



Der Segelflieger bedient sich der thermischen Aufwinde als wichtige Quelle zum Gewinn von Höhe und Energie.

Thermik ist auf einen bestimmten Bereich begrenzt: Sie beginnt nahe am Boden und reicht gegebenenfalls bis zur Obergrenze einer Quellwolke. Bei Blauthermik endet die Thermik in einer Höhe, bevor noch die an sich feuchte Luft kondensiert. Es gibt auch Überreste von thermischen Aufwinden, die bei ihrem Aufstieg nicht mehr mit dem Boden in Verbindung stehen.

Im Querschnitt ist die Thermik generell kreisförmig. Der Aufwindstrom setzt sich aus einzelnen Blasen zusammen und ist an den Rändern ungleichmäßig bis turbulent.

Der Segelflieger sucht beim Kreisen in der Thermik die Flugbahn so, dass die Steiggeschwindigkeit des Flugzeugs andauernd positiv und im Mittel möglichst groß ist. Dann liegt der Kreis im Aufwind und normalerweise im Inneren der Thermik.

Es gibt zahlreiche Beschreibungen in der Literatur über die physikalischen Eigenschaften der Thermikluft, die Auslösung, die Differenz der Temperatur und der Feuchte gegenüber der Umgebungsluft, die Strömungsverhältnisse innerhalb der Thermik und die Kondensation der Thermikluft.

Hier wird auf die Artikelserie von Henry Blum im Magazin „segelfliegen“ 1 bis 5/2013 verwiesen, wo eine aktuelle und ausführliche Darstellung zum Thema Thermik für den Segelflieger zu finden ist.

Im Folgenden wird auch ein Beispiel aus „segelfliegen“ 1/2013 Bezug zitiert.

### **Das Modell der aktiven Thermik, Auftrieb**

Eine thermische Aufwindzone reicht im Allgemeinen vom Boden bis zur Konvektionshöhe und gegebenenfalls bis zur Wolkenbasis und in die Kumuluswolke hinein. Die Luft in der aktiven Aufwindzone ist weniger dicht als die Luft der Umgebung.

Ein übersichtliches Modell eines thermischen Aufwindes zeigt eine Luftsäule, die meist vollständig mit thermisch aktiver Luft angefüllt ist (Bild 1). Die Thermik bezieht ihre primäre Auftriebsenergie aus der Luftschicht, die bodennah im Bereich der thermischen Grenzschicht erwärmt und gesammelt wurde.

Beim Aufsteigen eines thermischen Aufwindes („Bart“) wird die anfänglich vorhandene feuchte Luft mit nach oben getragen – ein Vorgang, bei dem eine beachtliche Auftriebsenergie frei wird. Es stellt sich dann auch eine entsprechend hohe Aufwindgeschwindigkeit ein.

Die absolute Feuchte der Luft bleibt im Zentrum des Aufwindes erhalten und kann schließlich bei der Bildung einer Quellwolke wirksam und sichtbar werden.

Ein thermischer Aufwind (Bart) besteht aus einer Menge von Luftpaketen, die leichter als die Luft der Umgebung sind. Die leichten Luftpakete in einem Aufwind bilden ein gemeinsam aufsteigendes Luftpaket, das kurz als „Thermik“ bezeichnet werden soll.

Das folgende Beispiel und das Bild 1 zeigen wichtige Parameter einer „Thermik“ und enthalten Zitate aus dem Magazin „segelfliegen“ 1/2013 Seite 25.

Die aufsteigende Thermikluft kühlt sich um etwa 1°C pro 100 Meter ab. Das ist die trockenadiabatische Temperaturänderung. Ist die Temperatur der aufsteigenden Luft soweit abgesunken, dass das mitgebrachte Wasser kondensiert, bildet sich die Untergrenze der Wolke aus. Die relative Feuchte des Aufwindes beträgt dort also 100%. Weiter unterhalb der Wolkenbasis ist die relative Feuchte geringer.

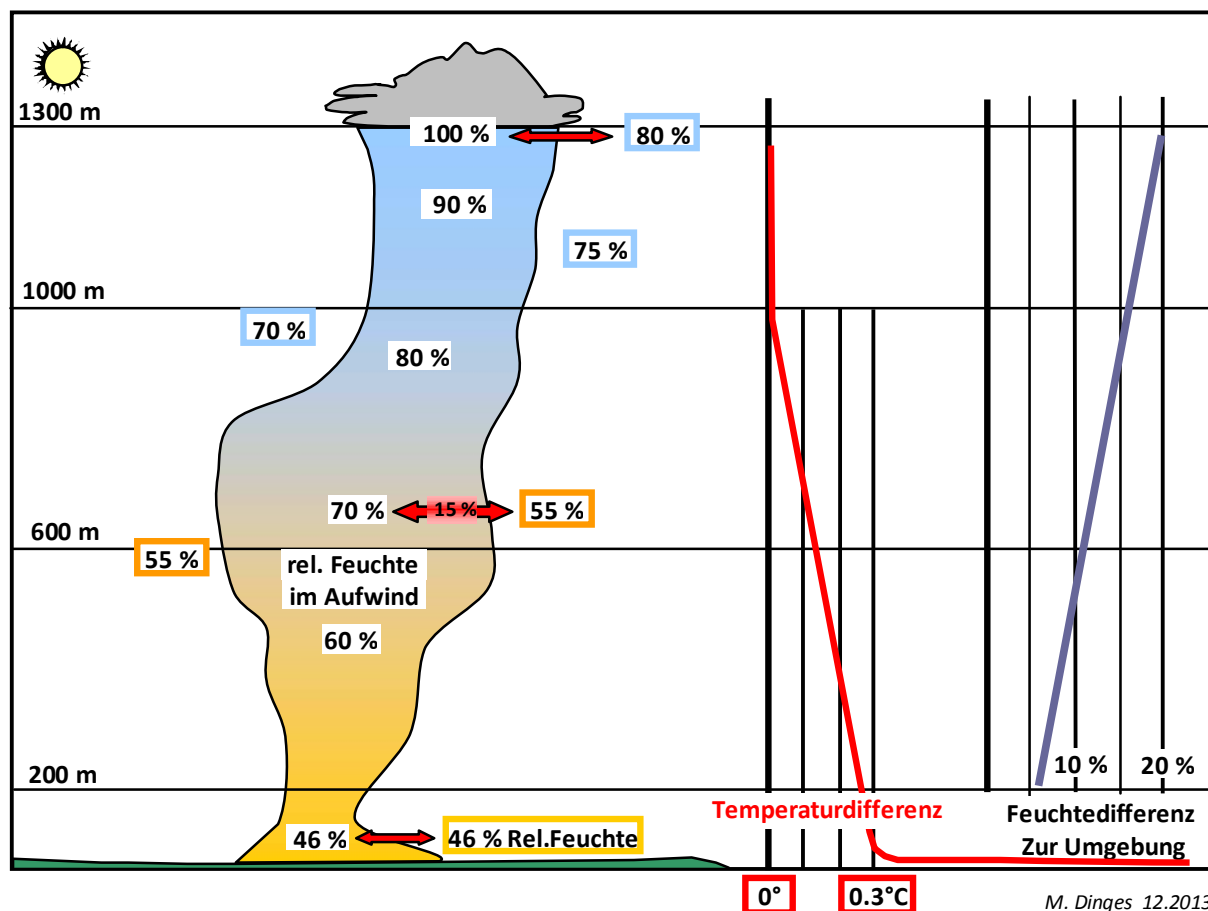
In Bodennähe kann ein Wert von beispielsweise 46 % vorliegen (Bild 1). Die relative Feuchte nimmt beim Aufstieg kontinuierlich bis auf 100 % zu. Anschließend kondensiert der Wasserdampf in einer Wolke.

Die Luft in der Umgebung des Bartes enthält ebenfalls Wasserdampf aber weniger als die Luft im Aufwind. Die Werte sind als relative Feuchte angegeben und lassen sich beispielsweise aus gemessenen Werten der Taupunkttemperatur ableiten.

Beim Aufstieg eines Bartes geht von der Menge an Feuchtigkeit, die anfänglich in Bodennähe vorhanden war, nur wenig verloren. Denn anders als die Temperaturunterschiede im Aufwind, die sich schnell angleichen, wäre für einen Ausgleich der Feuchtedifferenz ein Massetransport von Wasserdampf in die Umgebung erforderlich. Der findet aber nur in geringem Maß an den Rändern der Thermik statt. Die tatsächliche Menge an Feuchtigkeit bleibt zumindest im Kern des Bartes von unten bis oben weitgehend erhalten.

