

# Zur Filtertechnik an elektrischen Variometern

Ingo Westerboer

Vortrag auf dem XVI. OSTIV-Kongress 1978 in Châteauroux, Frankreich

## 1. Einleitung

Der Pilot erwartet von seinem Variometer verwertbare Informationen über die Vertikalgeschwindigkeit  $\dot{h}$  des Flugzeugs und der durchflogenen Luftmasse. Dazu messen die Variometer die zeitlichen Änderungen  $\dot{P}$  des Auswenddruckes. Dabei wird vorausgesetzt, dass zwischen dem Messwert  $\dot{P}$  und der gesuchten Information  $\dot{h}$  die aus der barometrischen Höhenformel ableitbare eindeutige Abhängigkeit besteht.

Dieser Grenzfall tritt in der freien Atmosphäre praktisch nur beim turbulenzfreien Wellenflug auf. In allen anderen Fällen wird der höhenabhängige Druckverlauf überlagert von turbulenzbedingten orts- und zeitabhängigen Druckschwankungen (Böen). Sie stören die Eindeutigkeit der Zuordnung von Druck und Höhe, werden aber gleichwohl vom Variometer erfasst und angezeigt.

Die Piloten reagieren darauf in sehr unterschiedlicher Weise. Im einen Extremfall werden alle erkennbar turbulenzbedingten, schnell verlaufenden Variometeranzeigen bewusst ausser Acht gelassen. Im anderen Fall wird versucht, auch aus diesen schnellen Variometersignalen Informationen über den Zustand der durchflogenen Luftmasse zu erhalten. Hierbei wird auch der Sitzdruck als Beschleunigungsmass registriert und verarbeitet, ebenso das Fahrtgeräusch.

Einige Piloten gehen hier so weit, dass sie aus der Kombination dieser drei Messwerte darauf zu schliessen versuchen, ob der gerade angeschnittene

Aufwind im Auf- oder Abbau begriffen ist.

An dieser Stelle kann von seiten der Variometertechnik Unterstützung kommen:

Aus den turbulenzbedingten Variometersignalen müssten jene extrem schnellen Anteile ausgesiebt werden, die auf keinen Fall auswertbar sind. In der Sprache der Filtertechnik sind das die Signalanteile mit hoher Frequenz. Die vorliegende Arbeit untersucht daher experimentell das Frequenzverhalten von Variometersystemen und gibt einfache pneumatische und elektrische Filternetzwerke zur Begrenzung der hohen Frequenzanteile an.

Dem Verfasser sind keine meteorologischen Aussagen über das Frequenzspektrum des Druckes in der freien Atmosphäre bekannt. Daher wird im folgenden stark vereinfachend davon ausgegangen, dass alle im Druckspektrum enthaltenen Frequenzen die gleiche Amplitude haben.

## 2. Frequenzgang-Messung und elektrisches Ersatzschaltbild des Variometers

Die Messumformer in den konventionellen elektrischen Variometern sind Strömungsmesssonden. Sie liefern eine Ausgangsspannung  $U_a$ , die im linearen Aussteuer-Bereich - d.h. bei konstanter Empfindlichkeit  $E$  - dem Luftdurchsatz  $\frac{dV}{dt} = \dot{V}$

durch die Sonde proportional ist.

$$U_a = E \dot{V} \quad (1)$$

Mit der in Abb. 1 skizzierten Kolben-Zylinder-Anordnung wird ein Luftstrom  $\dot{V}$  durch die Sonde erzeugt, der folgenden drei Bedingungen genügt:

- 1) hinreichend klein (linearer Betrieb);
- 2) sinusförmiger Verlauf über der Zeit;
- 3) Frequenz variabel im Intervall  $0 \leq f \leq 10$  Hz.

Wird der Luftstrom nach Durchlauf durch die Sonde ins Freie geleitet, so gilt bei dem hier vorliegenden sinusförmigen Kolbenweg  $x(t)$  für den Zeitverlauf des Luftdurchsatzes durch die Sonde

$$\dot{V}(t) = A \frac{dx(t)}{dt} = A \dot{x} \omega \cos \omega t \quad (2)$$

$$\dot{V}(t) = \dot{V} \cos \omega t \quad (3)$$

Im linearen Betriebsbereich der Sonde ist demnach

$$U_a(t) = E \dot{V}(t) = EA \dot{x} \omega \cos \omega t \quad (4)$$

$$U_a(t) = \dot{U}_a \cos \omega t \quad (5)$$

$$\dot{U}_a \sim \omega \quad (6)$$

Die Amplitude  $\dot{U}_a$  des Sondersignals steigt proportional zur Messfrequenz. Wird dagegen die Sonde an die in Abb. 1 skizzierte Flasche (Volumen  $V$ ) angeschlossen, so erzeugt die Kolbenbewegung Druckschwankungen in der Flasche. Die Flasche ist mit Topfschrubbern gefüllt. Damit ist isothermes Verhalten in der Flasche gewährleistet, so dass gilt

