

Elektronische Entwicklung für den Leistungsseglflug

Ingo Westerboer

Vortrag auf dem 13. OSTIV-Kongress, Vršac, Jugoslawien (1972)

1. Elektronische Verfahren zur Totalenergie-Kompensation

1.1 Doppelvario-Prinzip

Dieses Prinzip hat E. Brückner [1] erstmals vorgeschlagen. Es ist im Metallsonden-Variometer VW 5KB verwirklicht worden (I. Westerboer [7]).

1.11 Theorie

In jedem Flugzeug stehen als Messinformation über den Flugzustand zwei Druck-Grössen zur Verfügung:

1. statischer Druck P_s ,
2. Gesamt-Druck $P_g = P_s + \frac{1}{2} \rho v^2$.

Die Änderungen beider Drücke werden gemäss Abb. 1 mit Hilfe zweier Variometer-Systeme gemessen:

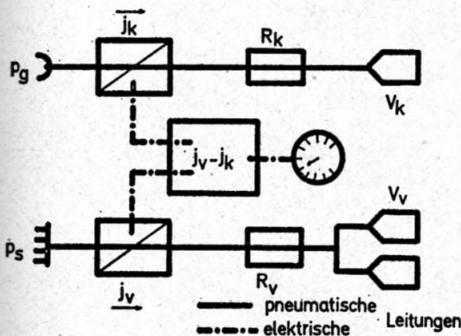


Abb. 1. Prinzip-Schaltung Doppelvario (Brückner, 1969).

Die Funktionsweise des Systems wird besonders leicht verständlich, wenn man es in idealisierten Flug-Zuständen untersucht.

a) Flug mit konstanter Bahngeschwindigkeit v durch ruhige Luft ($w_1 = 0$), d.h. stationärer Flugzustand. Aus der barometrischen Formel folgt

$$\frac{dP_s}{dh} = -\rho g. \quad (1)$$

Da v nach Voraussetzung konstant ist, gilt weiter

$$\frac{dP_g}{dh} \bigg|_v = \frac{dP_s}{dh} = -\rho g.$$

Zahlenbeispiel: für $\Delta h = -100$ m nimmt der statische Druck um $+11$ cm WS zu.

Die Druckänderungen dP_s und dP_g sind im stationären Flug gleich gross. Durch passende Flaschengrössen $V_k : V_v = 1:2$ wird

$$j_k = \frac{1}{2} j_v.$$

Als Differenz resultiert die Variometeranzeige

$$j_k - j_v \neq 0.$$

b) Flug unter Energieerhalt in ruhiger Luft

$$\frac{dP_g}{dh} \bigg|_E = \frac{dP_s}{dh} \bigg|_E + \frac{d}{dh} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \bigg|_E \quad (2)$$

$$\text{Energiesatz: } \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{const.}$$

$$\frac{dv^2}{dh} \bigg|_E = -2g$$

$$\frac{1}{2} \rho \frac{dv^2}{dh} \bigg|_E = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{d}{dh} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \bigg|_E =$$

$$\frac{1}{2} \rho \frac{dv^2}{dh} \bigg|_E + \frac{1}{2} v^2 \frac{d\rho}{dh} \quad (4)$$

Der zweite Teil ist wesentlich kleiner als der erste, nämlich nur 2% davon bei 200 km/h.

$$\frac{dP_g}{dh} \bigg|_E = \frac{dP_s}{dh} \bigg|_E + (-\rho g)$$

aus (2), (3), (4).

$$\frac{dP_g}{dh} \bigg|_E = -2\rho g = 2 \frac{dP_s}{dh} \bigg|_E \quad (5)$$

(T. Hanusz [2]).

In der Messschaltung wird bei $E = \text{const.}$

$$j_k = j_v$$

Dadurch wird die Variometeranzeige

$$j_k - j_v = 0. \quad (6)$$

c) Flug in ruhiger Luft mit Energieverlust.

Energieverlust (gemäss Fall a) wird angezeigt.

Energieaustausch (gemäss Fall b) wird unterdrückt.

