

**Bewerbung um den
Berblinger-Preis 2006 der Stadt Ulm**

Schwingenflieger *Berblinger 2*

Dr. Wolfgang Send¹, Göttingen

Studie der Machbarkeit.....	1
Normalflieger und Evolutionsgrad.....	3
Aerodynamische Kennzahlen.....	4
Starten und Steigen.....	5
Kinematik und instationäre Leistungen.....	7
Antrieb und Steuerung.....	10
Zusammenfassung.....	11
Anhang: Wie könnte es weitergehen?.....	12

Studie der Machbarkeit

Der Schwingenflieger *Berblinger 2* ist ein Fluggerät für zwei Personen, das seine Schubkraft ausschließlich aus der Bewegung der Tragflächen nach Art des Schwingenflugs der Lebewesen bezieht. Der Flieger wird bis zum Jahre 2011 startbereit sein. Die Entwicklung soll den Durchbruch zu einer technischen Nutzung dieses in der Natur überaus effektiven Antriebs bringen.

Zu welchem Zweck? Das Fliegen ist innerhalb der ersten einhundert Jahre nach dem ersten Motorflug 1903 zu einem sicheren und weltweit verbreiteten Transportmittel geworden. Eine wesentliche Errungenschaft hat uns die Natur aber unverändert voraus: Die fliegenden Lebewesen erfüllen mit ihren Tragflügeln gleichzeitig zwei Funktionen, das Tragen ihres Gewichts und die Schuberzeugung zur Überwindung des Widerstands. Die Leistung für die Schubkraft wird entfernt vom Ort ihrer Verwendung im Rumpf des Lebewesens aufgebracht. Das Motorflugzeug dagegen erzeugt diese Leistung an der gleichen Stelle, an der sie in Schubkraft umgesetzt wird. Diese Anordnung beeinträchtigt die Aerodynamik des Flügels, sie verursacht aber vor allem erheblichen und unvermeidlichen Lärm. Die Vorstellung ist verlockend, einen vergleichsweise

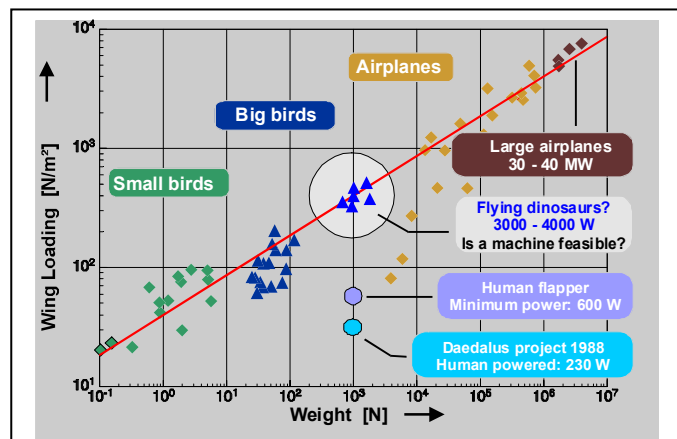


Bild 1: Flächenbelastung über Gewicht: Der Durchbruch zur technischen Nutzung des Schwingenflugs steht noch bevor. – Evolution der Flugzeuge (◆), beginnend mit dem Flyer III der Gebrüder Wright als leichtestem Flugzeug.

Diese Anordnung beeinträchtigt die Aerodynamik des Flügels, sie verursacht aber vor allem erheblichen und unvermeidlichen Lärm. Die Vorstellung ist verlockend, einen vergleichsweise

¹ Der Autor ist Wissenschaftler beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) im Institut für Aeroelastik in Göttingen. Dort arbeitet er derzeit theoretisch an Fragen der Kopplung von Fluid und Struktur und ist wiederholt in Projekten zusammen mit der Luftfahrtindustrie tätig gewesen. Daneben hat er über 15 Jahre mit der Arbeitsgruppe Flugbiophysik an der Universität Göttingen zusammengearbeitet und entwickelt im Rahmen einer genehmigten Nebentätigkeit Demonstrationsgeräte u.a. zur Physik des Schwingenflugs: www.aniprop.de

leisen, sehr effektiven Antrieb mit Schwingenflug zu haben und die Leistung dafür im Rumpf des Fliegers zu erzeugen. Bild 1 zeigt die Lücke, die es zwischen der natürlichen Evolution der fliegenden Lebewesen und der technischen Evolution der Fluggeräte zu schließen gilt². Das Bild zeigt die Beziehung zwischen der Flächenbelastung (Gewicht bezogen auf die Grundrissfläche der Tragflügel) und dem Gewicht eines Fluggeräts.

Der Mechanismus ist eine gekoppelte Schlag- und Drehbewegung der Flügel, bei der die Auslenkungen der beiden Bewegungsanteile in jedem Flügelschnitt annähernd das gleiche Verhältnis zueinander haben. Zugleich nehmen die Auslenkungen in ihrem absoluten Wert von der Flügelwurzel bis zur Spitze gleichmäßig zu. Die Wölbung der Flügel erzeugt die Auftriebskraft, deren mittlerer Wert über die Periode der Bewegung das Fluggerät trägt. Die Leistung zum Steigen und zur Überwindung des Widerstands der Strömung stammt von einem Elektromotor, dessen Drehbewegung durch ein Getriebe in eine Hubbewegung geeigneter Frequenz umgeformt wird. Die Hubbewegung treibt ähnlich der Bewegung beim Rudern die Holme der beiden Flügel von der Mitte aus zu der schlagenden Vertikalbewegung an. Beide Holme werden zugleich von dem Hubarm bewegt. Diese gekoppelte Schlag- und Drehbewegung zeichnet sich dadurch aus, dass die Schlagleistung vermittels der Drehung mit einem hohen Wirkungsgrad in eine Schubleistung umgewandelt wird. Dabei wird schon im Stand genügend Schubkraft zum Starten erzeugt. Die Steuerung des Fluggeräts geschieht über eine große Leitwerkflosse, die in sich gedreht und zugleich gehoben und gesenkt werden kann.

