

„Stau und Föhn-ihre Entstehung und Auswirkungen auf das Flugwetter“

von Dr. Manfred Reiber

Stau und Föhn sind, meteorologisch gesehen regionale, oft kleinräumige Windsysteme. Sie gehören zusammen wie der linke zum rechten Schuh. Ohne Stau kein Föhn, ohne Föhn kein Stau.

Jedes Gebirge, sei es auch noch so klein, stellt für Luftströmungen ein Hindernis dar. Wird dieses Hindernis überströmt, können drei charakteristische, sehr komplexe, regional begrenzte Wetterphänomene entstehen: *der Stau, der Föhn und die Leewellen*. Die Intensität der dabei entstehenden Wettererscheinungen hängt in erster Linie von der Höhe des Gebirges ab. Die physikalischen Prozesse sind, unabhängig von der Höhe des Gebirges, prinzipiell gleich, aber die Auswirkungen auf das Fliegen mit Gleitschirmen bzw. Drachen können sehr verschieden sein. Vor allem das Risiko in schwere Leeturbulenz zu geraten nimmt mit der Höhe des Gebirges zu. Im Hochgebirge ist es am größten, im Mittelgebirge ist es noch hoch, an kleineren Gebirgen und einzelnen Bergen mäßig bis gering. Gelegentlich ist die aufwärtsgerichtete Vertikalbewegung im Stau sogar auch für das Gleitschirmfliegen nutzbar. Das ist jedoch die Ausnahme und sollte nur den Ortskundigen vorbehalten bleiben.

Was versteht man unter Stau?

Auf der Luvseite eines Gebirges (das ist die dem Wind zugewandte Seite) wird die Luft gezwungen aufzusteigen. Dabei kühlt sie sich adiabatisch ab. Ist die Abkühlung so groß, dass die relative Luftfeuchte auf 100% steigt, bilden sich Wolken aus denen auch Niederschlag fallen kann. Dann herrscht schlechtes Flugwetter mit tiefen Wolkenuntergrenzen, Berge sind oft in die Wolken eingehüllt und bei Temperaturen unter 0 °C besteht außerdem Vereisungsgefahr. Die Flugsichten sind in aller Regel schlecht.

Was versteht man unter Föhn?

Auf der Leeseite eines Gebirges (das ist die dem Wind abgewandte Seite) strömt die Luft ins Tal hinab, sie erwärmt sich adiabatisch, die relative Luftfeuchte sinkt und erreicht bald Werte unter 100%. Dann hört der Niederschlag auf und die Wolken beginnen sich aufzulösen. Es herrscht deutlich besseres Wetter als auf der Luvseite des Gebirges. Besonders für Gleitschirm- und Drachenflieger werden aber starker Wind, verbunden mit starker Turbulenz oft zur großen Gefahr. Es bilden sich sog. Rotoren, die gelegentlich auch durch Wolken sichtbar werden (siehe Abbildungen 7 und 8).

Was versteht man unter Leewellen?

Unter bestimmten physikalischen Voraussetzungen strömt die Luft auf der Leeseite nicht „einfach“ nur in das Tal hinab. Sie gerät in Schwingungen. Es bilden sich Leewellen, deren Wellenberge oft durch linsenförmige (lenticularis) Wolken vom Typ Sc len (Stratocumulus lenticularis), Ac len (Alto cumulus lenticularis) oder Cc len (Circumulus lenticularis), erkennbar sind. Die dort vorhandene aufwärtsgerichtete Vertikalbewegung wird vor allem von Segelfliegern zum Höhengewinn genutzt (siehe Abbildungen 1 und 2).



Abbildung 1: Diese typische linsenförmige Wolke, nach der Wolkenklassifikation Altostratus lenticularis (Ac len), auch als „Föhnfisch“ bezeichnet, zeigt die Wellenbewegung der Luftströmung an. In den Wellenbergen herrscht aufwärtsgerichtete Vertikalbewegung, die vor allem von Segelfliegern zum Höhengewinn genutzt wird, in den Wellentälern herrscht abwärtsgerichtete Vertikalbewegung.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 2: Bänderförmig angeordnete Wolken, die eine gut ausgeprägte Leewelle im Schwarzwald anzeigen.

Foto: Dr. Manfred Reiber

Dieser Artikel soll aber ausschließlich dem Phänomen „Stau und Föhn“ gewidmet sein. Das sehr umfangreiche Thema „Lewellen“ sollte einem gesonderten Artikel vorbehalten bleiben.

Stau und Föhn, seine Entstehungsbedingungen, Charakteristika und Gefahren

Im Prinzip muss eine Stau/Föhn-Wetterlage nur eine einzige Bedingung erfüllen:

es muss eine Luftströmung vorhanden sein, die in einem Winkel von $90^\circ \pm 30^\circ$ auf ein Gebirge (ggf. auch auf einen einzelnen Berg) trifft.

