



Cumuluswolken

Schwungräder und Wegweiser,
manchmal auch Spielverderber der Thermik



Wolken im Juli 2022.
Trotz des Bedeckungsgrades
von ca. 4/8 ist die Thermik
nicht beeinträchtigt,
was auch am Wolkenbild
erkennbar ist.
Ganz anders verhält sich
der Einfluss größerer
Bedeckungsgrade ab etwa 6/8.
Bilden sich nämlich
ausgedehnte Wolkenfelder
oder gar Stratocumulus,
so fehlt die direkte
Solarstrahlung und die
Thermik kann sogar ganz
zum Erliegen kommen

In unserer Artikeln haben wir uns bisher mit dem Einfluss von Turbulenzstrukturen auf die „Thermikauslösung in Bodennähe“ und die Bildung von „Wolkenstraßen“ befasst, und versucht, dabei auch einiges Neue aus der Forschung mit heutigen Messmöglichkeiten wie Windlidar oder Modellierung einzubeziehen. Diesmal soll es mit ähnlichem Anspruch um Cumuluswolken und ihre Bedeutung für die Thermik gehen.

AUTOREN: CHRISTOPH KOTTMEIER UND DETLEF MÜLLER, BILDER: CHRISTOPH KOTTMEIER

Wenn Segelflieger morgens bei noch wolkenlosem Himmel auf die angekündigte Thermik warten, dann macht sich bei Erscheinen des ersten kleinen Cumulus humilis Erleichterung breit. Schließlich werden durch Cumuluswolken die Aufwinde sichtbar und damit leichter anfliegbar. Die Erfahrung zeigt auch, dass Cumuluswolken im Entwicklungsstadium verstärkend und stabilisierend auf die Aufwinde wirken. Kommt es dagegen zur Ausbreitung an Inversionen mit Stratusbildung oder zu Überentwicklungen als cumulus congestus oder gar Gewitterbildung mit Cumulonimbus, so können sie das Flugvergnügen auch beeinträchtigen oder gar beenden.

Entstehung von Cumuluswolken

Die Entstehung von Cumuluswolken setzt das Erreichen des Kondensationsniveaus beim Aufsteigen von Thermikpaketen voraus. Das ist bekanntlich an drei Bedingungen geknüpft:

- Zum Einen muss die bodennahe Luft ausreichend Wasserdampf enthalten, so dass beim Aufsteigen mit adiabatischer Temperaturabnahme und dadurch zunehmender relativer Feuchte schließlich Sättigung erreicht wird. Das Kondensationsniveau ist gleichzeitig die Wolkenbasis, und es lässt sich einfach durch die Formel $125 \times (T - T_d)$ aus Temperatur T und Taupunkttemperatur T_d (Spread) in Bodennähe bestimmen.
- Zum Zweiten muss dazu die Luft bodennah zunächst ausreichend erwärmt werden, dass der Aufstieg bis zu diesem Kondensationsniveau überhaupt möglich ist.
- Als dritte Bedingung dürfen eingelagerte stabile Schichten oder Inversionen nicht den Aufstieg unterdrücken.

Alle diese Einflüsse hängen von der Wetterlage, den Austauschvorgängen

am Boden und der „Vorgeschichte“ der letzten Tage ab. So werden vorangegangener Regen oder Trockenheit den Taupunkt verändern. Gute Thermik am Vortag liefert im Allgemeinen gute Voraussetzung dafür, dass am Folgetag keine niedrigen Inversionen – außer der nächtlichen Bodeninversion – mehr zu überwinden sind.

In Mitteleuropa kommt es meist nach dem Einfließen von kühlerer maritimer Luft zu guten Bedingungen für Cumuluswolken. Bei Alterung von Luft in Hochdruckgebieten wird sie trockener und Absinkbewegungen lassen Absinkinversionen entstehen. Auch bei Zustrom kontinentaler Luft aus trockenen Gebieten kommt es oft nicht zur Cumuluswolkenbildung. Nicht selten ändern sich die Bedingungen zur Wolkenentwicklung auch im Laufe eines Tages, eine gute Vorhersage gibt da wertvolle Hinweise. Das Grundwissen über Thermik und die Cumuluswolkenentstehung wird gut in der Literatur vermittelt (Walter Georgii's Buch „Flugmeteorologie“ 1974, Artikel von Henry Blum im *segelfliegen magazin*, OSTIV-Berichte, Müller und Kottmeier 1985).

Dieses Grundwissen soll hier nicht wieder „aufgewärmt“ werden. Vielmehr soll anhand von Messdaten die Wechselwirkung von Thermik und Cumuluswolken beleuchtet werden. Denn die Thermik beeinflusst nicht nur die Wolken, sondern auch die Wolken die Thermik, wie anhand von Messdaten aufgezeigt wird. Diese Auswirkungen bestehen in der Intensivierung der Konvektion durch die freiwerdende Kondensationswärme, in der Abschattungswirkung und in der Gefahr der Überentwicklung bei hochreichender Konvektion.

