



Industrie und Luftfahrtelektronik GmbH

Totalenergiekompensation in der Praxis

Diese Druckschrift wurde für unsere Kunden geschrieben, sie ist eine Zusammenfassung von Erkenntnissen aus theoretischen Betrachtungen, Messungen im Windkanal und Flugmessungen, die sich über mehrere Jahre hinweg erstreckten. Ziel dieser Arbeiten war es, die Ursachen für in der Praxis auftretende Abweichungen der Totalenergie-Varioanzeige vom idealen Verhalten aufzuklären.

Wir glauben, dass die hier in vereinfachter Form zusammengestellten Resultate dem interessierten Piloten dazu dienen können, die Anzeige seines Varios besser zu verstehen, oder eine TE-Anlage, mit der er unzufrieden ist, zu verbessern.

Bayreuth, August 1986
Rudolf Brözel, Dipl.-Phys.

© Reproduktion und Vervielfältigung nur mit Genehmigung von ILEC GmbH

Einfluss der Beschleunigung auf das Eigensinken und die Varioanzeige

Ein sehr offensichtlicher Tatbestand ist leider weitgehend unbekannt, und diese Unkenntnis führt immer wieder zu falschen Vorstellungen von der Totalenergiekompensation.

Beim Abfangen mit nicht zu kleinem Lastvielfachen (Sitzdruck!) geht im allgemeinen die TE-Vario-Anzeige zunächst kräftig in den Keller, während doch das in der guten alten Zeit der langsamen Flugzeuge benützte Höhenvario (nichtkompensiertes Vario) bei dieser Gelegenheit freudig an den oberen Anschlag ging. Normalerweise würde man erwarten, dass das TE-Vario dabei nicht rührt. Dieses verwirrende Phänomen wird immer wieder als ein Fehler der TE-Kompensation angesehen: Nichts ist falscher als das, im Gegenteil, wenn es nicht auftritt, dann taugt die Kompensation nichts.

Beim Abfangen mit erhöhtem Lastvielfachem muss der Auftrieb des Flügels nicht nur das Gewicht des Flugzeugs tragen, sondern auch noch die Kraft aufbringen, die das Flugzeug nach oben beschleunigt. Der Auftrieb wird $n \times G$, wobei G = Gewicht des Flugzeugs, n = Lastvielfaches (Der Sitzdruck des Piloten wird entsprechend normal so groß wie im Geradeausflug). Nun verursacht ein größerer Auftrieb auch einen größeren Luftwiderstand, und zwar um so kräftiger, je langsamer man fliegt, woran der induzierte Widerstand schuld ist. Dieser Zusatzwiderstand verzehrt zusätzliche Energie, und diese erhöhte Verlustleistung kann nur aus dem vorhandenen Vorrat an Lageenergie des Flugzeugs gespeist werden. Dies hat die unerfreuliche Folge, dass das Flugzeug schneller sinkt oder langsamer steigt als es dies ohne die Beschleunigung tun würde. Ein Totalenergievario muss diese zusätzlichen Energieverluste anzeigen.

Nota Bene.: Ein Totalenergievario zeigt nicht die Vertikalgeschwindigkeit an, sondern die Änderung der Totalenergie des Flugzeugs pro Zeiteinheit und pro Gewichtseinheit, deshalb sein Name: Es misst die Variation der Totalenergie, die gleich der Summe aus potentieller (Lage-) und kinetischer (Bewegungs-) Energie ist. Seine Anzeige kann nur dann als eine wirkliche Vertikalgeschwindigkeit angesehen werden, wenn sich die kinetische Energie nicht ändert, d. h. wenn der Betrag der Fluggeschwindigkeit konstant bleibt. Im Gegensatz dazu misst ein nichtkompensiertes Variometer die Änderung der potentiellen Energie alleine, d. h. die Änderung der Höhe, oder die wirkliche Vertikalgeschwindigkeit, unabhängig davon, ob sich die Fluggeschwindigkeit ändert oder nicht.

Schlussfolgerung: Die beiden Variometertypen zeigen nur dann das gleiche, wenn sich die Fluggeschwindigkeit nicht ändert.

Zur Illustration: Wenn wir unser Flugzeug auf einer geraden unter 15 Grad ansteigenden Bahn ausschießen lassen, dann ist seine tatsächliche Vertikalgeschwindigkeit bei 150 km/h mehr als 10 m/s Steigen. Dieses Steigen wird vom Höhenvario angezeigt, unser TE-Vario zeigt dagegen Sinken entsprechend der Polare, z. B. 2 m/s, bei ruhiger Luft. Im stationären Kreisflug jedoch zeigen beide Varios das gleiche: Der Betrag der Geschwindigkeit bleibt konstant (nur die Richtung ändert sich).

Der Beschleunigungseffekt tritt auch beim Kreisflug auf: Das Flugzeug muss dauernd zum Kreismittelpunkt hin beschleunigt werden, wenn es auf seiner Kreisbahn bleiben

soll (Die Richtung der Geschwindigkeit muss dauernd geändert werden!). Die dazu zusätzlich benötigte Kraft erfordert zusätzlichen Auftrieb, dieser erzeugt zusätzlichen Widerstand, dieser erhöht die Verlustleistung des Flugzeugs und damit das Eigensinken. Jeder Segelflieger kennt diesen Effekt.

Beim Abfangen tritt der gleiche Effekt auf, lediglich sind hier die Auswirkungen auf die Sinkgeschwindigkeit nicht direkt erkennbar wie beim Kreisflug, denn sie werden durch die von der aufsteigenden oder abfallenden Flugbahn herrührende Vertikalgeschwindigkeit, die sehr viel größer ist als das Eigensinken, überdeckt.

