

„Wolkenbilder helfen Luftströmungen zu erkennen und richtig zu interpretieren“

von Dr. Manfred Reiber

Wolken sind Spiegelbilder thermischer, dynamischer und Kombinationen von thermischen und dynamischen Prozessen. Sind Wolken vorhanden, dann werden sie durch die vorhandenen thermischen und/oder dynamischen Prozesse in ihrer Gestalt so verformt, dass man typische Strömungen oft direkt sehen kann. Sind keine Wolken vorhanden, dann laufen die physikalischen Prozesse in ähnlicher Weise ab, man kann aber die typischen Strömungen in „blauer Luft“ nicht sehen. Eine professionelle Wolkenbeobachtung kann uns also helfen Strömungsvorgänge, ggf. in Kombination mit thermischen Prozessen, in der realen Atmosphäre zu sehen und zu studieren. Mit anderen Worten gesagt, Wolken können uns z. B. zeigen wie Hindernisse überströmt werden, wo Turbulenzgebiete vorhanden sind und wie thermische und dynamische Prozesse miteinander korrespondieren. Diese Tatsachen möchte ich an einigen Wolkenbildern zeigen und erläutern.

1. Überströmung von Bergen

Wenn z.B. Berge oder Gebirge überströmt werden, wird das Windfeld deformiert. Sind Wolken vorhanden, dann kann man diese Strömungsdeformationen anhand typischer Wolkenformen sehen und man erhält so eine Vorstellung von der „Strömungsrealität“, wie man sie kaum in einem Windkanal nachbilden kann! Für alle Flieger, die (vorwiegend) im „Low Level“ fliegen, wie Gleitschirmflieger, Drachenflieger, aber auch für Ballonfahrer und Segelflieger ist das nicht nur interessant, sondern sogar bedeutsam für die geschickte Nutzung dieser Strömungsbesonderheiten und ggf. auch für ein kluges Risikomanagement. Strömungsdeformationen an Bergen werden im Wesentlichen von drei Parametern bestimmt:

- der Stabilität der Schichtung
- der Windgeschwindigkeit
- der Form des Hindernisses

Das Strömungsverhalten in Abhängigkeit von der Form des Hindernisses soll in diesem Beitrag nicht explizit untersucht werden, auf typische Merkmale wird aber auch bei entsprechenden Abbildungen hingewiesen. Unter Berücksichtigung der Stabilität der Schichtung und der Windgeschwindigkeit kann man in der Praxis immer wieder folgende vier Varianten von Strömungsdeformationen beobachten:

1.1 Überströmung eines Berges bei stabiler Schichtung und schwachem Wind

Bei stabiler Schichtung und schwachem Wind (weniger als 10 Knoten) wird ein Berg quasi laminar überströmt. Im Luv existiert dann eine ruhige, nicht allzu starke vertikal aufwärtsgerichtete Windkomponente, im Lee ist die Strömung abwärtsgerichtet, aber kaum turbulent. Gleitschirm- und Drachenflieger können solche Strömungen ohne Risiko nutzen. Auch Ballone können bei dieser Strömungskonstellation Berge in geringer Höhe gefahrlos überqueren. Auf der Abbildung 1 ist dieser Sachverhalt schematisch dargestellt.



Abbildung 1: Schematische Darstellung der Überströmung eines Berges bei stabiler Schichtung und schwachem Wind. Ruhiges, dynamisches Steigen im Luv, über dem Gipfel und im Lee kaum Turbulenz.

Betrachten wir einige Beispiele dazu.



Abbildung 2: An der Wolkenformation erkennt man deutlich die aufwärtsgerichtete, ruhige Strömung im Luv und die abwärts gerichtete im Lee. Oft ist der Umkehrpunkt der Vertikalbewegung sogar etwas leewärts verschoben, so dass das Steigen bis einige hundert Meter auf die Leeseite hinüber reicht. Gefährliche Turbulenz ist nicht zu erwarten.

