

Belastungsmessungen im Windschlepp

Von J. GEDEON, Technische Universität, Budapest

Vortrag über die Arbeiten von D. Györgyfalvy, am 7. Kongreß der OSTIV, Juni 1958, Leszno (Polen)

In den Nachkriegsjahren wurde bei den Segelflugzeugen der Schwerpunktschlepp eingeführt und immer mehr verbreitet. Der Schwerpunktschlepp ist – wie allgemein bekannt – ein sehr produktives Verfahren; er hat aber auch seine eigenen Probleme. Insbesondere muß man der Gefahr der Überbeanspruchung besondere Aufmerksamkeit widmen. Obgleich uns in der Fachliteratur mehrere ausgezeichnete Abhandlungen über dieses Thema bekannt sind, fanden wir darunter keine, die uns über den Einfluß sämtlicher Veränderlichen ein vollständiges, übersichtliches Bild geben konnte. Deshalb wurden am Lehrstuhl für Flugwissenschaften der Technischen Universität in Budapest bei Prof. Elemér Rácz dazu einige Flugversuche durchgeführt. Grundgedanke, Durchführung und Auswertung der Messungen stammen von Dipl.-Ing. Desiderius Györgyfalvy. Er arbeitet seit einiger Zeit nicht mehr bei uns, und so ist mir die Ehre zuteil geworden, Ihnen über diese Arbeit berichten zu dürfen. Ich werde dabei mein möglichstes tun, um ein korrekter Dolmetscher zu sein.

Während des Schleppfluges wirken auf das Flugzeug die Schwerkraft G , die Seilkraft K , der Auftrieb Y und der Widerstand X sowie der Auftrieb auf dem Höhensteuer Y_m . Beim Nasenschlepp hat die Seilkraft in bezug auf den Schwerpunkt einen ziemlich großen Hebelarm. Dieses Moment muß mit einem entsprechend großen negativen Auftrieb am Höhensteuer im Gleichgewicht gehalten werden, was einen beträchtlichen Höhenverlust bedeutet und unter gewissen Umständen die Leistungsfähigkeit des Höhensteuers überschreiten kann (Schaakeln). Beim Schwerpunktschlepp fällt dieser Leistungsverlust weg, daher die bessere Steiggeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit des Flugzeuges ist V , der Bahnneigungswinkel θ , die Steiggeschwindigkeit w .

Einige dieser Größen können unmittelbar gemessen werden, andere zweckmäßigerweise nur durch Umrechnen von direkt meßbaren Größen ermittelt werden. So kann man z. B. die Geschwindigkeit V aus dem dynamischen Druck erhalten. Für die Seilkraft kann ein Kraftmesser konstruiert werden. Die Schwerkraft und die Schwerpunktlage ändern sich nicht; sie können am Boden mit der Waage gemessen werden. Die Steiggeschwindigkeit w ist prinzipiell mit einem Variometer meßbar, doch ist die Genauigkeit des Verfahrens für diesen Zweck ungenügend. Es ist besser, mit einem Statoskop die Höhe des Flugzeuges zu messen und daraus mit numerischer oder graphischer Differenzierung die Steiggeschwindigkeit zu ermitteln. Der Bahnwinkel θ ist für die Zerlegung der Schwerkraft in Komponenten von Bedeutung. Da V und w bekannt sind, ist θ für jeden Bahnpunkt leicht zu berechnen.

Auch der Seilwinkel ist – wenn auch nur mit Annäherung – zu errechnen. Der Azimutwinkel β bildet eine gut brauchbare Hilfsgröße dazu. Die Bewegungsbahn des Flugzeuges kann durch graphische Integration ermittelt werden. Der Durchhang des Seiles ist dann annähernd berechenbar, und daraus kann der Seilwinkel bestimmt werden.

Der Auftrieb auf dem Höhensteuer wird unter den gegebenen Verhältnissen am besten aus dem Höhensteuerwinkel

und Staudruck berechnet. Um diese Rechnung ausführen zu können, ist auch eine statische Längsstabilitätsmessung erforderlich.

