

# Die Seele der Thermik

Was treibt eine Thermikblase beim Aufstieg an? Nach weitläufiger Ansicht ist es allein der Temperaturunterschied zur umgebenden Luft. Doch das ist nur die halbe Wahrheit. Es gibt einen zweiten, mindestens genauso einflussreichen Faktor: die Feuchtigkeit.

TEXT LUCIAN HAAS | GRAFIKEN HENRY BLUM



FOTO MARTIN SPEIS

Ein verheißungsvoller Thermiktag im Flachland. Die klare, trockene Luft verspricht gute Steigwerte in der Höhe.

Es war Ende der 1970er Jahre, als der Berliner Meteorologe Carsten Lindemann mit einem Motorsegler eine Reihe von Messflügen unternahm. Er flog in unterschiedlichen Höhen in thermisch durchmischter Luft, bestimmte die Stärke der Aufwinde und maß zugleich mit einem Thermometer die Lufttemperatur innerhalb und außerhalb der Thermikblasen. Dabei machte er eine erstaunliche Entdeckung.

Während die Thermikblasen kurz nach ihrem Ablösen in weniger als 100 Meter über Grund noch einen Temperaturvorsprung von über 1,5 Grad Celsius gegenüber der Umgebungsluft besaßen, nahm dieser mit der Höhe rapide ab. Schon 600 Meter über Grund war kaum noch ein Temperaturunterschied nachweisbar, obwohl die Thermiken dort häufig ihr stärkstes Steigen aufwiesen (s. Abb. 1). Spürbar schwächer wurden sie erst in noch größerer Höhe – gebremst durch eine Inversion, bei der nun Umgebungsluft messbar wärmer war als die Luft im Thermikschlauch. Die Thermiken waren also um einige hundert Meter

weiter gestiegen, obwohl ihnen ein messbarer Temperaturvorsprung als Antrieb fehlte. Wie konnte das geschehen?

Lindemanns Beobachtungen passen nicht ganz zu der bis heute noch immer verbreiteten Lehrmeinung über die Thermik. Sie besagt, dass Luftpakete in die Höhe steigen, weil sie wärmer und deshalb leichter sind als die umgebende Luft. Die Messungen Lindemanns zeigen allerdings, dass Thermikblasen auch dann noch aufsteigen können, wenn die darin gemessene Lufttemperatur sich gar nicht mehr von der Umgebungstemperatur unterscheidet. Es muss also noch eine zweite treibende Kraft für die Bärte geben, die von den meisten Fliegern einfach übersehen wird. Das Rätsel sei schon mal gelüftet: Es ist die Luftfeuchtigkeit.

Dass wärmere Luft im Umfeld kälterer Luftmassen nach oben steigt, hängt mit der Luftdichte zusammen. Wärmere Luft besitzt eine geringere Dichte, ist somit leichter und drängt deshalb nach oben. Der gleiche Effekt wird erreicht, wenn Luft mit Wasserdampf angefeuchtet

wird. Feuchte Luft hat ebenfalls eine geringere Dichte als trockene Luft (bei gleicher Temperatur), ist deshalb leichter und drängt ebenso nach oben. Wenn nun eine Thermikblase vom Boden aus aufsteigt, nimmt sie den in ihrem Luftvolumen enthaltenen Wasserdampf mit. Kommt sie beim Aufstieg in Luftmassen, die trockener sind, so trägt der Unterschied im Wasserdampfgehalt seinen Teil zu einer Differenz der Luftdichte bei. Die feuchtere Thermikblase wird dann, selbst wenn ihre Temperatur sich von der Umgebung gar nicht mehr unterscheidet, noch immer leichter sein und weiter steigen.

Halten wir deshalb eine erste wichtige Erkenntnis fest: Damit eine Thermikblase aufsteigen kann, muss sie eine geringere Dichte haben als die umliegende Luft. Und diese geringere Dichte wiederum beruht auf zwei Einflussgrößen – der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit. Meteorologen betrachten manchmal beides zusammen, indem sie den von der Luftfeuchte bestimmten Dichteunterschied rechnerisch der Temperatur zuschlagen. Sie sprechen dann von