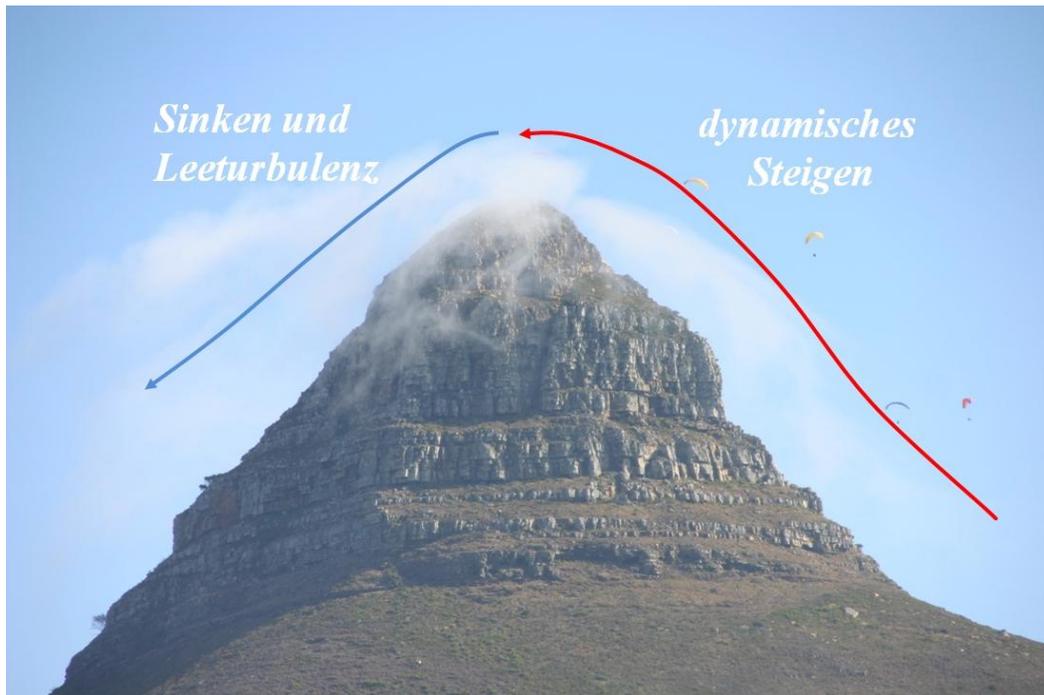


Abbildung 3: Im Luv nutzen mehrere Gleitschirmflieger das ruhige, dynamische Steigen zum Höhengewinn. Im Lee herrscht abwärts gerichtete Strömung, dort ist offensichtlich auch mit leichter Turbulenz zu rechnen, aber die Leeseite wird ja ohnehin von den Fliegern gemieden.