Am Höhenvario wird man deshalb den Beschleunigungseffekt beim Abfangen nur sehr schwer sehen können, dagegen an einem gut kompensierten TE-Vario, da hier die von der Bahnneigung herrührende Vertikalgeschwindigkeit herauskompensiert, und nur der vom Energieverlust durch den Luftwiderstand hervorgerufene Anteil an der Vertikalgeschwindigkeit angezeigt wird. Im Moment des Abfangens, wo das Lastvielfache hoch ist, kann der zusätzliche Anteil das normale Eigensinken erheblich übersteigen und damit wird er am TE-Vario deutlich sichtbar.

Umgekehrt sind die Verhältnisse beim Andrücken: Solange sich das Flugzeug auf seiner nach unten gekrümmten Bahn befindet, wird es von der Schwerkraft nach unten beschleunigt, es fällt quasi nach unten, das Lastvielfache wird kleiner als 1. Hier wird der Auftrieb verringert, damit auch der Widerstand und die Energieverluste. Das vom TE-Vario vorher angezeigte Sinken nimmt ab, während das Flugzeug seinem Bogen folgt, und unter Umständen geht die Anzeige nahe an Null heran, dann nämlich, wenn man einen Parabelbogen bei sehr niedriger Geschwindigkeit und einem Lastvielfachen nahe Null steuert, ruhige Luftmasse vorausgesetzt (sobald man den Knüppel zurücknimmt und wieder auf einer geraden, wenn auch geneigten Bahn weiterfliegt, verschwindet der Effekt).

Da ein Flugzeug, solange es fliegt, immer einen Luftwiderstand erfährt, der einen dauernden, jedoch mehr oder weniger großen Energieverlust bedeutet, kann ein ideales TE-Vario in ruhiger Luft nie Steigen anzeigen, welches Manöver auch immer man ausführt! Reale Vario-Systeme weichen in mehr oder weniger großem Maßstab von dieser Regel ab, wie stark, das ist ein gutes Kriterium für die Güte eines solchen Systems.

Die Verhältnisse beim beschleunigten Flug werden in der beiliegenden Abbildung gezeigt, und zwar gerechnet für die ASW 19, für andere Flugzeuge gilt der gleiche generelle Verlauf der Kurven:

Die dick ausgezogene Kurve mit $n = 1$ ist die normale, unbeschleunigte Polare.

- Wie man sieht, verdoppelt sich z. B. das normale Sinken, wenn man bei 80 km/h auf $n = 1,5$ anzieht (oder einen Vollkreis mit 48 Grad Schräglage bei der gleichen Geschwindigkeit fliegt). Bei noch stärkerem Ziehen reißt die Strömung ab, das Flugzeug wird dynamisch überzogen.
- Zieht man bei 110 km/h mit einem Lastvielfachen von 3, dann wird das Eigensinken sogar vervierfacht!
- Bei 220 km/h dagegen kann man ziehen soviel man will, dies hat praktisch keinen Einfluss auf das Eigensinken und damit auf die TE-Anzeige.

- Bei 70 km/h kann man durch Andrücken auf 0,5 g die TE-Anzeige auf die Hälfte reduzieren, kurzzeitig allerdings nur.

Wie wir aus all dem sehen, eliminiert die Totalenergiekompensation absolut nicht die Knüppelthermik, wie man häufig sehr ungenau sagt. Im Gegenteil, sie zeigt erst die durch Knüppeln erzeugten Energieverluste! Was sie eliminiert, ist lediglich die durch Austausch von kinetischer und potentieller Energie erzeugte Vertikalkomponente der Fluggeschwindigkeit (auf der geneigten Flugbahn).

Diesen Sachverhalt sollte man beim Sollfahrt- oder beim Delphinfliegen im Auge behalten und die kräftigen negativen Ausschläge des TE-Varios nicht einer schlechten Kompensation anrechnen, sondern seinem eigenen vielleicht zu rauhen Flugstil (Die TE-Vario-Anlage sollte allerdings gut sein, und nicht nur aus diesem Grunde).

NOTA BENE: Die angezeigten Energieverluste sind eine Realität und nicht nur eine Falschanzeige des Varios!

Die Rolle der Turbulenz

Wie im ersten Kapitel bereits dargestellt, misst unser TE-Vario die zeitliche Änderung der Totalenergie des Flugzeugs. Der Segelflieger denkt dabei normalerweise an einen Gewinn oder Verlust an Flughöhe, wie z.B. beim Einfliegen in einen Bart oder in einen Abwind. Es tritt aber leider noch eine weitere Beeinflussung der Gesamtenergie durch die Atmosphäre ein, nämlich der Gewinn oder Verlust an kinetischer Energie bei einer plötzlichen Erhöhung oder Verringerung der Anströmgeschwindigkeit des Flugzeuges durch z.B. einen Windsprung.

Jeder Pilot kennt diesen Effekt und weiß, dass er nach der Einwirkung einer solchen Bö entweder Fahrt "herausziehen" kann, oder nachdrücken muss, um die plötzlich verlorengegangene Fahrt wieder aufzuholen, dabei gewinnt oder verliert er Höhe, d.h. Energie. Wenn man nun sein TE-Vario dabei aufmerksam verfolgt, wird man beim Windsprung bemerken, dass es einen Anzeigesprung nach oben bzw. unten macht, und dass sich beim anschließenden, vom Piloten mit dem Höhenruder gesteuerten Manöver am Vario nicht viel tut. Dies ist vollkommen normal, da ja beim Windsprung die Gesamtenergie durch den Sprung in der Fluggeschwindigkeit zu-, bzw. abgenommen hat, beim anschließenden Manöver lediglich kinetische mit potentieller Energie ausgetauscht wurde, wobei die Summe konstant blieb. (Am Höhenvario ist dagegen beim Windsprung nichts zu sehen, dafür hinterher beim gesteuerten Manöver.)