Das Variometer zeigt stets das Sinken w_p laut Polare.

d) Flug in bewegter Luft ($w_1 \neq 0$)

Dem Polaren-Sinken addiert sich die Vertikalgeschwindigkeit w_1 .

Das Variometer zeigt stets $w_p + w_1$.

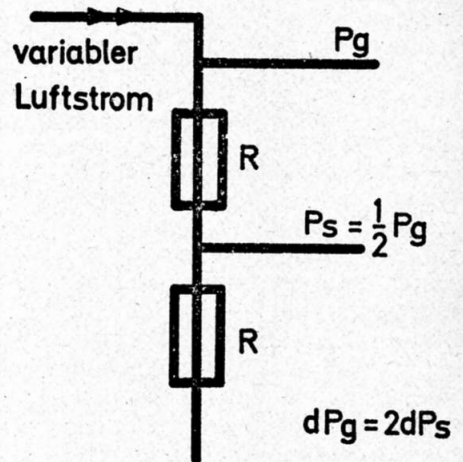
Ergebnisse

Ausreichende Erfahrungen wurden mit dem E-Vario-Modell VW 5 KB gesammelt. Die Praxis zeigt, dass die Schnelligkeit der beiden Variometer exakt übereinstimmen muss (Gene Moore [3]).

Die Strömungswiderstände R_v und R_k bilden mit den Flaschen die Zeitkonstanten $R_v \cdot V_v$ und $R_k \cdot V_k$.

Durch exaktes Einstellen von R_v u. R_k wird $R_v \cdot V_v = R_k \cdot V_k$ erreicht.

Dabei können kleine Fehler infolge unterschiedlicher Zeitkonstanten der beiden Sonden ausgeglichen werden. Der Abgleich erfolgt auf dem von Gene Moore vorgeschlagenen TEK-Messplatz:



(4) Abb. 2. TEK-Messplatz nach Gene Moore.

Ausser dem schon genannten Abgleich der Zeitkonstanten muss die Kompensationsstärke (Erfüllung von Gl. [6]) einjustiert werden. Das geschieht durch Feineinstellung der elektrischen Verstärkung des Variometers K. Die erreichte Kompensationsqualität erlaubt das Fliegen eines Loopings ohne Anzeige.

1.2 Elektronischer Differentiator

1.21 Theorie

Für Bordrechner-Funktionen, zum Beispiel für den Sollfahrtgeber, wird

ein dem Staudruck $\frac{1}{2} \rho v^2$ proportionales elektrisches Signal benötigt. Für die TE-Kompensation dagegen ist ein elektrisches Signal erforderlich, das der zeitlichen Änderung des Staudruckes proportional ist.

Die Prinzipschaltung (Abb. 3) zeigt die im Flugdatenrechner Pirol 17 verwirklichte Lösung (Brückner, Meisser, Westerboer 1970).

Das v^2 -Signal wird danach folgendermassen gewonnen: Der Strömungswiderstand R wird zwischen P_g und P_s geschaltet. Für den durch R fliessenden Luftstrom j_R gilt dann

$$j_R \cdot R = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Die Ueberführung von j_R in eine proportionale elektrische Spannung geschieht mit einer Metallsonde. Diese v^2 -Spannung liegt am Eingang des Differentiators; seine Ausgangsspannung ist dann der zeitlichen Änderung des Staudrucks proportional. Der Luftstrom j_v durch die zweite Metallsonde im Variometerteil ist in bekannter Weise der zeitlichen Änderung des statischen Druckes proportional. Die Variometer-Sonde liefert demnach eine elektrische Spannung

$$\text{proportional } \frac{dP_s}{dh}$$

Damit stehen für den Endverstärker die gleichen Eingangsgrößen wie beim Doppelvario-Prinzip zur Verfügung.

1.22 Ergebnisse

Die Kompensationsmethode mittels elektronischem Differentiator hat sich im Pirol 17 bewährt.