Je mehr Feuchtigkeit in Form von unsichtbaren, leichteren Wassermolekülen in einem Luftpaket eingelagert ist, desto geringer ist die physikalische Dichte der Mischung. Und je feuchter ein Luftpaket im Vergleich zu seiner Umgebung ist, desto höher ist sein Auftrieb.

Zum Verständnis der Entwicklung einer „Thermik“ ist es wichtig zu wissen: Die Thermik bezieht ihre Auftriebsenergie auf den ersten paar hundert Metern aus dem Temperaturunterschied, den die Sonnenstrahlung durch die Erwärmung des Bodens verursacht hat. Mit steigender Höhe übernimmt die zunehmende Differenz der relativen Feuchte mehr und mehr die ursprüngliche Rolle der erwärmten Luft und sorgt für den notwendigen Auftrieb. Entscheidend für das weitere Steigen ist der Feuchte- und damit Dichteunterschied zwischen Thermik und Umgebung. Die Stärke, die Qualität und die weitere Entwicklung der Thermik sind demnach generell durch die Temperatur und noch mehr durch die Feuchte der in Bodennähe angesaugten Luft bestimmt.



**Bild 1 Die relative Feuchte und die Temperatur der Luft im Aufwind und in der Umgebung**

## Der Auftrieb der Thermik

In dem oben zitierten Artikel wird eine Beispielrechnung für eine reale Thermik angegeben. Es wird der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Thermik und die Größenordnung der Auftriebskraft gezeigt. Die angehobene Temperatur der Luft in der Bodengrenzschicht, die nötig ist um die Thermik auszulösen wurde in die Berechnung nicht einbezogen.

Für die Beispielrechnung werden wirklichkeitsnahe Annahmen verwendet: Am Boden ist die relative Feuchte 46% wobei keine Dichteunterschiede zwischen Thermik und Umgebung vorhanden sind. Der Dichteunterschied steigt aber von Null auf  $0.9 \text{ gr/ m}^3$  bis zur Wolkenbasis in 1400 Metern GND. Der allein durch die Feuchteunterschiede bedingte Auftrieb des Aufwindes an der Wolkenuntergrenze entspricht also fast einem Gramm pro Kubikmeter Luft. Das klingt nach sehr wenig, ist aber, hochgerechnet auf die gesamte Thermik, sehr bedeutend. Der Aufwind möge einen mittleren Durchmesser von 500 Metern aufweisen, was bei einer Höhe von 1400 Metern einem Volumen von  $274.907.500 \text{ m}^3$  entspricht. Das ergibt einen durch die Feuchtedifferenz bedingten Auftrieb von 123.6 Tonnen. Dieser Wert ist sehr beachtlich und gibt Anlass zu weiteren Betrachtungen

## Das Umfeld der Thermik, die Druckabsenkung am Boden

Das Gebilde, das wir „Thermik“ nennen, ist ein besonderer Bereich in der sonst homogenen Luftmasse, der sich im steten Wandel befindet. Mit dem Anstieg der Konvektionshöhe im Laufe des Tages erstreckt sich die Thermik bis in größere Höhen. Wenn sie die Kondensationshöhe erreicht, entwickelt sich eine Quellwolke, die bei entsprechender Energiezufuhr auf eine beachtliche Höhe anwachsen kann. Mit dem weiteren Ansaugen von erwärmter und feuchter Luft in Bodennähe wird die Thermik umfangreicher und die Aufwindgeschwindigkeit nimmt zu.

Als Maßzahl für die Stärke einer Thermik kann der gesamte Auftrieb in Tonnen dienen. Im zitierten Rechenbeispiel wurde die Thermik mit einem Durchmesser von 500 Metern angenommen mit einem Auftrieb von 123.6 Tonnen.

Die Thermik kann also in einem Zylinder mit diesem Durchmesser, der senkrecht zur Erdoberfläche steht, weitgehend Platz finden (Bild 2). Die in dem Zylinder eingeschlossene Luftsäule enthält auch die aktive Luft der Thermik, die leichter ist als die Luft der Umgebung. Am Boden des fiktiven Zylinders ist die Druckkraft um den Auftrieb vermindert (Torricelli).

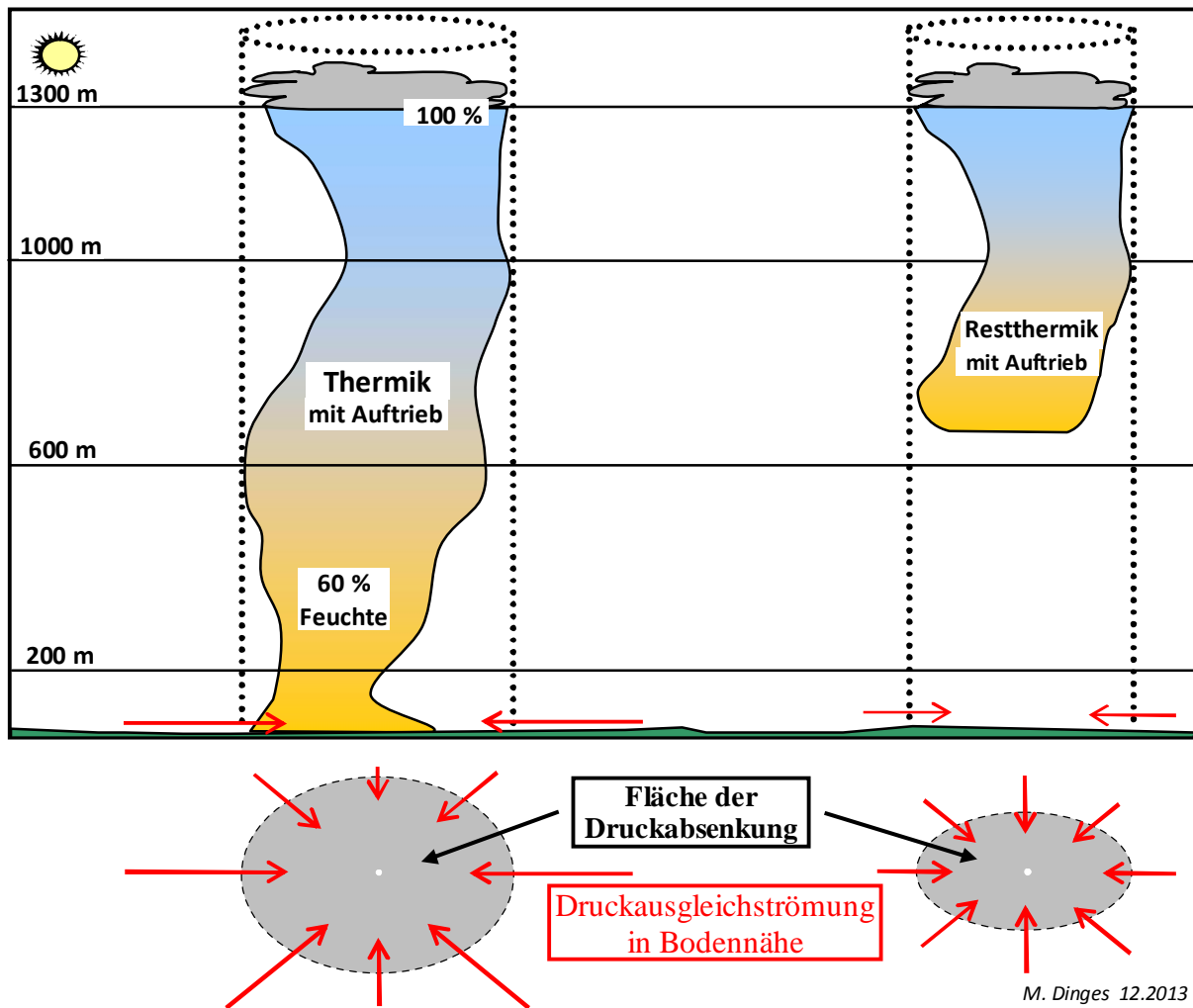
Wir finden somit *senkrecht unter der Thermik* eine örtlich begrenzte Druckabsenkung. Diese lokale Druckabsenkung ist an den Ort, den Umfang, die Auftriebskraft und an die Beständigkeit der zugehörigen Thermik gebunden und verändert sich dementsprechend. Bisher gibt es kaum Ansätze zur Messung des Druckfeldes in dem Maßstab, wie er der Ausdehnung von Thermiken entspricht. Wünschenswert wären Zeitreihen von Messwerten für die Analyse des Bodendrucks in der Umgebung von Aufwinden.

Die Druckabsenkung wirkt *senkrecht unterhalb der Thermik* auf die Erdoberfläche. Es kommt also in Bodennähe zu einer Druckdifferenz gegenüber dem Druckfeld der Umgebung. In der Folge wird sich eine Ausgleichströmung entsprechend dem Druckgradienten entwickeln, die darauf gerichtet ist die Druckunterschiede auszugleichen.

