

Das Totalenergievariometer im Strömungsfeld der Thermik

Martin Dinges
Starnberg
martin.dinges@t-online.de

Vorgetragen beim XXVII OSTIV Congress, Leszno, Poland, 30 Juli - 6 August 2003

Abstract

Das Totalenergievariometer zeigt aus physikalischen Gründen zusätzliche Signale an, die auf den horizontalen Strömungen im Umfeld der Thermik beruhen. Eine genaue Beobachtung und Interpretation der Variometeranzeige verbessert die Entscheidungen, wo es angebracht ist einzu- kurven oder wann der Thermikkreis in eine bestimmte Richtung versetzt werden sollte.

Bezeichnungen

| | |
|--------------------|----------------------------------|
| E | Totalenergie |
| g | Erdbeschleunigung |
| H | Höhe |
| m | Masse |
| P _{stat} | statischer Druck |
| P _{TE} | Totalenergiegedruck |
| s | Weg |
| t | Zeit |
| v | Fahrt |
| V | Geschwindigkeit (Inertialsystem) |
| ρ | Luftdichte |
| ½ ρ v ² | Gesamtdruck |

Subscripts

| | |
|-----|---------------------------|
| GPS | global positioning system |
| TE | Totalenergie |

Einleitung

Mit dem klassischen Variometer wurde die Änderung des Luftdrucks im Flugzeug gemessen und damit ein Anzeigewert für die Steiggeschwindigkeit bereitgestellt. Die Entwicklung zum Totalenergie-Variometer zielte darauf ab, die vom Piloten gesteuerten Höhenänderungen im angezeigten Messwert zu unterdrücken. Es sollte also nur der Gewinn und Verlust von Energie angezeigt werden und nicht auch der Austausch von kinetischer Energie (Fluggeschwindigkeit) und potentieller Energie (Höhe).

Die Gesamtenergie E des Segelflugzeugs beträgt:

$$E = \frac{1}{2} m V^2 + m g H \quad (1)$$

Im Flugzeug wird der Totalenergiegedruck P_{TE} gemessen und ausgewertet, und zwar

$$P_{TE} = \frac{1}{2} \rho v^2 - P_{stat} \quad (2)$$

Somit werden auch Unregelmäßigkeiten bei der Messung des Staudrucks $\frac{1}{2} \rho v^2$, beziehungsweise der Fahrt v, auf den Anzeigewert des TE-Variometers übertragen. In der Umgebung von thermischen Aufwinden gibt es horizontale Strömungen, die den Messwert der Fahrt und damit auch die Anzeigewerte des TE-Variometers systematisch beeinflussen.

1 Horizontalböen

Die Fahrt v entspricht im Allgemeinen nicht der in einem Inertialsystem definierten Flugzeuggeschwindigkeit V. Dennoch wird für viele Anwendungen V mit der Fahrt v gleichgesetzt. Die das Flugzeug umgebende Luft ist nicht immer in Ruhe oder in gleichbleibender Bewegung, sondern kann selbst beschleunigenden Kräften unterworfen sein. Bei böigem Wetter, beim Durchfliegen eines Windsprunges oder in der bodennahen Schicht kann sich die Anströmgeschwindigkeit, die aus dem Staudruck ermittelt wird, plötzlich und unregelmäßig ändern. Mit anderen Worten:

Der Fahrtmesser und das TE-Variometer reagieren auf Böen, die eine Geschwindigkeitskomponente in Flugrichtung aufweisen (Horizontalböen). Beim Durchfliegen von Horizontalböen zeigt das TE-Variometer Steigen und Sinken an, was durchaus störend und unerwünscht sein kann. Das Flugzeug wird durch eine Horizontalböe natürlich abgebremst oder beschleunigt bis wieder ein Gleichgewicht der Kräfte am Flugzeug erreicht ist. Bei einem modernen Segelflugzeug mit geringem Widerstand wird aber die Anpassung durch den veränderten Widerstand aufgrund der veränderten Fahrt nur langsam erfolgen. Man kann sich das Flugzeug als Trägheitsplattform vorstellen, die ihre Bewegung in Flugrichtung längerfristig mangels angreifender Kräfte beibehält. Für manche Anwendungen im Segelflug würde man besser auf ein inertiales Messsystem zurückgreifen, z.B. ein GPS-Gerät mit hoher Abtastrate.

