



**In meinen letzten Artikeln habe ich oft über die konvektive Grenzschicht (KG) berichtet, weil sie für das Verständnis der Aerologie immer mehr zum Kernbegriff wird. Das Fernerkundungs-Tool LIDAR (Light Detection And Ranging) misst und zeigt ein Bild der Atmosphäre, welche die Existenz dieser Schicht in der untersten Troposphäre beweist – falls ein solcher Beweis noch nötig sein sollte. Dort, wo sich die Thermik entwickelt.**

**J'ai souvent abordé la couche convective (CC) dans mes derniers articles, car elle devient une notion essentielle pour comprendre l'aérologie. L'outil de télédétection LIDAR, acronyme de «Light Detection And Ranging», qui fournit des mesures et une imagerie de l'atmosphère, apporte, si nécessaire, une preuve supplémentaire de l'existence de cette couche de la basse troposphère dans laquelle ont lieu nos thermiques.**

 **Jean Oberson, soaringmeteo.ch** 

Das LIDAR funktioniert ähnlich wie ein Radar oder ein Ultraschall in der Medizin. Der Unterschied liegt in den Strahlen, die gebraucht werden: Beim Radar sind es Radiowellen, beim Ultraschall Ultraschallwellen und beim LIDAR Lichtstrahlen. Diese Lichtstrahlen treffen auf Mikropartikel (Aerosole), die in der Atmosphäre schweben (Abb. 1). Die Wellen werden als Echo von diesen Partikeln zu einem Teleskop zurückgestrahlt, der die Signale empfängt. Diese Signale werden schliesslich von einem Computer verarbeitet, der daraus von einem Teil der Atmosphäre ein Bild der Partikelkonzentration, der Feuchtigkeit, der Temperatur und der Winde erstellt. Allgemein kann in zwei verschiedenen Arten von Graphiken folgendes dargestellt werden: Entweder die chronologische Entwicklung des Zustandes eines vertikalen Segments über einem bestimmten Punkt (Höhe als Y-Achse, Zeit als X-Achse, wie in Abb. 2, 4 und 5) oder der Zustand eines Stücks (Scheibe) Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt (Höhe als Y-Achse, Distanz als X-Achse, wie in Abb. 3). Die Aerosole sind feste oder flüssige Partikel (fettig oder wässrig), die in der Atmosphäre schweben und deren Durchmesser von einem Bruchteil eines Mikrometers bis zu mehreren Mikrometern reichen kann. Es handelt sich dabei um Schadstoffe, Rauchpartikel, biologischen Mikro-Abfall, Sandstaub, Vulkanasche usw.

Hier sei nochmals erwähnt, dass sich die KG vom Boden her durch einen Teil der Troposphäre erstreckt. Sie kann mehrere Meter oder hundert Meter dick sein. Oberhalb der KG erstreckt sich die freie Troposphäre. Hier eine Zusammenfassung ihrer Haupteigenschaften im Zusammenhang mit deren Bodennähe:

1. Sie ist turbulent, denn es gibt ständig vertikale Luftbewegungen, sowohl auf- (unsere geliebte Thermik) als auch abwärts. Somit ergibt sich in dieser Schicht eine grosse Luftdurchmischung und ein wiederholter Kontakt mit dem Boden, der die drei folgenden Eigenschaften zur Folge hat:

2. Sie ist besonders partikelhaltig, was ihr diesen dunstigen Aspekt gibt.

Le principe de fonctionnement du LIDAR est assez semblable à celui du radar ou de l'échographie médicale, la différence étant le type de faisceau utilisé. Alors que le radar fonctionne dans le domaine des ondes radio et l'échographie avec des ondes ultrasonores, le LIDAR utilise des faisceaux d'ondes lumineuses type laser. Il se compose d'un système qui émet par balayage des ondes lumineuses qui vont irradier les microparticules (aérosols) en suspension dans l'atmosphère aux alentours (figure 1). Les ondes sont ensuite rétrodiffusées (échos) par ces aérosols vers un télescope qui récolte ces signaux. Ceux-ci sont finalement traités par un dispositif électronique et informatique afin de fournir des images de la concentration des aérosols, de l'humidité, de la température et des vents d'une portion de l'atmosphère. On trouve en général deux types de graphique x-y. Soit on représente l'évolution de l'état d'un segment vertical au-dessus d'un point précis en fonction du temps (altitude en y et temps en x, p. ex. dans les figures 2, 4 et 5), soit l'état d'une section (une tranche) de l'atmosphère en un temps précis (altitude en y et distance en x, figure 3, p. ex.). Les aérosols sont des particules solides ou liquides (gras ou aqueux) en suspension dans l'air dont le diamètre varie d'une fraction de micromètre à plusieurs micromètres. Il y a des polluants, des particules de fumée, des micro-déchets biologiques, des poussières de sable, des cendres de volcan etc.

Rappelons que la CC s'étend du sol sur une partie de la troposphère. Son épaisseur varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Au-dessus de la CC s'étend la troposphère libre. Voici un résumé de ses principales propriétés découlant de sa relation étroite avec la surface terrestre:

1. Elle est turbulente, car il y a sans cesse des mouvements d'air verticaux ascendants (nos chers thermiques) et descendants. Il y a donc dans cette couche un important mélange d'air et un contact fréquent avec le sol subjacent, ce qui entraîne les trois autres caractéristiques suivantes.

2. Elle est particulièrement riche en aérosols, ce qui lui donne son aspect brumeux.

# Le LIDAR pour explorer la couche convective

## die konvektive ht erkunden

3. Sie weist eine homogene Feuchtigkeit auf, die grösser ist als diejenige in der freien Atmosphäre darüber.

4. Nach einer dünnen, sehr instabilen (überadiabatischen) Schicht wird ihr Temperaturgradient homogen und beträgt knapp  $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (adiabatische Kurve). An ihrer Obergrenze findet man oft eine Temperaturinversion, und die Feuchtigkeit sinkt abrupt.

Das LIDAR ermöglicht es, diese Eigenschaften besonders effizient und in Echtzeit zu messen, zu visualisieren und zu studieren. Abb. 2 zeigt die Entwicklung der KG von morgens früh bis abends. Besonders bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Oberfläche (4) der mit einem zusätzlichen weissen Strich markierten KG nicht glatt, flach und regelmässig ist, wie sie sonst in Mesoskala-Modellen dargestellt wird, sondern eher

3. Son humidité est homogène et plus élevée que dans l'atmosphère libre au-dessus.

4. Son gradient de température après une fine couche très instable (suradiabaticisme) est homogène et d'environ  $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (courbe adiabatique). Sa limite supérieure est souvent marquée par une inversion de température et par une chute brusque de l'humidité.

Le LIDAR est particulièrement efficace pour mesurer, visualiser et étudier ces caractéristiques en temps réel. La figure 2 montre l'évolution de la CC du petit matin jusqu'au soir. D'emblée, remarquons que la surface supérieure de la CC (4, marquée par un trait blanc surajouté) n'est pas lisse, plate et régulière, comme sur les modèles à mésoéchelle, mais plutôt bosselée, variable et irrégulière comme la surface de l'eau

Abb. 1 Fig. 1:

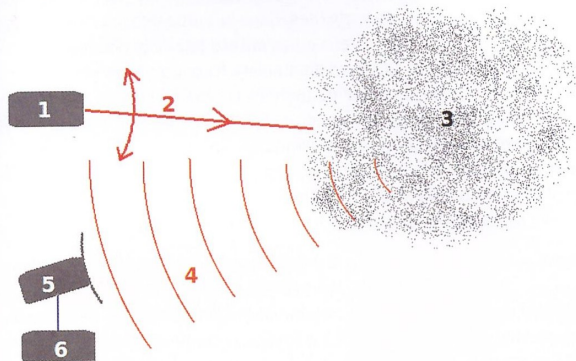


Abb. 1: Das LIDAR Prinzip. Sender (1) von Lichtstrahlen (2), mit oder ohne Abtastung. Der Strahl erreicht die Atmosphäre und somit die darin enthaltenen Aerosole (Partikel) (3); diese strahlen ein Lichtsignal (4) zurück (Rückstreuung). Das Signal wird von einem Empfänger aufgefangen und anschließend durch eine elektronische Computereinrichtung verarbeitet.

