsterklemme waren über eine Saison erfolgreich, eine speziell angefertigte Buchse mit einer entsprechenden Passung verrichtet ihren Dienst aber wesentlich zuverlässiger.

4. Bei kurzen Fernwellen ist man mit etwas Geduld bald am Ziel, bei längeren kommen jedoch Zweifel auf, ob diese Konstruktion aus dynamischen Gründen einen Dauereinsatz in der Luft übersteht. Dabei ist selbst schon die Frage, was eine kurze oder lange Welle ist, nicht leicht zu beantworten.

In Abb. 1 ist eine Fernwelle aus Stahldraht mit einem Durchmesser von  $d = 3 \text{ mm}$  und einer Länge von  $l = 70 \text{ mm}$  verwendet worden. Motorseitig ist noch die Lüsterklemme zu sehen, die später durch eine Buchse ersetzt wurde. Der gesamte Lagerbock besteht aus Pertinax und hat bereits mehrere schwere Abstürze überlebt. Antriebsseitige Schwingungen konnten bisher nicht festgestellt werden. Diese Kombination ist seit ca. 2 Jahren im Einsatz.



Abb. 1 Fernwelle am EPP Modell Mako

Längere Wellen erfordern jedoch ein systematisches Nachdenken über diese Konstruktion. Auslöser dafür war der Wunsch, die Northrop N9M als einfaches EPP Modell zu besitzen. Da dieses Flugzeug mit zwei Druckschrauben ausgestattet ist und deren Wellen dazu noch einen beträchtlichen Neigungswinkel zur Flügelsehne haben, mußten zwangsläufig die Motoren unmittelbar hinter der Nasenkante untergebracht werden. Eine Kopie des genialen Nachbaus dieses Flugzeugs durch Dean Copeland aus Nebraska brauchte es nicht werden, ein flugfähiges Modell war ausreichend.

Ausschlaggebend für die Dimensionierung war eine Gesamtlänge der Fernwelle von ca. 240 mm und dabei ein lichter Abstand der Lagerstellen von etwa 220 mm. Um eine einfache Verbindung von Motor und Antriebswelle zu gewährleisten, sollte auch die Fernwelle mit einem Durchmesser von 3 mm versehen sein. Eine sich daraufhin anschließende Abschätzung des dynamischen Verhaltens der Welle bezog sich auf zwei Schwerpunkte: das Torsionsschwingungsverhalten und die Biegeschwingungen. Dazu sollten einfache und überschaubare Ansätze gewählt werden. In der Maschinendynamik werden derartige

Aufgabenstellungen wesentlich aufwendiger und genauer betrachtet. Im vorliegenden Fall sollte die Aussage ausreichend sein, ob die konstruktiven Parameter beibehalten werden können oder nicht. Das Ziel war also, eine Berechnung der Resonanzfrequenzen für die beiden Schwingformen.

### 1. Torsionsschwingungen

Auf der Basis der Differentialgleichung zweiter Ordnung für Drehschwingungen wurden die Eigenkreisfrequenz und daraus die Resonanzfrequenz für die Antriebswelle berechnet. Danach ergibt sich für die Resonanzfrequenz der Ausdruck

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{G \cdot d^2 \cdot \pi}{4 \cdot L \cdot m}} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

G ... Schubmodul

d ... Wellendurchmesser

L ... Wellenlänge

$$G = 7,93 \cdot 10^6 \frac{N}{cm^2} \text{ für Stahl}$$

$$G = 6,0 \cdot 10^5 \frac{N}{cm^2} \text{ für CFK}$$

Für einen Wellendurchmesser von  $d = 3 \text{ mm}$  und einer variablen Einspannlänge ergeben sich Resonanzfrequenzen, die selbst von sehr hochdrehende Motoren nicht erreicht werden. Wird der Wellendurchmesser vergrößert, nehmen die Resonanzfrequenzen zu. Die Berechnung wird aufwendiger, wenn CFK zur Anwendung kommt. Der exakte G-Modul ist meistens unbekannt, so dass man auf Literaturangaben angewiesen ist. Dennoch sind die Resonanzdrehzahlen oberhalb des üblicherweise genutzten Drehzahlbandes.