Wie im Falle des Doppelvario-Prinzips müssen die Zeitkonstanten der Kompensationsstrecke und der Variometerstrecke aufeinander abgestimmt werden. Im Pirol 17 wird das durch eine pneumatische Grund-Zeitkonstante in der Variometerstrecke und durch eine verstellbare elektronische Verzögerungsschaltung in der Kompensationsstrecke erreicht. Aufgrund der grösseren Schnelligkeit der elektrischen Variometer machen sich hier Abgleichfehler in der TE-Kompensation ungleich deutlicher bemerkbar als bei mechanischen Variometern. Das ist als Vorteil zu werten, da die Abgleich-Fehler beim E-Vario leichter erkannt und dadurch leichter behoben werden können.

2. Netto-Variometer

Unter diesem Begriff soll ein Vario verstanden werden, das nur die Vertikalgeschwindigkeit w_1 der Luft, jedoch nicht mehr das polare Sinken w_p anzeigt.

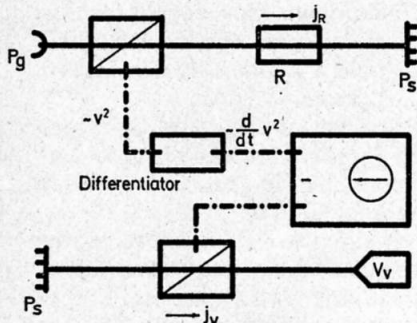


Abb. 3. TEK-Schaltung im Flugdatenrechner Pirol 17.

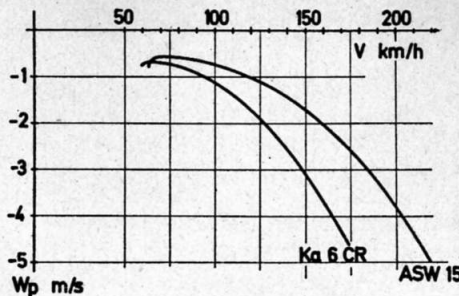


Abb. 4a. Polaren aufgetragen über v.

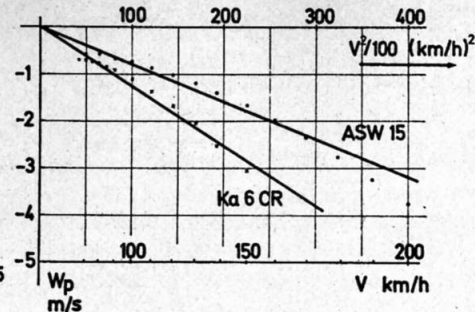


Abb. 4b. Streckung von Polaren durch Auftragen über v^2 .

2.1 Grundlagen

Praktisch alle bekannten Polaren lassen sich zu Geraden strecken, wenn man sie über v^2 statt wie üblich über v aufträgt.

Diese «Polaren-Geraden» gehen durch den Koordinaten-Ursprung.

An Bord steht der Differenzdruck $P_g - P_s = \frac{1}{2} \rho v^2$ zur Verfügung. Das ist

eine der Abszisse der Polaren-Geraden proportionale Grösse.

Dieser Druck wird verwendet, um den Luftstrom j_n durch einen Strömungswiderstand R_n zu treiben:

$$j_n \cdot R_n = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Dieser Luftstrom wird mit dem richtigen Vorzeichen zusätzlich zum Ausgleichsluftstrom j_v durch das Variometer geleitet.

Das Variometer zeigt nur noch die Differenz

$$j_v - j_n$$

an. Das Sinken w_p entsprechend der Polaren ist ausgeschaltet.

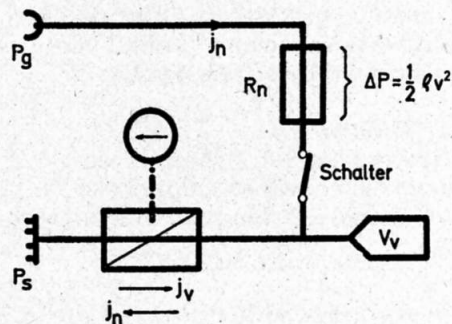


Abb. 5. Prinzipschaltung Netto-Variometer (Brückner 1972).