Figure 1: Principe du LIDAR. Émetteur (1) de faisceau lumineux (2) par balayage ou non. Ce faisceau atteint l'atmosphère avec ses aérosols (3) qui réfléchit par rétro-diffusion un signal lumineux (4). Ce signal est capté par un récepteur puis est traité par un dispositif électronique et informatique (6).

Abb. 2 Fig. 2:

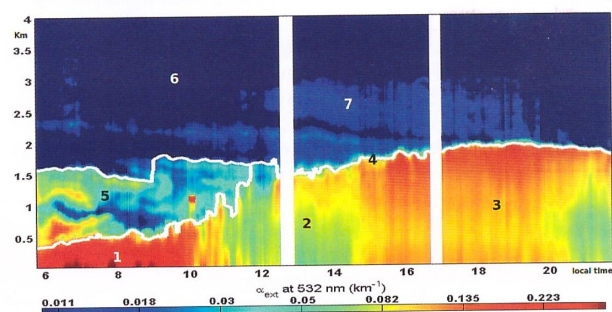
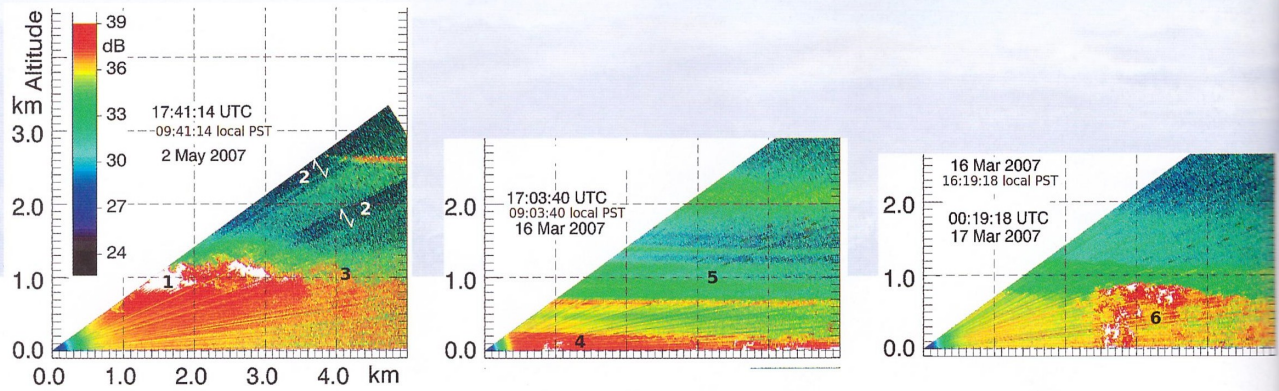


Abb. 2: LIDAR-Bild nach Höhe (Y-Achse) und Zeit (X-Achse) über Paris am 18. Mai 2005. Die Farbenskala entspricht in etwa der Konzentration von Partikeln in der Atmosphäre (blau = schwache, rot = hohe Konzentration); sie ist auch etwa umgekehrt proportional zur Sicht. Im Laufe des Nachmittags ist der Gipfel der KG markant rot. Das hat damit zu tun, dass dort die relative Feuchtigkeit und somit der Durchmesser (nicht unbedingt die Konzentration) der Partikel steigt. Publikation mit freundlicher Genehmigung von Dr. Jean-Christophe Raut, Dozent und wissenschaftlicher Mitarbeiter LATMOS/IPSL, Université Pierre et Marie Curie, Paris. Das Bild wurde 2007 in einem Artikel im «Journal Atmos. Chem. Phys.» veröffentlicht (Raut, J.-C. and Chazette, P).