$$P \cdot V = \text{const.} \quad (7)$$

$$\Delta V = -\frac{V}{P} \Delta P \quad (8)$$

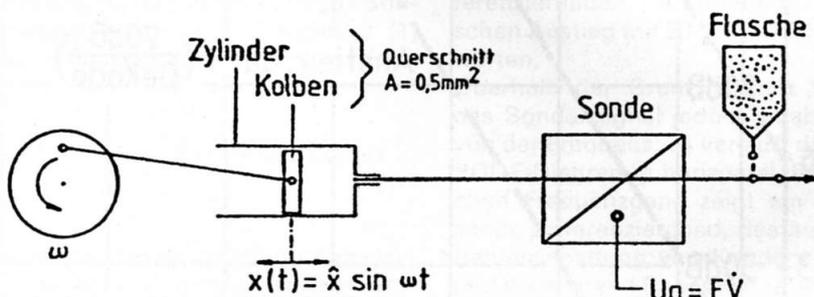
Die Druckschwankungen  $\Delta P$  sind den Volumenschwankungen  $\Delta V$  proportional. Das gilt ebenso für die zeitlichen Ableitungen:

$$\dot{V} = -\frac{V}{P} \dot{P} \quad (9)$$

Sinusförmig mit der Zeit verlaufende Volumenänderungen haben demnach sinusförmige Druckschwankungen zur Folge und umgekehrt. Wegen (1) und (9) gilt

$$U_a = -E \frac{V}{P} \dot{P} \quad (10)$$

Abb. 1 Anordnung zur Herstellung eines sinusförmigen Luftstromes mit einstellbarer Frequenz



Die Anordnung aus Strömungsmesssonde und Flasche misst demnach die Grösse  $\dot{P}(t)$ , also die zeitlichen Änderungen des Drucks in der Flasche.

Da die Druckänderungen nach (9) mit den sie erzeugenden Volumenänderungen gekoppelt sind, gilt für das Ausgangssignal der Sonde auch bei angeschlossener Flasche wieder der Ausdruck (4).

Die Anordnung nach Abb. 1 erlaubt demnach die Untersuchung des Frequenzverhaltens konventioneller Variometersysteme im Bereich von 0 bis 10 Hz.

Die Messobjekte waren gängige Hitzdraht-Metallsonden aus der Serienfertigung, wie sie in Metallsonden-Variometern Verwendung finden: einlagig aus dünnem Nickeldraht gewickelte Miniaturspulen in Kegelstumpfform, die im Strömungskanal direkt hintereinander angeordnet sind (Abb. 2).

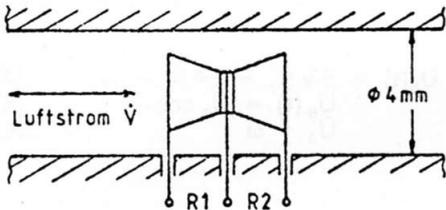


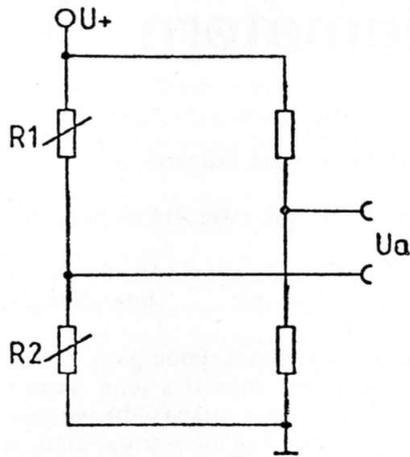
Abb. 2 Schnitt durch den Strömungskanal einer Metallsonde

Die Sonden wurden in zwei unterschiedlichen Schaltungen vermessen. Im einen Fall wurde die Sonde in einer üblichen Brückenschaltung nach Wheatstone an konstanter Spannung betrieben. Das zeigt schematisch Abb. 3a. Im folgenden wird diese Schaltung mit N bezeichnet.

Im zweiten Fall wurden beide Sondenhälften (R1 und R2 aus Abb. 2) in getrennten Brückenschaltungen mit Hilfe zweier Regelkreise auf konstantem Widerstand und damit auf konstanter Temperatur gehalten. Das zeigt schematisch Abb. 3b. Jeder der beiden Verstärker V bildet mit dem von ihr gesteuerten Transistor T und der Messbrücke einen geschlossenen Regelkreis. Als Ausgangssignal  $U_a$  diente hier die Differenz der von den beiden Regelverstärkern gelieferten Ausgangsspannungen. Im folgenden wird diese Schaltung mit S bezeichnet.