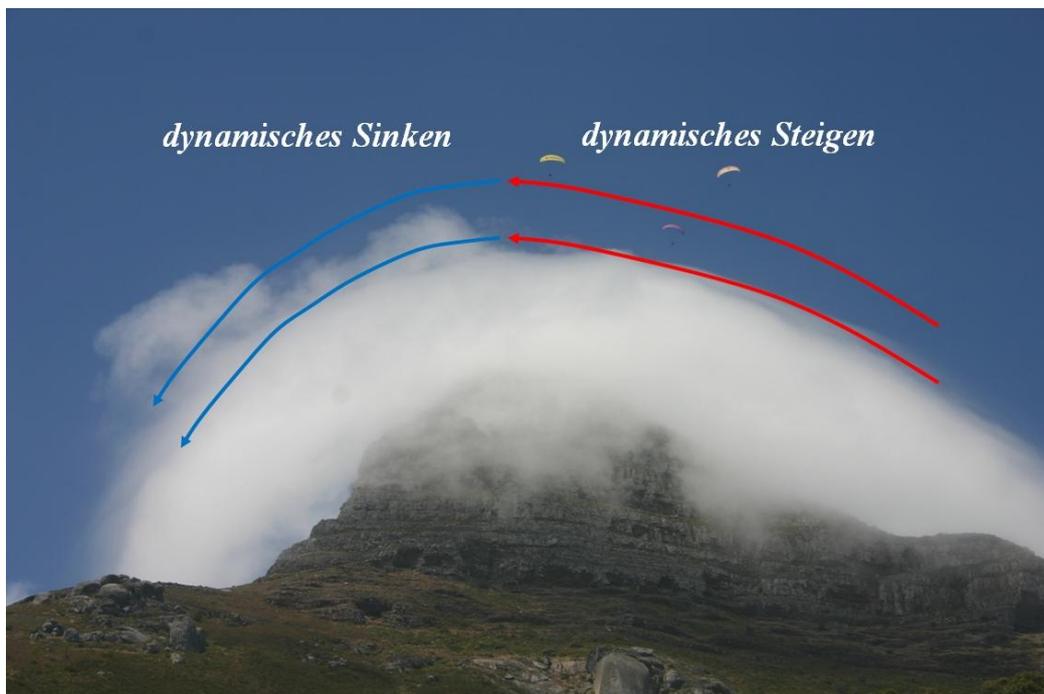


Abbildung 4: Auch hier nutzen Gleitschirmflieger die ruhige aufwärtsgerichtete Strömung im Luv. Leeseitig ist auch hier leichte Turbulenz zu erwarten, die unmittelbar nach Überschreitung des Gipfels einsetzt.

1.2 Überströmung eines Berges bei stabiler Schichtung und starkem Wind

Bei stabiler Schichtung und starkem Wind (über 10 Knoten) wird die Strömung über dem Berg umso turbulenter, je höher die Windgeschwindigkeit ist. Schon im Luv kommt es zu Verwirbelungen, die aber vor allem im Lee in aller Regel stärker ausgeprägt sind. Das Fliegen mit Drachen und Gleitschirmen wird riskant, Ballone sollten die Berge in größerer Höhe überfahren, um nicht in Turbulenzen zu geraten. Die Abbildung 5 zeigt die Sachverhalte in schematischer Darstellung.



Abbildung 5: Schematische Darstellung der Überströmung eines Berges bei stabiler Schichtung und starkem Wind. Es ist mit deutlich stärkerer Turbulenz als bei schwachem Wind zu rechnen. Sie ist schon im Luv und über dem Berg anzutreffen und erreicht ihr Maximum im Lee.

Das nächste Wolkenbild soll uns das verdeutlichen.



Abbildung 6: Die Schichtung ist stabil, die Wolken können nicht vertikal aufsteigen. Eine Inversion liegt wie ein Deckel über dem Berg und die Luft wird zwischen der Inversion und dem Gipfel hindurchgepresst und dabei wie in einer Düse beschleunigt. Das führt zu hoher Windgeschwindigkeit und mindestens mäßiger, vielleicht sogar starker Turbulenz, mit dem Maximum im Lee. Im Beispiel sieht man im Lee einen Wolkenvorhang, der einem Wasserfall ähnlich sieht und auf starke Turbulenz hinweist. Man bezeichnet derartige Wolkenvorhänge als „Wolkenwasserfälle“ und man kann sich gut vorstellen was einen Ballonfahrer oder Gleitschirmflieger in so einem „Wasserfall“ erwartet.

1.3 Überströmung eines Berges bei labiler Schichtung und schwachem Wind

Wenn Berge bei labiler Schichtung und schwachem Wind überströmt werden, bildet sich über dem Berg eine turbulente Schicht, die leewärts relativ steil ansteigt. Ihre Vertikalerstreckung ist meist gering, die Turbulenz leicht bis mäßig. Man kann mit einem ruppigen thermischen Aufstieg rechnen, der jedoch wegen der Turbulenzen von Gleitschirmfliegern, Drachenfliegern und auch von Ballonfahrern eher gemieden werden sollte.

Die Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung dieses Sachverhaltes und die Abbildungen 8 und 9 sind zwei Beispiele dafür.



Abbildung 7: Bei labiler Schichtung und schwachem Wind bildet sich über dem Berg eine turbulente Luftschicht mit leichter bis mäßiger Turbulenz, die leewärts relativ steil ansteigt. Ihre Vertikalerstreckung bleibt meist gering.