Daraus ergeben sich typische Wettererscheinungen, deren Ausprägungsgrad allerdings stark von der Höhe des Gebirges, vom Wasserdampfgehalt der Luftmasse und der Stabilität der Schichtung abhängt. Die physikalischen Prozesse der Entstehung des Wetterphänomens „Stau und Föhn“ sollen am Hochgebirge erklärt werden, weil sie dort am deutlichsten ausgeprägt sind. Die Unterschiede zu kleineren Gebirgen werden im weiteren Verlauf des Artikels an einigen Wolkenbildern aufgezeigt.

1. Typischer Temperaturverlauf, Wolken, Niederschlag und Sicht bei Stau und Föhn an Hochgebirgen

Wird Luft gezwungen ein Gebirge zu überqueren steigt sie auf und kühlt sich dabei, solange die relative Feuchte unter 100 % ist, trockenadiabatisch ab. Die Temperatur fällt also um $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$ (exakt sind es $0,98^\circ\text{C}/100\text{ m}$). Wird der Taupunkt erreicht, setzt Kondensation ein und es bilden sich Wolken. In Hochgebirgen entsteht in der Regel massive Staubeiwölkung. Der über den Gebirgskamm ragende Teil dieser Bewölkung wird auch als *Föhnmauer* bezeichnet (siehe Abbildungen 5 und 6). Die Wolkenuntergrenzen im Luv sind diffus und reichen bis an die Berghänge heran. „Die Wolken liegen auf“, oder sie „hüllen die Berge ein“. Es fällt meist kleintropfiger, anhaltender Niederschlag. Bei gelegentlich eingelagerten CBs ist er großtropfig und schauerartig verstärkt. Die Flugsichten sind schlecht. In der Bewölkung betragen sie oft nur wenige Dekameter. Auch außerhalb der Wolken liegen die Sichtweiten in der Regel unter 1000 m, bei Niesel oder Schneefall sogar unter 100 m. Beim weiteren Aufstieg kühlt sich die „Wolkenluft“ nicht mehr trockenadiabatisch, sondern feuchtadiabatisch ab. Da der feuchtadiabatische Temperaturgradient kleiner ist als der trockenadiabatische, fällt die Temperatur beim weiteren Aufstieg im Mittel nur noch um etwa $0,5$ bis $0,7^\circ\text{C}/100\text{ m}$. Vom Gebirgskamm fließt die Luft auf der Leeseite des Gebirges in das Tal hinab. Dabei erwärmt sie sich, zunächst feuchtadiabatisch, bis alle Wolkentropfchen verdunstet sind, danach weiter trockenadiabatisch. Wenn im Luv Niederschlag gefallen ist oder der Luft Feuchtigkeit durch das Durchströmen und Überströmen von Wäldern und Wiesen auf der Stauseite entzogen worden ist, muss im Lee weniger Wasser verdunsten als im Luv Wasserdampf kondensiert war. Die Wolkenuntergrenze im Lee liegt deshalb höher als auf der Luvseite. Die trockenadiabatische Erwärmung beginnt schon kurz unterhalb der Kammhöhe und setzt sich bis ins Tal fort. Die Lufttemperatur erreicht deshalb auf der Leeseite einen höheren Wert. Durch die Wolkenauflösung im Lee kommt es außerdem zu einer erhöhten Sonneneinstrahlung (zumindest tagsüber) und somit zu einem weiteren

Temperaturanstieg. Im Diagramm der Abbildung 3 wird der Verlauf von Temperatur, Bewölkung, Niederschlag und Sicht an einem Beispiel beschrieben, wie er typisch für ein Hochgebirge ist (z. B. die Alpen).

