FEUCHTIGKEIT – DIE „SEELE DER THERMIK“

Version 3.0 neu

1. April 2012

INHALT

- Zusammenfassung
- Thermik, das unbekannte Wesen.
- Thermik, das ist warme Luft, - oder etwa nicht?
    - Temperatur von Warmluftpolstern am Boden
    - Auslöser
    - Temperatur von Warmluftblasen in der Höhe
    - Wasserdampf, die „Seele“ eines Aufwindes
- Praxistauglichkeit und ein historischer Fehler
    - Stabile vs. Labile Schichtung
    - Theorie seit 1956
    - Eine konvektive Schicht ist immer indifferent
- Stark oder schwach? – Die Steigwerte im Aufwind.
    - Die Größe machts
    - Warum werden Bärte mit der Höhe manchmal stärker
    - Blauthermik vs. Wolkenthermik
    - Steigen an der Wolkenbasis
    - Einfluss der vertikalen Wolkenmächtigkeit
    - Wolken-Untergrenzen
    - Abnehmende Steigwerte mit der Höhe
    - Blauthermik
    - Zerrissene Thermik
    - Thermik bei starkem Wind
- Thermikdauer – wodurch wird sie bestimmt?
    - Strahlungs-Bilanz
    - Latente Wärme
    - Polarluft
- Alles zusammen – die Thermik im Gebirge
- Schluss-Bemerkungen

Zusammenfassung

Thermik! – Wie „funktioniert“ sie eigentlich? - Die gängige Vorstellung: Die Sonne erwärmt den Boden, und der wiederum die Luft darüber. Warme Luft steigt auf, solange sie wärmer ist als die Umgebungsluft (und damit leichter). –

Jetzt kühlt sich aber aufsteigende Luft immer mit 1° Celsius pro 100 m ab. - Damit Thermikluft wärmer bleiben kann als ihre Umgebung, muß also bei gutem Wetter die Temperaturabnahme der Umgebungsluft ausserhalb des Thermikschlauches gleich oder größer als 1° C pro 100 m sein, sonst geht der Temperaturvorsprung allmählich gegen Null und auch die Thermik hört auf... - An guten Tagen spricht man in Fachkreisen deshalb gern von „ labiler Schichtung“, da sich in der Atmosphäre theoretisch kein Temperatur-Gleichgewicht zwischen Aufwind und Umgebung einstellen kann ... - An schlechten Tagen ist die Schichtung halt zu „stabil“ und die Thermik wird eben schwächer...!

Mit diesen Erklärungen kommt man normalerweise sehr gut in der Praxis zurecht... Aber sie beantwortet viele der Fragen nicht, die sich einem erfahrenen Segelflieger stellen, wenn er seine Beobachtungen zum Wettergeschehen und die gängigen Theorien in Einklang bringen will ...

Wenn z.B. die Luft am Boden unterschiedlich erwärmt werden kann, dann ist das zwar eine mögliche Erklärung dafür, warum es an ein und demselben Tag stärkere und schwächere Aufwinde gibt. – Aber wenn die Thermik-Temperaturen doch so unterschiedlich sind, warum ist die Basis aller Wolken in der näheren Umgebung trotzdem immer gleich hoch? – Eine Warmluftblase, die anfangs nur 2 Grad wärmer war als die Nächste in der Nachbarschaft, würde eine 250 m höhere Wolkenbasis erzeugen. – (125m / 1°C). - Warum nimmt die Thermikstärke manchmal mit der Höhe sogar noch zu und ist direkt unter der Basis am stärksten? - Warum brüllt die Thermik an manchen Tagen geradezu, ist aber wenige Tage später bei gleicher Einstrahlung nur noch schwach ausgeprägt? - Warum gibt’s Tage an denen die Thermik schon sehr früh einsetzt und lange anhält, an anderen Tagen dagegen sind die Aufwinde nur schwach?

Mit etwas Phantasie lassen sich auch diese Phänomene noch einigermaßen mit dem oben erwähnten Schichtungs-Modell erklären, aber richtig zufriedenstellende Antworten liefert es nicht. - Aus gutem Grund: Es ist schlichtweg falsch! – Denn so gängig diese Erklärungen in der Literatur auch sein mögen, sie haben einen gravierenden Nachteil: Sie lassen sich in der Praxis, auch an Tagen mit guter Thermik, nicht nachweisen!

Zwar kann man in starken Bärten und in Bodennähe noch halbwegs signifikante Temperatur-Vorsprünge der Thermik messen, aber diese Differenzen verlieren sich mit zunehmender Höhe und verschwinden schliesslich ganz! - Auch die angeblich labile oder stabile Schichtung im Konvektionsraum, die so bekannte Phänomene wie unterschiedliche Thermikdauer bei gleicher Einstrahlung oder stark variierende Steigwerte erklären soll, kommt in der Praxis nicht vor: An einem guten Thermiktag wird man im Konvektionsraum maximal eine indifferente (also nie eine trocken labile, höchstens eine leicht stabile) Schichtung mit einem Gradient von < 1 antreffen! Also bestenfalls eine konstante Temperatur abnahme mit der Höhe von nahezu 1° C/100m.

Erst wenn man berücksichtigt, daß feuchte Luft ebenfalls leichter ist als trockene (und damit Auftrieb erzeugt), und wenn man die Relative Feuchte im Aufwind mit ins Kalkül zieht, hat man ein Modell an der Hand, mit dem man einleuchtend und nachvollziehbar erklären kann, was in einem Aufwind so alles passiert.

Die Sonne ist also unbestritten der „Motor unseres Wetters“, aber – die Feuchtigkeit ist die „Seele des Aufwinds“!

Thermik, das unbekannte Wesen

Thermik! – Jeder Segel-, Drachen- oder Gleitschirmflieger kennt sie in vielfältigen Variationen: Stark und gleichmäßig, unrund oder zerrissen. Er hat sie als Blauthermik oder als Blase kennen gelernt, oder er hat sie als als Hammerbart „ausgekurbelt". Mal hat er mühsam „einen ausgegraben", mal über 4m/sec integriertes Steigen gejubelt oder mit seinem Flugzeug einfach nur „in einem Nullschieber geparkt". Und doch können viele Piloten diese Variationen nicht vorhersagen oder gar schlüssig erklären. Am selben Tag kann ein Bart 2,5 m/sec Steigen bringen, der nächste aber nur schlappe 1 m/sec. Es gibt Wetterlagen, da „zieht jede Wolke", an anderen Tagen geht bei fast gleicher Wetteroptik nicht viel und der enttäuschte Pilot tituliert die Cumuli zu Recht als „Wassersäcke"...

Weiter gehende Fragen stellt man sich selten. Warum geht die Thermik zur gleichen Jahreszeit manchmal schon um 9.00 Uhr los, am nächsten Tag aber erst um 11.00 Uhr? - Oder warum kommt sie bei ansonsten gleicher Sonnen-Einstrahlung gar nicht erst richtig in Gang? – Warum sind die Wolkenbasen an einem Tag (fast) alle gleich hoch, obwohl darunter sehr unterschiedlich starke Aufwinde anzutreffen sind? - Warum ziehen an solchen Tagen manche Bärte mit 3 m/sec, andere dagegen nur mit einem Meter? – Warum nehmen die Steigwerte manchmal mit der Höhe sogar zu? - Warum hält Thermik an manchen Tagen bis Sonnenuntergang, an anderen „stellt sie aber schon am frühen Nachmittag ab"? – Warum ist Wolkenthermik üblicherweise stärker als Blauthermik?

Schlüssige Antworten auf diese Fragen findet man selten. Wenn überhaupt, dann werden Temps bemüht, um die Schichtung der Atmosphäre zu ergründen und man behilft sich mit Modellen, die von labiler, indifferenter oder aber stabiler Schichtung sprechen. Labile Schichtung soll für starke Thermik, stabile Schichtung für schwache, bzw. schwächer werdende Thermik verantwortlich sein. - Kaltluftzufuhr in der Höhe läßt dann lang anhaltende Thermik erwarten und so weiter... - Erstaunlich, wie wenig wir Segelflieger über die Hintergründe wissen, wenn man bedenkt, wie abhängig unser Sport gerade von diesen Aufwinden doch ist. – Thermik, das unbekannte Wesen!

In den folgenden Kapiteln werden wir die Thermik deshalb mal etwas genauer unter die Lupe nehmen und einige der oben aufgeworfenen Fragen ausführlicher beantworten. Dabei werden auch einige, weit verbreitete Vorstellungen über den Haufen geworfen, die unser landläufiges Bild von der Funktionsweise der Thermik nach wie vor dominieren!

Thermik, das ist warme Luft, - oder etwa nicht?

Jeder Segelflieger weiss, daß die Sonne der Motor unseres Wetters ist. Die Einstrahlung erwärmt den Boden. Dieser wiederum gibt die aufgenommene Energie an die Umgebungsluft ab, die sich dadurch ihrerseits erwärmt. Hat sich ein genügend grosses Warmluftpolster gebildet, das wärmer ist als die Umgebungsluft, dann kann es aufsteigen und einen Thermikschlauch ausbilden. Mit ein bischen Glück kann dieser Bart ein Segelflugzeug dann bis an die Wolkenbasis tragen. Die gängige Vorstellung dabei: Ein Luftpaket steigt wie ein Heissluftballon, solange es wärmer es ist als seine Umgebung. Verliert es seinen Temperaturvorsprung, erlischt der Auftrieb und die Thermik hört auf...

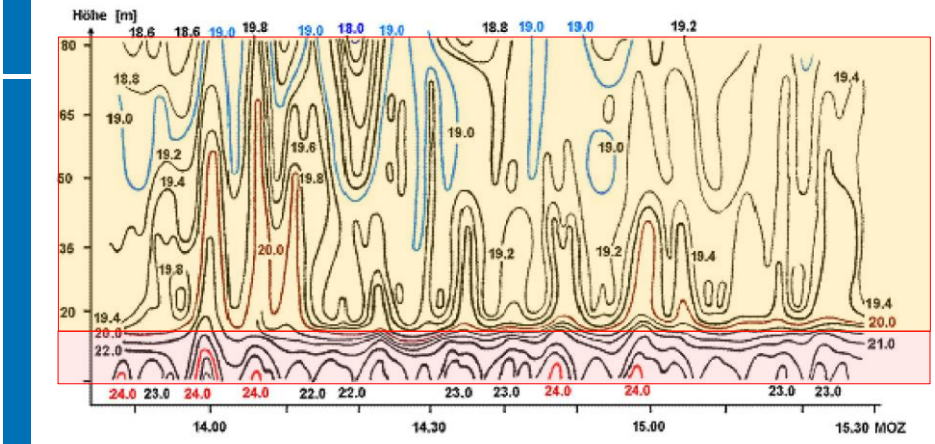
Temperatur von Warmluftpolstern am Boden

Wie stark erwärmt sich denn die Thermik-Luft am Boden, bzw. um wieviel wärmer ist sie normalerweise als die Luft in der unmittelbaren Umgebung? – Stellt man diese Frage einer Reihe von Segelfliegern, erntet man bereits nachdenkliche Blicke! – „Hmm! – Ich

schätze mal ...“, kommt dann als Antwort, und die genannten Werte variieren von 2 Grad Celsius bis zu 20 Grad, manchmal sogar mehr!

Tatsächlich liegen die Temperatur-Differenzen in dieser Bandbreite, je nachdem in welcher Höhe man gemessen hat. Je näher am Boden gemessen wird, desto größer übrigens die Unterschiede. Selbst 30° Celsius direkt an der Oberfläche gemessen sind da keine Seltenheit. Entscheidend ist nur die Beschaffenheit der Oberfläche.

Die Luftschicht, die sich wie eine warme Haut über dem Boden bildet, ist allerdings nur wenige Meter dick. In ca. 10 m Höhe sind die gravierendsten horizontalen Temperatur-Unterschiede bereits weitgehend ausgeglichen. Die maximale Obergrenze dieser sogenannten überadiabatischen Schicht liegt bei ca. 20m Höhe. Siehe Bild unten (Walter Georgii, 1956). Darüber schwanken die Temperaturen nur noch minimal, oft um weniger als ein Grad!



Die Grafik zeigt den Temperaturverlauf zwischen 13.00 und 15.30 MOZ bis 80 m Höhe (nach G. Fritsche u. R. Stange, 1936). Die überadiabatische Schicht wird durch eine ausgeprägte Sperrschicht in etwa 15 m Höhe, in der die horizontalen Temperaturgegensätze gering sind, begrenzt. Bis zu ihr werden offenbar geringe Überhitzungen durch Reibung und turbulente Mischung abgebaut, so dass nur stärkere Thermikelemente (s. 14.00 MOZ) diese Grenzfläche durchstoßen können. Betrachtet man den maximalen vertikalen Temperaturgradienten der untersten 15 m, dann ergibt sich ein ausgeprägter überadiabatischer Temperaturgradient von ca. 4 K pro 15 m oder hochgerechnet von etwa 27 K pro 100 m.

42 HENRY BLUM

Auslöser

Wie und wann so eine überwärmtes Luftpolster entstehen und „ausgelöst“ werden kann, darüber gibt’s es unzählige gute Beschreibungen in der Literatur. Warmluft entsteht z.B. an der Sonne zugewandten Hängen, speziell wenn sie windgeschützt im Lee liegen oder über sich rasch erwärmenden Flächen, wie dunklen, fein geeggten Äckern usw. - Entsprechende Thermik-Auslöser können Waldkanten sein, Absätze im Hang, Gewässergrenzen, ein fahrender Mähdrescher oder einfach nur ein Kartoffelfeuer, wie unten zu sehen.

Sie alle haben ihre Berechtigung, sind erfahrenen Piloten bestens bekannt und werden im Folgenden deshalb nicht weiter behandelt.

Wichtig erscheint mir in diesem Zusammenhang nur, daß eine Ablösung einer Thermikblase auch ohne Hindernis, einen Waldsaum, eine Geländekante oder einen Windenstart erfolgen kann. Laut Walter Georgii (1956) genügt theoretisch eine Überwärmung der bodennahen Schichten mit einem Gradienten von 3,4° Celsius/100m gegenüber der darüber liegenden Luft, um quasi zufällig Thermik erzeugen zu können, da damit der Grenzwert des mechanischen Gleichgewichts überschritten ist. Dieser Gedanke wird wichtig, wenn wir uns später mit Thermik bei Starkwind beschäftigen. Starker Wind läßt keine isolierten Warmluftblasen am Boden mehr zu, sondern die Thermik entsteht dann „zufällig“ aus einer turbulenten, überwärmten bodennahen Grenzschicht, die durchaus mehrere hundert Meter hoch gleichmäßig durchmischt sein kann...