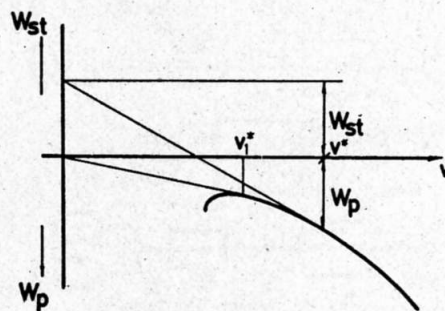


Abb. 6. Konstruktion zur Gewinnung der Sollfahrt v^* .

2.2 Konsequenzen für die Praxis

Das Netto-Vario bietet gegenüber dem herkömmlichen Vario eindeutige Vorteile im Stichflug. Das laufende Kopfrechnen, um aus der Vario-Anzeige durch Abziehen des Polaren-Sinkens $w_p(v)$ die Information über die Vertikalbewegung w_1 der durchflogenen Luftmassen zu erhalten, entfällt. Das Netto-Vario liefert diesen Wert w_1 direkt. Der Entscheid, wann bei positiven Vario-Anzeigen eingekurvt werden soll, ist weniger fehlerbehaftet. Das Fliegen nach dem Sollfahrtring ist ebenfalls vereinfacht, da die vom Vario-Zeiger angezeigte Sollfahrt sich beim Drücken oder Ziehen nicht ändert. Der McCready-Ring erhält für das Netto-Vario eine neue Teilung. Es muss vorausgesetzt werden, dass das Variometer korrekt kompensiert ist, entweder auf elektronischer Basis oder mit Hilfe der TEK-Düsen mit dem Beiwert 1. Im letzteren Fall steht in Abb. 5

statt P_s der Wert $P_s - \frac{1}{2} \rho v^2$, so dass

als Druckdifferenz an R_n der Druck $1 \cdot \rho v^2$ anliegt. In diesem Fall ist R_n also nur halb so gross zu wählen. Die System-Fehler infolge der Unterschiede zwischen den Polaren-Geraden und den wahren $w_p(v^2)$ -Funktionen fallen in der Praxis nicht ins Gewicht. Die Abweichungen liegen meist unter 10 cm/s. Besser sind die Polaren im Schnellflugbereich ohnehin nicht reproduzierbar. Wenn man die $w_p(v^2)$ -Funktion statt mit einer Geraden durch mehrere Geradenstücke annähert, werden die Abweichungen wesentlich kleiner (Abb. 4b). Diese Lösung ist mit Kapillaren pneumatisch nicht realisierbar. Sie wird jedoch in Flugdatenrechner Pirol 17 verwendet. Hier werden die Geraden-Stücke auf elektronischem Wege nachgebildet.

3. Ein neuer pneumatisch-elektrischer Sollfahrtgeber

Die optimale Stichfluggeschwindigkeit v^* hängt ab von den Polaren-Daten, vom Sinken w_1 der durchflogenen Luft und vom Steigen w_{st} im Aufwind. Der Sollfahrtgeber soll v^* in Abhängigkeit von den genannten drei Variablen berechnen und anzeigen. Bisherige Lösungen:

1. Lösung

Der bekannte Sollfahrt-Ring am Variometer nach McCready.

2. Lösung

Der Sollfahrtgeber der Firma Winter, bei dem zwei Zeiger, nämlich der Variozeiger und der Fahrtmesserzeiger, «auf Deckung» gehalten werden müssen.

Ein Nachteil beider Geräte ist das Abwandern des Variozeigers bei Fahrtänderungen. Dieser Nachteil kann durch Anwenden des Netto-Variometer-Prinzips vermieden werden.

