



Die Thermik sichtbar gemacht – aber wie sieht sie nun aus?



Schon lange konnte mit Radiosondenaufstiegen in dichtem Abstand die tageszeitliche Entwicklung von Temperatur, Feuchte und Wind gemessen werden. Durch moderne Variometer, ergänzt durch Windberechnungssoftware wie „HAWK“ oder dem Live-Anzeigesystem „Anemoi“, können heute in Segelflugzeugen viele Strömungsdetails der Thermik bei Durchflügen oder Kreisen an verschiedenen Orten und in verschiedenen Höhen vermessen werden. Das geht aber naturgemäß immer nur am Ort des Flugzeugs, nie gleichzeitig über den ganzen Höhenbereich der Thermik und an beliebigen Orten. Damit sind recht einfache Fragen zur Größe und Form von Aufwinden, ihrer Bewegung mit dem Wind und ihre Häufigkeit bisher nur näherungsweise gelöst. Hier ist die Lidarmesstechnik von großem Vorteil. Sie ermöglicht – in ihrer häufigsten Anwendung – die Messung der Auf- und Abwinde über dem Aufstellort ab etwa 50 m ü. G. bis zum Oberrand der Grenzschicht, und dies mit etwa 60 m Messabstand und typischerweise alle 20 Sekunden als komplettes Profil. Es wurden auch viele verschiedene Messverfahren entwickelt, z. B. mehrere Lidare gleichzeitig eingesetzt, vom

Forschungsflugzeug abwärts gemessen oder auch Windlidare mit anderen Messsystemen erfolgreich kombiniert. Die Lidarmesstechnik wird zudem für Windenergiestudien und Untersuchungen von Wirbelschleppen hinter Verkehrsflugzeugen eingesetzt. Wir beschränken uns hier auf Vertikalwindmessungen, die durch eingelagerte Messungen des Horizontalwindes vervollständigt werden. Der Horizontalwind wird dabei durch unterschiedlich geneigte Abstrahlrichtung der Laserpulse bestimmt.

Messort und Messdurchführung

Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Campus Nord (ehem. Forschungszentrum Karlsruhe) werden meteorologische Messungen in einem Waldgebiet seit Jahrzehnten mit einem sehr aufwändig instrumentierten Mast von 200 m Höhe durchgeführt. Unter anderem werden alle drei Windkomponenten mit Ultraschall-Anemometern in vier Höhen, die Temperatur mit Platinfühlern in acht Höhen und die Feuchte mit Taupunktspiegeln in fünf Höhen gemessen.

Bei einer Messfrequenz von 20 Hz können die konvektiven Bewegungen, also die Thermik, am Mast sehr gut

Was sehen wir Neues in Daten, wie wir sie über moderne Windmesstechnik mittels Doppler-Lidar erhalten? Damit kann ein viel vollständigeres Bild der Thermik als mit anderen Methoden gewonnen werden.

TEXT CHRISTOPH KOTTMEIER, NORBERT KALTHOFF,
OLGA KISELEVA BILD ALEXANDER AUST
ILLUSTRATIONEN STEPHAN KRAUT, KIT,
EUMETSAT 2020, WWW.WETTERZENTRALE.DE.



Moderne Lidar-Verfahren machen die Thermik „sichtbar“, auch ganz ohne Wolken. Messaufbau des KIT beim Messprogramm „Swabian MOSES“ bei Rottenburg, 2021 mit Doppler-Lidar im Vordergrund und Wolkenradar in der Mitte.

sichtbar gemacht werden (**Abb. 1**). In Kombination mit Doppler-Lidarmessungen liefern sie eine ziemlich vollständige Information über die zeitliche Entwicklung des Windes über den ganzen Höhenbereich der Thermik. Um das zu erreichen, wurde das Doppler-Lidar im Juli 2020 auf einer kleinen Lichtung in etwa 200 m Abstand vom Mastfuß über mehrere Wochen betrieben. Die Vertikalwindmessung erfolgte mittels Ausrichtung des Lidarstrahls in Zenit-Richtung, der Horizontalwind bestimmt sich durch Messungen in alle vier Himmelsrichtungen (N-O-S-W) unter einer Elevation von 75 Grad. Vertikalprofile des Vertikal- und Horizontalwindes liegen im Abstand von 50 m vor. Die zeitliche Auflösung beträgt 4 s für den Horizontal- und 20 s für den Vertikalwind.

Ein Tag mit super Thermik

Um beispielhaft eine typische tageszeitliche Entwicklung der konvektiven Grenzschicht zu zeigen, haben wir den 21. Juli 2020 herangezogen. An diesem Tag war es mittags im Oberrheingraben nahezu wolkenlos (**Abb. 2**). Die Thermik war trotzdem kräftig und es wurden in Deutschland vier Strecken über 1000 km sowie über hundert über 500 km, z. T. auch mit Querung des Oberrheingrabens, geflogen (www.weglide.org).

