

# Entwicklung eines elektronischen Variosystems mit Drucksonden

Claudio Meisser

Vortrag auf dem 15. OSTIV-Kongress in Rääskälä, Finnland (1976).

## 1. Einführung

Die elektronischen Variometer haben im vergangenen Jahrzehnt vermehrt an Bedeutung gewonnen, da sie gegenüber mechanischen Varios eine einfache Weiterverarbeitung der Vertikalgeschwindigkeit erlauben (Audio, Nettovariometer, Sollfahrtgeber), im allgemeinen mit geringerer Verzögerung realisierbar sind und neue Prinzipien zur Totalenergiekompensation zulassen. Die konventionellen Elektrovarios lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- Der Ausgleichsluftstrom zwischen statischem Druck und Ausgleichgefäß wird mit zwei beheizten Temperaturfühlern gemessen. Als solche kommen Platinwiderstände, NTC-Widerstände und Metallsonden in Frage.
- Elektronisch abgetastete Dosen- und Stauscheibenvariometer. Die durch den Ausgleichsluftstrom bedingte Membranauslenkung wird kapazitiv oder induktiv gemessen.

Beide Gruppen arbeiten also nach dem bekannten Durchflussprinzip und die für jedes Variometer charakteristische Differenzierung wird pneumatisch realisiert. Das Drucksondenvariometer arbeitet hingegen mit einer elektronischen Differenzierung des statischen Druckes.

## 2. Eigenschaften elektronischer Tiefpassglieder

Tiefpasseigenschaften sind für jedes Variometer von grundlegender Bedeutung, da der unverzögerten Anzeige der Vertikalgeschwindigkeit, erfolge sie optisch oder akustisch, keine Bedeutung zukommt. Selbst das Ausgangssignal einer idealen Variosonde (kein Rauschen, kein TEK-Fehler) muss verzögert werden, um dem Segelflieger optimale Informationen zu liefern. Tiefpasseigenschaften sind aber vor allem bei der Totalenergiekompensation zu berücksichtigen. Das zeitliche Verhalten des Variosignals und des differenzierten Staudrucks muss genau übereinstimmen.

Der einfachste pneumatische Tiefpass besteht aus einem Volumen  $C_p$  und einer seriegelagerten Kapillare  $R_p$ , der entsprechende elektronische Tiefpass aus der Kapazität  $C_e$  und dem Widerstand  $R_e$ . Beide werden durch die Zeitkonstante  $T_p = C_p \cdot R_p$  und  $T_e = C_e \cdot R_e$  genau beschrieben, da sich das Ausgangssignal nach Formel (1) verhält.

$$U_a = U_e \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

$$\text{für } t = T \rightarrow U_a = 1 - \frac{1}{e} = 0,63 U_e(1)$$

im Laplacebereich:

$$U_a(p) = U_e \frac{1}{1 + pT}$$

Jedes reale Variosystem besteht nicht nur aus einem RC-Glied, sondern aus einer Anzahl seriegelageter RC-Glieder. So kann beispielsweise ein einfaches Elektrovario, basierend auf der Abkühlung beheizter Thermistoren, nach folgender Abbildung aufgegliedert werden.

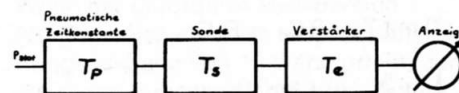


Abb. 1

Die pneumatische Zeitkonstante ergibt sich aus der Summe der pneumatischen Zuleitungswiderstände  $R_p$  (inkl. zusätzliche Kapillaren) und dem Ausgleichsvolumen  $C_p$ . Auch dies ist bereits eine Vereinfachung, die nur unter Vernachlässigung des Zuleitungsvolumens gültig ist. Korrekt müsste man die pneumatische Zuleitung durch eine Serieschaltung unendlich vieler RC-Glieder ersetzen. Ihre Zeitkonstante ist gegenüber  $T_p$  allerdings so klein, dass die Beschreibung mit einem RC-Glied ausreicht. Es folgt ein weiterer Block mit der Zeitkonstante  $T_s$ , gegeben durch die Trägheit der Variosonde, die sich bei thermischen Elektrovarios zwischen 0,5 und 1 sek. bewegt. Üblicherweise erfolgt eine weitere Verzögerung durch die elektrische Verstärkung, sowie, was in Abb. 1 unberücksichtigt blieb, eine Dämpfung durch die elektro-mechanische Anzeige.

Das Verhalten einer solchen Kette wird

im wesentlichen durch das grösste RC-Glied bestimmt, aber durch RC-Glieder mit ähnlicher Zeitkonstante stark beeinflusst. Die Zusammenstellung in Abb. 2 stellt die Sprungantworten für ein, zwei und drei seriegelagete RC-Glieder dar. Unter Sprungantwort versteht man das Ausgangssignal einer Anordnung bei plötzlicher Änderung des Eingangssignals (z. B. von 0 auf einen konstanten Wert A).  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  wurden dabei so gewählt, dass alle Kurven für  $t = 1$  sek. durch den 50%-Wert laufen.