3. Lösung

Der Sollfahrtgeber im Flugdatenrechner Pirol 17; auch hier wird die Sollfahrt v^* als Funktion der genannten drei Einflussgrößen berechnet. Hinzu kommt als weitere Vereinfachung, dass dieser Sollwert v^* mit dem tatsächlich geflogenen Istwert v verglichen wird und nur die Abweichung $(v^* - v)$ zur Anzeige gebracht wird. Der Pilot hat hierbei nur noch den Zeiger des Sollfahrtgebers auf Null zu halten. Zusätzlich wird der Ton nahe Null aus-

getastet, während Abweichungen in Richtung zu schnell oder zu langsam durch unterschiedliche Tonsignale akustisch angezeigt werden. Die im Pirol 17 verwendete elektronische Lösung ist naturgemäss aufwendig. Sie vereinfacht aber das Einhalten der Sollfahrt ganz erheblich und führt dadurch zu einer merklichen Leistungssteigerung.

Der neue pneumatisch-elektrische Sollfahrtgeber von Brückner und Westerboer verlangt, wie sich zeigen wird, weit weniger Aufwand als der rein elektronische im Pirol 17.

3.1 Grundlagen

Die bekannte Tangenten-Konstruktion (Abb. 6) von den Ordinatenpunkten (=mittleres Steigen w_{st}) an die Polare liefert die Sollfahrt v^* und die zugehörige Summe $(w_{st} + w_p)$. Das sind die Wertepaare $(v^*, [w_{st} + w_p])$ der McCready-Funktion (Abb. 7a). Aus der so gewonnenen McCready-Funktion wurde bisher die Teilung des McCready-Ringes abgenommen. Trägt man die McCready-Funktion über v^2 auf, so wird die Funktion bei praktisch allen Polen mit guter Näherung zur «McCready-Gerade» gestreckt (Abb. 7b). Diese Geraden gehen naturgemäss nicht durch Null, sondern sie schneiden die v^2 -Achse bei der Kurbelgeschwindigkeit v_0^2 . Als Beispiele dienen wieder McCready-Funktionen der Ka 6CR und der ASW 15 (Abb. 8a und b).

Wir setzen jetzt an der gleichen Stelle wie beim Netto-Variometer einen

passend bemessenen Strömungswiderstand R_s ein (Abb. 9).

Jetzt fliesst wieder ein dem Vario-Luftstrom j_v entgegengerichteter Strom j_s durch das Variometer. Er ist proportional zu v^2 :

$$j_s \cdot R_s = \frac{1}{2} \rho v^2.$$

Dort jedoch, wo die McCready-Gerade durch Null gehen sollte, fliesst bereits der Luftstrom $j_{so} = \frac{1}{2} \rho v_0^2 / R_s$ (Abb. 10).

Dieser Systemfehler kann, insbesondere bei elektrischen Variometern, ohne viel Aufwand durch Absenken des Nullpunktes um j_{so} korrigiert werden. In Abb. 10 ist zusätzlich zu der McCready-Geraden noch die Polaren-Gerade eingetragen.

Im folgenden soll gezeigt werden, dass die beschriebene Anordnung tatsächlich als besonders simpler Sollfahrtgeber funktioniert. Man fliegt genau dann mit der Sollfahrt v^* , wenn am Variometer die Anzeige Null steht; das ist der Fall, wenn die Funktionswerte der McCready-Geraden und der Polaren-Geraden gleich gross sind: $j_v = j_s$!

Für den Sonderfall des Fluges in ruhiger Luft ($w_1 = 0$) und ohne Aufwinderwartung ($w_{st} = 0$) ist das sofort zu übersehen. In diesem Fall stimmen genau bei der Geschwindigkeit v_1^* des besten Gleitwinkels der Polaren-Wert und der McCready-Funktionswert überein. Die entsprechenden Ströme j_s und j_v durch das Variometer heben sich auf (siehe Abb. 6 und Abb. 7).

Der Fall absinkender Luft wirkt sich bei der Tangentenkonstruktion durch die um w_1 nach unten versetzte Polare aus. Genauso gut kann der Tangenten-Ausgangspunkt um w_1 auf der Ordinate nach oben verschoben werden. Beides führt zu derselben höheren Sollfahrt $v^* > v_1^*$. Sie ist dann erreicht, wenn sich die Ströme j_s (McCready-Funktionswert) und j_v (entsprechend $w_p + w_1$) die Waage halten, das Variometer also wieder auf Null steht. Eine Anzeige am Variometer unter Null erfordert Nachdrücken, eine Anzeige über Null ziehen.