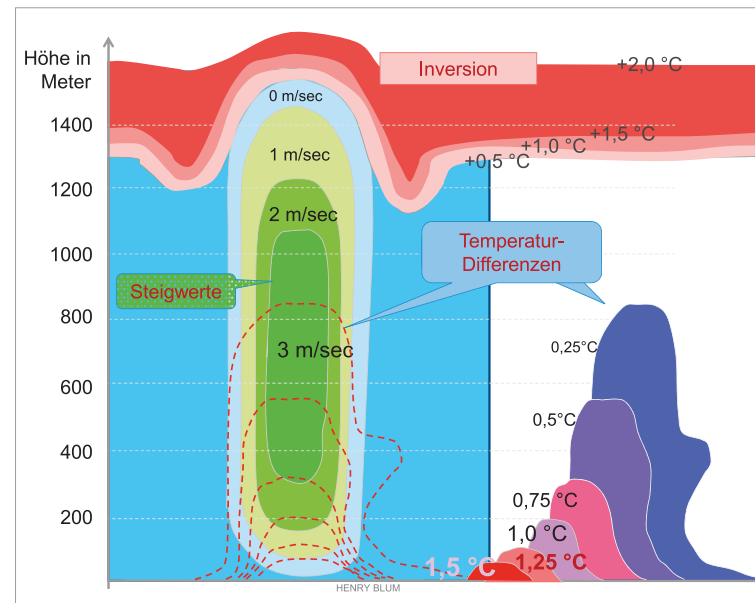
einer virtuellen Temperatur der Luftmassen (siehe Kasten Seite 8x). Um freilich bestimmte Qualitäten der aufsteigenden Thermikblasen besser zu verstehen, ist es sinnvoll, sich die Rollen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit getrennt vor Augen zu führen.

Lassen wir also erst einmal Thermiken nur getrieben durch die Temperaturunterschiede aufsteigen. Dabei gilt unterhalb der Wolkenbasis folgende Regel: Die aufsteigende Luft wird sich pro 100 gewonnene Höhenmeter um ein Grad Celsius trockenadiabatisch abkühlen. Solange sie dabei wärmer bleibt als die Umgebungsluft, die ja mit der Höhe auch kälter wird, wird die Thermikblase weiter steigen. Gebremst wird sie typischerweise erst an einer Inversion, d.h. wenn die Temperatur der Umgebungsluft mit der Höhe wieder zunimmt. Allerdings ist unsere Blase nicht wie ein klassischer Ballon durch eine Membran von der Umgebungsluft isoliert, sondern im ständigen Austausch mit ihr. Die Wärme strahlt dabei schnell ab. So kommt es, dass die Thermik ihren Temperaturvorsprung – wie von Lindemann gemessen – bald verliert. Eine nur durch temperaturbedingte Dichteunterschiede getriebene Blase erreicht keine großen Höhen über Grund.

Glücklicherweise gibt es keine vollkommen trockene Luft, zumindest nicht in den von uns Fliegern noch als erträglich empfundenen Temperaturbereichen. Ein bisschen Wasserdampf ist also immer enthalten. Und wenn sich dadurch wieder Dichteunterschiede ergeben, wird die Thermik höher reichen. Hier kommt zudem eine weitere Eigenschaft des Wasserdampfes zum Tragen. Wasser kann nicht einfach aus einer Thermikblase als Energie abstrahlen. Damit sich unterschiedlich feuchte Luftmassen angleichen, müssen sie sich durchmischen und das Wasser dabei gleichmäßig verteilt werden. Der Transport solcher Massen erfolgt viel langsamer, weshalb eine aufsteigende Thermikblase zwar ihren Wärmevorsprung schnell verliert, die aus den bodennahen Luftschichten mitgenommene Feuchtigkeit aber weitgehend behält.

Aus solchen Qualitäten ergibt sich, dass der Auftrieb einer Thermikblase je nach Höhe auf wechselnden Antrieben beruht – die aber fließend ineinander übergehen (s. Abb. 2).

In Bodennähe wird die dort stark überhitzte Luft durch ihr eigenes Brodeln schnell durchmischt, weshalb sich kleinräumig keine eklatanten Unterschiede in der Luftfeuchte ergeben können (Das ist übrigens der Grund, warum Wolken verschiedener Aufwinde typischerweise die gleiche Basishöhe haben, s. Kasten S. 82). Bei der Lufttemperatur hingegen gibt es diese kleinräu-



