
Heft 11 November 1939
1914 und 1939 – Flieger von heute und gestern! – Vom Moskauflug bis Ankara – D-1348, ein Film von unseren Fliegern – Kennst Du die Flugzeuge unserer Feinde?
Der Deutsche Sportflieger
Fliegerkameradschaft, auch wenn's „schief" geht
Zeitschrift für die gesamte Luftfahrt

Quelle: Zeitschrift Der Deutsche Sportflieger Monat 1,2 und 3 - 1937

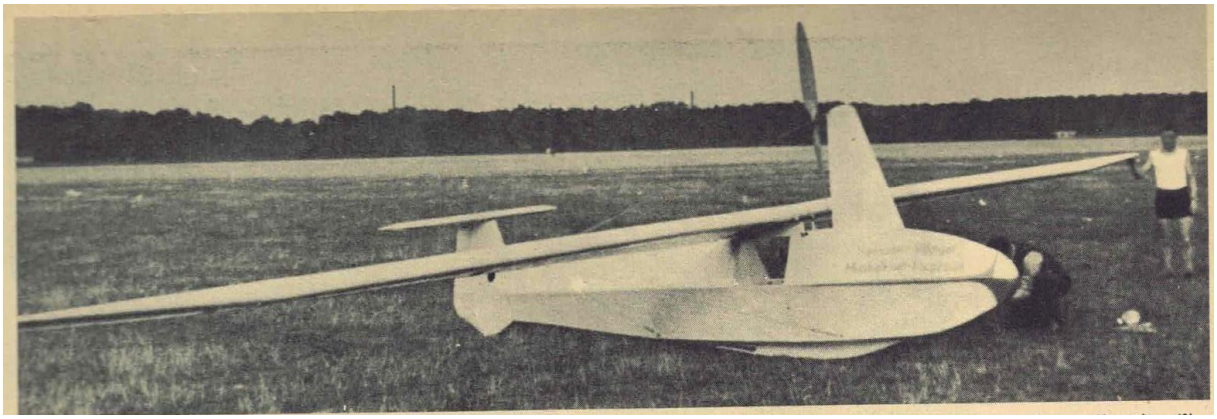


Abb.1.Muskelkraftflugzeug H. V. 1 der Ingenieure Haeßler und Villinger.
Bilder: Haessler (2)

Der Flug mit Menschenkraft

Von Ingenieur H. Haeßler, Weimar

Die Entwicklung des Flugzeuges ging von einfachen Konstruktionen aus, deren Leistungen, wohl durch das Entwicklungstempo des Weltkrieges, im Wesentlichen durch Verstärken der Motorleistung gesteigert wurden.

Nach dem Jahre 1920 suchte man die Leistungssteigerung mehr und mehr durch aerodynamische Verbesserung der Flugzeugzelle zu erreichen. Während des Weltkrieges waren zweisitzige Flugzeuge meist mit Motoren von mehr als 60 PS ausgerüstet, während im Jahre 1925 zweisitzige Flugzeuge mit nur 20 PS schon recht beachtliche Leistungen zeigten.

Wenn wir in die heutigen Segelflugzeuge, in denen die letzten aerodynamischen Erkenntnisse berücksichtigt wurden, Motore einbauen wollten, um so ohne Hilfe von Aufwinden fliegen zu können, würden bereits Leistungen von 5 bis 10 PS in vielen Fällen ausreichen.

Es liegt daher durchaus im Zuge dieser Entwicklung, dass heute der Wunschtraum der Menschheit, mit eigener Muskelkraft über Wald und Feld zu fliegen, wieder lebendig wurde. Denn sollte es nicht möglich sein durch weitere Verbesserungen ein Flugzeug so günstig zu bauen, dass schon die geringe Kraft des Menschen längere Flüge ermöglicht? Zum mindesten wäre es interessant, die uns durch die Natur gezogenen Grenzen endlich klar zu erkennen.

Von der Polytechnischen Gesellschaft in Frankfurt a. M. wurde im Jahre 1933 ein Preis ausgesetzt für den ersten Flug mit Menschenkraft. Der Start zu diesem Flug sollte durch die Kraft des Piloten erfolgen, und die hierzu notwendigen Hilfsmittel sollten im Finge mitgenommen werden. Der Flug war um zwei Wendemarken auszuführen, die 500 m

voneinander entfernt sind, so dass die geforderte Flugstrecke einschließlich zweier 180-Grad-Kurven in Bodennähe ungefähr 1400 m beträgt, die in 120 Sekunden durchflogen werden könnten.

Die Frage „Ist der Menschenflug möglich oder nicht?", wurde dadurch wieder in breiten Kreisen aktuell. Die jetzige Entwicklung des Flugzeugbaues lässt eine sachliche Erörterung dieses Problems und seiner Erfolgsaussichten ohne weiteres zu. Leider haben sich aber gerade die Fachkreise dazu kaum geäußert. Deshalb erscheint es notwendig, einmal zu untersuchen, welche Leistungen im Menschenkraftflug möglich sind (auch unter Berücksichtigung bisher unerprobter Vor- und Antriebsmittel wie Schlagflügel usw.) und festzustellen, wo die erreichbaren Grenzen liegen. Die in den folgenden gebrachten Angaben stützen sich auf das Ergebnis zahlreicher praktisch durchgeführter Menschenkraftflüge und allgemeiner Versuche. Die Arbeiten führte ich mit Dipl.-Ing. Villinger, Dessau, gemeinsam durch.

Zuerst soll das Problem des Menschenkraftfluges ganz allgemein untersucht werden, um festzustellen, auf welchem Wege die Lösung am besten möglich ist, und was dabei unter den günstigsten Bedingungen, die unter Umständen heute noch nicht vorhanden sein brauchen, überhaupt zu erreichen sein wird. Dazu müssen einige prinzipielle Fragen geklärt werden.

1. **Welche Größe und Form muss das Flugzeug mit dem geringsten Schwebeleistungsbedarf haben und wie groß ist dieser?**

Bei der Konstruktion eines Muskelkraftflugzeuges besteht die Hauptaufgabe darin, ein Flugzeug mit dem geringsten Schwebeleistungsbedarf zu bauen, der erreichbar ist. Dieser Forderung ordnen sich alle andern unter.

Es steht daher vorläufig noch nicht zur Diskussion, auf welche Art die Muskelkraft an die Luft zur Fortbewegung abgegeben werden soll. Das ist eine Frage zweiter Ordnung, die durch den erreichbaren Wirkungsgrad, des Vortrieb- oder Auftriebmittels, beantwortet wird.

Wovon hängt nun die Höhe der Leistung ab, die das Flugzeug zum horizontalen Schwebeflug braucht?

Es gilt hier die Formel:

$$N = \frac{G \cdot Vy}{77 \cdot \eta}$$

Hierin ist:
N = Leistung PS
G = Fluggewicht kg

Vy = Sinkgeschwindigkeit m/sec.

η = Wirkungsgrad des Antriebs.

In Worten lautet also diese Formel:

Schwebeleistung = **Fluggewicht • Sinkgeschwindigkeit**

Wirkungsgrad des Antriebs

Wir sehen also, dass die erforderliche Leistung umso geringer wird, je kleiner das Gesamtgewicht des Flugzeugs, je kleiner die Sinkgeschwindigkeit im Gleitflug und je besser der Wirkungsgrad des Antriebs ist.

Von welchen Faktoren hängt die Sinkgeschwindigkeit ab? Es gilt die Formel:

$$Vy \approx 4\sqrt{\frac{G}{b^2}} \cdot \frac{C_w}{C_a^{1,5}} \sqrt{\quad}$$

Hierin ist:
G = Gewicht des Flugzeugs
b = Spannweite

C_a, C_w = Luftkraftbeiwerte

$\sim$ =Seitenverhältnis des Flügels

Hieraus können wir entnehmen, dass die Sinkgeschwindigkeit umso geringer wird, je günstiger das Verhältnis von Gewicht zu Spannweite ist. Das Flugzeug muss also möglichst kleines Gewicht bei möglichst großer Spannweite haben. Weiterhin wird die Sinkgeschwindigkeit von der aerodynamischen Güte der Flugzeugzelle beeinflusst. Es ist daher notwendig, den Piloten durch einen geschlossenen glatten Rumpf zu umkleiden.

Aus der Forderung des geringsten Leistungsbedarfs muss nun der Wert Gewicht mal Sinkgeschwindigkeit ein Minimum werden, wir kommen daher zwangsläufig zu einem Hochleistungssegelflugzeug mit extrem geringem Gewicht. Um den Bestwert zu erhalten, ist eine Reihe von Näherungsrechnungen durchzuführen, bei denen die Gewichte aller Einzelteile genauestens zu berücksichtigen sind. Das Muskelkraftflugzeug H. V. 1 stellt das Ergebnis dieser Rechnung dar und dürfte dem erreichbaren Minimum sehr nahekommen. Es hat eine Spannweite von 13,5 m bei 35 kg Leergewicht und ein Gleitverhältnis 1:24.

Die theoretisch bei einem Antriebswirkungsgrad von100% und ohne Berücksichtigung des Antriebsgewichtes erforderliche Schwebeleistung ist hierbei:
1.bei einem Piloten von 60 kg Gewicht:

$$N = \frac{(60+35) \cdot 0{,}50}{75 \cdot 1{,}0} = 0{,}634 \text{ PS}$$

2.bei einem Piloten von 70 kg Gewicht:

$$N = \frac{70+35 \cdot 0{,}52}{75 \cdot 1{,}0} = 0{,}73 \text{ PS}$$

Da die Gewichte der Piloten verschieden sind, wäre zu untersuchen, bei welchem Piloten-Gewicht die günstigsten Verhältnisse eintreten. Messungen haben ergeben, dass die Leistungsgewichte verhältnismäßig konstant sind, d.h. dass der schwerere Pilot dem Mehrgewicht entsprechend auch mehr leistet.

