

„Es gibt nichts Praktischeres, als eine gute Theorie.“

Immanuel Kant

„Interpretation von Wolkenbildern und Wetterphänomenen für Piloten und Ballonfahrer“

Dr. Manfred Reiber

Teil 5: Sichtbare Wetterphänomene und Wolken an Inversionen (Grenzschichtbewölkung)

Physikalisch gesehen sind Inversionen Sperrschichten, die die Vertikalbewegung in der Atmosphäre behindern oder ganz und gar unterbinden. Sie stören einerseits die Thermik und haben somit negativen Einfluss auf das Segel-, Gleitschirm- und Drachenfliegen, andererseits wird in ihnen die Tragkraft von Ballonen signifikant verändert. Sie wirken aber auch markant auf meteorologische Phänomene wie die Sicht, die Wolkenbildung, das Feuchte- und das Windfeld ein. Dadurch werden Inversionen, oder besser gesagt die durch sie erzeugten Wetterphänomene, für uns sichtbar. Das gibt uns die Möglichkeit Inversionen oft relativ gut zu beschreiben, auch wenn keine genauen Messergebnisse vorliegen.

Bevor wir uns typische Bilder dieser Phänomene anschauen, noch einige Bemerkungen zu Inversionen „an sich“. Als Inversion bezeichnet man Luftschichten, in denen die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe zunimmt. Diese Temperaturzunahme ist Grund dafür, dass in einer Inversion stabiles Gleichgewicht herrscht. Steigt Luft adiabatisch auf (feucht- oder trockenadiabatisch), kühlt sie sich ab. Würde das innerhalb einer Inversion passieren, wäre sie immer kälter als die Umgebungsluft, weil die Lufttemperatur ja mit der Höhe zunimmt. Kalte Luft ist aber „schwerer“ als warme, deshalb könnte sie nicht weiter aufsteigen. Die Vertikalbewegung wird also gestoppt. Daraus folgt z. B., dass Inversionen keine Thermik zulassen. Solange z. B. eine Bodeninversion existiert, kann auch keine Thermik entstehen. Thermische Flüge sind dann nicht möglich. Fährt man mit einem Ballon, z. B. beim Start in eine Inversion ein, dann geht die Tragkraft zurück, um aber weiterhin steigen zu können müsste stärker geheizt werden. Fährt man mit einem Ballon, z. B. bei der Landung, von oben in eine Inversion ein, dann „schwebt der Ballon auf“, weil die Tragkraft jetzt zunimmt. Je nach der Höhenlage der Inversion ergeben sich so ganz verschiedene Handlungsalternativen für das Ballonfahren.

Inversionen sind nicht etwa selten, im Gegenteil sie sind eine sehr häufig auftretende Wettererscheinung. Bodeninversionen kommen an ca. 70% aller Tage vor. Freie Inversionen kommen an etwa 55% aller Tage vor. (Weitere Details zu Inversionen siehe Texte zu den Abbildungen)

