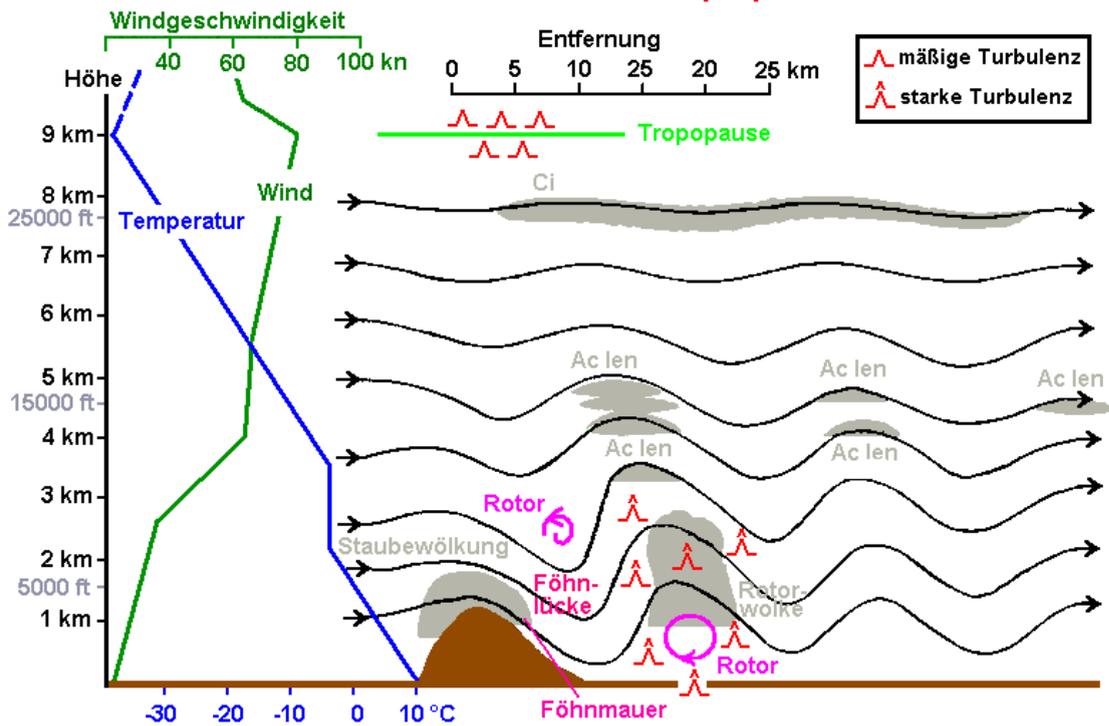


# Wolkenschnüffler



## Aerologie

### Phänomene beim Auftreten von Leewellen in der Troposphäre



## Leewellen

Michael F. H. Krutina

Stand: Februar 2006

D:\Webseite\Deckblätter\Leewellen Webseite.wpg



# Inhaltsverzeichnis

	Seitenzahl
1. Allgemeines	1
2. Allgemeine Struktur der Leewellenströmung	1
2.1 Lee-Phänomene bei Wellenbildung	1
2.2 Wellenarten	5
2.3 Resultate eines Messfluges	7
3. Relevante Faktoren der Leewellenbildung	9
3.1 Eigenschaften der anströmenden Luft	10
3.1.1 Vertikales Windprofil	10
3.1.2 Statische Stabilität	11
3.2 Einfluss der Topographie	13
4. Wellenlänge und -amplitude	15
4.1 Natürliche Wellenlänge $\lambda_n$	15
4.2 Erzwungene Wellenlänge $\lambda_B$	16
4.3 Amplitude der Leewelle	18
4.3.1 Topographische Faktoren	18
4.3.1.1 Abstand zwischen zwei Bergrücken	18
4.3.1.2 Höhe des Bergrückens	19
4.3.1.3 Querschnitt des Bergrückens	19
4.3.2 Wind- und Temperaturprofil der Luft	20
5. Rotoren	21
6. Orographische Druckänderungen	22
7. Lenticulariswolken	23
7.1 Sc len	24
7.2 Ac len	25
7.3 Cc len	28
Literaturverzeichnis	29



## 1. Allgemeines

Durch die rasante Entwicklung der Luftfahrt vor und während des 1. Weltkrieges und das nach der Völkerschlacht von den Alliierten angeordnete jahrelange Verbot des Motorfluges in Deutschland mit der rasch folgenden Renaissance des Segelfluges wuchs im zweiten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts das meteorologische Interesse an den Strömungsfeldern der Luft in der Umgebung von Höhenzügen zügig an. Eine Vielzahl von Veröffentlichungen - z.B. die der Professoren Walter Georgii und Harald Koschmieder - befassten sich mit dieser Materie und wiesen darauf hin, dass Aufwindregionen auf der Lee-seite von Hügeln oder Gebirgen genauso häufig auftreten wie auf der Luvseite. Nur wenig später im Jahre 1933 nutzten die Segelflieger Paul Steinig und Wolf Hirth die Steiggebiete auf der windabgewandten Seite des Riesengebirges, um an Höhe zu gewinnen und bewunderten die sich dort bildende 'Moazagotl'-Erscheinung, die linsen- oder mandelförmige Wellenwolke. Bereits 1937 erflogen dann Joachim Kuettnner (Meteorologe), und weitere Segelfluggpioniere in Leewellen mehrfach Höhen von 8 km. 1941 wurde in den Hohen Tauern (Alpen) eine Höhe von 11460 m erreicht und 1961 stieg ein Segelflugzeug auf der Leeseite der Sierra Nevada (Kalifornien, USA) bis in eine Höhe von 14 Kilometern auf.

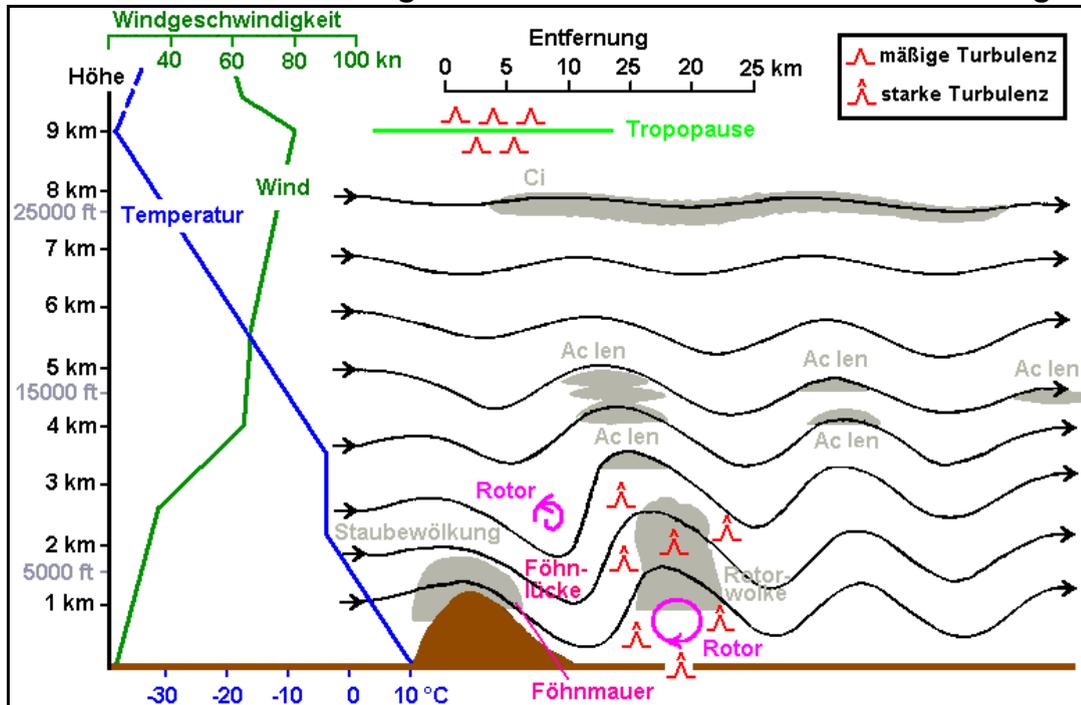
## 2. Allgemeine Struktur der Leewellenströmung