Zeichnungen: Der Deutsche Sportflieger (3)

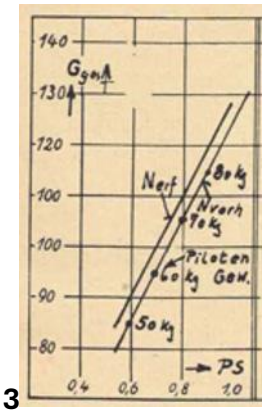


Abb. 3

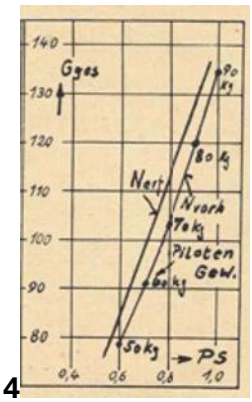


Abb. 4

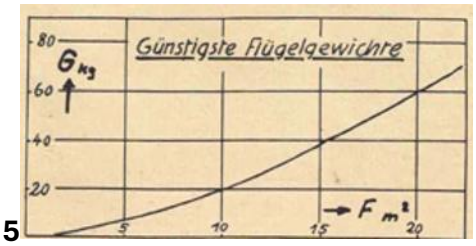
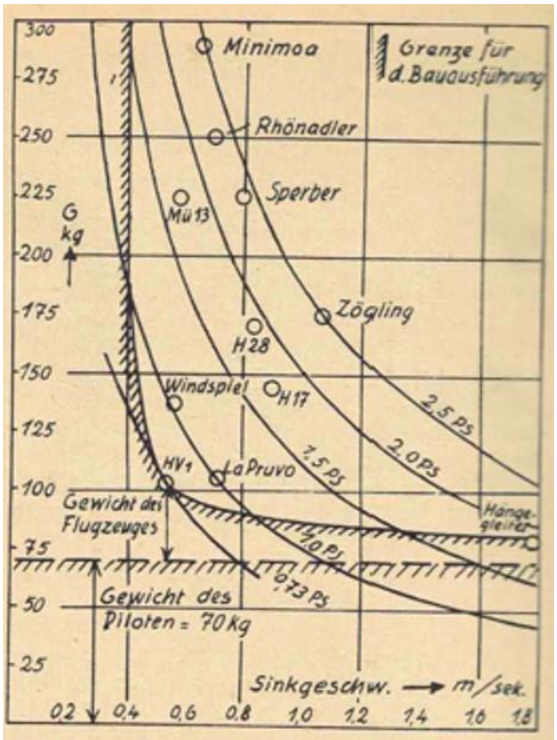


Abb. 5

Theoretischer Schwebeleistungbedarf **Abb. 6**



In Abb. 3 ist der Leistungsbedarf und die vorhandene Leistung bei verschieden schweren Piloten mit gleichem Leistungsgewicht abgetragen, wobei immer das gleiche Flugzeug vorausgesetzt wurde. Man sieht hieraus, dass in diesem Falle das Pilotengewicht keinen Einfluss hat.

In Abb. 4 ist der Leistungsbedarf und die vorhandene Leistung bei verschieden schweren Piloten mit gleichem Leistungsgewicht abgetragen. Diesmal wurde jedoch das Flugzeug jeweils so geändert, dass die Sinkgeschwindigkeit im Gleitflug konstant blieb. Hierbei ergaben sich geringe Abweichungen bis zu 4% gegenüber **Abb. 2**. Die günstigsten Verhältnisse ergaben sich bei einem Pilotengewicht von 70 kg. In diesem Falle wiegt der Pilot das Zweifache des Flugzeuges. Es wird daher für sämtliche weiteren Rechnungen dieses günstigste Pilotengewicht zugrunde gelegt. Nach dieser Feststellung ist es möglich, ziemlich genau die im Flugzeugbau überhaupt erreichbaren Grenzen der Sinkgeschwindigkeit abhängig vom Gesamtgewicht zu ermitteln.

Das Flugzeug mit dem geringsten Eigengewicht ist ein Hängegleiter, bei dem man als untere Gewichtsgrenze 10 kg annehmen kann. Die Sinkgeschwindigkeit eines derartigen Flugzeuges ist entsprechend hoch und liegt bei 1,8 m/Sek. Soll die Sinkgeschwindigkeit geringer werden, so ist der Pilot in einer windschnittigen Verkleidung unterzubringen, die das Gewicht erhöht. Als geringstes Gewicht für einen geschlossenen Rumpf mit Leitwerk ergibt sich 15 kg. Soll die Sinkgeschwindigkeit weiter herabgesetzt werden, so ist die Fläche zu vergrößern. Nun wächst das Gewicht des Flächenholmes annähernd in der zweiten Potenz mit dem Flächeninhalt. Gewichte von Rippen, Bespannung usw. verhalten sich annähernd proportional, so dass das gesamte Flächengewicht mit der 1,5 Potenz des Flächeninhaltes wächst.

In **Abb. 5** ist das Anwachsen des Flächengewichtes mit dem Flächeninhalt wiedergegeben. Hierbei wurde von einer 10 m^2 großen Fläche ausgegangen, bei der ein geringstes Gewicht von 20 kg bei einem Seitenverhältnis von 1:17 erzielt werden kann.

Daraus ergibt sich die geringstmögliche Sinkgeschwindigkeit zu 0,4 m/Sek. Diese Sinkgeschwindigkeit im Gleitflug kann durch keinerlei Hilfsmittel mehr herabgesetzt werden, außer durch Zuführung von Energie. In **Abb. 6** ist diese dem Flugzeugbau gezogene Grenze durch die schraffierte Linie dargestellt. Man kann nun die Kurvenscharen für verschiedene PS-Zahlen eintragen. Die Kurve von 0,73 PS berührt dabei die Hüllkurve der baulich möglichen Flugzeuge und gibt so den günstigsten erreichbaren Schwebeleistungsbedarf (bei 100% Antriebswirkungsgrad) an. Da diese beiden Kurven sich links und rechts vom Berührungspunkt schnell voneinander entfernen, ist dadurch das Gewicht und die Sinkgeschwindigkeit eines Muskelkraftflugzeuges in sehr engen Grenzen festgelegt; Form und Ausmaße sind damit eindeutig gegeben. In **Abb. 6** sind auch die Werte für einige andere bekannte Segelflugzeuge eingetragen. Man erhält dabei das Ergebnis, dass das Leistungssegelflugzeug Minimo mit einer Spannweite von 17 m den gleichen theoretischen Schwebeleistungsbedarf hat wie der Schulgleiter Zögling. Die kleinsten

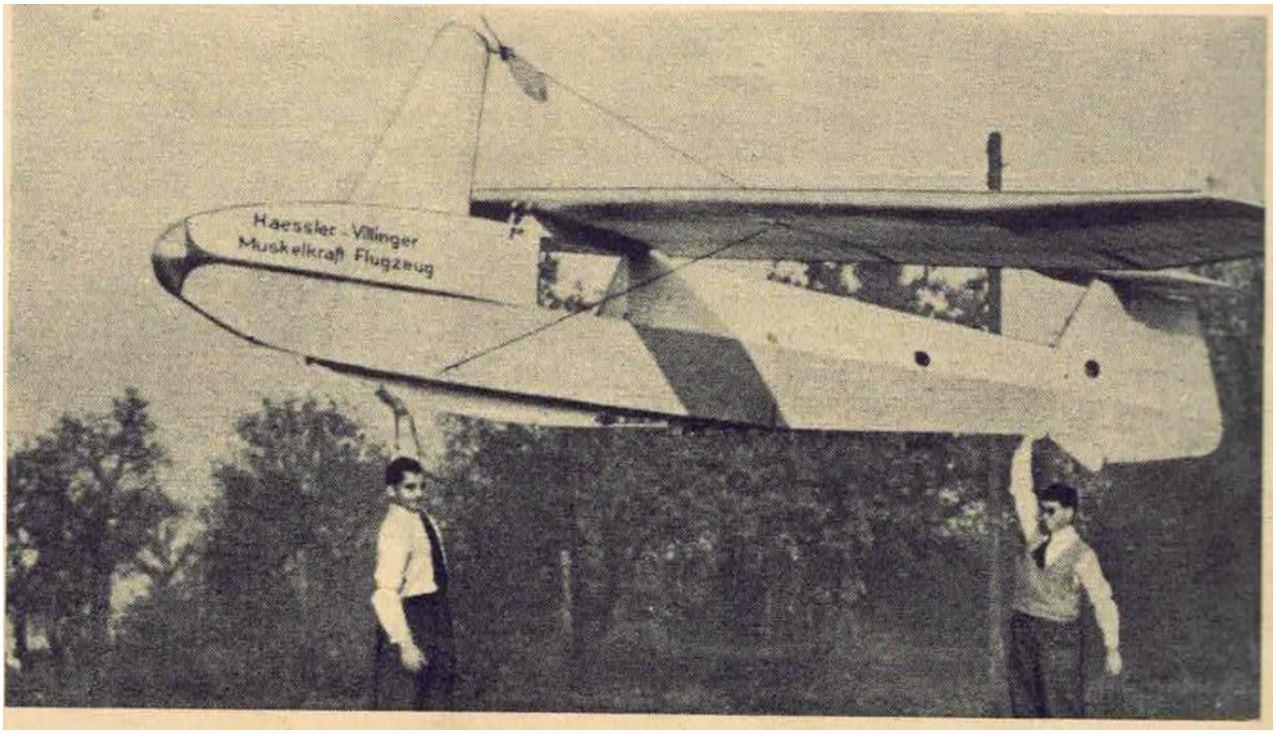
und leichtesten Segelflugzeuge wie Windspiel und La Pruvo sind jedoch dem erreichbaren Leistungsminimum schon recht nahe. **Die bekannten guten Flugeigenschaften und Flugleistungen des Windspiels zeigen außerdem, dass die für den Menschenkraftflug günstigen Flugzeuge zugleich gute Segelflugzeuge sein werden!**

Schlagflügel oder Propeller?