Der voranstehend beschriebene Bewegungsablauf hat sich in der Natur im Laufe der Evolution zu hoher Vollkommenheit entwickelt, seine Nachbildung mit einem „künstlichen Vogel“ vom Start bis zur Landung ist allerdings erst in allerjüngster Zeit gelungen. Nach Kenntnis des Autors ist es mit dem Schwingenflieger ESKALIBRI des Schweizer Kurt Saupe aus St. Gallen, einem künstlichen Vogel (engl. *Ornithopter*), Ende 2004 weltweit erstmals gelungen, den **Ablauf eines Fluges** in der Reihenfolge

Start vom Boden – Sicherer und kontrollierter Flug – Sichere Landung

erfolgreich vorzuführen und danach viele Male und an verschiedenen Orten zu wiederholen³. Die Berechnungen und Überlegungen des Autors haben zu dem Ergebnis geführt, dass mit dieser Vorlage auch ein zwei Personen tragendes Fluggerät entwickelt werden kann. Neue Materialien, modernste Antriebstechnik und eine genaue Kenntnis der Strömungsverhältnisse auf der Basis zeitgemäßer Rechen- und Konstruktionsverfahren geben die Sicherheit, die vielen Bemühungen früherer Jahre und Jahrzehnte nunmehr mit einem Erfolg krönen zu können. Der Autor hat dazu seine feste Position formuliert:

Stand das letzte Jahrhundert der Luftfahrt ganz im Zeichen des ‚starren‘ Flugzeugentwurfs, des konstruktiv vorgegebenen Optimums, so wird das neue 21. Jahrhundert das ‚flexible‘ Flugzeug entwickeln, das sich - in einem noch nicht absehbaren Ausmaß – der seit Millionen von Jahren beherrschten Adaptionsfähigkeit der fliegenden Lebewesen annähern wird.

² Das Bild ist der Anmeldung des - zwischenzeitlich angenommenen - Vortrags *Flapping-Wing Thrust in Compressible Flow* entnommen, den der Autor auf dem Weltkongress des *International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)* vom 3.-8. September 2006 in Hamburg halten wird.

³ Mit den Teilnehmern des vom Autor geleiteten Kurses *The Physics of Flying* im Rahmen des *XLAB International Science Camp 2005* ist die Flugmaschine ESKALIBRI von Kurt Saupe in Göttingen vorgeführt und im *DLR_School_LAB* eingehend studiert worden. Ein kurzer Videofilm auf DVD über *Eskalibri in Göttingen* ist der Bewerbung beigelegt.

Schließlich wird mit dem Namen des Projektes dem Namensgeber des Wettbewerbs die Referenz erwiesen. Die Bezeichnung **Berblinger 2** gilt im doppelten Sinne der Wiederholung des historischen Flugversuchs wie der Tatsache, dass diesmal zwei Insassen an dem Flug teilnehmen werden⁴.

Normalflieger und Evolutionsgrad

Das Diagramm auf der ersten Seite ist nebenstehend in einem Ausschnitt wiederholt und um zwei wesentliche Datenpunkte ergänzt. Die zentrale Bedeutung der Darstellung wird daran deutlich, dass die unterbrochene rote Linie bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts durch Vermessen von Lebewesen gefunden wurde, die durchgezogene rote Linie dagegen auf einer theoretischen Überlegung des Autors beruht⁵. Das Erstaunlichste aber ist, dass die technische Evolution der von Menschenhand entwickelten Fluggeräte sich zwanglos in dieses Diagramm auf der Seite 1 einfügt. Aus dieser Tatsache hat der Autor die Klassifizierung abgeleitet, dass „normale“ Fluggeräte solche sind, die durch die Nachbarschaft zu dieser roten Linie ausgezeichnet sind. Fluggeräte und Lebewesen mit Kenndaten auf dieser roten Linie sollen deshalb **Normalflieger** genannt werden.

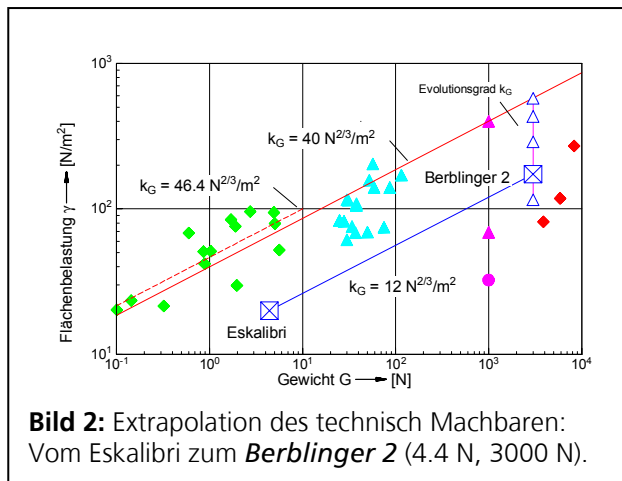


Bild 2: Extrapolation des technisch Machbaren: Vom Eskalibri zum **Berblinger 2** (4.4 N, 3000 N).

Größe	Wert	Einheit
Flügelfläche S	0.22	m^2
Gewicht G	4.40	N
Flächenbelastung γ	20	N/m^2
Spannweite b	1.12	m
Seitenverhältnis Δ	5.7	b^2 / S
Evolutionsgrad k_G	12.2	$N^{2/3}/m^2$
Mittlere Flügeltiefe l_m	0.21	m
Wurzelflügeltiefe l_i	0.27	m
Zuspitzung $\lambda = l_a / l_i$	0.58	-

Tabelle 1: Eckdaten des ESKALIBRI

Rechnerisch verbindet sich mit dem Namen Evolutionsgrad (eines Fliegers) die Konstante k_G , die den funktionalen Zusammenhang zwischen Flächenbelastung γ und Gewicht G parametrisiert:

$$\gamma(G) = k_G \cdot \sqrt[3]{G} \quad \text{mit } k_G \text{ Evolutionsgrad}$$

Dazu noch einige weitere Bezeichnungen zur leichteren Verständigung: Das Diagramm soll fortan als **Normalfliegerdiagramm** bezeichnet werden. Fluggeräte unterschiedlichen Gewichts haben den gleichen **Evolutionsgrad** erreicht, wenn sie auf einer Linie parallel zur roten Linie liegen. Diese Bezeichnung nimmt Bezug darauf, dass sich die technische Evolution der Flugzeuge, wie sie durch die Datenpunkte in Bild 1 dargestellt ist, beginnend vom Flyer III der Gebrüder Wright auf diese rote Linie hin entwickelt hat.