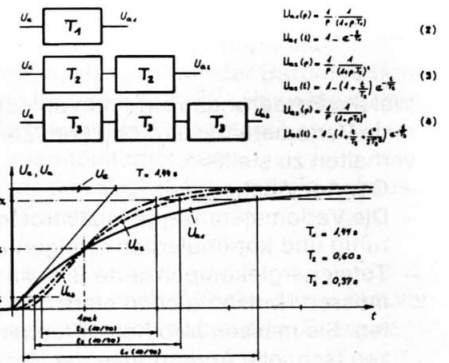


Abb. 2

In der gleichen Darstellung sind auch die entsprechenden Laplacegleichungen aufgeführt worden. Der Laplaceoperator wird mit  $p = j\omega$  definiert. Aus der Abb. 2 lässt sich klar erkennen, dass die Zeitkonstante  $T_1$  lediglich das Verhalten der Kurve  $U_{a1}$  definiert, nicht aber die beiden ändern. Eine wesentlich bessere Definition für das zeitliche Verhalten von Variometern ist die Anstiegszeit. Mit ihr wird jene Zeit angegeben, die ein Variometer braucht, um vom 10%-Wert auf den 90%-Wert anzusteigen. z. B. 10% nach 0,3 sek. - 90% nach 2,3 sek. Anstiegszeit<sub>10/90</sub> = 2 sek.

Die Vertikalgeschwindigkeit wird sich natürlich nie sprunghaft ändern. Doch sind auch bei kleinen Beschleunigungen die Eingangsfunktionen bereits so steil, dass die Annahme des mathematisch einfachen zu behandelnden Sprungs (im Laplacebereich  $1/p$ ) die Wirklichkeit sehr genau trifft. Zur mathematischen Behandlung würde sich als Vertikalgeschwindigkeit die Sprungantwort dreier RC-Glieder mit  $T_3 = 0,1$  sek. eignen. Die Serieschaltung von RC-Gliedern ist natürlich nur eine Möglichkeit, kürzere Anstiegszeiten zu erzielen, dies kann z. B. auch mit aktiven Filtern erfolgen. Sie haben allerdings den Nachteil, leicht zu überschwingen (Butterworth- und Tschebyscheff-Tiefpass), was für unsere Anwendung sehr negativ ist. Tiefpässe können generell also auch mit Frequenzgangkurven definiert werden.

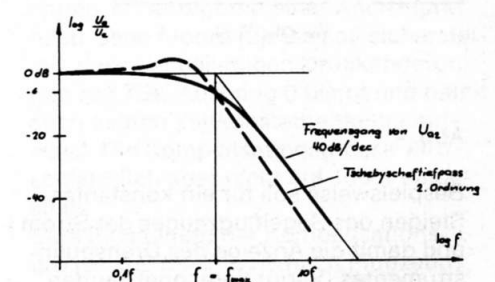


Abb. 3

Der Zusammenhang zwischen Grenzfrequenz  $f_{max}$  (Dämpfung um 3 dB) und der Zeitkonstante T kann für n seriegelagete RC-Glieder einfach angegeben werden.

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi T \sqrt{n}} \quad (5)$$

Welche Forderungen sind nun an optimale Variometer bezüglich ihrem Zeitverhalten zu stellen?

- Geringe Anstiegszeit.
- Die Variometeranzeige muss trotzdem ruhig und kontinuierlich erfolgen.
- Totalenergiekompensierte Systeme müssen Horizontalböen stark dämpfen. Sie müssen also hohe Frequenzen (schnelle Änderungen der Horizontalgeschwindigkeit) ausfiltern.

Aus diesen Forderungen folgt, dass gute Varios nicht nur mit einem bestimmten RC-Glied beschaltet werden, da solche Varios nervös sind und trotzdem eine sehr lange Zeit vergeht, bis sie 90% der Vertikalgeschwindigkeit anzeigen. Ein TEK-Variometer mit der Sprungantwort  $U_{a3}$  (Abb. 2) erfüllt die gestellten Forderungen wesentlich besser. In Wirklichkeit ist es schwierig, die optimale Anstiegszeit eines Tiefpasses festzulegen, da sie vom Piloten, von der Druckabnahme und von den meteorologischen Bedingungen abhängt. Die Erfahrungen mit 3 seriegelagerten RC-Gliedern, wobei  $T_3 = 0,5$  sek. beträgt, sind sehr positiv.

### 3. Das Drucksondenvario

Das Drucksondenvario lässt sich am einfachsten mit dem elektronisch abgetasteten Höhenmesser (Drucksonde) erklären. Die Linearbewegung der Höhenmessermembran wird z. B. mit einem reibungslosen, hoch-auflösenden Potentiometer in einen entsprechenden Widerstand umgeformt. In Verbindung mit der Batteriespannung  $U_B$  steht nun eine Gleichspannung zur Verfügung, die sich proportional zum statischen Druck verhält.