Wir haben jetzt festgestellt, welche Ausmaße das Flugzeug mit dem geringsten theoretischen Schwebeleistungsbedarf haben muss und von welcher Größe dieser ist. Diese Ergebnisse gelten allgemein, sind also unabhängig davon, ob zur Energieübertragung der Propeller, Schwingen oder Schlagflügel usw. zur Anwendung kommen. Wenn wir uns nun entscheiden müssen, welcher Antrieb angewandt werden soll, so müssen zwei Fragen beantwortet werden.

1. Welcher Antrieb hat den besseren Wirkungsgrad.
2. Welcher Antrieb fällt, gewichtlich am leichtesten aus. Der oben ermittelte Schwebeleistungsbedarf erhöht sich

Abb. 2. *So leicht ist das Muskelkraftflugzeug von Haessler und Villinger, dass es die beiden Erbauer (Haessler links) mühelos heben können*



also durch den Antriebswirkungsgrad, der in jedem Fall unter 100% liegt, und erhöht sich durch das zusätzliche Gewicht des Antriebes.

Zuerst wollen wir den Schlagflügelantrieb betrachten. Da auf diesem Gebiet noch keine entsprechenden Erfahrungen vorliegen, ist es schwer, den bei einer konstruktiv durchführbaren Lösung erreichbaren besten Wirkungsgrad zu bestimmen. Wir wollen

daher optimistisch sein und einen Wirkungsgrad des Schlagflügels von 90% für möglich halten.

Es müssen bei diesem Antrieb sämtliche bewegten Massen gewichtlich ausgeglichen und entsprechend gelagert sein. Die Flügel werden durch die größeren Beanspruchungen etwas schwerer als der bei unserer Rechnung bisher zugrunde gelegte leichteste Flügel. Der Antriebsmechanismus bringt ebenfalls zusätzliche Gewichte, die wir bei großer Vorsicht auf zusammen 12 kg schätzen können. Wir würden unter diesen günstigsten Voraussetzungen einen effektiven Leistungsbedarf er-halten von der Größe,

$$N_{eff} = \frac{(105+12) \cdot 0{,}55}{75 \cdot 0{,}9} = 0{,}95 \text{ PS}$$

günstiger liegen die Verhältnisse schon bei der von Prof. Schmeidler untersuchten Kippbewegung des Flügels. Der Flügel wird hierbei um eine Achse parallel zur Flügelvorderkante periodisch geschwenkt, wodurch Vor- und Auftrieb erzeugt wird. Wir wollen auch hier einen Wirkungsgrad von 90% für erreichbar halten. Da die periodische Kippbewegung mechanisch und konstruktiv leichter auszuführen ist, könnte man in diesem Falle für Antriebsmechanismus, Lagerungen usw. ein zusätzliches Gewicht von 8 kg annehmen. Dann wird der Leistungsbedarf

$$N_{eff} = \frac{(105+8) \cdot 0{,}54}{75 \cdot 0{,}9} = 0{,}91 \text{ PS}$$

Bei dem eben erwähnten Vor- und Auftriebsmitteln wurde mit günstigen Annahmen gerechnet, deren praktische Verwirklichung noch langer Versuchs- und Entwicklungsarbeit bedarf, wobei es ungewiss ist, ob diese angenommenen Wirkungsgrade überhaupt erreicht werden können. Anders liegen die Verhältnisse bei der Luftschraube. Hier liegen umfangreiche Versuchs- und Berechnungsunterlagen vor, so dass man heute die theoretisch möglichen Bestwerte praktisch nahezu erreicht hat. Es erübrigt sich, an dieser Stelle die Luftschraubentheorie ausführlich zu behandeln. Es genügt die Angabe, dass die theoretisch besten Wirkungsgrade von Luftschrauben bei den Betriebsverhältnissen eines Muskelkraftflugzeuges bei 84% liegen. Bei dem Muskelkraftflugzeug H. V. 1 wurde ein Wirkungsgrad von 82% praktisch erreicht. (Zur Kontrollberechnung folgende Angaben: N = 0,9 PS, D = 1,5 m, n = 500 u/min., o = 12,5 m/Sek.) Das zusätzliche Gewicht für Antriebsmechanismus und Luftschraube betrug 3 kg. Damit wird der Leistungsbedarf

$$N_{eff} = \frac{(105+3) \cdot 0{,}53}{75 \cdot 0{,}82} = 0{,}92 \text{ PS}$$

Dieser praktisch erreichte Wert dürfte einen Grenzwert darstellen, bei dem eine Verbesserung über 10% hinaus unmöglich erscheint. Es soll weiter unten jedoch untersucht werden, welche Leistungssteigerung von einer Verbesserung von 10% zu erwarten ist.

Wir kommen daher zu dem Ergebnis, dass der Schlagflügel, der Kippflügel und ähnliche Arten des Vortriebes bzw. Vor- und Auftrieb erzeugenden Mittel auch in ihrer zukünftigen besten Entwicklungsform der Luftschraube beim Menschenkraftflug nicht überlegen, sondern höchstens gleichwertig sein werden. **Infolge ihres einfachen Aufbaus und der vorliegenden Erfahrungen dürfte die Luftschraube im Muskelkraftflugzeug das praktisch erfolgreichste Vortriebsmittel bleiben.** Das schließt jedoch eine Existenzberechtigung der andern Vor- und Auftriebsmittel durchaus nicht aus, man muss sich nur darüber klar sein, dass ihre besten Verwendungsmöglichkeiten auf irgendwelchen anderen Gebieten der Fliegerei liegen und wahrscheinlich mit dem motorischen Antrieb verbunden sein werden.

Welche Leistung kann der Mensch abgeben?

Diese für den Muskelkraftflug ausschlaggebende Frage ist bisher immer recht oberflächlich gestreift worden. In dieser Beziehung wird auch heute noch gern Vogel-Strauß-Politik getrieben. Wir haben darüber Messungen durchgeführt, die ein klares Bild ergeben und mit der angewandten Methode sehr einfach auszuführen und zu kontrollieren sind.

Wenn man derartige Messungen durchführen will, ist zuerst die Frage zu beantworten, bei welcher Bewegungsart der Mensch am vorteilhaftesten seine Körperleistung abgeben kann. Wir kennen im Wesentlichen drei Bewegungsarten, bei denen der Mensch Leistung abgibt.

1. D a s Gehen, welches ins Mechanische übersetzt beim Liegefahrrad angewendet worden ist mit pendelnder Bein-bewegung.
2. Das R a d f a h r e n mit rotierender Beinbewegung.
3. D a s R u d e r n, bei dem Arme und Beine eine periodische Beuge- und Streckbewegung ausführen. Diese Bewegung ist auch beim Curryschen Landskiff angewandt worden.

Beim Gehen, Treppensteigen usw. wird eine gewisse Arbeit geleistet. Ein Teil dieser Arbeit wird bereits im Körper aufgezehrt, der Rest wird nutzbar gemacht. Bei einer gymnastischen Freiübung ermüdet der Körper, ohne nutzbare Arbeit abgegeben zu haben. Die ganze Energie ist im Körper verbraucht. Der Wirkungsgrad, mit dem die nutzbare. Arbeit geleistet wurde, ist also hierbei gleich Null. Wir müssen daher die Bewegungsart mit dem günstigsten Körperwirkungsgrad ermitteln, wo bei größtmöglicher Kraftabgabe, die wenigste Energie im Körper aufgezehrt wird.

Die drei genannten Bewegungsarten können wir qualitativ sehr einfach auf den Körperwirkungsgrad untersuchen. Wir führen dazu diese Bewegungsarten aus, ohne Arbeit an ein Gerät abzugeben. Die Bewegung, bei der Ermüdung zuerst auftritt, wird am ungünstigsten sein und umgekehrt.

Wird jede Bewegung im normalen Tempo eine Minute lang ausgeübt, dann kann man ohne Schwierigkeit feststellen, dass die Ruderbewegung, die meiste Energie verzehrt hat, während eine Entscheidung zwischen den anderen beiden Arten schwerer fällt. Zu diesem Zwecke führen wir diese Bewegungen noch einmal durch, diesmal jedoch in schnellerem Tempo. Dabei zeigt sich, dass bei der Pendelbewegung höhere Beschleunigungskräfte auftreten als bei der rotierenden Bewegung, die entsprechend mehr Arbeit verzehren, so dass nunmehr die rotierende Bewegung beim Fahrrad als die Bewegung mit dem günstigsten Körper-Wirkungsgrad erkannt ist.

Die Erfahrungen der Praxis bestätigen dieses Resultat. Im Curryschen Landskiff werden nicht die hoben Geschwindigkeiten erzielt wie mit dem Rennrad. Das Liegefahrrad mit pendelnder Beinbewegung hat sich nur bei geringen Geschwindigkeiten bewährt, bei großen Geschwindigkeiten (Radrennen) ist immer das normale Fahrrad überlegen.

Nun wäre noch die Frage zu klären, bei welcher Umdrehungszahl und bei welcher Kurbellänge die besten Leistungen erzielt werden können. Auch hier hat die Praxis eindeutige Antwort gegeben. Fast jeder Rennfahrer hat verschiedene Kurbellängen und Übersetzungsverhältnisse durchprobiert. Dabei ergibt sich in allen Fällen, dass die besten Umdrehungszahlen bei 70 bis 110 U/min. liegen. Die Kurbellänge beträgt je nach Körpergröße 160 bis 180 mm.

Da die Untersuchung zugunsten des normalen Fahrrades ausgefallen ist, (sonst wäre ja das Fahrrad längst verbessert worden), wollen wir damit auch unsere Leistungsmessungen vornehmen.