⁴ Es muss nicht betont werden, dass die Überlegungen für den Fall der erfolgreichen Teilnahme gelten. Der Name **Berblinger 2** des Projekts ist bislang nicht als Marke geschützt worden, aber als Internetadresse www.berblinger2.de eingetragen.

⁵ W. Send, *Der Traum vom Fliegen*, Naturwiss. Rundschau **56** (2003), S. 65-73.

Größe	Wert	Einheit
Evolutionegrad k_G	12.0	$N^{2/3}/m^2$
Gewicht G	3,000	N
Zuspitzung $\lambda = \ell_a / \ell_i$	0.60	-
Seitenverhältnis Λ	6.0	b^2 / S
Flächenbelastung γ	173.1	N/m^2
Spannweite b	10.2	m
Flügelfläche S	17.3	m^2
Mittlere Flügeltiefe ℓ_m	1.7	m
Wurzelflügeltiefe ℓ_i	2.1	m

Tabelle 2: Eckdaten des **Berblinger 2** mit dem Evolutionegrad des Fliegers Eskalibri.

Die Untersuchung von ESKALIBRI hat gezeigt, dass dieses Fluggerät noch kein „normales“ Fluggerät ist. Aber die Annahme des gleichen Evolutiongrades für die Größe von **Berblinger 2** gibt einen Hinweis auf das derzeit technisch Machbare.

Die erste wesentliche Auslegungsgröße für **Berblinger 2** ist das angenommene **Gewicht** von **3,000 N** (300 kg) für zwei Personen und das Fluggerät.

Die blaue Verbindungslinie in Bild 1 parallel zur roten hat den Zahlenwert 12 für k_G , der aus den Eckdaten des

Eskalibri in Tabelle 1 ausgerechnet worden ist. Für die Eckdaten des **Berblinger 2** ist diese Zahl Ausgangspunkt der neuen Dimensionierung. Die Zahlen ergeben sich aus der Rückrechnung⁶ der beiden vorgegebenen Größen Gewicht und Evolutionegrad und der ungefähren Beibehaltung von Seitenverhältnis und Zuspitzung.

Sieht man zunächst auf die geometrischen Daten, so unterscheiden sich diese nicht sehr vom Grundriss eines gewöhnlichen Drachengleiters. Der Unterschied liegt in der größeren Tragkraft als Folge einer höheren Fluggeschwindigkeit, die im nachfolgenden Abschnitt diskutiert wird.

Aerodynamische Kennzahlen

Auftriebskraft. Nach dem Gewicht des Fliegers und den geometrischen Daten der Auslegung sind nunmehr Annahmen über die aerodynamischen Eigenschaften zu treffen. Die Qualität der Flügel im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit wird bestimmt durch den Auftriebsbeiwert c_A , aus dem deren Auftriebskraft A ermittelt wird nach der Formel

$$A = c_A \cdot q_0 \cdot S \quad \text{mit} \quad q_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot u_0^2.$$

Die Dichte ρ der Luft sei nachfolgend stets mit 1.2 kg/m^3 gerechnet. Wir nehmen für den Flügelschnitt (zweidimensionaler Querschnitt) im Mittel den **Auftriebsbeiwert** $c_{A,2D} = 1$ an, was bei einer gewöhnlichen ebenen Platte einem Anstellwinkel von 10 Grad entspräche. Dieser Wert wird zu den Flügelspitzen hin gemindert durch den Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite. Eine grobe Faustformel berücksichtigt diesen Randabfall durch einen mit dem Seitenverhältnis Λ gebildeten Korrekturfaktor $\Lambda / (\Lambda + 2)$, wodurch sich ein mittlerer Wert $c_A = 0.75$ ergibt. Mit dieser Vorgabe und der bekannten Flügelfläche S ergibt sich die Fluggeschwindigkeit u_0 , für die der erzeugte Auftrieb das Gewicht des Fliegers gerade ausgleichen kann. Für den **Berblinger 2** ergibt sich diese Mindestgeschwindigkeit zu 19.6 m/s , also rund 70 km/h . In dieser Größenordnung liegt die Reisegeschwindigkeit des Fluggeräts.

⁶ Die Rückrechnung erfolgt mit einem elektronischen Datenblatt auf Basis einer Microsoft Excel Tabelle. Die Tabelle ist vom Autor 2003 in Zusammenhang mit der Publikation *Der Traum vom Fliegen* im Internet verfügbar gemacht worden. Die Daten vom **Berblinger 2** können darin eingesetzt und nachgerechnet werden, wobei man sich zweckmäßiger der Tabelle [natrs03_modellnormal_send.xls](http://www.aniprop.de/natrs03_xlsmodell_send.xls) bedient:

http://www.aniprop.de/natrs03_xlsmodell_send.html

Widerstandskraft. Der Strömungswiderstand W eines Fluggeräts wird gekennzeichnet durch die **Gleitzahl** ε , die das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand beschreibt:

$$\varepsilon = A/W \quad \text{Gleitzahl}$$

Die Annahme von $\varepsilon = 15$ ist ein oberer Wert für einen modernen Drachengleiter. Aus dieser Vorgabe erhält man eine erste Abschätzung für den Leistungsbedarf.

Leistungsbedarf zum Fliegen. Zur Überwindung des Strömungswiderstands W wird fortlaufend Leistung P benötigt, die von der Schubkraft aufgebracht wird:

$$P = W \cdot u_0 = \frac{C_A}{\varepsilon} \cdot q_0 \cdot S \cdot u_0 = \frac{C_A}{\varepsilon} \cdot S \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_0^3$$

Geht man mit dem ermittelten Wert $u_0 = 19.6$ m/s und den übrigen Daten in die Gleichung, dann erhält man für die Größenordnung der Flugleistung $P \cong 3,900$ W. Der Wert von rund 4 kW ist eine untere Grenze, die noch keine Verluste zwischen der Erzeugung der Leistung und ihrer Abgabe an die Hebelmechanik der Flügel enthält. Auch wird die bereit gestellte mechanische Leistung durch den Mechanismus des Schwingenflugs, die gekoppelte Schlag- und Drehbewegung, nicht vollständig in Schubleistung umgewandelt. Dies hat physikalische Gründe, auf die an dieser Stelle noch nicht weiter eingegangen werden soll.