Wir halten also fest, dass einem Sprung der Fahrt des Flugzeuges ein Sprung der Gesamtenergie des Flugzeuges entspricht. Dieser Energiesprung wird vom TE-Vario "gesehen", und zwar genau so als ob das Flugzeug einen der Energieänderung entsprechenden Höhengsprung bei konstanter Fahrt ausgeführt hätte, weil es wegen seines Messprinzips nicht zwischen den beiden Arten von Energieänderung unterscheiden kann. Mathematisch ausgedrückt ist dieser Höhengsprung

$dH = 1/g * v * dv$, wo g die Erdbeschleunigung von 9,81 m/s/s, v die Fahrt und dv der Fahrtsprung ist (Geschwindigkeiten in m/s einsetzen). Wir sehen, dass die Anzeige proportional zur geflogenen Fahrt ist, d.h. der gleiche Windsprung erzeugt bei 180 km/h einen 2 mal so großen Ausschlag wie bei 90 km/h.

Wie groß sind nun solche Ausschläge? Zur Beantwortung müssen wir noch die Größe der zu erwartenden Fahrtsprünge bestimmen. Es gibt sehr gute physikalische Gründe zu der Annahme, dass die Horizontalkomponente der Luftturbulenz von der gleichen Größe ist wie ihre vertikale Komponente, für die hier die Auf-, bzw. Abwindstärke zu nehmen wäre (Werte statistisch sehen!). Wir müssen also bei Thermik mit Spitzen von +/- 5 m/s mit Fahrtsprüngen von ebenfalls +/- 5 m/s rechnen (Es hat keinen Sinn diese am Fahrtmesser ablesen zu wollen, er reagiert viel zu langsam um solch schnelle Änderungen anzuzeigen).

Wenn wir nun eine Fahrt von 150 km/h annehmen und die obige Formel benützen, dann kommen wir auf den erstaunlichen Wert von etwa +/- 21 m bei einer Bö von 5m/s. Das Vario wird nun je nach seiner Anzeigeschnelligkeit einen kurzen großen, oder einen langen kleineren Ausschlag machen. Ein Stauscheibenvario z.B. mit einer Zeitkonstante von 3 s wird schnell um etwa 7m/s hochschnellen und dann in etwa 6 s wieder bei der vorhergehenden Anzeige angelangt sein. (Ein Höhenvario hätte sich dabei nicht gerührt!)

Dieses Phänomen ist eine grundlegende Eigenschaft der TE-Kompensation, und es ist dagegen kein Kraut gewachsen: es ist völlig unabhängig von der Art des Messprinzips nach dem das Vario arbeitet (Düsen-, Membran-, elektrische Kompensation, Stauscheibe, Drucksonden, Strömungssonden).

Man kann nur versuchen, durch Optimierung des zeitlichen Verhaltens der Varioanzeige eine möglichst wenig nervöse Antwort zu bekommen. Filter zweiter Ordnung, wie ILEC sie eingeführt hat, sind hier dem üblichen Verhalten erster Ordnung (z.B. Stauscheibe oder das bisher bei E-Varios meist verwendete RC-Filter, ob passiv oder aktiv spielt keine Rolle) deutlich überlegen, weil sie die Anzeige beruhigen ohne die Signalverzögerung zu vergrößern. Die Vergrößerung der Zeitkonstante eines Filters 1. Ordnung bewirkt zwar auch eine stärkere Unterdrückung dieser störenden Impulse, verlängert aber gleichzeitig die Signalverzögerung. Eine große Signalverzögerung ist jedoch beim Kurbeln sehr ungünstig, weil man die Anzeige im Geiste zeitlich, und damit im Kreis, zurückversetzen muss, beim Thermiksuchen muss man auf der geflogenen Bahn zurückdenken.

NOTA BENE: Wir müssen mit dem störenden Einfluss der Horizontalböen leben, denn es gibt kein Mittel gegen sie. Die beste Methode ist es, zu lernen sie zu verstehen, um sie beim Fliegen berücksichtigen zu können.

Wir halten fest, dass die durch Fahrtsprünge (Horizontalböen) entstehenden Impulse der TE-Vario-Anzeige etwa von der gleichen Größe sind wie die Thermikstärke: zu starkem Wetter gehören auch starke Störimpulse. Wenn man nun in rauem Wetter durch Vergrößerung der Anzeigedämpfung (der Zeitkonstante) die Anzeige wieder auf die Ruhe einer schönen Abendthermik zurückdreht, dann bezahlt man dafür teuer durch eine erhöhte Signalverzögerung. Man sollte dies lieber bleiben lassen und die ruppigere Anzeige als ein Anzeichen für ruppigere Thermik akzeptieren. Man kurbelt ja dann auch nicht so gemütlich wie in der Abendthermik.