Temperatur von Warmluftblasen in der Höhe

Wenn also Thermik nichts anderes wäre als eine Warmluftblase, die steigt, weil sie wärmer ist als ihre Umgebung, dann müßten sich Temperaturunterschiede auch in größerer Höhe nachweisen lassen. Dem ist aber nicht so. In etwa 200 m über Grund sind selbst große Temperatur-Differenzen im Durchschnitt auf weniger als 0,3 °C geschrumpft. In 600m Höhe sind oft nur noch 0,15 °C meßbar. Ab einer Höhe von etwa 1000m über Grund sind in der Regel keine nennenswerten Temperatur-Unterschiede der Thermik mehr nachweisbar! – Diese Erkenntnis geht auf Meßflüge mit einem Motorsegler zurück, die Carsten Lindemann 1977 durchgeführt hat und die von Detlef Müller und Christoph Kottmeier (1984) sehr aufschlussreich kommentiert wurden.

Vermessungen von C.Lindemann zeigen tatsächlich für die thermisch durchmischte Schicht erstaunlich geringe Temperaturdifferenzen, sie liegen bei einer mittleren Höhe der durchmischten Schicht von 1300m in 200m Höhe im Mittel bei etwa 0.3 K, in 600m bei 0.15K und in 1000m bei 0K (siehe Abb.22). Die Maximalwerte haben etwa den doppelten Wert.

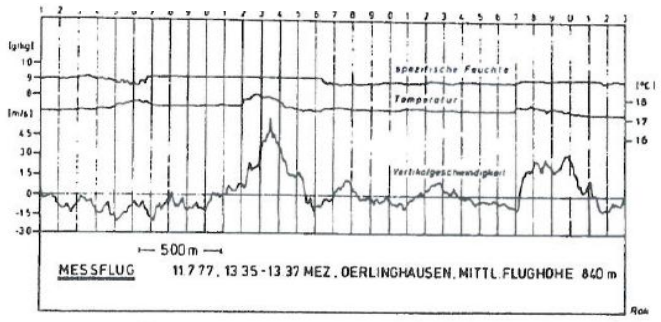


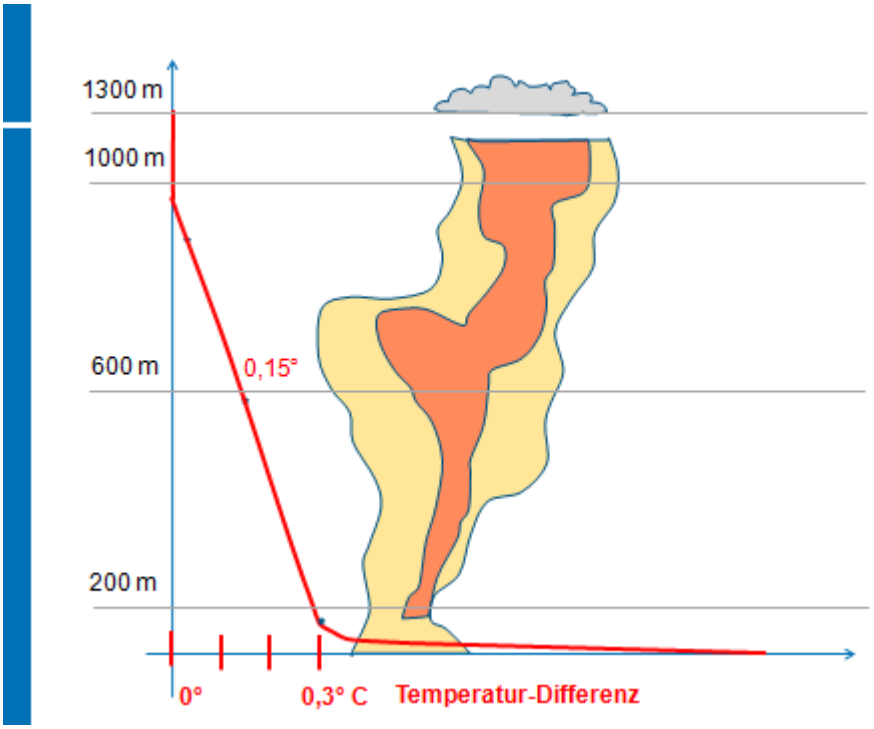
Abb.22: Thermikmessflug mit einem Motorsegler, bei dem Vertikalgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte gemessen wurde. (C.Lindemann)

243 HEINKT BLUM

Das obige Bild zeigt Kopien der entsprechenden Textstellen in ihrem Bändchen: Müller D, Kottmeier C. (1984). *Meteorologische Aspekte des Streckensegelflugs,* Selbstverlag – Hannover.

Temperatur-Unterschiede zwischen Thermik und Umgebung sind hier im Text übrigens in Grad Kelvin wiedergegeben, während ein aufmerksamer Leser im Diagramm sehen kann, daß ein 4,5 m/sec Bart einen kleinen Temperatur-Sprung von wenigen Zehntel Grad Celsius ausführt. Das steht nicht im Widerspruch zueinander. Da das Messflugzeug beim Durchfliegen des Bartes seine Höhe ändert, wird diese Schwankung bei der Berechnung der Thermik berücksichtigt. Das Ergebnis wird als potentielle Temperatur in Grad Kelvin dargestellt.

Die Tatsache, daß Temperatur-Unterschiede zwischen Thermik und Umgebung selbst bei starken Bärten relativ gering ausfallen, sind für die weitere Überlegung so wichtig, daß die Kernaussagen von Carsten Lindemann’s Messflügen in der folgenden Grafik noch mal dargestellt sind. Der Einfachheit halber bleiben wir ab jetzt bei Grad Celsius in den Skalen.

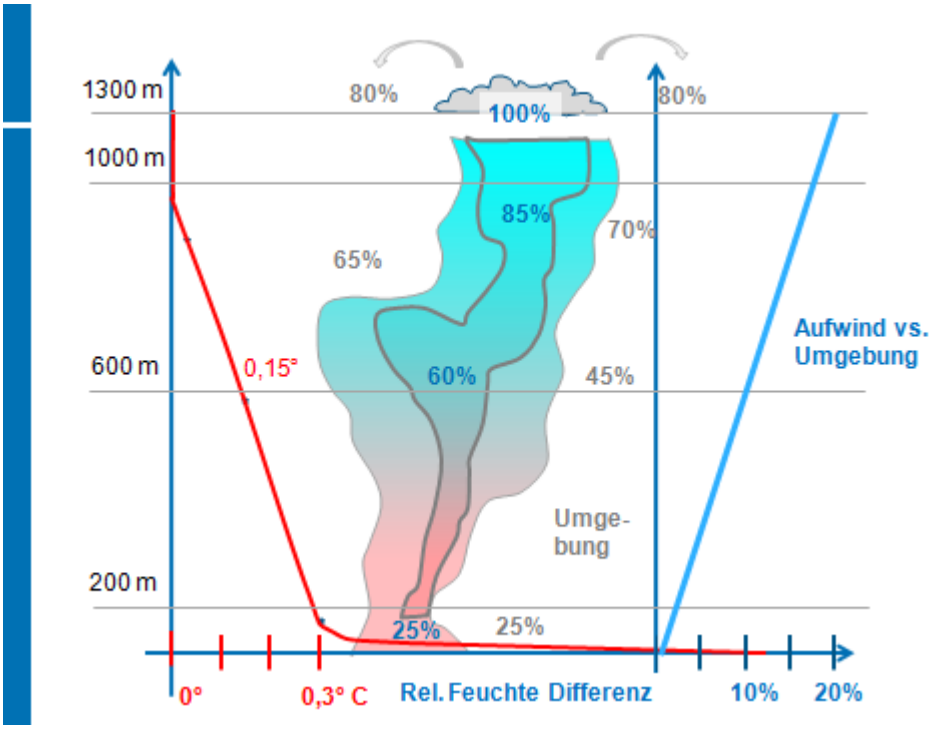


Trotz dieser geringen Temperatur-Differenzen haben wir an guten Tagen nicht nur gute Steigwerte (je höher die Basis, desto größer übrigens das durchschnittliche Steigen), es kann durchaus vorkommen, daß die Steigwerte mit der Höhe sogar noch zunehmen... Wie geht das zusammen? – Woher kommt der Auftrieb, der die Aufwinde weitersteigen läßt und sie noch an Stärke gewinnen läßt, wenn sich in der Thermik selbst gar keine Temperatur-Unterschiede mehr messen lassen?

Wasserdampf, die „Seele eines Aufwindes“

Die Antwort auf diese Fragen finden wir, wenn wir die Feuchtigkeit mit ins Kalkül ziehen, denn abhängig von der Temperatur kann Luft unterschiedlich viel Wasserdampf speichern. Bei niedrigen Temperaturen nur wenige Gramm pro Kubikmeter, bei hohen Temperaturen wesentlich mehr. Die „Relative Feuchte“ bezeichnet deshalb das Verhältnis von tatsächlich vorhandenem Wasserdampf zum maximal möglichen Dampfgehalt der Luft bei einer bestimmten Temperatur.

Aufsteigende Thermik-Luft kühlt sich immer um ca. 1°C/100m ab. (Meteorologen bezeichnen das auch als trocken-adiabatische Temperatur-Änderung). Ist die Temperatur soweit abgesunken, daß Kondensation des mitgebrachten Wasserdampfs eintritt, bildet sich die Untergrenze der Wolken aus. Per Definition erreicht also die relative Feuchte des Aufwindes an der Basis exakt den Wert von 100%! – Je weiter weg wir noch von der Wolke sind, desto geringer die relative Feuchte im Aufwind. Direkt unterhalb der Basis sind das noch 99% und etwas weiter weg nur noch 90%. In Bodennähe dagegen können das z.B. Werte von nur 45% sein. Das heisst aber auch, daß die sogenannte relative Feuchte im Bart kontinuierlich vom Boden bis zur Basis hin zunimmt, bis dieser Wasserdampf schließlich in einer Wolke kondensiert!



Natürlich enthält auch die Umgebungsluft unseres Bartes ein gewisses Maß an Wasserdampf, der als Relative Feuchte gemessen werden kann. Je weiter oben, desto mehr, da die Umgebungsluft durch die Auflösung bzw. Verdunstung der Wolken selbst mit Wasserdampf angereichert wird.

Aber, beim Aufstieg eines Bartes geht von der Menge an Feuchtigkeit, die anfänglich in Bodennähe vorhandenen war, nur sehr wenig verloren. Denn anders als die Temperatur-Unterschiede im Aufwind, die sich sehr schnell angleichen, wäre für einen Ausgleich der Feuchtedifferenzen ein Massetransport von Wasserdampf in die Umgebung erforderlich. Dieser Ausgleich findet, wie beim Verdunsten einer Wolke auch, nur an den Rändern des Thermikschlauchs statt. Also dort, wo im Aufwind aber oft weitere Luft aus der Umgebung mit angesaugt wird. Die absolute (tatsächliche Menge) Feuchte im Bart bleibt also im Kern von unten bis oben hin weitgehend erhalten. Sie bildet sozusagen die „Seele des Aufwinds“ und wird am Ende in Form einer wunderschönen Quellwolke sichtbar.

Nun ist aber feuchte Luft leichter als trockene Luft! – Genauer gesagt, je mehr Feuchtigkeit als (unsichtbarer) Wasserdampf in einem Luftpaket gespeichert ist, desto geringer ist seine physikalische Dichte! – Es verhält sich wie ein Stück Holz oder Kork unter Wasser und drängt nach oben. Und je feuchter so ein Luftpaket im Vergleich zu seiner Umgebung ist, desto höher ist auch sein Auftrieb! – Es ist also die Feuchtigkeit, die das Fliegen in der „Thermik“ erst möglich macht. Eine für viele Segelflieger überraschende Erkenntnis, mit der sich manche nur sehr schwer anfreunden können.

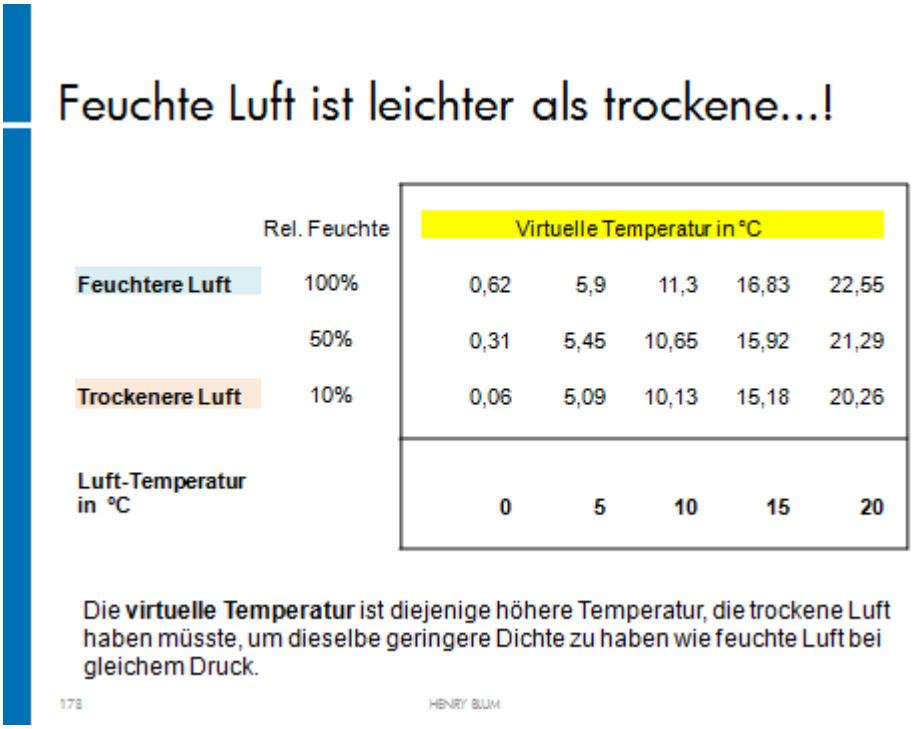
Als ich dieses Thema anläßlich einer Fluglehrer-Fortbildung mal vorgestellt hab, bekam ich massive Kritik zu hören: Insbesonders ein „Doktor der Physik“, (so bezeichnete er sich jedenfalls), war schier ausser sich: Wie ich auf die Idee käme zu behaupten, feuchte Luft sei weniger dicht, deshalb leichter als trockene und könne so aufsteigen ...! – Das sei doch alles Humbug! – Ich hab‘ ihm daraufhin empfohlen, doch einfach mal sein Physikbuch aufzuschlagen. - Dort würde er die folgenden Formeln und Tabellen finden, die genau diesen Tatbestand dokumentieren....

Noch deutlicher kann man die Gewichts-Unterschiede indirekt an der sogenannten „Virtuellen Temperatur“ ablesen, einem Begriff aus der Meteorologie, der speziell geschaffen wurde, um diesen Tatbestand zu verdeutlichen ... - Die folgende ausführlichere Definition stammt von einer Webseite mit interessanten meteorologischen Informationen, www.top-wetter.de.