Das bereits erwähnte Microsoft Excel Datenblatt *NATRS03*⁷ ist vom Autor auf das Fluggerät **Berblinger 2** angewandt worden. Dieses Datenblatt gibt Auskunft über die Beziehung zwischen aufgewandter mechanischer Schlagleistung und daraus erzielter Schubleistung. Ein Ausdruck der Berechnung ist beigefügt in Tabelle 3. Das Ergebnis ist ein Leistungsbedarf an mechanischer Schlagleistung von etwa 5.8 kW. Diese Abschätzungen führen auf den **Leistungsbedarf** im Reiseflug von etwa **6 kW**.

Starten und Steigen

Länge des Startweges. Bekanntlich ist beim Start die größte Schubkraft erforderlich, da das Fluggerät zunächst bis zum Abheben beschleunigt und dann in die Höhe geschoben werden muss. Die Erfahrung zeigt, dass ein Schwingenflieger bereits im Stand in der Lage ist, seine volle Schubkraft zu entfalten. Mit dieser Überlegung werde statt der Schubkraft für den Reiseflug von 200 N in Tabelle 3 für den Start der um 50 % erhöhte Wert von 300 N unterstellt⁸. Die Rollreibung beim Start kann mit 2 % des Gewichts angenommen werden, ist also vernachlässigbar. Damit lässt sich die Mindestlänge des Startweges s_{LOF} berechnen (der Index *LOF* steht für *lift off*). Die Formel dafür folgt aus der Gleichung Kraft $T =$ Masse $M \times$ Beschleunigung a zusammen mit der Bewegungsgleichung $v = a \cdot t$, nach der die Geschwindigkeit v bei konstanter Beschleunigung a linear mit der Zeit t anwächst:

$$s_{LOF} = \frac{M \cdot v_{LOF}^2}{2 \cdot T}$$

⁷ Kernstück der Theorie der instationären Luftkräfte für die ebene, zweidimensionale, schwingende Platte ist die so genannte Theodorsenfunktion (nach Th. Theodorsen, 1935). Das Programm Microsoft Excel verfügt über komplexe Besselfunktionen, die hierfür benötigt werden. Diese klassische Luftkrafttheorie ist in dem Excel Datenblatt *NATRS03* programmiert.

⁸ Dies gelingt durch eine Vergrößerung der Schlagamplitude, die erheblich mehr Leistung benötigt. Der Flieger ESKALIBRI liefert bei einem Gewicht von 4.4 N bis zu 8 N Schubkraft!

Die Geschwindigkeit v_{LOF} ist darin der bereits ermittelte Wert von $u_0 = 20$ m/s. Mit der Abflugmasse von $M = 300$ kg ergibt sich für die **Länge des Startweges** $s_{LOF} \approx 200$ m. Ohne erhöhten Schub beträgt der Start entsprechend 300m.

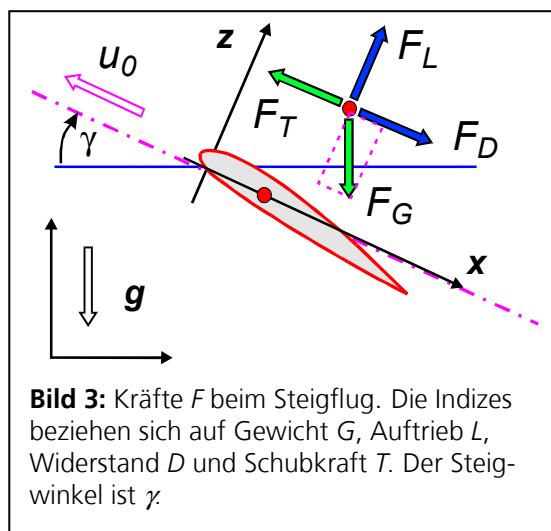
Auslegung Berblinger 2		V 1.02 - 05.07.04		
Entwurf: Dr. W. Send - ANIPROP GbR		berblinger_3kN_natrs03.xls		
Für Berblinger Wettbewerb 2006		Feste Kerndaten	Wesentliche	Basisdaten
		Vorgaben	Ergebnisse	
Resultate (Theorie ebene Platte 2D)				
Schubleistung - Widerstandsbeiwert	-3,915	W	0.050	-
Schlag- und Drehleistung, Schubkraft	5,791	W	-200	N
Schubleistung aus Nasenschub, Freq.	-501	W	1.10	Hz
Amplituden Flügelspitze Drehen α_0 , Schlagen h_0	27	deg	1.41	m
Flächenleistung - Spez. Leistung	334.1	W/m ²	12.8	W/kg
Wirkungsgrad - Erzielt / Vorgabe	67.60	%	70.00	%
Auslegung und Geometrie				
Konstante k_G , Gesamtgewicht G	12.00	N ^{2/3} /m ²	3000.00	N
Gleitzahl $\varepsilon = c_A / c_W$, Widerstand W	15.0		200.00	N
2D Beiwert c_A , Seitenverhältnis Δ	1.00		6.00	-
Flächenbelastung γ , 3D Beiwert c_A	173.07	N/m ²	0.75	-
Drehachse x_D/ℓ , Zuspitzung δ	0.25	-	0.60	-
Flügelfläche S , Spannweite b	17.33	m ²	10.20	m
Flügeltiefe Wurzel, Spitze	2.12	m	1.27	m
Mittlere Flügeltiefe ℓ , Starre Drehung	1.70	m	0	a.lin
Formfaktor f_P für Leistung	0.29	-		
Kinematische Daten				
Geschwindigkeit u_0 , Leistung P	19.6	m/s	3,915	W
Reduzierte Frequenz ω^*	0.3	-		
Wirkungsgrad η , Phasenvoreilung κ	0.70	-	90	deg
Zugehörige Schlagfrequenz f	1.1	Hz		
Geometrischer Anstellwinkel α_0, λ	26.6	deg	4.8	-

Tabelle 3: Aerodynamische Auslegung mit Datenblatt NATRS03 (Auszug). Die Angaben für die Spannweite sind noch ohne die Breite des Rumpfes ermittelt (für 300 N Schubkraft setzt man die Gleitzahl auf 10 und erhält den Leistungsbedarf von 8.7 kW - die Amplituden werden angezeigt).