Übrigens kann man leicht unterscheiden zwischen einem Fahrtsprung und dem Einfliegen in einen Bart oder einen Abwind: im ersten Fall wird man fast keine Änderung des Sitzdrucks (Vertikalbeschleunigung) wahrnehmen, im zweiten sehr wohl. Allerdings sind in der fliegerischen Wirklichkeit oft die beiden Typen von Ereignissen miteinander gekoppelt, dies hat seine Nachteile, aber auch Vorteile:

nicht jeder durch eine Horizontalbö verursachte Störimpuls ist nur das, er markiert auch sehr häufig den Beginn oder das Ende eines Bartes, weshalb die meisten Segelflieger den Unterschied noch nie bemerkt haben. Wer allerdings im Gebirge fliegt oder am 11ang, der wird das oben beschriebene Phänomen häufig beobachten: dort gibt es teils recht kräftige Windscherungen.

Beim Kurbeln im Flachland wird man bei aufmerksamer Beobachtung in ungefähr 90% aller Bärte feststellen, dass das TE-Vario in jedem Kreis zwei Maxima und zwei Minima anzeigt (ein einigermaßen schnelles Vario ist dazu allerdings schon nötig, ein durch Kapillaren oder Ähnliches künstlich "beruhigtes" Vario mag den Piloten zwar beruhigen, es wird ihn aber über den wirklichen Sachverhalt hinwegtäuschen, der "schnelle" Konkurrent wird es besser wissen und deswegen besser zentrieren und besser steigen).

Man könnte nun meinen, dass diese Anzeige die wirkliche Vertikalgeschwindigkeit darstellt, dem ist nicht so: Ein paralleles Höhenvario, das z.B. an den Kabinendruck angeschlossen ist, wird meistens gleichmäßiges Steigen anzeigen, oder doch sehr viel gleichmäßigeres. Dies liegt nicht am Vario, sondern an der TE-Kompensation. Die TE-Anzeige wird von der Horizontalkomponente des Bartes beeinflusst. Diese hat offensichtlich zwei Perioden pro geflogenen Kreis.

Die Horizontalturbulenz hat noch einen weiteren unangenehmen Einfluss auf die Varioanzeige: Plötzliche Luftbewegungen quer zur Flugrichtung bewirken eine Schräganströmung des Flugzeugs, mit anderen Worten: sie lassen das Flugzeug schieben. Man könnte argumentieren, dass ein guter Pilot dieses Schieben verhindern kann. Dies ist falsch, auch er braucht eine bestimmte Zeit um die Störung wegzusteuern, und während dieser Zeit schiebt das Flugzeug eben. (Das Gleiche gilt natürlich auch für vertikale Böen und den Anstellwinkel. Einziger Unterschied: Die Längsstabilität des Flugzeugs ist sehr groß, daher steuert die Maschine Störungen des Anstellwinkels sehr schnell selbst aus - das spürt man am Sitz. Die Kursstabilität ist aber vergleichsweise sehr gering, deswegen dauert es hier sehr lange.) Wenn nun die TE-Düse schiebeempfindlich ist, dann erzeugt das Schieben eine Druckänderung, die das Vario als Energie- oder Höhenänderung interpretiert: es macht einen Ausschlag. Starke Schiebewinkel werden bei niedrigen Geschwindigkeiten erzeugt, also beim Kurbeln, hier muss man mit bis zu 15 Grad rechnen. Das größte derartige Problem tritt jedoch bei manchen Flugzeugen mit sehr großer Spannweite auf: Beim Einleiten eines Kreises lässt sich hier sehr starkes Schieben anscheinend schlecht vermeiden. Abhilfe ist eine gute TE-Düse. Es ist noch hinzuzufügen, dass das Problem im Falle einer elektrischen Kompensation viel schwieriger zu lösen ist, weil man bei den bisher besten Sonden mit einer 10 bis 20 - mal größeren Empfindlichkeit gegen Schieben rechnen muss als bei einer guten TE-Düse. Wobei wir nicht von den verschiedenen statischen Bohrungen im Rumpf reden wollen, die oft nur noch schlechter sind in dieser Hinsicht. Vom Autor wurde jetzt eine statische Sonde mit großer Schiebeeunempfindlichkeit entwickelt, die auch dieses Problem löst. Sie ist von ILEC erhältlich.

Erprobung einer Totalenergie-Vario-Anlage

Es gibt nur eine einzige einfache und zuverlässige Testmethode, den Test auf gerader, geneigter Bahn. Vor der 2-Fahrtmesser-t-ethode sei gewarnt, durch Fehler des statischen Drucks können Fehlmessungen des Düsenbeiwertes von bis zu 50% auftreten.

Methode:

1. Ruhige Luftmasse aussuchen (z. B. sehr früh morgens).
2. Geschwindigkeit des geringsten Sinkens, oder 10 km/h mehr als Minimalfahrt für 10 Sekunden beibehalten.
3. Flugzeuglängsachse zügig um 10 bis 15 Grad nach unten drücken, Beschleunigungsmesserazeige 0,5 bis 0,2 g, der Schmutz sollte am Boden bleiben.
4. Längsneigung durch Beobachten des Horizontbildes, oder der Anzeige des künstlichen Horizontes, und durch Nachführen des Höhensteuers so gut wie möglich beibehalten.
5. Vor Erreichen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit hochziehen und diesmal die Längsachse auf 10 bis 15 Grad über den Horizont bringen.
6. Längsneigung bis zum Erreichen der Minimalfahrt beibehalten.

Während der Phase 2 muss das Vario stetig das Minimalsinken anzeigen.