Abbildung 8: Deutlich erkennt man den steilen Anstieg der turbulenten Luftschicht, der im konkreten Fall gar nicht so weit ins Lee reicht. Im gegebenen Fall muss man mit leichter bis mäßiger Turbulenz rechnen. Die Nutzung der aufwärtsgerichteten Vertikalbewegung durch Gleitschirm- bzw. Drachenflieger ist riskant und sollte gemieden werden.



Abbildung 9: Auch in diesem Beispiel sieht man den steilen Anstieg der turbulenten Luftschicht, die hier deutlich weiter ins Lee reicht. Für Gleitschirm- und Drachenflieger wäre es viel zu riskant die aufwärtsgerichteten Strömungen nutzen zu wollen. Ballonfahrer sollten bei solchem Wetter den Berg in größerer Höhe überfahren.

1.4 Überströmung eines Berges bei labiler Schichtung und starkem Wind

Wenn die Schichtung labil ist und der Wind stark (über 10 Knoten), dann wird die turbulente Luftschicht über dem Berg vertikal mächtiger, reicht deutlich weiter ins Lee, steigt aber nicht so steil an, wie bei schwachem Wind. Die Turbulenz ist meist mäßig bis stark, stellt also ein erhebliches Risiko für Gleitschirme, Drachen und Ballone dar. Nach einer Faustformel hat man die turbulente Schicht bei starkem Wind erst überwunden, wenn man eine Höhe von $H=10 \times \text{Wind speed in km/h}$ erreicht hat. Bei 50 km/h Windgeschwindigkeit wären das also etwa 500 m!



Abbildung 10: Schematische Darstellung der Strömung über einen Berg bei labiler Schichtung und starkem Wind. Die turbulente Schicht ist vertikal mächtig, die Turbulenz ist mäßig bis stark. Die turbulente Schicht reicht meist weit ins Lee hinaus, steigt aber deutlich geringer an als bei schwachem Wind. Oft ist in diesem Fall auf der Leeseite auch unterhalb des Gipfels mit mäßiger bis starker Turbulenz zu rechnen.



Abbildung 11: Deutlich wird an den Wolkenstrukturen die Turbulenz sichtbar, die hier mäßige bis starke Intensität erreicht. Der Anstieg der turbulenten Schicht ist relativ gering, reicht aber weit ins Lee hinaus. Leeturbulenz ist auch unterhalb des Gipfels zu erwarten.



Abbildung 12: Die turbulente Schicht hat einen geringen Anstieg ins Lee hinaus. Im gegebenen Fall bildet sich im Lee ein Rotor, der unterhalb des Gipfels am stärksten ausgeprägt ist.