### 2.1 Lee-Phänomene bei Wellenbildung

Auf der Leeseite von einzelnen Bergen oder Gebirgszügen lassen sich häufig weltweit sogenannte Schwerewellen beobachten, die unter dem Einfluss der Schwerkraft an einer troposphärischen Übergangszone, einer Inversion oder Isothermie, entstehen. Das Gebirge bildet dabei die Störungsquelle der Strömung und aufgrund der Gravitationskraft kommt es dann bei stabiler Schichtung der Atmosphäre zu leeseitigen Schwingungen, die physikalisch als stehende Welle - alle schwingenden Teilchen durchlaufen gleichzeitig die Ruhelage und erreichen zeitgleich ihren größten Ausschlag - zu betrachten sind und von Segelfliegern als Leewelle bezeichnet und zum Höhengewinn genutzt werden.

Die Abbildung 1 zeigt die schematisierten Strömungsverhältnisse im Bereich eines Höhenzuges und enthält die prägnanten meteorologischen Erscheinungen, die weltweit bei typischen Stau- und Föhn-Wetterlagen beobachtet werden können.

**Schematisierten Strömungsverhältnisse im Bereich eines Höhenzuges (Abb. 1)**



**Föhn-lücke oder -fenster** : Wolkenfreier Raum im Bereich des ersten Wellentales auf der Leeseite, der durch die starke Absinkbewegung der Luft entsteht.

**Föhnmauer** : Staubewölkung, die wie eine Kappe den Berggipfel auf der Leeseite bedeckt.

**Lenticulariswolke** : Linsen- oder mandelförmige Wolken, die quasi ortsfest in den Aufwindgebieten der Wellenberge zu finden sind.

**Rotor** : Quasistationärer Wirbel mit horizontaler Achse, häufig am kräftigsten unter dem ersten Wellenberg ausgeprägt.

**Rotorwolke** : Schlanke, zigarrenförmige, cumulusähnliche, nahezu stationäre Wolke im Bereich des ersten leeseitigen Wellenberges mit einer Basis etwa in Kammhöhe des Hindernisses.

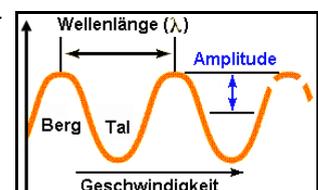
**Schwachwindige Zone** : Region, in dem ein schwacher, der Höhenströmung entgegen gesetzter Bodenwind vorhanden ist oder Windstille herrscht.

**Starkwindfeld** : Bereich mit einem starken, hangabwärtsgerichteten Bodenwind, der oft Sturmstärke erreicht und höhere Geschwindigkeiten als im Gipfel des Gebirges oder auf seiner Luvseite zeigt. Manchmal treten auch Orkanböen auf.



: ICAO-Symbol für Gebiet starke bzw. mäßige Turbulenz.

**Leewelle** : Eine sich oft auf der Leeseite eines Bergkammes ausbreitende Schwingung, deren Wellenlänge in der Regel 5 bis 25 km und im Mittel 10 km beträgt. In der Mehrzahl der Beobachtungsfälle lassen sich leeseitig 2 bis 3, manchmal sogar 5 bis 7 Wellenberge feststellen.



## Wetterphänomene an Gebirgen (Abb. 2, 3, 4, 5)

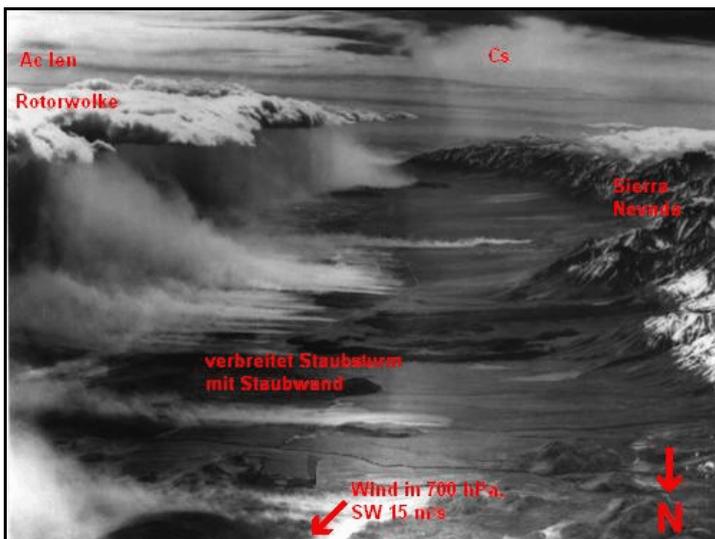


Föhnmauer im Lee des norwegischen Küstengebirges

[Quelle:5]



Alto cumulus lenticularis im März 1978, östlich des Pfälzer Waldes über dem Rheintal, in der Nähe von Neustadt/W (s. auch Abb. 21)



[Quelle: 7]

Rotorwolke im Lee der Sierra Nevada am 05.03.1950, vom Flugzeug in einer Höhe von 9800 m aufgenommen. In 700 hPa herrschte ein Südwestwind mit  $15 \text{ m s}^{-1}$ . Der starke Bodenwind als leeseitiger Fallwind der Sierra Nevada wird sichtbar durch die Staubfahnen, die fast bis zur Rotorwolke empor reichen. Links oben ist die Rotorwolke und darüber Alto cumulus lenticularis (Ac len) zu erkennen.



Föhnluke über dem Rheintal bei Neustadt/W, 1979; Blick auf das Rheintal von der Kalmit (Berg im Pfälzer Wald bei Neustadt/W, s. Abb 21) auf die Nebelobergrenze im Rheintal. Die Abwärtsbewegung der Luft wird an der Abrisskante des Alto cumulus stratiformis translucidus (Ac str len) über dem Rheintal sichtbar.

Die Wellenlänge von Leewellen beträgt in der Regel 5 bis 25 km, liegt in der Mehrzahl der Beobachtungsfälle bei 10 km und es lassen sich leeseitig 2 bis 3, manchmal sogar 5 bis 7 Wellenberge registrieren.

Beobachtungen zeigten, dass die Amplitude der Welle im allgemeinen mit zunehmender Entfernung vom Erdboden anwächst, ein Maximum in der mittleren Troposphäre erreicht, dann wieder abnimmt und unterhalb der Tropopause gegen null geht. In Ausnahmefällen jedoch können bei kräftigen Winden besonders durch Hochgebirge Leewellen ausgelöst werden, deren Amplitude so groß ist, dass nicht nur die Troposphäre, sondern auch noch die Stratosphäre von diesen dynamischen Vorgängen erfasst wird.