Derzeit nähert man sich dem Problem mit folgender Überlegung: Böen sind meist nur „kurzzeitig“ wirksam und gleichen sich im Mittel „bald“ aus. Im Vergleich dazu sind Fahrtänderungen des Flugzeugs aufgrund von Steuereingaben langsamer und nachhaltiger. Daraus resultiert die Überlegung, man müsse das Fahrtsignal dämpfen, um kurzzeitige Änderungen auszufiltern.

Bei den üblichen TE-Variometern führt das dazu, dass auch das Höhenänderungssignal in unerwünschter Weise gedämpft wird und die Ansprechgeschwindigkeit des Variometers insgesamt verlangsamt wird. Es ist naturgemäß eine Frage der persönlichen Vorliebe und der Gewöhnung, wie stark das Gerät – einstellbar – gedämpft sein soll. Beim Geradeausflug, insbesondere durch turbulente Luft, kann man die Dämpfung am Gerät höher einstellen als beim Zentrieren.

2 Das Windfeld im Inneren und in der Umgebung einer Thermik

Die von einem gleichmäßigen thermischen Aufwind, einer „freien Thermik“, induzierten Strömungen analysiert man meist genauer anhand eines Modells, mit dem das Strömungsverhalten eines Wirbelringes beschrieben wird (vortex ring, Ref. Woodward). Es gibt auch Messungen des Strömungsfeldes (z.B. Ref. Konovalov).

Die Vertikalgeschwindigkeit im Zentrum der Thermik ist von der Temperaturschichtung der freien Atmosphäre abhängig. Sie wächst in der unteren Schicht des Konvektionsraumes an, verändert sich im mittleren Bereich mehr oder weniger und wird mit Annäherung an die Obergrenze weitgehend abgebremst.

Im **unteren** Schicht des Konvektionsraumes:

- nimmt die Vertikalgeschwindigkeit zu;
- der Durchmesser des thermischen Aufwindes wächst an und ist dann im Kreisflug nutzbar;
- die aufsteigende Luft wird von unten und von der Seite ersetzt;
- es bildet sich eine horizontale, zur Mitte des Aufwindes hin gerichtete Strömung (inflow).

Im **mittleren** Bereich des Konvektionsraumes:

- kann die Vertikalgeschwindigkeit entsprechend dem Temperaturgradienten noch weiter ansteigen;
- der Durchmesser des Aufwindes vergrößert sich dabei weiter.;
- die zusätzliche aufsteigende Luft wird durch horizontale Zuströmung (inflow) geliefert.

Im **oberen** Bereich des Konvektionsraumes:

- kann der Aufwind unter der Wolkenbasis und in den Wolken erneut beschleunigt werden;
- mit der Annäherung an die stabileren Luftschichten wird der Aufwind abgebremst;
- die abgebremste Luft strömt horizontal von der Mittelachse des Aufwindes weg (outflow).

Bei der Annäherung an den thermischen Aufwind in niedrigen und mittleren Höhen (inflow) erfährt das Flugzeug Rückenwind, bei der Annäherung in größerer Höhe (outflow) Gegenwind. Die Geschwindigkeit der horizontalen Strömung ist zwar nicht stark aber regelmäßig. Um die Größenordnung abzuschätzen stützt man sich auf Modellrechnungen. Demnach kann am Rand eines thermischen Aufwindes die horizontale Zuströmgeschwindigkeit bis zu 20 % der Aufwindgeschwindigkeit in der Thermik betragen.

In einer Beispielrechnung soll dargelegt werden, mit welchen zusätzlichen Anzeigewerten das TE-Variometer beaufschlagt wird, wenn das Flugzeug bei Thermik in diesem Windfeld fliegt. Nach dem Konzept des TE-Variometers wird kinetische und potentielle Energie als Summe betrachtet:

$$m g H + \frac{1}{2} m v^2 = \text{constant}$$

oder,

$$g \frac{dH}{dt} + v \frac{dv}{dt} = 0. \quad (3)$$

Nach dieser Beziehung führt eine Fahrtänderung dv/dt zur Anzeige einer Höhenänderung dH/dt , also

$$\frac{dH}{dt} = -1/g v \frac{dv}{dt}.$$

Zum Beispiel soll das Segelflugzeug wie in der Fig. 2 dargestellt, im Horizontalflug mit $v = 25 \text{ m/s}$ (90 km/h) in eine Böe einfliegen, die auf einer Strecke von $ds = 100 \text{ m}$ die Fahrt um $dv = 1 \text{ m/s}$ linear ansteigen lässt. Die Fahrtanzeige beträgt dann $v + dv = 26 \text{ m/s}$ (93.6 km/h). Anschließend soll die Fahrt auf einer Strecke von 100 m linear auf den Ausgangswert 25 m/s zurückgehen.