Die Thermik im Tagesverlauf aus Sicht des Lidars ist in **Abb. 3** gezeigt. Um 6 Uhr (alle Uhrzeiten in MEZ) – also kurz nach Sonnenaufgang um 05:45 Uhr – liegt die horizontale Windgeschwindigkeit in den Höhen zwischen etwa 100 m und 1000 m bei etwa 6 - 7 m/s (**Abb. 3b**). Im Höhenbereich um 1250 m herrscht dagegen nahezu Windstille. Der Bereich bis zur Höhe von 100 m ist die stabil geschichtete nächtliche Grenzschicht. Die darüberliegende Schicht bis 1250 m (Residualschicht) kennzeichnet den Bereich der Thermik vom Vortag. In ihr sind nachts nur ganz schwache Vertikalbewegungen zu beobachten (**Abb. 3a**).

Eine Temperaturinversion trennt die Residualschicht von der darüberliegenden freien Atmosphäre, in der die horizontale Windgeschwindigkeit deutlich höher ist (**Abb. 3b**). Die Bedingungen in der Residualschicht ändern sich nach Sonnenaufgang. Gegen 08:00 Uhr, d. h. nach Auflösung der bodennahen Inversion (**Abb. 4**), dringen die ersten kleineren Konvektionszellen (Plumes) von unten in sie ein (**Abb. 3a**). Ab 10:00 Uhr werden bei zunehmender Erwärmung des Erdbodens und der Ausbildung einer labilen bodennahen Luftschicht (**Abb. 4**) konvektive Wirbel ausgelöst, die mit deutlichen Schwankungen des Horizontalwindes verbunden sind (**Abb. 3b**). Die Temperaturdaten zeigen, wie die potenzielle Temperatur pulsierend weiter ansteigt (**Abb. 4**). Sie ist vor allem bis 100 m Höhe deutlich labil geschichtet. Vor 15:00 Uhr deutet sich eine schwach labile Schichtung sogar bis 200 m Höhe an.

Wie bei der Temperatur, so kann man auch bei den konvektiven Wirbeln ein Pulsieren beobachten. Sie stoßen mit zunehmender Einstrahlung in immer größere Höhen vor und gegen 13:00 Uhr erreichen sie die Höhe der Residualschicht vom Vortag (**Abb. 3a**). Da die Inversion in 1250 m schwach ist, steigt die konvektive Grenzschicht durch die aufsteigenden Warmluftpakete im Verlauf des Nachmittags bis etwa 1750 m an. Sie liegt an diesem Tag also ca. 500 m höher als am Vortag. Die Aufwinde erreichen 4 - 5 m/s und haben auch im Rheingraben gute Thermikflüge ermöglicht. Die Abwinde können durchaus bis 3 m/s betragen. Auch der Horizontalwind variiert in der Nähe von Aufwinden (**Abb. 3b**), wie es auch mit den windmessenden Variometern festgestellt wurde.

Die Messungen bestätigen damit eindrucksvoll unser Wissen über die konvektive Grenzschicht an ungestörten Thermiktagen. Der Aufbau der konvektiven Grenzschicht hat am frühen Nach-



mittag also den typischen vertikalen Aufbau: oberhalb der bodennahen labilen Schicht (Prandtl-Schicht) befindet sich die gut durchmischte, stark turbulente Mischungsschicht. Diese wird nach oben durch eine Entrainmentschicht mit eingelagerter Inversion abgeschlossen. Darüber liegt die freie Atmosphäre. Mit der abendlichen Abkühlung werden die Auf- und Abwinde schwächer, zunächst bodennah, später auch in der oberen Grenzschicht, und sind nicht mehr ausfliegar.

Abwinde, auch von ganz oben nach ganz unten

Wir wollen uns auf einige interessante Phänomene beschränken, die durch die Doppler-Lidarmessungen besonders gut sichtbar gemacht werden und für Segelflieger von Bedeutung sein können. Dazu haben wir einen Zeitraum am frühen Nachmittag gewählt, d. h. in dem die Thermik gut ausgebildet war (**Abb. 3a**). Die erste der beiden Stunden war durch mehrere kürzer andauernde (und damit engere) Thermikstrukturen und die zweite durch eine länger anhaltende Thermikstruktur gekennzeichnet. Um dieses Fragen zur Thermik soll es nun gehen:

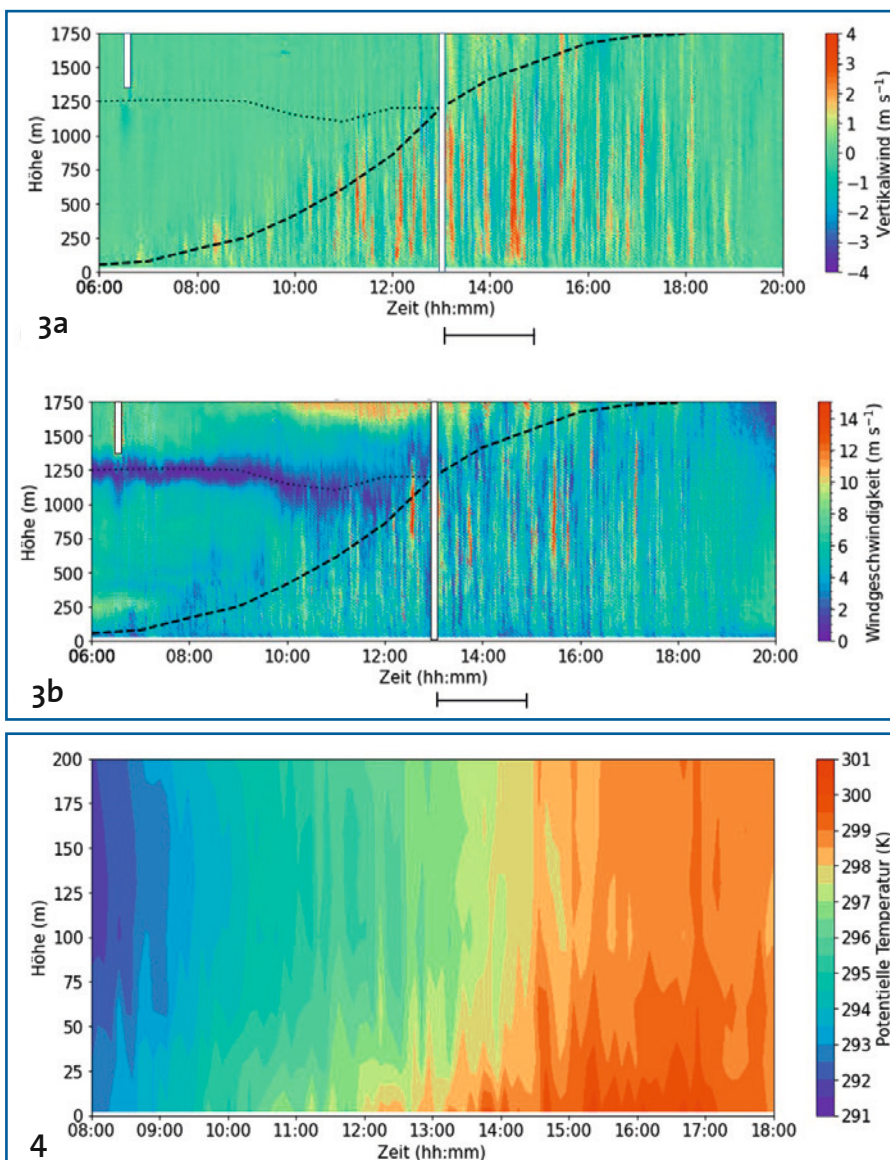


Abb. 1 Der 200 m hohe meteorologische Messmast des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) am Campus Nord (49° 5' 33" N, 8° 25' 33" O, 110,4 m NN).

Abb. 2 Satellitenbild (natural colours) am 21. Juli 2020 um 13 Uhr MEZ.

Abb. 3 (a) Zeitreihen des Vertikalwindes und **(b)** des Horizontalwindes am 21. Juli 2020. Die gestrichelte Linie zeigt die mittlere Grenzschichthöhe z_i , und die gepunktete Linie die Höhe der Residualschicht RL. Die weißen Balken markieren Zeiträume mit Datenausfall. Der untere Maßstabsbalken markiert das Zeitfenster, das nachfolgend detaillierter besprochen wird.

Abb. 4 Potenzielle Temperatur am 200-m-Mast am 21. Juli 2020. Die Temperatur zeigt eine überadiabatische (labile) Schicht etwa im Bereich der untersten 100 m und eine gute Durchmischung darüber, d. h. eher adiabatisch geschichtet.



- Wie sieht die vertikale Struktur der Aufwindschläuche aus?
- Welche vertikale Erstreckung und Sinkgeschwindigkeit sind typisch für die Abwindbereiche?
- Was geschieht am Oberrand der turbulenten Grenzschicht, der sogenannten Entrainmentschicht?
- Wie variabel sind die Horizontalwinde?