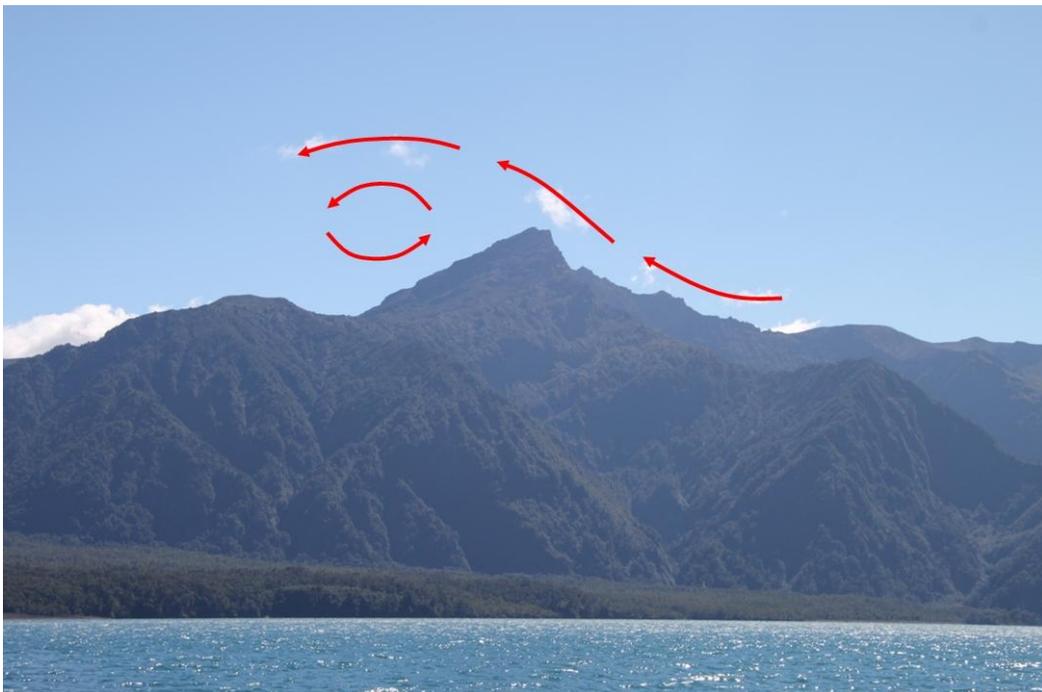


Abbildung 13: Bei sehr trockener Luft bilden sich entweder überhaupt keine Wolken, oder nur kleine Wolkenfetzen, wie in diesem Fall. Hier „verraten“ uns die Wolken gerade noch etwas über die Strömung, wäre die Luft aber noch einen „Tick“ trockener, könnten wir gar nichts sehen. Die turbulente Strömung wäre aber selbstverständlich in gleicher Weise vorhanden! Mit einiger Erfahrung und solidem Wissen kann ein Flieger derartige Strömungskonstellationen antizipieren.



Föhnmauer am Tafelberg mit schwerer Leeturbulenz

Abbildung 14: Bei besonders starkem Wind bilden sich auf der Luvseite von Bergen bzw. Gebirgen „Wolkenwände“ aus, die auch als „Föhnmauern“ bezeichnet werden. Im Lee „stürzt“ die Luft hangabwärts ab. Infolge der adiabatischen Erwärmung lösen sich die Wolken hier auf. Vor allem auf der Leeseite herrscht dann schwere Turbulenz, die für alle Kategorien von Luftfahrzeugen eine extreme Gefahr darstellt.