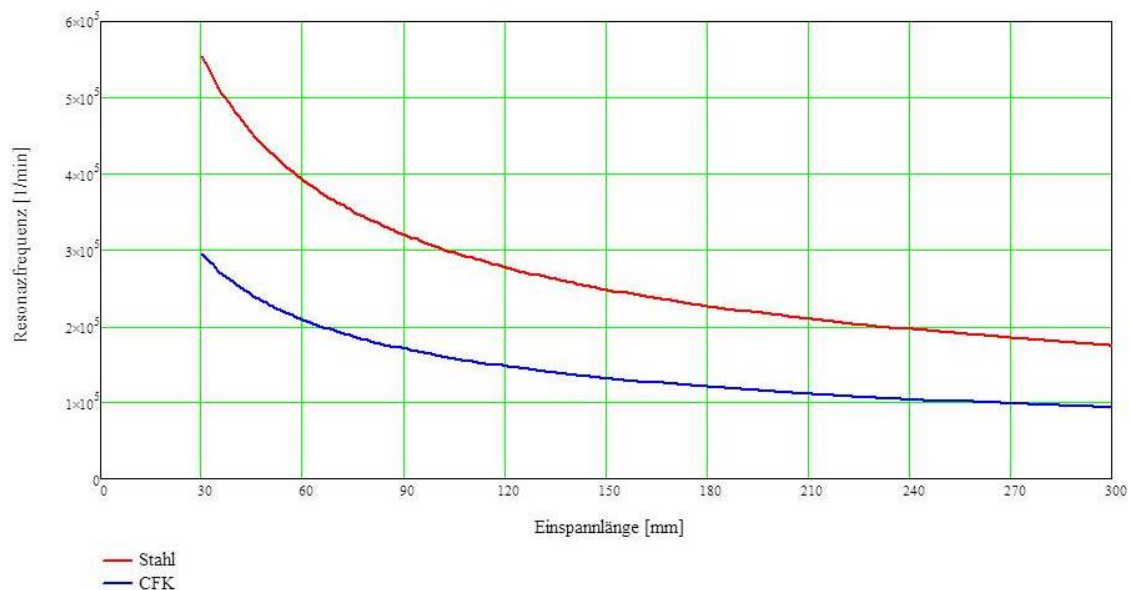


Abb. 2 Resonanzdrehzahl bei Torsionsschwingungen einer Welle mit einem Durchmesser von  $d = 3 \text{ mm}$

## 2. Biegeschwingungen

Auch für diese Schwingform sollte aus der Sicht des Modellbaus eine einfache Abschätzung vorgestellt werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die rotierenden Teile -hier ist es vornehmlich die Luftschraube- ausgewuchtet sind. Darüber hinaus soll die Welle längs ihrer Ausdehnung homogen, also mit einem konstanten Durchmesser und einheitlichen Materialeigenschaften (E-Modul, Dichte) ausgestattet sein. Ferner wird der Motor stirnseitig gelagert, die Antriebswelle ist nur mit einer Lagerstelle am anderen Wellenende versehen. Unter dieser Annahme ist nachfolgende vereinfachte Berechnung [1] für die Abschätzung des „gefährlosen“ Drehzahlbereiches ausreichend.

Für Biegeschwingungen berechnen sich die Eigenkreisfrequenzen gemäß nachstehender Gleichung [1]:

$$\omega_k = \lambda_k^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A \cdot L^4}} \quad (2)$$

Für die dafür wirkende Eigenfrequenz, die gleichbedeutend der Resonanzdrehzahl ist, gilt wiederum die Umrechnung  $f_k = \frac{\omega_k}{2 \cdot \pi}$ .

Mittels Gl.(2) können also die kritischen Eigenfrequenzen berechnet werden, bei denen die Schwingamplituden besonders groß sind. Ergänzend sei festgehalten, dass sich natürlich die Schwingform mit der jeweiligen Ordnung ebenfalls ändert. Wird die Motordrehzahl erhöht, durchläuft man zwangsläufig auch die kritischen Drehzahlen, was sich akustisch bzw. auch haptisch, wenn man die Finger auf die Wellenabdeckung legt, bemerkbar macht.

Aus den Schwingformen ergeben sich ferner Rückschlüsse auf die Position eventueller Zwischenlager. Diese sollten in den Schwingknoten angeordnet sein. Zur besseren Veranschaulichung sind in Abb. 2 für die ersten drei Ordnung die zu erwartenden Schwingformen und der dabei für die Rechnung zu verwendende Faktor  $\lambda^2$  enthalten.

In Anlehnung an unterschiedliche Einspannmöglichkeiten in [1] sind in Abb. 3 für eine ausgesuchte Wellenbefestigung, die im Modellbau üblich ist, die Schwingformen gegenübergestellt. Je größer die Eigenfrequenz, desto mehr Wellenberge treten auf.