Steigflug. Nach dem Start beginnt der Steigflug, der - ähnlich wie beim gewöhnlichen Fliegen durch Ziehen des Höhenruders - beim *Berblinger 2* durch Ziehen der Schwanzflosse eingeleitet wird. Für das Steigen wird zusätzliche Schubkraft benötigt. Aus dem Kräftegleichgewicht in Bahnrichtung u_0 und quer dazu (siehe Bild 3) erfolgt eine Angabe für die zusätzlich erforderliche Schubkraft in Abhängigkeit vom Steigwinkel γ :

$$F_T = \frac{1}{\varepsilon} F_G \cdot [\cos \gamma + \varepsilon \sin \gamma], \quad \varepsilon = \frac{F_L}{F_D}$$

Die Größe ε ist die bereits eingeführte Gleit-
zahl. Ohne Steigwinkel ($\gamma=0$) ergibt sich die für den Reiseflug bekannte Schubkraft. Für kleine Winkel gilt $\cos \gamma \cong 1$. Der zweite Term in der eckigen Klammer gibt folglich direkt Auskunft über den Steigwinkel, den man sich bei gegebener zusätzlicher Schubkraft „leisten“ kann. Geht man für den Steigflug von den 50 % zusätzlicher Leistung aus, die für die Startbeschleunigung bereit stehen und das Steigen bewirken, so ergibt dies für $\varepsilon = 15$ den Steigwinkel $\gamma = 2^\circ$. Mit 50 % zusätzlicher Leistung ist *Berblinger 2* zu einem langsamen Steigflug in der Lage. So hat der Flieger nach 1000 m eine Höhe von 35 m erreicht (Steiggeschwindigkeit ist 0.7 m/s).



Kinematik und instationäre Leistungen

Bislang ist nicht in den Vordergrund getreten, dass große Auslenkungen der Tragflächen die Schubkraft erzeugen, wie man sie auch bei jedem Vogel beobachtet. Die Theorie der instationären Luftkräfte gibt Auskunft darüber, wie groß die maximalen Auslenkungen (Amplituden) sein müssen und in welcher Beziehung die Schlagbewegung und die Drehbewegung zu stehen haben. Wir betrachten dazu die Eigenschaften in einem typischen Flügelquerschnitt, wie er in Bild 3 gezeichnet ist. Folgende Größen haben in einen wesentlichen Einfluss:

- die bereits festgelegte Fluggeschwindigkeit u_0
- die Frequenz f der Schwingung
- die Amplituden h_0 und α_0 von Schlägen⁹ und Drehen
- die Phasenbeziehung¹⁰ κ zwischen Schlägen und Drehen

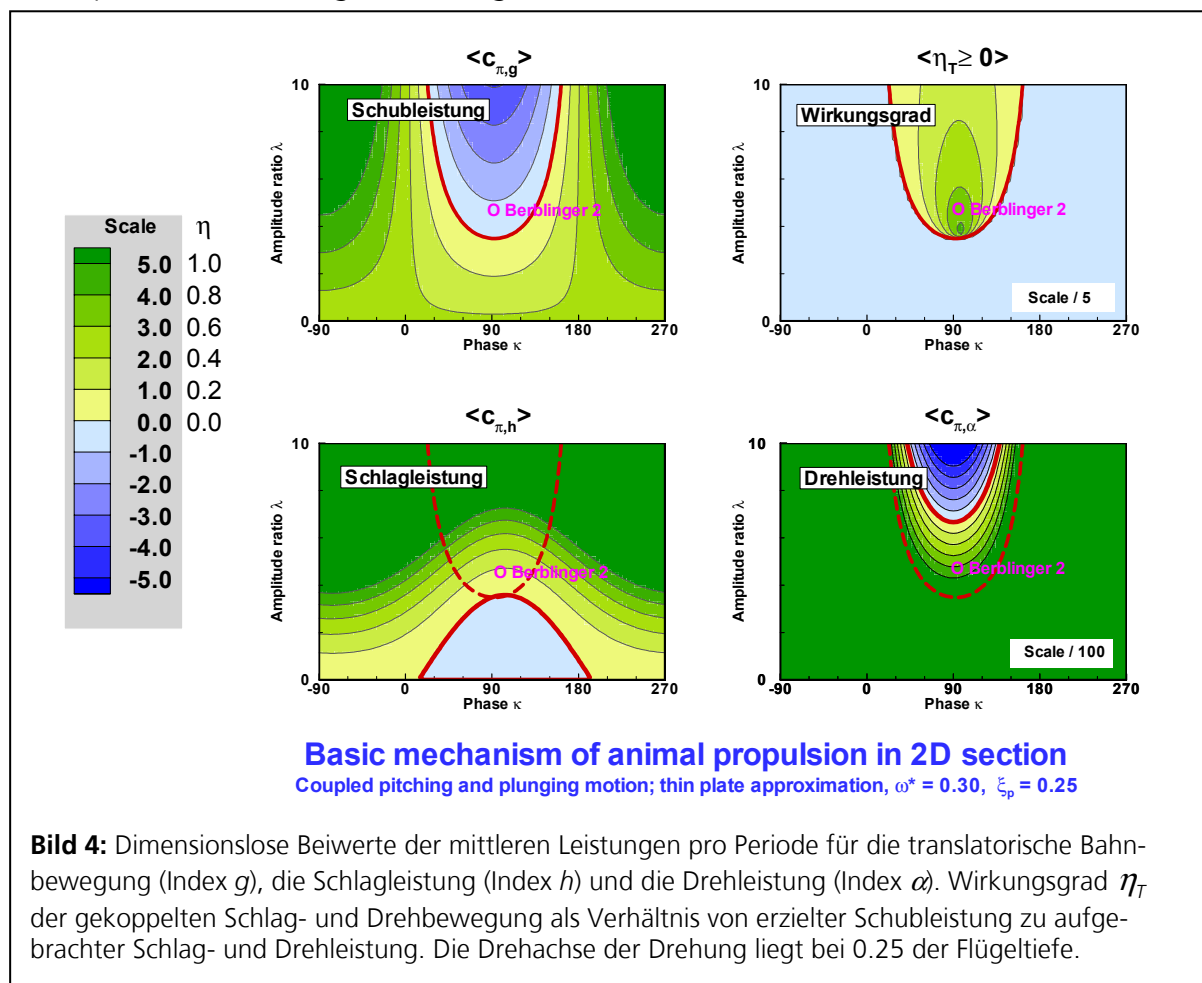
Daraus leiten sich zwei dimensionslose Kennzahlen ab, mit denen das Ergebnis des Zusammenwirkens von Schlägen und Drehen sehr übersichtlich dargestellt und diskutiert werden kann:

⁹ Betrachtet man den Flügel von der Wurzel bis zur Spitze, dann ist die „Schlagbewegung“ eine Drehung um die Längsachse des Flügels in Spannweite. Im einzelnen Flügelschnitt wirkt sich diese räumliche Bewegung als ein Heben und Senken des Flügelschnitts aus, was als (translatorische) Schlagbewegung behandelt wird.