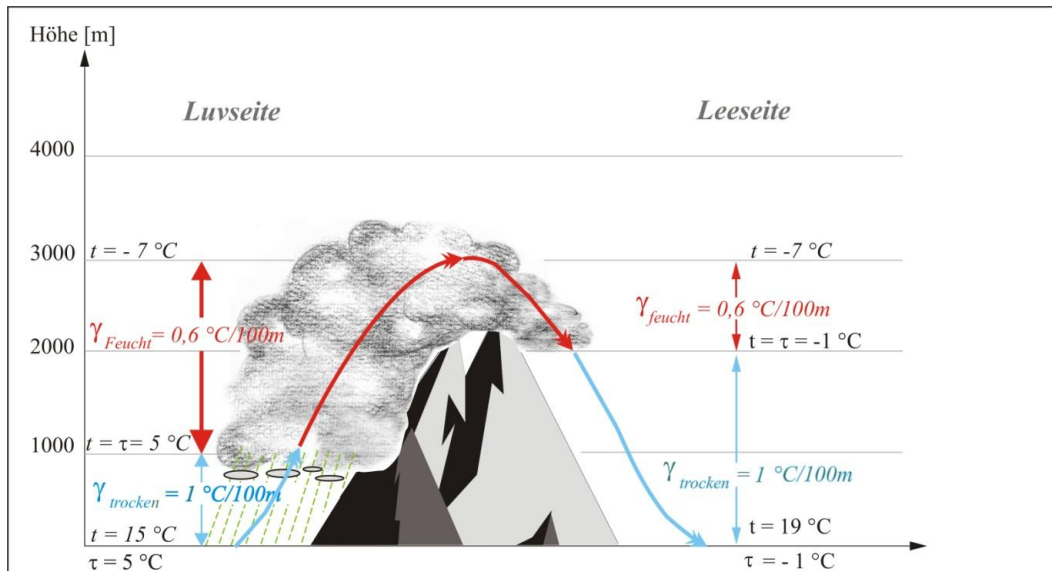


Abbildung 3: Temperaturverlauf, Wolken- und Niederschlagsbildung bei Stau und Föhn, wie er für Hochgebirge (wie z. B. die Alpen) typisch ist. Bei der Überströmung kleinerer Gebirge sind diese Wettererscheinungen meist weniger ausgeprägt (siehe Abbildungen 9, 10, 12, 13 und 14). Detailbeschreibung des dargestellten Beispiels:

Die bodennahe Luft hat auf der Luvseite eine Temperatur von 15 °C und einen Taupunkt von 5 °C. Die senkrecht auf das Gebirge gerichtete Strömung zwingt sie zum Aufsteigen. Beim zunächst trockenadiabatischen Aufstieg fällt die Temperatur bis in 1000 m Höhe auf 5 °C. Hier wird also gerade der Taupunkt erreicht; d. h. die relative Feuchte ist auf 100 % angestiegen. Wolkenbildung setzt ein. Aus der Staubewölkung fällt Niederschlag, damit ist auf der Leeseite weniger Wasser vorhanden und muss somit nicht mehr verdunstet werden. In unserem Beispiel steigt die Luft im Lee von 3000 m auf 2000 m noch feuchtadiabatisch ab (also nur noch 1000 m) und aus 2000 m Höhe bis zum Erdboden trockenadiabatisch. Das führt zu einer Erwärmung auf 19 °C in Bodennähe. Die Temperatur ist somit 4 °C höher als an ihrem Ausgangspunkt im Luv. Der Taupunkt auf der Leeseite beträgt nur noch -1 °C, der Spread ist auf 20 grd gestiegen und damit doppelt so hoch wie auf der Luvseite. Die Luft ist also nicht nur wärmer, sondern auch deutlich trockener geworden. Sehr gute Flugsichten sind die Folge. Diagramm: Dr. Manfred Reiber

2. Turbulenz und Windscherung, wie sie beim Hochgebirgsföhn typisch sind

Gefährliche Turbulenz tritt in der Staubewölkung auf, wenn sie mit CBs durchsetzt ist. Das ist relativ selten der Fall. Typisch und fast immer vorhanden ist aber die *Turbulenz im Lee*. Sie ist durch meist kräftige Fallböen und um eine horizontale Achse rotierende Luftkörper, sog. Rotoren, charakterisiert. Besonders kräftige Rotoren bilden sich, wenn unmittelbar über dem Gebirgskamm eine Temperaturinversion, meist gekoppelt mit einem Windmaximum, liegt. Zwischen Inversion und Kamm erfolgt eine Beschleunigung der Strömung, wie in einer „Düse“, und gerade das begünstigt die Entstehung von Rotoren.