2. Thermisch bedingte Störungen bei der Überströmung von Bergen

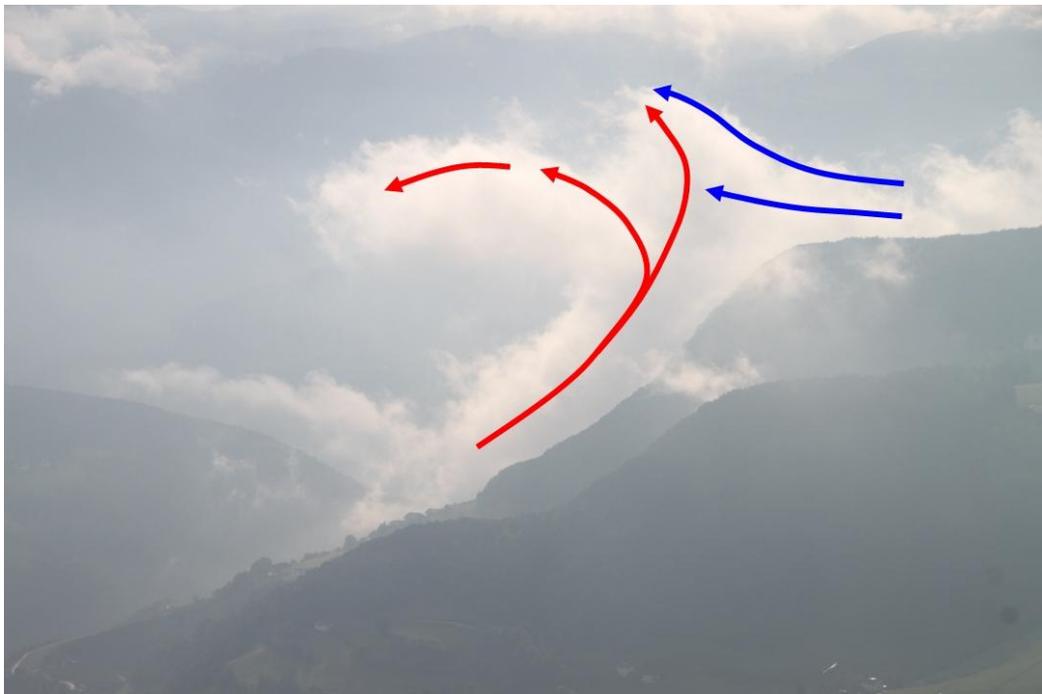


Abbildung 15: Hänge mit südlicher Exposition haben tagsüber einen höheren Strahlungsgenuss, erwärmen sich schneller und bilden frühzeitig schon stärkere Thermik aus. Wie in der obigen Abbildung gezeigt kann sich dieser Vorteil für Thermikflieger in einen

risikoreichen Nachteil verwandeln. Bei nördlichen Winden wird die Thermik zumindest abgelenkt und kann sogar, wie im obigen Bild gezeigt, in Korrespondenz mit der existierenden Strömung zur Gefahr werden. Ab Oberkante Berg bzw. Gebirge „verwandelt“ sich die Thermik in Kombination mit dem Wind in eine turbulente Strömung, ggf. bilden sich sogar Rotoren. Man muss sich immer klar machen, dass diese Prozesse nur dann so schön sichtbar sind, wenn Wolken (wie im Bild) vorhanden sind. Ist die Luft trocken, dann existiert das Phänomen in gleicher Weise und kann schnell zur Gefahr werden. Bei Flügen im Low Level lohnt es deshalb immer, sich eine Vorstellung über die momentanen thermisch-dynamischen Verhältnisse zu erarbeiten. Bei einiger Erfahrung und Übung sollte das auch gelingen.



Abbildung 16: Dieses Beispiel zeigt wie eine thermisch ausgelöste Vertikalbewegung durch die vorhandene Strömung seitlich versetzt wird. Wäre die Luft trocken, dann könnte man die seitliche Versetzung nicht sehen, aber mit einiger Erfahrung „vorausahnen“, wenn man die Strömung und die Thermik in ihren Zusammenwirken zu verstehen versucht.