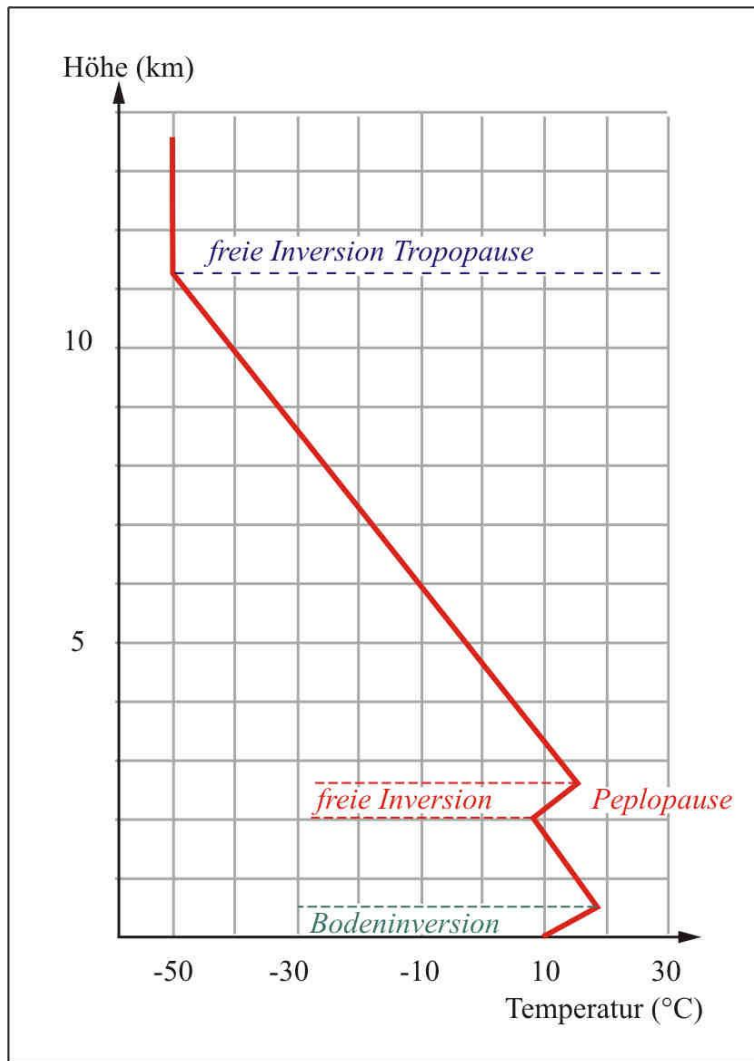


Abbildung 1: Die unterste Schicht der Atmosphäre, die Troposphäre, ist durch eine mittlere Temperaturabnahme von $0,65 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ (Standardatmosphäre) charakterisiert. In der realen Atmosphäre wird diese Temperaturabnahme aber häufig durch eine Temperaturzunahme unterbrochen. Diese Schichten bezeichnet man als Inversionen. Man unterscheidet dabei Bodeninversionen und freie Inversionen. Bodeninversionen beginnen direkt an der Erdoberfläche und reichen im Sommer 150 bis 250 m hoch, im Winter 400 bis 600 m. In Extremfällen können sie sich mit einer freien Inversion „verbinden“ und Höhen bis 2000 m erreichen. Bodeninversionen entstehen in der Regel infolge der Wärmeabgabe durch die langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche. Sie bilden sich bei „Strahlungswetterlagen“, also bei wolkenlosem Himmel oder bei nur geringer Bewölkung aus. Hochdruckwetter ist deshalb der beste Garant für Bodeninversionen. Freie Inversionen entstehen in der Regel durch das Absinken (adiabatische Erwärmung) von Luftmassen aus der Höhe. Weil in Hochdruckgebieten „Absinken“ herrscht, ist auch die Entstehung der freien Inversionen eng mit der Existenz von Hochdruckgebieten korreliert. Die typische Absinkinversion in Hochdruckgebieten, auch Peplopause genannt, hat im Winter eine Höhenlage zwischen etwa 750 und 1000 m, im Sommer zwischen 1750 und 2000 m. Die Tropopause ist eine ständig vorhandene freie Inversion in ca. 8000 bis 12000 m Höhe.

Diagramm: Dr. M. Reiber „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“ S. 201



Abbildung 4: Fast senkrecht aufsteigender Rauch und starker Dunst, ggf. sogar Nebel, sind typische Wettererscheinungen in einer Bodeninversion. Dadurch, dass die Vertikalbewegung quasi unterbunden ist, findet kein Windenergieaustausch mit höher gelegenen Luftschichten statt. In Bodennähe herrscht also in der Regel schwacher, meist umlaufender Wind. Die Aufstiegshöhe der Rauchfahnen ist dann erreicht, wenn die Wärmeenergie aufgezehrt ist, die der Rauch aus seiner Quelle mitgebracht hat. Das muss also nicht die Obergrenze der Bodeninversion sein.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 5: Starke Dunstanreicherung bis kurz vor Gipfelhöhe der Berge lässt sehr genau die Existenz und die Obergrenze der Bodeninversion erkennen. Bei einiger Übung kann man aus der so „gemessenen“ Höhe der Bodeninversion auch Schlussfolgerungen über den Zeitpunkt der Auflösung dieser Bodeninversion, oder anders gesagt über den Beginn stärkerer thermischer Prozesse, ableiten.