Virtuelle Temperatur

Die virtuelle Temperatur ist diejenige höhere Temperatur, die trockene Luft haben müsste, um dieselbe geringere Dichte zu haben wie feuchte Luft bei gleichem Druck. Es handelt sich also um ein fiktives Temperaturmaß, das dem Umstand Rechnung trägt, dass der in Luft enthaltene Wasserdampf eine geringere Dichte hat als trockene Luft (0% relative Feuchte!). Da der Wasserdampf die trockene Luft bei gleichem Druck nur ersetzt, ist das Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf etwas weniger dicht.
(siehe auch top-wetter.de, 8. Juli 2011. http://www.top-wetter.de/lexikon/v/virtuelletemp.htm)

Die folgende Tabelle zeigt reale Werte der Virtuellen Temperatur und verdeutlicht einmal mehr, daß feuchte Luft leichter ist als trockene:



Nehmen wir Luft mit 0°C als Beispiel aus obiger Tabelle und nehmen wir weiter an, daß wir keine Temperatur-Unterschiede zwischen Thermik und Umgebung messen können. – An der Nullgrad-Spalte kann man ablesen, daß die Thermik sehr wohl deutlich leichter sein kann, als gleich warme trockene Luft! –

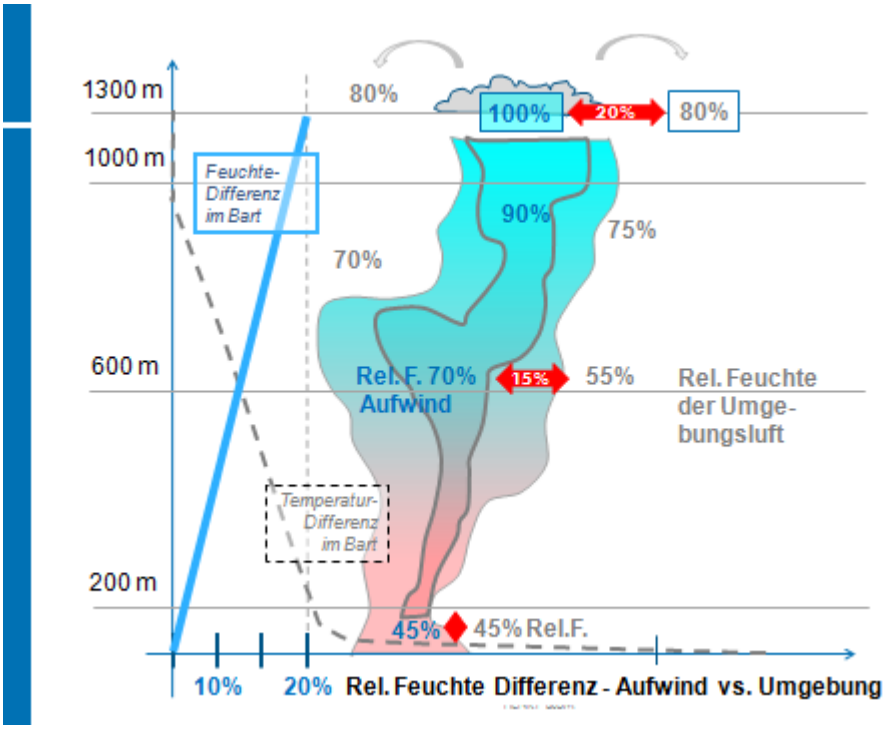
Denn schon 20% Feuchte-Differenz zwischen Umgebungsluft und Thermik würden bereits einem realen (hier virtuellen) Temperatur-Unterschied in der Thermik von 0,12 °C entsprechen. –

Bei gemessenen 10 °Celsius wären 20% Feuchte-Unterschied sogar für einen theoretischen Temperaturvorsprung von 0,26 °C gut! – Dieser Wert liegt schon sehr nahe an den sonst gemessenen, realen durchschnittlichen Thermik-Temperatur-Differenzen von ca. 0,3 °C in etwa 200 m über Grund. (Siehe auch Erklärung und Grafik weiter oben). - Man kann also gut sehen, daß Feuchtigkeit ohne weiteres einen ähnlich hohen Auftrieb erzeugen kann, wie die klassische Warmluft in Bodennähe.

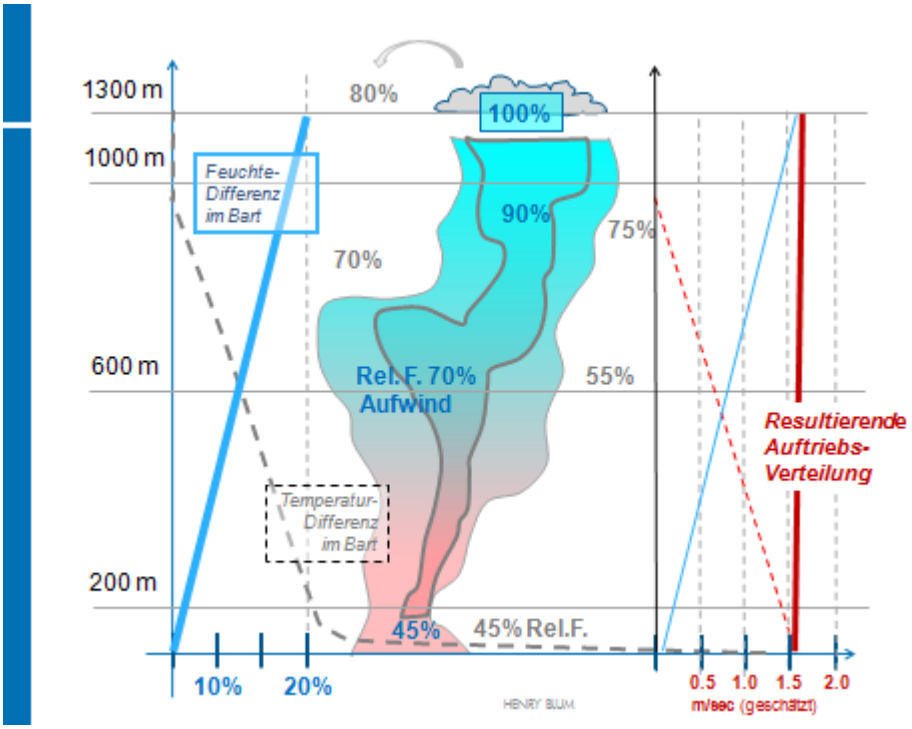
Praxistauglichkeit und ein historischer Fehler

Damit haben wir einen ersten Schlüssel zum Verständnis der Thermik. Sie bezieht also ihre Auftriebsenergie nur die ersten paar hundert Meter aus dem Temperatur-Unterschied den ihr die Sonne mitgegeben hat. –

Wir müssen also unsere gängigen Vorstellungen von der Bildung und Auslösung von Thermik nicht über Bord werfen! - Aber mit zunehmender Höhe übernimmt die zunehmende Relative Feuchte mehr und mehr die ursprüngliche Rolle der Warmluft und sorgt so für den notwendigen Auftrieb. Entscheidend für das weitere Steigen ist der Feuchte- und damit Dichte-Unterschied zwischen Thermik und Umgebungsluft und nicht etwa Unterschiede in der Temperatur zwischen Thermik und Umgebung. –



Im folgenden Bild ist zusätzlich die resultierende Auftriebsverteilung (als ungefähre, also nicht exakte! Summe aus Tempertur- und Feuchte-Differenzen) eingezeichnet.



Die beiden Grafiken oben gelten als Erklärungsmodell, und sind so wie dargestellt, nur für Thermik im Flachland gültig. Im Hochgebirge sind die Verhältnisse noch etwas komplexer. Sie beruhen zwar auf den gleichen Grundprinzipien, aber im alpinen Raum wird

die Aufwinderzeugung durch weitere Faktoren beeinflusst. Diese werden erst in den Folgekapiteln erklärt. Deshalb gibt's für die Thermik im Hochgebirge ein eigenes Kapitel am Ende, in dem alle wesentlichen Faktoren noch mal kurz zur Sprache kommen.

Als wichtigste Erkenntnis halten wir inzwischen aber fest: Feuchte- und damit Dichte-Unterschiede zwischen Aufwind und Umgebung beeinflussen das Steigen im Bart signifikant. - Mit dieser Einsicht lassen sich jetzt nämlich auch viele weitere, jedem Segelflieger bekannte Phänomene schlüssig erklären.

Aber bevor wir soweit sind, müssen wir noch eine weit verbreitete, aber falsche Modellvorstellung ausräumen...

Stabile vs. Labile Schichtung

In vielen Lehrbüchern ist von stabiler bzw. labiler Schichtung die Rede, die angeblich die Thermikstärke bestimmt. Ausgangspunkt dieser Argumentation ist die unbestrittene Tatsache, daß ein aufsteigendes Luftpaket sich immer mit ca. 1°C pro 100 m Höhe abkühlt. Die Umgebungsluft dagegen kann, wie man ja in einem Temp sehen kann, sehr unterschiedliche Temperaturverläufe haben. Wenn also die Temperatur-Abnahme der Umgebungsluft mit der Höhe größer als 1°C / 100 m ist redet man von (trocken) labiler, bei weniger als 1°C/100 m von stabiler Schichtung... Man glaubt jetzt, eine Thermikblase steigt solange, wie sie wärmer ist als ihre Umgebung. Bei einer labilen Schichtung würde dieser Vorsprung erhalten bleiben oder sogar noch zunehmen und damit stärkere Thermik hervorbringen... Bei stabiler Schichtung würde die Thermikstärke entsprechend abnehmen.

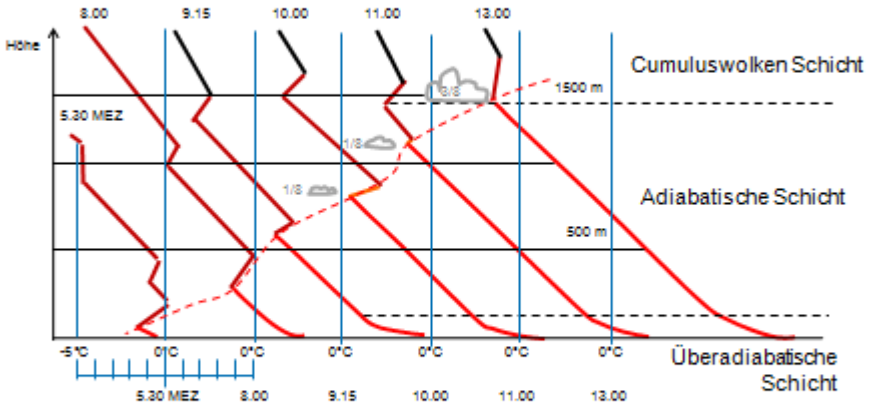
Theorie seit 1956

Der Ursprung dieser Annahme ist vermutlich auch bei Professor Walter Georgii zu suchen, der bereits im Jahr 1956 ein wegweisendes Buch zur Meteorologie des Segelflugs geschrieben hat und diese Theorie dort anschaulich beschrieben hat. Nur ein kleiner, aber wesentliche Fehler in einem ansonsten hoch angesehenen Werk! Von dort aus hat er wohl Eingang in diverse Lehrbücher gefunden und wurde seither immer wieder kritiklos abgeschrieben. Jedenfalls ist er heute fester Bestandteil in jedem Theorie-Unterricht und wird so auch in der Luftfahrerprüfungen der Regierungspräsidien abgefragt.

Eine konvektive Schicht ist immer indifferent oder sogar leicht stabil

Aber, so einleuchtend die Erklärung der Aufwindstärke anhand der angeblich labilen oder stabilen Schichtung auch sein mag. Sie hält der Realität leider nicht stand! – Messungen in der freien Atmosphäre haben gezeigt, daß sich jeder Temperaturverlauf, der im Temp z.B. während der Nacht gemessen wurde, nach dem Einsetzen der Thermik bis hin zur „Basis" in einen Gradient (= Änderungsrate) von nahezu 1 umgewandelt wird, also eine gleichmäßige Temperaturabnahme von 1°C/100 m!

Das ist nicht weiter verwunderlich: Die Thermik durchmischt ja die Konvektionsschicht. Thermik steigt auf und Umgebungsluft sinkt ab. Beide kühlen, bzw. erwärmen sich beim Auf- und Abstieg um ziemlich genau 1° C / 100 m und geben diese Temperaturverhältnisse an die Umgebung weiter. – Meteorologen sprechen deshalb auch von einem adiabatischem Gradienten!



Änderung des Temperaturverlaufs in den untersten 2000m der Atmosphäre am 26.04.74 in Meppen von 5.30 bis 13.00 Uhr. (Daten aus Beyer, Roth, 1977 – gefunden bei Müller, Kottmeier, 1984).

Das oben stehende Bild illustriert das eindrücklich. Es stammt auch aus der Veröffentlichung von Detlef Müller und Christoph Kottmeier, (Meteorologische Aspekte des Streckensegelflugs, 1984) und zeigt diese Entwicklung an einem sehr guten Thermiktag im April. Während früh morgens noch Bodenfrost herrschte, gab's bereits um 10 Uhr MEZ (9 Uhr Sommerzeit) 1/8 Quellbewölkung in 800 m über Grund bei einem adiabatischen Temperaturverlauf. Eine Stunde später war die Basis bereits auf 1100m angestiegen und erreichte gegen 12 Uhr Sommerzeit schon 1500 m GND.

Es gibt also an Thermiktagen keine wirklich stabile und auch keine labile Schichtungen unterhalb der Wolkenbasis (bzw. dem sogenannten Konvektions-Kondensations-Niveau, KKN)! – Solange die Konvektion aufrecht erhalten bleibt, haben wir unterhalb des KKN's immer eine indifferente Schichtung der Umgebungsluft (adiabatische Schicht mit einem Gradient von nahezu 1) vorliegen! –

Ein Thermikschlauch, (der sich ja ebenfalls adiabatisch abkühlt), würde also bei seinem Aufstieg auch einen etwaigen Temperatur-Vorsprung (vor der Umgebungsluft) bis zur Basis beibehalten können, wenn es ihn denn gäbe! – Aber, auch das läßt sich, wie oben schon gesehen, weder so nachweisen, noch in der Praxis beobachten: Unterschiedlich warme Thermikblasen würden nämlich sonst sehr unterschiedliche Wolkenuntergrenzen ihrer zugehörigen Quellwolken erzeugen! – Schon 0,5° Celsius Differenz würden für 60 Meter Basis-Unterschied ausreichen. –

Das Gegenteil ist bekanntermaßen der Fall. An guten Tagen entsteht über größere Entfernungen hinweg eine einheitliche Basishöhe, die höchstens dem Geländeprofil entsprechend variiert und dann mit steigender Temperatur im Tagesgang ebenfalls ansteigen kann. Eventuelle Temperatur-Unterschiede der einzelnen Thermikblasen gegenüber der Umgebungsluft gleichen sich also sehr schnell aus, unter anderem auch durch die ständige Zumischung von Umgebungsluft, die den Schlauch mit der Höhe z.B. dicker werden läßt...

Aber auch die Relative Feuchte, bzw. das Mischungsverhältnis, (das heist der Wasserdampfgehalt der bodennahen Luftschichten), muß über größere Distanzen hinweg sehr ähnlich sein, denn sonst würden auch hier unterschiedliche Werte in einzelnen Bärten deutlich unterschiedliche Wolkenuntergrenzen erzeugen.