Diese Druckausgleichströmungen sind im Wesentlichen zum Zentrum der Druckabsenkung gerichtet, das *senkrecht* unter dem Auftriebszentrum der Thermik liegt (Bild 2). Das gilt auch für eine Restthermik, die sich abgelöst hat, noch aktiv ist und Auftrieb aufweist.

Die Druckausgleichströmung zum Fuß der Thermik folgt nahezu dem Verlauf des Druckgefälles. Die Strömung hat keinen längeren Vorlauf, ihre Geschwindigkeit ist gering, durch den Kontakt mit Hindernissen und durch die Mischung mit der Bodengrenzschicht wird sie immer wieder abgebremst. Das entspricht einer antitripischen Strömung, bei der die Corioliskraft unerheblich ist und deshalb eine entsprechende Richtungsablenkung fehlt.

Übrigens gibt es nicht nur bei Thermiklagen sondern auch bei dynamischen Aufwinden und bei Wellenaufwinden enorme Luftmassen mit Auftrieb, die dann am Boden mit einer Druckabsenkung wirksam werden und dort Ausgleichsströmungen hervorrufen. Manche Wellensysteme kooperieren offenbar mit konfluenten Strömungen, die sie durch die Druckabsenkung am Boden selbst verursachen und aufrechterhalten. Um die Eigenarten der Wellensysteme genauer zu erfassen sind gezielte Messungen und Modellrechnungen nötig. Derartige Untersuchungen könnten für Segelflieger und Verkehrspiloten von Interesse sein.



**Bild 2 Die Druckabsenkung liegt senkrecht unter der aktiven Thermik**

### Die Entwicklung und die Wechselbeziehungen einer Thermik mit dem Umfeld

Es bestehen bemerkenswerte Wechselbeziehungen einer Thermik mit dem Umfeld:

- Auf Satellitenaufnahmen kann man verfolgen, wie sich eine einzelne aus der Thermik entstandene Kumuluswolke sehr schnell bis zu einem Kumulonimbus weiterentwickelt.
- Eine Anzahl von Thermiken kann eine geradlinige Aufreihung in Windrichtung bilden, die ergänzt, verlängert und über eine längere Zeit aufrechterhalten wird (Wolkenstraße).
- An einem Bergmassiv entwickelt sich auf der Luvseite ein Aufwind in Form einer Thermik. Diese Luvthermik kann offenbar auf die Ablösung und die Entwicklung einer überraschend starken Thermik im Lee Einfluss nehmen.

## **1. Der selbstverstärkende Effekt bei der Entwicklung einer Thermik**

Aktive Kumuluswolken zeigen einen Aufwind an und sind häufig auch Teil einer mit bodennaher Luft versorgten Thermik. Zu jeder aktiven Thermik gehört eine Druckabsenkung am Boden, die dem senkrecht darüber liegenden Auftrieb der Thermik entspricht. Die Stärke der Auftriebskraft ist von der Höhe und dem Umfang der Thermik und vom Dichteunterschied zur Umgebung abhängig. Kräftiger Wind und Turbulenz können das Windfeld stören und die Entstehung geordneter Aufwinde und Thermiktürme beeinträchtigen.

Bei Windstille aber, oder bei schwachem Wind in allen Höhen, können die den Auftrieb spendenden Luftpakete in der Thermik weitgehend senkrecht übereinander bleiben. Das führt zu einem günstigen und übersichtlichen Sonderfall. Die Auftriebskräfte der übereinander lagernden Luftpakete beteiligen sich dann an der Druckabsenkung auf derselben Bodenfläche. Die Druckabsenkung ist dort konzentriert und entsprechend kräftig.

Unter diesen Bedingungen kann sich die aktive Thermik eigenständig weiter entfalten. Infolge der Druckdifferenz zur Umgebung strömt in Bodennähe von allen Seiten Luft aus der Umgebung zum Fuß der Thermik.

Diese Luft stammt speziell aus der überhitzten, energiereichen Bodengrenzschicht der Umgebung. Diese Luft wurde im Kontakt mit dem Boden mehr oder weniger mit Feuchtigkeit angereichert und kann deshalb zur Entwicklung des Auftriebs in der Thermik ganz besonders beitragen.

Häufig entwickeln sich bei schwachwindigem Wetter in einer ebenen und homogenen Landschaft zunächst thermische Aufwinde, die sich regelmäßig verteilt in der Fläche anordnen. Die mittlere Entfernung der einzelnen Aufwinde vergrößert sich mit dem Anwachsen der Konvektionshöhe. Erfahrungsgemäß beträgt die mittlere Entfernung der Aufwinde das 2.5- bis 3.5- fache der Konvektionshöhe. Die Abhängigkeit von der Konvektionshöhe ist dadurch begründet, dass die höherreichende Thermik mehr Luftpakete mit thermischem Auftrieb enthält und damit auch die Druckabsenkung am Boden verstärkt wird. Und das führt zu einer kräftigeren Entfaltung der Druckausgleichsströmung am Boden zum Zentrum der Thermik hin. Dabei wird auch ein wachsendes Umfeld mit einbezogen. Somit wächst das Einflussgebiet der einzelnen Thermik und der optimale Abstand zwischen den Aufwinden vergrößert sich. Dazu kommt, dass die kräftigere Thermik auch mehr Luft nach oben und zur Seite verdrängt. Luft, die schließlich im Raum zwischen den Aufwinden langsam absinkt. In der regelmäßigen Anordnung mit den passenden Abständen befinden sich thermische Aufwinde offenbar in einem temporären Gleichgewicht.

Man kann auch im Flachland beobachten, dass Thermiken am selben Standort sehr beständig sind und auch wiederholt ausgelöst werden. Das sind die sogenannten Hausbärte. Oft ist der Auslösepunkt durch ein günstiges Merkmal am Boden hervorgehoben und erkennbar. Das kann ein Steinbruch, eine Waldkante, ein Flussufer oder eine Abraumhalde sein.

Bei Wetterlagen mit schwacher Thermik reicht die am Boden einströmende energiereiche und feuchte Luft nicht immer aus um den Aufwind dauernd in Betrieb zu halten. Die Zuströmung in die Thermik wird immer schwächer bis die Verbindung abbricht. Daraufhin wird die Thermik mit ihrem aktuellen Auftrieb unabhängig weiter aufsteigen. Mangels Energiezufuhr lassen der Auftrieb und die Steiggeschwindigkeit nach. Für den Segelflieger ist das der Hinweis, dass der Aufwind zu Ende geht und die bisher aktive Wolke zerfallen wird. Der Segelflieger wird seinem Reflex folgen und wenn möglich weiterfliegen. Allerdings entfalten eine aktive Restthermik und eine zerfallende Wolke ihre Wirksamkeit noch weiter. Solange noch Luftpakete mit Auftrieb vorhanden sind, veranlassen sie eine Druckabsenkung am Boden. Das bedeutet, dass am Boden weiterhin eine konfluente Strömung energiereiche Luft sammelt. Das mag zehn oder fünfzehn Minuten dauern, aber dann kann die Energie für die Ablösung einer neuen Thermik ausreichen. Wenn der Wind sehr schwach ist, dann wird die Ablösung sogar am selben Standort stattfinden. Der Segelflieger kann diesen möglichen Ablauf in seine taktischen Überlegungen einbeziehen.

Doch nicht immer befinden sich selbstinduziertes Wachstum und Abschwächung eines thermischen Aufwindes in einem periodischen oder stabilen Gleichgewicht. Unter gewissen Umständen kann die Thermik auch ein stetiges Wachstum entfalten, so dass sich ein einzelner Aufwind bis zu einem riesigen Cumulonimbus auftürmt.