Foto: Olaf Groschupf



Abbildung 6: Interessant auf diesem Foto ist der über viele Kilometer waagrecht verlaufende Abzug der Rauchfahne eines Schiffes. Diese Rauchfahne zeigt **nicht** die Obergrenze der Bodeninversion an. Die Rauchfahne liegt innerhalb der Bodeninversion. Sie erreicht eben gerade die Höhe, für die die Wärmeenergie ausreicht, die sie vom Schiff „mitbekommen“ hat. Über Land sieht man vor allem im Winter diese waagrecht abziehenden Rauchfahnen, teils aus Hochschornsteinen. Sie zeigen aber auch hier nicht die Obergrenze der Bodeninversion an.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 7: Das ist die Obergrenze einer dichten, etwa 500 m dicken, Hochnebeldecke, die identisch ist mit der Obergrenze der Bodeninversion. Das Bild wurde nach einem Ballonstart in der Nähe von Bellinzona (italienische Alpen) durch diese Hochnebeldecke hindurch, fotografiert. Solche massiven Hochnebeldecken lösen sich nur sehr langsam auf. Für Thermikflüge besteht an diesem Tag wohl keine Hoffnung.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 8: Wir sehen hier eine aufgelockerte Sc-Decke an einer ausgeprägten freien Absinkinversion, der sog. Peplopause. Wenn der Sc durch Ausbreitung aus Cu Wolken entsteht, dann bezeichnet man diese Wolken als Sc cugen (Statocumulus cumulogenitus, d. h. so viel wie Stratocumulus aus Cumulus entstanden). Solche, oft weit ausgedehnte, aber vertikal flache Wolkenfelder kommen häufig nachts, bis zum frühen Vormittag vor. In der Frühe schirmen diese Wolken zunächst die Thermik ab, werden aber bald durch die Sonneneinstrahlung aufgelöst. Dann erst entsteht Thermik und wieder Cu-Bewölkung, die sich wieder an der Peplopause ausbreitet. Dieser zyklische Ablauf hält so lange an, wie eine stabile Hochdruckwetterlage existiert. Bei labiler Schichtung zwischen Boden und Peplopause ist zumindest über die Mittagszeit bis zum frühen Abend mit guter Thermik zu rechnen. Bei einer Höhenlage der Sperrschicht von mindestens 2000 m, sind auch weite Thermikflüge möglich.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 9: Hier handelt es sich um eine dichte Sc-Decke. Diese Sc-Bewölkung entsteht eher nicht durch Ausbreitung von Cu-Wolken. Sie entsteht meist durch starke Dunstanreicherung und die nächtliche Ausstrahlung einer Dunstschicht an der Obergrenze der Peplopause. Im Winter werden solche dichten Sc-Decken nicht aufgelöst, im Sommer erst um die Mittagszeit oder gar noch später, so dass das thermische „Fenster“ nur für kurze Zeit geöffnet werden kann. Es sind höchstens kürzere Thermikflüge möglich, aber Ballonfahrer haben den Vorteil, dass sie kaum in Thermik geraten können.