Entscheidend für die Güte der Konvektion ist also primär die großräumige Zusammensetzung der Luftmasse (also primär ihre Temperatur und ihr Wasserdampfgehalt) und nicht so sehr die kleinräumigen, Thermik erzeugenden Verhältnisse am Boden. - (Bitte beachten: Mit kleinräumig sind hier Unterschiede im 500 m Abstand gemeint. Es gibt sehr wohl Unterschiede in der Thermikqualität einzelner Landstriche. Die Schwäbische Alb „geht“ besser als die Baar, der Schwarzwald besser als der Kraichgau. Und es gibt Tage an denen das Donautal mit seinen feuchten Auen eher Wolken produziert als das Alpenvorland. - Nur bei richtig guten Hammerwetterlagen verwischen sich diese Unterschiede!)

Unterm Strich kann man festhalten: Unterschiedliche Steigwerte zwischen benachbarten Aufwinden, lassen sich also, wie hergeleitet, nicht mit Temperatur- oder Feuchte-Differenzen untereinander erklären! - Woher kommen dann die unterschiedlichen Steigwerte, die an ein und demselben Thermik-Tag anzutreffen sind?

Stark oder schwach? – Die Steigwerte im Aufwind.

Die Größe machts...

Nehmen Sie einfach mal ein hohes Glas mit Mineralwasser, Bier (z.B Kristallweizen) oder ein Glas Sekt in die Hand und beobachten Sie die darin aufsteigende Kohlensäure... Das Kohlendioxid bildet kleine und großen Bläschen, die ihrerseits in einer Kette aufgereiht nach oben perlen... Die großen Bläschen steigen dabei wesentlich rascher als die kleinen oder feinen...

Verantwortlich dafür ist der unterschiedliche Widerstand den die Flüssigkeit den verschiedenen Bläschen entgegensetzt. Oder anders herum ausgedrückt, der „Auftrieb“ der großen Blasen ist deutlich höher als der der kleinen und deshalb steigen sie schneller.

Mit der Thermik verhält es sich ähnlich. Je größer und umfangreicher der Aufwind, desto stärker kann er, unter sonst gleichen Umgebungsbedingungen, sein. Je größer oder beständiger das Reservoir ist, das den Aufwind speist, desto stärker kann auch der Thermikschlauch werden. – (Übrigens, sie können z.B. das Experiment erweitern und ein paar Salzkörner oder ähnliches ins Glas werfen. Sie werden dort zu Boden sinken und dort als eindeutig definierter „Auslöser" zuverlässig ihre eigenen Bläschen erzeugen). –

Nun ist Thermik selten so blasenförmig wie blubbernde Bläschen in Flüssigkeiten und verhält sich auch nicht genau so. Anders als zwischen Wasser und Luft sind die Dichte-Unterschiede dafür viel zu gering. – Wenn wir nach einem anschaulichen Bild suchen, können wir uns die Form eines Bartes eher vorstellen wie die von flüssigem Honig, der von einem Messer abtropft: Erst bildet sich ein dicker Tropfen, der sich unter seinem eigenen Gewicht allmählich von der Kante ablöst und einen dicken Faden hinter sich herzieht. Ist der Anfangsvorrat aufgebraucht, reisst der Faden und aus dem nachfliessenden Material bildet sich sofort ein neuer Tropfen. Dieser erzeugt ebenfalls eine „Schleppe", bevor auch er sich komplett ablöst und so weiter. Geht der Honigvorrat zu Ende, dann fallen nur noch gelegentlich einzelne, meist kleinere Tropfen vom Messer. Schlussendlich geht nichts mehr und es bleibt nur noch ein Rest des süssen Stoffs an der Klinge hängen ... –

Ähnlich verhält es sich mit Warmluft-Reservoirs am Boden. So lange genügend Einstrahlung herrscht, wird immer wieder neues „Material" nachgeliefert und je nach Menge bleibt‘s entweder bei einem kontinuierlichen Strom, oder es lösen sich nur noch „Tropfen" bzw. größerer Blasen ab, bis das Reservoir endgültig erschöpft ist.

Warum werden Bärte mit der Höhe manchmal stärker?

Dafür gibt’s gleich mehrere Ursachen... Erstens nehmen Aufwinde bei ihrem Aufstieg ständig weiter Umgebungsluft auf, die den Umfang bzw. Durchmesser des Thermikschlauchs mit der Höhe wachsen lassen können. Die Fachleute sprechen von sogenanntem „Entrainment". Mit zunehmender Größe des Bartes wird auch der Strömungswiderstand geringer und, wie im vorhergehenden Absatz schon beschrieben, die Steigwerte nehmen zu. Übrigens ein Phänomen, daß sich auch im Bier- oder Sektglas beobachten läßt. Eine kleine Blase nimmt bei ihrem Aufstieg im Glas zunehmend Kohlendioxid aus der Umgebungsflüssigkeit auf und wird beim Aufstieg tendenziell größer. Je größer sie wird, desto schneller perlt sie weiter nach oben. –

Eine andere Ursache kann auch das Zusammenwachsen mehrer Aufwinde zu einem größeren sein. Auch da gilt, der Auftrieb nimmt mit der Größe zu... –

Eine dritte Möglichkeit, die durch die Wolkenhöhe bestimmt wird, lernen wir in den nächsten Kapiteln kennen....

Blauthermik vs. Wolkenthermik

Aus diversen Untersuchungen und eigenen Beobachtungen wissen Segelflieger, daß bei Blauthermik das Steigen tendenziell schwächer ist, Wolkenthermik dagegen, relativ gesehen, bessere Aufwinde liefert. Grundsätzlich läßt sich sogar sagen, mit zunehmend höherem Basisniveau wird auch das Steigen besser. Auch hier liefert die Feuchtigkeit eine schlüssige Erklärung für diesen „Wolkenturbo".

Steigen an der Wolkenbasis

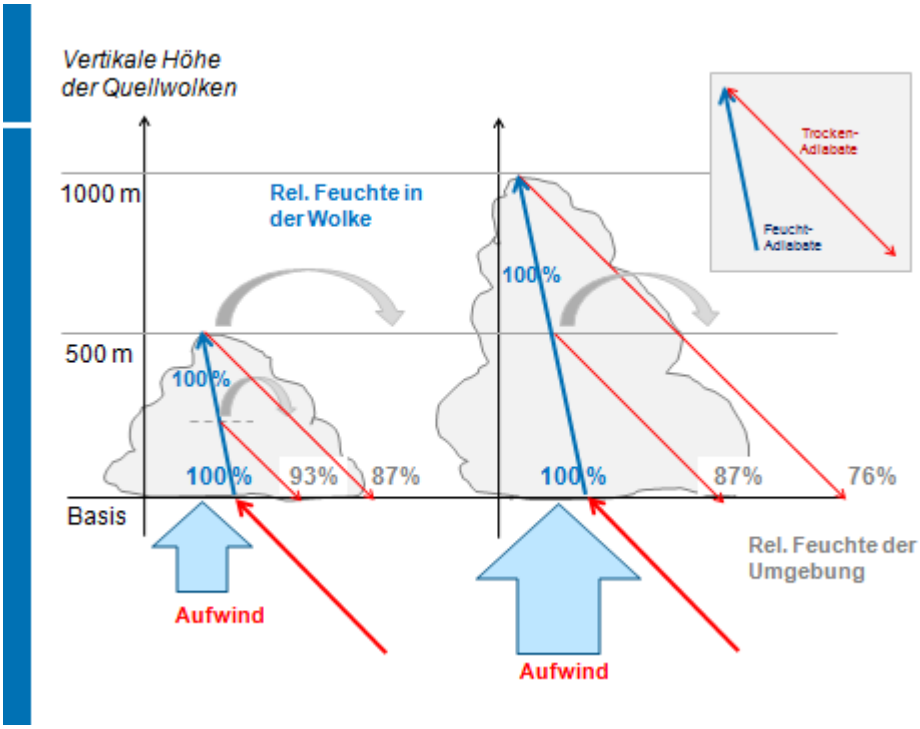
Es gibt Tage, da ziehen die Bärte direkt unterhalb der Basis am besten. Oft sind es die dunkelsten Stellen der Wolke, an denen tatsächlich auch mehr Feuchtigkeit kondensiert wird und größere, und deshalb auch dunklere Wolkentröpfchen erzeugt werden. In extremen Fällen zeigt die Wolke selbst eine Art Bart, der nach unten aus der Basis heraus hängt und signalisiert, hier kondensiert besonders viel Wasserdampf. –

Die geläufige Theorie, daß die Wolke „zieht“, also selbst einen Staubsauger-Effekt erzeugt, ist zwar sehr anschaulich, aber unsinnig. Dazu müßte der Unterdruck unglaublich gross sein, was in der segelfliegerischen Praxis nicht vorkommt. (Versuchen Sie mal ein Stückchen Papier mit dem Staubsauger vom Boden zu saugen... – Sie müssen mit enormer Sogkraft schon auf wenige Zentimeter ran, damit das funktioniert! – Selbst die zerstörerische Kraft eines Tornado-Rüssels entfaltet sich am Boden nur auf relativ kurze Distanzen von wenigen Flugzeugspannweiten. Und diese Schäden werden nicht so sehr durch die Saugwirkung des Tornados, als durch die extrem hohen Windgeschwindigkeiten am Rande des Schlauchs verursacht).

Die tatsächlich angefundenen Steigwerte sind viel besser mit den schon so ausführlich dargestellten Feuchte-Unterschieden und der Wolkenhöhe selbst erklärbar.

Einfluß der vertikalen Wolken-Mächtigkeit

Das folgende Bild illustriert den Zusammenhang: Sobald die Luft an der Basis kondensiert, steigt sie innerhalb der Wolke feuchtadiabatisch weiter. Das bedeuted die Temperaturabnahme mit der Höhe beträgt nur noch 0,5° C/100m, solange bis die „Wolkenluft“, (genauer die kleinen Wassertröpfchen oder Eiskristalle, die die Wolke bilden), wieder verdunstet. Ab diesem Punkt erwärmt sich die außerhalb der Wolke wieder absteigende Luft mit 1°C/100 m (also trockenadiabatisch), und bringt die Ausgangs-Feuchte aus der Höhe wieder mit. Und damit gibt’s nahe an der Basis um so signifikantere Unterschiede in der Relativen Feuchte, je höher die Wolken hinaufreichen...



In der Realität hängen die tatsächlichen Verhältnisse natürlich nicht ausschließlich von der Höhe, sondern auch Größe und Form der Wolken ab. Aber das Prinzip wird hoffentlich klar: Wolken sind also sozusagen der Turbo für die Thermik in der Nähe der Basis! –

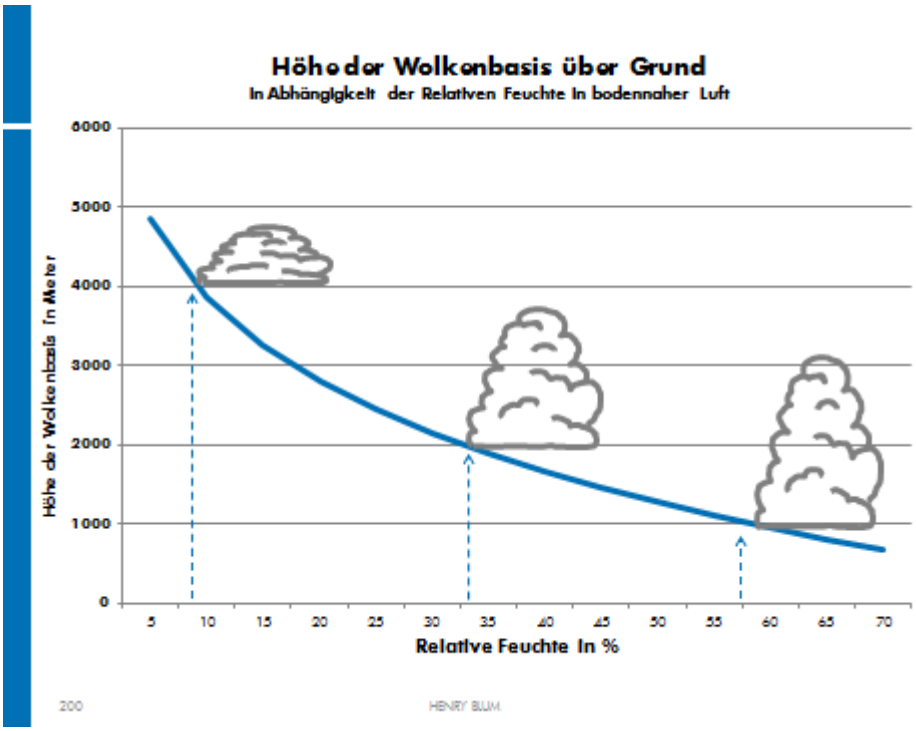
Aufmerksame Beobachter realisieren sicher, daß in obigem Bild die auf- und absteigenden Adiabaten theoretisch auch Temperatur-Differenzen an der Basis erzeugen würden. Aber wie schon füher ausgeführt, diese Unterschiede gleichen sich, anders als bei der Feuchtigkeit, extrem rasch an und führen nur zu einem insgesamt etwas unteradiabatischen Gradient von <1, also einer leicht trocken stabilen konvektiven Schicht!

Je größer die vertikale Ausdehnung der Wolken, desto stärker kann das gute Steigen Richtung Basis verschoben sein (siehe Erklärung oben...). Je flacher die Cumuli, desto gleichmäßiger die Steigwerte über die ganze Höhe... . Erfahrene Streckenflieger kennen das Phänomen und wählen ihre Flugtaktik entsprechend (oft unbewußt) abhängig von der Wolkenhöhe!

Wolken-Untergrenzen

Grundsätzlich gilt auch hier: Je höher die Basis, desto besser das Steigen. Als Faustformel kann man 1,5 m/sec durchschnittliches Steigen pro 1000 m Basishöhe annehmen. (Starke Bärte erreichen die doppelten Werte!).

Hohe Wolkenuntergrenzen können aber nur bei entsprechend trockener Luftmasse entstehen. Je trockener sie ist, desto geringer ist die relative Feuchte der Luft in Bodennähe (*und um so weniger Strahlungsenergie wird für die „Verdunstung" gebraucht*). Und um so weniger Wasserdampf (absolute Feuchte) nimmt die Thermik vom Boden her mit. Entsprechend hoch muß sie steigen, bevor die kontinuierliche Abkühlung im Bart (1°C/100m) die Temperaturen im Aufwind soweit hat sinken lassen, daß die mitgebrachte Feuchte auskondensieren muß!