Figure 2: Image LIDAR en fonction de l'altitude (axe y) et du temps (axe x) au-dessus de Paris, le 18 mai 2005. L'échelle des couleurs est environ proportionnelle à la concentration d'aérosols dans l'atmosphère (bleu = faible et rouge = forte concentrations) et est aussi environ inversement proportionnelle à la visibilité. L'aspect très rouge au sommet de la CC en cours d'après-midi est dû à l'augmentation du diamètre des aérosols par augmentation de l'humidité relative à ce niveau plutôt qu'à une augmentation de concentration. Avec l'aimable autorisation du Dr. Jean-Christophe Raut, Maître de conférence, LATMOS/IPSL, Université Pierre et Marie Curie, Paris. L'image a été publiée dans un article écrit par Raut, J.-C. and Chazette, P. dans le journal Atmos. Chem. Phys. en 2007 (Copyright).

Abb. 3 Fig. 3:



verbogen, veränderlich und unregelmässig, wie die Oberfläche von kochendem Wasser. Die partikelhaltige, gelb-rote Schicht bildet die KG. Am frühen Morgen gibt es noch keine KG, sondern eine dünne, nächtliche Grenzschicht mit einer grossen Temperaturinversion am Boden, die zu einer starken Konzentration von Partikeln führt (1). Unter Einfluss der Sonne bildet sich die KG und löst die nächtliche Inversion auf, bevor sie sich von morgens (2) bis nachmittags (3) nach und nach ausdehnt. Oberhalb der nächtlichen Schicht befindet sich eine heterogene Schicht mit einer kleineren Konzentration von Partikeln (5). Dabei handelt es sich um die Überreste der KG vom Vortag. Oberhalb der KG (6) gibt es nur vereinzelt wenig dichte Partikelschichten, die z.B. aus Vulkanrauch oder Staub aus der Sahara bestehen (7).

Abb. 3 zeigt die Konzentration von Partikeln in verschiedenen «Scheiben» der Atmosphäre. Je röter die Schicht, desto stärker die Konzentration – bis hin zur Sättigung (weisse Zonen). Kleine, morgendliche Kumuli an der Spitze der KG (1) haben eine hohe Reflexion der LIDAR-Strahlen zur Folge, was zu den schattigen Zonen (2) im Hintergrund in der freien Atmosphäre führt. Die obere Grenze (3) ist zwar verbeult, hier jedoch nicht so deutlich zu erkennen. Am frühen Morgen drückt eine Bodeninversion eine dünne, stark partikelhaltige (rote) Schicht (4) zu Boden, in der die erste kleine Thermik (weiss) zu erkennen ist. Darüber enthält die restliche KG vom Vortag (5) nur wenige Partikel (5); sie ist auch sehr heterogen. Die Thermik, die am Boden entsteht, enthält natürlich mehr Partikel (6) und ist somit gut ersichtliche: Sie bildet heterogene Säulen (rot-weiße Zonen), deren unregelmässige Formen sich an der Obergrenze der KG ausdehnen. Im unteren Bereich ist die KG (7) wenig partikelhaltig und recht homogen. Oberhalb ist die freie Atmosphäre (8) klar und enthält wenig Partikel. Im unteren Bereich der KG löst sich eine Thermik (9) vom Boden, welche die Basis noch nicht erreicht hat.

Abb. 4 zeigt auf beeindruckende Weise, wie sich die KG im Lauf des Tages entwickelt. Am frühen Morgen (1) enthält sie viel Wasserdampf, ist jedoch recht homogen (5 bis 6 g Wasserdampf/m<sup>3</sup>). Am Nachmittag (2) dehnt sich die KG etwas aus und verliert dabei ein wenig an Feuchtigkeit (4 bis 5 g/m<sup>3</sup>), bleibt jedoch weiterhin homogen. An der Spitze der KG (3),

qui bout. La plage jaune-rouge, riche en aérosols, dessine la CC. Au petit matin, il n'y a pas encore de CC, mais une couche limite nocturne mince avec son importante inversion de température au sol qui maintient une forte concentration d'aérosols (1). Avec le soleil, la CC se forme et dissipe l'inversion nocturne, puis s'épaissit progressivement du matin (2) à l'après-midi (3). Au-dessus de la couche nocturne, on trouve une plage hétérogène à concentration modérée d'aérosols (5). Il s'agit de la CC résiduelle de la veille. Au-dessus de la CC (6), il n'y a que quelques plages peu denses d'aérosols, provenant par exemple de la fumée de volcans ou de poussières venant du Sahara (7).