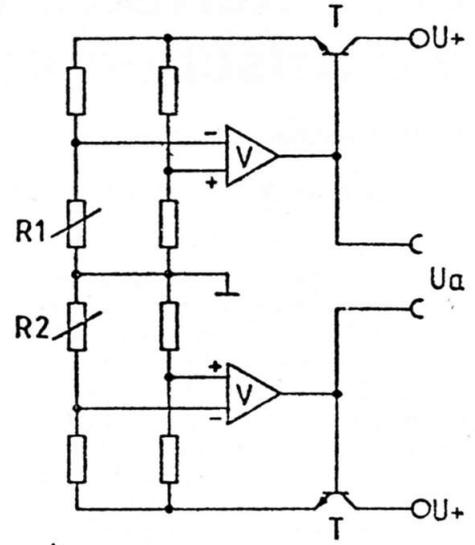
Abb. 4 zeigt die Messergebnisse. Dargestellt ist der Frequenzgang des Ausgangssignals für die N-Schaltung und die S-Schaltung im sog. BODE-Diagramm. Auf der Abszisse ist die Frequenz  $f$  in logarithmischem Masstab

### Konstante Brückenspeisespannung



a

Abb. 3 Strömungsmessbrücken  
a) Betrieb an konstanter Brückenspeisespannung



b

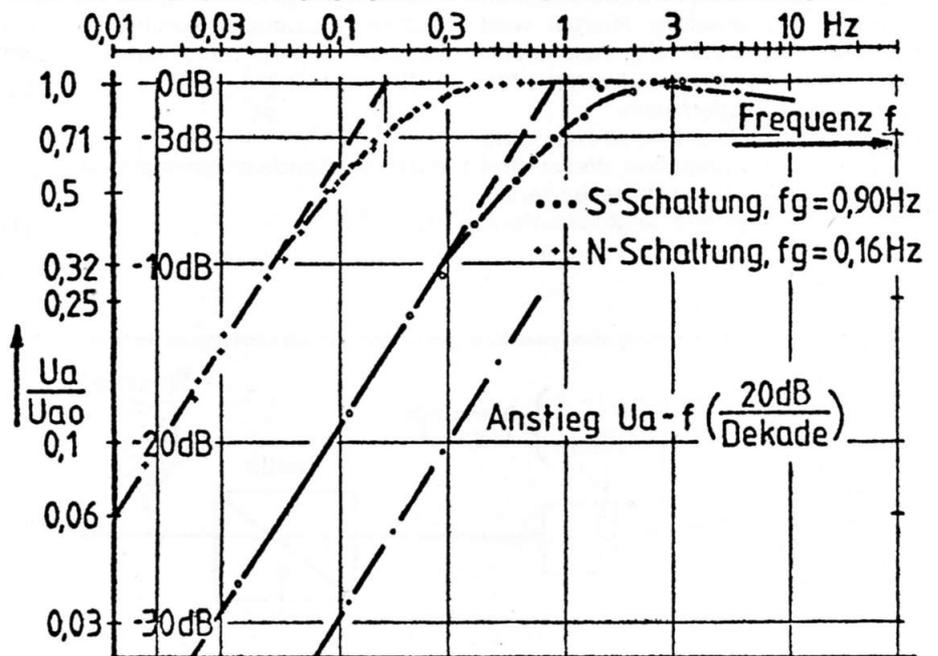
b) Betrieb im Regelkreis mit konstantem Sondenwiderstand

aufgetragen, auf der Ordinate und ebenfalls in logarithmischem Masstab das normierte Ausgangssignal  $U_a/U_{a0}$ , worin  $U_{a0}$  der Grenzwert des Ausgangssignals bei hohen Frequenzen ist.

Beide Messreihen zeigen den nach Gleichung (6) erwarteten Anstieg der Ausgangsspannung proportional der Messfrequenz. Ferner zeigen beide Messreihen als Folge der thermischen Trägheit der Metallsonde nach Überschreiten der jeweiligen Grenzfrequenz  $f_g$  den Übergang auf  $U_a = \text{const.}$

Bei der Grenzfrequenz sind 71% ( $1/\sqrt{2}$ ) des Grenzwertes  $U_{a0}$  der Ausgangsspannung erreicht. Für die N-Schaltung wurde  $f_g = 0,16$  Hz gemessen, für die S-Schaltung wurde  $f_g = 0,90$  Hz. Für die N-Schaltung wurde oberhalb 3 Hz – also etwa ab  $20 f_g$  – ein geringfügiger Abfall des Sondensignals gefunden. Der Grund für diesen Nebeneffekt ist noch nicht eindeutig geklärt. Er stört jedoch die weiteren Überlegungen nicht.