Die Zeit dt , in der die Strecke ds zurückgelegt wird beträgt $ds/v = 4 \text{ sec}$. Bei der Eingabe des Fahrtsignals nach Fig. 2 zeigt sich ein TE-Signal gemäß Figur 3.

$$\frac{dH}{dt} = -1/g v \frac{dv}{dt} = 0.63 \text{ m/s}.$$

Wird diese Horizontalböe mit höherer Fahrt durchfliegen, gilt für das TE-Signal bei 113 km/h ein Wert von 1 m/s und bei einer Fahrt von 140 km/h ein Wert von 1.5 m/s.

3 Geradeausflug durch die Thermik im unteren Höhenbereich (inflow)

Dieses Beispiel bezieht sich auf ein TE-Netto-Variometer. Es wird das jeweilige fahrtabhängige Sinken des Flugzeugs zum TE-Variometer-Signal addiert. Ein derartiges TE-Netto-Variometer zeigt unabhängig von der Fahrt Null an, wenn die umgebende Luft ruhig ist.

Durchquert man die Thermik im unteren Bereich, beobachtet man bei der Annäherung eine Abnahme und beim Wegfliegen eine Zunahme der Fahrt aufgrund der zum Zentrum strömenden Luft (inflow). Nach unserer Modellrechnung soll die Strömungsgeschwindigkeit am Rand der Thermik bis auf 1 m/s ansteigen. Beim Durchflug durch die

Thermik mit gleichbleibender Längsneigung wird der Fahrtverlauf der Darstellung im Bild 4 entsprechen. Aus der Figur 5 ist ersichtlich, mit welchen zusätzlichen, aus dem Fahrtverlauf resultierenden Steigwerten das TE-Variometer beim Durchfliegen der Thermik beaufschlagt wird. Die meteorologische Aufwindverteilung (Vertikalströmung) ist aus einem Modell der freien Thermik (Ref. Woodward) in die Figur 6 übernommen worden. Die glockenförmige Kurve zeigt die Vertikalgeschwindigkeit der Luft im Querschnitt durch das Zentrum der Thermik. Ein schnelles Nettovariometer ohne Kompensation würde diesen Verlauf der Steiggeschwindigkeit wiedergeben. Dieser Verlauf wird mit der Anzeige des TE-Variometers verglichen, dessen Signal auch die Änderungen der Fahrt enthält (siehe Fig. 6). Bei modernen Geräten kann eine gewünschte, auch sehr kurze Zeitkonstante eingestellt werden. In der Figur 6 ist auch ein Beispiel für das zeitverzögert angezeigte Signal eingezeichnet.

Der Pilot wird die Anzeige des TE-Variometers beobachten, bevor er die Entscheidung darüber trifft, wann und wie er einkurvt, um schon den ersten Kreis nahe beim Aufwindzentrum zu platzieren. Durch den Effekt der zuströmenden Luft (inflow) wird das TE-Variosignal (Figur 6) nicht grundsätzlich verändert. Bei Annäherung an den Rand des Aufwindes wird stärkeres Sinken angezeigt, während am Rand das Signal steil ansteigt und das Steigen im Zentrum überhöht dargestellt wird. Vom TE-Variometer wird der Signalverlauf natürlich geglättet und zeitverzögert wiedergegeben. Die Entscheidung zum Einkurven kann demnach anhand des TE-Variometers getroffen werden. Die bekannten Regeln zum Einkurven und Versetzen sind im unteren und mittleren Bereich des Konvektionsraumes, also bei Zuströmung (inflow), bewährt und erfolgreich.

4 Geradeausflug durch die Thermik im oberen Bereich (outflow)

Durchquert man eine Thermik nahe der oberen Grenze des Konvektionsraumes, wird sich ein Verlauf des Fahrtsignals ergeben, wie er in der Figur 6 schematisch dargestellt ist. Die Fahrtzunahme bei der Annäherung an den Aufwind und die Abnahme im Bereich des Aufwindes beruhen auf der im oberen Teil der freien Thermik vorliegenden horizontalen Abströmung (outflow). Aus der Figur 8 ist ersichtlich, mit welchen zusätzlichen, aus dem Fahrtverlauf (Figur 7) resultierenden Steigwerten das TE-Variometer beaufschlagt wird. In der Figur 9 ist die Aufwindverteilung mit den zusätzlichen Signalen aus der Figur 8 überlagert. Aus diesem Signalverlauf ist der beste Zeitpunkt zum Einkurven nicht so offensichtlich zu erkennen. Schon vor dem Erreichen der Thermik steigt das Signal an, am Rand der Thermik fällt das Signal und erreicht dann den Maximalwert.