Zu diesem Zwecke werden zwei Fahrräder hintereinandergestellt und durch eine 10 m lange Schnur verbunden. Vor dem zweiten Fahrrad ist eine Federwaage zwischengehängt, die während der Fahrt beobachtet werden kann. Zur Dämpfung von Stößen wird noch ein kurzes Gummiseil eingeschaltet. Die Fahrt geht über eine vorher festgelegte Messstrecke, über die sich der hintere Fahrer, ohne mitzutreten ziehen lässt. Er liest dabei den Seilzug von der Federwaage ab, zugleich wird die für das Durchfahren der Messstrecke gebrauchte Zeit gestoppt.

Unter der Voraussetzung, dass beide Radfahrer gleiches Gewicht und beide Fahrräder gleiche Reibung besitzen, errechnet sich die von dem vorderen Radfahrer abgegebene Leistung nach der Formel:

$$N = \frac{2\,P \cdot V}{75}$$

Hierin ist:

N = Leistung in PS
P = Zugkraft an der Waage in kg
V = Geschwindigkeit m/Sek.

Das Resultat ergibt die durchschnittliche Leistung während der gemessenen Zeit. Die Leistung wird über verschiedenlange Messstrecken ermittelt, wodurch man die Hüllkurve für die Leistung in Abhängigkeit von der Zeit aufzeichnen kann. Der Vergleich von Messungen mit verschiedenen Personen zeigt, dass der trainierte Rennfahrer ca. 100 Prozent mehr leistet als ein untrainierter Fahrer. Durch das Überlagern von Messergebnissen mit Spezialisten über kurze und lange Strecken ist es möglich, eine Hüllkurve für die erreichbaren besten Leistungen aufzustellen, die in **Abb. 6** dargestellt ist. Die größte Spitzenleistung auf dem Fahrrad erzielte ein Berufsfahrer über 17 Sek. mit 1,3 PS. Bei kürzeren Zeiten ließ sich die Leistung kaum mehr verbessern.

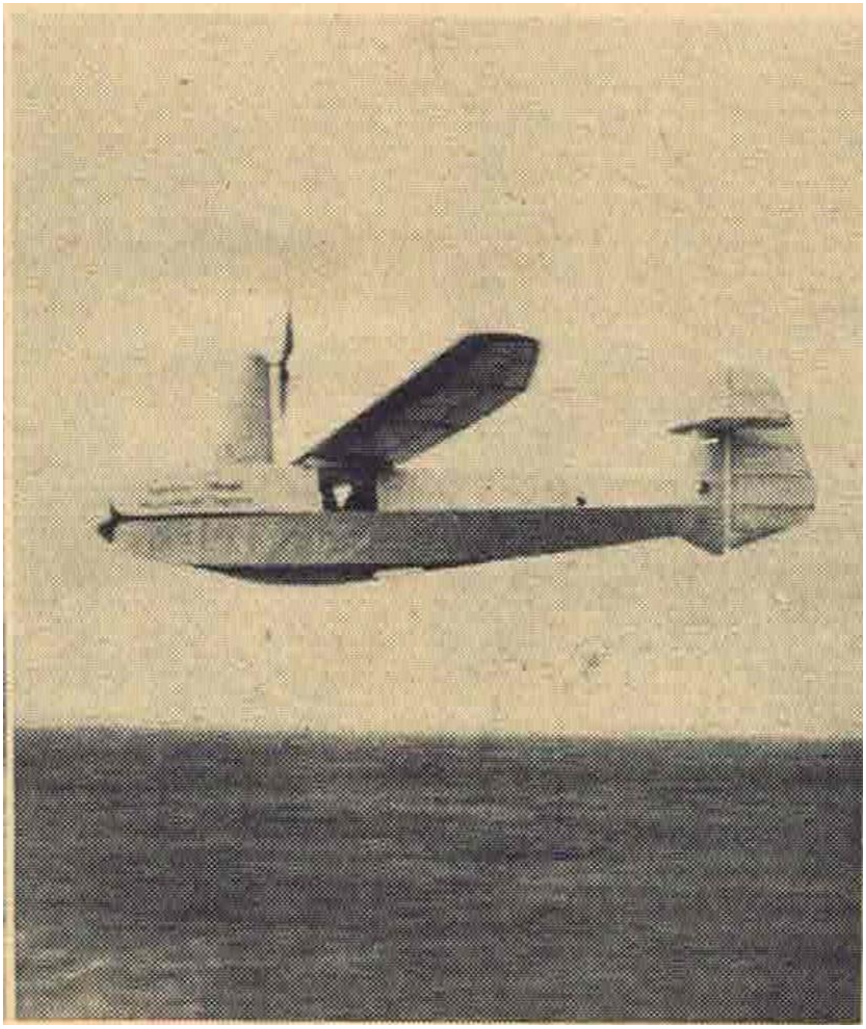
Von einem Gerät, bei dem Arme und Beine zur Arbeitsabgabe herangezogen werden, versprechen sich manche Konstrukteure eine Steigerung der Leistung. Es wurden daher Messungen an einem Gerät durchgeführt, bei dem Arme und Beine rotierende Bewegungen ausführen, da hierbei der beste Körperwirkungsgrad vorhanden ist. Es ergab sich dabei, dass bei kurzzeitigen Leistungsabgaben eine Steigerung der Nutzleistung möglich ist, jedoch ermüdete der Körper der größeren Kraftabgabe entsprechend schneller. Mit diesem Gerät konnte die Grenze, bei der die Versuchsperson wegen Erschöpfung mit der Leistungsabgabe aufhören muss, schon bei kurzen Zeiten erreicht werden.

Diese Art der Kraftabgabe ist in einem Muskelkraftflugzeug nur dann möglich, wenn das Flugzeug völlig eigenstabil, d. h. ohne Steuerung durch den Piloten fliegt. In diesem Falle ist jedoch der mindestens erforderliche Schwebeleistungsbedarf höher als bei dem günstigsten Flugzeug, welches oben ermittelt worden war. Der Rumpfquerschnitt wird hierbei größer, und die Stabilisierung setzt die aerodynamische Güte herab, so dass der Vorteil der größeren Kraftabgabe wieder ausgeglichen wird. Soll das Flugzeug durch den Piloten gesteuert werden (was jedoch mit der Kraftabgabe durch die Arme kaum vereinbar sein dürfte), so kann der Pilot sich nur so weit erschöpfen, als dies das Steuern des Flugzeuges zulässt. Das ist jedoch beim Antrieb nur durch die Beine bereits gut möglich. Arme und Beine zur Kraftabgabe heranzuziehen, verspricht daher keine merkliche Steigerung der Flugstrecken. Es soll im Folgenden mit der Leistungsgrenze gerechnet werden, die in einem vom Piloten gesteuerten Flugzeug erreicht werden kann und die mit der Leistungsgrenze für die Beinarbeit allein übereinstimmt.

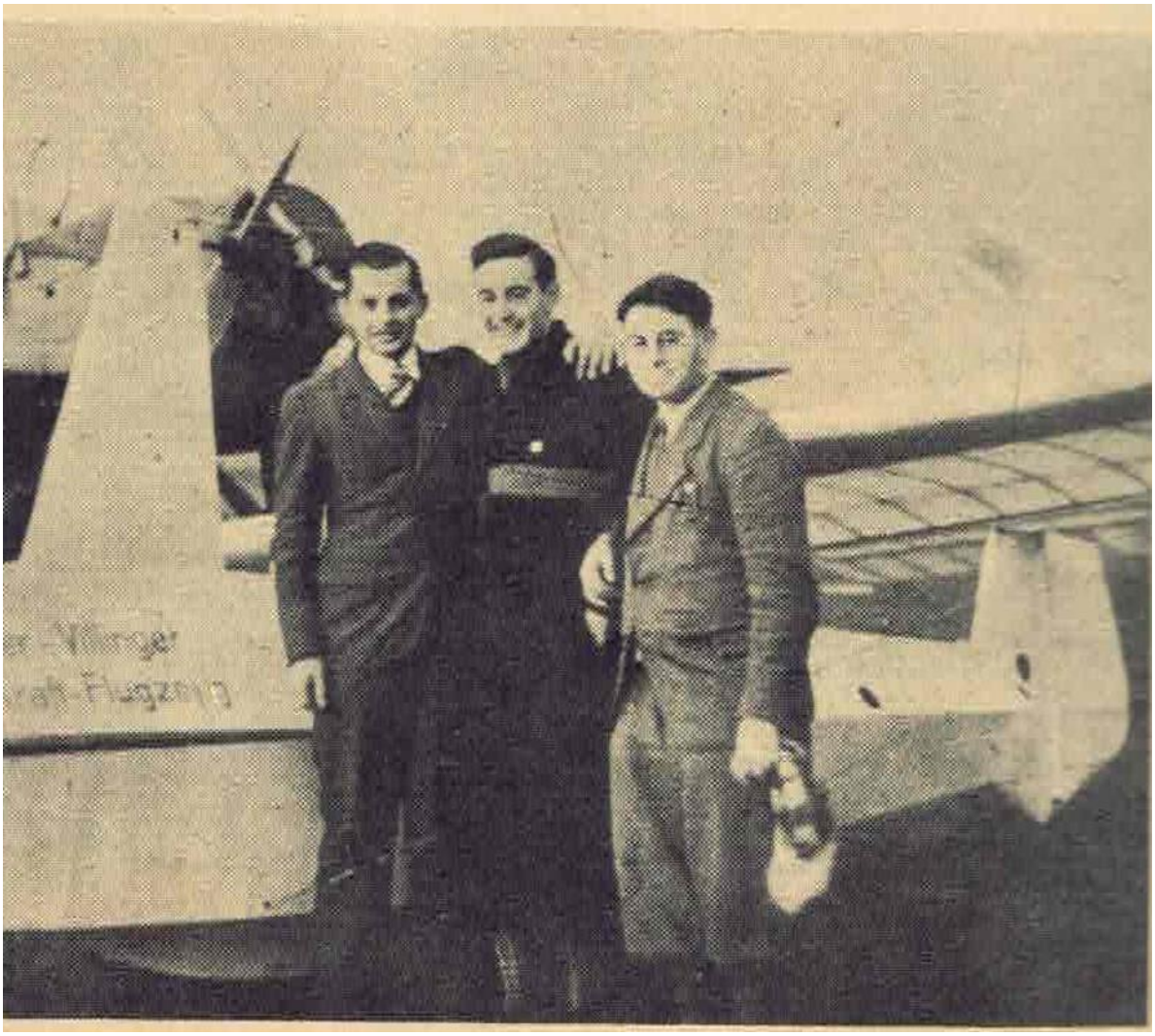
Propellermontage



Der Rekordflug von 429 m in Hamburg am 20. November 1936



Haeßler, Hofmann und Villinger an ihrem Muskelkraftflugzeug



Bilder: Haeßler (3)

Wenn wir in **Abb. 6** eine Gerade in Höhe der Dauerleistung ziehen, können wir feststellen, dass die Hüllkurven beizeiten über 20 bzw. 40 Sek. Hyperbeln darstellen, die sich asymptotisch. der Senkrechten über der Zeit 0 und der Linien der Dauerleistung nähern. Das bedeutet, dass wir über der Dauerleistung eine konstante Arbeitsmenge zur Verfügung haben; das ist die Reserve im Körper. Aus dem Vergleich der Kurven für Beinarbeit und Arm- und Beinarbeit ergibt sich, dass in beiden Fällen die Dauerleistung die gleiche ist.