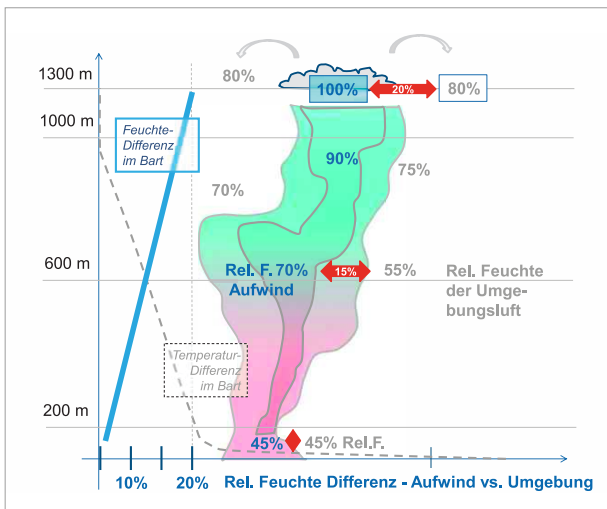
1 | Temperatur-Differenzen und Steigwerte in einem starken Aufwind (nach Carsten Lindemann, 1987)

migen Unterschiede, weil der Untergrund je nach seiner Beschaffenheit und dem Einstrahlungswinkel der Sonne mal mehr, mal weniger stark aufgeheizt wird. Über den überhitzten Bereichen entstehen die Thermikblasen. Anfangs wird eine solche Thermikblase hauptsächlich durch ihren Temperaturvorsprung getrieben in die Höhe steigen. Doch je höher sie kommt und je schneller sich ihre Temperatur der Umgebung angleicht, desto mehr nimmt dieser Antrieb ab. An seine Stelle kann nun der feuchtigkeitsbedingte Dichteunterschied treten. Eine Thermikblase nimmt den Wassergehalt der bodennahen Luft mit nach oben. Die höher gelegenen Luftschichten sind in der Regel eher etwas trockener. Die Thermikblase wird also dort, bedingt durch ihren höheren Wassergehalt, weiter steigen – und das umso stärker, je größer der Unterschied zwischen trockener Umgebungsluft und feuchter Thermikblase ausfällt.

Daraus ergeben sich wiederum zwei Stellgrößen, welche die Thermikqualität maßgeblich beeinflussen. Zum einen gilt: Je feuchter die Thermikblase, desto besser wird sie in der Höhe noch steigen. Nun muss man sich vor Augen halten, dass die Feuchte in der Thermik von ihrem

Ursprung bestimmt wird. Waldgebiete beispielsweise erwärmen sich zwar schlechter als ein gepflügter schwarzer Acker, doch die Bäume liefern der Luft durch Evapotranspiration viel Feuchtigkeit. Thermikblasen, die aus Wäldern aufsteigen, werden zwar unten heraus mangels großen Temperaturvorsprungs schlechte Steigwerte aufweisen. (Es kommt selten vor, tief über Waldgebieten einen rettenden Bart zu finden). Doch die Erfahrung zeigt, dass in größeren Höhen, wo nicht mehr Temperatur- sondern die Feuchtigkeitsunterschiede ihre Auftriebskraft entfalten, sich gerade große Waldgebiete häufig als Garanten guter Thermik entpuppen.

Die zweite Stellgröße für die Thermikqualität sind die vorherrschenden Luftmassen. Je trockener die Luft in der Höhe ist, desto besser wird eine Thermikblase aufgrund ihres Feuchtigkeitsvorsprungs darin steigen. Wer also nach besonders guten Thermiktagen Ausschau hält, sollte stets auf Prognosen achten, die möglichst wenig Luftfeuchtigkeit im oberen Thermikraum verheißen. Besonders interessant wird es, wenn in der Höhe kalte Luftmassen einfließen. Kalte Luft hat eine größere Dichte und kann deutlich weniger Was-



**2a** | Während der Unterschied in der Feuchtigkeit zwischen dem Aufwind und der Umgebungsluft mit der Höhe zunimmt, nimmt die Temperaturdifferenz ab.

kenspielen ein bisschen nachzuhängen und neue Einsichten zu gewinnen.