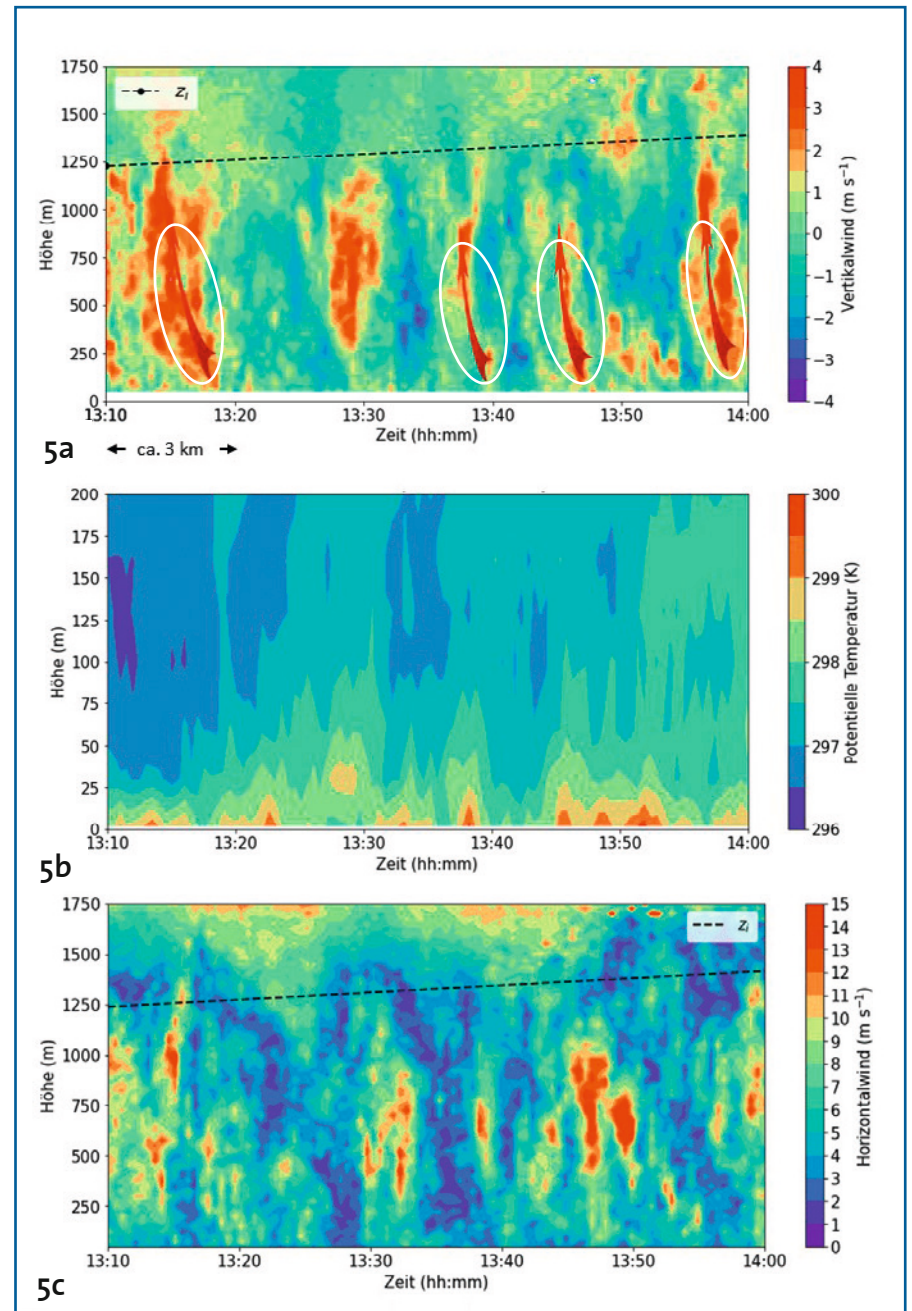
Sehen wir auf den ersten Zeitraum von 13:00 bis 14:00 Uhr, der durch ein starkes Pulsieren der Temperatur in Bodennähe gekennzeichnet ist (**Abb. 5b**). In dieser Stunde sind über dem Doppeler-Lidar etwa fünf Thermikschläuche von unterschiedlicher Dauer (zwischen zwei bis acht Minuten) zu erkennen (**Abb. 5a**). Einige von ihnen reichen aus der Bodennähe bis zur Grenzschichtobergrenze z_i bzw. stoßen in die Entrainmentschicht hinein. In der Inversion wird ihr weiteres Aufsteigen ausgebremst. Das Maximum der vertikalen Windgeschwindigkeit tritt typischerweise in der Mitte der Grenzschicht auf. Ein weiterer interessanter Aspekt ist die nicht exakte vertikale Ausrichtung der Thermikschläuche in Bodennähe. In den untersten ca. 250 m „hängt der Fuß“ des Thermikschlauches hinter dessen

Abb. 5 (a) Vertikalwind, (b) potenzielle Temperatur und (c) Horizontalwind zwischen 13:10 und 14:00 Uhr. Die gestrichelte Linie in (a) und (c) kennzeichnet die Grenzschichtobergrenze z_i , die Pfeile (im weissen Kreis) in (a) die Richtung der Auf- und Abwinde.