Zur Kontrolle ist in **Abb. 7** die sich nach **Abb. 6** ergebende Größe der geleisteten Arbeit, abhängig von der Zeit, aufgetragen. Der gerade Anstieg der geleisteten Arbeit und der parallele Verlauf der Arbeit bei Dauerleistung bestätigt obige Überlegung. Außerdem können wir jetzt feststellen, dass die im Fluge praktisch nutzbare Reserve beim besten untersuchten Radfahrer 1100 mkg beträgt, während die bis zur Erschöpfung freiwerdenden Reserven rund 2600 mkg betragen. Die übrige Arbeit konnte erst durch

die Tätigkeit von Herz und Lunge frei werden. Da sich das Arbeitstempo von Herz und Lunge nicht beliebig steigern lässt, geben diese die Höhe der Dauerleistung an.

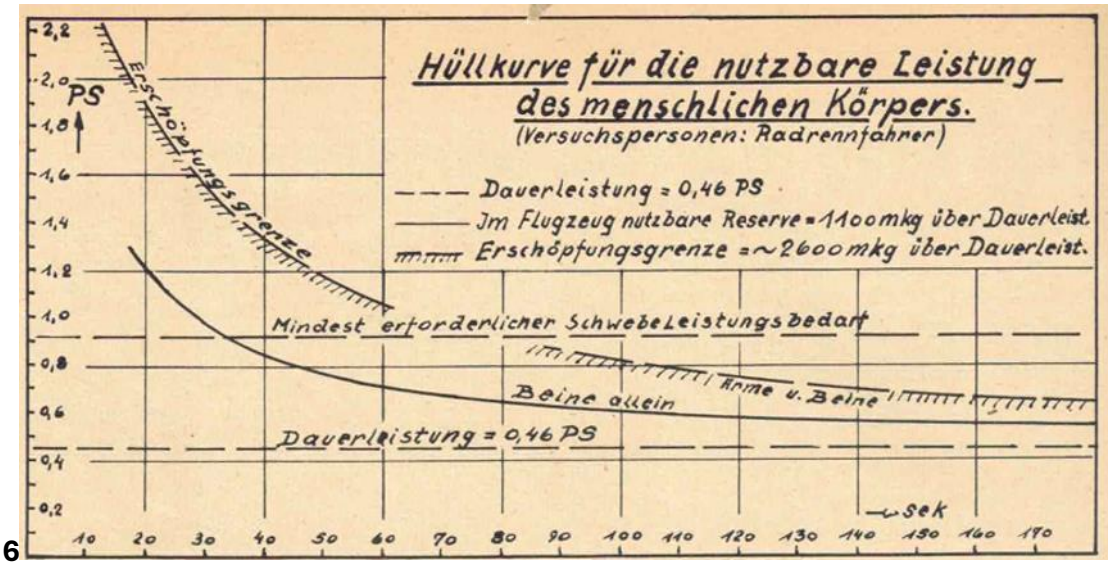


Abb. 6



Abb. 7

Wir wollen uns daher einmal vor Augen führen, welche Vorgänge sich bei der Arbeitsabgabe im menschlichen Körper abspielen. Der Betriebsstoff für die Verbrennungsmaschine des menschlichen Körpers ist das Glykogen der Muskeln. Es wird bei der Muskelarbeit zu Milchsäure abgebaut. Nun hat der Sauerstoff die Aufgabe, die Milchsäure wieder in Glykogen zurückzuführen, was mit einem gewissen Wirkungsgrad geschieht.

Der Körper hat also eine bestimmte Menge mit Sauerstoff aufgeladener Milchsäure (=Glykogen) vorrätig. Mit diesem vorrätigen Sauerstoff kann ein trainierter Sportsmann nach obigem Ergebnis bis zur im Fluge zulässigen Ermüdungsgrenze 1100 mkg Arbeit leisten. Soll die abgehaltene Arbeit größer werden, ohne die zulässige Ermüdungsgrenze zu überschreiten, muss er durch die Lunge Sauerstoff aufnehmen. Die Lunge ist aber nur für eine begrenzte Fördermenge von Sauerstoff gebaut, ebenso kann das Herz das mit Sauerstoff versorgte Blut nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu den Muskeln bringen. Bei dem untersuchten Radrennfahrer ist die Fördermenge von Sauerstoff gerade so groß, dass sie dem Verbrauch an Sauerstoff bei der Dauerleistung von 0,46 PS die Waage hält. Will er mehr als 0,46 PS leisten, so muss er eben seine Reserven in Anspruch nehmen. Die Versuche zeigen, dass bei einer Leistung von 2 PS sämtliche Reserven in 17 Sek. aufgebraucht sind, bei einer Leistung von 1 PS in 66 Sek. usw. Man sieht hieraus, dass es keinen Zweck hat, die Reserven so schnell wie möglich

abzuzapfen, da diese nur einen Bruchteil der Arbeitsmenge darstellen, die bei einem längeren Flug benötigt wird.

Wir können zusammenfassend sagen, dass im besten Fall bei einem Piloten mit dem günstigsten Gewicht von 70 kg eine Dauerleistung von 0,46 PS und eine im Fluge nutzbare Reserve von ca. 1100 mkg zur Verfügung steht.

Wie weit kann man mit Muskelkraft horizontal fliegen?

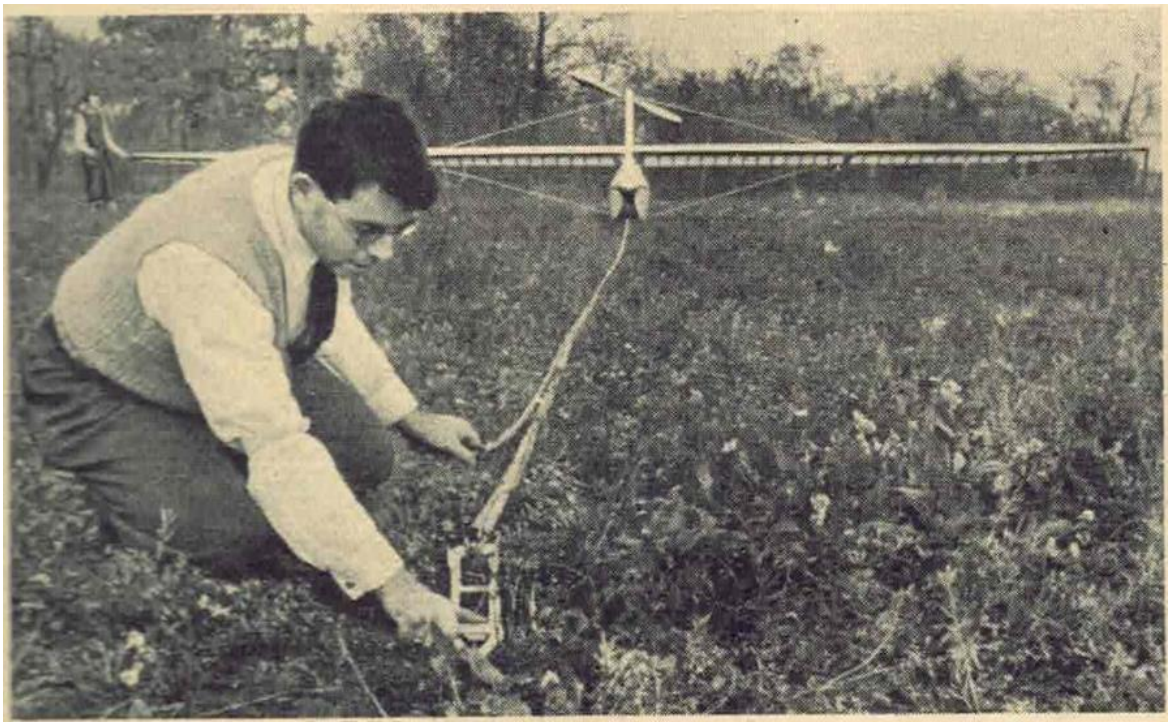
Nachdem wir nun festgestellt haben, mit welchem geringsten Schwebeleistungsbedarf wir ein Flugzeug bauen können und welche Körperleistung vorhanden ist, können wir ermitteln, welche Strecken man unter diesen günstigsten Bedingungen horizontal fliegen kann. Wir setzen dabei voraus, dass die für den Start notwendige Arbeit von einer Hilfsvorrichtung geleistet wird, und das Flugzeug am Ende des Startvorganges ganz niedrig über dem Boden, theoretisch in null Meter Höhe, fliegen soll.