Bevor bei outflow die Entscheidung zum Einkurven getroffen wird, ist zu bedenken:

--- Schwaches Steigen ohne merkbare Vertikalbeschleunigung lässt darauf schließen, dass der Rand der Thermik noch nicht erreicht ist.

--- Ist keine Vertikalbeschleunigung (Sitzdruck) fühlbar, ist das Einkurven nicht angeraten.

Starke Horizontalböen können verheißungsvolle Anzeigewerte am Variometer hervorrufen und den Piloten zum Einkurven verführen. Liegt eine Horizontalböe vor, dann wird bereits nach einer Richtungsänderung von weniger als 90 Grad starkes Fallen angezeigt. Jetzt empfiehlt es sich, sofort wieder auf Kurs zu gehen. Wenn der eingeleitete Kreis fortgesetzt wird, entsteht meist ein größerer Verlust an Höhe und Zeit.

5 Messungen im Flug

Die Figur 10 zeigt die Wiedergabe eines Messschriebs mit dem zeitlichen Verlauf der Fahrt und das Signal eines TE-kompensierten Variometers. Man erkennt am Fahrtschrieb kurzzeitige Schwankungen, die wohl von Verwirbelungen herrühren. Die mittelschnellen Änderungen des Fahrtsignals gehen wohl kaum auf eine Beschleunigung oder Verzögerung des Flugzeugs zurück. Einerseits würde der Pilot die dabei auftretenden Kräfte spüren, andererseits würde es zu bedeutenden aerodynamischen Verlusten führen. Es handelt sich offenbar um Auswirkungen von Horizontalströmungen, die sowohl im Fahrtsignal als auch im TE-Variometer-Signal erkennbar sind.

6 Kreisflug neben dem Zentrum der Thermik

Nach dem Einkurven zum Kurbeln wird zumindest der erste Kreis nicht mit dem Zentrum des Aufwindes übereinstimmen. Aus dem Anzeigeverlauf des TE-Variometers wird abgeleitet, in welche Richtung der Kreis versetzt werden sollte. Auch hier hat die Horizontalströmung (inflow oder outflow) in der Umgebung der Thermik Einfluss auf die Anzeige des TE-Variometers.

In der Figur 11 ist die Situation dargestellt. Der Mittelpunkt des geflogenen Kreises soll 100 m von der Mittelachse der Thermik entfernt liegen. Der Kreisradius beträgt etwa 80 m. Der Vollkreis dauert 20 Sekunden bei einer Geschwindigkeit von 25 m/s (90 km/h) und einer Schräglage von 39 Grad.

An den Punkten 0 und 2 der Flugbahn (Figur 11) ist die Radialströmung jeweils quer zur Flugbahn gerichtet. Das Fahrtsignal und das TE-Variometer-Signal bleiben in diesen Punkten von inflow oder outflow unbeeinflusst.

6.1 Inflow

Die Figur 12 zeigt das Fahrtsignal während des Kreisfluges. Die dargestellten Fahrtänderungen werden durch die Zuströmung zum Aufwind hin (inflow) verursacht. Die aus dem Fahrtverlauf resultierenden TE-Werte beaufschlagen das TE-Variometer mit einem zusätzlichen Signal (Figur 13). In der Figur 14 ist der Verlauf der Vertikalgeschwindigkeit der Luft (Aufwindverteilung) auf dem Kreis (0-1-2-3) neben dem Zentrum der Thermik dargestellt. Das TE-Variometer spricht zusätzlich noch auf das auf der Fahrtänderung beruhende Signal an. (siehe Figur 14).

Dem Verlauf des TE-Vario-Signals kann man die Lage des Zentrums recht gut zuordnen. Das Maximum des TE-Signals liegt dem Aufwindzentrum (Punkt 2) sehr nahe. Das Minimum der Kurve entspricht dem Punkt der Flugbahn, der am weitesten vom Aufwindzentrum entfernt ist (Punkt 0). Demzufolge ist es angebracht, den Kreis zum Maximum hin zu versetzen (best heading rule) oder vom Minimum weg zu verlagern (worst heading rule). Diese beiden Methoden sind dem Segelflieger bekannt und geläufig. Sie werden auch durch die GPS-gestützten Zentrierhilfen unterstützt. Eine weitere Methode wird durch die Figur 14 nahe gelegt. Man kann auf einen starken und anhaltenden Anstieg des Variometersignals unmittelbar reagieren (best gradient rule) indem man den Kreis an dieser Stelle erweitert.