Abb. 4 Frequenzgang des Ausgangssignals der Strömungsmessbrücken im BODE-Diagramm



Die Strömungsmessonde erweist sich demnach in beiden Mess-Schaltungen als ein Hochpass 1. Ordnung. Das ist für die späteren Überlegungen zur Filtertechnik von entscheidender Bedeutung.

Das Ausgangssignal  $U_a(t)$  eines Hochpasses 1. Ordnung verläuft nach einer e-Funktion, wenn ein stufenförmiges Eingangssignal vorgegeben wird. Die Zeitkonstante  $\tau$  dieser e-Funktion ist definiert als die Zeitspanne, in der  $U_a(t)$  auf 63% des Endwertes angestiegen ist. Zwischen der Grenzfrequenz  $f_g$  eines Hochpasses 1. Ordnung und der Zeitkonstanten  $\tau$  seiner Sprungantwort besteht die Beziehung

$$\tau = 1 / (2\pi f_g) \quad (11)$$

Diese Aussage wurde in beiden Mess-Schaltungen durch oszillographische Beobachtung der «Sprungantwort» – im Falle der Strömungsmessonde ist das der zeitliche Verlauf ihrer Ausgangsspannung nach Einschalten einer konstanten Durchströmung – überprüft und exakt bestätigt. In Abb. 5 sind beide Sprungantworten  $U_a/U_{a0}$  über der Zeit im linearen Masstab aufgetragen. Die nach (11) berechneten Zeitkonstanten betragen 0,18 s für die S-Schaltung und 1,0 s für die N-Schaltung.

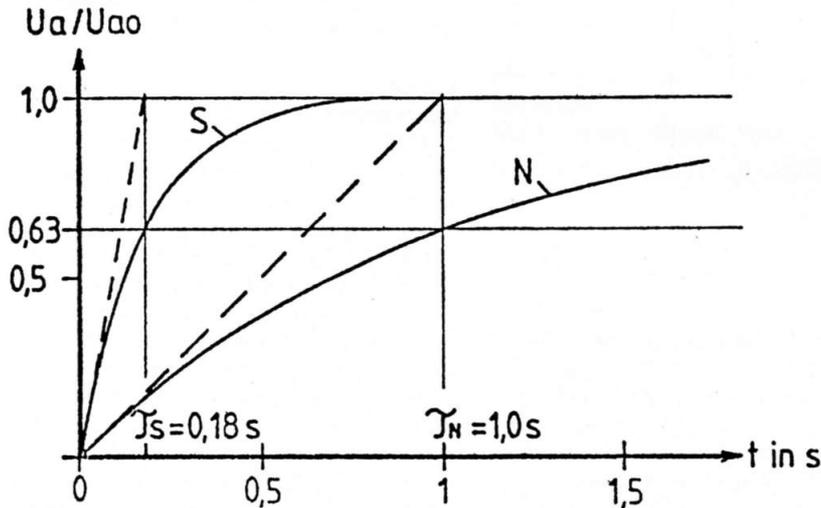


Abb. 5 Zeitverlauf des Ausgangssignals der Strömungsmessbrücken (normierte Sprungantwort)

Die folgenden Überlegungen haben zum Ziel, das elektrische Ersatzschaltbild der Metallsonde darzustellen. Denn dann lassen sich alle weiteren Frequenzgang-Untersuchungen an der Metallsonde ins Elektrische übertragen. Dort sind sie schneller und bequemer auszuführen als mit Hilfe der pneumatischen Messanordnung gemäss Abb. 1.

Die Metallsonde misst den Luftstrom  $\dot{V}$  zur Ausgleichsflasche. Wenn der Druck an der Flasche sinusförmig verläuft,

$$P(t) = \hat{P} \sin \omega t$$

dann steigen der Luftstrom  $\dot{V}(t)$  nach Gleichung (9) und damit auch das Sonden-signal  $U_a(t)$  nach Gleichung (1) proportional mit der Frequenz:

$$U_a(t) = E \dot{V}(t) \sim \dot{P}(t) = \omega \hat{P} \cos \omega t \quad (12)$$

Eine analoge Aussage gilt für den elektrischen Strom  $i$  in einen Kondensator

C. Wenn die angelegte Spannung  $U_e(t)$  sinusförmig verläuft,

$$U_e(t) = \hat{U}_e \sin \omega t$$

dann steigt auch hier der Strom  $i(t)$  wegen

$$i(t) = C \dot{U}_e(t) = \omega C U_e \cos \omega t \quad (13)$$

proportional mit der Frequenz. Im BODE-Diagramm (Abb. 4) ist demnach sowohl für die Sonden-Ausgangsspannung  $U_a(t)$  wie auch für den Kondensator-Strom  $i(t)$  der für alle differenzierenden Anordnungen typischen Anstieg mit 20 dB/Dekade zu erwarten.