Beim Andrücken, Phase 3, muss das Vario wegen des verringerten Lastvielfachen bis nahe an Null hochsteigen, siehe Teil 1. Ist die TE-Düse weit hinter dem Vario angebracht, z.B. an der Seitenflosse, dann wird das Ansteigen der Anzeige noch durch den Effekt der Luftsäule in der Leitung zum Vario verstärkt. Dieser Effekt ist um so stärker, je größer die Längserstreckung der Leitung von der Düse zum Vario ist und je schneller der Längsneigungswinkel des Flugzeugs sich ändert (Bei elektrischer Kompensation gilt das Gleiche, nur dass hier statische Druckabnahme anstatt TE-Druckabnahme zu setzen ist). Der Längsluftsäuleneffekt überschreitet selten etwa 0,5 m/s, was bedeutet, dass die gesamte Anzeige nicht über etwa +0,5m/s ansteigen sollte.

Die Dämpfung der Varioanzeige bewirkt nun eine Verringerung des Ausschlages, allerdings auf Kosten einer Verlängerung seiner Dauer. So wird man den Effekt mit einem Stauscheibenvario nur schwer, mit dem 1s-Filter eines ILEC Varios jedoch deutlich sehen (er klingt aber schneller ab als bei einem langsamen Vario).

In der Phase 4 läuft die Geschwindigkeit linear mit der Zeit hoch. Parallel dazu muss die Varioanzeige, bei guter Kompensation, jetzt das zur jeweiligen Fluggeschwindigkeit gehörende Polarensinken anzeigen. Man beachte dabei jedoch dass das Variosignal um seine Zeitkonstante gegenüber der Fahrtanzeige verzögert wird. Bei einem Stauscheibenvario sind das mindestens 3 Sekunden, dies entspricht bei einer Bahnneigung von 15 Grad einem Vorseilen der Geschwindigkeit gegenüber der Varioanzeige von 30 km/h! Deshalb sollte man die Bahnneigung umso flacher wählen je langsamer das Vario ist. Man muss in jedem Fall im Geiste einen festen Betrag von der angezeigten Geschwindigkeit abziehen (in Phase 5 dazuzählen). Bei 7,5 Grad Bahnneigung ist er nur noch halb so groß, d. h. 15 km/h und bei einer Zeitkonstanten von 1,5 s und 7,5 Grad nur noch 7,5 km/h und damit vernachlässigbar, da man sowieso nicht sehr genau ablesen kann.

Beim zügigen Abfangen am Ende der Phase 5, Beschleunigung 2 bis 3 g, kommt es je nach Flugzeugtyp und Geschwindigkeit zu einem mehr oder weniger großen

Ausschlag in Richtung Fallen (Auch hier tritt wieder eine Verstärkung des Beschleunigungseffektes durch die Längssäule auf, die jedoch weniger auffällt).

In der Phase 6 wird die Polare in der anderen Richtung durchlaufen. Wenn der Mittelwert der Anzeigen der Phasen 4 und 6 mit der Polare übereinstimmt, dann ist die Kompensation für den schiebefreien Flug perfekt.

Man sollte verschiedene Flüge mit unterschiedlicher Bahnneigung durchführen, um ein gutes Bild zu bekommen.

Zur besseren Korrelation der Fahrt mit der Varioanzeige notiert man sich das Polarensinken über der Fahrtmesserskala z.B. mit Farbstift.

Die oben genannten Zahlenwerte gelten für moderne Leistungssegelflugzeuge. Für Übungs- oder Holzflugzeuge sollte man alle Zahlenwerte kleiner wählen.

Prüfung des Einflusses des Schiebens auf die Kompensation

Alle Kompensationsmethoden leiden unter dem Einfluss des Schiebens, allerdings verschieden stark. In einem turbulenten Aufwind ist es praktisch unmöglich den Faden dauernd gerade zu halten, ohne aus dem Bart herauszufallen. Ist die Kompensation schiebeempfindlich, dann erzeugt sie in einem solchen Fall Fehlanzeigen des Varios, die von einfacher Nervosität der Anzeige bis zu großen Fehlausschlägen reichen können (Siehe auch Kapitel Turbulenz).

Schiebeunempfindlichkeit ist deshalb ein wichtiges Kriterium für eine gute Kompensation, nicht nur für Flugzeuge der offenen Klasse. (Nach H. Reichmann soll es Piloten geben, die -unbewusst- periodisch das Seitenruder treten, weil bei gewissen Düsen dabei kurzzeitiges Steigen am Vario erscheint!)

Eine einfache Methode der Beurteilung: In sicherer Höhe einen schiebenden Flug für mindestens 3 s beibehalten, Schiebewinkel mindestens 30 Grad, der Faden kann fast quer stehen. Den Schiebeflug mit Seiten- und Querruder stetig, ohne Hast beenden, dabei Längslage beibehalten so gut es geht. Beim Beenden des Schiebens muss das Vario stetig und ohne Sprünge vom starken Fallen zum Polarensinken übergehen und darf dieses beim ganzen Vorgang nicht übersteigen.

Nota Bene: Im Slip kommt es nur auf den glatten Übergang der Anzeige an, nicht auf deren Absolutwert, der vom Flugzeug und dem Schiebewinkel abhängt, nur am Ende muss sich die Anzeige dem Polarensinken nähern.

Einfluss des Anstellwinkels

Da die Längsstabilität eines Segelflugzeuges sehr groß ist und daher der Anstellwinkel innerhalb enger Grenzen bleibt (im normalen Geschwindigkeitsbereich etwa +1- 5 Grad), ist im allgemeinen die Anstellwinkeländerung, sei es durch Turbulenz, sei es durch gewollte Flugmanöver, von geringem Einfluss.