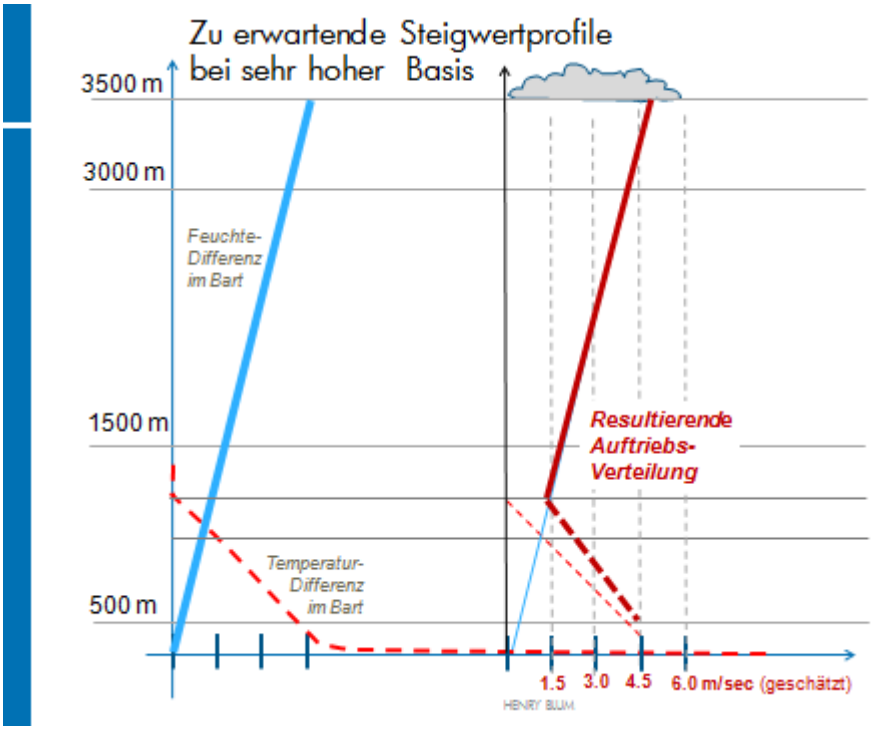
In Bitterwasser, der „Diamantenfarm" in Namibia, werden Basishöhen von über 5000m NN erreicht. Steigwerte von 6 m/sec und mehr sind dann normal. Kein Wunder, daß der morgendliche Gang zum Hygrometer zur Flugvorbereitung gehört...

Gerade anhand der Thermikverhältnisse bei hohen Wolkenbasen läßt sich der Einfluss der Feuchtigkeit besonders gut demonstrieren: Auch hier gilt, die am Boden erzeugte

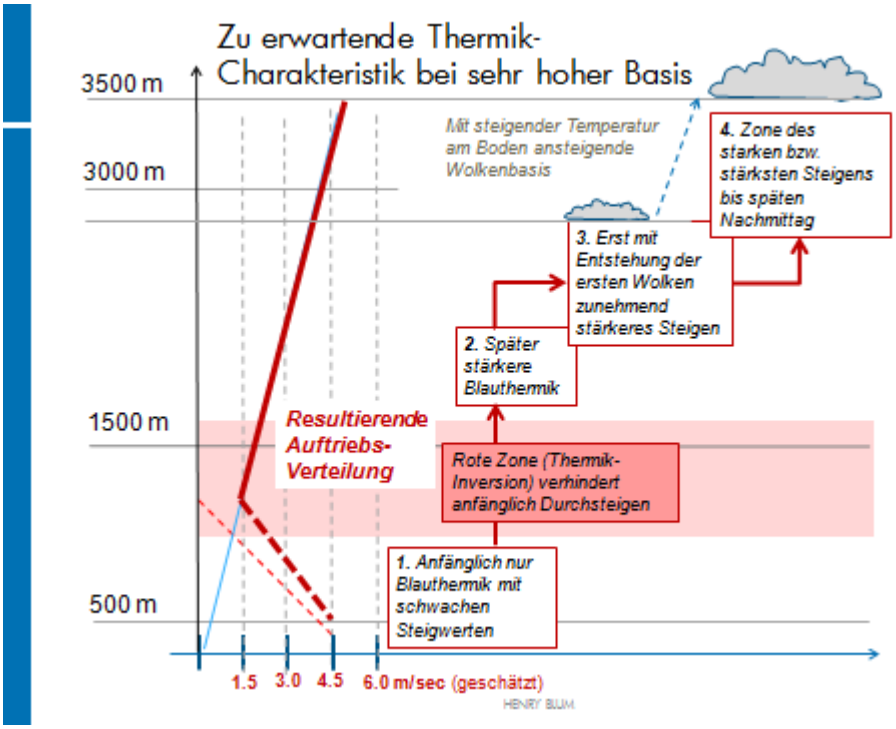
Warmluft verliert ihren Temperaturvorsprung mit der Höhe und die Feuchtigkeit übernimmt ihre Rolle als Auftriebslieferant. Aber, anders als bei niedrigen oder normal hohen Basen started der Aufwind mit sehr viel niedrigeren Feuchtewerten und diese nehmen nur sehr allmählich bis auf die notwendigen 100% des Konvektions-Kondensations-Niveaus zu. Entsprechend gering sind anfangs die Feuchte-Differenzen zwischen Thermik und Umgebungsluft, und um so geringer der feuchte-bedingte Anteil des Auftriebs im unteren Höhenband.

Der aus der Summe von Warmluftanteil und der Feuchtedifferenz resultierende Gesamt-Auftrieb zeigt deshalb, (allerdings nur bei sehr hohen Wolkenbasen), einen starken Knick im Höhenband um etwa 1000 Meter über Grund, in dem, wie schon erwähnt, nur noch geringe Temperatur-Differenzen in der Thermik messbar sind und schliesslich ganz verschwinden.

In grossen Höhen nehmen dafür die Feuchte-Differenzen im Bart wieder deutlich zu und erzeugen so auch einen höheren Auftrieb der Thermikluft und entsprechend starkes Steigen.



Aus dieser „geknickten“ Auftriebsverteilung läßt sich auch der für Hammerwetterlagen mit sehr hoher Basis typische Tagesgang der Thermik herleiten und erklären.



Nach Sonnenaufgang erwärmt die Sonne die bodennahen Luftschichten relativ rasch. Dank des geringen Feuchtegehalts erfolgt eine sehr gute Umsetzung der eingestrahlten Energie und es entsteht Blauthermik, die bis in Höhen von 1000-1200 Metern über Grund ausfliegbar ist. Solang aber das Luftmassensteigen in dieser Höhe das Eigensinken des Segelflugzeugs nicht deutlich übertrifft, ist der Aktionsradius des Piloten nach oben erst mal eingeschränkt.

Erst mit weiter steigendem Sonnenstand und damit zunehmender Einstrahlung steigen auch die Warmluftblasen hoch genug, um von den Feuchte-Differenzen mit der Umgebung profitieren zu können und so (auch ohne meßbare Temperatur-Differenzen) weiter steigen zu können. Das Luftmassensteigen ist jetzt deutlich besser als das Eigensinken eines Flugzeugs und der „Durchstich“ nach oben, also durch die hier als „Rote Zone“ (bzw. Thermik-Inversion) bezeichnete Schicht, wird möglich.

Sobald die ersten Wölkchen auskondensieren, setzt obendrein der auftriebsverstärkende Effekt des „Wolkenturbos“ ein und die Steigwerte nehmen rasch weiter zu. Die besten Steigwerte finden sich ab jetzt den ganzen Tag über im oberen Drittel der Konvektionsschicht, da dort die Feuchtedifferenzen besonders ausgeprägt sind.

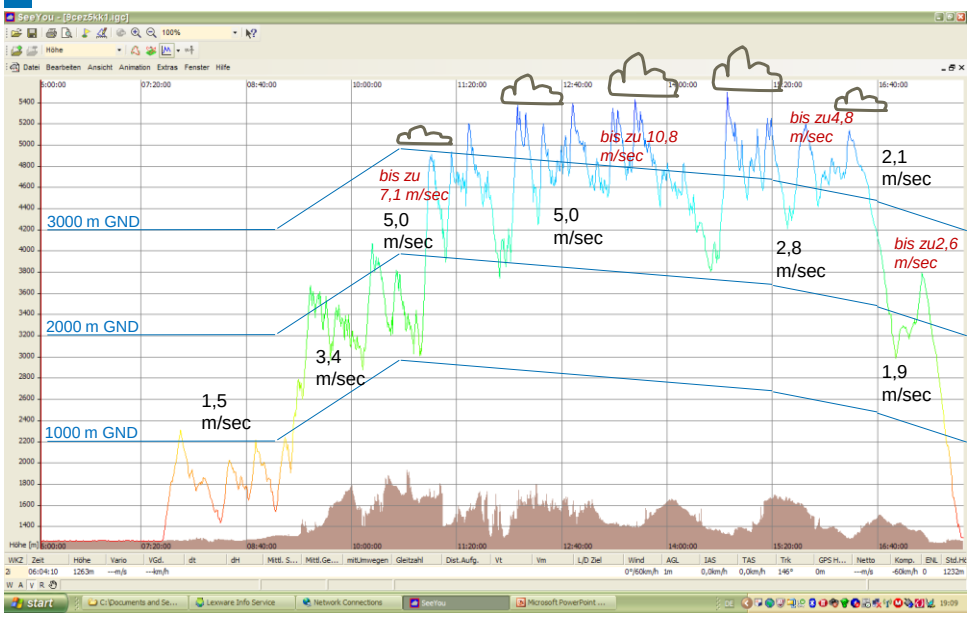
Gegen Abend nimmt mit nachlassender Einstrahlung auch die Thermikstärke in Bodennähe wieder ab. Während im oberen Höhenband noch halbwegs gutes Steigen anzutreffen ist, wird es von unten her zunehmend schwieriger noch Anschluss zu finden. Die „Rote Zone“ wird wieder aktiv und verbietet zu tiefes Abgleiten bis zum Annehmen des nächsten Bartes.

Am Barogramm eines 1400 km Fluges von Guy Bechtold läßt sich das exemplarisch nachvollziehen.

Guy Bechtold, 14.12.2009, 1412 km, Bitterwasser, Namibia

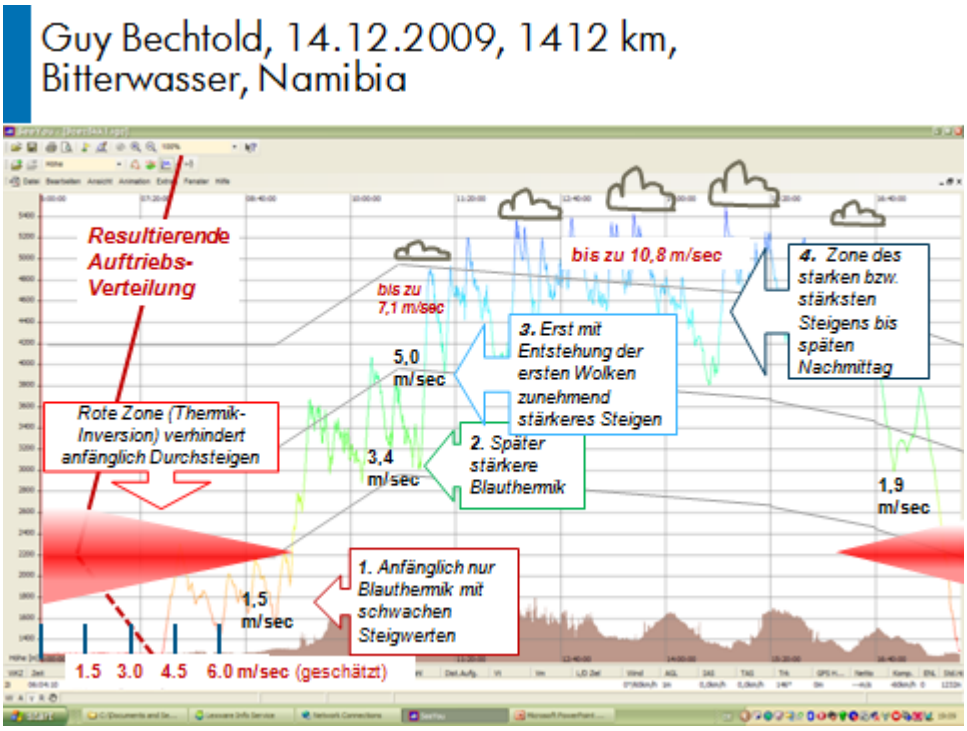
Ganz offenbar traute sich Guy, schon sehr früh (um 7.50 Uhr UTC, das entspricht 8.50 Uhr MEZ) auf Strecke zu gehen und die ersten hundert Kilometer über der Kalahari in reiner Blauthermik zu fliegen. Zwei Mal ist er dabei bis auf fast 200 m über Grund abgeglitten.

Guy Bechtold, 14.12.2009, 1412 km, Bitterwasser, Namibia



Erst mit Erreichen des Berglandes wurde die Blauthermik deutlich besser und mit den ersten Wolken ging‘s dann schliesslich unter besten Bedingungen bis auf 5500 Meter MSL!

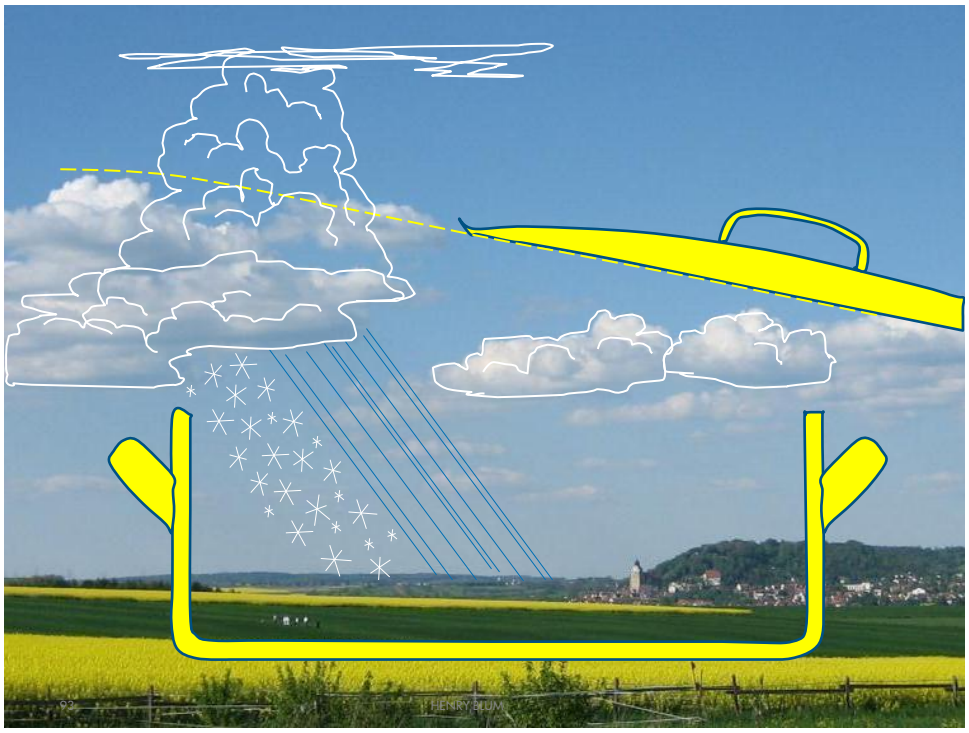
In der folgenden Grafik sind die verschiedenen Phasen der Thermik-Entwicklung noch mal in's Barogramm eingetragen.