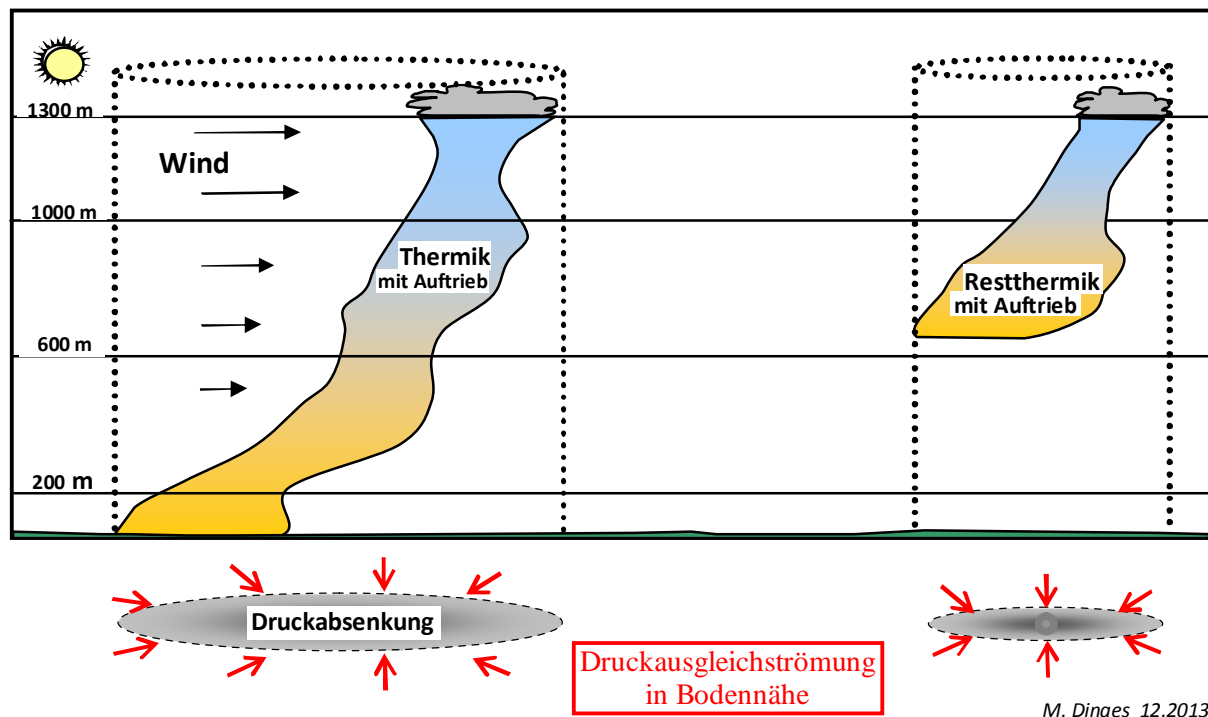
Wenn das Umfeld günstig ist, kann eine einzelne Thermik gegenüber den Konkurrenten eine vorteilhafte Entwicklung erfahren. Beispielsweise kann die Thermik, wenn sie als erste eine hemmende Inversion durchbricht, schnell in der Höhe und im Umfang anwachsen. Der wachsende Auftrieb und die verstärkte und schnelle Druckabsenkung am Boden befähigt die Thermik aus einer erweiterten Umgebung noch mehr erwärmte und feuchte Luft zu sammeln. Die zusätzliche Feuchte trägt zum beschleunigten Wachstum bei und forciert die Ausbildung einer gewaltigen Kumuluswolke. Wenn es die physikalischen Gegebenheiten erlauben, entsteht daraus ein hochreichender Cumulonimbus.

Man erkennt den *sich selbst verstärkenden Effekt* dieser Entwicklung. Der Segelflieger darf nicht überrascht sein wenn sich ein Gewitter außerordentlich schnell aufbaut.

## 2. Thermische Aufwinde bei höheren Windgeschwindigkeiten, Wolkenstraßen

Wenn die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt, wie man es regelmäßig beobachtet, werden die oberen Teile einer Thermik mehr als die unteren versetzt. Die aktiven Luftpakete in der Thermik sind dann bald schräg übereinander angeordnet (Bild 3). Jedes einzelne der Luftpakete bewirkt nun eine Druckabsenkung am Boden. Die Stärke der Druckabsenkung entspricht dem aktuellen Auftrieb eines jeden Luftpaketes. Die Druckabsenkungen der einzelnen Luftpakete ergänzen sich am Boden zu einem langgezogenen, in Windrichtung orientierten Bereich (Bild 3).

Auch eine vom Boden bereits abgelöste aber noch aktive Restthermik wird am Boden mit einer Druckabsenkung wirksam.

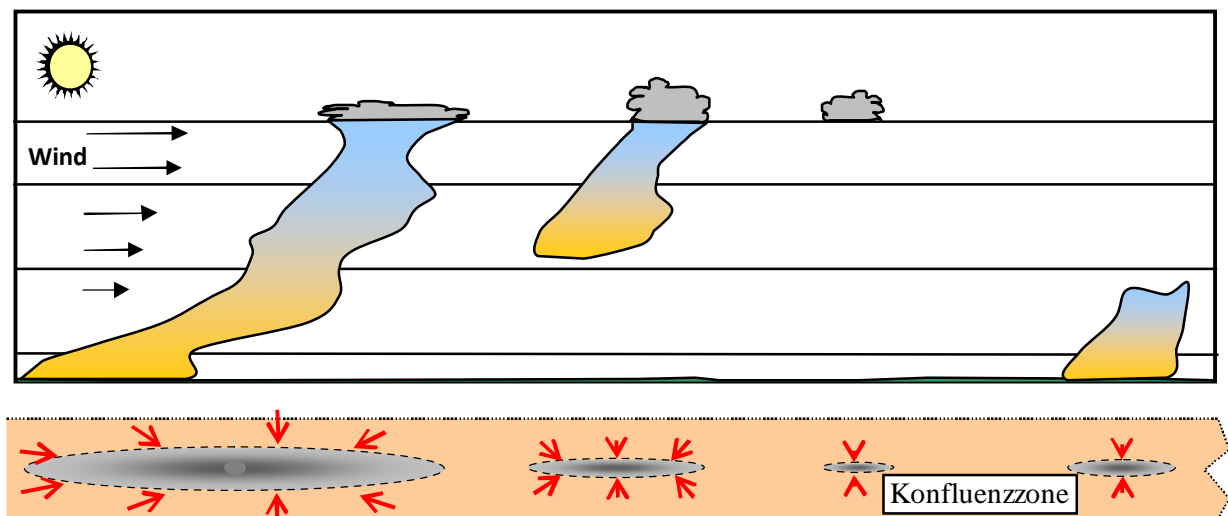


**Bild 3** Druckabsenkungen und Ausgleichsströmung unter einer Thermik im Windfeld

Die Thermik wird mit dem Wind versetzt und verliert früher oder später den Kontakt mit der am Boden zuströmenden Luft. Die Luftpakete in jedem Höhenabschnitt der Thermik werden mit dem Wind versetzt und gegeneinander verschoben. In dem jeweils senkrecht unter einem

Luftpaket liegenden Bereich wird der Druck abgesenkt. Die Bereiche des verminderten Druckes bewegen sich am Boden mit dem Wind mit und fügen sich zu einem umfassenden langgezogenen Bereich der Druckabsenkung zusammen. Die aktiven Luftpakete ziehen eine *unsichtbare Spur* am Boden und werden dort zumindest zeitweilig wirksam.

Von der Umgebung zu dem wandernden Bereich mit dem abgesenkten Druck besteht eine konfluente Druckausgleichströmung, die im Wesentlichen quer zum Wind verläuft (Bild 4). Die bodennahe, größtenteils energiereiche und feuchte Luft der Umgebung wird in den Bereich des abgesenkten Druckes transportiert. Sie sammelt sich in einer langgestreckten Konfluenzzone. Diese energiereiche Luft wird aus den Bereichen genommen, die parallel dazu verlaufen. Dort fehlt dann Energie bis sie im Lauf der Zeit durch Einstrahlung und Erwärmung der Oberfläche wieder ergänzt werden kann.



M. Dinges 12.2013

**Bild 4** Die Konfluenzzone unter der Wolkenstraße

Wo eine aus aktiven Luftpaketen bestehende Thermik oder Restthermik mit dem Wind versetzt wird, bewirkt und hinterlässt sie eine unsichtbare, mehr oder weniger breite Spur („pressure footprint“ oder „footprint“) am Boden. Dorthin kann die jeweils vorübergehend wirksame Druckausgleichströmung energiereiche und feuchte Luft aus der Umgebung transportieren und anreichern.

Auch wenn die aktive Thermik bereits weitergezogen und dann zerfallen ist: Es bleibt die langgezogene Spur am Boden. Es ist die *Konfluenzzone*, die für die Entstehung, Ablösung und Entwicklung einer neuen Thermik günstige Bedingungen bietet (Bild 4).

Das bedeutet: *Die folgenden Aufwinde entstehen bevorzugt aus der Konfluenzzone heraus.* Diese neuen Thermiken werden ebenfalls mit dem Wind versetzt und ziehen ihre Spur wobei sie die Konfluenzzone verlängern und intensivieren.