Zum Abschluss sei nur noch ein weiteres Fliegermärchen zurechtgerückt. Es handelt von den Wolken, die angeblich ziehen, also einen Sog entwickeln, weil in ihnen durch freiwerdende Kondensationswärme die Thermikblasen schneller steigen. Die zutreffendere Erklärung für das Phänomen, dass Piloten unter Wolken den Eindruck gewinnen können, sie würden von den grauen Massen geradezu angezogen, hat ebenso weniger mit Temperaturgradienten als mit Feuchteunterschieden zu tun: Wenn Wolken weit aufschließen, bilden sich an ihren Rändern als Gegenbewegung Abwinde. Diese spülen an den Wolkenrändern entlang kältere und besonders trockene Höhenluft nach unten. Sie dringt teilweise bis zu mehrere hundert Meter tiefer als die Wolkenbasis vor. Ein aufsteigender, feuchter Bart wird dann unter der Wolke in Bereiche kommen, in denen er plötzlich einen deutlichen größeren Feuchtigkeitsvorsprung zu der eingespülten, trockenen Luft hat. Entsprechend stärker wird dadurch sein Auftrieb. Die Wolke selbst saugt nicht. Sie sorgt nur für die Bedingungen, bei denen die Thermikblase besser steigen kann. ☞

serdampf aufnehmen als warme. Solche Wetterlagen zünden geradezu den Thermik-Turbo.

Was aber ist mit der Temperatur-Schichtung der Luft? Vielen Piloten gilt die Analyse von sogenannten Temps – das sind Kurven der gemessenen oder modellierten Temperaturveränderungen mit der Höhe – als die Königsdisziplin der Thermikvorhersage. Allerdings achten die meisten allzu sehr auf die reine Temperaturkurve, um aus deren Verlauf Luftschichten mit angeblich besserem oder schlechterem Steigen erkennen zu können. Dabei ist das gar nicht so relevant. Denn im Tagesverlauf wird sich durch die stete Durchmischung und schnelle Wärmeverteilung im Thermikraum unterhalb der Wolkenbasis an den meisten Tagen sowieso eine weitgehend labile Schichtung einstellen (s. Abb. 3).

Viel entscheidender ist stattdessen die Entwicklung der im Temp ebenso eingetragenen Taupunktcurve. Liegt sie in der Höhe nah an der Temperaturkurve, herrscht dort eine erhöhte Luftfeuchtigkeit vor. Die Thermiken werden dann in diesen Schichten kaum einen weiteren Antrieb entwickeln. Zeigt sich in der Höhe hingegen ein großer Spread, d.h. laufen Temperatur- und Taupunktcurve weit auseinander, ist mit besseren Steigwerten zu rechnen.

Viel ließe sich noch darüber schreiben, warum letztendlich die Luftfeuchtigkeit die Seele der Thermik ist, und wie sich diese Seele zum Beispiel je nach Jahreszeit verändert. Im Sommer kann die wärmere, bodennahe Luft viel mehr Wasser aufnehmen als die kalte Luft des Winters. Wie wird

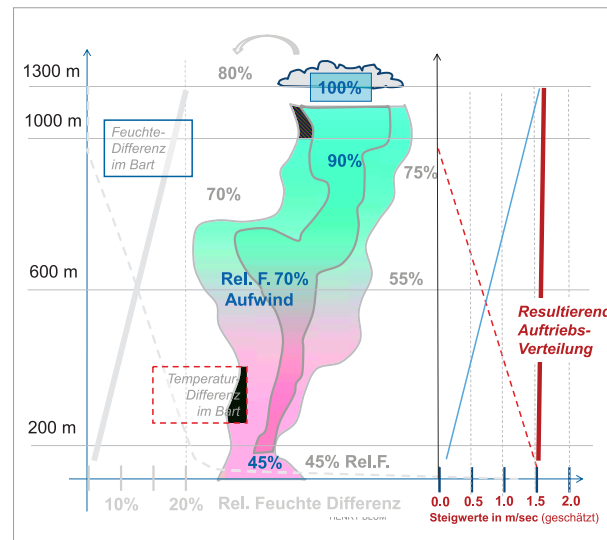
das meinen Thermikcharakter beeinflussen? Und was hat kräftige Frühjahrs thermik in den Bergen damit zu tun, dass über tauenden Schneemassen eine dünne Schicht aus kalter und sehr feuchter Luft bergab fließt? Könnte es sein, dass diese Feuchtigkeit von den Thermiken, die an der Schneegrenze ablösen, mitgerissen wird, um dann in der trockenen kalten Höhenluft die Blasen nur umso heftiger steigen zu lassen? Es lohnt sich, vor dem nächsten Thermikflug solchen Gedanken