Foto: Dr. Manfred Reiber



© Dr. Manfred Reiber

Abbildung 10: Hier ist ein Cumulus mit einem Thermikschlauch zu sehen. An der Peopopause wird die Vertikalbewegung gebremst, die Wolke breitet sich aus, weil sie wegen der Sperrschicht nicht weiter aufsteigen kann. Man kann also deutlich die „allgemeine“ Obergrenze der Thermik „sehen“. Thermische Flüge über diese Höhe hinaus sind nicht möglich.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 11: Eine vom Kraftwerk Lippendorf (nahe Leipzig) erzeugte künstliche Wolke steigt zunächst, wegen ihres Wärmeüberschusses nach oben und breitet sich dann in der Peilpausen-Inversion waagrecht aus. Diese Höhe ist nicht unbedingt identisch mit der Obergrenze der Sperrschicht, es ist die Höhe in der die Temperatur der Rauchfahne gleich der Temperatur der Umgebungstemperatur ist. In diesem konkreten Fall wird die waagerechte Rauchfahne aber etwa an der Untergrenze der Inversion liegen. Zu erkennen ist das an der markanten Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsänderung, wie sie für Inversionsgrenzen typisch ist. Solche Rauchfahnen lassen sehr gute Rückschlüsse über das Höhenprofil von Windrichtung und Windgeschwindigkeit zu.

Foto: Olaf Groschupf



Abbildung 12: An Inversionen treten oft starke Windscherungen auf (siehe auch Abbildung 3). Oft liegen Schichten mit starkem Wind über Schichten mit schwachem Wind. Wenn Quellwolken in diese „schnellen“ Schichten hineinwachsen bilden sich sichtbare Wolkenwellen, ähnlich wie die durch Wind erzeugten Wasserwellen an der Meeresoberfläche. Diese Wolken zeigen dann die Scherung mit der ihr inne wohnenden Turbulenz an! Häufig muss man in Höhe dieser Wolkenwellen mit Turbulenz rechnen, die zumindest für Gleitschirm- und Drachenflieger zur Gefahr werden kann.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 13: Hier sieht man Wolken mit deutlicher Turbulenzstruktur. Auch diese Wolke ist durch Windscherung entstanden. Bei geringer Luftfeuchte sieht man häufig nur einzelne Wolkenwirbel, was nicht etwa bedeutet, dass die Turbulenz gering ist. Das bedeutet eigentlich nur, dass die Feuchte relativ gering ist. Wenn die Luftfeuchte sehr gering ist, entsteht gar keine Bewölkung, aber mit Sicherheit auch Turbulenz, die man aber dann leider nicht sehen kann. Diese Art der Turbulenz bezeichnet man als CAT (clear air turbulence). Man kann sie nicht sehen, sie entsteht ja in „klarer Luft“ und sorgt dann immer für einen riskanten Überraschungseffekt, wenn man einfliegt.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 14: Hier sind sehr schön ausgeprägte Wellenwolken, die durch Windscherung an der Peilopause entstanden sind, zu sehen. Die Aufnahme stammt von einem Ballonfahrer aus den Tagen im Mai 2010, als der Luftraum wegen der Aschewolken des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull für Flächenflieger über Deutschland gesperrt war. Diese Wolken weisen auf Turbulenz hin, der Schweregrad der Turbulenz ist schwer einzuschätzen. Wir wissen aber, dass die Turbulenz umso gefährlicher ist, je besser die Wirbelgröße mit der Größe des Fluggerätes übereinstimmt. Außerdem sind textile Fluggeräte, wie Ballone, Gleitschirme und Drachen natürlich mehr gefährdet, als Flugzeuge.

Foto: Christian Schulz

Der Autor: Dr. Manfred Reiber hat Flugzeugbau und Meteorologie studiert. Er hat langjährige Erfahrungen auf allen Teilgebieten der Flugmeteorologie und Flugwettervorhersage. Er ist als Dozent, Wissenschaftsjournalist und Buchautor tätig und betreut auch Ballonmeetings, Segelflug- und Gleitschirmwettbewerbe. Sein neuestes Lehrbuch ist die „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“. Im Internet ist er unter www.DrMReiber.de zu finden.