Unter den dynamischen Verhältnissen des Schleppfluges sind auch die Trägheitskräfte, insbesondere jene normal zur Bahntangente, zu berücksichtigen. Die Größe der normalen Trägheitskraft kann aus V und

$$\frac{d\theta}{d\tau}$$

die beide bekannt sind, punktweise ermittelt werden.

Aus diesen Gedankengängen kann für die Messungen folgendes Programm aufgestellt werden:

1. Die gleichzeitige Messung von Geschwindigkeit, Höhe, Seilkraft und Höhensteuerwinkel im Nasen- und im Schwerpunktschlepp.

2. Als Kontrolle einige Meßflüge im Nasen- und Schwerpunktschlepp, wobei Anstellwinkel, Geschwindigkeit und Höhe gemessen werden. Dazu ist noch der Anstellwinkel als Funktion der Geschwindigkeit im normalen Gleitflug zu ermitteln.

3. Eine statische Stabilitätsmessung. Die gemessenen Größen wurden durch ein optisches Meßgerät aufgezeichnet, das eigentlich zwei Meßelemente besaß, bei zweckmäßiger Schaltung aber vier Veränderliche registrieren könnte.

Beim ersten Meßelement wirkt auf die untere Membrandose der statische Druck in Statoskopschaltung, auf die obere Dose der Staudruck. Die zwei Membrandosen bewegen durch Hebel kleine Spiegel, die auf optischem Wege die Registrierung besorgen (Fig. 1).

Die Größe der Seilkraft und der Höhensteuerausschlag wurden durch Autosynmeßelemente übermittelt.

Beim Geber für Seilkraftmessung geht die Seilkraft durch eine Spiralfeder. Das Zusammendrücken wird mittels einer Spiralführung in Drehbewegung umgewandelt und vom Autosyngeber elektrisch weitergegeben (Fig. 2). Eine Auslösevorrichtung ist vor dem Seilkraftmesser eingebaut. Beim Nasenschlepp wurde dieser Dynamometer an die Auslösevorrichtung gehängt.

Beim Schwerpunktschlepp wird eine Schulterkupplung benutzt. Der Dynamometer wurde hier vor der Seilgabel eingeschaltet. Die Seilgabel wurde nicht abgeworfen, sondern in der Luft eingezogen.

Der Geber für den Höhensteuerwinkel wurde am Steuerknüppel befestigt und durch eine Kette betätigt (Fig. 3).

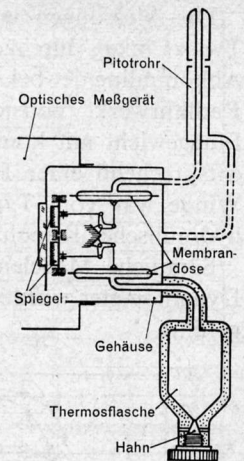


Fig. 1 Schema des Doppelmeßelements

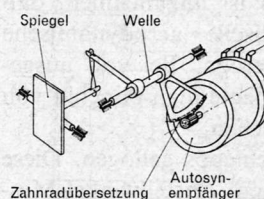


Fig. 2 Schema der Spiegelbewegung beim Autosynempfänger

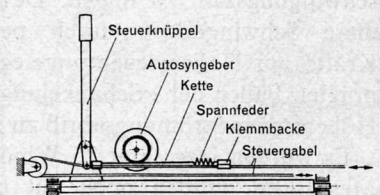


Fig. 3 Geber für Höhensteuerwinkel

Die Messungen wurden an einem Leistungssegler vom Typ «Cinke» durchgeführt. Dieses Flugzeug ist ein direkter Abkömmling der bekannten «Meise». Die Änderungen sind: Radfahrwerk, Vollsichthaube und Schulterkupplung. Das Fluggewicht mit kompletter Meßausrüstung betrug 307 kg, entsprechend einer Flächenbelastung von 20,5 kg/m². Die Winde war vom Typ «Herkules» mit 120-PS-Motor und hydraulischer Kupplung.