Stärkerer Wind sorgt für eine schnelle Versetzung der Thermiken und Aufwindreste. Jede einzelne Thermik prägt dann, bevor sie Zeit hat sich aufzulösen, einen entsprechend längeren Abschnitt der Spur. Die erste Thermik des Tages, die sich an einem begünstigten Ort abgelöst hat und mit dem Wind über das Land zieht, kann eine Zone der Konfluenz begründen und dort die Konzentration von energiereicher Luft bewirken. Jede Thermik, die in dieser Zone entsteht oder auch rein zufällig ihren Weg oberhalb dieser Konfluenzzone findet, lenkt weitere Energie in die Zone.

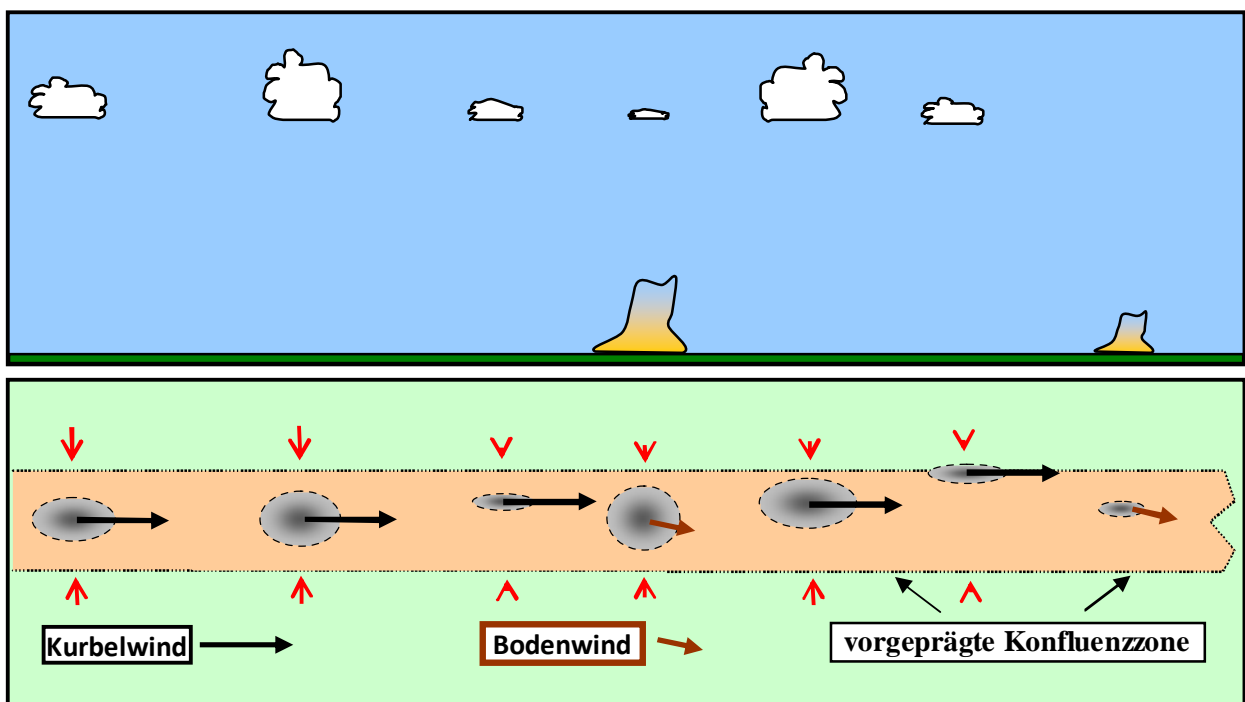
Wenn der Vorgang einigermaßen ungestört abläuft, wird sich nach und nach eine der parallel verlaufenden Konfluenzonen dadurch hervorheben, dass sich in ihr überdurchschnittlich viel energiereiche Luft angesammelt hat. Dort ist die optimale Voraussetzung dafür gegeben, dass sich entlang dieser Spur auch weiterhin eine Abfolge von thermischen

Aufwinden entwickelt, die ihrerseits diese Konfluenzzone stärken und weiterführen. In diesen vorgeprägten Streifen bringt die Druckausgleichsströmung bodennahe energiereiche Luft. Die Energie wird der Umgebung entzogen. Infolgedessen ist es unwahrscheinlich, dass sich neben der vorgeprägten Konfluenzzone eine Thermik ablösen wird. Beobachtungen zeigen, dass die vorgeprägten Konfluenzzonen einen typischen Abstand voneinander aufweisen, der mindestens der dreifachen Konvektionshöhe entspricht.

Die Reihe der Thermiken, die einer fortlaufenden Spur folgen, zeigt sich als *Wolkenstraße*.

Der Segelflieger sucht seit jeher die Wolkenstraßen zu identifizieren und zum Gewinn von Höhe und Energie entlang seiner Flugstrecke zu nutzen. Aus diesem Grunde ist es hilfreich, die Entwicklung, die Verteilung und das Wachstum der Wolken im Auge zu behalten und zu bewerten. Daneben ist es interessant, die physikalischen Zusammenhänge zu kennen, die der Bildung von Wolkenstraßen zugrunde liegen. Man erkennt, wie der Austausch von Information und Energie zwischen den entlang der Wolkenstraße aufeinanderfolgenden Aufwinden funktioniert.

Aufreihungen gibt es auch bei Blauthermik, nur sind dann die einzelnen Aufwinde nicht durch Wolken markiert. Die Vermutung, dass eine gefundene Thermik zu einer Reihe weiterer Aufwinde gehört, kann dem Pilot helfen, den nächsten Aufwind zu finden. Mit einiger Aussicht auf Erfolg wird die Suche genau mit dem Wind oder gegen den Wind durchgeführt. Die aktuelle und zutreffende Windrichtung kann beim Kreisflug im jeweils vorhergehenden Aufwind ermittelt werden. Die Richtung entspricht der Versetzung beim Kurbeln und wird deshalb oft als „Kurbelwind“ bezeichnet.



M. Dinges 12.2013

**Bild 5 Bodenwind und Kurbelwind unter der Wolkenstraße, die vorgeprägte Konfluenzzone**

Die Lage und Ausrichtung einer Wolkenstraße verändert sich im Lauf des Tages.

Morgens ist der Konvektionsraum noch niedrig. Die aktiven Thermiken werden mit dem Wind in der unteren Luftschicht versetzt. Die Richtung der Versetzung entspricht dort nahezu dem Bodenwind.

Mittags sind die kräftigsten Aufwinde unterhalb der Wolkenbasis zu finden. Dann zeichnen diese Abschnitte der Thermiken (Kurbelwind) die Spur der Konfluenzzone.



Am Nachmittag befinden sich die Luftpakete mit dem stärksten Auftrieb in den Kumuluswolken, jedenfalls wenn sich diese kräftig entwickeln. Deren Zugrichtung entspricht weitgehend der Richtung des Höhenwindes oder des geostrophischen Windes.

Die Zugrichtung eines aktiven Luftpakets (Kurbelwind) unterscheidet sich normalerweise von der Zugrichtung der bereits vorgeprägten Konvergenzzone (Bodenwind). Diese Winkel­differenz („skid“) führt zu einer langsamen Verlagerung und auch zu einer Krümmung der Wolkenstraße. Die neu entstandenen Aufwinde finden sich deshalb häufig am Rand der Wolkenstraße, die durch die früher entstandenen Wolken und Wolkenreste markiert ist.

Das Feld der thermischen Wolkenstraßen und der darunterliegenden Konfluenz­zonen ist nicht stationär. Es passt sich dem Windfeld und dem Tagesgang der Wetterentwicklung an.

Natürlich gibt es weitere meteorologische Phänomene, die auch zu einer regelmäßigen Aufreihung von Wolken führen. Entlang von Luftmassengrenzen oder Fronten oder ausgelöst durch dynamische Reaktionen an Hindernissen oder unterhalb von stationären Wellen bilden sich gelegentlich Aufreihungen, die dem Segelflieger vertraut sind.

### 3. Beispielhafte Wolkenstraßen



*Bild 6 Wolkenstraßen, Hochdruckgebiet „MARA“, 23. August 2009*

Das Feld der Wolkenstraßen wird in dem Satellitenbild vom 23. August 2009 eindrucksvoll sichtbar. Das Bild des Satelliten „Aqua“ zeigt den Bereich des Hochdruckgebietes „MARA“, dessen maximaler Luftdruck bei 1026 hPa lag. Sein Mittelpunkt liegt nahe bei Berlin.

Die Luft war durch Advektion und Absinken soweit abgetrocknet, dass zunächst wolkenarmes Wetter vorherrschte. Im Laufe des Tages führte strahlungsbedingte Konvektion zur Bildung zahlreicher Kumuli, die sich konzentrisch zum Mittelpunkt des Hochs anordneten.

Die Strömung der aus dem Hoch ausfließenden Luft ist an den ausgeprägten Wolkenstraßen erkennbar. (nach Jörg Rapp, Mitteilungen DMG 02/2011).