Antrieb von oben

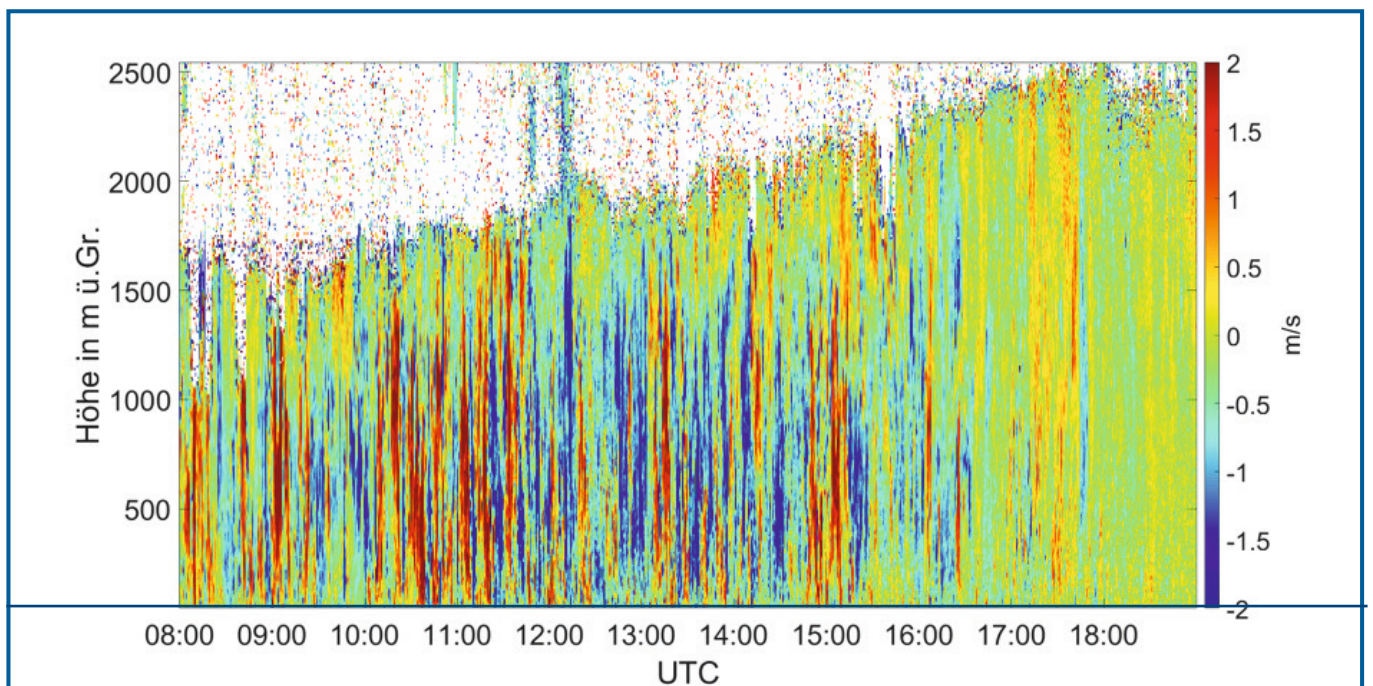
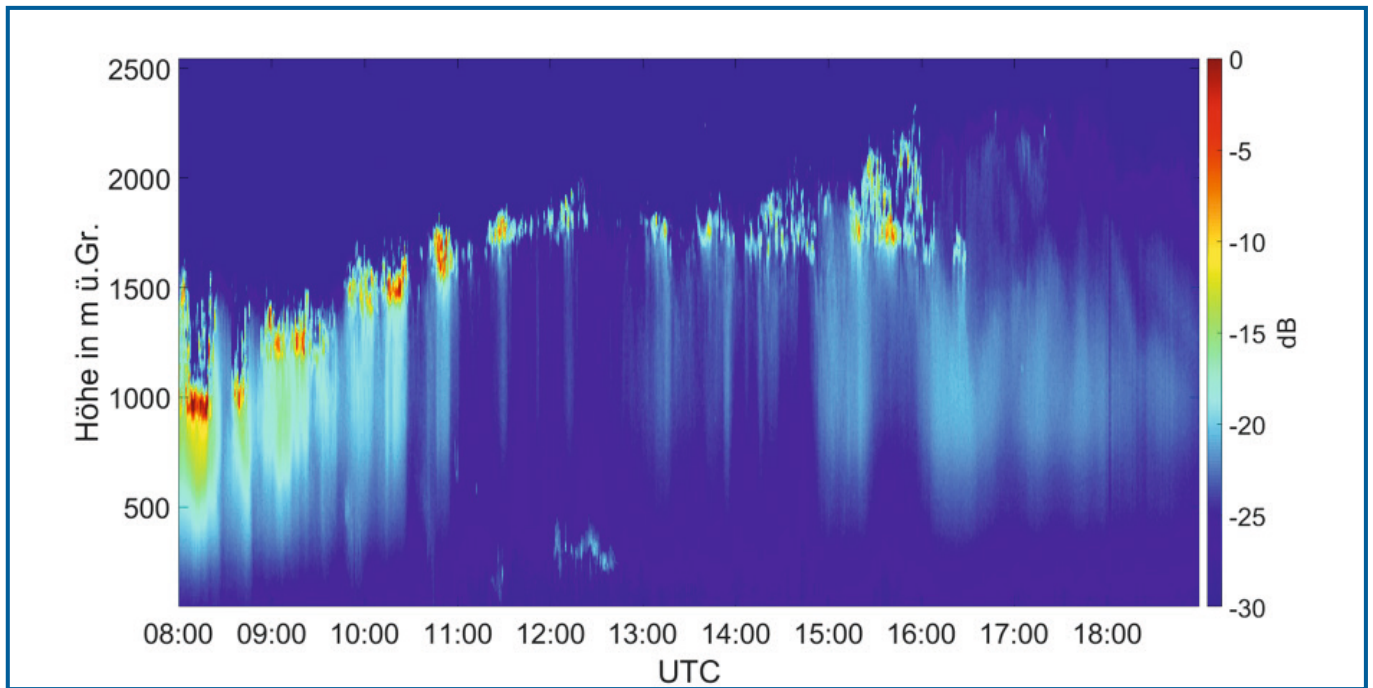
Cumuluswolken kann man als Schwungräder der Thermik bezeichnen. Die Thermik im Tagesgang und die Wolkenbildung wird meistens in schemati-