¹⁰ Der Vereinbarung der klassischen Publikationen folgend eilt der Schlag der Drehung um $\kappa = 90$ Grad voraus, wenn beim Aufschlag von unten nach oben auch Drehung größer wird (positiver Anstellwinkel) und beim Durchgang des Schlags durch seine Mittellage die Drehung die größte Auslenkung erfährt.

- die so genannte reduzierte Frequenz $\omega^* = \frac{2\pi \cdot f \cdot (\ell_m / 2)}{u_0}$
- das Amplitudenverhältnis $\lambda = \frac{h_0}{\alpha_0 \cdot \ell_m / 2}$

Nun ist die Annahme keineswegs selbstverständlich, dass mit wachsenden Amplituden die Kräfte und Leistungen in gleicher Weise mitwachsen. Für den nachfolgenden Überblick soll von dieser Annahme jedoch ausgegangen werden, die durch Vergleiche mit Experimenten auch gerechtfertigt wird:



Zu diesen Beiwerten erhält man die absoluten Mittelwerte über die Periode aus

$$\langle P_X \rangle = \langle c_{\Pi,X} \rangle \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot u_0^3 \cdot S_{eff} \cdot \alpha_0^2, \quad S_{eff} = S \cdot f_p, \quad f_p \text{ Formfaktor.}$$

Zum Beispiel ist die absolute Leistung in Bahnrichtung (Index g , $\langle c_{\Pi,g} \rangle \cong -0.8$) in Tabelle 3 als entnommene Schubleistung für ein einzelnes Wertepaar $(\kappa, \lambda) = (90^\circ, 4.8)$ und eine Drehamplitude ($\alpha_0 = 26.6^\circ$) in der ersten Zeile angegeben. Der Formfaktor f_p berücksichtigt die Trapezfläche der Flügel und den linearen Anstieg der Amplituden.

Ermittlung des Wertepaares (κ, λ) . In dieser Tabelle 3 auf der Basis des Datenblatts *NATRS03* wird jedoch der umgekehrte Weg gegangen: Die benötigte Schubleistung ist bereits bekannt. Zu der Vorgabe der Phasenbeziehung als Voreilung von 90° , der reduzierten Frequenz $\omega^* = 0.3$ und dem gewünschten Wirkungsgrad werden das Amplitudenverhältnis und die absolute Amplitude der Drehung bestimmt.

Die gewählten Vorgaben finden ihre Vorlage in den experimentellen Befunden und in einer Reihe von praktischen Erwägungen im Hinblick auf die konstruktive Umsetzung. Bedeutsam ist die Einsicht, dass trotz der großen Amplituden das Zusammenwirken der beiden Bewegungen zu instationären Anstellwinkeln der Tragflächen unter 10 Grad führt, die sich von denen für die stationäre Anstellung nicht wesentlich unterscheiden.

Diskussion von Bild 4

- Die vier gezeigten Teilbilder kennzeichnen in ihrer Gesamtheit die Physik des Schwingenflugs. Damit überhaupt Vortriebsleistung erzielt wird (blauer Bereich im oberen linken Teilbild), muss bei der Schlagbewegung Leistung aufgebracht werden. Der Rand dieses Gebietes ist in allen vier Teilbildern durch eine rote Grenze hervorgehoben. Außerhalb hat auch die Definition des Wirkungsgrades ihren Sinn verloren. Interessant ist das Verhalten der Leistung bei der Drehung. Bei niedrigen Wirkungsgraden bis etwa 0.5 genügt ein reiner Schlagantrieb (in diesem Bereich arbeiten die heutigen Schwingenflieger). Die Drehung wird passiv durch den Luftstrom angeregt (blauer Bereich im unteren rechten Teilbild). Für kleinere Amplitudenverhältnisse unterhalb von etwa 6 benötigt auch die Drehung eine kleine Zufuhr an Leistung (grüner Bereich). Dann wird der Wirkungsgrad deutlich größer: *Berblinger 2* wird deshalb in den Holmen der Flügel kleine Motoren haben, die diese Leistung zuführen¹¹. Mit einem kleineren Amplitudenverhältnis erniedrigt sich jedoch der Beiwert für die Schubleistung, deren absoluter Wert sinkt, wenn man nicht die Drehamplitude entsprechend vergrößert.
- Die gewählte reduzierte Frequenz ω^* ist größer als in der Natur beobachtet. Diese Kennzahl verändert sich nur sehr wenig bei den fliegenden Lebewesen. So findet sich für einen Storch, wie er bereits von Otto Lilienthal beschrieben worden ist, der Wert 0.15. Den gleichen Wert beobachtet man aber auch für den Vorderflügel einer Heuschrecke. Der höhere Wert drückt auch aus, dass der Evolutionsgrad des Fliegers noch nicht optimal ist.
- Der Wirkungsgrad η_T zeigt in einem sehr engen Bereich hohe Wert von bis zu 0.9. Da die reduzierte Frequenz aber so hoch ist, würde sich in diesem Bereich eine zu große Drehamplitude ergeben. Oberhalb davon ist das erzielte Plateau der Leistung nicht mehr so empfindlich gegenüber Veränderungen über der Spannweite. Es ist nämlich konstruktiv nicht ganz einfach, eine lineare Zunahme der Drehung von der Flügelwurzel bis zur Flügelspitze zu erreichen, durch die eine optimale Abstimmung der erzielbaren Leistung erreicht wird.

Zusammenfassung der Kinematik. *Berblinger 2* wird durch eine gekoppelte Schlag- und Drehbewegung der Flügel angetrieben, bei der die vorgesehene Drehamplitude von $\alpha_0 = 27^\circ$ nur durch eine aktive Ansteuerung zu erreichen ist. Die Auslenkung an der Flügelspitze beträgt $h_0 = 1.4$ m. Mit der Halbspannweite $s = 5.1$ m ergibt sich für den Schlagwinkel θ des Holmes die Amplitude $\theta_0 = 15.4^\circ$. Wenn die Ruhelage des Holmes eine V-förmige Stellung mit 5° Neigung hat, dann liegt der untere Umkehrpunkt der Flügelspitze etwa 1 m unterhalb der Lagerpunkte der Holme. Die Schlagfrequenz beträgt $f = 1.1$ Hz. Diese Frequenz ist nicht außergewöhnlich hoch, wenn man bedenkt, dass die Biegeschwingung des Flügels eines großen Verkehrsflugzeugs mit 25 Meter Halbspannweite (ein Flügel) in der gleichen Größenordnung ist.