Das Wolkenbild wird strukturiert durch die höher reichenden Kumuli. Sie verdeutlichen die Strömung am oberen Bereich des Konvektionsraumes, die etwa dem geostrophischen Wind entspricht.

#### **4. Die ortsfeste Thermik im Gebirge, Konfluenz und Wachstum**

An einem Gebirgsmassiv finden wir thermische Aufwinde dort, wo reichlich Strahlungsenergie ankommt und wo die bodennahe Luftschicht bevorzugt erwärmt wird. Die bodennahe erwärmte Luftschicht ist in eine Ausgleichströmung eingebunden, die vom Druckfeld am Boden gelenkt wird und im Sinne eines Druckausgleichs verläuft. Die Druckausgleichsströmung zeigt sich besonders im thermischen Hangaufwind (anabatischer Wind) und im System der Talwinde.

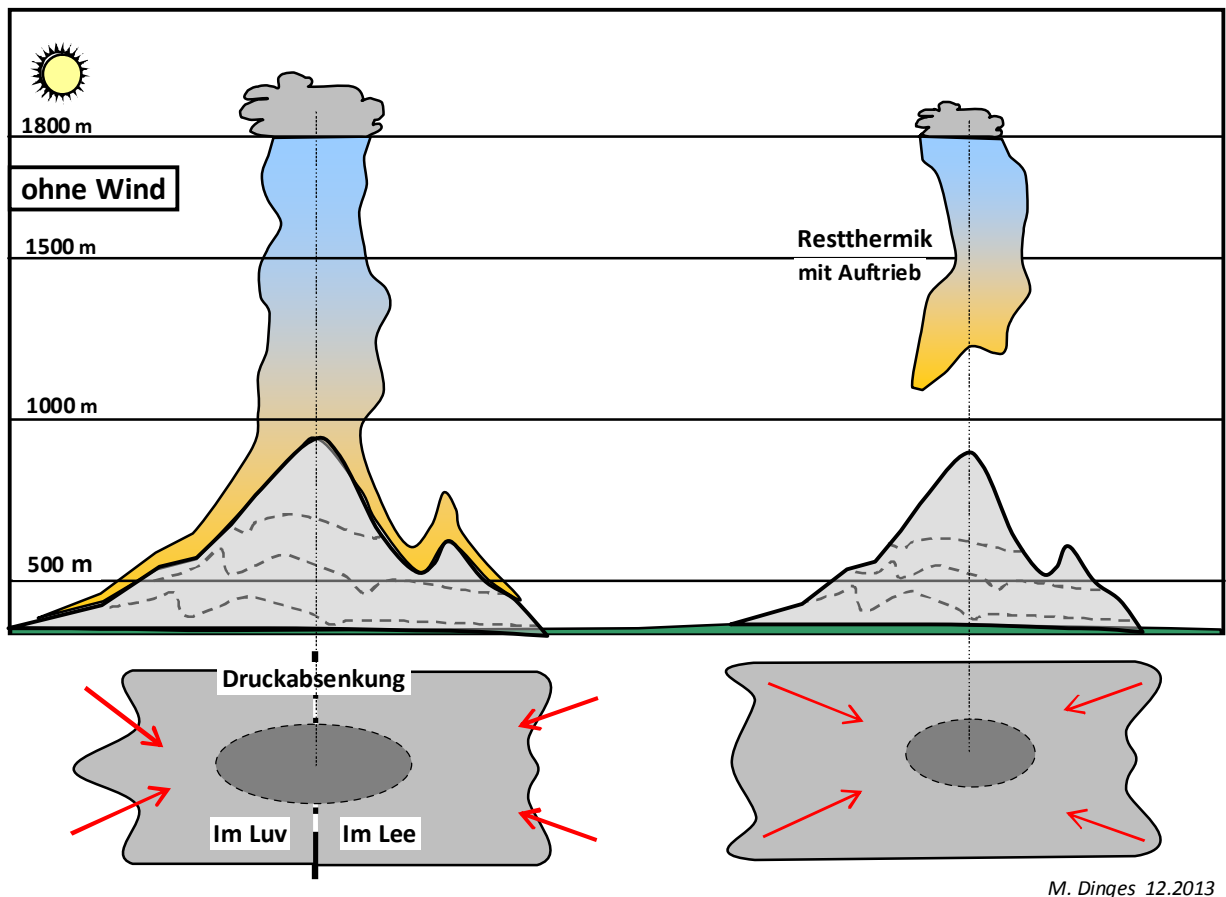
Im Gebirge ist die konvektive Luftschicht ungleichmäßig dick, so wie es das Gebirgsrelief vorgibt. Über einem umfangreichen und hohen Gebirgsmassiv lagert eine geringere Luftmenge als über einem benachbarten Tal. Das wird mit dem Begriff Volumeneffekt benannt. (siehe: „Die Entwicklung der Thermik im Gebirge“, Martin Dinges, 2010).

Bei Windstille machen sich die ersten konfluenten Strömungen bevorzugt im engeren Umfeld eines Gipfels oder Grates bemerkbar. Die Höhenlage, der Volumeneffekt, günstige Einstrahlung, Erwärmung und Ausgleichströmung tragen dazu bei, dass sich dort eine Thermik entwickeln kann (Bild 7).

Die anabatische Strömung unterstützt den Druckausgleich im Relief und transportiert dabei erwärmte und feuchtere Luftpakete aus den Tälern über die Hänge zur Thermik hin. Oberhalb des Reliefs unterscheidet sich die Thermik im Gebirge nicht wesentlich von einer im Flachland entstandenen Thermik. Mit der Höhe nehmen die relative Feuchte der Luftpakete und damit ihr Auftrieb zu.

Entscheidend für die Stärke des Auftriebs und der Aufwindgeschwindigkeit ist auch hier der Feuchte- und damit Dichte-Unterschied zwischen Thermik und Umgebung.

Die von der Thermik umfasste Luftmenge enthält die aktive Luft der Thermik, die leichter ist als die Luft der Umgebung (Bild 7). Unterhalb der Thermik, auch wenn dort die Bodenoberfläche ungleichmäßig strukturiert ist, wirkt eine Druckkraft, die um den Auftrieb der aktiven Thermik vermindert ist. Wir finden also auch hier *senkrecht unter der Thermik* eine örtlich begrenzte Druckabsenkung und dort entwickelt sich die dazugehörige konfluente Druckausgleichsströmung.



M. Dinges 12.2013

**Bild 7 Thermik über dem Gebirgsmassiv bei Windstille**

Bei Thermikwetter entsteht bevorzugt in Gipfelnähe ein stationärer Aufwind, der den Bereich mit vermindertem Druck konsolidiert. Man spricht allgemein von einer relativen Tiefdruckzone, einem Bodentief oder insbesondere von einem örtlichen Hitzetief. Dagegen sind Tiefdruckzonen im geostrophischen Wettergeschehen sehr viel umfangreicher. Sie weisen einen Durchmesser von hunderten von Kilometern auf. Ihre Lebensdauer kann Tage und Wochen betragen. Diese Druckverhältnisse werden für meteorologische Untersuchungen und Vorhersagen im großen Maßstab und regelmäßig registriert.