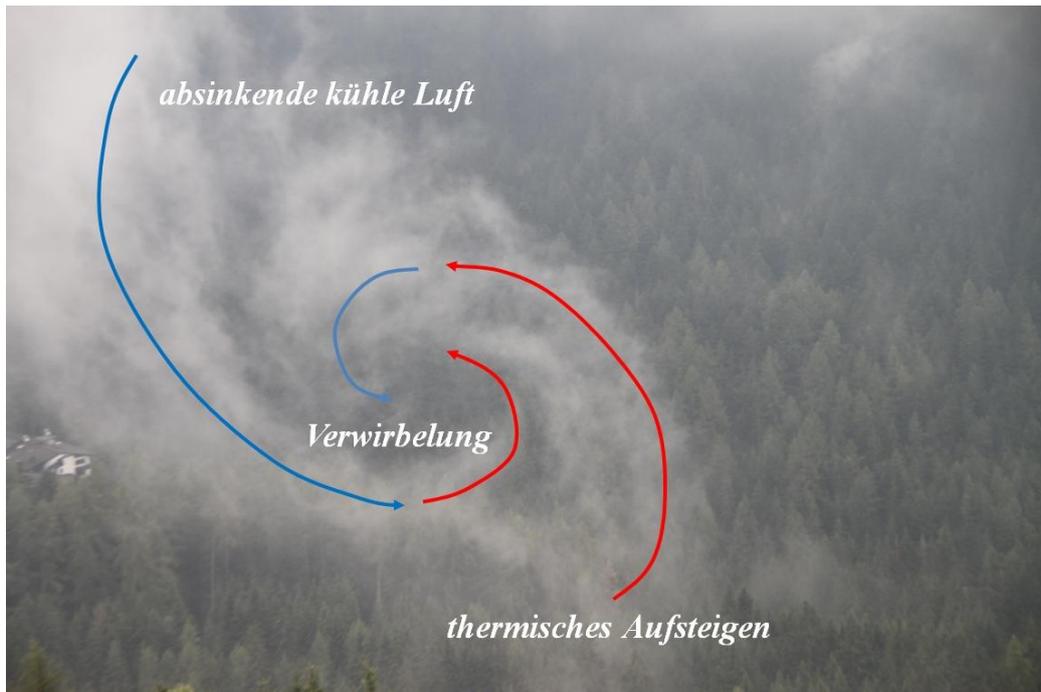


Abbildung 17: Dieses Bild zeigt uns die Entstehung eines Wirbels durch die gegenseitige Beeinflussung von am Hang abfließender kühler Luft und thermisch bedingter aufsteigender warmer Luft. Vor allem bei Thermikbeginn sind solche „Überraschungen“ für einen Thermikflieger im Low Level immer wieder möglich. Wenn man die Zusammenhänge kennt, lassen sich Erscheinungen zumindest „vorausahnen“, bzw. sogar vorhersehen.

3. Rotorbildung an langgestreckten Hindernissen bei starkem Wind

Wenn die Hindernisse langgestreckt sind werden sie praktisch „nur“ überströmt und nur „weit draußen“ an den Rändern umströmt. Dabei entstehen im Bereich des Kammes häufig Rotoren mit meist starker Turbulenz (siehe Abbildung 18)

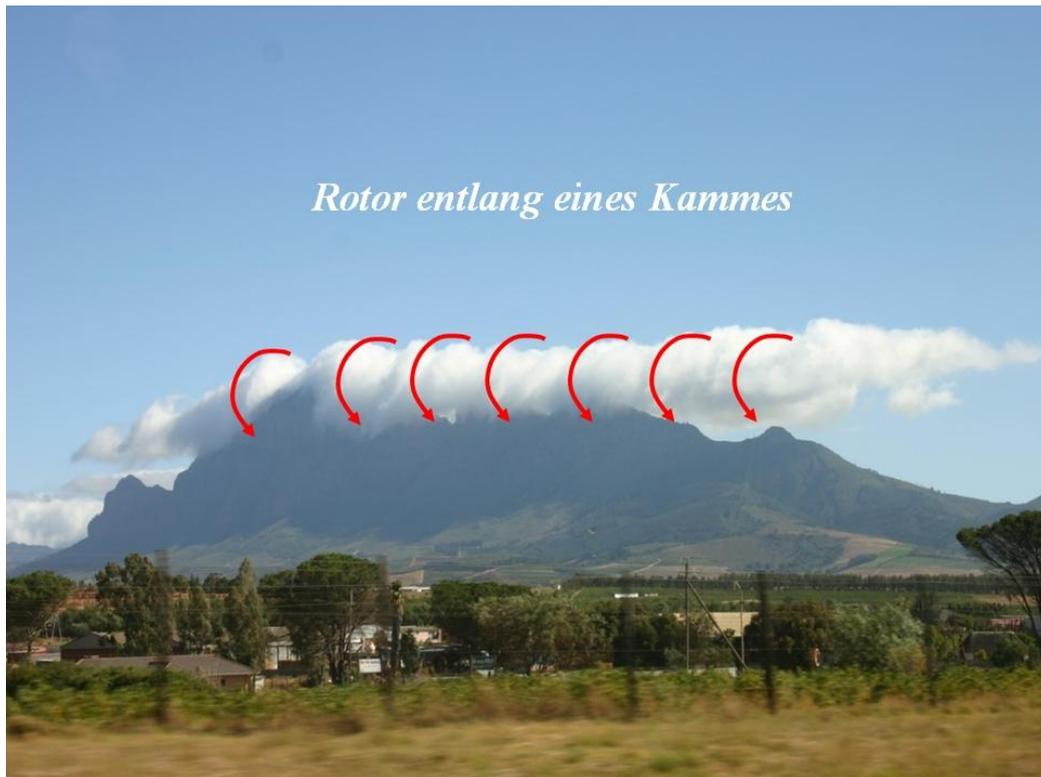


Abbildung 18: Rotorbildung im Bereich des Kammes eines langgestreckten Hindernisses mit starker Turbulenz. Man sieht, dass die Turbulenzzonen am rechten und linken Rand den Gebirgszug in seiner Längserstreckung überragen. Beim „knappen“ seitlichen Vorbeiflug am Gebirgszug kann man immer noch vom Rotor „erwischt“ werden.