Der McCready-Theorie entsprechend führt eine um w_1 absinkende Luftmasse auf dieselbe Sollfahrt wie ein gleich grosses, erwartetes Steigen w_{st} . Bei der Tangenten-Konstruktion sind w_1 und w_{st} austauschbar. Ein Unterschied tritt nur beim praktischen Flug nach dem McCready-Ring auf: das Sinken w_1 wird vom Variometer mit angezeigt, das erwartete Steigen naturgemäss nicht. Statt dessen wird die Ring-Nullmarke um w_{st} nach oben verstellt.

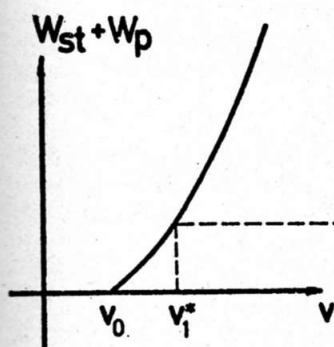


Abb. 7a. McCready-Funktion ($w_{st} + w_p$) über v .

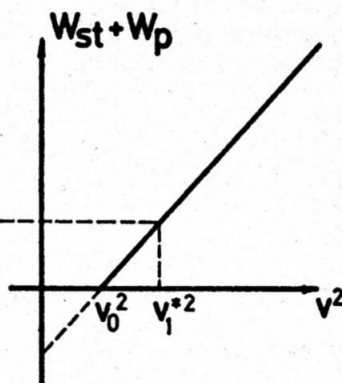


Abb. 7b. McCready-Funktion gestreckt durch Auftragen über v^2 .

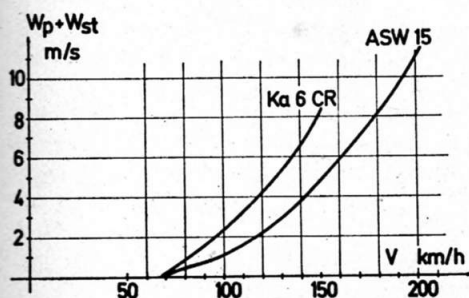


Abb. 8a. McCready-Funktionen aufgetragen über v .

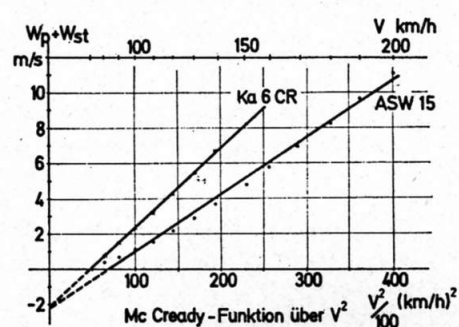


Abb. 8b. McCready-Funktionen gestreckt durch Auftragen über v^2 .

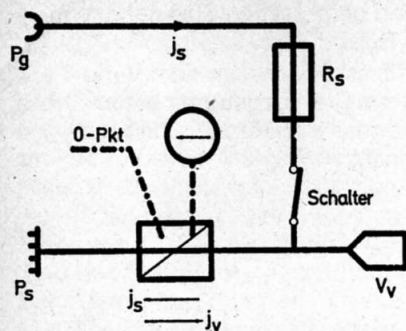


Abb. 9. Pneumatisch-elektrischer Sollfahrtgeber Brückner und Westerboer 1972.

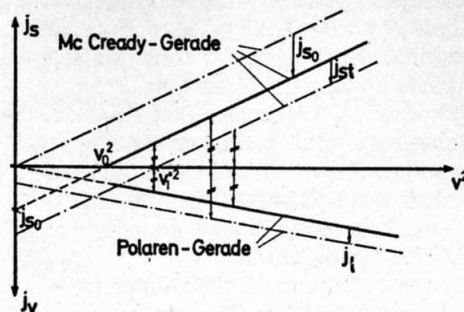


Abb. 10. Zur Funktionsweise des elektro-pneumatischen Sollfahrtgebers nach Brückner und Westerboer.