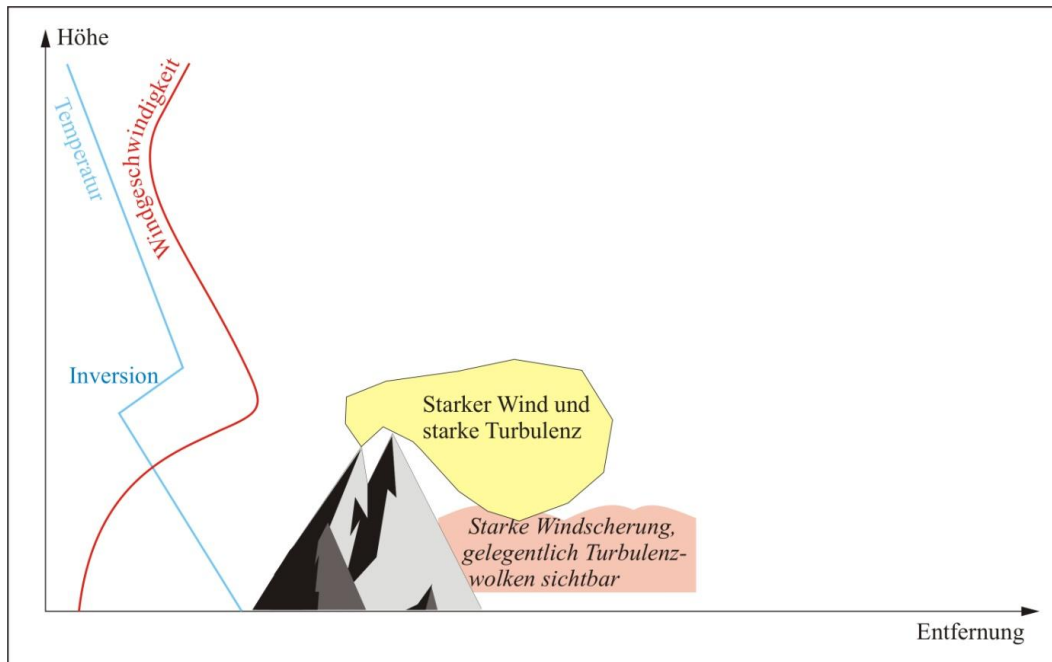


Abbildung 4: Schematische Darstellung zur Entstehung des starken Windes und starker Turbulenz bei Föhnwetterlagen. Beim Überströmen eines Gebirges kommt es in Kammhöhe und vor allem im Lee zu starken Winden und damit verbunden zu starker Turbulenz. Inversionen, knapp über Kammhöhe, verstärken diesen Effekt. Sogenannte „Föhnstürme“ sind dann die Folge. Bevor der Föhn bis zum Boden „durchbricht“ gibt es in der Höhe ein Gebiet mit starker Windscherung, das man gelegentlich auch an „Turbulenzwolken“ erkennen kann (siehe Abbildungen 7 und 8). Diagramm: Dr. Manfred Reiber

3. Labilität, wie sie vor allem beim Hochgebirgsföhn auftreten kann

Erzwungene Hebung im Hochgebirge führt nicht selten zur Labilisierung einer Luftmasse. „Gerade noch“ stabil geschichtete Luftmassen können bei einer stärkeren Hebung (eben im Hochgebirge) explosionsartig labil werden, besonders dann, wenn die Luft in den unteren Schichten feucht, in den oberen aber trocken ist. Eine solche Schichtung bezeichnet man auch als *potenziell labil*, weil sie durch Hebung aus einem stabilen, rasch in einen labilen Zustand übergehen kann. Das ist auch der Grund dafür, dass in der Staubeiwölkung, z.B. bei Südtau in den Alpen, nicht selten CBs vorkommen.

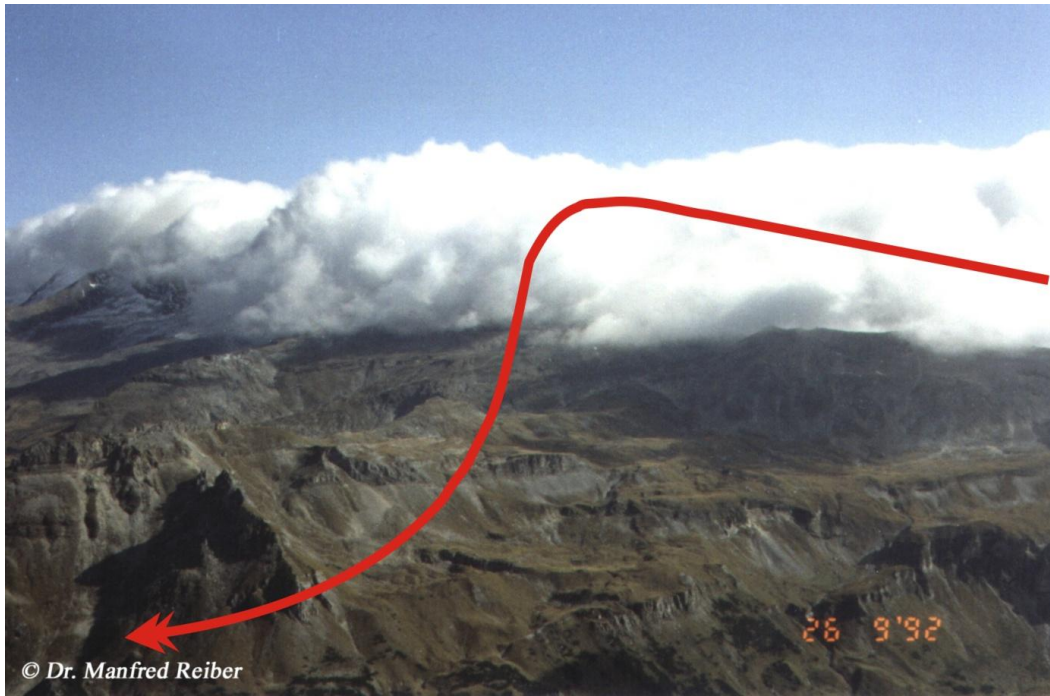


Abbildung 5: Föhnmauer in den Alpen (Nähe Hochtorn) mit schwerer Leeturbulenz. Von der Luvseite her ragt die Staubewölkung wie eine Wolkenmauer über den Kamm. Durch die abwärtsgerichtete Vertikalbewegung im Lee löst sich die Bewölkung auf. Die Leeströmung ist abwärtsgerichtet und turbulent. Im vorliegenden Beispiel herrschte eine Windgeschwindigkeit von ca. 60 Knoten (geschätzt). Es war außerordentlich turbulent, also eine potenzielle Fluggefahr, vor der man nicht genug warnen kann. In derart starker Leeturbulenz sind Flüge mit Gleitschirmen und Drachen unmöglich. Selbst Motorflugzeuge können in solch einer starken Leeturbulenz in größte Gefahr geraten.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 6: Föhnmauer am Tafelberg (Kapstadt) mit schwerer Turbulenz im Lee. Besonders interessant an diesem Foto ist der „seitliche Blick“ auf die Staubewölkung und die Föhnmauer. Man sieht deutlich, dort wo der Berg nicht mehr vorhanden ist, ist auch der Stau- und Föhneffekt nicht mehr vorhanden, obwohl die Turbulenz erst etwa 1000 m entfernt vom Berg spürbar nachließ.