¹¹ Diese Maßnahme ist sogar von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des *Berblinger 2*.

Antrieb und Steuerung

Zu unterscheiden sind beim Antrieb die drei Module Energiequelle, Motor und Getriebe. Obwohl jeder Modul für sich Komponenten der neuesten Technologien enthalten soll, ist die Darstellung in dieser Bewerbung knapp gehalten, da auf Entwicklungen anderer Firmen oder Forschergruppen zurückgegriffen werden soll. Genannt wird jeweils eine Option mit einer Abschätzung ihrer Daten. Dadurch soll nachgewiesen werden, dass die Komponenten in der gewünschten Spezifikation am Markt oder durch Sonderanfertigung verfügbar sind.

Energiequelle. Als Leistungsbedarf des *Berblinger 2* ist etwa 6 kW ermittelt worden¹². Von der Firma *Intelligent Energy* wird eine 10.3 kW Brennstoffzelle angeboten, die ein Trockengewicht von 70 kg hat. Der kleinere angebotene Modul mit 1.3 kW Leistung hat ein Trockengewicht von 10 kg. Nominell sind 5 kleinere Module erforderlich, die insgesamt eine Leistung von 6.5 kW abgeben. Deren Masse ist trocken 50 kg, wozu noch der Treibstofftank kommt. Ausgehend von dem größeren Modul ergibt sich eine spezifische Leistung von 0.15 kW/kg. Geht man von einer angepassten Einheit für 6 kW aus, so ergäbe sich eine Masse von 40 kg zuzüglich Treibstofftank, dessen Größe von der gewünschten Reichweite bestimmt wird. Für die Gewichtsbilanz des *Berblinger 2* wird für die Energiequelle ein **Gewicht von 500 N** angenommen.



Motor. Für den Elektrosegler *Antares*¹³ der Firma *Lange Flugzeugbau* ist an der Hochschule für Technik und Architektur Biel (HTA Biel, Schweiz) ein bürstenloser 42 kW Außenläufer-Elektromotor entwickelt worden. Der Motor selbst wiegt 28.5 kg, die Leistungselektronik noch einmal 9 kg. Selbst mit der Annahme, dass sich ein Motor nicht linear verkleinern lässt, ist eine sinnvolle Abschätzung für den Motor gleicher Bauart und 6 kW Leistung ein **Gewicht von 200 N**. Anzumerken ist, dass der Elektrosegler seine Energie aus einer Reihe von Metallhydrid-Akkumulatoren bezieht, die beeindruckende Leistungen zeigen. Es ist dem Autor aber nicht gelungen, über das Gewicht der Batterien genauere Kenntnisse zu erlangen.



Getriebe. Da für Schwingenflieger die Notwendigkeit besteht, die schnell rotierende Bewegung des Antriebsmotors in eine langsame Hubbewegung zu übersetzen, wird bei den meisten Modellen ein Getriebe mit einer Exzentrerscheibe verwendet. Die Motor-

¹² Die Überlegungen gelten nur für den Reiseflug. Der erhöhte Leistungsbedarf für das – einstweilen noch weit voraus gedachte - Fliegen in größerer Höhe sei zurückgestellt, aber mit den genannten Komponenten durchaus zu realisieren. Dann wird man das Gesamtgewicht auf 4,000 N auslegen.

¹³ Elektrosegler: Autonom startendes Segelflugzeug, dessen Propellerantrieb nach dem Start eingeklappt werden kann.



Bild 6: Getriebe des zeitweise kommerziell verfügbaren Fliegers Kestrel.
Quelle: www.randrmodelaircraft.com

welle treibt über Zahnräder die Scheibe an, auf der die Stößel für die Hubbewegung exzentrisch gelagert sind. Für die Anregung von Nickschwingungen bei einem Windkanalmodell des DLR ist 2005 ein Hubantrieb entwickelt worden¹⁴, der nach dem Prinzip einer kardanischen Aufhängung arbeitet. Zwei aufeinander folgende Gelenkebenen, von denen die eine verstellbar aufgehängt ist, wandeln die Drehbewegung ähnlich der Taumelscheibe beim einem Hubschrauberrotor in eine Hubbewegung mit verstellbarem Hub um. Der Vorteil dieser Anordnung ist eine kompakte Bauweise mit großer Hubkraft. Die Auffassung des Entwicklers ist, dass diese Bauweise auch die Übertragung von Leistungen in der Größenordnung von 6 kW gestattet. Der Hubantrieb für den *Berblinger 2*

würde die Verwendung der Exzentrerscheibe ersetzen, wie sie nebenstehend für den Flieger Kestrel¹⁵ gezeigt ist.

Steuerung. Die Steuerung des Fluggeräts geschieht über eine große Leitwerkflosse, die in sich gedreht und zugleich gehoben und gesenkt werden kann. Die Auslegung der Flosse erfolgt entsprechend den erforderlichen Momenten zum Trimmen; sie übernimmt die Funktion von Höhen- und Seitenleitwerk. Im Reiseflug erfolgt über die Leitwerkflosse auch eine Dämpfung der Schlagbewegung des Rumpfes.

Zusammenfassung

Bild 7 zeigt den Grundriss von *Berblinger 2*, wie er sich aus den voranstehend entwickelten Daten ergibt. Die Bewerbung ist zu verstehen als eine Machbarkeitsstudie im Hinblick auf die Schuberzeugung durch den Mechanismus des Schwingenflugs. Deshalb sind Komponenten wie die Leitwerkflosse, die in sich keine besondere Herausforderung darstellen, bei diesem Stand des Entwurfs noch nicht detailliert ausgearbeitet.