Aufwinde mit inflow lassen sich meist erfolgreich zentrieren, auch wenn sie oft in geringer Flughöhe angetroffen werden und dementsprechend geringe Durchmesser aufweisen. Die Strömung zum Zentrum hin bringt das Flugzeug zudem mit jedem Kreis dem Zentrum näher.

6.2 Outflow

Die Figur 15 zeigt das Fahrtsignal während des Kreisfluges. Die Fahrtänderungen werden durch die Abströmung vom Zentrum des Aufwindes weg (outflow) verursacht. Die aus dem Fahrtverlauf resultierenden TE-Werte beaufschlagen das TE-Variometer mit einem zusätzlichen Wert (Figur 16). In der Figur 17 ist wieder der Verlauf der Vertikalgeschwindigkeit der Luft (Aufwindverteilung) auf der Kreisbahn (0-1-2-3) neben dem Zentrum der Thermik dargestellt. Das TE-Variometer wird mit dem Signal angesteuert, das die Vertikalgeschwindigkeit und den zusätzlichen Wert aus der Fahrtänderung enthält (Figur 17). Es ist auch ein Anzeigeverlauf eingezeichnet, wie er von einem schwach gedämpften Gerät wiedergegeben wird. Ein TE-Variometer-Signal mit diesem Verlauf liefert keinen deutlichen Hinweis auf die Lage des Aufwindzentrums in Bezug zur Kreisflugbahn. Es zeigt auch kein deutliches Maximum oder Minimum. Die bekannten Methoden der Kreisverlagerung zum Maximum hin (best heading rule) oder vom Minimum weg (worst heading rule) sind wenig geeignet.

Am besten orientiert man sich am steil ansteigenden TE-Signal bei der Annäherung an die Thermik (best gradient rule). Das Flugzeug ist bereits ab dem Punkt 1 der Kreisbahn zum Aufwind hin gerichtet.

Wenn wir davon ausgehen, dass outflow vorliegt, dann wird das Flugzeug beim weiteren Kurven zum Punkt 2 zunehmenden Gegenwind erfahren. Noch bevor es den Rand des Aufwindes erreicht hat, zeigt das TE-Variometer aufgrund des zunehmenden Gegenwindes ein ansteigendes Signal. Das ist der Hinweis, dass wir auf dem rechten Weg zum Zentrum des outflow, also auch zum Zentrum des Aufwindes sind. Beim Einflug in den Aufwind steigt das TE-Variometersignal noch weiter an. Im besten Fall wird der Rand des Aufwindes für den aufmerksamen Piloten wegen des zunehmenden Sitzdrucks kenntlich.

Bei outflow kann das Zentrieren folgendermaßen durchgeführt werden:

Der steile Anstieg des TE-Variometer-Signals und gegebenenfalls der verzögerungsfrei spürbare Sitzdruck kündigen die Lage des Aufwindzentrums rechtzeitig an. Nun wird durch unverzügliches Reduzieren der Drehung oder durch Ausleiten der Kurve der Kreis in die gewünschte Richtung zum Zentrum hin erweitert. Es wird empfohlen, den Kreis um einen halben Kreisdurchmesser zu verlagern. Das entspricht einer Flugdauer von 3 bis 4 Sekunden. Während des anschließenden Vollkreises wird der Verlauf des TE-Variometer-Signals und der Sitzdruck beobachtet und die Drehgeschwindigkeit beibehalten. Anschließend kann man auf einen steilen Anstieg des TE-Variometer-Signals erneut reagieren und den Kreis verlagern. Bei dieser Vorgehensweise kann das TE-Variometer auf eine geringe Dämpfung eingestellt werden.

Zusammenfassung

Das TE-Variometer zeigt systembedingt zusätzliche Steigwerte an, die auf inflow im unteren und mittleren Höhenbereich oder auf outflow im oberen Bereich der thermischen Aufwinde zurückzuführen sind. Liegt inflow vor, unterstützt das TE-Variometer-Signal die bekannten Zentriermethoden (best heading rule, worst heading rule, best gradient rule), die das Verlagern des Thermikkreises zum Zentrum hin ermöglichen.