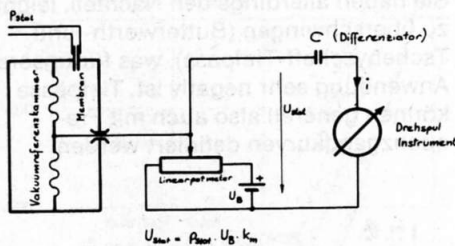


Abb. 4

Bspieelsweise soll für ein konstantes Steigen des Segelflugzeuges der Strom  $i$  und damit die Anzeige des Drehspulinstrumentes (Vario) berechnet werden.

$$U_{\text{stat}}(t) = k t \quad \frac{dU_{\text{stat}}}{dt} = k$$

mit  $i dt = Q = C U$  gilt bei vernachlässigbarem Innenwiderstand des Potmeters:

$$i = C \frac{dU_{\text{stat}}}{dt} = Ck \quad (6)$$

mit  $k = I \frac{mV}{s}$  (bei geeigneten Drucksonden üblich)

und  $C = 10 \mu F$  folgt für  $i = 10^{-8}$  A.

Ohne Verstärkung kann natürlich dieser geringe Strom (10 nA) auf einem Drehspulinstrument nicht angezeigt werden. Die folgende Schaltung mit einem Operationsverstärker (integrierte Schaltung mit analogem Verstärker) soll zwei Aufgaben erfüllen: Differenzierung und Verstärkung.

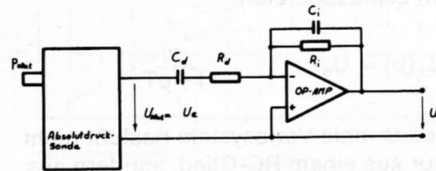


Abb. 5

Die Übertragungsfunktion dieser Schaltung lässt sich mit (7) beschreiben.

$$U_a = -U_e R_d C_d \frac{p}{(1 + Tp)} \quad (7)$$

(7) mit  $T = R_i C_d = R_d C_i$

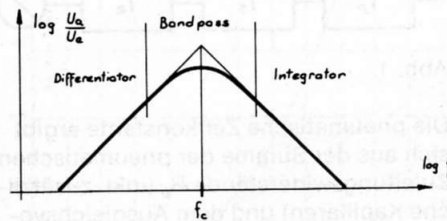


Abb. 6

Aus dem Bodediagramm (Abb. 6) erkennt man sofort, dass die gegebene Schaltung im unteren Frequenzbereich differenziert, oberhalb  $f_c$  aber integriert. Wie die folgende Herleitung zeigt, erhalten wir für eine rampenartige Funktion am Eingang, was einer sprunghaften Änderung der Vertikalgeschwindigkeit entspricht, ein Ausgangssignal, das gleich wie  $U_{a2}$  verläuft (Formel 3) und somit bereits die Forderung des 2. Kapitels erfüllt.

$$\left. \begin{aligned} t < 0 \quad \frac{dp_{\text{stat}}}{dt} &= 0 \\ t > 0 \quad \frac{dp_{\text{stat}}}{dt} &= k \end{aligned} \right\} \text{Darstellung der Rampe im Laplacebereich mit } 1/p^2 \quad (8)$$

Mit (7) und (8) folgt:

$$U_a = \frac{1}{p^2} R_d C_d \frac{p}{(1 + Tp)^2} \quad T = R_i C_d = R_d C_i$$

$$= \frac{1}{p} R_d C_d \frac{1}{(1 + Tp)^2} \quad (9)$$

Dies entspricht genau der Sprungantwort zweier seriegelageter RC-Glieder. Der Faktor  $R_d C_d$  entspricht der Verstärkung des Differenziators und kann mit normalen Operationsverstärkern bis 100 ausgelegt werden.

Zusammenfassend weist das Drucksondenvario beachtenswerte Unterschiede zu konventionellen Systemen auf.

**Pneumatisch:** Das Drucksondenvario besitzt kein Ausgleichgefäß. Das mit dem statischen Druck beaufschlagte Messkammervolumen kann beliebig klein gehalten werden ( $< 1 \text{ cm}^3$ ). Lediglich das Zuleitungsvolumen ergibt einen minimalen Ausgleichluftstrom. Im Vergleich zum herkömmlichen Vario mit  $250 \text{ cm}^3$  Ausgleichvolumen beträgt er etwa 3% bei einer Schlauchlänge von ca. 0,5 m. Der störende Druckabfall über der Zuleitung und Druckentnahmestelle und die daraus resultierende pneumatische Verzögerung entfällt. Zudem wird das Eindringen von Staub und Wasserpartikeln stark reduziert. Diese Vorteile kommen allerdings erst bei der Totalenergiekompensation zum Tragen.