schen Zeichnungen dargestellt (Müller und Kottmeier, 1985). Hierbei sind die Vorgänge unterhalb und innerhalb von Wolken anhand von Erfahrungen illustriert. Mit Windlidarmessungen (*Bericht in segelfliegen magazin 02/22, Zusatzinfo am Artikel-Ende*) ergibt sich ein viel vollständigeres Bild, wie in **Bild 1 unten** gezeigt.

Die Messungen wurden am 02.07.2021 beim Swabian-MOSES-Messprogramm 2021 in Rottenburg in der Nähe von Stuttgart aufgenommen. Es zeigt die Vertikalgeschwindigkeiten über dem Messort, gemessen mit einem vertikal sehenden Windlidar bis zu einer Höhe von ca. 2500 m. Mit einem Messwert in 80 m Höhenabstand im Zeitabstand von zwei Minuten ergibt sich ein gutes Bild jedes einzelnen Auf- und Abwindes. Es wird deutlich, dass ab etwa 09:00 Uhr MESZ (07:00 Uhr UTC) während des ganzen Tages bis ca. 18.30 Uhr MESZ Auf- und Abwinde über dem Gerät auftreten. Sie wurden mit schwachem Wind (Windgeschwindigkeit v) bewegt. Die Aufwindbreite b ist dann durch $b = v \cdot \Delta t$ gegeben, wenn Δt die Verweildauer eines Aufwindes über dem Gerät ist.

Die meisten Auf- und Abwinde haben eine vertikal und horizontal zusammenhängende Struktur, aber nicht immer über die gesamte Grenzschicht. Teilweise sind die Aufwinde als „Schläuche“ (plumes) in allen Höhen, teilweise als „Blasen“ (bubbles) nur über einige 100 m Höhe zu sehen. Zusätzlich gibt es viele Mischformen. Durch die komprimierte Zeitachse (Tageszeit) erscheinen die einzelnen Strukturen sehr schmal, entsprechen aber den bekannten Breiten von ca. 300 m bis über 1 km.

Um ca. 09:00 Uhr MESZ setzt die Thermik ein, sie reicht bei anwachsender Grenzschicht zunächst bis 1200 m (10:00 Uhr, dann 1500 m (11:00 Uhr MESZ) und schließlich bis über 2000 m ab 13:00 Uhr MESZ. Da Wolken an ihrer Unterseite das Rückstreusignal des



1 Lidarmessungen der Rückstreuintensität (oben) und des Vertikalwindes (unten) bei Rottenburg am 02.07.2021. Die Wolkenunterseite wird im oberen Bild durch die erhöhte Streuung (rot) sichtbar, im unteren Bild sind Aufwinde von mehr als 1 m/s rot eingefärbt, Abwinde von mehr als -1 m/s blau. Daten aus Messprogramm Swabian MOSES

Lidars stark erhöhen (darüber aber auch schwächen), lassen sich die einsetzenden Cumuluswolken sehr gut erkennen (*Bild 1 oben*). Sie sind deutlich mit den Aufwinden unter sich verbunden. Noch stärkeres Steigen ist verschiedentlich in

der mittleren Konvektionsschicht zu sehen. Dies sind Aufwinde, die es teils noch nicht bis zur Wolkenbasis geschafft haben, oder durch den Windversatz nicht zur genau gleichen Zeit mit Wolken verbunden sind.