Übrigens, die fliegerisch interessante "Saison" in Namibia dauert nur von November bis Januar! - Nur in dieser „Vor-Regenzeit", (die eigentliche Regenzeit beginnt im Februar), werden bereits mit etwas Feuchtigkeit angereicherten Luftmassen ins Land geweht, die regelmäßig Segelfliegerträume wahr werden lassen. – In den Monaten davor gibt's trotz guter Einstrahlung in pulver-trockener Luft kein Hammerwetter!

Und wie erklären sich abnehmende Steigwerte mit der Höhe?

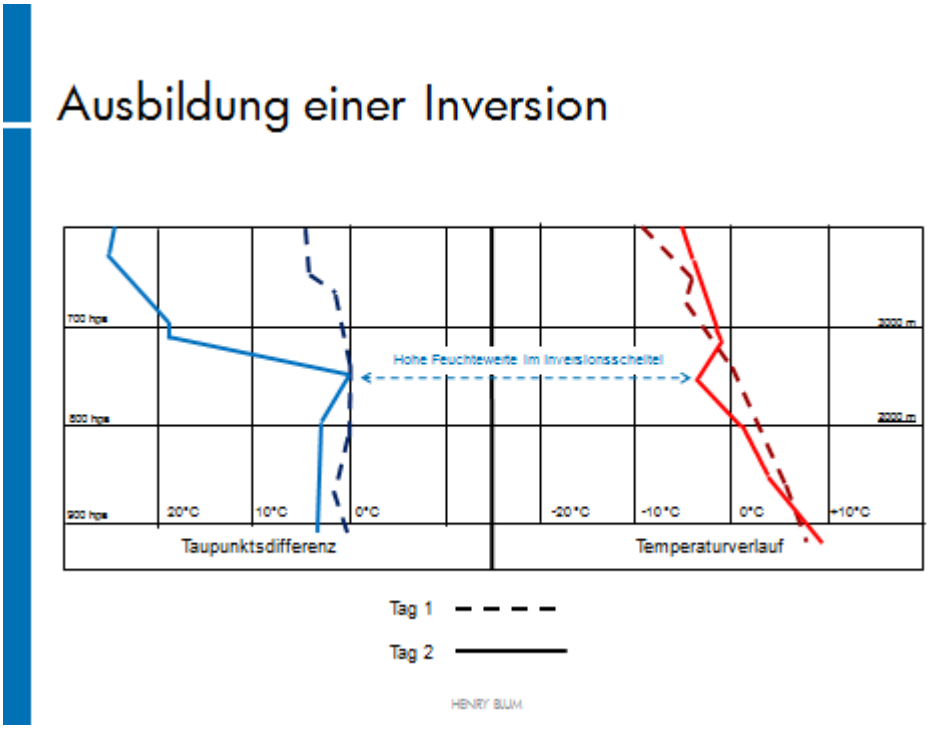
Die bekannteste Thermikbremse ist die sogenannte Inversion. Sie bezeichnet eine Zunahme der Temperatur der Umgebungsluft mit der Höhe, die üblicherweise durch Absinkvorgänge in der Atmosphäre hervorgerufen wird. An guten Tagen ist sie die natürliche Begrenzung (i.e. der Deckel auf dem Topf) der konvektiven Schicht, die auch „schädliche" Überentwicklungen zuverlässig verhindert.



Nimmt die Umgebungs-Temperatur also mit der Höhe zu, dann verliert der feuchte-bedingte Auftrieb in der wärmeren Luft seine Wirkung und die Blase hört auf zu steigen.

Hohe Feuchtigkeitswerte in der Umgebungsluft, wie sie oft im Scheitel einer Inversion oder auch nahe an den Wolken anzutreffen sind, wirken ebenfalls stark bremsend. Da der Auftrieb eines Bartes, wie gesehen, zunehmend durch Feuchte-Unterschiede bedingt ist, verringert sich dieser Unterschied bei ebenfalls steigender relativer Feuchte der Umgebungsluft in der Höhe und die Steigwerte nehmen wieder ab.

Speziell an Tagen mit sehr starker Inversion, die manchmal auch an sehr flachen Cumuli sichtbar wird, ist diese Tendenz besonders ausgeprägt. Die folgende Grafik zeigt den Temperatur-Verlauf an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit Ausbildung einer Inversion und hohen relativen Feuchtewerten im Inversions-Scheitel.



Ähnlich verhält es sich mit Luftmassen, die insgesamt feuchter sind. (Siehe auch oben im Bild die Taupunktsdifferenz an Tag 1). Sie zeigen deutlich mehr Wolken und bremsen damit die Einstrahlung! Ausserdem lösen sich die entstandenen Wolken nur sehr langsam wieder auf und halten so als „Wassersäcke“ so manchen Thermiksucher zum Narren...

Blauthermik

Hier verhindert in unseren Breiten meist eine Inversion den weiteren Aufstieg der Thermik und unterbindet den Bart, bevor der enthaltene Wasserdampf auskondensieren kann; im Extremfall sogar schon lange bevor die relative Feuchte im Bart ihren 100% Schwellwert für die Wolkenbildung erreichen kann. Je geringer deshalb die Feuchte-Unterschiede zwischen Bart und Umgebungsluft ausfallen, desto schwächer und ungleichmäßiger können die Steigwerte sein. Es fehlt ausserdem der vorher schon vorgestellte „Wolkenturbo“! –

Aber auch für Blauthermik gilt: Je kälter die Luftmasse, desto besser die konvektive Umsetzung der eingestrahlen Energie, (warum erfahren wir in den letzten Kapiteln), und je höher die limitierende Sperrschicht, desto stärker kann auch die Blauthermik werden:

Das obige Foto stammt vom 1. April 2012, aufgenommen um 8.15 Uhr UTC in Donaueschingen am Flugplatz. - Der Tag begann, wie zu sehen, mit einigen wenigen Flusen, die sich aber bald auflösten und einen guten Blauthermik-Tag einleiteten. Die Luftmasse war sehr kalt (und trocken) und die Temperaturen lagen morgens nur knapp über 0° Celsius.

Im Blauen gings am frühen Nachmittag bis auf 2300 Meter NN (also zwischen 1200 m und 1600 m über Grund), bevor eine schwache Inversion die Bärte nach oben abriegelte. Das durchschnittliche Steigen betrug zwischen 2,5 und 3,5 m/sec. Einzelne Aufwinde lieferten bis zu 5 m/sec in der Spitze. Abends konnte man sich noch bis eine halbe Stunde vor Sonnen-Untergang oben halten...

Zerrissene Thermik

Wer viel segelfliegt weiss auch, Thermikschläuche sind nicht immer gleichmäßig rund und tragen auch auf einem Kreis nicht überall gleichmäßig gut. Auch hier liefert die Feuchtigkeit plausible Erklärungen: Aus den bisherigen Ausführungen ist bereits klar, ein gewisser, im Aufwind gleichmäßig verteilter Wasserdampf-Anteil ist für die Ausbildung von satten, runden Bärten wichtig. Fehlt dieser, (oder sind die Feuchte-Unterschiede schwach, wie z.B. oft bei Blauthermik), sind Aufwinde ruppiger und schlechter zentrierbar.

In einem Bart können keine raschen, horizontalen Massetransporte des Wasserdampfs stattfinden. Unterschiede im Feuchtegehalt einzelner Bereiche eines Aufwindes können also auch nur langsam ausgeglichen werden. Deshalb ist auch der zugehörige (archimedische) Auftrieb in diesen Zonen unterschiedlich und kann so zu „unrunden“ Bärten führen... – Für diese Schwankungen können auch Windscherungen verantwortlich sein. – Ein häufiger Fall sind z.B. Bärte, die sich an sonnenbeschienenen Leehängen ausbilden und oben am Berggrat mit der luvseitig aufsteigenden Luft zusammen fliessen bzw. verwirbelt werden. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch, wenn mehrere, kleinere Aufwinde, zwar in der Höhe zusammen wachsen, aber zumindest „feuchtetechnisch“ noch nicht vereinigt sind.

Thermik bei starkem Wind

Auch Wetterlagen mit starkem Wind können gute oder sehr gute Thermik abgeben. Allerdings wird die bodennahe Luftschicht durchs Gelände und Bewuchs so stark durchmischt, daß diese zwar von der Sonne aufgeheizt werden kann, aber keine isolierten Warmluftpolster mehr entstehen können. Als grobe Faustformel für die Dicke dieser turbulenten Schicht kann man die Windgeschwindigkeit mit 20 multiplizieren. Das Ergebnis ist die Höhe der turbulenten Schicht in Metern. Wind mit 20 km/h z.B. erzeugt eine bis zu 400 m hohe, stark durchmischte Zone ...

Innerhalb dieser (überwärmten) bodennahen Luft-Schicht ist es deshalb fast unmöglich, ausfliegbare Aufwinde zu finden, während weiter oben die Kameraden noch wegsteigen können... Auch hier haben wir eine „Rote Zone", in die man besser nicht abgleiten sollte und auch hier greift das Prinzip Feuchte: Einzelne isolierte Blasen, die aus dieser überwärmten Grundschicht aufsteigen, sind zwar anfangs zu schwach oder zu „eng", um ein Segelflugzeug „tragen" zu können, aber auch sie kühlen sich beim weiteren Aufstieg kontinuierlich ab. Der in der Blase bereits vorhandenen Wasserdampf bleibt erhalten und damit ihre tatsächliche, mitgebrachte Feuchte, die später eine Wolke ausbilden wird...

Beim weiteren Aufstieg nimmt also die relative Feuchte ständig zu. Solange dieser „Feuchtevorsprung" gegenüber der Umgebungsluft erhalten bleibt, wird die Blase bzw. der Schlauch sich weiter beschleunigen. Irgendwann wird er schneller steigen als das Eigensinken des Segelflugzeugs, das in ihm kreisen will und aus der Blase ist ein echter, ausfliegbarer Bart geworden...

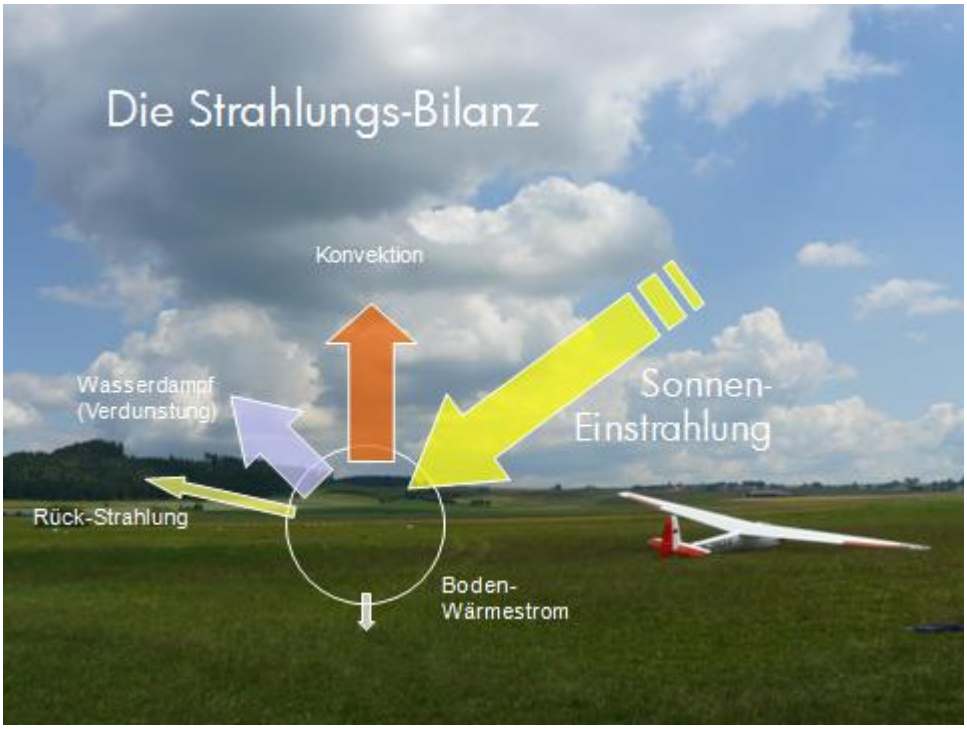
Thermikdauer – Wodurch wird sie bestimmt?

An manchen Tagen setzt die Thermik sehr früh ein und hält lange an, teilweise bis Sonnenuntergang. An anderen Tagen geht sie viel später los und hört meist auch früher wieder auf, obwohl die eingestrahlte Energie gleich oder sogar höher ist, im Sommer zum Beispiel. Trotzdem ist die statistische Häufung der guten Wetterlagen Richtung Frühjahr verschoben. – Warum das?

Dazu kehren wir wieder zum Ursprung der Thermik, der Bildung von Warmluft am Boden zurück. Denn die Antwort auf diese Frage ergibt sich aus der Strahlungs-Bilanz, d.h. der eingestrahlten Sonnen-Energie und wie sie an der Erdoberfläche umgesetzt wird.

Strahlungsbilanz

Wie in dem Bild unten dargestellt, wird ein Teil im Bodenwärmestrom abgeführt, ein Teil geht durch Rückstrahlung „verloren", ein Teil wird für die Verdunstung verbraucht, bzw. in der Luftfeuchtigkeit gespeichert und nur der Rest steht für die Erwärmung der Luft zur Verfügung. Diese Anteile entsprechen zwar in Summe immer der eingestrahlten Energie, untereinander können sie aber signifikant variieren.

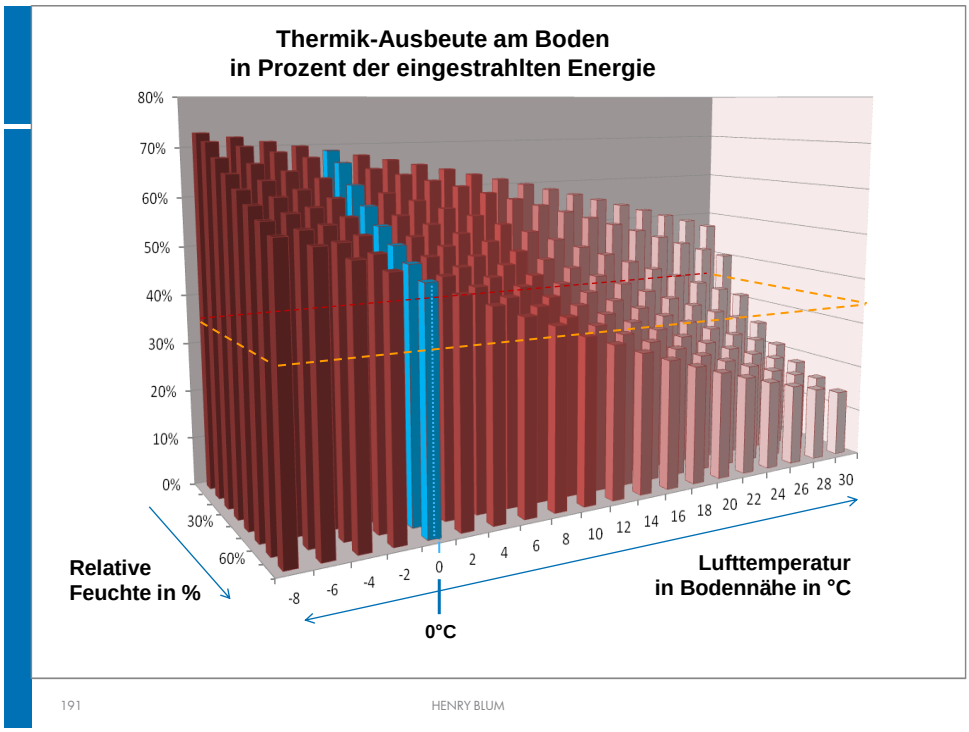


Den Bodenwärmestrom können wir zumindest für die Beantwortung der Frage nach der Thermikdauer vernachlässigen. Er hat zwar einen gravierenden Einfluss auf die unterschiedliche Erwärmung der jeweiligen Oberflächen und damit die Temperatur-Unterschiede am Boden. Bei trockenen Böden ist er aber verhältnismässig klein und nimmt bei zunehmend abtrocknendem Untergrund, (wie zum Beispiel dunklem, feinkrumigem Ackerboden) auch noch rasch ab. Er kann daher auf die grossen, beobachtbaren Unterschiede der Thermikstärke an verschiedenen Tagen, (bei ansonsten gleicher Einstrahlung), keinen nennenswerten Einfluss haben. Es bleiben nur noch die Rückstrahlung, die mit steigender Temperatur ebenfalls ansteigt und die Verdunstung als „Energieverbraucher“ und damit „thermik-hemmende“ Faktoren übrig.