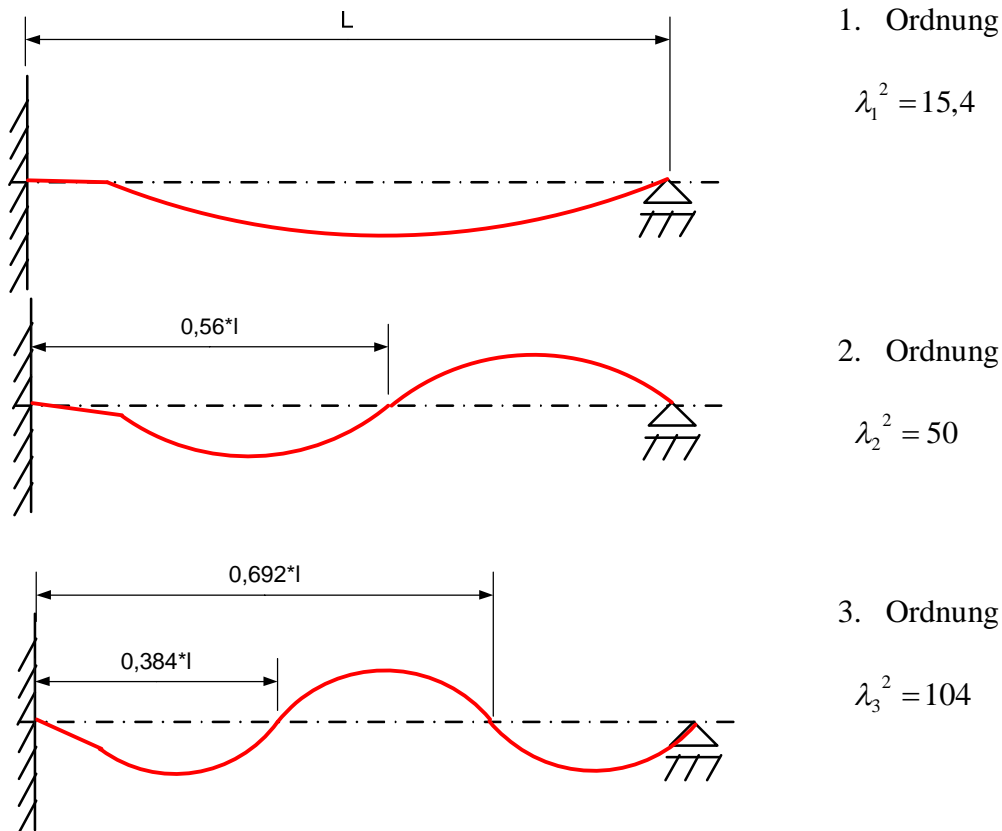


Abb. 3 Übersicht über die ersten drei Einschwingformen für eine spezielle Einspannung

Als Zahlenbeispiel soll ein Wellendurchmesser von  $d = 3 \text{ mm}$  bei einer Wellenlänge von  $L = 200 \text{ mm}$  angenommen werden, als Material wird Stahl verwendet. Alternativ dazu kommt ein Welle aus dem gleichen Material mit einem Durchmesser von  $d = 5 \text{ mm}$  in Frage. Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die Ergebnisse.

Tabelle 1 Resonanzdrehzahlen für die ersten drei Ordnungen (Stahlwelle)

	<b>d = 3 mm</b>	<b>d = 5 mm</b>
<b>1. Ordnung</b>	$n_1 = 14260 \text{ 1/min}$	$n_1 = 23770 \text{ 1/min}$
<b>2. Ordnung</b>	$n_2 = 46300 \text{ 1/min}$	$n_2 = 77170 \text{ 1/min}$
<b>3. Ordnung</b>	$n_3 = 96310 \text{ 1/min}$	$n_3 = 160500 \text{ 1/min}$

Betrachtet man den Zusammenhang in einem Diagramm, so ist ein hyperbolischer Abfall der Resonanzdrehzahl mit zunehmender Einspannlänge zu erkennen. Kürzere Wellen sind also unkritischer in der Anwendung. Diese Erkenntnis kann als trivial vorausgesetzt werden.