Sämtliche Meßelemente wurden sorgfältig geeicht. Beim Dynamometer wurde auch eine dynamische Eichung durchgeführt.

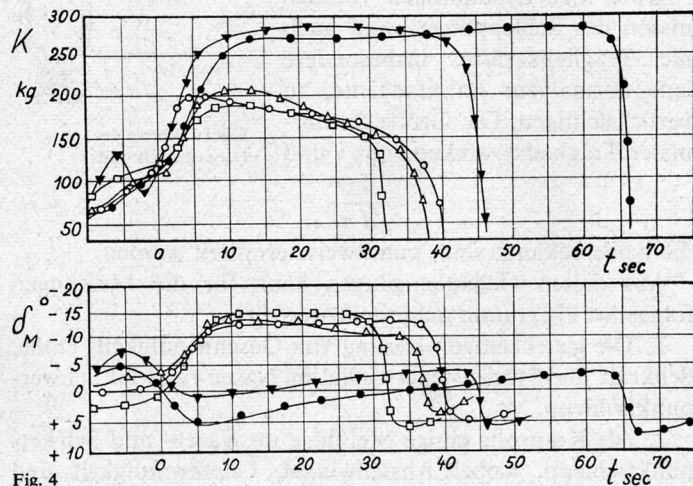


Fig. 4

Die Meßflüge wurden während des Sommers 1955 auf dem Flugplatz Esztergom geflogen. Bei jedem Flug wurde die Windgeschwindigkeit gemessen. Die Seillänge betrug ungefähr 1000 Meter.

Wenn das Flugzeug zu rollen beginnt, ist das Höhensteuer annähernd in Normallage. Die Seilkraft ist mäßig. Nun ist die Geschwindigkeit genügend, um das Flugzeug vom Boden abzuheben. Mit dem Höhensteuer wird ein wenig nachgedrückt; die Seilkraft wächst ziemlich steil an. Nun wird das Höhensteuer langsam angezogen; die Steiggeschwindigkeit wird größer. Während des eigentlichen Steigflugs vermindert sich die Seilkraft ein wenig; die Geschwindigkeit wächst dagegen langsam an. Diese letztere Erscheinung ist eher als ein Gewohnheitsfehler des Windenführers zu bezeichnen, als daß man sie korrekt nennen könnte. In diesem Falle ist der Fehler nicht bedeutend und verursacht weder unangenehme Fluglagen noch großen Höhenverlust. Am besten ist es, wenn die Geschwindigkeit während des ganzen Schleppflugs konstant ist.

Auffallend sind die starken Schwankungen bei der Kurve der Seilkraft. In kleinerem Maße sind diese Erscheinungen auch beim Staudruck zu beobachten. Da die Kurve des Höhensteuerwinkels schwingungsfrei verläuft, können wir die Möglichkeit einer Fehlanzeige außer acht lassen. Ebenso wenig gelingt es, im Flugzeug-Kraftmesser-Seilsystem ein rein mechanisches Schwingungsgebilde mit entsprechender Eigenschwingungszahl zu finden. Deshalb ist anzunehmen, daß diese Schwingungen durch periodische aerodynamische Kräfte am Höhensteuer angeregt werden. Bei voll ausgeprägten Fällen der «Schaukelung» pflegte man ohnehin von Höhensteuer-Strömungsabriß zu sprechen.

Es wurden insgesamt 75 Windenschlepps geflogen. Diese Messungen wurden noch mit einigen Anstellwinkel-Messungen sowie mit Messungen der statischen Längsstabilität und der Höhensteuer-Wirksamkeit ergänzt. Leider würde es

zu weit führen, alle Einzelheiten der ziemlich komplizierten Auswertung zu verfolgen; die wichtigsten Ergebnisse sind aber in Diagrammform zusammengestellt. Wenn in den Diagrammen scheinbar vereinzelter Auswertungskurven zu sehen sind, so handelt es sich immer um Mittelwerte einzelner Versuchsreihen, die unter gleichen Bedingungen am gleichen Tag gemessen wurden. Jede einzelne Kurve wiederzugeben wäre nicht nur unübersichtlich, sondern wegen der unvermeidlichen Streuung auch weniger genau.