Latente Wärme

Da bei normalen Temperaturen in unseren Breiten die absolute Feuchte (also die tatsächliche Menge Wasserdampf in der Luft) nicht vernachlässigbar ist, wird auch ein signifikanter Anteil der eingestrahlten Energie im Wasserdampf der Luft gespeichert. Damit steht auch für die Erwärmung der Luft, und damit der Konvektion, entsprechend weniger Energie zur Verfügung.

Bei sehr niedrigen Temperaturen dagegen sinkt der Anteil an latenter, im Wasserdampf gespeicherter Energie und die Luft direkt über dem Boden kann sich viel schneller erwärmen. Damit entstehen viel schneller Warmluftpakete, die Aufwinde ausbilden können und die Thermik setzt bereits sehr viel früher ein als normal. Das gleiche gilt auch für den Abend. Bei niedrigen Lufttemperaturen können sich auch noch bei sehr tief stehender Sonne ausreichende Warmluftreservoirs ausbilden, sodaß die Thermik länger anhält. Tagsüber ist die Ausbeute natürlich ebenfalls besser und die Aufwinde sind wesentlich stärker. Die unten stehende Grafik zeigt diesen Zusammenhang in Abhängigkeit von der Luft-Temperatur in Bodennähe und ihrer Relativen Feuchte.



Wie errechnen sich die Balken in dieser Grafik? – Sie basieren auf einer etwas vereinfachten Energiebilanz, in der der (relativ kleine) Bodenwärmestrom vernachlässigt wird, nicht aber die Rückstrahlung von der Erdoberfläche ins All, (die mit steigender Oberflächentemperatur des Bodens, und damit der Luft, ebenfalls anwächst). Ausgangspunkt ist dabei die Energie (Enthalpie), die nötig ist, um ein Luftpaket mit einer bestimmten Relativen Feuchte bei einen Luftdruck von 1020 hpa um 1 °C zu erwärmen. - Die dazu notwendige Energiemenge steigt übrigens mit steigenderTemperatur, bei, rechnerisch gesehen, gleichen (oder steigenden) Werten der Relativen Feuchte in der Luftmasse! Trotz konstanter Einstrahlung sinkt also gleichzeitig die Fähigkeit des Bodens, die darüber liegende Luft entsprechend aufzuheizen... - Die Grafik zeigt, wieviel der erforderlichen Aufheiz-Energie für die bodennahe Warmluft von der Sonnen-Einstrahlung noch aufgebracht werden kann.

Wir können aus dieser Grafik einige sehr interessante Rückschlüsse ziehen: Je wärmer und je feuchter die Luftmasse ist, desto schlechter die Thermik! - Je trockener die Luft, bzw. je niedriger dagegen ihre Temperaturen, desto höher die „Thermik-Ausbeute“ in Prozent der eingestrahlten Energie. Bei Minus-Temperaturen steigt dieser Anteil unter Umständen auf über 70%! – Liegen die Auslösetemperaturen also unterhalb der Nullgrad-Grenze (und im Mittel- und Hochgebirge kommt das im Frühjahr oft genug vor) wird der Löwenanteil der Sonneneinstrahlung in Warmluft umgesetzt! – Bessere Bedingungen kann man sich nicht wünschen!

Polarluft

Entscheidend für die durchschnittliche Thermikdauer eines Tages ist deshalb die Temperatur der vorherrschenden Luftmasse. Insbesonders Polarluft mit ihren allgemein niedrigen Temperaturen ist deshalb eine fast sichere Garantie für gute und auch lang anhaltende Thermik.

Während kontinentale (also trockene) Polarluft meist nur Blauthermik zuläßt, ist ihre maritim geprägte Schwester, Meeresluft polaren oder arktischen Ursprungs, dank ihres höheren Feuchtegehalts, wesentlich potenter!

Sie produziert zwar anfangs oft noch Schneeschauer, aber sobald sie sich nur etwas erwärmt, sinkt die relative Feuchte (bedingt durch den, absolut gesehen, niedrigen

Wasserdampfgehalt) dramatisch ab. Rapide ansteigende Basishöhen und hervorragende Thermik sind möglich, wenn sie unter Hochdruck-Einfluss gerät!

Erfahrenere Piloten wissen das und richten sich entsprechend danach. Der ehemalige Schulleiter der Segelflugschule Hornberg, Frank Dreher, hat mir das mal so erklärt: „Junge, Du musst auf die Pfützen am Flugplatz achten! – Wenn sie morgens mit `ner Eisschicht überzogen sind, dann gibt's gute Thermik!" – Tatsächlich gibt es bei eingeflossener Polarluft auch im Sommer in Verbindung mit klaren Nächten oft nächtliche Bodenfröste, die dann entsprechend Reifüberzüge oder eben „gefrorene Pfützen" hinterlassen...

Übrigens, solche Kaltluft-Einbrüche kommen im Winter und Frühjahr häufiger vor als im Sommer. Deshalb gibt's Hammerwetter-Lagen mit lang anhaltender Thermik auch eher im April als im Juli ...

Alles zusammen – Die Thermik im Gebirge

Mit dem letzten Kapitel über die Thermik-Ausbeute und ihre Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte haben wir alle wichtigen Faktoren abgehandelt. Wir können jetzt auch die besten Bedingungen analysieren, die unseren Breiten zu finden sind, die Thermik im Hochgebirge.

Erfahrungsgemäß sind in den Alpen tatsächlich die besten Steigwerte in Mitteleuropa anzutreffen. Mehrere Faktoren sind dafür verantwortlich und addieren sich im günstigsten Fall zu einer Dynamik der Aufwinde, die sonst nur in Afrika oder Australien zu finden ist.

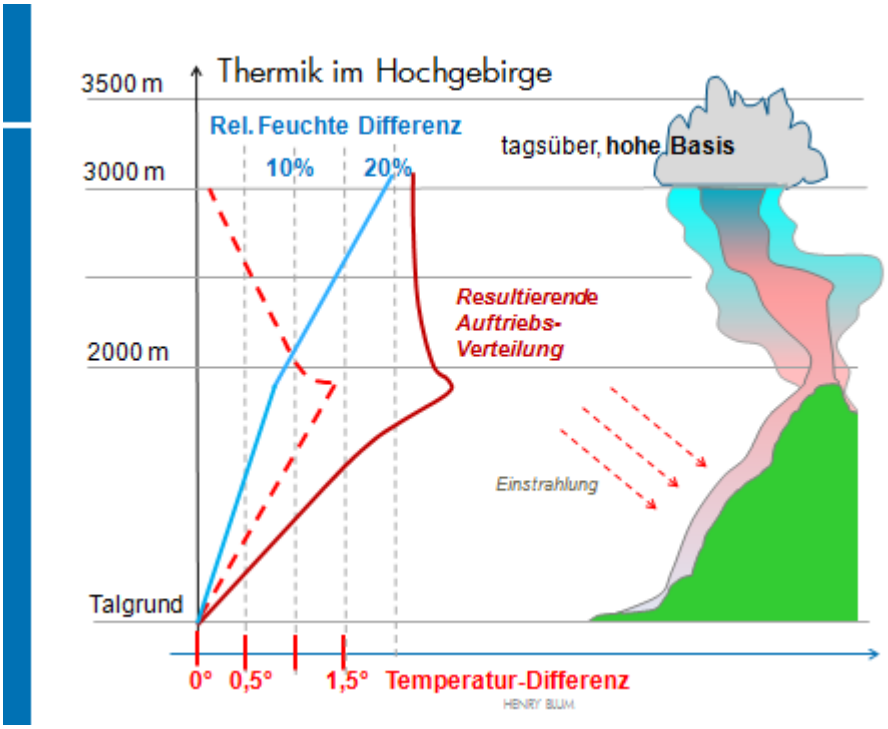
Zunächst mal ist das Luftvolumen, das insgesamt aufgeheizt werden muss, wesentlich kleiner als im Flachland, da die Gebirgslandschaft selbst einen Grossteil des Konvektions-raums ausfüllt. Bei ansonsten vergleichbarer Einstrahlung resultiert allein das schon in höheren Basen als im Flachland und besseren Steigwerten.

Zweitens, die zur Sonne orientierten Hänge sind steil genug, um die maximale Einstrahlung pro Quadratmeter aufzufangen. Ein Osthang z.B. bekommt schon um 8.00 Uhr morgens soviel Energie ab, wie eine ebene Fläche gegen Mittag.

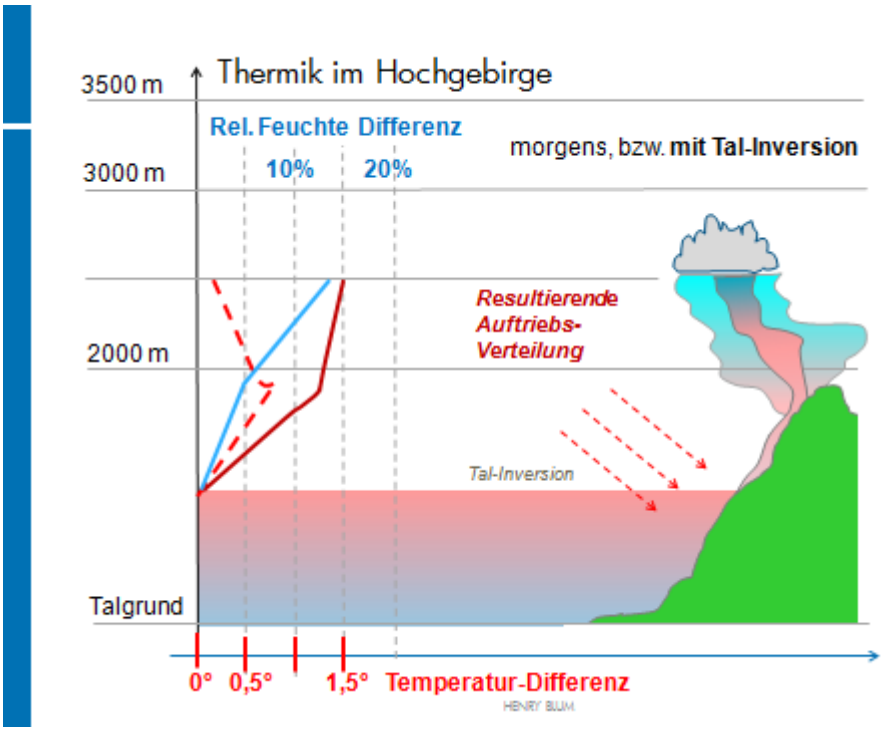
Drittens sind die Umgebungstemperaturen der Luft in großer Höhe niedriger und garantieren (wie in einem der vorangegangenen Kapitel erklärt) eine bessere Thermik-Ausbeute an der Oberfläche der besonnten Flächen. Und viertens kann die oberflächennah erwärmte Luft weitere Strecken den Hang hinauf gleiten als z.B. im Mittelgebirge. Solange sie mit der Hangoberfläche in Kontakt bleibt, wird ihr ständig weitere Energie zugeführt, die schliesslich in höheren Ablösetemperaturen resultiert, wenn die Thermik an einem Grat ablöst.

Die folgende Grafik zeigt diesen „Standard-Verlauf". Die Temperatur-Differenz zwischen Umgebung und dem hangnah aufsteigenden Aufwind nimmt kontinuierlich zu, bevor sie nach Ablösung am Grat wie im Flachland allmählich wieder abnimmt.

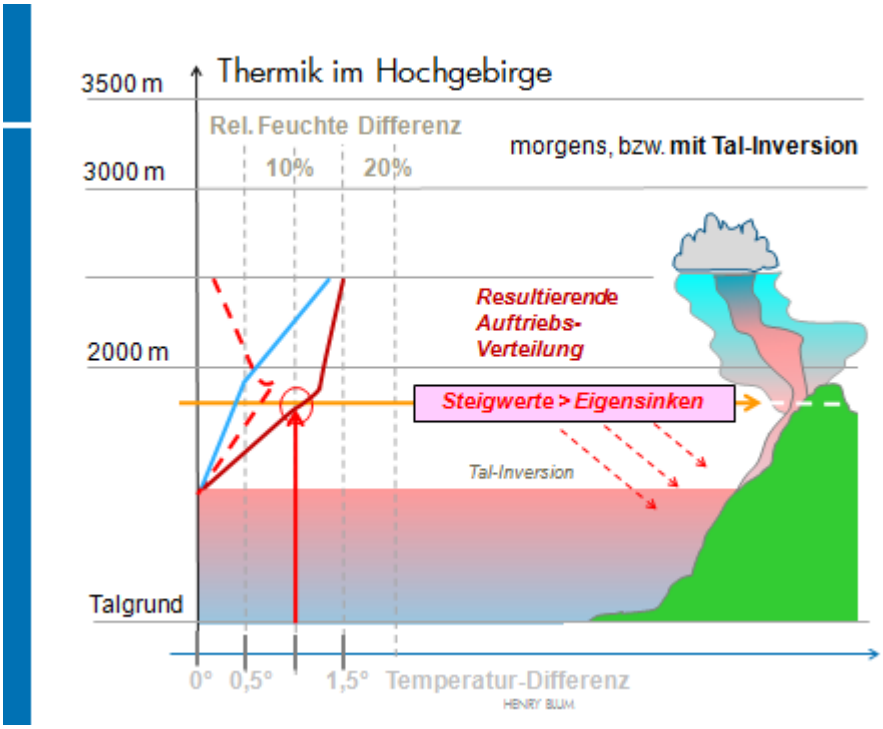
Die Feuchtedifferenz im Bart dagegen wächst beim Aufstieg am Hang nicht besonders stark an. Solange keine Feuchtigkeit zugeführt wird, zum Beispiel durch einen Gebirgsbach, bleibt die Differenz kleiner als bei einem „freien" Aufstieg, da auch die Luft sich mit wesentlich weniger als 1° C/100 m abkühlt. Ihr wird ja ständig Energie zugeführt. Erst wenn der Bart an einem Grat ablöst, setzt die normale adiabatische Abkühlung wieder ein und die relative Feuchte nimmt zu, bis der mitgebrachte Wasserdampf in einer Wolke auskondensiert.