Variable Aufwinde

Welche Unterschiede der Thermik gibt es aber nun zwischen Tagen und Zeiträumen mit Blauthermik und Wolken thermik? Aufwinde sind sehr variabel und von der Tageszeit, Höhe,

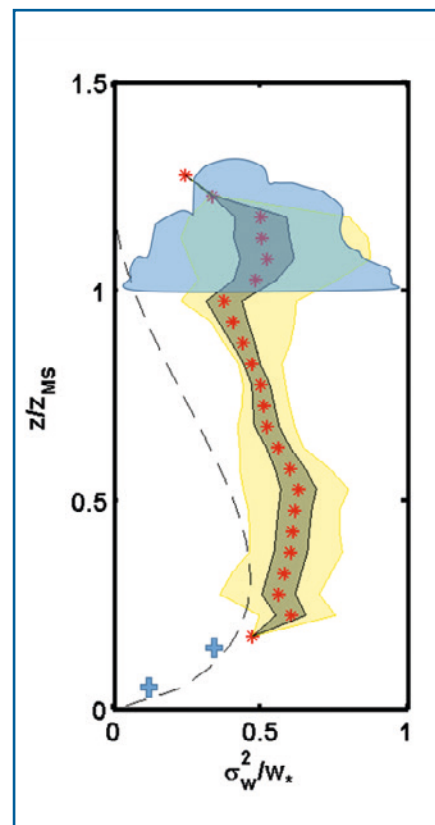
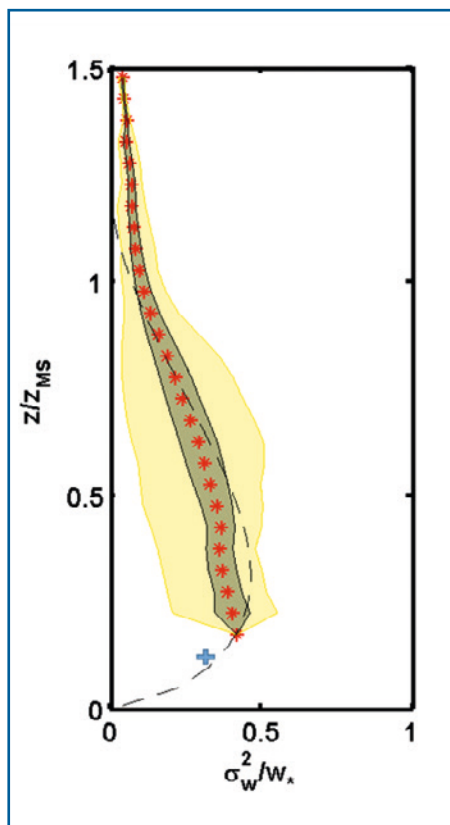
Wetterlage und dem aktuellen Zustand seiner Entwicklung abhängig. Deshalb können kaum statistisch sicherere Aussagen aus Einzelmessungen und aus einzelnen Tagen bestimmt werden.

Als gute Maßzahl für Unterschiede zwischen wolkenfreien und bewölkten Tagen eignet sich die Standardabweichung Σw des Vertikalwindes. Hat sie z. B. einen Wert von 2 m/s, dann heißt das, dass ca. 2/3 aller Auf- und Abwinde im Schwankungsbreite von ± 2 m/s liegen. Sie kann aus Lidarmessungen gut berechnet werden und wurde, ergänzt durch Messungen an dem 200-m-Mast in Karlsruhe, für sechs ähnliche Tage mit oder ohne Cumuluswolken dargestellt.

Um typische Abhängigkeiten erkennen zu können, wird eine normierte Darstellung verwendet. Hierbei ist die „Turbulenzintensität“, berechnet als Varianz (Standardabweichung zum Quadrat) geteilt durch w^0 (Bild 2), in Abhängigkeit von der normierten Höhe dargestellt. w^0 liegt aus bodennahen Turbulenzmessungen vor und kennzeichnet die tageszeitlich und windabhängige Turbulenz in Bodennähe. Originalmessungen ohne eine solche Normierung sind immer durch sehr große Streubreiche gekennzeichnet.

Es wird deutlich, dass an Blauthermik-Tagen und in längeren wolkenfreien Perioden (links) die Turbulenzintensität schwächer als unter Cumuluswolken ist und etwa dem theoretischen Verlauf entspricht. Ein Maximum liegt in der mittleren Grenzschicht. Die bewölkten Abschnitte zeigen generell stärkere Turbulenz, sogar mit einem zweiten Maximum oberhalb von $z/z_{MS} = 1$. Da z_M hier die Höhe der Wolkenunterseite ist, stammen die vergleichsweise großen Werte aus dem Inneren der Wolken nahe der Basis, was ja auch zu erwarten ist.