Foto: Dr. Manfred Reiber

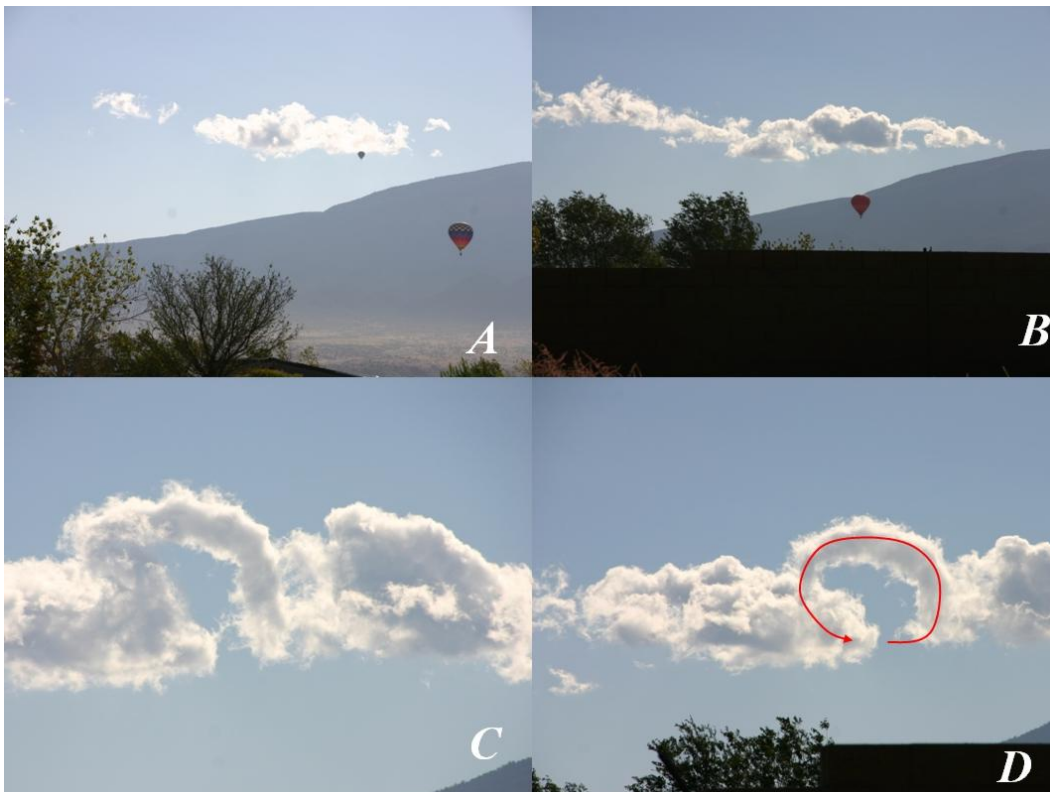


Abbildung 7: Entwicklung von Rotorwolken am Sandia-Gebirge (Albuquerque USA), während einer Ballonveranstaltung.