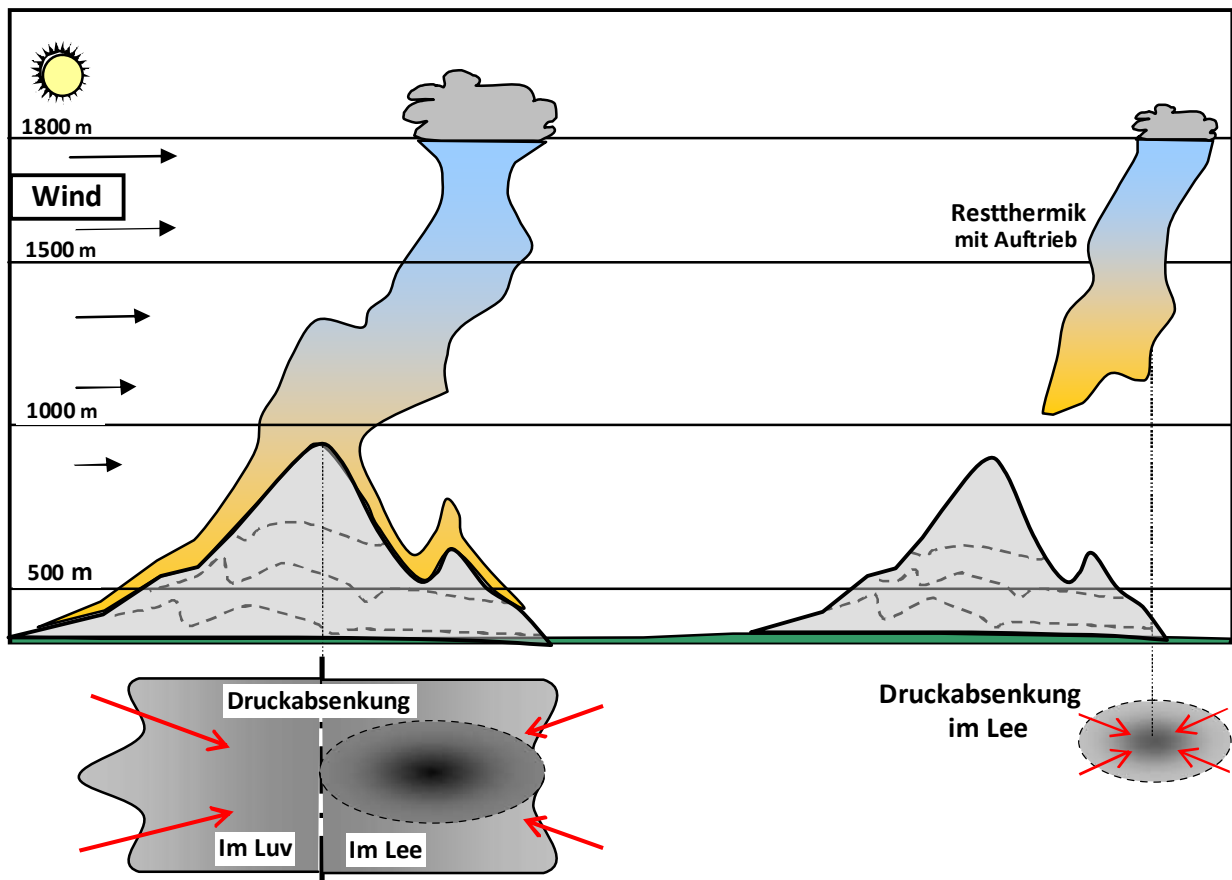
Die kleinräumigen Hitzetiefs, die zusammen mit der Thermik täglich neu erscheinen, haben eine kurze Lebensdauer. Ihr Durchmesser kann einige hundert Metern betragen oder ein ganzes Gebirgsmassiv umfassen. Eine Messung des Druckfeldes ist technisch aufwendig.

Ist die bodennahe Druckausgleichsströmung in Gang gekommen, dann transportiert sie weitere erwärmte und feuchte Luftmassen zum Zentrum des Hitzetiefs und in die darüberliegende Thermik. Die Thermik wird umfangreicher und höher, die Aufwindgeschwindigkeit nimmt zu. Der wachsende Auftrieb und die infolgedessen verstärkte Druckabsenkung am Boden befähigt die Thermik aus einer erweiterten Umgebung noch mehr erwärmte und feuchte Luft zu sammeln. Die Thermik kann ihren Einflussbereich am Boden auch auf Kosten einer angrenzenden, zu diesem Zeitpunkt schwächeren Thermik vergrößern.

Schwächere Hitzetiefs, die über untergeordneten Gipfeln entstanden sind können von einem stärkeren Hitzetief vereinnahmt werden, das dann ein größeres Massiv umfasst.

Man beobachtet und erkennt an den wachsenden Wolken und an den größeren Wolkenabständen das *sich selbst verstärkende Wachstum* der Thermik über dem Gebirgsmassiv.

## 5. Thermik und Wind im Gebirge, der Leebart



M. Dinges 12.2013

**Bild 8** Druckabsenkung am Boden, Thermik über dem Gebirgsmassiv bei mäßigem Wind

Im Windfeld weist das angeströmte Massiv eine Luvseite und eine Leeseite auf. Der Wind verschiebt erwärmte und feuchte Luft auf der Luvseite zum Gipfel und zum Grat hin. Diese Strömung weist bereits eine vertikale Komponente auf. Das gilt als einer von vielen Gründen, warum gerade dort ein günstiger Auslösepunkt für die Thermik ist. Der Startpunkt kann auch auf der Seite des Massivs, die optimal zur Einstrahlungsrichtung orientiert ist, liegen. Bei günstigen Luftwerten ist zu erwarten, dass sich früher oder später ein Hitzetief und eine beständige Thermik zentral über dem Gipfel oder dem Massiv entwickeln will (Bild 8).

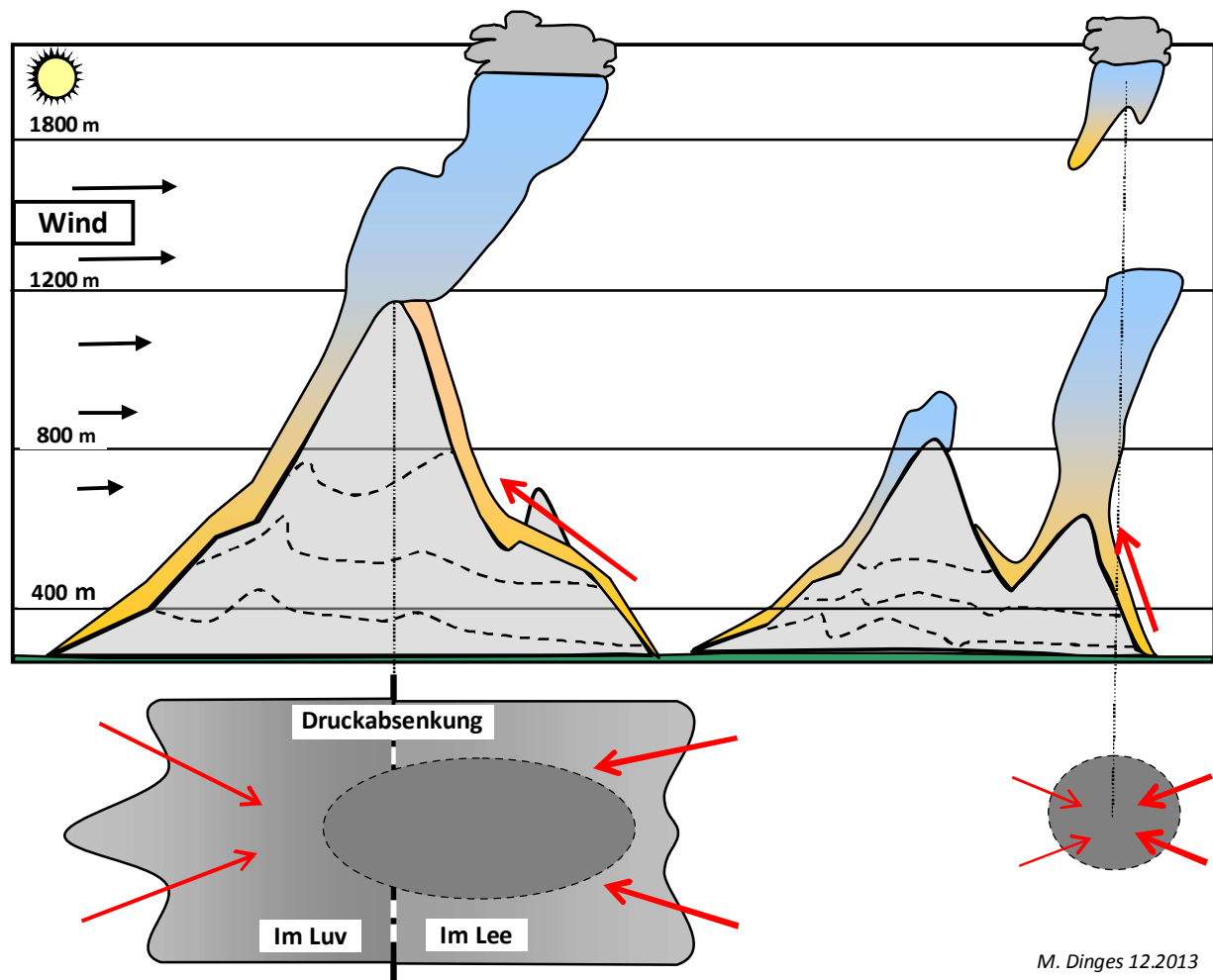
Die erwärmten Luftpakete sammeln sich bevorzugt nahe des Grates oder des Gipfels und tragen zur Ablösung und zur Entwicklung eines Aufwindes bei. Wenn der Aufwind weiter an Höhe gewinnt, dann wirkt neben der vertikal gerichteten Auftriebskraft zunehmend auch die horizontal gerichtete Windkraft. Die horizontale Beschleunigung der thermisch aktiven Luftpakete in der Thermik stellt einen komplexen Vorgang dar. In dieser Übergangshöhe muss der Segelflieger mit störender Turbulenz rechnen.