Oberhalb der Grenzfrequenz  $f_g$  wird das Sonden-signal jedoch unabhängig von der Frequenz; es verläuft daher im BODE-Diagramm horizontal. Den gleichen Frequenzgang zeigt ein elektrisches Differenzierglied, das aus einer Reihenschaltung von Kondensator  $C_0$  und Widerstand  $R_0$  besteht (Abb. 6).

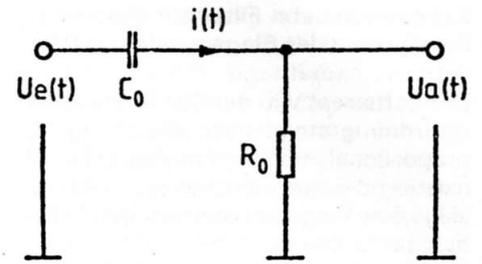


Abb. 6 Differenzierendes RC-Glied als elektrisches Ersatzschaltbild für die Kombination Strömungsmessonde-Flasche

Solange der frequenzabhängige Widerstand des Kondensators überwiegt und damit die Ungleichungen

$$1/(\omega C_0) \gg R_0; \omega \ll 1/(R_0 C_0)$$

gelten, steigt  $i(t)$  nach Gleichung (13) proportional mit der Frequenz. Wenn umgekehrt der Widerstand des Kondensators bei hohen Frequenzen ausser acht gelassen werden kann, wird  $i(t)$  von  $R_0$  bestimmt:

$$i(t) = U_e(t)/R_0, \text{ falls } \omega \gg 1/(R_0 C_0). \quad (14)$$

$i(t)$  ist jetzt unabhängig von der Frequenz.

Der durch das Einfügen des Widerstandes  $R_0$  erreichte Übergang zum frequenzunabhängigen Verlauf findet statt bei

$$\omega_g = 1/(R_0 C_0); f_g = 1/(2\pi R_0 C_0). \quad (15)$$

Ein elektrisches Differenzierglied nach Abb. 6 ist demnach eine passende Ersatzschaltung zur Kombination Strömungsmessonde-Flasche. Beide Anordnungen zeigen den gleichen Frequenzgang im BODE-Diagramm. Zum Beispiel hat ein R-C-Glied mit  $R_0 = 180 \text{ k}\Omega$  und  $C_0 = 1 \text{ }\mu\text{F}$  nach Gleichung (15) die Grenzfrequenz  $f_g = 0,9 \text{ Hz}$  und zeigt damit den Frequenzgang der Metallsonde in S-Schaltung.

Hier muss beachtet werden, dass das Ausgangssignal der Sonde wegen ihrer thermischen Trägheit oberhalb der Grenzfrequenz in den horizontalen Verlauf im BODE-Diagramm übergeht. Dem Widerstand  $R_0$  in der elektrischen Ersatzschaltung entspricht also kein reeller pneumatischer Widerstand.

### 3. Pneumatische Filter zur Frequenzbegrenzung des Eingangssignals $P(t)$

Der Luftstrom  $V$  in der Sonde-Flasche-Anordnung steigt nach Gleichung (9) proportional mit der Frequenz. Für  $V$  existiert die Grenzfrequenz  $f_g$  nicht, da sie ja eine Folge der thermischen Trägheit der Sonde ist.

Der Sonden-Luftstrom würde also bei Annahme konstanter, frequenzunabhängiger Druckamplituden mit steigender Frequenz immer weiter zunehmen und den Aussteuerbereich der Sonde mit Sicherheit überschreiten. Um das zu verhindern, muss der Luftstrom durch geeignete Filtermassnahmen im Bereich hoher Frequenzen begrenzt werden. Nun hat die Strömungsmesssonde ohnehin eine obere Frequenzgrenze  $f_g$ , oberhalb der ihr Signal gegenüber dem ungestörten frequenzproportionalen Anstieg zurückgeht. So liegt es nahe, das Filter eben an dieser Stelle einsetzen zu lassen. Dadurch wird einerseits die Übersteuerung der Sonde verhindert; zum anderen kann so eine Beschneidung im Frequenzgang ihres Signals vermieden werden. Falls erwünscht, kann also die Anzeigeschnelligkeit der Sonde trotz Einsatz des frequenzbegrenzenden Filters voll erhalten bleiben.