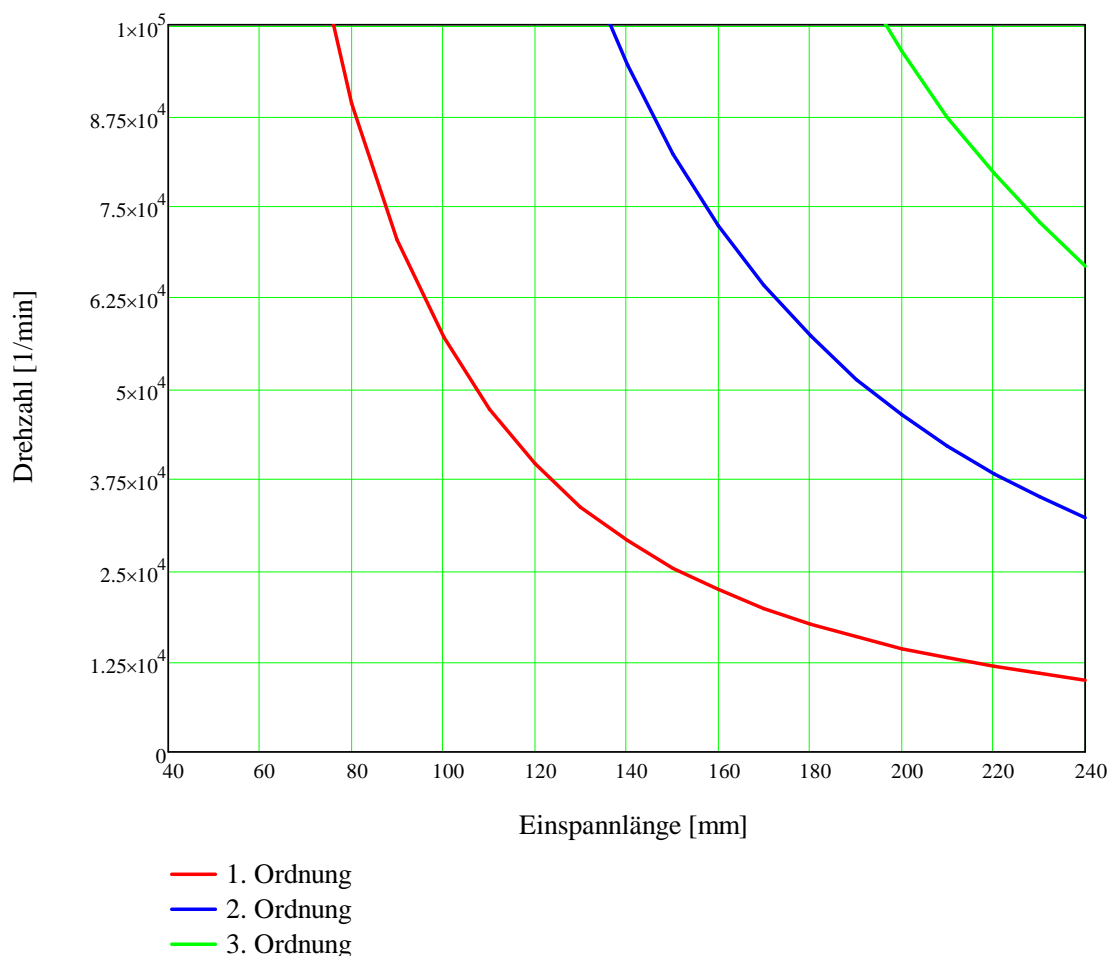


Abb. 4 Verlauf der Resonanzdrehzahl für eine Stahlwelle mit  $d = 3$  mm

Anwendungsseitig bedeutet das, ein längeres Verweilen bei der Resonanzdrehzahl führt zu spürbaren Schwingungen im ganzen Modell und Bauteilverbindungen können sich lösen. Es empfiehlt sich also, diese Drehzahlbereiche zu vermeiden bzw. darauf zu achten, dass die Nenndrehzahl einen ausreichenden Abstand zur Resonanzdrehzahl hat. Die hier vorgestellten Ergebnisse können jedoch den Anwender beruhigen, der relevante Drehzahlbereich für die erste Ordnung wird die Ausnahme darstellen, die höheren Ordnungen sind nicht mehr von Interesse für die meisten Anwendungen im Modellbau.

Zur Vervollständigung soll im weiteren CFK als Wellenmaterial verwendet werden. Eine Berechnung der Resonanzdrehzahl erfolgt zwar analog, jedoch bereitet es Mühe, die korrekten Materialeigenschaften des Materials zu quantifizieren. Daher sind im nachfolgenden Beispiel mittlere Werte angenommen worden.

Für eine Antriebswelle soll ein CFK-Rohr mit einem Außendurchmesser von  $d_a = 5$  mm und ein Innendurchmesser von  $d_i = 3$  mm zum Einsatz kommen. Für diese Welle ergeben sich Resonanzdrehzahlen von

$$n_1 = 18950 \text{ 1/min} \quad n_2 = 61520 \text{ 1/min} \quad n_3 = 128000 \text{ 1/min.}$$

Selbst bei Schwankungen der Materialkonstanten dürfte somit dem Einsatz dieses Werkstoffs, zumindest aus der Sicht der Biegeschwingungen, nichts entgegenstehen.