La figure 3 montre la concentration d'aérosols dans diverses «tranches» d'atmosphères. Plus la plage est rouge, plus la concentration est grande – jusqu'à saturation (zones blanches). De petits cumulus matinaux au sommet de la CC (1) entraînent une forte réflexion des faisceaux LIDAR et donc des ombres à l'arrière (2) dans l'atmosphère libre. La limite supérieure (3) est bosselée, mais pas très nette, dans ce cas. En début de matinée, l'inversion au sol maintient une couche mince (4), très riche en aérosols (en rouge), dans laquelle on devine les premiers petits thermiques (en blanc). Au-dessus, la CC résiduelle de la journée précédente (5) est moyennement chargée en aérosols (5) et hétérogène. Les thermiques venant du sol sont évidemment encore plus riches en particules (6) et sont ainsi bien matérialisés par des colonnes hétérogènes (zones rouges et blanches) de formes irrégulières qui bombent à la limite supérieure de la CC. Sur la section du bas, la CC (7) est peu chargée en aérosols et plutôt homogène. L'atmosphère libre au-dessus (8) est claire et pauvre en particules. Dans la partie inférieure de la CC, un thermique (9) se détache et n'a pas encore atteint le plafond.

L'image de la figure 4 montre de manière frappante l'évolution de la CC en cours de journée. En début de matinée (1), la CC est riche en vapeur d'eau mais assez homogène, avec des valeurs oscillant entre 5 et 6 g de vapeur d'eau par m<sup>3</sup>. Dans l'après-midi (2), la CC devient plus épaisse, ce qui dilue un peu l'humidité (4 à 5 g/m<sup>3</sup>) qui reste cependant homogène. Au sommet de la CC (3), qui grimpe en cours de journée de 1000 à 2200 m d'altitude, il y a une brusque chute de l'humidité. Au-dessus,

Abb. 4 Fig. 4:

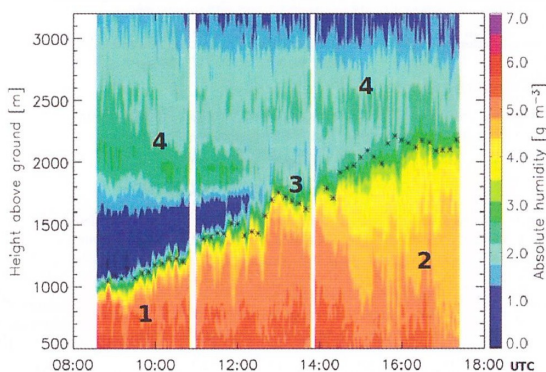
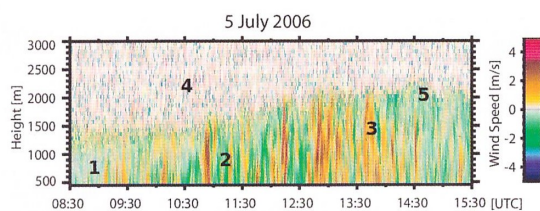


Abb. 5 Fig. 5:



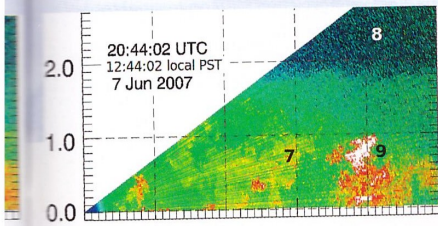


Abb. 3: Verschiedene Sektionen der Atmosphäre mit der Höhe als Y-Achse und der Distanz als X-Achse, 2007 in Dixon mit dem LIDAR der Chico Universität aufgenommen. Die Achsen entsprechen den LIDAR-Sendern und -Empfängern. Die Farbskala entspricht der Intensität der Rückstreuung und ist etwa proportional zur Konzentration von Partikeln in der Atmosphäre (schwarz-blau = schwach, rot = hoch, weiss = gesättigt). Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Shane D. Mayor, California State University Chico. [http://phys.csuchico.edu/lidar-data/nsf\\_results](http://phys.csuchico.edu/lidar-data/nsf_results).