Im Lee des Sandia-Gebirges entwickelte sich bereits in der 2. Nachthälfte ein Rotor, der schon unmittelbar vor Sonnenaufgang durch erste Wolkenfetzen „sichtbar“ wurde. In Bodennähe war es noch nahezu windstill! Nach dem Ballonmassenstart am Morgen des 11. Oktober 2008 ereigneten sich während der Landeanfahrt einige Ballonunfälle in starker Turbulenz, wobei ein Ballon in eine Hochspannungsleitung geriet und abstürzte (ein Toter, ein Schwerverletzter). Die Bilder A), B), C), D) zeigen die Entwicklung des Rotors, der durch die Wolken sichtbar wird. Typisch für solche Wolken ist der geringe Bedeckungsgrad. Hier war weniger als 1/8 des Himmels mit Wolken bedeckt! Leider werden oft „so wenige Wolken“ von Luftsportlern (hier Ballonfahrern) übersehen“. Die eigentlich schon „sichtbare“ Gefahr wurde leider nicht erkannt! Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 8: Ein weiteres Beispiel von „Wölkchen“, die durch Scherwinde und Turbulenz erzeugt werden. Im Bereich der Scherwinde (siehe Abbildung 4) bilden sich gelegentlich Wolkenfetzen vom Typ Stratus fractus (St fra). Gibt es sie, sind sie als Anzeichen für starke Scherwinde in der Höhe dieser Wolken und für ein plötzliches Durchbrechen der Turbulenz bis zum Erdboden zu werten. Das Problem besteht eben darin, dass diese Wolken sich nur dann entwickeln können, wenn die Luftfeuchte auf 100 % ansteigt. Sie sind also leider nicht immer zu sehen, aber wenn sie vorhanden sind, ist größte Vorsicht geboten.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 9: Das ist eine durch Stau entstandene Rotorwolke in Kammhöhe. Erst in dieser Höhe ist die relative Luftfeuchte auf 100 % gestiegen. Im Bereich der Wolke und im Lee tritt starke Turbulenz auf. Die Rotorachse liegt horizontal, parallel zum Berg. Für Gleitschirme, Drachen, Ballone und alle Sportflugzeuge ist diese Art von Turbulenz extrem gefährlich. Wäre beim erzwungenen Aufsteigen der Luft im Stau die relative Luftfeuchte nicht bis auf 100 % angestiegen, gäbe es zwar keine Wolke, aber eine ähnlich starke Turbulenz.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 10: Staubwölkung und Leeturbulenz an einem einzeln stehenden Berg (Lionshaed in Kapstadt). Auch an einzeln stehenden Bergen lassen sich Stau und Föhnerscheinungen beobachten. Auf der Luvseite (rechts im Bild) entsteht durch erzwungene Hebung am Berg eine langgestreckte, schräg nach oben zeigende Wolke. Bei genauer Betrachtung sieht man wie leeseitig einzelne Wolkenelemente infolge der Leeturbulenz, aus der Wolke herausgerissen werden und so die Turbulenzstruktur anzeigen. Turbulenz ist also nicht nur hinter dem Berg, sondern auch über dem Berg zu erwarten.

Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 11: Das ist eine sog. „Bannerwolke“, die ein ungeübter Beobachter auf dem ersten Blick vielleicht mit Staubwölkung verwechseln könnte! Diese Wolken entstehen aber im Lee von Bergen (meist an einzelnen oder herausragenden Bergen). Es scheint, als wären die Wolken am Gipfel befestigt und laufen im Lee bannerartig aus. Ursache für diese Erscheinung ist wahrscheinlich der tiefere Luftdruck hinter dem Berg und starke Leewirbelbildung. Hier handelt es sich also nicht um Staubwölkung, aber auch um Gefahren anzeigende Wolken (Turbulenz).