Die resultierende Aufwind-Dynamik im Gebirge ist tagsüber so start ausgeprägt, daß sie kräftige Talwindsysteme erzeugen kann. Abends und nachts kühlen die Hänge natürlich auch schnell wieder aus und jetzt fliesst kalte Luft hangabwärts und bildet in den Tälern unter Umständen regelrechte Kaltluftseen mit einer kräftigen Bodeninversion aus.



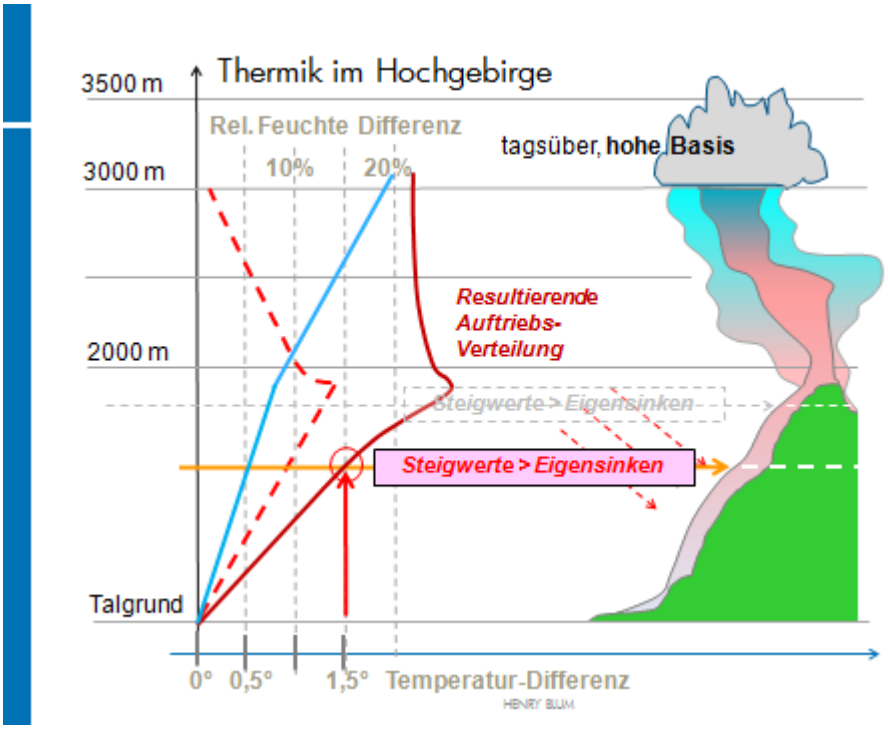
So lange die damit einher gehende Tal-Inversion nicht ausgeheizt ist, kommt vom unteren Teil des Hanges allerdings kein konvektiver Beitrag. Das hat erhebliche Konsequenzen auf die mögliche Flugtaktik am Morgen.



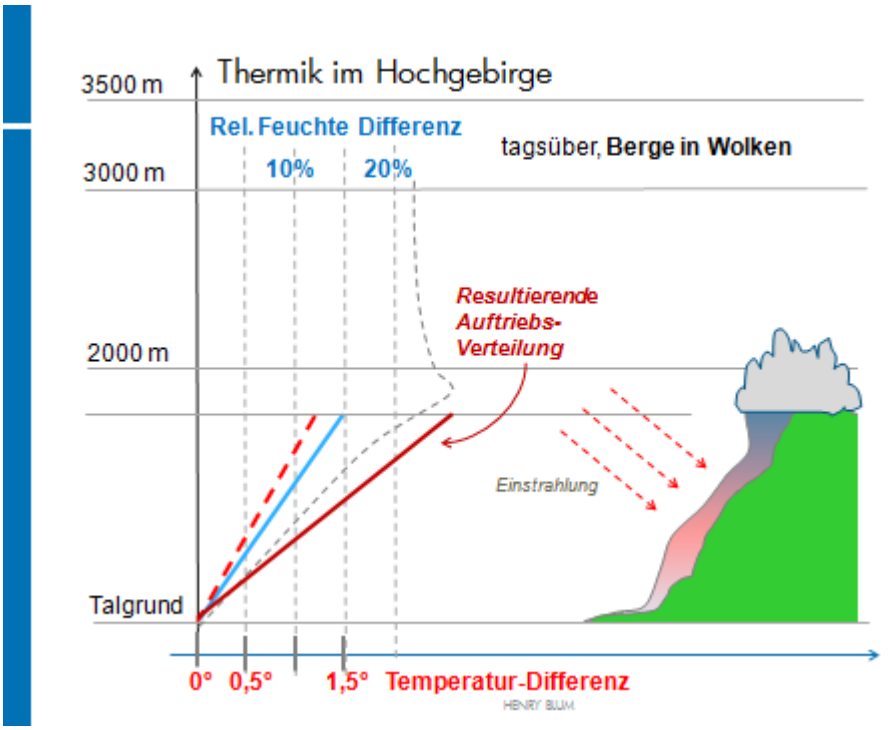
Da ein Segelflugzeug (oder ein Drachen oder Gleitschirm) nur steigen kann, wenn das Luftmassensteigen das Eigensinken des Flugzeugs übertrifft, gibt es auch hier eine „rote Zone“ inner- oder unterhalb derer ein Wegsteigen nicht mehr möglich ist. Während die Kameraden nur 100 Meter höher mit zunehmend besseren Steigwerten klettern können, sind unterhalb selten ausfliegbare Bedingungen anzutreffen und es bleibt nur das frustrierende Abgleiten ins Tal.

Entsprechend hoch muss man sich zum Beispiel im Segelflugzeug schleppen lassen, um sicher Anschluß an die ersten Aufwinde zu bekommen!

Mit dem Ausheizen der Boden-Inversion wird nicht nur die Thermik schnell kräftiger, auch die Basis steigt unter günstigen Umständen rasch weiter an. Jetzt kann auch etwas tiefer unten am Hang ausreichend starkes Steigen gefunden werden und die Arbeitshöhe erweitert sich rasch.



Nicht immer ist die Luftmasse aber so trocken, daß die Wolkenbasen weit oberhalb der Gipfelgrate entstehen. Im Gegenteil! – Oft liegen die Gipfel trotz bester Bedingungen noch in den Wolken.

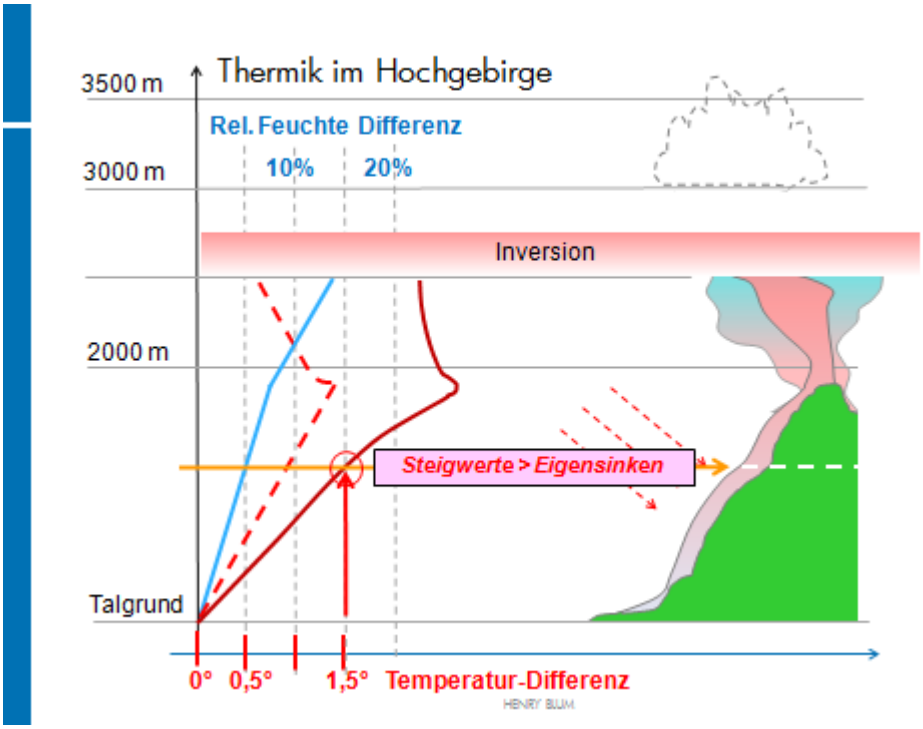


Für die Qualität der Thermik muß das nicht unbedingt ein Nachteil sein. – Viel entscheidender ist die Güte der Luftmasse, genauer ihre Temperatur und ihre Feuchte-Anteile. Denn je niedriger die Lufttemperaturen, desto besser auch die Umsetzung der eingestrahlten Energie in Warmluft am Hang.

Damit sinkt unter günstigen Umständen sogar die Schwelle, oberhalb derer ausfliegbare Aufwinde zu finden sind. - Einziger Nachteil: Das hangnahe Aufwindband ist generell relativ schmal und läßt sich deshalb nicht immer optimal nutzen. Vielfach sind hangnahe Achten angebracht, um sich Höhe erarbeiten zu können und Einkreisen ist nur in günstigen Geländeabschnitten möglich.

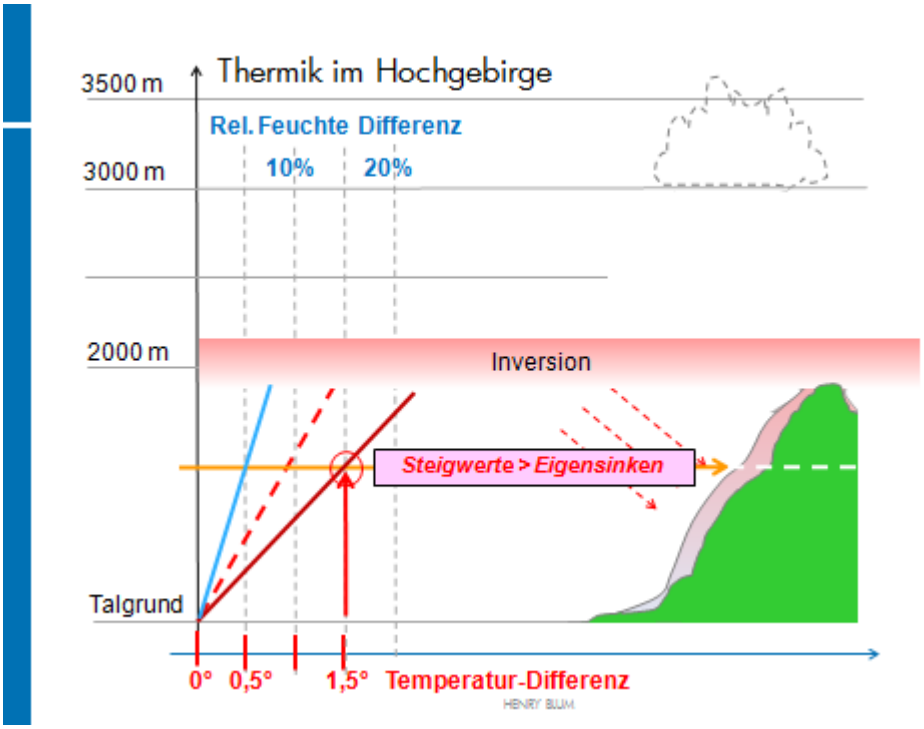
Das folgende Foto stammt von einem 1100 Kilometer Flug am 14. April 2009 und zeigt exemplarisch, daß nach einem massiven Polarluft-Einbruch aber auch bei relativ niedriger Basis große Strecken möglich sind.

Natürlich sind die Bedingungen nur selten so gut. - Gerade an Tagen mit „schönem Wetter“ und ungehinderter Einstrahlung kann es auch sein, daß die segelfliegerischen Bedingungen sich verschlechtern. Denn eine ungehinderte Einstrahlung ist meist mit hohem Luftdruck verknüpft: Nur Hochs lösen durch absteigende Luftmassen hohe Bewölkung auf und bilden Inversionen aus. Diese Sperrschichten haben zudem die angenehme Eigenschaft Überentwicklungen und damit Schauer und Gewitter zu unterbinden. Sie können aber,wie im Flachland auch, die Quellbewölkung komplett verhindern und im Extremfall den Konvektionsraum in den Alpen und damit die „Arbeitshöhe“ extrem einschränken.



An der obigen Grafik und dem nächsten Bild wird das nochmal deutlich.

Während im obigen Bild noch ausreichend Arbeitshöhe vorhanden ist, zeigt die nächste Grafik eine ebenfalls häufige Situation mit sehr niedriger Inversion.



Wenn ausserdem noch die Luftmasse stark erwärmt worden ist, (im Fliegerjargon also „verfault“ ist), und das passiert in den Alpen ebenfalls schneller als im Flachland, dann fällt auch die Thermik-Ausbeute mager aus. Das schmale fliegbare Höhenband zwischen dem Beginn der „roten Zone“ und der Inversion läßt dann oft nur noch ein mühsames Polieren am Hang zu.

Schluss-Bemerkungen

Mit Hilfe der Feuchtigkeit haben wir jetzt einen exzellenten Schlüssel zum Verständnis der Thermik. - Sie bezieht also ihren Auftrieb zwar zu 100% aus der eingestrahlten Sonnenenergie, aber diese wird anfänglich zweigeteilt gespeichert, sowohl in der Wärme des Luftpolsters am Boden, als auch in Form von latenter Energie in seinem Wasserdampfgehalt.

Nur die ersten paar hundert Meter eines Thermikschlauchs speist sich der Auftrieb hauptsächlich aus dem Temperatur-Unterschied, den ihm die Sonne ursprünglich mitgegeben hat. Danach übernimmt die Feuchtigkeit mit ihrer ständig anwachsenden ‚relativen Feuchte‘ mehr und mehr diese Rolle. Und erst das Verständnis dieser Mechanismen erlaubt eine schlüssige Interpretation aller Phänomene, die wir als Segelflieger so gut kennen und schätzen... – Feuchtigkeit ist nun mal die „Seele der Thermik!“

APPENDIX

Referenzen

Elsner, N. (1980). *Grundlagen der Technischen Thermodynamik,* Akademie Verlag - Berlin

Georgii, W. (1956). *Flugmeteorologie,* Akademische Verlagsgesellschaft GmbH, - Frankfurt

Georgii, W. (1969). *Meteorologische Navigation des Segelfluges.* Vieweg+Sohn, - Braunschweig

Müller D, Kottmeier C. (1984). *Meteorologische Aspekte des Streckensegelflugs,* Selbstverlag - Hannover