Aus Abb. 6 entnehmen wir, dass das ermittelte Flugzeug, welches bei einem Schwebeleistungsbedarf von 0,92 PS mit einer Geschwindigkeit von 12,5 m/sec (45 km/h) fliegt, auf diese Art 32 Sekunden lang horizontal gehalten werden kann, was einer Flugstrecke von 400 m ohne Gegenwind entspricht. Würde es gelingen, das Flugzeug noch um 10% zu verbessern, dann würde es 500 m weit fliegen können. Um eine Strecke von 1400 m zurückzulegen, müsste der Leistungsbedarf um 37 Prozent verringert werden, d. h., **das Flugzeug dürfte bei der gleichen aerodynamischen Güte über-haupt nichts mehr wiegen.** Der Pilot müsste bei dem hierbei erforderlichen Gesamtgewicht von 69 kg noch 1 kg leichter.

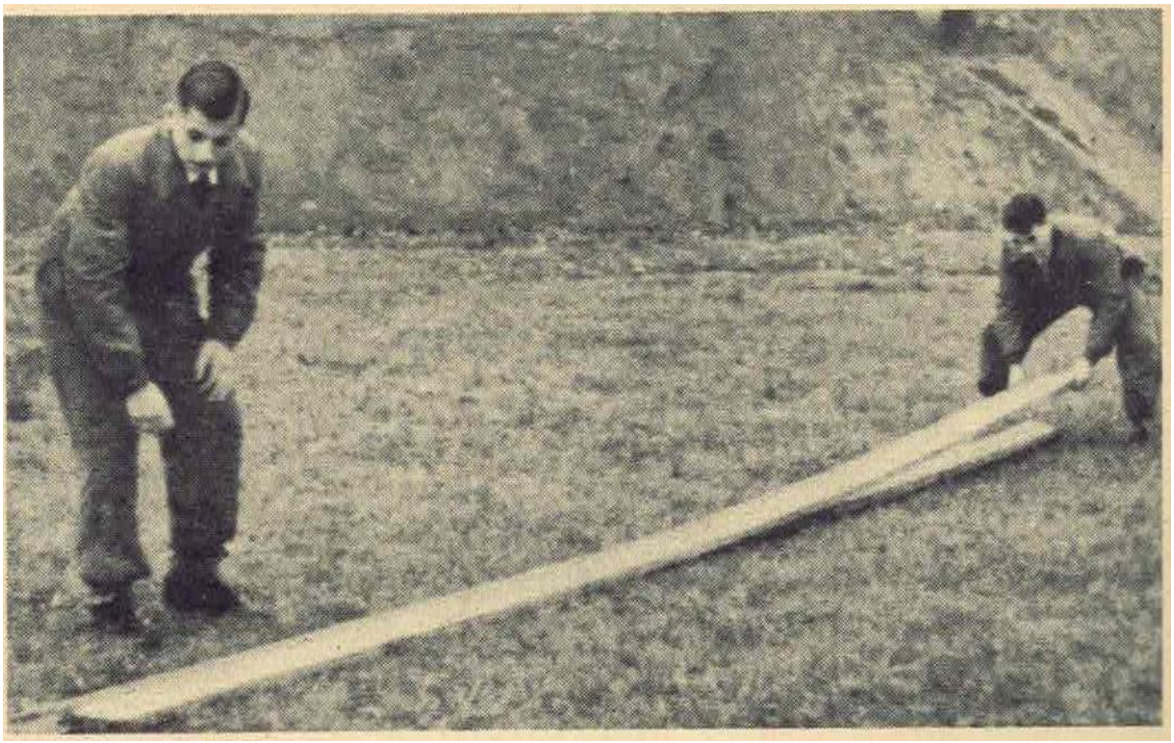
Welche Strecken können mit einem Muskelkraftflugzeug aus verschiedenen Starthöhen zurückgelegt werden?

Wir haben also festgestellt, dass es möglich ist, mit Muskelkraft 400 m weit horizontal zu fliegen. Da wir jedoch mit den bekannten Startmethoden den Ausgangspunkt des Fluges höher als 0 m verlegen können, interessiert die Frage, wie weit man mit dem Menschenkraftflugzeug bei den verschiedenen Starthöhen fliegen kann.

Das Startseil wird am Anker befestigt



Auslegen der Startbahn



Bilder: Haeßler (2)

Zur Beantwortung dieser Frage müssen wir feststellen, welche Gleitzahl das Flugzeug bei Abgabe der Dauerleistung erreicht. Als günstigste Werte gelten jetzt:

Fluggewicht G = 108 kg
Sinkgeschwindigkeit Vy =:0,53 m/sec.
Fluggeschwindigkeit V = 12,7 m/sec.
Dauerleistung ND = 0,46 PS
Propellerwirkungsgrad η = 0,82
Dann ist die Hubgeschwindigkeit bei 0,46 PS

$$V_h = \frac{N_D \cdot 75 \cdot \eta}{G} = \frac{0{,}46 \cdot 75 \cdot 0{,}82}{108} = 0{,}262 \text{ m/sec.}$$

Die verbleibende Sinkgeschwindigkeit ist

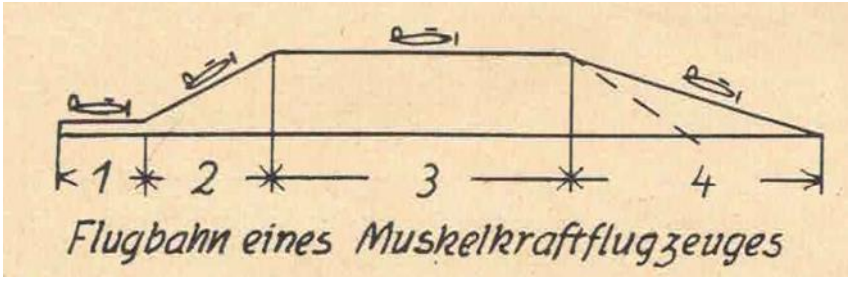
$$\underline{Vy} = 0{,}53 - 0{,}262 = \underline{0{,}268 \text{ m/sec.}}$$

Die Gleitzahl ist

$$\underline{\varepsilon} = \frac{0{,}268}{12{,}7} = 1 : 47{,}5$$

Nun setzt sich der vom Flugzeug zurückgelegte Weg ausfolgenden Einzelstrecken zusammen:

1.Beschleunigungsstrecke beim Start $c_B = \sim 15$ m
2. Anstiegsweg auf Starthöhe h, der nach Versuchen ungefähr das Achtfache der Starthöhe beträgt.
3. Horizontaler Muskelkraftflug $c_M = 400$ m.
4. Durch die Dauerleistung verlängerter Gleitweg mit der Gleitzahl $\varepsilon_D = 1 : 47{,}5$



Flugbahn eines Muskelkraftflugzeug **(Abb. 8)**

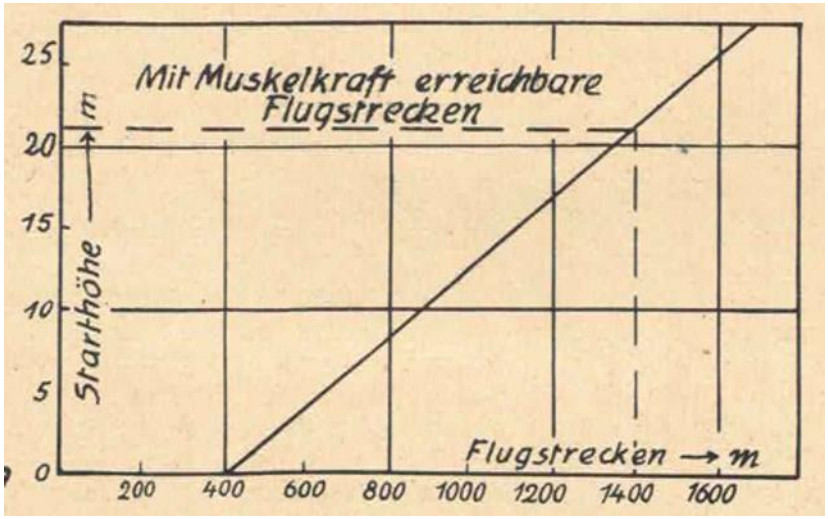


Abb. 9

Der Flugweg ist somit

$$s = c_B + 8h + c_M + \frac{h}{\varepsilon_D}$$

Bei einer Starthöhe von 3 m, die im Selbststart erreicht wird, ergibt sich dann eine Flugstrecke von

$$s = 15 + 8 \cdot 3 + 400 + 3 \cdot 47{,}5$$
$$s = 15 + 24 + 400 + 142 = 581 \text{ m}$$