**Elektrisch:** Ausser dem Variometersignal steht auch ein dem statischen Druck proportionales Signal zur Verfügung, was für verschiedene Funktionen eines Variosystems sehr nützlich sein kann. Die Nullpunktstabilität ist bedeutend besser, da Nullpunktabweichungen des Umformers (Drucksonde) durch die elektronische Differenzierung unterdrückt werden. Ein Nullpunktfehler macht sich nur während der momentanen Driftperiode bemerkbar. Mit der allgemein gültigen Annahme, dass die Grundfrequenz der Drucksonde wesentlich über der wünschbaren Grenzfrequenz der Anzeige liegt, wird das zeitliche Verhalten des Variometers nur durch den elektronischen Tiefpass bestimmt. Mit eng tolerierten Bauteilen (Widerstände und Kondensatoren) ist es möglich, dieses Verhalten genau zu reproduzieren. Die Abhängigkeit der Varioanzeige mit der Höhe ist durch die Barometerformel genau definiert. Sie verläuft mit der Luftdichte  $\rho$ . Temperaturfehler sind vom Prinzip her nicht zu erwarten.

## 4. Drucksonden

### 4.1 Verschiedene Drucksondentypen

Das Angebot an käuflichen Drucksonden ist kaum überblickbar und sehr umfangreich. Verschiedene Technologien würden sich vom technischen Gesichtspunkt für unsere Anwendung eignen, insbesondere hochauflösende Transducers auf dem Vibrationsprinzip ( $f-p$ ) sowie verschiedene grossflächige Membrantransducers. Allerdings kommen sie infolge des hohen Preises kaum in Frage.

Im Variosystem LX 1600 werden integrierte, piezoresistive Drucksonden von National Semiconductor verwendet.

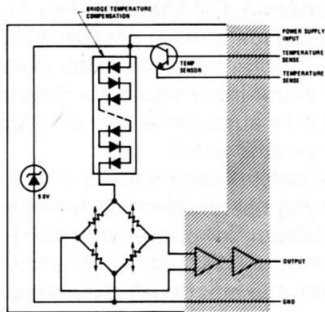
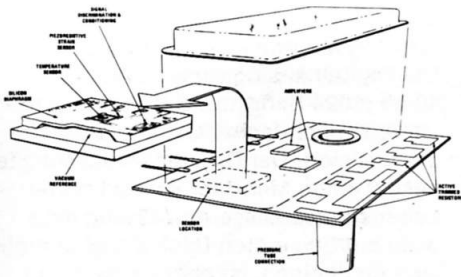


Abb. 7

In einer Siliziummembran von 25  $\mu\text{m}$  Dicke werden 4 piezoresistive Widerstände eindiffundiert. Die Auslenkung der Membran wird von 2 dieser 4 Widerstände in Brückenordnung erfasst und mittels zweier Operationsverstärker aufbereitet. Nullpunkt und Verstärkung werden bei jeder Sonde einzeln im Laufe der Produktion mittels Laser abgeglichen. Absolut- und Differenzdrucksonden sind für verschiedenste Druckbereiche erhältlich. Sie beanspruchen kaum mehr als 3  $\text{cm}^3$  Platz. Besondere Beachtung ist dem elektrischen Rauschen zu schenken, das für schnelle Variometer eine gegebene Limite nicht überschreiten darf. Die entsprechenden Anforderungen werden unter 4.2 zusammengestellt. Im weiteren ist es mit diesem Sondentyp nicht möglich, eine Staudruckmessung ohne weitere Hilfsmittel drifffrei zu realisieren. Eine weitere Möglichkeit stellen induktiv abgetastete Membrantransducers nach Abb. 8 dar.

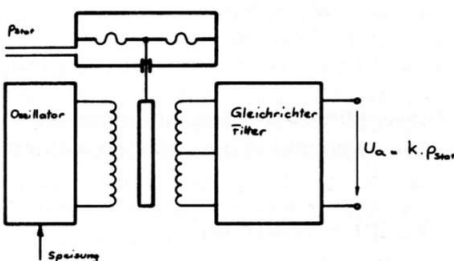


Abb. 8

Die Auslenkung der Membran wird durch den Differentialtransformator in ein elektrisches Signal umgeformt und ergibt nach erfolgter Gleichrichtung eine stabile Sonde mit geringem Rauschen. Sie benötigt etwas mehr Bauvolumen und ist nicht integrierbar.

#### 4.2 Anforderungen an die Drucksonden Messbereich:

Für ein auf allen Höhen funktionsfähiges Variometer wird eine Absolutdrucksonde mit dem Bereichsumfang von 0–10<sup>5</sup> Pa benötigt.

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}$$

(10<sup>5</sup> Pa = ca. 1 atm oder 10 000 mmWS)

Zur Staudruckmessung wird eine Differenzdrucksonde mit dem Bereichsumfang von 0–2750 Pa benötigt, entsprechend einer Horizontalgeschwindigkeit von 0–ca. 250 km/h. Der Pilot-Druck kann allerdings auch mit einer zweiten Absolutdrucksonde (gleicher Messbereich wie oben) erfasst werden.

**Auflösung:** Für eine gewünschte Auflösung von 0,1 m lässt sich mit der Barometerformel die entsprechende Druckauflösung bestimmen.

$$|dp| = -\rho g |dh| = 1 \text{ Pa}$$

Wenn der geforderte Messbereich (10<sup>5</sup> Pa) beispielsweise einem Spannungsausgang von 10 V entspricht, darf die durch Rauschen und Drift momentan verursachte Spannungsänderung nicht grösser als 0,1 mV sein. Ungefilterte Sondausgänge werden diese Forderungen nie erreichen. Wichtig ist nur, dass nach Beschaltung mit dem gewählten Tiefpass die Rauschspannung unter diesem Wert bleibt. Dies läuft natürlich parallel mit der Beschränkung der Sondagrenzfrequenz (oft mehr als 100 Hz) auf 0,25 Hz.