Bei einer guten Düse ist der Anstellwinkel kein Problem, solange sie den richtigen Einstellwinkel hat und an der richtigen Stelle montiert ist (ILEC - Düsen für Seitenleitwerkmontage sollten parallel zur Achse der hinteren Rumpfröhre montiert werden).

Es ist mit einfachen Mitteln nicht möglich, die Anstellwinkelempfindlichkeit eines Systems im Flug zu prüfen. Glücklicherweise wird sie bei der Prüfung des Düsenbeiwertes im Geradeausflug automatisch mitberücksichtigt.

Höhenrudereinfluss

Bei Düsen, die vor dem Höhenruder montiert sind, kann eine Beeinflussung durch den Höhenruderausschlag auftreten. Er kann zum einen dadurch zustande kommen, dass sich bei Höhenruderausschlag die Strömungsrichtung vor dem Ruder ändert. Ist eine Düse zu nahe am Ruder montiert, und ist sie zusätzlich anstellwinkелеmpfindlich (wie das bei älteren Venturi-artigen Düsen der Fall sein kann), dann erzeugt ein Höhenruderausschlag eine Druckänderung über die Düse.

Zum anderen befindet sich eine Düse in der Nähe des Höhenruders in dessen Strömungsfeld, das erstaunlich weit reicht. Der lokale statische ebenso wie der Staudruck ändern sich daher mit der Luftkraft des Höhenruders, welche selbst wiederum vom Knüppelausschlag und einigen anderen Größen bestimmt wird (Schwerpunktlage, Geschwindigkeit, Lastvielfaches,..). Da Schwankungen dieser Drücke sich direkt der Düse mitteilen, können Höhenruderausschläge auch auf diese Weise Störungen der Varioanzeige verursachen. Nota bene: nur während und kurz nach einer ÄNDERUNG des Höhenruderausschlags, etc. entstehen diese Störungen.

Man erkennt Beeinflussung durch das Höhenruder daran, dass beim schnellen Ziehen und Drücken bei mäßigeren Geschwindigkeiten starke Ausschläge des Varios in beiden Richtungen auftreten. In ungünstigen Fällen kann sich das so äußern, dass ein Beschleunigungseffekt vorgetäuscht wird, der ein Mehrfaches des im ersten Teil gezeigten ist. Je schneller das Vario ist, desto deutlicher werden die Fehler angezeigt, desto schneller klingen die angezeigten Fehler ab.

Bei schnell aufeinanderfolgendem Ziehen und Drücken, darf die Varioanzeige wohl nach unten gehen, jedoch nicht nach oben über den Nullpunkt hinaus.

Abhilfe: Düse weiter vor das Höhenruder setzen und eine Düse verwenden, die weniger anstellwinkелеmpfindlich ist (gedämpfte Höhenruder erfordern einen größeren Abstand als Pendelruder). Je näher der Düsenkopf an der verlängerten Symmetrieebene des Höhenruders liegt, desto geringer sind die Störungen. Vertikale Abstände von der Größe der halben Höhenrudertiefe z.B. sind sehr schlecht!

Bei einem gedämpften Höhenruder und einem schnellen Vario ist eine lange Düse notwendig, um eine störungsfreie Anzeige zu erhalten! (Bei kurzen Düsen können kurzzeitige Fehlanzeigen beim Hochziehen - z.B. in einen vermuteten Bart - von bis zu 2 m/s auftreten.)

TE- Sonden auf dem Rumpf

Der Rumpf erzeugt um sich ein sehr starkes Druckfeld, das jede Druckabnahme in seiner Nähe beträchtlich stört. Dies ist der Fall schon beim sauberen Geradeausflug. Beim beschleunigten und beim Schiebeflug werden die Verhältnisse noch schlimmer. Eine Abschätzung der Fehler ist sehr schwierig, weil die Strömungsverhältnisse um den Rumpf sehr kompliziert sind und natürlich für jeden Flugzeugtyp verschieden. Man sollt einige generelle Vorsichtsmaßnahmen beherzigen: Die Nähe des Flügels meiden, je weiter weg, desto besser (der Flügel täuscht im beschleunigten Flug, beim Abfangen z.B., Vertikalgeschwindigkeiten vor, die es nicht gibt). Der Messkopf der TE- Sonde sollte so weit weg vom Rumpf sein wie möglich (Faustwert: Abstand = Durchmesser des Rumpfes am Fußpunkt der Sonde) um den Einfluss es Schiebens klein zu halten.

Eine weitere sehr ernste Gefahr droht vom verwirbelten Nachlauf der Flügel-Rumpf-Kombination: wenn der Messkopf der Sonde von ihm erfasst wird, ändert sich der

Beiwert der Sonde drastisch und dazu noch sehr schnell. Die Folge ist eine kräftige Störung der TE-Anzeige, meistens im Langsamflug. Eine generelle Aussage über die Lage dieser Wirbelschicht kann man nicht machen. Faustregel: Den Bereich zwischen Rumpfoberseite und einer gedachten Ebene, welche die Oberseite des Flügels mit der Hinterkante des Höhenruders beim T-Leitwerk verbindet, meiden.

Wie man sieht, bleibt nicht sehr viel Raum für eine gute Position der TE-Düse auf dem Rumpf, praktisch nur die etwa 1 m hinter dem Flügel. Man sollte Positionen auf dem Rumpf nur nach ausgiebigen positiv verlaufenen Tests verwenden. Die Position oben auf der Kielflosse ist dagegen vergleichsweise unproblematisch. Die Position auf der halben Höhe der Kielflosse wird die Düse mit Sicherheit, irgendwann im Langsamflug, in den Flügel/Rumpf-Nachlauf bringen. Die Folgen sind dann schlimm.