Die Vertikalbewegungen der Luft in Leewellenregionen können markante Werte erreichen. Leewärts kleiner Berge wurden Steigwerte von 1 bis 2 m s<sup>-1</sup> bis in große Höhen festgestellt und in Hochgebirgen sind Vertikalgeschwindigkeiten von 5 bis 10 m s<sup>-1</sup> nicht ungewöhnlich. Ihre Maxima liegen etwa bei 25, aber es sind auch schon 40 m s<sup>-1</sup> beobachtet worden.

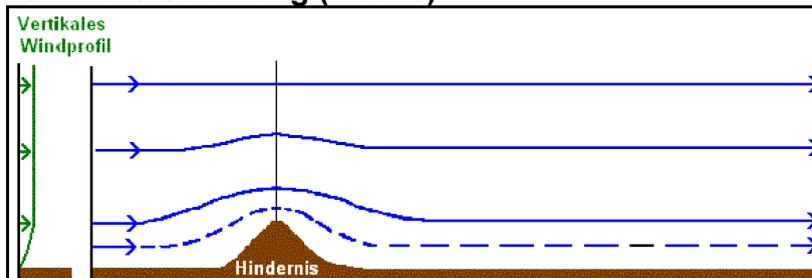
1954 z.B. berichtete ein Pilot einer P-38 (2-motoriges Kampfflugzeug des 2. Weltkrieges), der aufgrund zu starker, böiger Bodenwinde nicht auf dem Flughafen Bishop (USA, Sierra Nevada, Owens Valley) landen konnte und dem kein Ausweichflughafen zur Verfügung stand, von einer extremen Welle mit so kräftigen Aufwinden, dass er sein schweres Luftfahrzeug mehr als eine Stunde ohne Motorkraft gleitend in der Luft halten konnte.

## 2.2 Wellenarten

Messungen und Untersuchungen mit Hilfe von Segelflugzeugen Ende der 40er-Jahre durch den tschechischen Wissenschaftler Jiri Förchtgott in der ergaben, dass die Form des Leehanges des Gebirgshindernisses von primärer Bedeutung für die Leewelle ist. Gut ausgeprägte Wellen bilden sich aber nur dann, wenn der Bergkamm bei stabiler Schichtung annähernd senkrecht angeströmt wird und das Windprofil keine signifikante Richtungsänderung mit der Höhe aufweist. Die Art der auf der Leeseite auftretenden Wellen sind dabei vom vertikalen Windprofil der das Hindernis anströmenden Luft abhängig (s. Abb. 6 - 10):

- Bei schwachwindigen Verhältnissen bildet sich lediglich eine flache Welle über dem Bergrücken aus, und die Leeströmung zeigt ausschließlich geringe Vertikabewegungen und keine weiteren meteorologischen Phänomene (Abb. 6).

### a) Laminare Strömung (Abb. 6)



Quelle : [3]

#### Linke Seite

Vertikales Profil der hangsenkrechten Komponente der Windgeschwindigkeit

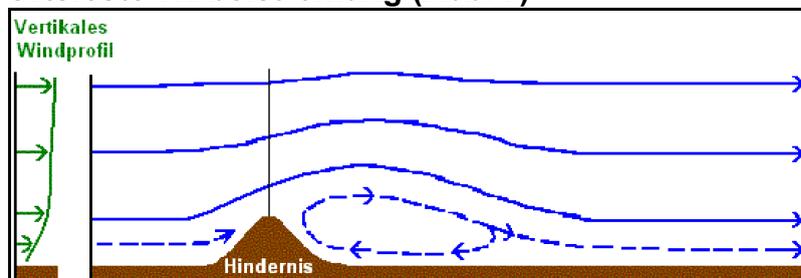
#### Blaue Linien

Stromlinie der Luft, in Bodennähe gestrichelt

Bei nur geringer luvseitiger Windgeschwindigkeit bildet sich lediglich eine flache Welle über dem Bergrücken aus, und die Strömung zeigt ausschließlich schwache Vertikabewegungen und keine meteorologischen Phänomene auf der Leeseite.

- Bei einer etwas höheren hangsenkrechten Komponente der Windgeschwindigkeit findet man häufig auf der Leeseite einen ausgedehnten Wirbel, über dem die laminare Höhenströmung eine Welle bildet.

### b) Ortsfeste Wirbelströmung (Abb. 7)



Quelle : [3]

#### Linke Seite

Vertikales Profil der hangsenkrechten Komponente der Windgeschwindigkeit

#### Blaue Linien

Stromlinie der Luft, in Bodennähe gestrichelt

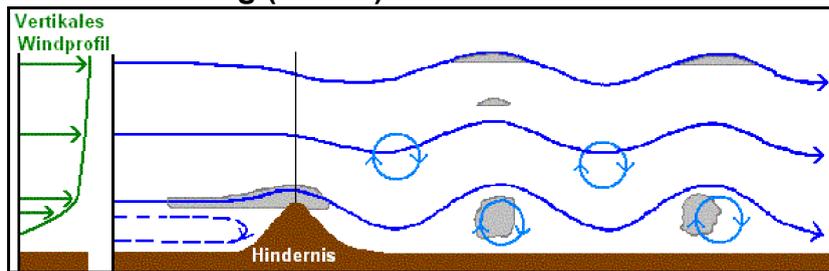
Bei etwas höheren Windgeschwindigkeiten als in Abb. 6 findet man häufig auf der Leeseite einen ausgedehnten Wirbel, über dem die laminare Höhenströmung der Luft eine Welle bildet. Dieser Leewirbel beinhaltet einen Strömungsfluss, der in Bodennähe genau entgegengesetzt zu dem in der Höhe verläuft, was dem kundigen Beobachter manchmal durch Rauchfahnen oder dem Flug der Vögel angezeigt wird.

Der Leewirbel beinhaltet einen Strömungsfluss, der in Bodennähe genau entgegengesetzt zu dem in der Höhe verläuft, was dem kundigen Beobachter manchmal durch Rauchfahnen oder dem Flug von Vögeln angezeigt wird. Solche Wirbel prägen dabei auch die Strömungsverhältnisse in oberen Schichten, weil durch sie die Hindernisform abgebildet und der Höhenströmung aufgeprägt wird (Abb. 7).

- Bei stärkerem Wind und einer Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe entwickelt sich auf der Leeseite eine ausgeprägte Wellenströmung mit linsenförmigen Wolken in den Wellenbergen sowie Wirbeln und Rotorwolken in tieferen Luftschichten (Abb. 8).

### c) Wellenströmung (Abb. 8)

Quelle : [3]



#### Linke Seite

Vertikales Profil der hangsenkrechten Komponente der Windgeschwindigkeit

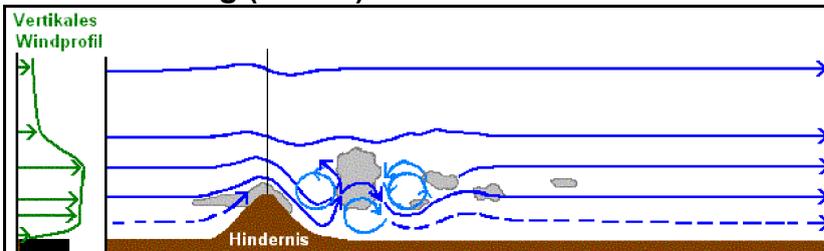
#### Blaue Linien

Stromlinie der Luft, in Bodennähe gestrichelt

Bei noch stärkeren Windgeschwindigkeiten und einer -geschwindigkeitszunahme mit der Höhe entwickelt sich auf der Leeseite eine ausgeprägte Wellenströmung mit linsenförmigen Wolken im Bereich der Wellenberge sowie Rotoren und Rotorwolken in tieferen Luftschichten.