Dieses Verfahren muss sinngemäss auf den zur Diskussion stehenden Sollfahrtgeber übertragen werden.

Das Verdrehen der Ring-Nullmarke wird ersetzt durch eine zusätzliche Nullpunkt-Verschiebung der Mc-Cready-Geraden um j_{st} entsprechend w_{st} (Abb. 10).

Man erkennt an Abb. 10 die Austauschbarkeit des Einflusses eines zusätzlichen Sinkens w_1 der durchflogenen Luft bzw. eines erwarteten mittleren Steigens w_{st} : Verschiebungen der McCready-Geraden nach unten bzw. der Polaren-Geraden nach unten um jeweils gleiche Beträge führen auf dieselbe Sollfahrt.

Ergebnisse

Vergleichsflüge zwischen dem neuen Sollfahrtgeber mit 0-Signal und den Sollfahrtgebern in Form des herkömmlichen McCready-Ringes fallen regelmässig zugunsten der Neukonstruktion aus. Folgende Gründe werden genannt:

Das Einhalten der 0-Stellung des Sollfahrtgeber-Zeigers ist leichter und

genauer durchführbar als beim herkömmlichen McCready-Verfahren, bei dem stets abwechselnd das Variometer und der Fahrtmesser beobachtet werden müssen.

Das Kommando eines Sollfahrtgebers auf der Basis elektrischer Variometer kommt deutlich schneller als die Ring-Anzeige des Stauscheiben-Variometers. Je schneller unsere Flugzeuge werden, um so wichtiger ist dieser Gesichtspunkt.

Das Kommando des elektrisch arbeitenden Sollfahrtgebers kann zusätzlich akustisch gegeben werden. Der Pilot hat damit auch beim Sollfahrt-Flug den Blick frei.

Der neue Sollfahrtgeber ist als eine abschaltbare Zusatzeinrichtung zum Variometer anzusehen. Voraussetzung für das ordnungsgemässe Arbeiten ist die exakte Kompensation des zugrunde liegenden Variometers. Erst die in jüngster Zeit erzielten Fortschritte der verschiedenen Kompensationsverfahren machten den sinnvollen Einsatz der schnellen, elektronisch arbeitenden Sollfahrtgeber möglich.

Zusammenfassung

Zwei elektronisch arbeitende Verfahren zur Totalenergie-Kompensation des Variometers werden in ihrer Wirkungsweise beschrieben. Die praktischen Probleme des Zeitkonstanten-Abgleichs in der Variometer- und der Kompensationsstrecke und des Ausgleichs von Druckabnahmefehlern werden besprochen.

Unter dem Begriff Netto-Variometer wird eine Zusatzschaltung zum herkömmlichen Variometer beschrieben. Dadurch wird das Polaren-Sinken des Flugzeugs unterdrückt und nur noch die Vertikalbewegung der durchflogenen Luftmasse angezeigt.

Die bekannten Sollfahrtgeber-Systeme werden hinsichtlich ihrer Wirkungsweise verglichen. Ein einfaches Zusatzgerät zu elektrischen Variometern ermöglicht die Umschaltung zu einem neuen Sollfahrtgeber, der gegenüber dem Sollfahrtflug nach dem McCready-Ring das Einhalten der Sollfahrt vereinfacht. Voraussetzung dafür ist die korrekte Totalenergie-Kompensation des Variometers.

Literaturverzeichnis

1. Egon Brückner, Deutsches Bundespatent Nr. 1 945 956/1969.
2. Thadeusz Hanusz, Schweizer Aero Revue 6 (1970).
3. Gene Moore, Proceedings of Symposia on Competitive Soaring (1969 und 1970).
4. Claudio Meisser, Ingo Westerboer, Schweizer Aero Revue 4 (1971).
5. Paul McCready jr.; in Ann & Lorne Welch, und F. G. Irving, The Soaring Pilot (London 1955).
6. Egon Brückner, Luftsport 2 (1973).
7. Ingo Westerboer, Luftsport 6 (1970).