Weitere störende Einflüsse

Der Einfluss der Beschleunigung auf das Flugzeug-Eigensinken ist kein Messfehler, da er sich ja auf die Energiebilanz des Flugzeugs auswirkt. Man muss sich daran gewöhnen mit ihm zu leben. Das gleiche gilt auch für die Turbulenz.

Im Gegensatz dazu sind die erwähnten anderen Einflüsse vom gesamten Meßsystem selbst herrührende Fehler, die im Prinzip von einem perfekteren -und natürlich aufwendigeren Meßsystem ausgeschaltet werden könnten. Wobei man ruhig sagen kann, dass die schwerwiegenden Fehler auf das Konto der Druckabnahmen, und damit auf aerodynamische Einflüsse, und auf das Konto der Leitungen geht.

Viele dieser pneumatischen Messfehler sind sehr schwierig zu erfassen, weil sie von mehreren Einflüssen gleichzeitig abhängen. Glücklicherweise sind es meist schwächere Störungen der Kompensation, die man erst bei einem guten System bemerkt. Es soll deshalb hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

Wechselwirkung von Variometern

Werden mehrere Variometer oder ein Vario mit anderen Instrumenten zusammen von der gleichen Druckabnahme gespeist, dann ist große Vorsicht geboten: Die einzelnen Varios oder Instrumente können sich in ihrem Übergangsverhalten wechselseitig beeinflussen. Dies kann besonders dann auftreten, wenn große Luftvolumina (Ausgleichsgefäße, sogenannte Böenfilter,..) im System vorhanden sind. Dabei ist es sogar möglich, dass die Anzeige eines Varios anfänglich umgekehrt wird. Man sollte auf jeden Fall darauf achten, dass keine Restriktionen (Kapillaren), keine scharfen Ecken, oder Verzweigungen mit Strahlwirkung in der gemeinsamen Leitung sind.

Man sollte auf jeden Fall erst einen Testflug mit einem einzigen Vario machen, dann das zweite Gerät zuschalten und sehen, ob sich am Verhalten des ersten irgend etwas geändert hat und ob auch das zweite Gerät einwandfrei arbeitet. Erst dann das nächste Gerät zuschalten und den Test wiederholen.

ILEC- Varios stören normalerweise kein anderes Gerät dank ihres sehr kleinen Ausgleichsvolumens, sie können jedoch sehr wohl von anderen Geräten in der oben beschriebenen Weise gestört werden, wie jedes andere Vario auch.

Güte der Kompensation

1. Es gibt keine perfekte Kompensation.
2. Bleiben bei Phase 4 und 5 die gemittelten Sinkwerte in einem Band von +/- 20cm/s um das Polarensinken im Geschwindigkeitsbereich bis 150 km/h und ist das Schiebehaviorhalten und der Höhenrudereinfluss in Ordnung, dann kann man die Kompensation getrost als hervorragend bezeichnen. Bei dieser Kompensation wird man selbst beim Hochziehen unter 45 Grad einen 1-Meter-Bart noch bemerken. Beim Kurbeln wird man eine Anzeige haben, die so ruhig wie möglich ist. Nicht sehr viele Systeme sind so gut!
3. Sind die Abweichungen geringer als +/- 0,5 m/s, und die anderen Tests fallen nicht zu schlecht aus, dann kann die Kompensation immer noch als sehr gut gelten. Bei niedrigen bis mittleren Geschwindigkeiten kann man damit sehr zufrieden sein, wenn man allzu raues Steuern vermeidet.

Abschätzung des Fehlers des wirksamen Beiwertes einer Düse

Der im freien Luftstrom bestimmte Beiwert einer Düse wird am Flugzeug durch die erwähnten Einflüsse der Aerodynamik des Flugzeugs verändert, sodass man hier von einem letztlich wirksamen System-Beiwert sprechen muss (Bei korrekter Montage am Leitwerk sind diese Einflüsse meist kleiner als etwa -5 %, am Rumpf können ohne weiteres Werte von -10% bis +20% auftreten). Dieser aus Düse und Flugzeug zusammengesetzte Beiwert kann abgeschätzt und notfalls innerhalb vernünftiger Grenzen korrigiert werden.

Tritt bei Manöver 4 zu großes Fallen auf, dann besteht Unterkompensation, der Systembeiwert ist kleiner als 1. Bei zu kleinem Fallen, oder gar Steigen besteht Überkompensation, der Systembeiwert ist größer als 1.

Sinken-Fehler und Beiwert-Fehler hängen wie folgt zusammen: Der Sinken-Fehler ist ungefähr gleich der wirklichen Vertikalgeschwindigkeit multipliziert mit $(1 - B)$, wobei die wirkliche Vertikalgeschwindigkeit die von einem unkompensierten Vario angezeigte Vertikalgeschwindigkeit und B der Systembeiwert ist. Beispiel: Bahnneigung 15 Grad nach unten, Bahngeschwindigkeit 144 km/h = 40 m/s, ergibt eine Vertikalgeschwindigkeit von $40 \text{ m/s} \cdot \sin(-15 \text{ Grad}) = 10,4 \text{ m/s}$ Sinken. Ein Systembeiwert von 0,9 (10% Unterkompensation) führt damit auf einen Fehler der Varioanzeige von $-10,4 \text{ m/s} \cdot (1 - 0,9) = -1 \text{ m/s}$, d. h. es wird ein um 1 m/s zu großes Sinken angezeigt.