**Grenzfrequenz:** Für eine einwandfreie TEK sollte die Sonde ungefiltert eine Grenzfrequenz von 5 Hz aufweisen. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, müssen die RC-Glieder des Differenziators auf das zeitliche Verhalten abgestimmt werden, sofern auf eine einwandfreie TEK Wert gelegt wird.

**Linearität:** Die Nichtlinearität der Sondausgänge wird insbesondere die Kompensationseigenschaften in Funktion der Höhe verändern (Kompensationsgrösse). Zudem garantiert die ideale Linearität die Dichte-Abhängigkeit des Variosignals und der Staudruckmessung. Die Linearität wird bei den genannten Sondentypen mit 1% vom Endwert spezifiziert und stellt keine Probleme.

**Langzeitdrift:** Differenzdrucksonden, die ohne zusätzliche Mittel zur genauen Erfassung des Staudrucks eingesetzt werden, dürfen während der Einsatzdauer nicht mehr als 50 Pa driften. Diese Bedingung wird nur von sehr teuren industriellen Drucksonden erfüllt. Entsprechende Methoden zur Behebung dieser Langzeitdrift werden unter 6 beschrieben.

#### 5. Totalenergiekompensation – TEK

Als bekannt wird die Herleitung der Druckgleichung aus der Barometerformel und dem Energiesatz vorausgesetzt. Mit folgenden Annahmen:

- ruhende Luftmasse
- ideales Segelflugzeug (kein polares Sinken)
- $\frac{dQ}{dh} = 0$

ergibt sich nach [1] beim Austausch von kinetischer und potentieller Energie:

$$dp_{\text{Pilot}} = 2 dp_{\text{stat}} \quad (10)$$

oder

$$dp_{\text{stau}} = dp_{\text{stat}} \quad (11)$$

Beim TEK-Variometer dürfen also statische Druckänderungen, die durch eine gleich grosse Staudruckänderung begleitet sind, nicht angezeigt werden. Mit den Gleichungen (10) und (11) werden auch die beiden mit Drucksonden möglichen TEK-Methoden beschrieben.

#### 5.1 TEK mit 2 Absolutdrucksonden

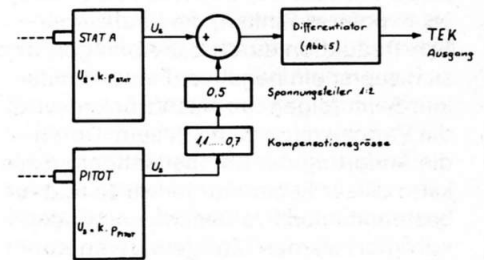


Abb. 9

In Abb. 9 wird die einfachste Anordnung dargestellt. Ihre Vorteile sollen kurz aufgezählt werden. Infolge der hohen Grenzfrequenz der Drucksonden kann kein Zeitkonstantenfehler auftreten. Zudem wird durch das Ausbleiben des Ausgleichsluftstromes in den Zuleitungen die pneumatische Druckänderung korreliert an beiden Sondereingängen erscheinen. Das Kompensationsprinzip eliminiert jeden Dichtefehler, da beide Messsysteme (statischer Druck und Staudruck) identisch sind. Die Prüfung der 100%igen TEK (Gleichung 11) erfolgt mit einer Anordnung nach Gene Moore [2]. Sie soll sicherstellen, dass bei beliebigen Druckänderungen der TEK-Ausgang 0 bleibt und damit auch keinen Zeitkonstantenfehler aufweist. Die Kompensationsgrösse wird schliesslich aber nicht auf 100% eingestellt.

Eine Einstellung der Kompensationsgrösse auf 80–85% (je nach Flugzeug) ergibt die besten Resultate. Dies infolge zweier Fehlerquellen:

**Fehler der statischen Druckabnahme**  
Üblicherweise werden Druckabnahmen seitlich des Instrumentenbretts verwendet, die sich deutlich vor der dicksten Rumpfstelle befinden. Sie ergeben sehr kurze Zuleitungen, sind aber nicht unabhängig vom Staudruck. Diesem stati-

schen Druck ist ein Unterdruck von ca. 10% des Staudrucks überlagert, was von Rumpfform und Ort der Druckabnahme stark variiert. Dieser Unterdruck würde eine Überkompensation der gleichen Größenordnung bedingen. Bei zu hohem Unterdruck muss die Druckabnahmestelle weiter zur Rumpfspitze verlegt werden. Bei Verwendung dieser statischen Drücke muss auch die Staudruckabnahme im Rumpfspitz erfolgen. Über die TEK-Eigenschaften bei der Verwendung von statischen Druckabnahmen im hintern Rumpfteil, kombiniert mit einer Staudruckabnahme auf dem Seitenleitwerk bestehen wenig Erfahrungswerte. Die Fehler des statischen Druckes sind aber wesentlich kleiner und ergeben eine genauere Horizontalgeschwindigkeit.