Ein oft unterschätzter positiver Effekt vorhandener kräftiger Cumuluswolken (Cu cong) entsteht in den Abendstunden. Ebenso wie die Erdoberfläche



z Links: Mittleres Turbulenzprofil berechnet aus allen zusammengeführten wolkenfreien Abschnitten (Lidardaten: rot, Mastdaten: blau). Rechts: Mittleres Turbulenzprofil berechnet aus den Abschnitten unter Cumuluswolken. Die Standardabweichung ist als graue Fläche, die jeweiligen Minimal- bzw. Maximalwerte in einer normierten Höhe sind mit der gelben Fläche gekennzeichnet. Die gestrichelte Linie gibt eine theoretisch von Deardorff berechnete Höhenverteilung an. Blaue Symbole beruhen auf Daten am 200-m-Mast des KIT. Es gehen die Daten von sechs Messtagen im Juli und August am KIT, jeweils von 11:00 Uhr bis 15:00 Uhr UTC ein

infolge der flacheren Einstrahlung abkühlt, so erhält auch die Wolkenoberseite weniger Strahlung. Da sie weiter Infrarotstrahlung nach oben abgibt, kühlt sie sich jedoch ab. Innerhalb der Wolken wird dadurch die Temperaturschichtung labilisiert. Die Wolken werden länger am Leben erhalten, und mit ihnen die Thermik unterhalb. So haben schon einzelne langlebende Cumuluswolken beim Abschluss langer Streckenflüge geholfen.

Cumuluswolken contra Thermik

Ist der Himmel dann einmal voller Cumuluswolken, so stellt sich die Frage,

ob sie nicht die Erdoberfläche so beschatten können, dass sie abkühlt und die Thermikauslösung behindert wird. Wichtig dafür ist, dass tatsächlich weniger Sonnenstrahlung am Boden ankommt. Es zeigt sich aus Messdaten der Strahlung deutlich, dass bei Bedeckungsgraden bis zu etwa 5/8 die Wirkung schwächer ist, als man vermuten könnte.

Die Erklärung liegt einerseits darin, dass Wolken grundsätzlich nur wenig solare Strahlung absorbieren. Andererseits streuen sie dagegen die Strahlung sehr gut, d. h. sie führen zu einer Richtungsänderung und Umverteilung von Strahlung. Bei lockerer Bewölkung

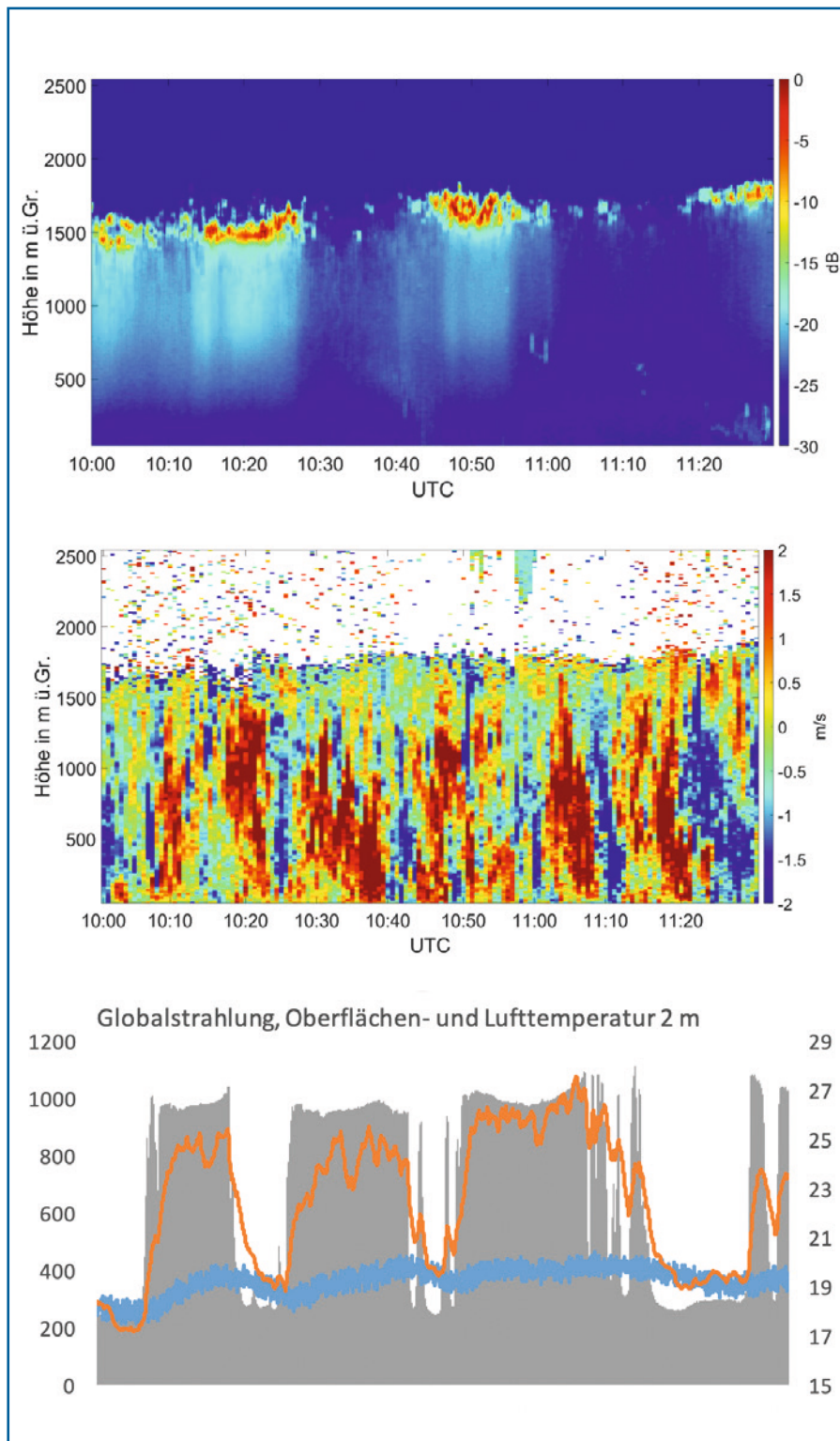
reflektieren auch die Seitenflächen der Cumuli, erscheinen dabei hell und erhöhen die diffuse Einstrahlung auf den Boden. Kernschatten einzelner Wolken sind kaum auszumachen und der Wolkenzug bei Wind verhindert zusätzlich eine längere Beschattung einzelner Flächen. Lockere Cumulusbewölkung fördert sogar über die Entstehung leicht unterschiedlich wärmerer und kühlerer Oberflächen die Temperaturkontraste und Thermikauslösung.