In Fig. 4 ist die Seilkraft und der Höhensteuerausschlag als Funktion der Zeit zu sehen. Die mit vollen Punkten gezeichneten Linien sind Schwerpunktschlepps, die anderen Nasenschlepps. Beim Schwerpunktschlepp ist die Seilkraft etwa dem Fluggewicht gleich und bis zum Augenblick des Seilabwurfes gleichbleibend. Beim Nasenschlepp erreicht die größte Seilkraft nach dem Abheben nur etwa $\frac{2}{3}$ des Fluggewichtes und vermindert sich danach langsam, aber stetig. Die Lage des Höhensteuers im Nasen- und im Schwerpunktschlepp ist wie üblich.

Fig. 5 zeigt die durchschnittlichen Bahnkurven der Versuchsreihen. Die beiden oberen Kurven sind die Schwerpunktschleppflüge; die anderen wurden im Nasenschlepp geflogen. Die Azimutwinkel β sind ebenfalls eingezeichnet.

Fig. 6: Die Geschwindigkeiten während des Schleppfluges. Längsbeschleunigungen in m/s; Steiggeschwindigkeiten; Beschleunigungen normal zur Bahntangente.

In Fig. 7 sind die vier Kräfte dargestellt, die das Flugzeug in Bewegungsrichtung normal belasten. Es sind von oben nach unten: die Schwerkraftkomponente, die Seilkraftkomponente, der Auftrieb auf dem Höhensteuer und die Trägheitskraft. Die größte Belastung kommt von der Schwerkraft, obgleich beim Schwerpunktschlepp die Seilkraft fast ebenso groß sein kann. Der Anteil der übrigen Kräfte ist gering.

Der obere Teil von Fig. 8 zeigt den Auftriebskoeffizienten als Funktion des Azimutwinkels. Beim Nasenschlepp finden wir Werte zwischen 0,6 und 0,9; beim Schwerpunktschlepp kann er Werte zwischen 0,8 und 1,2 erreichen.

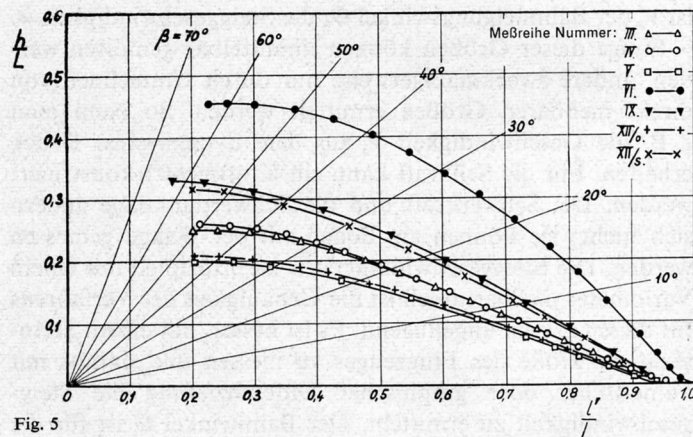


Fig. 5

In der Mitte sind die Lastvielfachen als Funktion des Azimutwinkels aufgetragen. Da hier die Beschleunigungskräfte vernachlässigbar klein sind, ist die Biegebeanspruchung des Flügels größer als bei einem Abfangen mit dem gleichen Lastvielfachen. Das untere Bild zeigt daher die gleichwertigen Lastvielfachen. Scheinbar sind auch diese nicht groß: im Nasenschlepp etwa $n_e = 1,7$, im Schwerpunktschlepp etwa $n_e = 2,3$. Der höchste gemessene Wert betrug 2,5. Wir müssen aber bedenken, daß es sich hier um ein dynamisches Kräftespiel handelt. Ungeübte Behandlung oder plötzliche