### Fehler durch erhöhtes Lastvielfaches (n)

Nach einer Arbeit von Richard Meyer bewirkt das Lastvielfache  $n$  eine Fehlanzeige des TEK-Variometers von  $-\sqrt{n} v_p$  ( $v_p$  = polares Sinken). Im Laufe einer Fahrtreduktion durch das Abfangen wird sich zuerst ein negativer Fehler einstellen. Beim folgenden Nachdrücken wird die Varioanzeige zu hoch sein. Durch die Änderung der Kompensationsgrösse kann dieser Fehler nur teilweise und für bestimmte positive Beschleunigungen korrigiert werden. Zur genaueren Korrektur dieses Fehlers müsste das Vario-signal ein weiteres Mal differenziert werden.

### 5.2 TEK mit Absolut- und Differenzdrucksonde

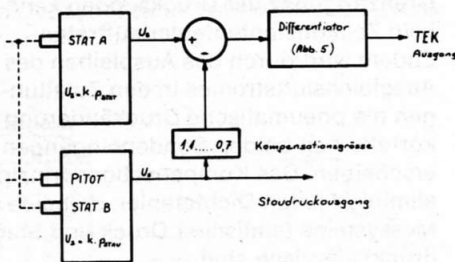


Abb. 10

Eine ähnliche Kompensationsmethode lässt sich mit einer Absolutdrucksonde für den statischen Druck und einer Differenzdrucksonde für den Staudruck aufbauen. Die Vorteile dieser Anordnung bestehen in der gleichzeitigen Messung des Staudrucks und einer sehr einfachen Prüfmethode zur Kontrolle der 100%igen Kompensationsgrösse. Dazu wird eine beliebige Druckänderung an den Eingang STAT A und PITOT gelegt. Der Anschluss STAT B bleibt offen. Diese Anordnung wird seit mehreren Jahren im Variosystem LX 1600 verwendet und arbeitet zur Zufriedenheit der Piloten.

### 6. Staudruckmessung

Verschiedene Funktionen, auf die der Leistungspilot heute nicht mehr verzichtet, sei es Sollfahrtgeber, Nettovariometer oder Distaviascheibe (LX 1600) benötigen ein genaues Staudrucksignal. Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt wurde, erfüllen die preisgünstigen Drucksonden die diesbezüglichen Bedingungen nicht. Es ist offensichtlich, dass genaue Staudruckmessungen mit Drucksonden aufwendiger sind als eine entsprechende Durchflussmessung (der Luftstrom durch eine zwischen Pitot und statischer Druck seriegelassete Kapillare ist proportional zum Staudruck und kann mit einer üblichen Vario-sonde gemessen werden). Der Mehraufwand für eine reine Druckmessung muss aber in Kauf genommen werden, um die Vorteile der elektronischen Drucksonden-TEK auszunutzen. Im LX 1600 wird seit der Serie 75 ein mechanisch-elektrischer Differenzdruckschalter zur genauen Eichung der Differenzdrucksonde verwendet.

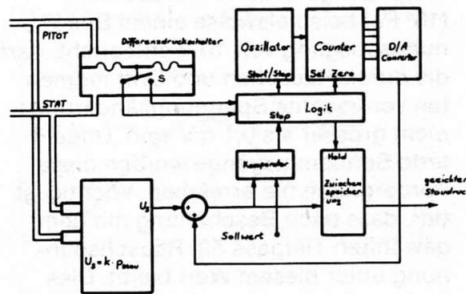


Abb. 11

Aus Abb. 11 ersehen Sie die Funktionsweise der automatischen Fahrtsignaleichung (AZS = Automatic Zero Speed). Zwischen Pitot und statischem Druck liegt der Differenzdruckschalter, der bei einem bestimmten Staudruck den Kontakt S schliesst. Dieser Staudruck liegt optimal bei einer Horizontalgeschwindigkeit von ca. 100 km/h (entspricht etwa 440 Pa). Diese Eichgeschwindigkeit wird in den meisten Fällen im Abstand von einigen Minuten überflogen, sei es im normalen Nachdrücken zum Abstecken oder im Delphinflug. Jedesmal beim Nachdrücken über die Eichgeschwindigkeit wird der Eichvorgang wiederholt.

Die Auslösung der Eichung erfolgt durch das Schliessen der Kontakte. Zuerst wird nun von der Logik ein Hold-signal ausgegeben, das die Speicherung des alten Staudrucksignals während des neuen Eichvorgangs sicherstellt. Zugleich wird der Zähler (Counter) auf 0 gesetzt mit dem Steuersignal Set Zero. Die Oscillatorimpulse werden im Counter aufsummiert, bis der Ausgang der Additionsstufe den Sollwert für 100 km/h erreicht hat. In diesem Moment wird vom Komparatorausgang der Oszillator gestoppt und der neu ge-

eichte Staudruck ohne Zwischenspeicherung auf den Ausgang weitergeleitet. Der Digital/Analogconverter umfasst 10 bit (1024 Schritte à 2 mV) und wird im LX 1600 in einfacher CMOS-Technologie realisiert. Der Differenzdruckschalter besitzt einen Mehrfachkontakt hoher Lebensdauer. Diese Anordnung mag wohl auf den ersten Blick etwas kompliziert erscheinen, ist aber einfach und zuverlässig. Die Stabilität des Staudruckausganges ist praktisch nur noch vom Differenzdruckschalter abhängig und damit innerhalb einer Toleranz von  $\pm 3$  km/h auch bei extremen Temperaturen gewährleistet.