Im einfachsten Falle wird das geforderte Filter in herkömmlicher Weise aus einem Strömungswiderstand  $R_1$  in Reihe zur Variometerflasche  $V_0$  gebildet. Das zeigt Abb. 7a. Das elektrische

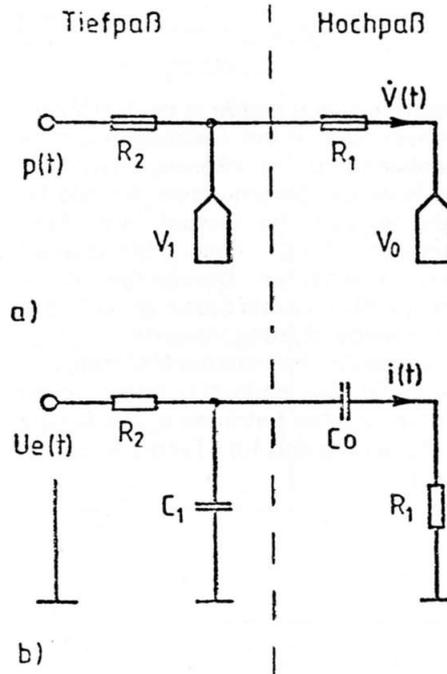


Abb. 8 Kombination aus Tiefpass und Hochpass 1. Ordnung  
a) pneumatisch  
b) elektrisch

Ersatzschaltbild dieses pneumatischen Filters ist wieder ein Differenzierglied (Abb. 7b). Dem Strom  $i(t)$  durch den Kondensator  $C_0$  entspricht der Luftstrom  $\dot{V}$  zur Flasche. Im elektrischen Fall kann der Strom als Spannung gemessen werden, die am Widerstand  $R_1$  abgegriffen wird.

Unterhalb der Grenzfrequenz steigen Strom  $i$  und Luftstrom  $\dot{V}$  proportional zu  $\omega$  oberhalb werden sie frequenzunabhängig. Die Grenzfrequenz wird jetzt nach Gleichung (15) bestimmt durch das Produkt  $R_1 V_0$  bzw.  $R_1 C_0$ .

Bei Annahme konstanter, frequenzunabhängiger Druckamplituden ist mit diesem Filter nach Abb. 7 die Übersteuerung der Sonde jedoch noch nicht verhindert. Dazu müsste im BODE-Diagramm statt des jetzt erreichten horizontalen Verlaufs oberhalb  $f_g$  ein abfallender Frequenzgang erzwungen werden.

Hierfür bietet sich als einfache Lösung das Vorschalten eines R-C-Tiefpasses an (Abb. 8). Im pneumatischen Falle besteht er aus  $R_2$  und  $V_1$ , im elektrischen Falle aus  $R_2$  und  $C_1$ .

Ein derartiger Tiefpass ist wie der oben besprochene Hochpass ein Filter 1. Ordnung, jedoch mit inversem Frequenzgang. Der Tiefpass überträgt die tiefen Frequenzen unterhalb seiner Grenzfrequenz  $\omega_g = 1/(R_2 C_1)$  frequenzunabhängig. In diesem Bereich stellen der Kondensator  $C_1$  bzw. die Flasche  $V_1$  einen so grossen Widerstand dar, dass der vorgeschaltete Widerstand  $R_2$  ohne Einfluss ist. Oberhalb seiner Grenzfrequenz fallen die Druckamplituden im pneumatischen Falle bzw. die Spannungsamplituden im elektrischen Falle proportional mit  $1/f$  ab. Folglich geht im BODE-Diagramm der horizontale Verlauf nach Über-