Das Messbeispiel zeigt im Detail (**Bild 3 unten**), wie an einem Hochsommertag die Globalstrahlung ohne Wolken mit ca. 1000 W/m² in bewölkten Abschnitten auf ca. 250 W/m² absinkt. Dadurch kühlt die Erdoberfläche – zeitverzögert um 5 bis 10 min – um etwa fünf Grad ab. Die Lufttemperatur sinkt nur um ca. ein Grad, so dass beide Temperaturen sich annähern und die bodennahe Überhitzung fast abgebaut ist. Bei Weiterzug der Wolke kommt es zu einer ähnlich raschen Erwärmung der Erde und der alte Zustand wird wiederhergestellt. Wandernde Cumuluswolken fördern auf diese Weise eine pulsierende Erwärmung des Bodens und horizontale Temperaturunterschiede im Randbereich der Beschattung.

Die zeitgleichen Lidardaten des Vertikalwindes (**Bild 3 Mitte**) verdeutlichen, dass die Auf- und Abwinde nicht zum Erliegen kommen, aber stark veränderlich sind. In Abschnitten mit Cumuluswolken sind sie vor allem in der oberen Grenzschicht ab etwa 800 m bis zu den Wolken zu finden. In den wolkenfreien Zeiten gibt es stärkere Auf- und auch Abwinde in Höhen bis etwa 1000 m. Dies würde man aufgrund der veränderlichen Auslösebedingungen auch erwarten.

Überentwicklungen

Überentwicklungen zu Schauern oder gar Gewittern sind ungeliebte Wolkenerscheinungen für Segelflieger. Lassen sich kleine Schauer noch umfliegen, so setzen Gewitter meist dem Segelflugtag



3 Messungen zur Wechselwirkung Wolken-Thermik. Oben: Rückstreuintensität, Mitte: Vertikalwinde in der Grenzschicht in bewölkten und unbewölkten Abschnitten von 12:00 bis 13:30 MESZ am 02.07.2021 (Ausschnitt aus Abb. 1) und unten: zeitgleiche Messung der Globalstrahlung (graue Fläche), der Erdoberflächentemperatur (rot) und der Temperatur in 2 m Höhe (blau) in Rottenburg beim Messprogramm Swabian-MOSES