Umgekehrt kann mit dieser Beziehung der Fehler des Systembeiwerts aus einer Abschätzung des Fehlers der TE-Anzeige berechnet werden. (im obigen Fall: 144km/h, -15 Grad, Sinken 1 m/s zu groß, führt zu $B = 0,9$).

Dazu ist noch zu sagen, dass der Fehler des Systembeiwerts um so kleiner sein sollte, je schneller das Flugzeug ist, denn mit einem schnellen Schiff fliegt man ja nicht nur schnellere, sondern dazu noch steilere Manöver: der Variofehler nimmt mit dem Quadrat zu! Andersherum: Bei einer K8 kann man die Düse durchaus an einer nicht sehr günstigen Stelle montieren, bei einem Flugzeug der Rennklasse muss man schon sehr viel sorgfältiger vorgehen.

TE-Vario gegen Höhenvario

Beim modernen Streckenflug kann man nicht auf das TE-Vario verzichten, weil man beim Thermiksuchen und beim Gleiten ebenso wie beim Delphinfliegen die Fluggeschwindigkeit und die Bahnneigung doch kräftig variiert. Ein einfaches Höhenvario wäre bei diesen Übungen dauernd am oberen oder am unteren Anschlag. Man könnte es benutzen, wenn man die Fahrt stückweise konstant hielte, zugegebenermaßen ein nicht sehr attraktives Verfahren.

Doch gibt es eine Situation, in der die Eigenschaft des nichtkompensierten Varios, sich nicht von der Horizontalturbulenz beeinflussen zu lassen, einen sicheren Vorteil bietet: beim Kurbeln in rauer Thermik, wo die horizontalen Böen ganz schön kräftig sein können. Hier wird das Höhenvario ein erstaunlich ruhiges Signal liefern, wo ein TE-Vario eine Anzeige produzieren kann, die zu interpretieren beinahe nicht mehr möglich ist. Hier ist das Höhenvario durchaus einen Versuch wert.

Die gleichzeitige Beobachtung eines TE- und eines Höhenvarios kann auch einige ganz interessante Informationen liefern: solange sie beide das gleiche Steigen anzeigen, hat man es mit einem wirklichen Bart zu tun; wenn nur das TE-Vario etwas anzeigt und das Höhenvario nichts, dann handelt es sich um eine Horizontalbö, die das Eindrehen nicht lohnt. Hier ist allerdings vorauszusetzen, dass man die Fahrt dabei nicht ändert, was beim Gleiten z.B. auf größeren Stücken oft sowieso der Fall ist. Wenn sich nur das Höhenvario rührt, dann ändert sich die Fahrt des Flugzeugs.

Mit etwas Erfahrung kann es durchaus eine gute Sache sein beide Variotypen an Bord zu haben. Allerdings sollte ihr Zeitverhalten nicht zu verschieden voneinander sein.

Ein weiterer Hinweis: Bei vielen Segelflugzeugen ist der Kabinendruck ein viel weniger gestörter statischer Druck als der, der von allen möglichen Löchern im Rumpf kommt.

Korrektur eines fehlerhaften Systems

1. Entgegen einer landläufigen Ansicht kann eine schlechte Kompensation nicht durch zusätzliche Dämpfung in der Variometerleitung (mit Kapillaren) korrigiert werden, man macht damit meistens aus einem schlechten TE-Vario nur einen noch schlechteren Mittelwertanzeiger.
2. Je schneller das Vario, desto deutlicher treten Fehler der Kompensation hervor, desto besser wird aber auch die Kompensation, wenn die pneumatische Seite des Systems in Ordnung ist, weil die störende Verzögerung des Signals geringer wird.
3. Fehler müssen zuerst an der Quelle gesucht werden, d. h. bei Düsenkompensation an der Düse und ihrem Einbau (siehe weiter oben). Bei elektrisch kompensierten und bei Membran-Systemen muss zunächst die statische Druckabnahme in Ordnung gebracht werden, ein allerdings sehr schwieriges Unterfangen.
4. Ist ein System mit Düse schlecht, liegt es an der Düse selbst (man sieht manchmal unglaubliches Gerät, wir haben an selbst gebastelten und sogar an kommerziellen Düsen Beiwerte von 0,8 bis 1.5 gemessen!), oder an der Einbaustelle, oder unter Umständen an einem falschem Einstellwinkel (wir haben schon Einbaufehler von schätzungsweise 30 Grad gesehen!), sofern

keine sonstigen Manipulationen vorgenommen wurden. (Es gibt Leute, die verschiedene Biegezustände einer Düse durchprobieren!) Es kann auch sein, dass Düse und Einbauort nicht zusammenpassen. (gute Düsen: $B = 0,95$ bis $1,05$)

5. Von Düsen in der Nähe des Flügels (Nähe heißt hier näher als etwa eine Flügeltiefe) muss generell abgeraten werden, da sie hier leicht in eine Abhängigkeit vom Auftriebsbeiwert, und damit vom Lastvielfachen geraten. Die Varioanzeige kann damit sehr leicht zu Fehlurteilen über die Qualität des Bartes führen, den man gerade sucht.
6. Katastrophale Auswirkungen können gequetschte Schläuche haben und Lecks.
7. Die Wissenschaft von der TE-Kompensation ist eine sehr komplexe Sache, die zu ihrer Beherrschung einige Jahre spezifischer Erfahrung und Kenntnisse in mehreren Disziplinen aus Natur- und Ingenieurwissenschaft erfordert. Basteln kann deshalb hier nur zum Misserfolg und zur Frustration führen.