Eine zweite Möglichkeit zur Staudruck-eichung bestünde im periodischen Kurz-schliessen der pneumatischen Eingänge STAT und PITOT der Differenzdruck-sonde und einem gleichzeitigen Nullab-gleich des SONDenausgangs. Die Druck-stösse des Ventils würden aber erhebliche Varioausschläge bei jeder Eichung zur Folge haben.

### 7. Mittel zur Optimierung des Leistungssegelfluges

#### 7.1 Der Intervallintegrator (II)

Der Intervallintegrator liefert dauernd einen Mittelwert über die Vertikalgeschwindigkeit. Er wird oft auch mit «Running Average» bezeichnet und erleichtert die Abschätzung des optimalen MC-Wertes für den folgenden Schnellflug. Die Informationen über Art und Höhenstruktur des Aufwindes erlauben dem Piloten auch, laufend seine Flugtaktik zu überwachen. Es sind somit ähnliche Informationen, wie sie nach erfolgtem Flug auf dem Barogramm zur Verfügung stehen. Ebenso wesentlich wie die Daten des letzten Aufwindes sind taktische Überlegungen und die Entwicklung. Die Information des gestoppten Mittelwertes ist kaum brauchbar, wie in [3] an einem Beispiel gezeigt wird. Mathematisch ist der laufende Mittelwert über die Periode T wie folgt definierbar:

$$V_{sm} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_s(t) dt \quad (12)$$

Dieser Mittelwert kann mit folgender Laplacegleichung beschrieben werden:

$$V_{sm}(p) = V_s(p) H(p)$$

$$H(p) = \frac{1}{pT} (1 - e^{-pT}) \quad (13)$$

$H(p)$  ist eine transzendente Funktion in  $p$  und lässt sich mit linearen Netzwerken nicht realisieren. Näherungsweise kann sie mit einer komplizierten Schaltung nachgebildet werden. Eine weitere Vereinfachung gestattet die Verwendung

eines normalen RC-Gliedes, wie es im 1. Kapitel beschrieben wurde. Am Beispiel der Sprungantwort kann das Verhalten des mathematischen Mittelwertes (12) und des RC-Gliedes (2) verglichen werden.

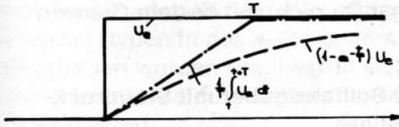


Abb. 12

Im LX 1600 und Pirol 17 werden Intervallintegratoren mit einer Zeitkonstante von 20–40 sek. verwendet. Die Erfahrungen aller Piloten sind positiv und rechtfertigen den geringen Mehraufwand.

## 7.2 Der Sollfahrtgeber

Die einfachste Form des Sollfahrtgebers, Vario mit MC-Ring und Fahrtmesser, hat sich seit längerer Zeit überall durchgesetzt. Der Nachteil dieser Anordnung besteht im aufwendigen «Suchen» der Sollfahrt. Eine erhebliche Verbesserung wird durch die Verwendung des Nettovariometers (Kompensation des polaren Sinkens) erreicht. Dies kann auf rein pneumatische Weise erfolgen. Eine dritte Art des Sollfahrtgebers wird in verschiedenen elektronischen Variometern verwendet. Der Zeiger des SC (Speedcommands) wird mit entsprechenden Fahrtkorrekturen auf 0 gehalten. Positive Ausschläge sind wegzuziehen, negative durch Nachdrücken auszugleichen. Wesentlich ist die Frage nach dem Aufwand, mit dem die Sollfahrt optimiert werden soll. Unter Aufwand wird die zusätzliche Belastung des Piloten durch diese Tätigkeit verstanden. Sie ist eine Funktion der Darstellungsart (optischer oder akustischer Sollfahrtgeber) und der Kompensationsgüte (TEK). Es ist kaum sinnvoll, mit grosser Mühe eine Sollfahrt auf  $\pm 5$  km/h einzuhalten, wenn die berechnete Annahme besteht, dass bereits Höhenfehler, falsche Polarendaten und fehlerhafte Messgrössen (Vertikal- und Horizontalgeschwindigkeit) Abweichungen in der gleichen Grössenordnung verursachen. Als ausgewogene Lösung hat sich die Ausblendautomatik der Variosysteme Pirol 17 und LX 1600 erwiesen. Während des Schnellfluges wird dabei der Ton ausgeblendet, sofern die Horizontalgeschwindigkeit nicht mehr