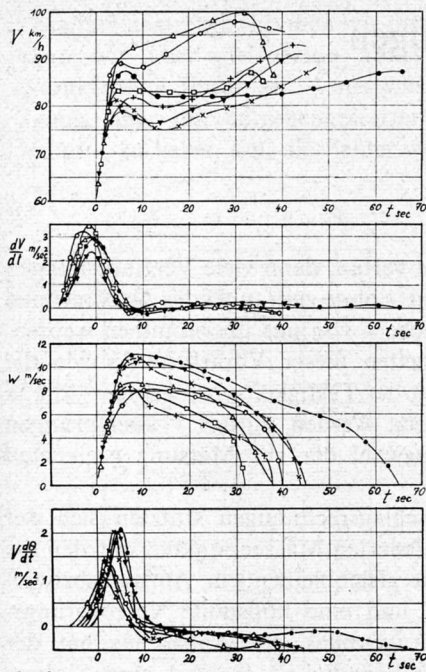


Fig. 6

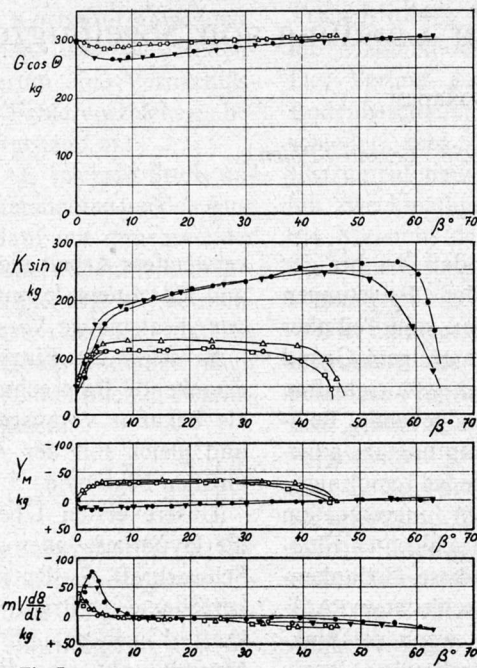


Fig. 7

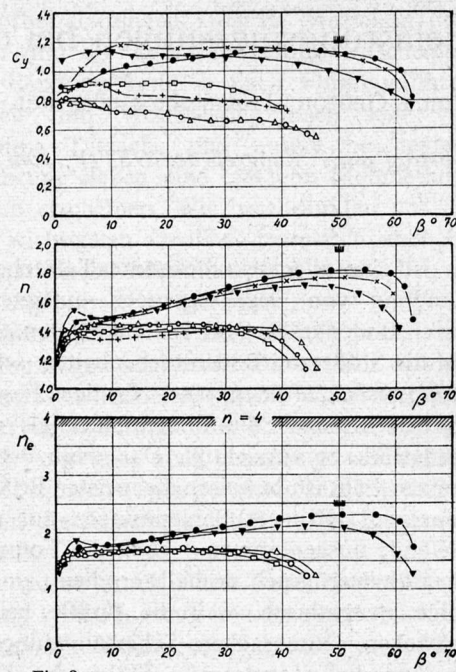


Fig. 8

Windstöße können noch erhebliche Mehrbelastungen verursachen. Deshalb scheint es geraten, beim Nasenschlepp mindestens ein sicheres Lastvielfaches von 3, beim Schwerpunktschlepp dagegen mindestens ein solches von 4 zu verlangen.

In Fig. 9 sind einige Daten für die Beanspruchung der Winde zu sehen. Die Seilgeschwindigkeit ist je nach Windstärke und anderen Umständen zwischen 80 und 20 Stundenkilometern zu variieren. Sie hat ihren Höchstwert gleich nach dem Abheben; dann nimmt die Seilgeschwindigkeit langsam ab. Beim Schwerpunktschlepp ist die Seilgeschwindigkeit etwas geringer als beim Nasenschlepp.