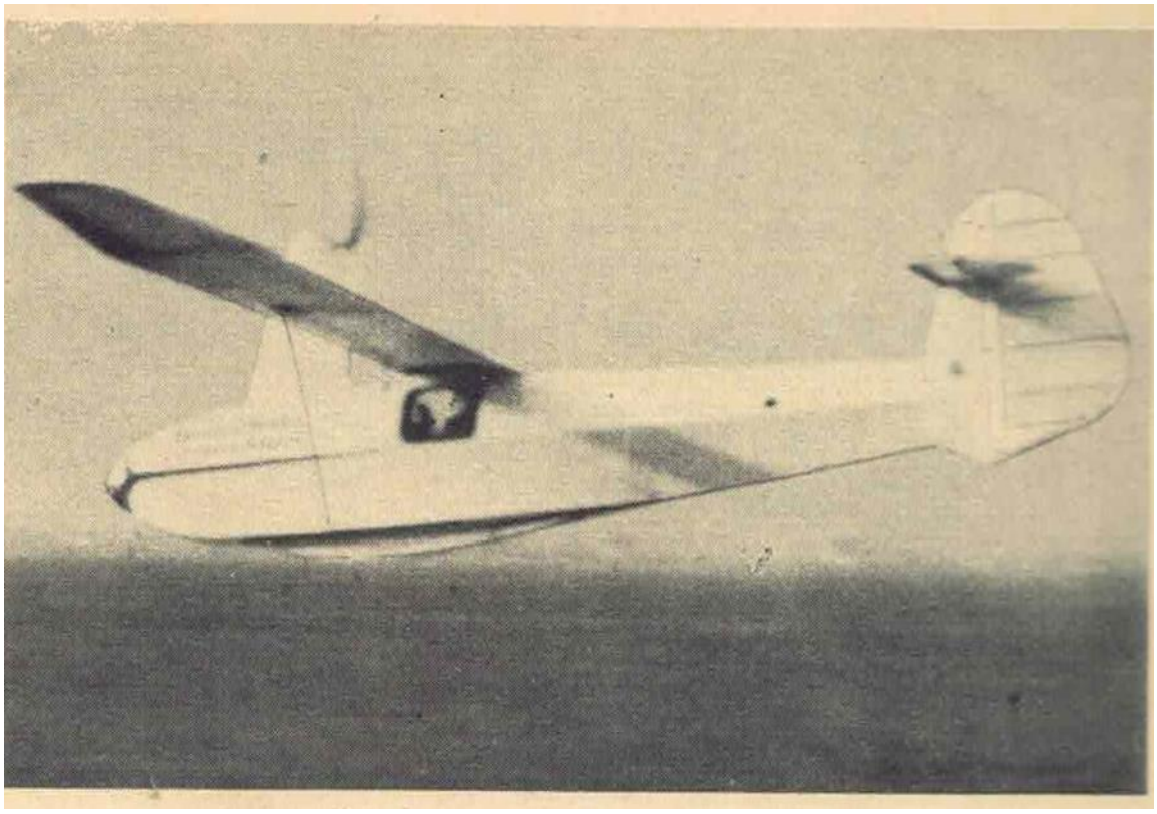
Ohne Muskelkraftantrieb legt das Flugzeug bei der gleichen Starthöhe die Strecke zurück:

$$s = c_B + 8 \cdot h + \frac{h}{\varepsilon}$$
$$s = 15 + 24 + 3 \cdot 24 = 111 \text{ m}$$

Es ergibt sich somit eine nur durch Muskelkraft zurück-gelegte Strecke von
s = 581— 111 = 470 m (bei Windstille)
In Abb. 9 sind die Flugstrecken bei verschiedenen Starthöhen angegeben. Um z. B. einen Flug von 1400 m durch-führen zu können, ergibt sich eine erforderliche Starthöhe von 21m.

Kann ein Energiespeicher Vorteile bringen?

Da von verschiedenen Seiten die Ansicht vertreten wird, dass ein im Fluge mitzunehmender Energiespeicher beim Menschenkraftflug erhebliche Vorteile bringen kann, diese Frage kurz gestreift werden.



Landung nach 400 m Strecke Bild: Haeßler

Zuerst wollen wir einmal prüfen, ob ein Selbststart ohne Speicher möglich ist. Zu diesem Zweck müsste das Flugzeug mit einem Rad ausgerüstet sein. Der Vortrieb könnte über Rad und Propeller erzielt werden. Unter der Voraussetzung, dass diese Einrichtung nichts wiegt und einen Wirkungsgrad von 100 Prozent besitzt, erhalten wir folgendes Ergebnis: Die für den Start aufzubringende Arbeit beträgt ca. 1600 mkg. Die Arbeit muss mindestens bei der Schwebeleistung von 0,92 PS abgegeben werden, da das Flugzeug sonst nicht zum Abheben kommt. Aus der Leistungskurve **(Abb. 6)** ergibt sich, dass hierbei diese Arbeit in 22 Sek. geleistet wird. Da die Leistung von 0,92 PS nur 32 Sek. lang abgegeben werden kann, muss das Flugzeug nach einem Flug von 10 Sek. Dauer wieder landen. Diese Startart hat also keinen praktischen Wert.

Es ist daher notwendig, eine zusätzliche Starthilfe zu verwenden. Am bekanntesten ist der Katapultstart, bei dem von einer Startmannschaft ein Gummiseil ausgezogen wird, bis genügend Arbeit auf diese Art aufgespeichert ist. Dann schnellt das Flugzeug vorwärts, während die Mannschaft noch weiterläuft und so weitere Arbeit leistet. Hierbei kann das Flugzeug Starthöhen bis zu 15 m erreichen.

Dieser Katapultstart kann auch ohne fremde Hilfe vom Piloten allein durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wird das Flugzeug verankert, das Gummiseil in den Starthaken gehängt und vom Piloten ausgezogen, um dann an einem Erdanker befestigt zu werden. Vom Führersitz aus löst der Pilot die Haltevorrichtung aus, und das Flugzeug startet durch die im Gummiseil aufgespeicherte Energie. Da das Laufen der Startmannschaft während der Beschleunigung des Flugzeuges in diesem Fall fehlt, können hierbei nur geringe Höhen erzielt werden. Die Erfahrung bei über 100 Starts, die wir auf diese Methode durchführten, hat gezeigt, dass die günstigste Starthöhe 3 m beträgt. Wird das Seil länger gemacht, um die Höhe zu vergrößern, dann wächst das Gewicht und die Reibung des Seiles am Boden so schnell an, dass bei einer bestimmten Seillänge das Flugzeug nicht mehr freikommt. Höhen über 3 m konnten durch Ziehen erreicht werden, die Flugstrecken waren dann jedoch kürzer.

Bei den letzten beiden Startarten mit Energiespeicher wird dieser am Startplatz zurückgelassen. Die Startvorrichtung bei einem Flug von 400 m im Flugzeug mitzunehmen, hat keinen Sinn. Denn es ist unlogisch, das Flugzeug auf seinem kurzen Flug mit einer derartigen Vorrichtung zu belasten, wo es nach der Landung sowieso an den Ausgangspunkt zurückgebracht werden muss, um von neuem gegen den Wind zu starten.

Der im Fluge mitzunehmende Energiespeicher hat erst dann eine Daseinsberechtigung, wenn mittels der gespeicherten Energie das Flugzeug starten und eine Höhe erreichen kann, von der aus ein Streckensegelflug möglich ist. Diese Höhe wird bei Zugrundelegung der im Muskelflug erreichbaren Sinkgeschwindigkeit von 0,27 m/sec mindestens 75 m betragen. Außerdem darf der Energiespeicher nicht schwerer sein als ein entsprechender Benzinmotor.

In dem gegebenen Flugzeug genügt ein Motor von 2,5 PS, um beliebige Streckenflüge auszuführen. Dabei würde eine Steiggeschwindigkeit von 1 m/sec erreicht werden. Dieser Motor wiegt mit Tankanlage und Betriebsstoff für 2 Stunden 12 kg. Dies wäre daher als Gewichtsgrenze für einen an-deren Energiespeicher zu betrachten. Wir wollen daher untersuchen, ob es möglich ist, einen diesen Anforderungen entsprechenden Speicher zu bauen. Wieviel Arbeit ist für einen Start und anschließenden Steigflug auf 75 m erforderlich? Das Gesamtgewicht des Flugzeuges, des Speichers und des Piloten beträgt 120 kg bei einer Sinkgeschwindigkeit von 0,57 m/sec. Die für den Start notwendige Arbeit ist dann 1600 mkg.

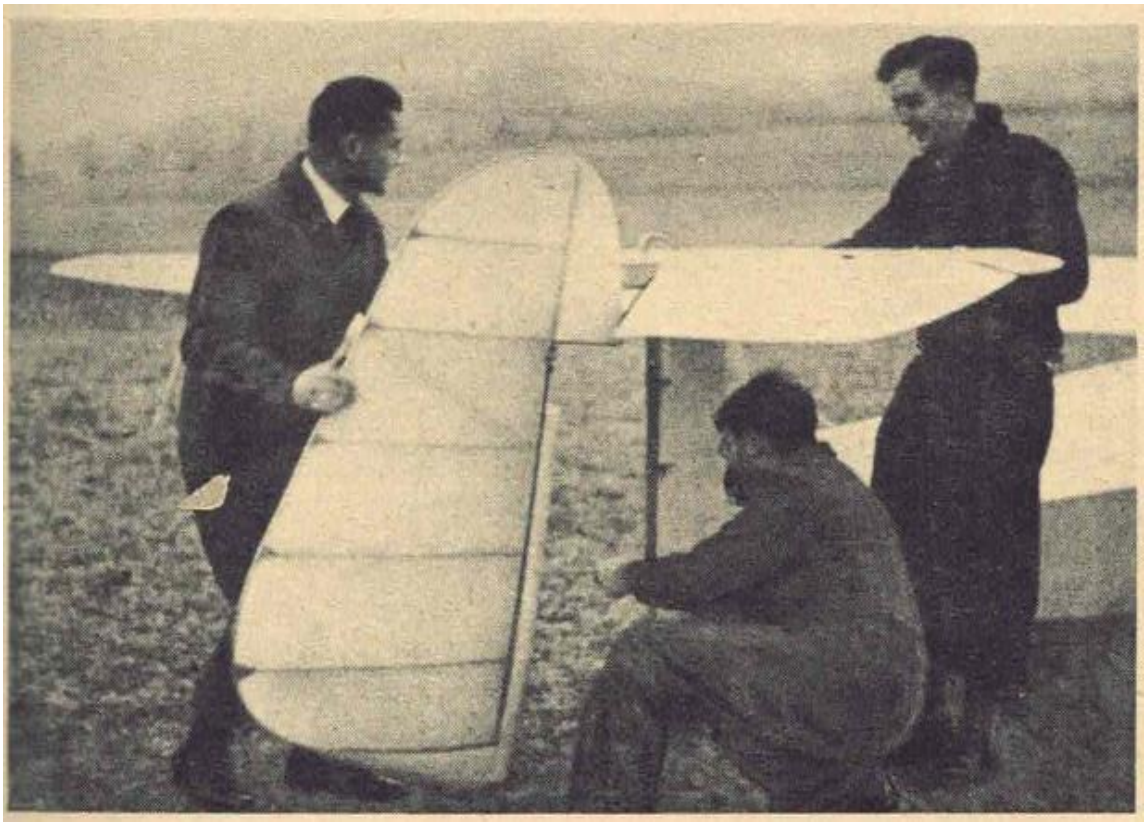
Bei einer Steiggeschwindigkeit von 1 m/sec ist die Hubhöhe