Position oberhalb davon hinterher. Der zeitliche Versatz des Thermikschlauchs kann durch die reibungsbedingt niedrigere Windgeschwindigkeit in der bodennahen Schicht erklärt werden und ist in der Grafik durch die gekrümmten Linien angedeutet. Oberhalb davon sind sie eher vertikal, wie auch Oliver Predelli herausgefunden hat.

Zwischen allen durchziehenden Thermikschläuchen treten Phasen mit Absinkbewegungen auf (**Abb. 5a**). Sind die Phasen von längerer Dauer, dann sind die Abwinde schwächer, sind sie kürzer, dann können sie auch Werte von 3 m/s erreichen. Allgemein gilt für alle Abwinde, dass sie sich schlauchähnlich über die gesamte Grenzschicht erstrecken. Sie werden an der Grenzschichtobergrenze mit dem Eindringen der Aufwinde in die Entrainmentschicht als kompensierende Abwinde ausgelöst und transportieren sowohl trockene, warme Luft als auch Impulse von oben in die Grenzschicht hinein. Dies ist in **Abb. 5a** durch blaue Gebiete deutlich.

Die zwischen 10:00 und 16:00 Uhr sogar noch in 200 m Höhe gemessene Abnahme der spezifischen Feuchte ist sicherlich auch eine Folge dieses Einmischvorgangs trockener Luft und deren Abwärtstransport durch die Abwinde. Auch bei den Abwinden gilt, dass sie in der Mitte der Grenzschicht im Mittel die höchste Geschwindigkeit erreichen und zum Boden hin schwächer werden (**Abb. 3a, 5a**). Dort wird das Absinken in horizontale Bewegung umgelenkt, was zu kleinräumigen Konvergenzen beiträgt und die Ablö-



sung neuer Aufwinde begünstigt.

Zweitens muss im Umfeld von Thermikschläuchen auch immer mit einer kurzzeitigen Zunahme im Horizontalwind gerechnet werden. Windspitzen über 10 m/s in der Mitte der Grenzschicht sind offensichtlich keine Seltenheit (**Abb. 5c**). Dies sind überraschend hohe Werte, die sich aber auch mit windmessenden Variometern finden lassen müssten.

Kräftiger Aufwind

Wenden wir uns nun der nächsten Stunde zu, in der die Temperatur in Bodennähe weiterhin labil geschichtet ist und ein starkes Pulsieren aufweist (**Abb. 6b**). Die Thermik ist durch eine einzige längere Aufwindphase von ca. 15 Minuten geprägt, mit vorher und nachher etwa 20-minütigem Absinken (**Abb. 6a**). Das Aufwindgebiet, d. h. der