Die an der Welle der Seiltrommel erforderlichen Drehmomente sind beim Schwerpunktschlepp größer und fast bis zum Ende andauernd.

Der Leistungsbedarf des Schleppfluges ist verhältnismäßig gering. Man darf aber nicht vergessen, daß diese Leistungen manchmal bei niedrigen Drehzahlen abzugeben sind. In der Praxis ist daher eine nominelle Leistungsreserve von 60 bis 80 % sehr gut zu gebrauchen.

Die Drehzahlen der Seiltrommel erreichen ihren Höchstwert kurz nach dem Abheben.

Nachdem dem Flugzeug- und dem Windenkonstrukteur einige ihrer Fragen beantwortet worden sind, erlauben Sie noch einige Worte über die Flugzeugführung und die Zusammenarbeit des Piloten mit dem Windenführer. Der Zweck des Schleppfluges ist die Erreichung einer gewissen Höhe – je höher, desto besser. Man bemüht sich also, unter Einhaltung der Vorsichtsmaßregeln und ohne Überbeanspruchung des Fluggerätes die größtmögliche Höhe zu erreichen. In Diagramm 10 sind die erreichbaren Schlepphöhen als Funktion der Höhensteuerwinkel bei verschiedenen Wind- und Schleppgeschwindigkeiten aufgetragen. Betrachten wir zuerst die drei Gruppen rechts unten, also den Fall des Nasenschlepps. Die Lage der drei Kurvenscharen zeigt, daß die erreichbare Höhe mit der Windgeschwindigkeit wächst. Dies ist – im Nasen- wie im Schwerpunktschlepp – eine allgemein bekannte Tatsache und braucht hier nicht näher erörtert zu werden. Sehen wir nun, wie sich die erreichbare Höhe bei gegebener Geschwindigkeit mit dem Höhensteuerwinkel ändert. Es ergibt sich hier ein gut ausgeprägtes Maximum, dessen Lage bei größeren Geschwindigkeiten

nach dem kleineren Höhensteuerwinkel wandert. Dies bestätigt wiederum die praktische Erfahrung, daß beim Nasenschlepp der Steuerknüppel so stark zu ziehen ist, daß die Maschine eben noch nicht schaukelt. Interessant ist es, zu verfolgen, bei welcher Geschwindigkeit die größte Höhe zu erreichen ist. Bei Windstille ist der Einfluß der Geschwindigkeit gering; das Optimum liegt bei etwa $V = 85$ km/h. Bei 5 m/s Wind ist das Maximum schon leicht erkennbar; es liegt bei 80 km/h. Bei 10 m/s Wind ist 74 km/h die beste Geschwindigkeit. Dies ist sehr beruhigend für den Konstrukteur, denn die Gefahr der Überbeanspruchung wird damit sehr vermindert. Der alte Fuchs merkt sich nämlich sehr bald diese Tatsachen auch ohne Meßtabellen und instinktmäßig. Wenn die Schleppgeschwindigkeit zu groß ist, gibt er mit dem Seitenruder ein Zeichen, wenn nicht aus Vorsicht, dann um höher zu gelangen.

Im Schwerpunktschlepp ist die Sache etwas anders. Hier wächst die Höhe mit Höhensteuerwinkel und Schleppgeschwindigkeit monoton an, wenigstens bei praktisch verwirklichtbaren Werten. Die Beanspruchungen wachsen natürlich auch. Schwerpunktschlepp erfordert gerade deshalb noch mehr Disziplin.

Fig. 9

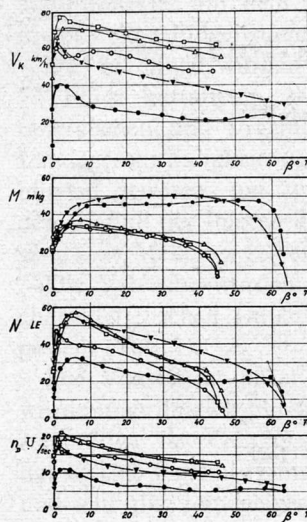


Fig. 10