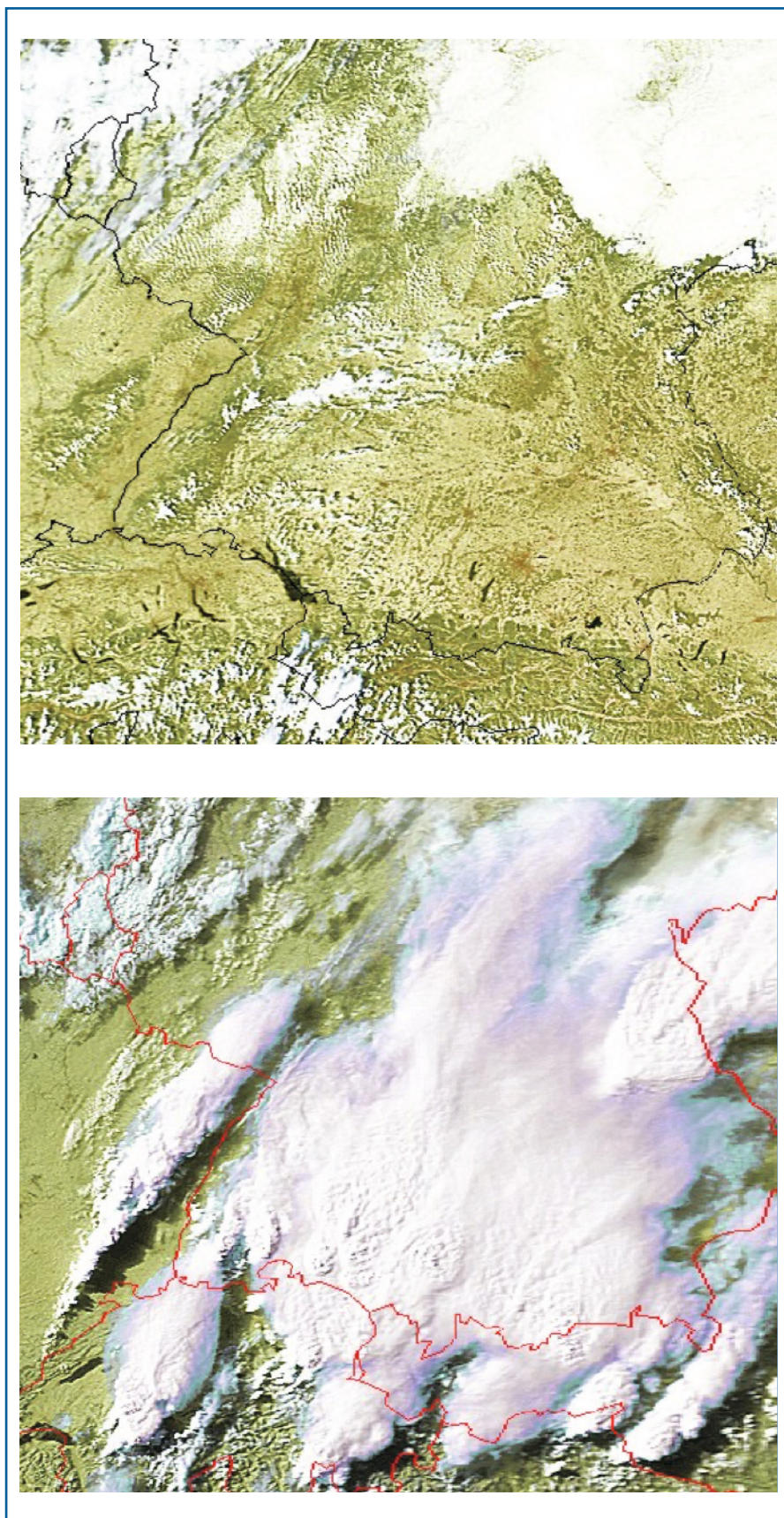
ein Ende. Die Entstehung hochreichender Konvektion ist recht gut verstanden, ihre zeit- und ortsgenaue Vorhersage ist aber auch mit heutigen Modellen schwierig.

Voraussetzung für hochreichende Konvektion ist natürlich, dass überhaupt Cumuluswolken entstehen können. Dabei gelten die gleichen Bedingungen wie für Cumulusthermik. Zusätzlich muss der vertikale Temperatur- und Feuchteverlauf oberhalb der Wolkenbasis auch ein weiteres Aufsteigen ermöglichen. Wenn ausreichende Feuchtlabilität bis zu vier oder mehr km Höhe gegeben ist, so ist die Chance auf Schauerbildung hoch.

In den letzten Jahren wurden eine ganze Reihe von Studien durchgeführt, um mit Hilfe sogenannter Konvektionsindizes bereits aus Mitternachts-Radiosondendaten die Wahrscheinlichkeit für Gewitter am Folgetag zu bestimmen. Die Konvektionsindizes sind besonders für Wetterlagen mit wenig Luftmassenwechsel recht aussagefähig. Sie stehen über gute Wetterplattformen allen Segelfliegern zur Verfügung. Ihre Trefenquote wird aber durch Luftmassenwechsel, Absinkbewegungen, schmale Konvergenz- und Labilitätszonen, durch Abschirmungen und die bekannten „hotspots“ der Thermikauslösung stark beschränkt.