Bei **outflow** werden jedoch Maxima und Minima des Steigens nicht wie erwartet angezeigt. In diesem Fall führt weder die best heading rule noch die worst heading rule zum Ziel. Zum Erfolg führt nur die **best gradient rule**:

Man reagiert bei outflow-Bedingungen auf einen starken und anhaltenden Anstieg (Gradienten) der Anzeige des TE-Variometers. Daraufhin kann der Kreis zum Aufwindzentrum hin verlagert werden.

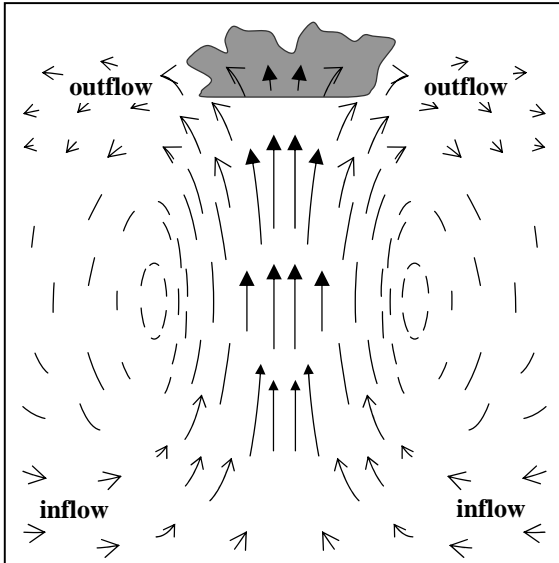
Literatur

¹Woodward, B., *A Theory of Thermal Soaring*, OSTIV Publication IV, July 1959.

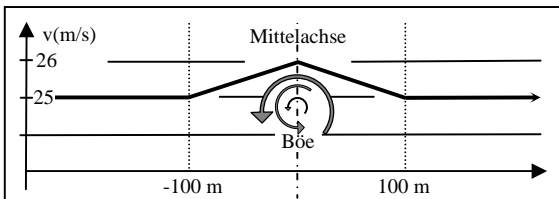
²Kononov, D. A., *On the Structure of Thermals*, OSTIV Publication XI, 1970.

³Deutsche Patentschrift P 3639398 vom 3.3.1988

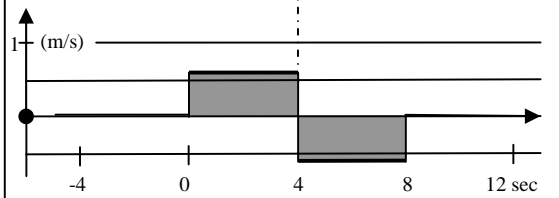




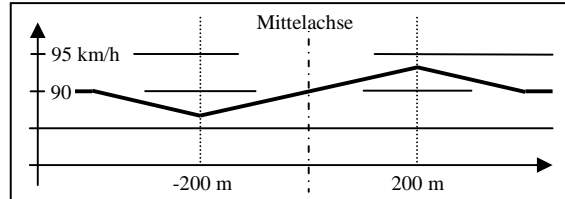
Figur 1 Inflow und outflow in der Umgebung eines thermischen Aufwindes



Figur 2 Fahrtänderung beim Flug durch eine Horizontalböe.



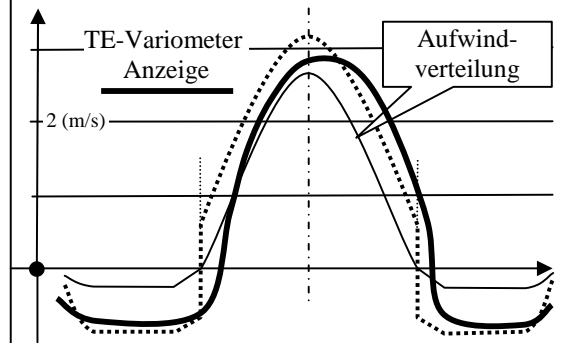
Figur 3 Zusätzliches TE-Variometer-Signal.



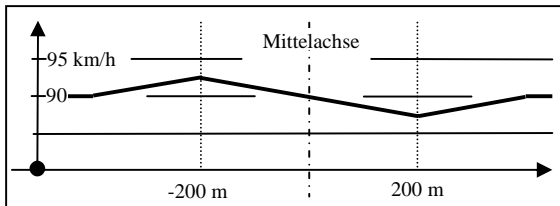
Figur 4 Flug durch die Thermik, Fahrt bei inflow (von links).