- Bei einer hohen gebirgssenkrechten Windkomponente in einer vertikal begrenzten Luftschicht, in der sich die Kammlage befindet, ist auf der Leeseite häufig schwere Turbulenz anzutreffen und ein System von quasistationären Wirbeln mit einer gegenläufigen Luftbewegung zu beobachten (Abb. 9, 10).

### d) Rotorströmung (Abb. 9)



#### Linke Seite

Vertikales Profil der hangsenkrechten Komponente der Windgeschwindigkeit

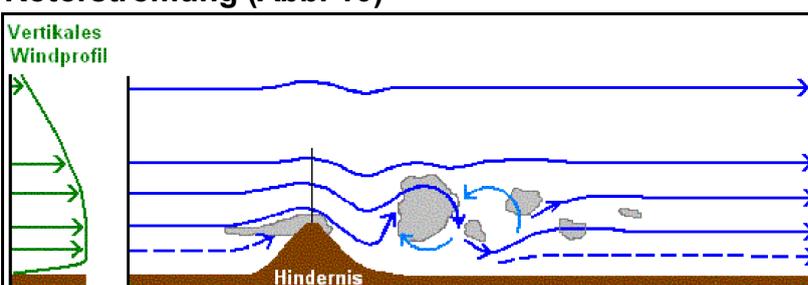
#### Blaue Linien

Stromlinie der Luft, in Bodennähe gestrichelt

Bei hohen Windgeschwindigkeiten in einer vertikal begrenzten Luftschicht, in der sich die Kammlage befindet, ist auf der Leeseite häufig schwere Turbulenz anzutreffen und ein System von quasistationären Wirbeln mit einer gegenläufigen Luftbewegung zu beobachten. Solche Strömungsverhältnisse treten z.B. auf, wenn die hangsenkrechte Komponente der Geschwindigkeit durch Drehung des Windes mit der Höhe abnimmt.

### e) Rotorströmung (Abb. 10)

Quelle : [3]



#### Linke Seite

Vertikales Profil der hangsenkrechten Komponente der Windgeschwindigkeit

#### Blaue Linien

Stromlinie der Luft, in Bodennähe gestrichelt

Diese Strömung verursacht - ebenso wie in Abb. 9 - oft schwere Turbulenz auf der Leeseite.

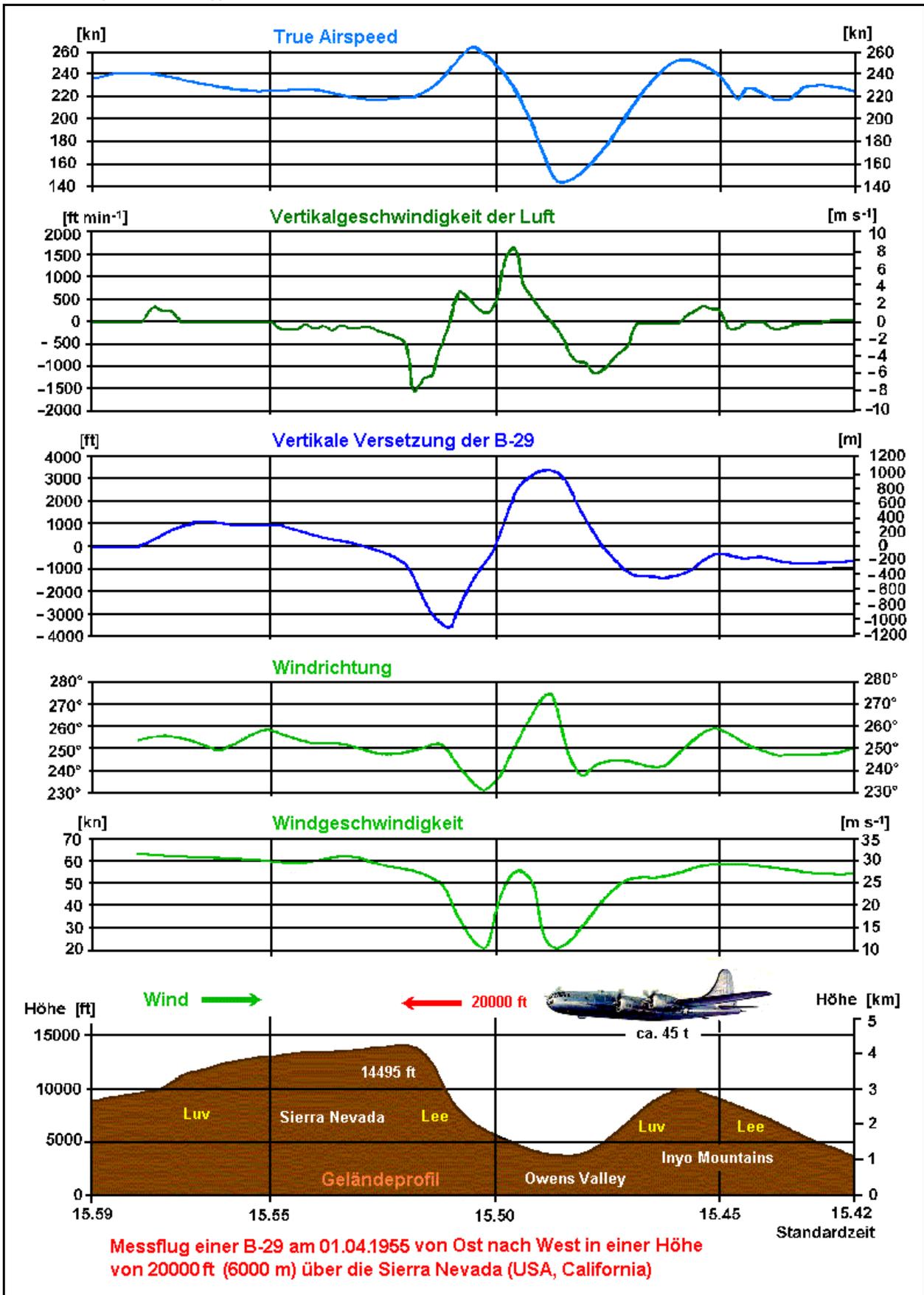
## 2.3 Resultate eines Messfluges

Am 1. April 1955, beim Vorhandensein einer markanten Leewellenströmung im Bereich der Sierra Nevada (USA; Gebirge westlich von San Francisco; höchster Berg Mount Whitney 4418 m) wurde ein Messflug quer zum Gebirge und gegen den Wind mit einer B-29 (Superfortress, fliegende Festung, viermotoriger USAF-Langstreckenbomber des 2. Weltkrieges) in einer Flughöhe von 20000 ft über NN durchgeführt. Die Abbildung 11 zeigt die Horizontalprofile der True airspeed, der Vertikalbewegungen der Luft, der vertikalen Versetzung des Flugzeuges und der Windrichtung und -geschwindigkeit (im Diagramm von links nach rechts). Geflogen wurde mit konstanter Triebwerksleistung und einem mit dem Höhenmesser gekoppelten Autopiloten. Aus den Messwerten der sich von rechts nach links gegen die Luftströmung bewegenden B-29 ergeben sich folgende Einzelheiten:

- Die Aufzeichnungen der Windrichtung- und -geschwindigkeit verdeutlichen die komplexen Strömungsverhältnisse auf der Leeseite eines Gebirges, die Schwankungen von über 40° und ca. 40 kn zeigen.
  - Die Windgeschwindigkeitsvariationen lassen sich folgendermaßen erklären. Das Luftpaket, das bei stabiler Schichtung auf der Luvseite des Hindernisses zwangsweise gehoben wurde, beginnt sich in tieferen Luftschichten bereits wieder vor dem Gebirgskamm abwärts in Richtung seiner Ausgangslage zu bewegen und schießt aufgrund seines Geschwindigkeitsüberschusses darüber hinaus (Hydraulic jump).
  - Die Windrichtungsschwankungen sind eine Folge der Druckänderungsmechanismen, die beim Anströmen von Gebirgen auftreten - Druckanstieg auf der Luvseite, -fall auf der Leeseite - und eine anti- bzw. zyklonale Verbiegung der Stromlinien bewirken. Allerdings scheint der Druckstieg auf der Luvseite der Sierra Nevada aufgrund des flachen Gebirgsprofils keine Ablenkung der Windrichtung ausgelöst zu haben.
  