In dem eingangs erwähnten Modell der N9M wurden jetzt zwei Fernwellen mit einer Einspannlänge von  $L = 222 \text{ mm}$  praktiziert. Der Antrieb erfolgt mit einem Lipolice LPA 2208/24T und einer Starrluftschraube Graupner 7x4. Als Welle kam ein CFK Rohr mit einem Außendurchmesser von 5 mm zur Anwendung. Stirnseitig wurden kurze Stahlwellen mit  $d = 3 \text{ mm}$  eingeschoben, um problemlos eine Verbindung zum Motor und Luftschraube herzustellen (Abb. 5). Als Material für die Lagerung wurde Sperrholz verwendet.

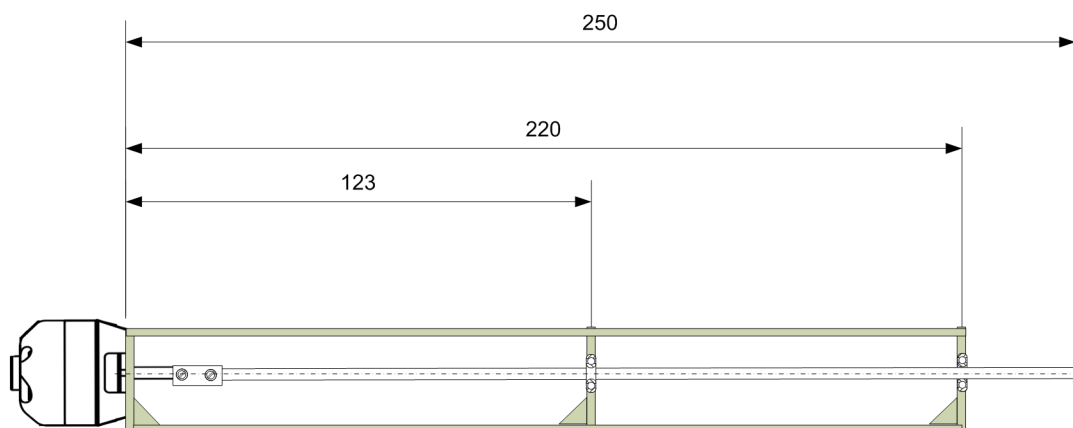


Abb. 5 Skizze einer längeren Fernwelle

In den beiden Lagerstellen wurden abgedichtete Kugellager eingesetzt. Obwohl nach der Berechnung keine Gefährdung hinsichtlich der Biegeschwingungen zu erwarten ist, wurde eine mittlere Lagerstelle eingefügt. Schließlich kann man nie wissen, wie exakt die Lagerstellen miteinander fluchten.

Eingebaut in das Modell verhielt sich diese Konstruktion bei den ersten Flügen zufriedenstellend. Es sind lediglich schwache Schwingungen im Flügel spürbar, große Amplituden, die möglicherweise auch noch sichtbar sind, konnten nicht festgestellt werden.

Mit etwas Geduld läßt sich eine Fernwelle also auch für größere Abstände realisieren. Sollte jedoch die Luftschraube bzw. deren Mitnehmer Unwuchten aufweisen, war die ganze Mühe umsonst.

Folgende Darstellung zeigt diese Lagerung im eingebauten Zustand. Der Motor ist tief im vorderen Teil des Flügels versenkt, wobei darauf zu achten ist, dass dadurch die gesamte Festigkeit des Flügels infolge der großen Ausschnitte nicht leidet.



Abb. 6 Fernwellenlagerung im Flügel

Insgesamt macht das Modell mit einer Spannweite von 1,50 m einen respektablen Eindruck. Die Verkleidung der Motorwellen in Verbindung mit der Heckluftschraube erzeugte eine akzeptable Richtungsstabilität ohne ein Seitenleitwerk (Abb. 6).



Abb. 7 Gesamtansicht der Motorlagerung mit Verkleidung



Zusammenfassend lässt sich feststellen: Fernwellen sind aufwendig aber machbar. Hinsichtlich Biege- und Torsionsschwingungen sind bei den gängigen Motordrehzahlen keine großen Überraschungen zu erwarten. Dass allerdings bei dieser Anordnung der Luftschraube der Handstart eine besonders reizvolle Angelegenheit sein kann, weiß wohl jeder Nurflügelfan aus eigener Erfahrung.

- [1] Holzweißig F., Dresig, H.  
Lehrbuch der Maschinendynamik  
Fachbuchverlag Leipzig, 2. Auflage