Abb. 7 Hochpass-Filter 1. Ordnung  
a) pneumatisch  
b) elektrisch

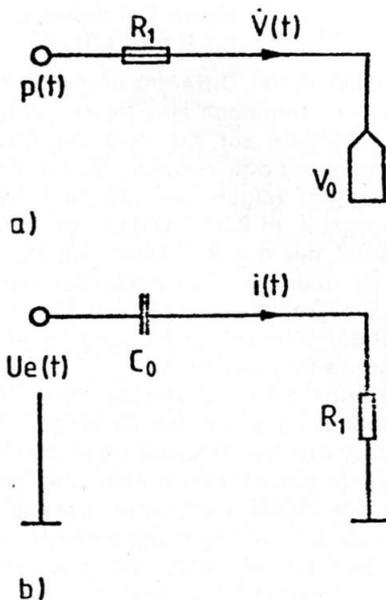
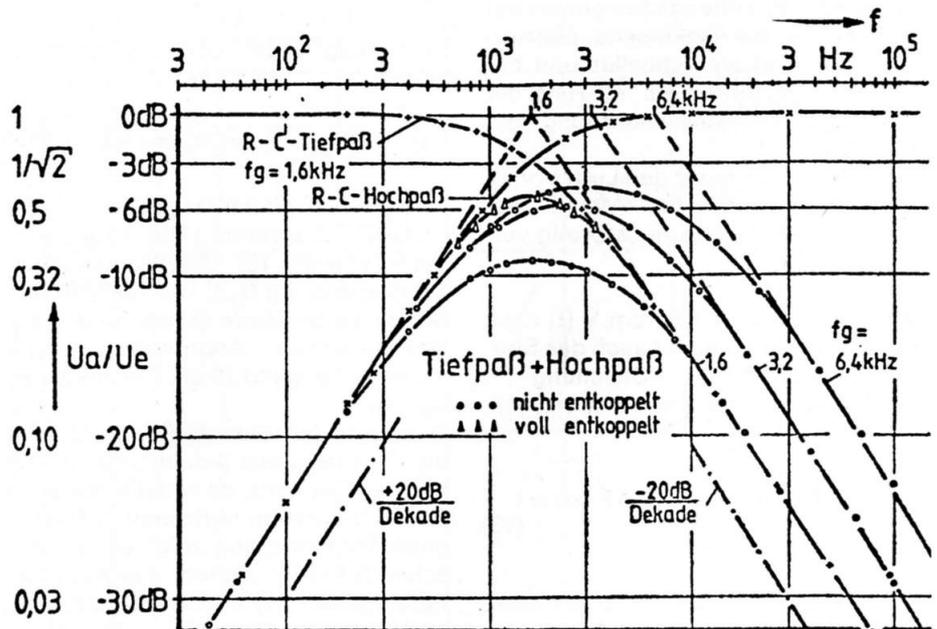


Abb. 9 Frequenzgang (BODE-Diagramm) des Netzwerks aus Abb. 8b



schreiten der Grenzfrequenz über in den 20 dB/Dekade-Abfall.

In Abb. 9 sind die Frequenzgänge vom elektrischen Tiefpass und Hochpass wiedergegeben. Durch die Wahl von  $C_1 = C_0 = 1 \mu\text{F}$  und  $R_1 = R_2 = 100 \Omega$  wurden die Messungen in einen handlichen Frequenzbereich verlegt. Die Grenzfrequenz  $f_g$  beträgt 1,6 kHz. Sie liegt also um den Faktor 1000 über der Grenzfrequenz der Metallsonde in der N-Schaltung.

Ferner sind in Abb. 9 die Frequenzgänge dargestellt, die an der Hintereinanderschaltung von Tiefpass und Hochpass gemessen wurden. Der Hochpass wurde auf drei Grenzfrequenzen eingestellt:

$$f_g = 1,6 \text{ kHz } (100\Omega/1\mu\text{F});$$

$$f_g = 3,2 \text{ kHz } (50\Omega/1\mu\text{F}) \text{ und}$$

$$f_g = 6,4 \text{ kHz } (50\Omega/0,5\mu\text{F}).$$

Dabei wurde die mit Dreiecken markierte Summenkurve unter Zwischenschaltung eines entkoppelnden Trennverstärkers zwischen beiden Einzelfiltern gemessen, die mit Kreisen markierten an der nicht entkoppelten Hintereinanderschaltung gemäss Abb. 8b. Der Unterschied der Summenkurven für die Tiefpass-Grenzfrequenz 1,6 kHz zeigt, dass im nicht entkoppelten Fall das zweite Filter im Bereich der Grenzfrequenz eine merkliche Belastung für das erste Filter darstellt. Das gilt ebenso für das pneumatische Netzwerk nach Abb. 8a.

Erhöht man die Grenzfrequenz des Tiefpasses, so steigt das Maximum der Summenkurve deutlich an; das ist für  $f_g = 3,2$  und  $6,4$  kHz des Tiefpasses in Abb. 9 deutlich erkennbar.

Zur Kontrolle dieser am elektrischen Ersatzschaltbild gewonnenen Ergebnisse wurde der Frequenzgang eines pneumatischen Netzwerks nach Abb. 8a mit Hilfe der Apparatur nach Abb. 1 vermessen. Sowohl der Anstieg proportional  $f$  bei niedrigen Frequenzen als auch der Abfall proportional  $1/f$  bei hohen Frequenzen wurde mit hoher Genauigkeit bestätigt.

Mit dem Netzwerk nach Abb. 8 wird also die geforderte Reduzierung des Luftstromes  $\dot{V}$  durch die Sonde bei steigender Frequenz mit einfachen Mitteln erreicht, wobei mit der Wahl der Tiefpass-Grenzfrequenz über dessen Einsatzpunkt auf der Frequenzachse entschieden wird. Die Übersteuerung der Strömungsmesssonde bei ho-

hen Frequenzen wird damit sicher vermieden.