Foto: Dr. Manfred Reiber

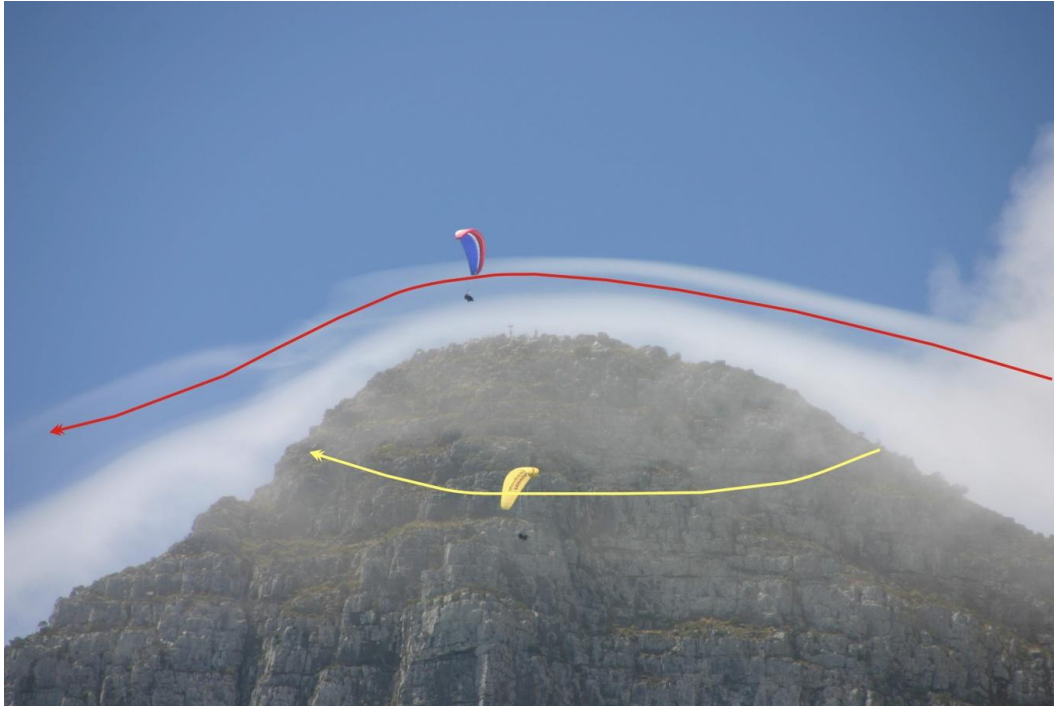


Abbildung 12: Das ist eine besondere, relativ seltene Form von Stau und Föhn. Im Stau des einzeln stehenden Berges bildet sich infolge der Hebung Staubewölkung. Die Wolken sind wenig kompakt, es handelt sich eher um starken Dunst. Im Luv regnet es nicht und dieser Wolke wird auch auf andere Art kein Wasserdampf entzogen (es ist kaum Vegetation vorhanden, die Feuchtigkeit aufnehmen könnte). Im Lee strömt die Luft abwärts, da die Luft ihre Feuchte behalten hat, steigt sie im Lee feuchtadiabatisch ab. Die Wolken können sich daher nicht auflösen. Da der Berg relativ glatt und die Windgeschwindigkeit gering ist (geschätzt 5 bis 8 m/s) entsteht kaum Turbulenz. Die aufwärtsgerichtete Vertikalbewegung über dem Berg kann von Gleitschirmfliegern zum Höhengewinn gut genutzt werden. An den Seiten wird der Berg aber „nur“ umströmt, ohne dass aufwärtsgerichtete Vertikalbewegung entsteht. Aufwinde werden hier nicht zu finden sein! Der Pilot mit dem gelben Gleitschirm sucht sein „Glück“ offensichtlich an der falschen Stelle. Foto: Dr. Manfred Reiber

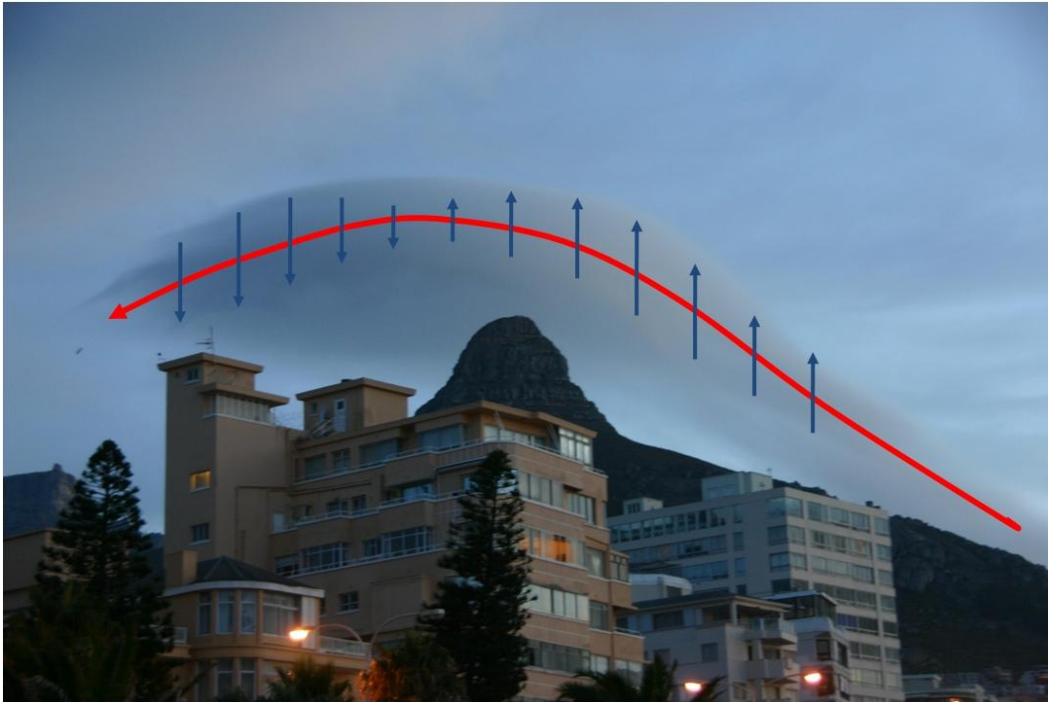


Abbildung 13: Bei geringer Windgeschwindigkeit und stabiler Schichtung wird der Berg (Lionshaed in Kapstadt) quasi laminar überströmt. Durch Stau bildet sich eine wenig dichte „Dunstwolke“, die weit ins Lee hineinreicht. Stromrichtung und Vertikalbewegung sind durch Pfeile markiert. Turbulenz ist in diesem Fall nicht zu erwarten! Foto: Dr. Manfred Reiber



Abbildung 14: Ein schönes Beispiel für einen kleinen lokalen Stau und Föhn zeigt dieses Bild. Bei einer Windgeschwindigkeit 5 m/s bildet sich am Hesselberg (689 m hoch), östlich von

Dinkelsbühl gelegen, im Luv Staubewölkung. Niederschlag tritt nicht auf, aber durch die Vegetation im Luv wird der Luft beim Überströmen etwas Feuchtigkeit entzogen. Im Lee erwärmt sich die Luft nicht nur feuchtadiabatisch, sondern zumindest teilweise auch trockenadiabatisch. Es bilden sich „Föhnwindlücken“ unmittelbar hinter dem Berg.