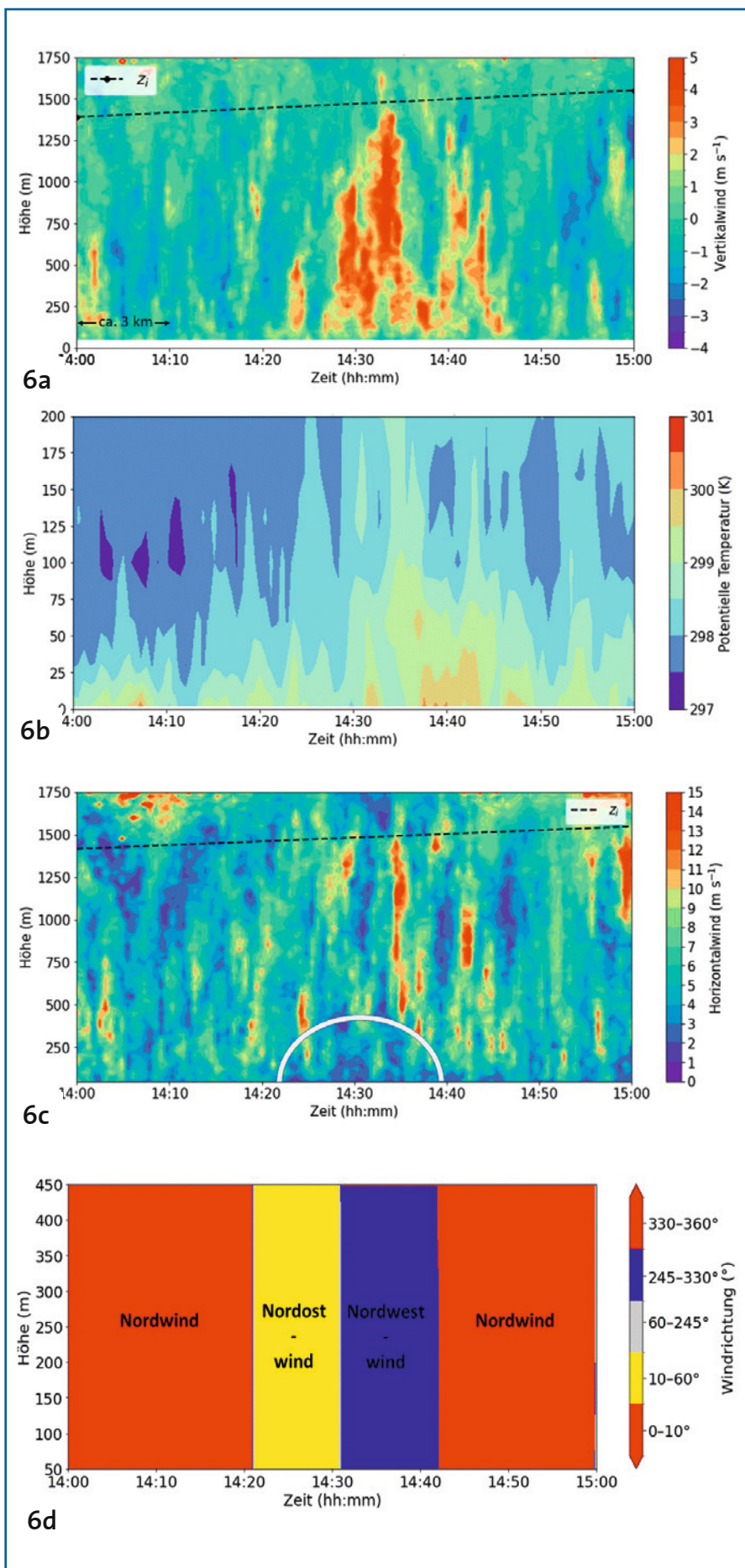


Abb. 6 (a) Vertikalwind, (b) potenzielle Temperatur, (c) Horizontalwind und (d) Windrichtung am 21. Juli 2020. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Grenzschichthöhe z_i . In (c) kennzeichnet die gebogene Linie einen Bereich bis 400 m Höhe, in der der Horizontalwind geringer ist als in den Zeiträumen vor- und nachher.

kräftige Aufwind um 14:30 Uhr ab etwa 400 m Höhe, wird aus mehreren schmalen Aufwinden unterhalb davon „gefüttert“ – Bedingungen, wie sie auch bereits vorher beschrieben wurden. Setzt man eine Verlagerung des ca. 15-minütigen Thermikschlauches mit dem mittleren Horizontalwind von etwa 5 m/s voraus, dann hat er eine horizontale Ausdehnung von ca. 4,5 km. Ein weiterer kräftiger Aufwind nur wenige Minuten später dürfte mit dem ersten Thermikschlauch zusammenhängen (**Abb. 6d**). Da das Doppler-Lidar nur Messungen ab 50 m Höhe liefert, können wir für dieses Ereignis zusätzlich die Mastmessungen hinzuziehen. Das erlaubt es einerseits zu beurteilen, wie gut benachbarte Messungen – Mast und Lidar stehen ca. 200 m voneinander entfernt mit völlig unterschiedlichen Messverfahren übereinstimmen und andererseits, das Aussehen des Thermikschlauches bis zum Boden beobachten.