Der obere Teil der Thermik mit ihren aktiven Luftpaketen wird vom Wind leewärts verformt. Dorthin, in den Leebereich verschiebt sich auch die Fläche des abgesenkten Druckes (Bild 8). Die dazugehörige Druckausgleichsströmung sammelt aus der Umgebung die bodennahe Luft. Das führt dazu, dass eine Konfluenzströmung im Lee des Massivs warme und feuchte Luft sammelt. Dort wird bevorzugt ein eigenständiger Aufwind ausgelöst, der sogenannte *Leebart*. Je nach der Stärke des Windes und des Aufwindes löst sich die Thermik nach einer gewissen Zeit vom Gipfel des Massivs ab und treibt zunächst ohne Zustrom von weiteren aktiven Luftpaketen mit dem Wind davon. Die isolierte Thermik zeichnet dabei am Boden eine Spur der Druckabsenkung. Die dazugehörige Konfluenz wird zuerst und besonders im Leebereich des Massivs wirksam. Bevorzugt entlang dieser Spur beobachtet man dann einen neu ent-

standenen Aufwind. Dem Wetter entsprechend kann der Abstand bis zum ersten Bart eine typische Länge aufweisen. Der neue Aufwind kann dort als Leebart wiederholt auftreten. Der Segelflieger schätzt die *Leebärte*, weil sie oft überdurchschnittliche Steiggeschwindigkeiten liefern. Andererseits neigen sie dazu eng und turbulent und von kurzer Lebensdauer zu sein.

## 6. Die anabatische Strömung im Lee

Wind und Thermik erzeugen im Zusammenspiel eine komplexe Strömung an einem Bergmassiv. Dennoch kann man Merkmale einer gewissen Ordnung feststellen. Wenig wissen wir von der Strömung von Wind und Thermik auf der Leeseite eines Massivs. Wir finden meist sehr turbulente Verhältnisse, wie sie bei der Mischung heterogener Luftmassen entstehen. Wenn die thermische Konvektion fehlt und nur der Wind das Massiv beaufschlagt, dann erwarten und finden wir auf der Leeseite nahe am Berg kräftigen Abwind.



**Bild 9 Die anabatische Strömung auf der Leeseite des Bergmassivs**

Im Zusammenhang mit Einstrahlung und Auftrieb kann auch auf der Leeseite die Existenz von anabatischem Aufwind nachgewiesen werden. Dieser Aufwind ist eng an den Hang angelehnt und kann erstaunlich kräftig sein (Bild 9). Die energiereiche Luft im Lee wird in der Nähe des Gipfel oder des Grates mit der luvseitigen Thermikluft vermischt. Meist differiert ihrer Herkunft entsprechend die relative Feuchte der Luftmassen. Dann bildet sich zunächst keine einheitliche Wolkenbasis. Bei kräftigem Wind kann der Aufwind im Lee tatsächlich vorhanden sein, aber für den Segelflieger ist er kaum von Nutzen.

Hubschrauberpiloten beobachten den Effekt, wenn sie dringende Versorgungsflüge oder Rettungseinsätze im Gebirge durchzuführen haben.

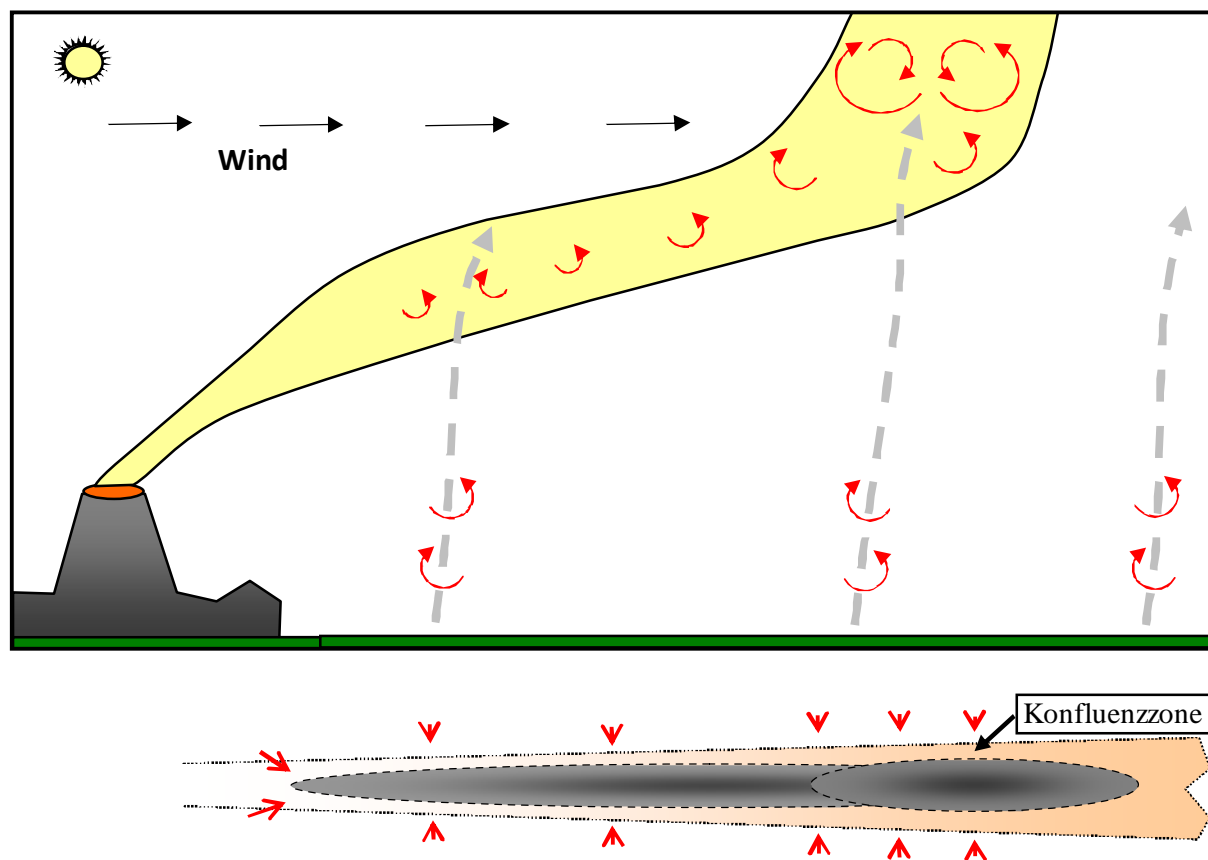
Die Segelflieger können beim Hangflug im Lee kaum einen Höhengewinn erzielen. Der Flug müsste sehr nahe an einem Steilhang entlang führen um im Steigen zu bleiben. Sobald aber die übliche Umkehrkurve eingeleitet wird, fällt das Flugzeug in einen enormen Abwind und verliert katastrophal an Höhe. Wenn ein Pilot den Hangaufwind unbedingt erforschen möchte, sollte er einen langgezogenen Hang auswählen, Längsneigung und Fahrt anpassen und alle Sicherheitsvorkehrungen erwägen. Man kann gelegentlich die heikle Umkehrkurve vermeiden indem man abwechselnd dem Luvhang und dem Leehang folgt und so den Berg umrundet.

Weniger Probleme mit der Turbulenz und dem schmalen Aufwindband scheinen die Geier in Südfrankreich zu haben. Sie nisten erstaunlicherweise in großen Ansiedelungen gerade in Felswänden, die bei den häufigen Wetterlagen ein Lee aufweisen.

## 7. Industriethermik und konfluente Strömung

Die warme Abluft aus einem Kraftwerk ist weniger dicht als die Luft in der Umgebung und wird von der Auftriebskraft angehoben und vom Wind versetzt. Sie ist leichter als die Luft der Umgebung und vermindert in den vertikalen Luftsäulen, in welchen sie die Umgebungsluft verdrängt, den Bodendruck. Unterhalb der Abluffahne gibt es deshalb am Boden eine Spur der Druckabsenkung, die Tiefdruckspur. Sie verläuft senkrecht unter der Warmluftfahne.

Bei Thermikwetter entwickelt sich entsprechend der Druckdifferenz von beiden Seiten zur Tiefdruckspur hin eine konfluente Strömung. Aus dieser Konfluenzzone heraus lösen sich bevorzugt die weiteren Thermiken ab, die ihrerseits Druckabsenkungen am Boden bewirken. Somit wird die vorgeprägte Konfluenzzone über die sichtbare Abluffahne hinaus verlängert.



M. Dinges 12.2013

**Bild 10 Industriewärme und Konfluenzzone**