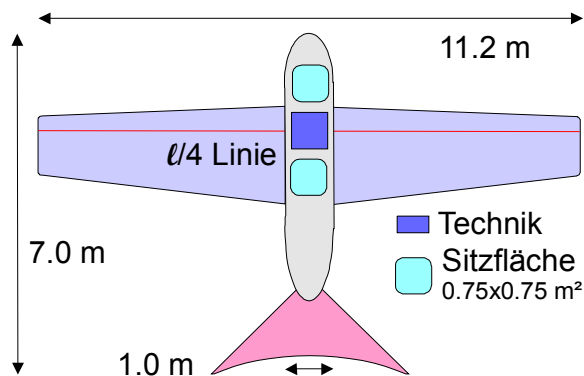


Bild 7: Grundriss des *Berblinger 2* nach den Daten der vorgelegten Machbarkeitsstudie.

Diese Studie bietet nicht den Raum, eine kritische Durchsicht der wenigen, weltweit vorhandenen Entwicklungsarbeiten und gebauten Flieger vorzunehmen¹⁶. Eine zentrale theoretische Einsicht sei aber hervorgehoben, die den vorliegenden Entwurf von allen

¹⁴ Der Entwickler des Hubantriebs ist der Betriebsleiter des Hochdruckwindkanals (der Betreibergesellschaft DNW) am Standort Göttingen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Herr Dipl.-Ing. Martin Rippl. Die Entwicklung ist nicht geschützt und steht ausdrücklich für die Nennung und weitere Verwendung im Rahmen dieser Bewerbung zur Verfügung.

¹⁵ Auf der Basis dieses – inzwischen nicht mehr im Handel verfügbaren – Modells Kestrel hat Kurt Saupé seinen Flieger Eskalibri entwickelt.

¹⁶ Zu nennen ist hier an erster Stelle das *Project Ornithopter* eines Flugzeugs für einen Piloten von James DeLaurier an der Universität Toronto, mit dem den Autor über lange Jahre ein herzliches und kollegiales Verhältnis verbindet: www.ornithopter.net

Größe	Wert	Einheit
Evolutionegrad k_G	12.0	$N^{2/3}/m^2$
Gewicht G , davon:	3,000	N
Antrieb	800	N
Struktur	600	N
2 Pers. je 80 kg	1,600	N
Flächenbelastung γ	173.1	N/m^2
Spannweite b	10.2	m
Flügelfläche S	17.3	m^2
Wurzelflügeltiefe ℓ_i	2.1	m
Min. Geschwindigkeit u_0	19	m/s
Schlagfrequenz f	1.1	Hz
Reduzierte Frequenz ω^*	0.3	-
Schlagamplitude h_0	1.4	m
Drehamplitude α_0	27	deg
Leistungsbedarf	6	kW
Gleitzahl ε	15	-

Tabelle 4: Ergänzung der Daten für den Schwingenflieger *Berblinger 2*.

früheren Versuchen unterscheidet: Die Drehung muss aktiv angesteuert werden. Die benötigte Leistung ist sehr gering, wie aus Bild 4 hervorgeht, aber entscheidend für einen großen Wirkungsgrad.

Tabelle 4 ergänzt die Übersicht über alle Daten des *Berblinger 2*, soweit sie in dieser Studie der Machbarkeit ausgearbeitet worden sind. Die Daten zeigen, dass es mit der derzeit vorhandenen Technik möglich ist, einen Schwingenflieger für zwei Personen zu bauen. Das Entwurfsblatt *NATRS03* gestattet es, Parameterstudien anzustellen, die auch einen langsamen Steigflug einschließen. In diesem Fall steigt der Leistungsbedarf auf knapp 9 kW, der durch die Leistung der genannten Brennstoffzelle abgedeckt werden könnte. An der Machbarkeit eines Schwingenfliegers für zwei

Personen Tragfähigkeit ändert dies aber nichts.



Anhang: Wie könnte es weitergehen?

Der Autor arbeitet im Rahmen seiner Nebentätigkeit zusammen mit seinem langjährigen Geschäftspartner **Felix Scharstein**, dessen Befähigung und Kreativität für außerordentliche mechanische Entwürfe zuletzt in dem Projekt des Hubflügelgenerators¹⁷ unter Beweis gestellt worden ist. Gemeinsam haben beide die wirtschaftlichen Randbedingungen für die Realisierung geschaffen. Diese Erfahrungen würden auch für *Berblinger 2* von größtem Wert sein, da solche Projekte niemals einen geradlinigen Finanzierungsweg haben.

Der erste Schritt wäre der Bau eines flugfähigen Modells mit 300 N Gewicht und gleichem Evolutionegrad. Dieses Modell hätte bereits alle mechanischen Eigenschaften des *Berblinger 2* einschließlich der aktiven Ansteuerung der Drehung. Mit diesem Bau könnte sofort begonnen werden, da das Geld dafür zur Verfügung stünde. Dabei wären dann die Erfahrungen von **Kurt Saupe** zum Flügelbau und zu mechanischen Details sehr hilfreich. Er kann auch das Modell per Fernsteuerung fliegen und testen.

Die Kosten für die Entwicklung des *Berblinger 2* würden das ausgesetzte Preisgeld weit übersteigen, wenn man von einer regulären und eigenständigen Finanzierung ausgeht. Es ist aber davon auszugehen, dass **Wissenschaftler** im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, aber auch von Hochschulen, sich gerne im Rahmen von finanzierten Projekten in dieses Ziel eines bemannten Schwingenfliegers einbringen würden. Der Vorlauf dafür beträgt etwa ein Jahr. Nicht zuletzt arbeitet der Autor selbst gerade an einer Studie zur technischen Nutzung des Schwingenflugs.

Der Autor ist seit langer Zeit gut bekannt mit **Stephan Nitsch**¹⁸, der zahlreiche Gleiter von Otto Lilienthal nachgebaut hat und erfahrener Drachenflieger ist. Mit ihm hat er mehrfach den Bau von Schwingenfliegern beraten. Für 2007 würde ein Symposium zum Schwingenflug geplant, zu dem der Autor sicherlich **James DeLaurier** als Gast einladen würde. Seine Erfahrungen mit einer Flugmaschine würden uns vor unnötigen Konstruktionsfehlern und falscher Wahl von Material bewahren. Schließlich gibt es für alle Fragen der **Flugzulassung** erfahrene Kollegen im eigenen Institut wie an Fachhochschulen. □

¹⁷ Entwicklung zur Energiegewinnung in einem Binnengewässer: www.aniprop.de/#hfk

¹⁸ Stepha Nitsch, *Vom Sprung zum Flug – Der Flugtechniker Otto Lilienthal*, Berlin 1991