- Die vertikale Versetzung der B-29 in Leewellen ist bemerkenswert und beträgt über 6500 ft bzw. mehr als 2300 m. Nach einer Höheneinbuße wieder an Höhe zu gewinnen, ist nicht einfach, weil das Windfeld starke Variationen zeigt und damit den Auftrieb entscheidend beeinflusst.  
Über Gebirgen ist deshalb immer mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand zu fliegen. Die Höhengewinne und -verluste sind aber nicht nur auf die Vertikalbewegungen zurückzuführen, sondern werden auch durch Windänderungen verursacht.
  
- Das Profil der True airspeed zeigt Geschwindigkeitsschwankungen von mehr als 120 kn, mit einem Minimum über dem Owens Valley von 142 kn und einem Maximum vor dem Kamm der Sierra Nevada mit über 260 kn. Diese Horizontalbeschleunigungen sind hauptsächlich eine Folge der substantiellen Windrichtungs- und -geschwindigkeitsschwankungen, die aufgrund der Trägheit des Flugzeuges Änderungen der True airspeed hervorrufen.

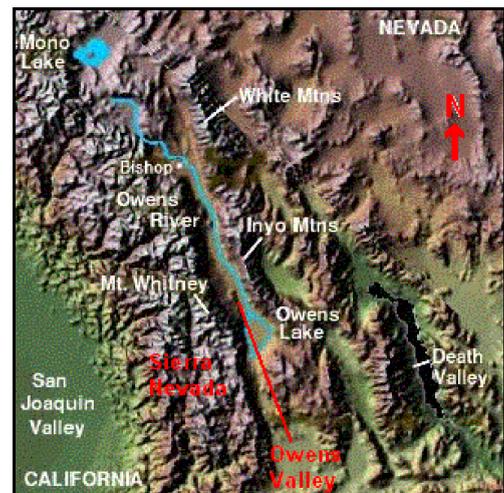
**Messflug einer B 29 bei einer markanten Leewellenströmung im Bereich der Sierra Nevada (Abb. 11 a)**

Quelle : [3]



### Region des Messfluges (Abb. 11 b) und 11 c)

Quellen : [6, 7]



Der Geschwindigkeitsverlust in Leewellen ist besonders heimtückisch, weil bei den Versuchen des Piloten oder Autopiloten, den Höhenverlust zu kompensieren, die Mindestfluggeschwindigkeit (Stalling speed) unterschritten werden kann. Diese Vertikalbewegungen und Windänderungen über und auf der Leeseite von Gebirgen verursachen in Abhängigkeit von ihrer Stärke, der Fluggeschwindigkeit und der Masse des Luftfahrzeuges mehr oder minder starke Turbulenz, die in der gesamten Troposphäre und auch noch in der Stratosphäre auftreten kann. Auch wenn Flüge durch Leewellengebiete selbst bei starken Vertikalbewegungen der Luft eine laminare Strömung vortäuschen, können Turbulenzen von solch hoher Intensität angetroffen werden, wie sie sonst nur in heftigsten Gewittern zu finden sind.

## 3. Relevante Faktoren der Leewellenbildung

Radiosondenaufstiege, Segelflugzeugsondierungen, Radarmessungen und synoptische Analysen der Wetterlagen an ausgeprägten Wellentagen, die in den Jahren 1950 bis 1960 im Bereich der Sierra Nevada (USA) und der französischen Alpen unternommen wurden, führten zu dem Ergebnis, dass die Eigenschaften der anströmenden Luftmasse und die topographischen Verhältnisse die bestimmenden Faktoren bezüglich der Bildung und Intensität von Leewellen sind.

## 3.1 Eigenschaften der anströmenden Luft

Weil die Topographie, die horizontale und vertikale Ausdehnung des Strömungshindernisses, seine spezielle Form und bei komplexen Gebirgen mit mehr als einem Höhenzug insbesondere ihr Abstand quer zur Windrichtung wesentlich gestaltet, beziehen sich die Betrachtungen von 3.1 nur auf einen symmetrisch verlaufenden Bergkamm. Wird diese Vereinfachung angenommen, dann ist die Leewellenbildung nur noch eine Funktion der Eigenschaften der das Hindernis anströmenden Luftmasse, und das vertikale Windprofil und die statische Stabilität sind die beiden bestimmenden Größen.

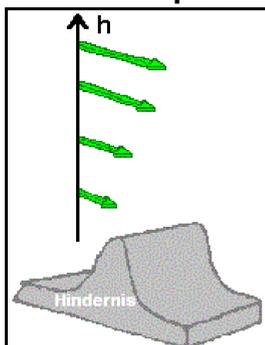
### 3.1.1 Vertikales Windprofil

Gute Bedingungen für die Bildung von Leewellen liegen dann vor, wenn der Wind in Kammhöhe kleiner Hügel oder Berge eine Mindestgeschwindigkeit von 15 kn und in den Gipfellagen von Hochgebirgen von 30 kn zeigt. Das Hindernis sollte dabei möglichst frontal angeströmt werden, d.h. die Windrichtung hat nicht mehr als  $30^\circ$  von der senkrechten Anströmung abzuweichen. Darüber hinaus muss bei geringer Richtungsänderung mit der Höhe die Windgeschwindigkeit bis zur Tropopause zunehmen (s. Abb. 12).

Bisweilen bilden sich auch Leewellen, wenn nicht alle diese Maßgaben erfüllt sind. Geht z.B. die vertikale geschwindigkeits- bzw. gebirgssenkrechte Richtungskomponente des Windes in irgendeiner Höhe gegen null, dann stellt diese Höhe das maximale Niveau dar, das von wellenfliegenden Segelflugzeugen erreicht werden kann, weil hier die Obergrenze der Wellenaktivität liegt (s. Abb. 13). Darüber hinaus wurde in diesem Level häufig Turbulenz angetroffen, die vermutlich auf die ausgeprägte Windscherung im Bereich der rasch wechselnden Wellenamplitude zurückzuführen ist (s. Abb. 14).