Die Modellvorhersage von Konvektionsindizes, die solche Änderungen berücksichtigt, erwies sich hier als nützlich. Den stärksten Einfluss auf räumliche Unterschiede hat wohl die Orographie, und einige Mittelgebirge wie der Schwarzwald sind ausgesprochen gewitterfördernd. Hierauf wird in einem anderen Artikel eingegangen.

Die Mittelgebirge fördern hochreichende Konvektion besonders bei ruhigen, aber randlichen Hochdruckwetterlagen. Im Kern von Hochs fehlt die Labilität und näher an Tiefs werden höhere Windgeschwindigkeiten und großräumige Hebung entscheidender.



4 NOAA-Satellitenaufnahme vom 17.06.2002 um 12.30 Uhr (oben) und 17.30 (unten) mit starken Überentwicklungen am Nachmittag

Die Rolle der Berge verdeutlichen die beiden NOAA-Satellitenbilder vom 17.06.2002 um 12:30 Uhr und um 17:30 Uhr, die Süddeutschland und Teile Frankreichs und der Alpenstaaten zeigen. Bei der Mittagsaufnahme (**Bild 4 oben**) ist bereits deutlich die stärkere Cumulusentwicklung über Vogesen, Süd- und Nordschwarzwald, Schwäbischer Alp, Fränkischer Alp und den Nordalpen zu sehen. Mit wenigen Ausnahmen zeigen die tiefergelegenen und flacheren Gebiete noch keine oder schwache Wolkenbildung.

Am Nachmittag dokumentieren zahlreiche Gewitterschirme verbreitete Überentwicklungen. Bei südwestlicher Strömung stehen die Gewitter deutlich mit Auslösepunkten an den Mittelgebirgen und den Nordalpen in Verbindung. Die Wolkenstrukturen legen nahe, dass auch von weiteren Mittelgebirgen Gewitter ausgelöst wurden.

Zusammenfassung

Für die Planung von Streckenflügen mit Segelflugzeugen in der Thermik sind Cumuluswolken von entscheidender

Bedeutung. Ihre Vorhersage mit immer detaillierten Wettervorhersagemodellen und zugehörigen Auswerteverfahren hat große Fortschritte gemacht. Sie finden aber immer noch ihre Grenzen bei der Vorhersage von Abschirmungen und genauen tageszeitlichen Entwicklungen. Moderne Messverfahren wie mit Windlidar geben neue Einblicke in die Struktur von Aufwinden, die Wechselwirkungen zwischen Thermik und Wolken und zeigen typische Unterschiede zwischen Blauthermik- und Wolken-thermiktagen.

Für Streckensegelflieger ist die Fülle meteorologischer Informationen heute

kaum noch überschaubar. Umso wichtiger ist es, sich auf eine oder wenige Informationsquellen zu konzentrieren und auch einen Kontakt mit den Fachleuten dahinter zu entwickeln. Solche Rückmeldungen sind auch wichtig, um mehr Erfahrungswissen aus Flügen in die Vorhersagen zu bringen, die sonst nur auf den Rechergebnissen mit Computern basieren. ♦

Für die Bereitstellung von Daten danken wir dem Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), insbesondere Dipl.-Met. Martin Kohler.

Literatur:

Arnold, K.: Analyse konvektiver Strukturen in der atmosphärischen Grenzschicht mittels Doppler-Lidar. Diplomarbeit, Inst. F. Meteorol. U. Klimaf., KIT, 2009.

Literatur: Georgii, W.: Meteorologische Navigation des Segelfluges. Braunschweig: Vieweg, 1974, 4., neu bearb. Aufl. 1. Nachdr.1974.

Müller, D., Kottmeier, Ch.: Meteorologische Aspekte des Streckensegelfluges. Selbstverlag, Hannover, 1984.

Kunz M, und 35 Koautoren: Swabian MOSES 2021: An interdisciplinary field campaign for investigating convective storms and their event chains. Front. Earth Sci. 10:999593. doi: 10.3389/feart.2022.99959, 2022.

Zusatzinfo aus *segelfliegen magazin* 02/22: „Die Thermik sichtbar gemacht“
<https://www.segelfliegen-magazin.de/ausgaben/2023-2/magazin-info-ausgabe-01-2023/>



TOST
Flugzeuggerätebau

für mehr Sicherheit
im Flugsport

Wir fertigen mit EASA-Zulassung:

Flugzeugräder
Bremshydraulik
Flugzeugreifen/-schläuche
Sicherheitskupplungen
Schleppseileinziehwinden
Start-/Schleppausrüstung

Tost GmbH Flugzeuggerätebau München Thalkirchner Str. 62 D-80337 München
Tel. +49-(0) 89-544 599-0 Fax +49-(0) 89-544 599-70 info@tost.de www.tost.de