H = Geforderte Höhe + <u>Geforderte Höhe • Sinkgeschwindigkeit</u>
Steiggeschwindigkeit

$$\underline{H} = 75 + \frac{75}{1{,}0} \cdot 0{,}57 = 75 + 43 = \underline{118\ \text{m}}$$

Dann ist die für den Steigflug erforderliche Arbeit

$$A_{st} = G \bullet H = 120 \bullet 118 = 14.150 \text{ mkg}$$



Haeßler, Villinger und Hofmann beim Einhängen des Seitensteuers an Ihrem Muskelkraftflugzeug Bild: Haeßler

Die gesamte Arbeit ist

$$A_{ges} = 1600 + 14150 = 15750 \text{ mkg}$$

Bei einem Propellerwirkungsgrad von 80 Prozent und einem Speicherwirkungsgrad von 100 Prozent wird die erforderliche Arbeit

$$A_{eff} = \frac{15750}{0{,}8} = \sim 20000 \text{ mkg}$$

Wie kann man nun diese Arbeit aufspeichern? Es kommen folgende Methoden in Frage:

1. Dehnen von Stahlfedern
2. Dehnen oder Verdrehen von Gummi
3. Beschleunigung einer Schwungmasse
4. Verdichten von Luft (Pressluft Motor)

1. Dehnen von Stahlfedern

Bei einer Elastizitätsgrenze von 150 kg/m^2 kann eine Stahlfeder 65 mkg pro kg Gewicht aufnehmen. Das ergibt für unseren Fall ein Gesamtgewicht von Stahlfedern von.

$$\underline{G = \frac{20\,000}{65} = 308 \text{ kg}}$$

Stahlfedern sind also nicht geeignet.

2. Dehnen von Gummi.

Aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm für Gummi ergibt sich eine praktisch mögliche Arbeitsaufnahme von 400 mkg/kg.

Dann ist das erforderliche Gummigewicht:

$$\underline{G = \frac{20\,000}{400} = 50 \text{ kg}}$$

Gummi ist daher ebenfalls nicht geeignet, ganz abgesehen von konstruktiven Schwierigkeiten.

3. Beschleunigung einer Schwungmasse.

Wir wollen für ein Schwungrad eine Tourenzahl von 8000 U/min zulassen. Dann ist das erforderliche Gewicht der Schwungmasse bei einem Schwungraddurchmesser von 40 cm und einem Abstand der Schwerlinie des Kranzes von der Achse von 17 cm

$$A = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$m = \frac{A \cdot 2}{v_2}$$

$$v = 0{,}34 \cdot \pi \cdot \frac{8000}{60} = 142 \text{ m/sek}$$

$$m = \frac{20\,000 \cdot 2}{142^2} = 198 \frac{\text{kg/sek}^2}{\text{m}}$$

$$\underline{G = m \cdot g = 1{,}98 \cdot 9{,}81 = 19{,}4 \text{ kg} = \sim 20 \text{ kg}}$$

Hinzu kommt noch das Gewicht der Lagerung und das des Getriebes mit ca. 15 kg, was ein Gesamtgewicht von 35 kg ergibt. Durch die Verluste der Lagerreibung und den Luftwiderstand des Schwungrades sowie Getriebereibung werden die Verhältnisse noch ungünstiger, abgesehen von der beim Fliegen unangenehmen Kreiselwirkung.

4. Verdichten von Luft

Als Behälterdruck wollen wir 20 atm annehmen, der mit einem dreistufigen Kompressor erreicht wird. Jede Stufe soll mit einem Wirkungsgrad von 80 Prozent arbeiten und der

Pressluft Motor mit einem solchen von 50 Prozent. Dann ist die insgesamt aufzubringende Arbeit:

$$A = \frac{20\,000}{0{,}8 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}5} = 78\,000 \text{ mkg}$$

Der Luftbehälter hat dann $\frac{20\,000}{0{,}5} = 40\,000 \text{ mkg}$ aufzunehmen. Es ergibt sich dabei eine erforderliche Druckluftmenge von 200 Liter bei 20 atm. Das Gewicht der Anlage setzt sich zusammen aus:

Kompressor Anlage	10 kg
Luftbehälter	14 kg
Pressluft Motor	10 kg
Gesamtgewicht	34 kg

Zusammenfassend ergibt sich, dass mittels Schwungrads oder Pressluft die geforderte Arbeitsmenge im Flugzeug gespeichert werden kann. **Gewichtlich sind diese Speicher jedoch dem Benzinmotor unterlegen.** Da die gespeicherte Arbeit nur zu einem Start und begrenztem Steigflug ausreicht, beim Benzinmotor die Leistung jedoch zu beliebiger Zeit zur Verfügung steht, erscheint dieser Weg nicht zweckmäßig. **Der einfachste und billigste Start zum Menschenkraft-Segelflug wird mit großer Wahrscheinlichkeit der Autoschleppstart werden.**

Die Entwicklungsmöglichkeiten des Muskelkraftfluges

Die erreichbare horizontale Flugstrecke von 400 m zeigt eindeutig, dass der Menschenkraftflug in dieser Form nur ein begrenztes sportliches Interesse besitzt. Da man jedoch mit diesem Flugzeug bei der Dauerleistung von 0,46 PS für mehrere Stunden eine Sinkgeschwindigkeit von 0,27 m/sec erreichen kann, ist es logisch, dass seine Bedeutung auf dem Ge biet liegen muss, wo diese geringe Sinkgeschwindigkeit von Vorteil ist: also im Segelflug.

Es soll daher untersucht werden, welche Vorteile eine Kombination des Muskelkraftfluges mit dem Segelflug ergeben kann. Die Vorteile eines Segelflugzeuges mit geringer Sinkgeschwindigkeit gegenüber einem solchen mit hoher Sinkgeschwindigkeit abzuschätzen, ist zahlenmäßig leider nicht möglich.

Die Erfahrungen der verschiedenen Wettbewerbe zeigen, dass man sich. mit Sinkgeschwindigkeiten von Vy = 90 cm/sec schon an der oberen Grenze befindet, und dass ein Vy = 60 cm/sec als niedriger Wert das Segeln bei nicht besonders günstigem Wetter erheblich erleichtert. Eine Verringerung der Sinkgeschwindigkeit durch

Muskelkraft um ca. 50 Prozent wird daher das Flugzeug bedeutend unabhängiger von der Wetterlage machen.

Weiterhin wird die im Hangaufwind erreichbare größte Höhe durch Kraftabgabe vergrößert, was das Erreichen von thermischen Aufwindgebieten vom Hang aus erheblich erleichtert, wozu das durch Muskelkraft verbesserte, Gleitverhältnis ebenfalls beiträgt.

Im Allgemeinen sind die thermischen Aufwinde frühmorgens gleich Null, erreichen über Mittag die größte Stärke, um gegen Abend wieder auf null zu fallen. Ein Segelflugzeug kann daher erst dann zu einem Streckenflug starten, wenn der Aufwind gleich oder größer als die Sinkgeschwindigkeit wird. Eine Verringerung der Sinkgeschwindigkeit vergrößert daher die während des Tages zur Verfügung stehende Flugzeit, so dass längere Dauer- und Streckenflüge möglich werden. Hierbei ist zu beachten, dass bei einer Verringerung der Sinkgeschwindigkeit durch Muskelkraft die Horizontalgeschwindigkeit nicht kleiner wird.

Wie sehen nun die thermischen Aufwinde in der Ebene aus? Wir wissen, dass die Aufwärtsbewegung der Luft bei der Wolkenbasis sehr kräftig ist, in einer Höhe von 200m über dem Boden gerade noch ein Segeln mit normalen Segelflug-zeugen ermöglicht und

am Boden gleich Null ist. Eine Herabsetzung der Sinkgeschwindigkeit bedeutet daher eine Herabsetzung der zum Segelflug mindestes notwendigen Höhe. Während ein Segelflugzeug im Flugzeugschlepp auf die erforderliche Ausgangshöhe für einen Streckenflug gebracht werden muss, würde für ein Muskelkraftflugzeug schon der einfachere und billigere Autoschleppstart genügen. Bei gleicher Ausgangshöhe für einen Segelflug kann die Suchzeit zum Finden von Aufwindfeldern durch Muskelkraft verdoppelt werden.

Wir sehen hieraus, dass eine Kombination des Menschenkraftfluges mit dem Segelflug die Flugmöglichkeiten ohne Motor wesentlich erweitern kann. Es erscheint daher geboten, diese Möglichkeit praktisch zu erproben. Nach unseren bisherigen Erfahrungen lässt sich ein allen Forderungen festigkeitsmäßig genügendes Menschenkraft-Segelflugzeug mit einem Gewicht von 45 kg heute schon bauen. Die Steuerung, bei der das Seitensteuer in die Hand verlegt werden muss, ist bereits erprobt und hat sich bisher gut bewährt. Bei Piloten, die als Radfahrer nicht sonderlich trainiert sind, lässt sich mit diesem Flugzeug eine Sinkgeschwindigkeit von 35 cm für die Zeit von mehreren Stunden erreichen. Der Propeller wird im Segelflug automatisch zusammengeklappt, was ebenfalls schon durchgeführt worden ist. Die Richtung für die Weiterentwicklung ist damit klar vorgezeichnet. Die Ausschreibung eines Preises oder die Veranstaltung eines entsprechenden Wettbewerbes mit technischer Prüfung, bei dem diese Erkenntnisse berücksichtigt werden, wäre daher sehr zu begrüßen.