Figure 3: Diverses sections de l'atmosphère avec l'altitude pour l'axe y et la distance pour l'axe x, acquises en 2007 à Dixon, Californie, par le LIDAR de l'université de Chico. L'émission et la réception LIDAR se trouvent à l'origine des axes. L'échelle des couleurs, correspondant à l'intensité de la rétrodiffusion, est environ proportionnelle à la concentration d'aérosols dans l'atmosphère (noir-bleu = faible, rouge = forte concentrations, blanc = saturation). Avec l'aimable autorisation du Dr. Shane D. Mayor, California State University Chico. [http://phys.csuchico.edu/lidar-data/nsf\\_results/](http://phys.csuchico.edu/lidar-data/nsf_results/) (Copyright).

die im Verlauf des Tages von 1000 auf 2200 m steigt, sinkt die Feuchtigkeit abrupt. Darüber ist die freie Atmosphäre (4) viel heterogener und trockener (0 bis  $3 \text{ g/m}^3$ ).

Abb. 5 zeigt ein besonders interessantes Bild: Am frühen Morgen (1) ist die KG eher dünn und weist blasser Farben auf, was auf schwache, vertikale Bewegungen (also schwache Thermik) hinweist. Am späten Vormittag (2) sind die Farben in der KG markanter, Auf- (rot-orange) und Abwinde (grün-blau) sind zeitweise stark. Am frühen Nachmittag (3) dominieren offenbar die Aufwinde. Wenn die Spitze der KG am späten Nachmittag am höchsten ist (5), verblasst diese Schicht wieder, die Farben sind weniger markant, was bedeutet, dass sich die Thermik abschwächt. Oberhalb bleibt die freie Atmosphäre (4) sehr blass und homogen – hier finden kaum vertikale Luftbewegungen statt.

Die hier dargestellten LIDAR-Bilder zeigen die KG und ihre Merkmale deutlich auf. Ich habe keine Bilder gefunden, welche die Temperaturstruktur dieser Schicht hervorheben. Abb. 6 zeigt jedoch das Bild einer echten Radiosonde an einem guten Flugtag: Hier verläuft die Temperaturkurve a der dicken KG, die oben durch die Inversion b bei etwa 750 hPa (ca. 2500 m) begrenzt wird, tatsächlich parallel zu den Adiabaten (ein Beispiel rosa markiert) auf dem Emagramm; ihr Gradient entspricht  $-1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ , was für eine gut strukturierte KG typisch ist.

l'atmosphère libre (4) est plus hétérogène et plus sèche, avec des valeurs entre 0 et  $3 \text{ g par m}^3$ .

L'image de la figure 5 est très intéressante. En début de matinée (1), la CC n'est pas épaisse et présente des couleurs assez pâles, ce qui indique de faibles mouvements verticaux (peu de thermiques). En fin de matinée (2), la CC présente des plages de couleurs plus marquées avec des périodes de fortes ascendances (orange-rouge) et descendances (vert-bleu). En début d'après-midi (3) les ascendances semblent dominer. Finalement, en fin d'après-midi, alors que le sommet de la CC est au plus haut (5), cette couche devient plus pâle avec des plages de couleurs moins marquées, ce qui correspond à une baisse de l'activité thermique. L'atmosphère libre sus-jacente (4) reste très pâle et homogène, traduisant une quasi absence de mouvements d'air verticaux.

Les images LIDAR présentées ici illustrent de façon évidente la CC et ses caractéristiques. Je n'ai pas trouvé d'image mettant en évidence la structure de température de cette couche. Mais sur la dernière image (figure 6) d'un radiosondage réel d'un bon jour de vol, la courbe de température de l'épaisse CC limitée en haut par l'inversion b vers 750 hPa (environ 2500 m) est bien parallèle aux adiabatiques (un exemple en rose) de l'émagramme et présente par conséquent un gradient de  $-1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ , typique d'une CC bien structurée.