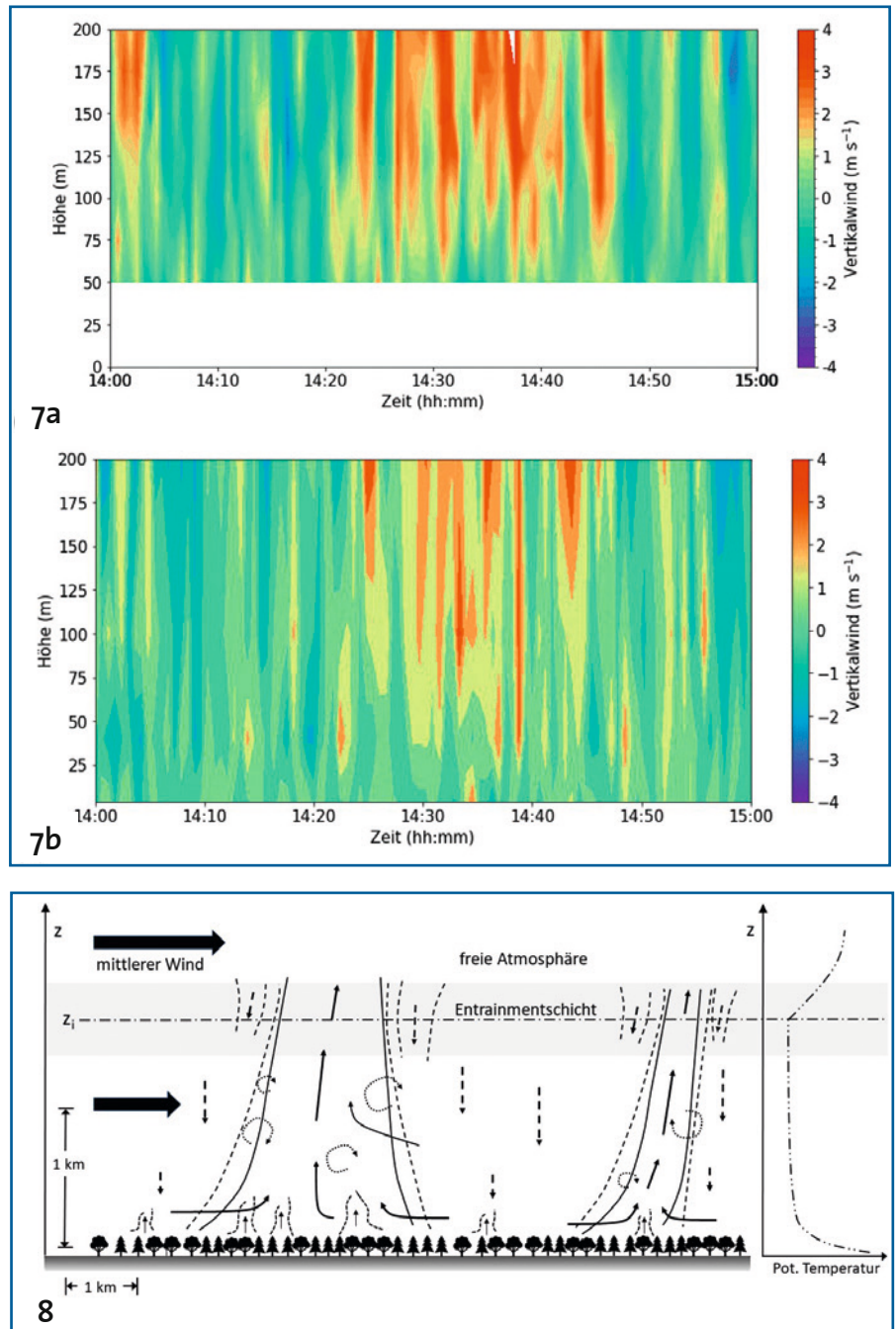
Ausfliegbare Aufwinde

Die drei Zeiträume von schwacher Thermik (14:05 bis 14:25 Uhr und 14:45 bis 15:00 Uhr) und stärkeren Aufwinden (14:25 bis 15:45 Uhr) sind an beiden Standorten zu sehen (**Abb. 7**), auch wenn die Strukturen nicht ganz gleich sind. Die Details in der mittleren Phase zeigen etwas mehr und stärkere Aufwinde am Lidar, sie sind auch nicht ganz zeitgleich. Aufgrund des Abstandes von 200 m driften die Aufwinde ja nicht „identisch“ über die Standorte. Zudem zeigen die Mastdaten deutlich, dass bodennah die Auf- und Abwinde noch

Abb. 7 Vertikalwinde am 21. Juli 2020 **(a)** vom Doppler-Lidar und **(b)** am 200-m-Mast. Der Höhenbereich unter 50 m wird vom Lidar nicht erfasst. **Abb 8** Schematische Darstellung der Konvektion in der Grenzschicht. z_i kennzeichnet die Grenzschichthöhe. Bereiche mit Aufwinden sind durch durchgezogene Pfeile und Linien, Bereiche mit Abwinden durch gestrichelte Pfeile und Linien gekennzeichnet.

schwächer ausgeprägt sind. Aus den gemeinsamen Messungen kann man sehr schön ansehen, dass sich die Aufwinde erst ab etwa 100 bis 150 m so stabilisieren und kräftig sind, dass sie ausfliegbar zu werden. Das deckt sich ganz mit den bisherigen Ergebnissen, wie sie auch von Müller und Kottmeier 2025 beschrieben werden. Dem hier gezeigten, mächtigen Thermikschlauch wird die bodennahe Warmluft zugeführt, was den überadiabatischen Temperaturgradienten in den untersten 100 m ab 15:00 Uhr deutlich reduziert (**Abb. 4**). Das ist wohl auch ein Grund dafür, dass für den Rest der Stunde keine Konvektionszellen mehr vor Ort ausgelöst werden. Auffallend sind auch die Windänderungen im Umfeld des Thermikschlauchs. Während der Phase mit Aufwinden (14:25 bis 14:45 Uhr) ist der Horizontalwind in den untersten ca. 400 m schwächer als zu den Zeiten mit Abwinden, also vorher und nachher (**Abb. 6c**).