als  $\pm 15$  km/h von der optimalen Sollfahrt abweicht. Diese Automatik bringt Ruhe ins Cockpit und macht den Piloten für andere Aufgaben frei. Anfänglich wird er beim Erörten des Audios die Sollfahrtskorrektur mit Hilfe der optischen Anzeige ausführen. Eine weitere Verbesserung der herkömmlichen Sollfahrtgeber wird durch die Anpassung der Signalverzögerungen erreicht. So soll die vom Piloten verursachte Fahrtänderung schnell auf den Sollfahrtgeber übertragen werden, während das TEK-Variosignal zusätzlich verzögert wird. Für den Piloten ergibt sich damit eine rasche Erfolgskontrolle und ein angenehmer Flugstil. Die einwandfreie TEK ist in jedem Fall Voraussetzung, um irritierende Sollfahrtbefehle auszuschliessen. Beim Vergleich verschiedener Sollfahrtsysteme muss unbedingt auch deren Höhenfehler berücksichtigt werden. Bei Übereinstimmung in 1000 m Höhe ergibt sich zum Beispiel auf 3000 m eine Fahrdifferenz von ca. 30 km/h (bei 150 km/h), wenn elektronische Sollfahrtsysteme mit der herkömmlichen Kombination (Fahrtmesser/Stauscheibenvario mit MC-Ring) verglichen werden.

## 7.3 Distaviascheibe

Die zurückgelegte Distanz kann mit einer Staudruckmessung nach Abschnitt 6 und nachfolgender Radizierung und Integration ermittelt werden. Die Dichteabhängigkeit des Fahrtsignals kann auf einfache Art korrigiert werden, da mit dem statischen Druck das entsprechende Korrektursignal zur Verfügung steht [4]. Natürlich entspricht diese Information nicht den über Grund zurückgelegten Kilometern. Mit einer einfachen Formel wird vom Piloten die Windgeschwindigkeit im Vergleich zur Karte berechnet und diese Korrektur am Gerät eingestellt. Unter gleichbleibenden Windverhältnissen steht dem Segelflieger eine relativ genaue Navigationshilfe zur Verfügung. Die logarithmische Darstellung der zurückgelegten Distanz und notwendigen Endanflughöhe auf einer synchronmotorgetriebenen Rechenscheibe erlaubt eine weitere Optimierung im Endanflug.

## 8. Informationsdarstellung

Die Darstellung der bei modernen Variosystemen anfallenden Informationen kann grundsätzlich optisch oder akustisch erfolgen. Beim Sollfahrtgeber wäre eine Übertragung mittels Tastsinn

denkbar, die den Piloten zum Nachdrücken oder Wegziehen auffordert. Beim Variometer wie auch beim Nettovariometer hat sich trotz allen andern Versuchen das optische Rundskaleninstrument, kombiniert mit dem Doppeltontaudio, durchgesetzt. Bei genügend grosser Stückzahl wäre ein Ersatz des Rundskaleninstrumentes durch ein Servosystem denkbar, das verschiedene Werte koaxial darstellen würde. Digitalanzeigen eignen sich bestenfalls für den Intervallintegrator, da der Pilot den laufenden Mittelwert memorisieren muss, um anschliessend den MC-Wert abzuschätzen. Die optische Sollfahrtanzeige kann auch mit Leuchtdioden (LED) erfolgen. LEDs sind aber bei extremen Lichtverhältnissen auch bei optimaler Konstruktion kaum zu erkennen, da ein annähernd senkrechter Lichteinfall nicht verhindert werden kann. Analoge Liquid-Crystal-Anzeigen könnten zukünftig das Zeigerinstrument ersetzen. Die Entwicklung solcher Anzeigen ist noch nicht abgeschlossen. Abschliessend muss aber auf das wesentlichste Problem von Variosystemen hingewiesen werden: Der Pilot muss mit minimalem Aufwand (Betätigung von Schaltern, Einstellung von Potmetern, Denkarbeit) jene Informationen zur Verfügung haben, die für die momentane Situation notwendig sind. Die dauernde Darstellung aller Werte ist verwirrend und aufwendig. Die im LX 1600 angewandte Lösung stellt einen Kompromiss dar. Mit einem Kippschalter (Steigflug/Schnellflug) werden auf zwei Rundskaleninstrumenten die jeweils wichtigen Werte dargestellt. Steigflug: Variometer und Intervallintegrator. Schnellflug: Nettovario und Sollfahrtgeber. Der Pilot hat also ständig eine Information über die Vertikalgeschwindigkeit, welche zusätzlich vom Audio wiedergegeben wird. Die Audioausblendung bei korrekter Sollfahrt erfolgt nur im Schnellflug.

## Literatur

- [1] The Electric Variometer System, Part II, Gene Moore
- [2] Elektronische Entwicklung für den Leistungssegelflug, 13. OSTIV-Kongress, Ingo Westerboer
- [3] LX 1600 – Vom Drucksondenvario zur Distaviascheibe, Aero-Kurier 3, 4/76, Claudio Meisser
- [4] Manual B LX 1600, Flexum