#### Höhenwindprofil bei gut ausgebildeten Leewellen (Abb. 12)

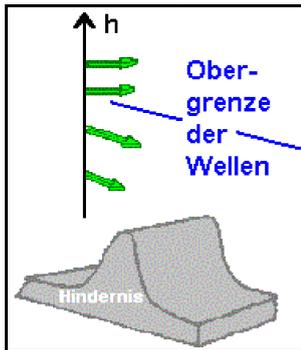
Quelle : [3]



*Gute Bedingungen für die Bildung von Leewellen liegen vor, wenn der Wind in Kammhöhe kleiner Hügel oder Berge eine Mindestgeschwindigkeit von etwa 15 kn und in den Gipfellagen der Hochgebirge von ca. 30 kn zeigt und eine Richtungskomponente aufweist, die nicht mehr als  $30^\circ$  von der senkrechten Anströmung abweicht. Zusätzlich sollte bei geringer Richtungsänderung mit der Höhe die Windgeschwindigkeit bis zur Tropopause zunehmen.*

### Höhenwindprofil mit vertikaler Richtungsänderung (Abb. 13)

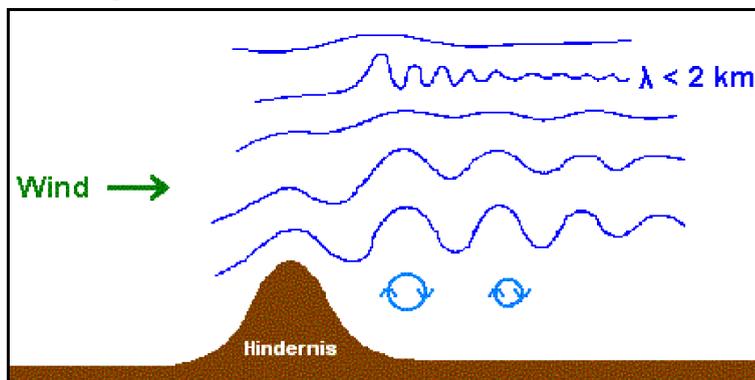
Quelle : [3]



Bei einem signifikanten Richtungswechsel des Windes ab einer bestimmten Höhe stellt dieses Niveau etwa die Obergrenze der Wellenaktivität und damit die maximale Höhe dar, die von wellenfliegenden Segelflugzeugen erreicht werden kann.

### Bildung von instabilen Wellen bei Winddiskontinuitäten (Abb. 14)

Quelle : [3]



Weist das Windprofil signifikante Änderungen ab einer bestimmten Höhe auf (s. Abb. 13), dann können sich im Niveau dieser Winddiskontinuität instabile Wellen ausbilden, die Turbulenz verursachen.

Weiterhin wurde festgestellt, dass zeitliche Variationen des vertikalen Windfeldes zu wesentlichen Modifikationen der Wellenmuster führen können, was dem Wolkenbeobachter z.B. durch Veränderungen des Standortes und der Struktur von Lenticulariswolken angedeutet wird. Die Ursache davon sind zweifellos Wechsel der Wellenlänge, weil große Wellenlängen mit starkem Wind und umgekehrt verbunden sind.

### 3.1.2 Statische Stabilität

Die Analyse von Wellenwetterlagen ergab, dass markante Leewellen dann vorkommen, wenn die thermische Schichtung einen größeren Stabilitätsgrad aufweist als es normalerweise in der Troposphäre der Fall ist. Erfahrungswerte zeigten, dass große Amplituden und kurze Wellenlängen dabei mit starker, kleine Amplituden und große Wellenlängen mit geringerer Stabilität verbunden sind. Bei hohen Windgeschwindigkeiten entwickeln sich lange Wellen und die größte Schwingungsweite tritt meistens in oder in der Nähe des Niveaus der maximalen Stabilität auf.

Die Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$  von der statischen Stabilität und weitere, die Welle bestimmende meteorologische Parameter demonstriert die nachstehende Formel 1. Zu erkennen ist, dass die Wellenlänge  $\lambda$  mit der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  zu und mit wachsender Stabilität  $\gamma_d - \gamma$  abnimmt. Jedoch ist der Einfluss der Stabilität weitaus geringer als die Bedeutung der Windgeschwindigkeit.

### Wellenlänge $\lambda$ von Schwerewellen (Form. 1)

Quelle : [12]

$$\lambda = 2\pi v \sqrt{\frac{T}{g(\gamma_d - \gamma)}} \quad [m]$$

- $\lambda$  : Wellenlänge [m] der Leewelle; abhängig von den Luftmasseneigenschaften
- $v$  : Strömungsgeschwindigkeit [ $m\ s^{-1}$ ]
- $T$  : Temperatur [K]
- $g$  : Erdbeschleunigung [ $m\ s^{-2}$ ]
- $\gamma_d - \gamma$  : Statische Stabilität; bei Temperaturabnahme mit der Höhe sind die Werte für  $\gamma_d$  und  $\gamma$  positiv und umgekehrt  $\leftrightarrow$  Isothermie:  $\gamma = 0$  [ $K\ m^{-1}$ ]; Stabile Schichtung:  $\gamma < 0$
- $\gamma_d$  : Trockenadiabatischer Temperaturgradient [ $K\ m^{-1}$ ]
- $\gamma$  : Temperaturgradient [ $K\ m^{-1}$ ] der Umgebungsluft

Ausgeprägte Leewellen entstehen, wenn in Kammhöhe des Höhenzuges eine mehrere hundert Meter dicke stabile Luftschicht besteht, oberhalb derer die thermische Schichtung weniger stabil ausgeprägt ist und wenn der Wind kräftig ist und mit der Höhe zunimmt. Diese Verhältnisse sind typisch für frontale Wetterlagen und sie lassen sich relativ leicht mit Hilfe eines repräsentativen TEMP erkennen.

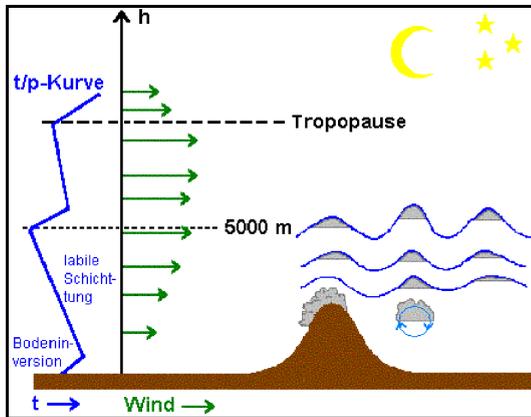
Die Nähe einer Front stellt jedoch nicht die notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Leewellen dar, allerdings ist in ihrer Umgebung die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Bildungsvoraussetzungen günstig sind. Weil außerdem stabile Wetterlagen in der kalten Jahreszeit häufiger auftreten als in der warmen, ergeben sich für Leewellen gute Bildungsvoraussetzungen im Herbst und/oder Winter. Im Frühling und Sommer dagegen kann die bodennahe Luftschicht tagsüber bei Strahlungswetter so stark labilisiert werden, dass die Konvektion bis weit über den Bergkamm einer Erhebung reicht. Dadurch tritt die Welle in geringer Höhe über den Berggipfeln nur schwach ausgeprägt oder gar nicht in Erscheinung. Wenn sich jedoch die Mächtigkeit der Quellwolken geringer als die dreifache Kammhöhe kleiner Höhenzüge erweist, so kann Wellenflug möglich sein. Es besteht dann durchaus die Möglichkeit, dass ein Segelflieger seinen Flug in der Thermik beginnt und in höheren Schichten Anschluss an die Welle findet.

Auch der Tagesgang der Lufttemperatur beeinflusst die Wellenbildung. Beobachtungen zeigten, dass das Einsetzen der nächtlichen Abkühlung die Wellenentwicklung fördert.