4. Windscherungen und Windzunahme an der Obergrenze von Inversionen

Inversionen sind Luftschichten, in denen die Temperatur mit zunehmender Höhe zunimmt. Das macht sie zu sog. Sperrschichten, die einen vertikalen Luftaustausch behindern oder sogar verhindern. Typische, häufig auftretende Inversionen gibt es in drei verschiedenen Höhen:

- ➔ in Bodennähe, hier werden sie als Bodeninversionen bezeichnet
- ➔ in etwa 1500 m bis 2500 m Höhe, hier werden sie als Peplopause bezeichnet
- ➔ in etwa 10 000 m Höhe, an der Obergrenze der Troposphäre, hier wird die Inversion als Tropopause bezeichnet

Charakteristisch für Inversionen sind Starkwindfelder von geringer Vertikalerstreckung, aber einer großen horizontalen Längenerstreckung. Kommen die Starkwindfelder an den tiefer gelegenen Inversionen vor bezeichnet man sie als „Low Level Jet“, kommen sie in Tropopausenhöhe vor, nennt man sie „Jetstream“. Die geringe Vertikalerstreckung dieser Starkwindfelder führt zu großen Geschwindigkeitsunterschieden auf kurzer vertikaler Distanz, d.h.es kommt zu markanten Windscherungen. In diesen Scherungsgebieten herrscht mäßige, oft sogar starke Turbulenz. An bestimmten Wolkenformen kann man diese

Scherungsturbulenz immer wieder beobachten. Ein Einflug ist für Sportflugzeuge, Gleitschirme, Drachen und Ballone immer riskant.



Abbildung 19: Deutlich sichtbar wird hier Scherungsturbulenz in Peplopausenhöhe. Der Schweregrad der Turbulenz ist nicht so ohne weiteres erkennbar, aber Vorsicht ist bei solchen Bildern auf jeden Fall geboten.



Abbildung 20: Immer wieder kann man vor allem in Peplopausenhöhe Wellen beobachten, deren Entstehung man ähnlich interpretieren kann wie die Entstehung von Windwellen auf der Meeresoberfläche. Mit Scherungsturbulenz ist an diesen Wellen in jedem Fall zu rechnen.



Abbildung 21: In einer sehr flachen Bodeninversion hat sich Hochnebel gebildet. Die Windkraftanlagen überragen die Inversionsobergrenze und liegen so im Bereich der höheren Windgeschwindigkeit, das ist sicher gut für die Produktion von Elektroenergie. Wächst die Inversion jedoch über die Windkraftanlagen hinaus, liegen die Windräder innerhalb der Inversion, also im Bereich geringer Windgeschwindigkeit oder sogar Windstille. Dann bleiben die Windräder stehen.



Abbildung 22: Auch wenn Sportflieger und Ballonfahrer wohl kaum die Tropopause in ca. 10 000 m Höhe erreichen werden, so ist es doch auch für sie interessant zu wissen, dass an der Tropopause Jetstreams mit häufig starken Windscherungen vorkommen. Gelegentlich sieht man auch im Ci-Niveau Wolken, die diese Turbulenzen anzeigen. Oft ist die Luft in

diesen Höhen aber zu trocken und es können sich keine Wolken bilden. Die Turbulenz ist aber trotzdem vorhanden, man bezeichnet sie deshalb auch als „Clear Air Turbulenz (CAT)“, weil sie nicht zu sehen ist. Flugzeuge, die in diesen Höhen fliegen werden dann in der Regel von dieser Turbulenz überrascht, weil man sie erst spürt, wenn man bereits eingeflogen ist.

Abbildungen 1 bis 20 und 22 von Dr. Manfred Reiber
Abbildung 21 von Manfred Materne/Wolfgang Böhme

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. Brandneu ist seine Power-Point-Präsentation „*Professionelle Wolkenbeobachtung und ihr Nutzen für Ballonfahrer, Gleitschirm-, Segel- und Motorflieger*“. Im Internet ist er unter www.DrMReiber.de zu finden.