### Die virtuelle Temperatur von Luftmassen

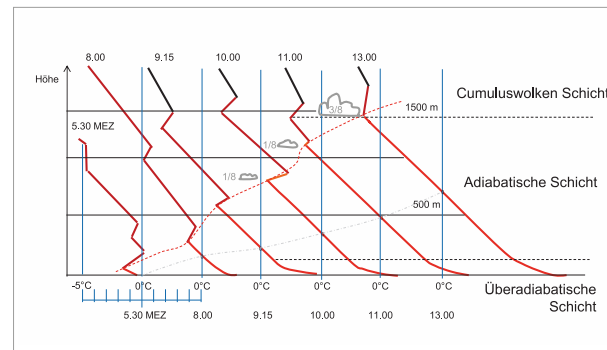
Um die Dichte unterschiedlich feuchter und unterschiedlich temperierter Luft besser vergleichen zu können, haben Meteorologen ein spezielles rechnerisches Maß entwickelt: die virtuelle Temperatur. Zieht man aus einer feuchten Luftmasse das enthaltene Wasser komplett heraus, steigt ihre Dichte. Man müsste die Luft also anschließend erwärmen, um wieder die gleiche geringe Dichte zu erreichen wie zuvor. Die virtuelle Temperatur einer Luftmasse beschreibt als fiktives Maß genau dieses Phänomen. Je größer der Feuchtigkeitsgehalt einer Luftmasse ist, desto höher liegt ihre virtuelle Temperatur. Man kann sich das vorstellen, als hätten feuchte Luftmassen noch ein eingebautes Wärmepack, das durch den virtuellen Temperaturvorsprung zum Thermiktreiber wird.

Tabelle 1 zeigt, wie groß diese virtuelle Temperatur bei unterschiedlichen realen Lufttemperaturen und Feuchtegehalten der Luft sein kann. Je höher die Grundtemperatur, desto mehr Wasser kann die Luft aufnehmen. Entsprechend größer werden auch die virtuellen Temperaturdifferenzen zwischen den verschiedenen Feuchtestufen.

Relative Feuchte	Virtuelle Temperatur in °C				
0%	0	5	10	15	20
10%	0,06	5,09	10,13	15,18	20,26
50%	0,31	5,45	10,65	15,92	21,29
100%	0,62	5,9	11,3	16,83	22,55



**2b** | Temperatur- und Feuchteunterschiede sorgen für Auftrieb. Bodennah werden die Steigwerte v.a. von der Temperatur bestimmt, in größeren Höhen von der Feuchtigkeit.



**3** | Eine typische Entwicklung der Temperaturschichtung einer Luftmasse im Tagesverlauf. Durch den Wärmetransfer stellt sich im Thermikraum eine labile Schichtung ein. Die typische Thermikstärke eines Tages wird dann maßgeblich von den Feuchtigkeitsunterschieden zwischen Thermik- und Umgebungsluft bestimmt.

### Die Feuchtigkeit bestimmt die Basishöhe

Wer auf Streckenflug geht und dabei verschiedene Thermiken anfliegt, wird bemerken, dass sie unterschiedlich stark sein können. Erklärt wird das normalerweise damit, dass die Luft in der Thermikblase sich am Boden je nach lokalen Bedingungen und der Sonneneinstrahlung unterschiedlich stark aufheizen konnte. Stärker erhitzte Luftblasen liefern einen stärkeren Bart. Aber warum haben dann fast alle aus den Thermiken entstandenen Kumuluswolken die gleiche Basishöhe? Denn eigentlich müssten „heißere“ Bärte durch ihren größeren Temperaturvorsprung erst später das Kondensationsniveau erreichen.

Auch in diesem Fall liefert wieder die Feuchtigkeit die Erklärung. Während am Boden kleinräumig große Temperaturunterschiede herrschen können, weist die Luftfeuchtigkeit in einer Landschaft nur geringe Schwankungen auf. Die Menge an Wasserdampf, die mit einer Thermikblase in die Höhe steigt, ist also über weite Flächen hin gleich, egal wie groß der Temperaturvorsprung der Thermik im Vergleich zur Umgebungsluft ist. Dieser Temperaturvorsprung wird sowieso schnell ausgeglichen. Am Ende sorgt die einheitliche Feuchtigkeit für die einheitliche Basishöhe. Im Flachland ist das ganz offensichtlich. In den Bergen wird die Lage etwas differenzierter. Denn jedes Tal kann im Grunde seine eigene Luftmasse mit der ihr eigenen Feuchtigkeit beherbergen. So kann gelegentlich die Basishöhe der Wolken von Tal zu Tal deutlich schwanken.