Dieser Fall tritt besonders dann auf, wenn der Wind nicht zu stark ist, um den nächtlichen Stabilisierungsvorgang durch die turbulente Durchmischung zu verhindern.

### Nächtliche labile Schichtung (Abb. 15)

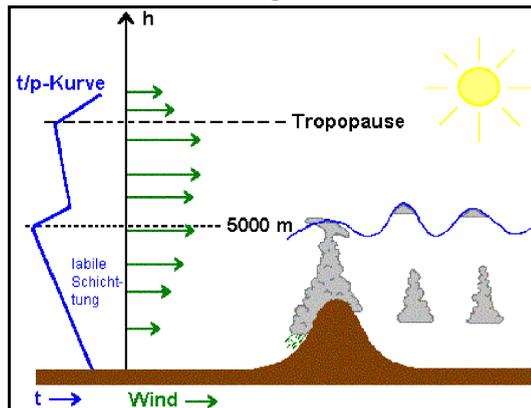
Quelle : [3]



Nachts können sich aufgrund der stabilitätsfördernden Abkühlung der bodennahen Luftschichten ausgeprägte Wellen bilden, wenn der Wind nicht zu stark ist, um den nächtlichen Stabilisierungsvorgang durch die turbulente Durchmischung zu verhindern.

### Labile Schichtung während des Tages (Abb. 16)

Quelle : [3]



Im Frühling und Sommer dagegen kann die bodennahe Luftschicht tagsüber bei Strahlungswetter so stark labilisiert werden, dass die Konvektion bis weit über die Kammhöhe des Gebirges reicht. Dadurch tritt die Welle in geringer Höhe über den Berggipfeln nur schwach ausgeprägt oder gar nicht in Erscheinung.

Ist jedoch die Mächtigkeit der Quellwolken geringer als die 3-fache Kammhöhe von kleinen Hindernissen, so können auch bei solchen Wetterlagen Wellenflüge durchgeführt werden. Dabei ist es durchaus möglich, dass Segelfluggpiloten ihren Flug in der Thermik beginnen und in höheren Schichten dann Anschluss an die Welle finden.

## 3.2 Einfluss der Topographie

Dynamisch lässt sich die Leewelle als Summe eines natürlichen Wellensystems darstellen, die bei günstigen atmosphärischen Verhältnissen (s. Form. 1) auf der Leeseite eines Hindernisses ausgelöst und dessen Wellenkomponenten von seinen Merkmalen geprägt werden. Von besonderer Relevanz sind dabei die horizontale und vertikale Ausdehnung des Strömungshindernisses, seine spezielle Form und bei komplexen Gebirgen mit mehr als einem Höhenzug insbesondere ihr Abstand quer zur Windrichtung.

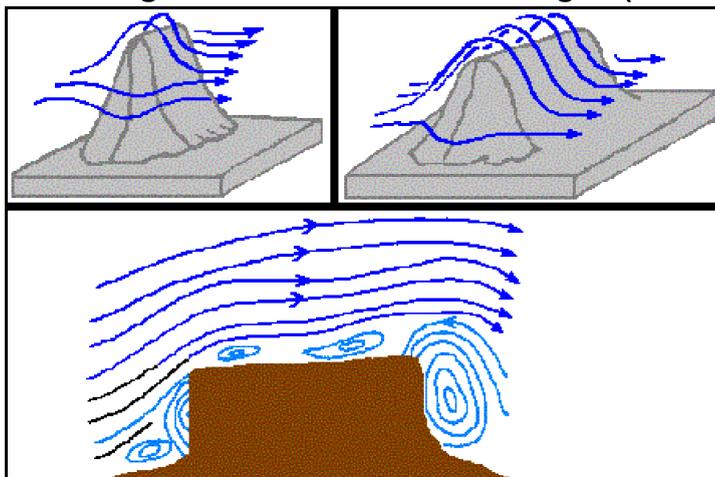
Weil einzelne Berge die Strömungsverhältnisse weniger verändern, als es ein geräumiger Höhenzug oder sogar eine Bergkette mit zwei Erhebungen hintereinander vermag, treten ausgeprägte Wellen meist bei letzteren Hindernissen auf.

Auch die Form des Hindernisses beeinflusst das Um- und Überströmen. Stärkere Verwirbelungen sind häufiger auf der Leeseite eines steilen Höhenzuges (s. Abb. 17) anzutreffen als leeseitig eines sanft abfallenden Bergkammes. Ein konkaves Profil wirkt sich, weil mehr Luft das Hindernis überfließt, vorteilhaft, ein konvexes Äußeres dagegen ungünstig auf die Wellenbildung aus (s. Abb. 18).

Außerdem wurde festgestellt, dass sich im Bereich einer breiten Barriere in Form mehrerer separater Bergketten an jedem Höhenzug Wellen bilden können, die in der Lage sind, zu sich überlagern (Interferenz, s. 4.3.1.1). Daraus resultiert dann in Abhängigkeit von der Wellenphase einerseits eine Verstärkung oder andererseits eine Dämpfung der Amplitude (s. Abb. 19).

### Strömungsverhältnisse an Höhenzügen (Abb. 17)

Quelle : [3]



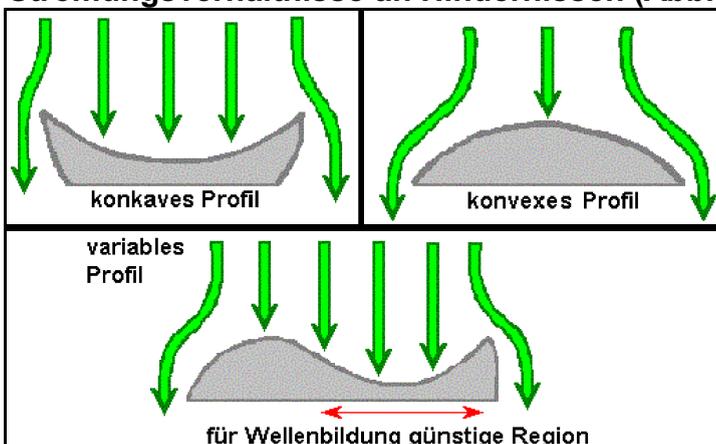
Einzelne Berge verändern die Strömungsverhältnisse weniger, als es ein ausgedehntes Hindernis vermag.

Stärkere Verwirbelungen der Luft sind auf der Leeseite eines steilen Höhenzuges häufiger anzutreffen als leeseitig eines sanft ansteigenden und abfallenden Berges.

Weil separate Berge die Strömungsverhältnisse weniger verändern, als es ein geräumiger Höhenzug oder sogar eine Bergkette mit zwei Erhebungen hintereinander vermag, treten ausgeprägte Wellen meist bei letzteren Hindernissen auf.

### Strömungsverhältnisse an Hindernissen (Abb. 18)

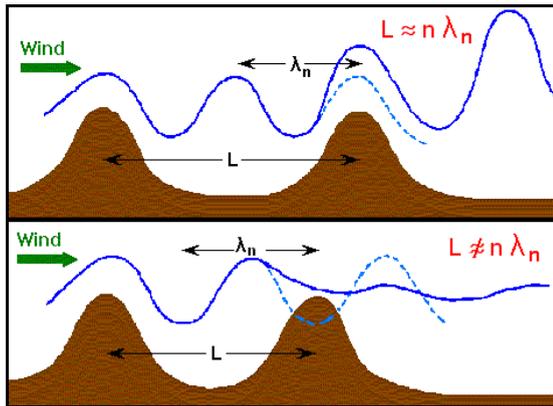
Quelle : [3]



Die Form des Gebirges beeinflusst das Um- und Überströmen der Luft. Ein konkaves Profil wirkt sich, weil mehr Luft das Hindernis überfließt, vorteilhaft, eine konvexe Form dagegen ungünstig auf die Ausbildung markanter Leewellen aus.