Wie bereits in der Stunde vorher, ist es im Umfeld des Thermikschlauches, also in der Mitte der Grenzschicht, äußerst böig. Eine bevorzugte räumliche Zuordnung zu dem Aufwind ist nicht zu erkennen. Die größten Schwankungen im Horizontalwind scheinen an der Rückseite des Aufwindes aufzutreten (z. B. zwischen 14:35 und 14:45 Uhr). Als Ursache für das turbulente Verhalten des Horizontalwindes, insbesondere die



hohen Windspitzen, kommen gemäß der Theorie zu turbulenten Strömungen sowohl dynamische als auch thermische Erzeugung in Frage. Ihre genaue Ursache ist aber noch nicht erklärt. Was die Windrichtung bodennah im Umfeld des Thermikschlauches betrifft, so sind sehr markante Änderungen beim Durchzug der Zelle zu beobachten

(**Abb. 6d**). Hier wurden die stark schwankenden Windrichtungen in vier Sektoren zusammengefasst: Nordwind (rot), Nordostwind (gelb), Nordwestwind (blau) und alle anderen Windrichtungen (grau, traten hier nicht auf). Was zeigen uns nun die Ergebnisse? Vor dem Eintreffen des Thermikschlauches erkennen wir den synoptisch vorherr-

schenden Nordwind an diesem Tag. Mit dem Eintreffen des Thermikschlauches drehte der Wind auf Nordost, mit Durchzug des Zentrums ebenso abrupt und bis zu dessen Ende auf Nordwest. Danach wehte er wieder aus nördlicher Richtung. Berücksichtigt man nun, dass der Thermikschlauch von Nord nach Süd über das Lidar hinweg zog, so belegen die Windmessungen sehr gut die Windkonvergenz im unteren Bereich des Thermikschlauches (Einströmen). Dieses Windverhalten ist auch aus anderen Beobachtungen bekannt und steht in Übereinstimmung mit den niedrigeren horizontalen Windgeschwindigkeiten im unteren Teil des Thermikschlauches (*Abb. 6c*).

Neue Einblicke

Fassen wir nun die Ergebnisse – auch anhand der schematischen Darstellung in *Abb. 8* – kurz zusammen:

Aufwindschläuche haben in Bodennähe bis in etwa 150 m Höhe infolge der Windscherung häufig eine Neigung „der Fuß hängt nach“. Außerdem formieren sich mehrere kleine und schwächere bodennahe Aufwinde (Plumes) in der gut durchmischten Schicht zu wenigen starken Aufwindschläuchen, die dann häufig bis zum Oberrand der Grenzschicht und sogar in die Entrainmentschicht reichen und so ein Anwachsen der Grenzschicht bewirken. Maximale Geschwindigkeiten und turbulente Schwankungen des Vertikalwindes bis 5 m/s treten üblicherweise in der Mitte der Grenzschicht auf.

Am Oberrand der Grenzschicht, der Entrainmentschicht, tritt das Einmischen von trockener, warmer Luft und Impuls aus der freien Atmosphäre in die Grenzschicht ein. Da die Windgeschwindigkeit in der freien Atmosphäre häufig höher als in der Grenzschicht ist, muss man im Entrainmentbereich mit erhöhten Horizontalwindgeschwindigkeiten im Zusammenhang mit dem Abwind rechnen.

Die Abwinde erstrecken sich meist zusammenhängend über die gesamte Grenzschicht, reichen also von der Entrainmentschicht bis zur bodennahen Schicht (Prandtl-Schicht). Auch für sie gilt, dass die höchsten Werte von bis zu 3 m/s zumeist in der Mitte der Grenzschicht auftreten.

In der Umgebung der Aufwindschläuche treten oft starke Schwankungen im Horizontalwind auf. Anhand der Lidarmessungen konnten in der Mitte der Grenzschicht über 10 m/s gemessen werden. Sie sind als Phänomen nicht vollständig verstanden. Ein neu am KIT entwickeltes

flugzeuggetragenes Lidar soll hier weitere Erkenntnisse liefern.

Im unteren Bereich der Aufwindschläuche, also in der untersten bis ca. 400 m, wurde eine Konvergenz im Horizontalwind beobachtet. Dieses Einstürmen in den Aufwindschlauch ist aus Massenerhaltungsgründen auch zu erwarten.

Die Ergebnisse aus Lidar- und Mastmessungen bestätigen mit neuen und vollständigeren Daten vieles, was Segelflieger und Meteorologen bereits über die Thermik wissen. Sie liefern aber auch neue Einblicke in die faszinierende Welt der Auf- und Abwinde. ♦

Zusatzinformationen Thermik-Artikel:



**VON FLIEGERN FÜR FLIEGER:
IHR KOMPETENTER PARTNER
FÜR LUFTFAHRTVERSICHERUNGEN.**



SIEGFRIED PESCHKE KG
VERSICHERUNGSVERMITTLUNG

Tel: +49 (0) 89 744 812-0
www.peschke-muc.de