Abb. 4: LIDAR-Bild nach Höhe (Y-Achse) und Zeit (X-Achse) über Lindenberg am 30. Mai 2003. Das LIDAR ist so eingestellt, dass es die absolute Feuchtigkeit in  $\text{g Wasserdampf/m}^3$  misst. Die Farbskala reicht von blau ( $0 \text{ g/m}^3$ ) bis violett ( $7 \text{ g/m}^3$ ). Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Barbara Hennemuth, Max-Planck-Institute for Meteorology, Hamburg. Das Bild wurde am 5. Januar 2006 im Online-Artikel «Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter» publiziert, Barbara Hennemuth and Andrea Lammer.

Figure 4: Image LIDAR en fonction de l'altitude (axe y) et du temps (axe x) au-dessus de Lindenberg, le 30 mai 2003. Le LIDAR est réglé pour mesurer l'humidité absolue en  $\text{g de vapeur d'eau par m}^3$ . L'échelle des couleurs va du bleu ( $0 \text{ g/m}^3$ ) à violet ( $7 \text{ g/m}^3$ ). Avec l'aimable autorisation du Dr Barbara Hennemuth, Max-Planck-Institute for Meteorology, Hamburg. L'image a été publiée dans un article écrit par Barbara Hennemuth and Andrea Lammer, determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter, publié online le 5 janvier 2006 (Copyright).

Abb. 6 Fig. 6:

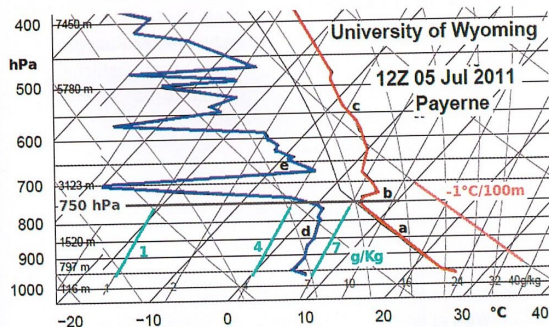


Abb. 5: LIDAR-Bild nach Höhe (Y-Achse) und Zeit (X-Achse) über Leipzig am 5. Juli 2005. Das LIDAR ist so eingestellt, dass es die Geschwindigkeit von vertikalen Luftbewegungen misst. Die Farbskala reicht von blau ( $-4 \text{ m/s}$ ) über weiss ( $0 \text{ m/s}$ ) bis rot ( $+4 \text{ m/s}$ ). Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Holger Baars, Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig. Das Bild wurde in der Diplomarbeit «Continuous monitoring of the planetary boundary layer depth with lidar» von Holger Baars publiziert.

Figure 5: Image LIDAR en fonction de l'altitude (axe y) et du temps (axe x) au-dessus de Leipzig, le 5 juillet 2005. Le LIDAR est réglé pour mesurer les vitesses d'air verticales. L'échelle des couleurs va du bleu ( $-4 \text{ m/s}$ ) à rouge ( $+4 \text{ m/s}$ ) en passant par le blanc ( $0 \text{ m/s}$ ). Avec l'aimable autorisation du Dr Holger Baars, Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig. L'image a été publiée dans une thèse de diplôme: Continuous monitoring of the planetary boundary layer depth with lidar de Holger Baars (Copyright).

Abb. 6: Echte Radiosonde an einem guten Thermiktag in Form eines Emagramms. Der Gipfel der KG befindet sich auf ca. 750 hPa (2500 m). Kurve c: Temperaturen oberhalb der KG mit einem Gradienten von ca.  $-0.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ . Kurve d: Taupunkt (Feuchtigkeit) in der KG, parallel zu anderen Kurven des Mischungsverhältnisses (hellblau). Oberhalb der KG variiert die Feuchtigkeit e sehr stark.

Figure 6: Radiosondage réel d'une bonne journée à thermiques, reporté sur un emagramme. Le sommet de la CC est situé vers 750 hPa soit à environ 2500 m. Courbe c, températures au-dessus de la CC avec un gradient d'environ  $-0.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ . Courbe d, points de rosée (humidité) dans la CC, parallèles aux autres courbes de rapport de mélange (bleu clair). Au-dessus de la CC l'humidité e est très variable.