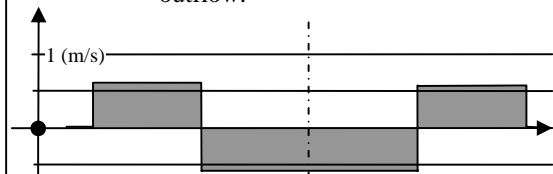
Figur 5 Zusätzliches TE-Vario-Signal (inflow)



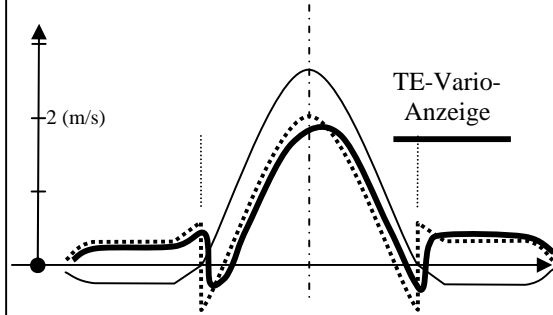
Figur 6 Aufwindverteilung und TE-Vario-Signal bei inflow.



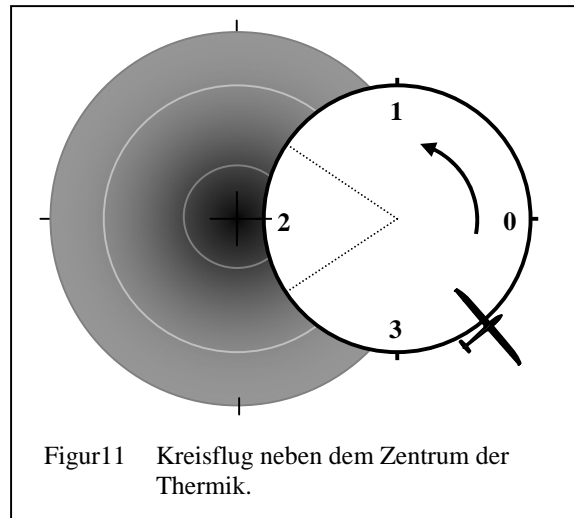
Figur 7 Flug durch die Thermik, Fahrt bei outflow.



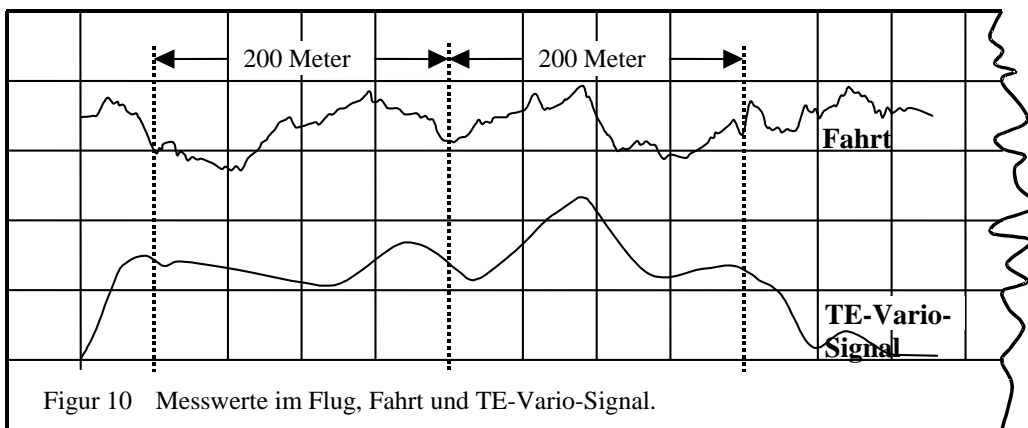
Figur 8 Zusätzliches TE-Vario-Signal bei outflow.



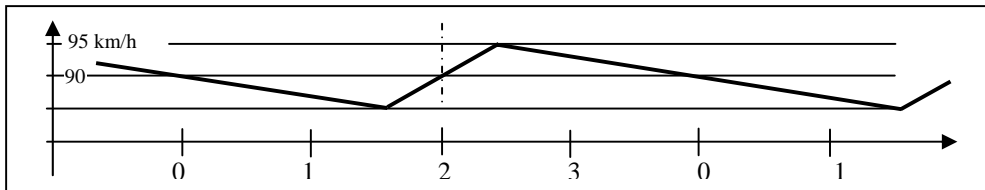
Figur 9 Aufwindverteilung und TE-Vario-Anzeige bei outflow.