Foto: Christian Schulz

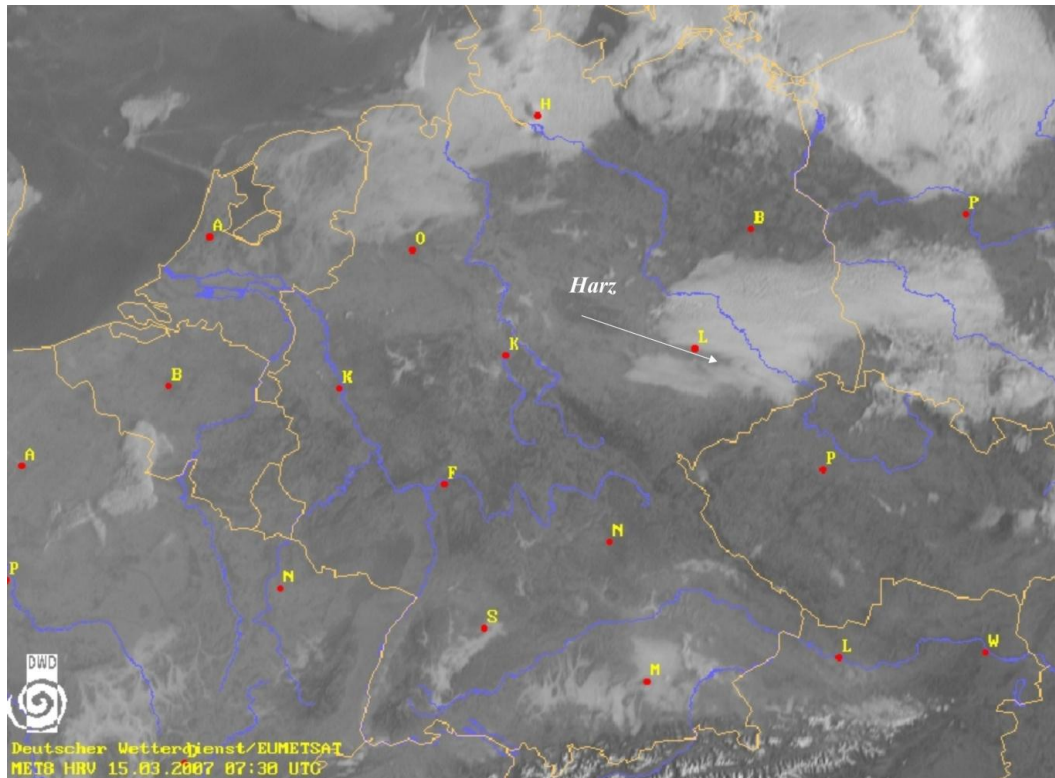


Abbildung 15: Hochauflöstes VIS-Satellitenbild vom 15.03.2007 (METEOSAT 8)

Im Lee des Harzes lösen sich bei WNW-licher Strömung tiefe Wolken bis weit in den Leipziger Raum auf (siehe Pfeil). Entsprechend der Hauptwindrichtung sind die Stau- und Föhneffekte der deutschen Mittelgebirge auch im Klima nachweisbar. Z.B. gibt es im Lee des Harzes ein niederschlagsarmes Gebiet, das bis in den Raum Halle-Leipzig reicht. Wolkenbild: DWD

Macht der Föhn krank?

Es gibt sehr viele wetterfühlige und wetterempfindliche Menschen, bei denen der Föhn starke Beschwerden hervorruft. Das Beschwerdebild reicht von depressiven Verstimmungen, Gereiztheit, Abgeschlagenheit, Schlafstörungen, Kopfschmerzen, Migräne bis hin zu Herz- und Kreislaufbeschwerden. Ja, es gibt statistische Untersuchungen, die bei Föhnwetterlagen ein Ansteigen von Verkehrs- und Betriebsunfällen und der Selbstmordrate zeigen. Andererseits wird gelegentlich auch über Föhnrausch berichtet. Das ist ein plötzlich auftretendes, sehr angenehmes Gefühl und führt zur Euphorie und Überschätzung der eigenen

Leistungsfähigkeit. Diese Tatsache ist für Luftsportler vielleicht kritischer zu bewerten, als physische Beschwerden, wie sie von wetterfühligen Menschen beklagt werden.

Krankmachende Föhnerscheinungen treten in Deutschland nur beim Alpenföhn auf.

Die Föhnkrankheit plagt aber offensichtlich nur Ortsansässige. Urlauber, selbst wetterempfindliche, werden erst föhnkrank, wenn sie mindestens ein bis zwei Jahre in einem Föhngebiet leben. Die Wirkung des Föhns kann nicht durch Anpassung ausgeglichen werden, im Gegenteil, die Krankheitssymptome verstärken sich, je länger man in einem Föhngebiet lebt.

In den Alpen ist die Föhnwirkung in den Zentral- und Ostalpen am stärksten. Je größer die Entfernung nach Norden wird, umso schwächer und seltener treten Föhnwirkungen auf. Die äußerste nördliche Begrenzung des Alpenföhns ist etwa die Donau. Am häufigsten tritt der Föhn im Frühjahr (März, April) und im Herbst (Oktober, November) auf.

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.