Das Ausfiltern hochfrequenter Druckschwankungen vor dem pneumatisch-elektrischen Umformer ist eine generelle Forderung für alle Variometersysteme. Denn bei allen Systemen existiert eine Linearitätsgrenze, oberhalb der mit Signalverzerrungen gerechnet werden muss.

#### 4. Elektronische Filter zur Frequenzbegrenzung des Variometer-Ausgangssignals

Eine ebenso wichtige Forderung ist der Einsatz eines passenden Filters hinter dem Umformer, um von den bis an diese Stelle der Messkette gelangten Signalen nur jene zur Anzeige zu bringen, die der Pilot auch verwerten kann. Dieses Filterproblem fällt also in den elektrischen Bereich des Variometersystems.

Mit Hilfe sog. aktiver Filterschaltungen lassen sich hier ohne übertriebenen Aufwand Tiefpässe mit überraschend steiler Filter-Flanke erzeugen. Nach den jetzt vorliegenden Erfahrungen ist aus der Sicht des Piloten ein Filter 2. Ordnung mit seiner typischen Filtersteilheit von 40 dB/Dekade ausreichend. Eine grössere Steilheit bringt keine spürbare Verbesserung.

Im Gegensatz dazu ist die Lage der Filter-Grenzfrequenz kritisch. Denn damit wird schliesslich das Anzeigeverhalten des Variometers festgelegt. An dieser Stelle gehen denn auch die Auffassungen der Piloten über die optimale Lage der Grenzfrequenz auseinander. Sie schwanken zwischen  $f_g = 0,23$  Hz bis herunter zu  $f_g = 0,11$  Hz, wobei vom einzelnen Piloten schon geringe Abweichungen von «seiner» Optimal-Grenzfrequenz erkannt und als störend empfunden werden. In der herkömmlichen Terminologie der Filter 1. Ordnung entspricht nach Gleichung (11) der Grenzfrequenz  $f_g = 0,23$  Hz eine Zeitkonstante von  $\tau = 0,7$  s und  $f_g = 0,11$  Hz eine Zeitkonstante von  $\tau = 1,5$  s.

Die Beschreibung des Filters mit Hilfe seiner Zeitkonstanten ist jedoch nur sinnvoll anwendbar bei Filtern 1. Ordnung mit der für sie typischen Sprungantwort in Form einer e-Funktion, wie etwa in Abb. 5.

Zwar werden auch die Sprungantworten von Filtern höherer Ordnung in erster Linie von der gewählten Grenzfrequenz bestimmt. Sie beginnen jedoch bei  $t = 0$  mit horizontaler Tangente. Gegenüber der e-Funktion ist die Sprungantwort demnach anfangs verzögert. Diese Verzögerung nimmt mit

steigender Ordnung des Filters zu, so dass auch aus dieser Sicht der Filteraufwand nicht übertrieben werden darf. Die Zeitdauer  $T_a$  des anschließenden steilen Anstiegs der Sprungantwort von 10 auf 90% vom Endwert wird von der Ordnung des Filters kaum beeinflusst und lässt sich mit guter Genauigkeit berechnen nach  $T_a \approx 1/(3f_g)$ . Für die Auslegung des elektrischen Tiefpass-Filters sind offenbar zwei Kompromisse zu treffen:

Zum einen ist abzuwägen zwischen einer möglichst steilen Filterflanke bei der Grenzfrequenz im BODE-Diagramm und einer noch praktikablen Verzögerungszeit der Sprungantwort. Zum anderen müssen auch die unterschiedlichen Wünsche der Piloten bezüglich der Lage der Grenzfrequenz in Einklang gebracht werden. Dies ist ohne Zweifel das grössere Problem, denn Piloten sind nun einmal nicht normierbare Individualisten.

#### Zusammenfassung

Es wird eine Apparatur zur Erzeugung sinusförmiger Druckschwankungen von kleiner Amplitude und variabler Frequenz beschrieben, mit der das Verhalten elektrischer Variometersysteme in Abhängigkeit von der Frequenz erfasst werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass die konventionellen Variometeranordnungen aus Strömungsmesssonde und Flasche den Frequenzgang eines Hochpass-Filters 1. Ordnung aufweisen. Je nach der verwendeten Mess-Schaltung ergibt sich eine Filter-Grenzfrequenz von 0,90 Hz oder von 0,16 Hz.

Um das Übersteuern der Strömungsmesssonden bei hohen Frequenzen zu verhindern, wird ein neues pneumatisches Filter-Netzwerk vorgestellt. Sein Frequenzgang wird mit Hilfe der elektrischen Ersatzschaltung diskutiert und vermessen.

Die von der Praxis diktierten Anforderungen an einen elektrischen Tiefpass werden dargestellt, der die hochfrequenten Anteile im Variometersignal ausfiltern und damit zu einer beruhigten Anzeige führen soll.