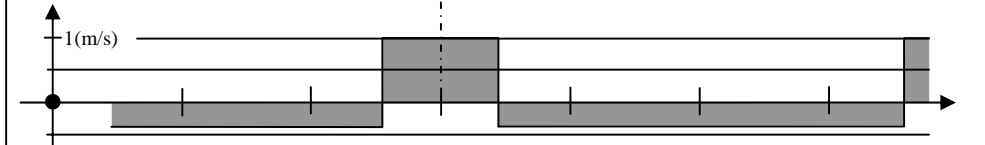
Figur11 Kreisflug neben dem Zentrum der Thermik.



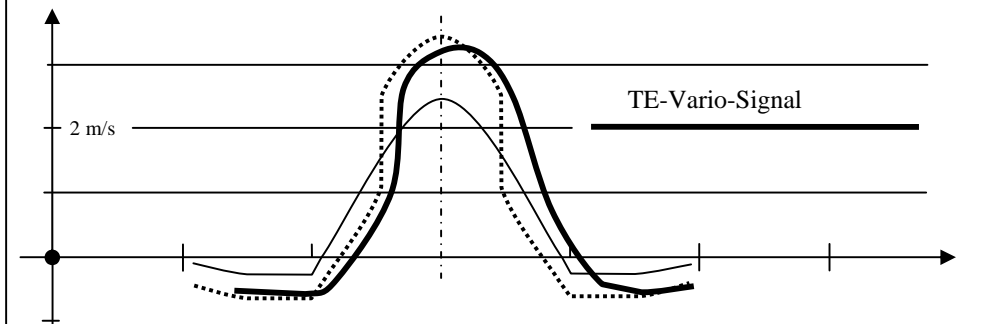
Figur 10 Messwerte im Flug, Fahrt und TE-Vario-Signal.



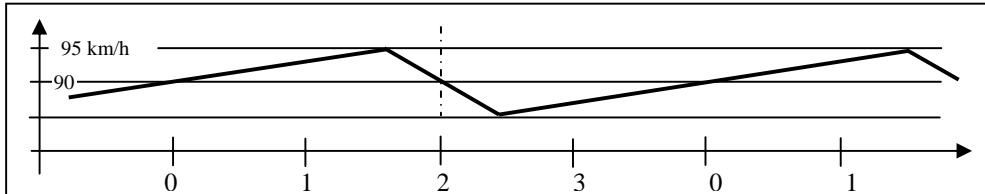
Figur 12 Kreisflug neben dem Zentrum, Fahrt bei inflow.



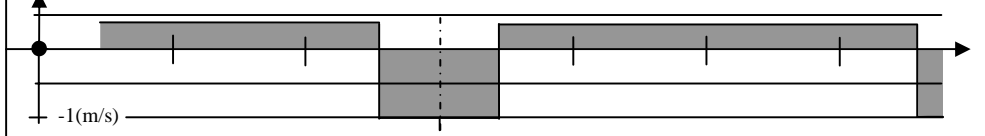
Figur 13 Zusätzliches TE-Vario-Signal im Kreisflug bei inflow.



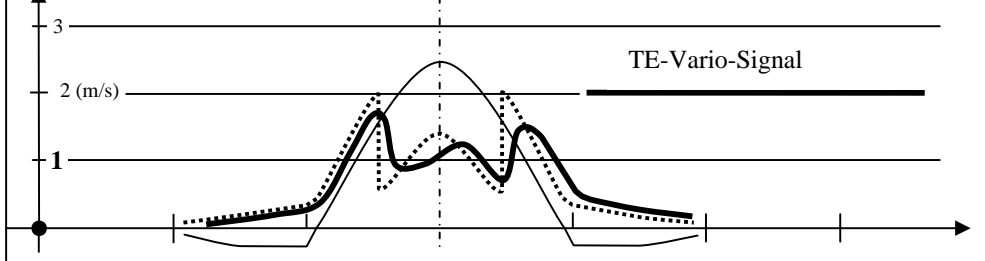
Figur14 Aufwindverteilung und TE-Vario-Signal bei inflow.



Figur 15 Kreisflug neben dem Zentrum der Thermik, Fahrt bei outflow.



Figur 16 Zusätzliches TE-Vario-Signal bei outflow.



Figur17 Aufwindverteilung und TE-Vario-Signal bei outflow.