### Wellen in und nicht in Phase mit dem Relief (Abb. 19)

Quelle : [3]



Im Bereich einer breiten Barriere in Form mehrerer separater Bergketten können sich an jedem Höhenzug Wellen bilden, die in der Lage sind, sich zu überlagern (Interferenz, s. 4.3.1.1). Daraus resultiert dann in Abhängigkeit von der Wellenphase einerseits eine Verstärkung oder andererseits eine Dämpfung der Schwingung.

#### Welle in Phase mit dem Relief ( $L = n \lambda$ )

Die Schwingung verstärkt sich, wenn der Abstand der beiden Bergrücken  $L$  ein ganzzahliger Faktor  $n$  der natürlichen Wellenlänge  $\lambda_n$  ist.

#### Welle nicht in Phase mit dem Relief ( $L \neq n \lambda$ )

Die Schwingung schwächt sich ab, wenn der Abstand der beiden Bergrücken  $L$  nicht ein ganzzahliger Faktor  $n$  der natürlichen Wellenlänge  $\lambda_n$  ist.

$n$  : Ganzzahliger Faktor (1, 2, 3, usw...)

$L$  : Abstand der beiden Bergrücken  
 $\lambda_n$  : Natürliche Wellenlänge

## 4. Wellenlänge und Amplitude

Die Wellenlänge beträgt in der Regel 5 bis 25 km, liegt in der Mehrzahl der Beobachtungsfälle bei 10 km und es lassen sich leeseitig 2 bis 3, manchmal sogar 5 bis 7 Wellenberge erkennen. Eine ganze Reihe von Schwingungen entwickeln sich vor allen Dingen dann, wenn das Gebirgshindernis aus einem horizontal ausgedehnten Bergrücken quer zur Strömungsrichtung besteht. Im Gegensatz dazu lösen sich die Leewellen eines einzelnen Hügels oder Berges stromabwärts schnell wieder auf, so dass nur ein bis zwei bemerkenswerte Wellen auftreten.

### 4.1 Natürliche Wellenlänge $\lambda_n$

Die Wellenlänge der sich im Lee eines Gebirges ausbildenden Wellen ist - wie bereits angesprochen - eine Funktion der Geschwindigkeit der anströmenden Luft und ihres Stabilitätsgrades. Generell lässt sich sagen, dass mit geringen Windgeschwindigkeiten und/oder starker Stabilität kurze Wellenlängen, mit starkem Wind und/oder geringer Stabilität große Wellenlängen verbunden sind. Allerdings hat die Windgeschwindigkeit einen wesentlichen größeren Einfluss auf diese sogenannte natürliche Wellenlänge  $\lambda_n$  als der vertikale Temperaturgradient (s. auch Form. 1).

Vernachlässigt man die statische Stabilität, so ergibt sich die Näherungsformel nach Corby (1957), welche die fast lineare Zunahme der Wellenlänge (Korrelationskoeffizient 0.91) mit der Windgeschwindigkeit zeigt (s. Form. 1, Tab. 2).

### Natürliche Wellenlänge $\lambda_n$ nach Corby (Form. 2)

Quelle : [3]

$$\lambda_n = 0.6 \cdot u_m - 3 \quad [km]$$

$\lambda_n$  : Natürliche Wellenlänge [km] der Leewelle; abhängig von den Luftmasseneigenschaften (s. auch Form. 1)  
 $u_m$  : Mittlere Windgeschwindigkeit [ $m\ s^{-1}$ ] der wellenbildenden Luftschicht

Beobachtungen zeigen jedoch, dass die Formel von Corby nur Näherungswerte liefert, da Leewellen in der Troposphäre, vor allem auf der windabgewandten Seite von breiten Gebirgszügen, häufig nicht als einfache Wellen in Erscheinung treten.

### Mittlere Windgeschwindigkeit $u_m$ und natürliche Wellenlänge $\lambda_n$ nach Corby (Tab. 1)

Mittlere Windgeschwindigkeit $u_m$ [kn]	Natürliche Wellenlänge $\lambda_n$ [km]
10	3
15	6
20	9
25	12
30	15
40	21

Sogar im Lee einzelner Bergrücken, hinter denen die Strömung nicht mehr erneut gestört wurde, fand man gelegentlich eine ausgesprochen komplexe Wellenstruktur, d.h. die Wellenlänge variierte in Raum und Zeit, in verschiedenen Höhen traten unterschiedliche Wellenfamilien auf und bei konstanter Wellenlänge wurden stromabwärts signifikant gedämpfte Amplituden beobachtet.

## 4.2 Erzwungene Wellenlänge $\lambda_B$

Wie bereits unter 3.2 angesprochen wurde, bestimmt auch die Orographie die Leewelle und modifiziert sie. Die Breite des Hindernisses dominiert dabei die Wellenlänge und seine Höhe über Grund die Amplitude (s. Abb. 20 und 4.3).

Nur wenn die natürliche Wellenlänge  $\lambda_n$  und die vom Hindernis geprägte, die sogenannte erzwungene Wellenlänge  $\lambda_B$ , annähernd übereinstimmen, kann sich eine geordnete Wellenströmung auf der Leeseite des Bergkammes ausbilden. Diese erzwungene Wellenlänge  $\lambda_B$  ist eine Funktion der Breite B des Gebirgszuges (s. Abb. 20).

**Erzwungene Wellenlänge  $\lambda_B$  (Form. 3)**

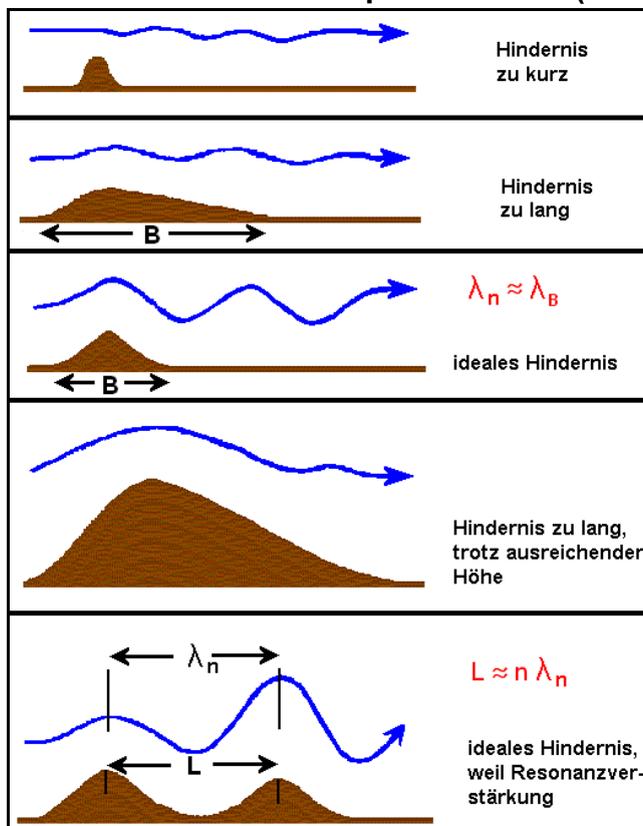
Quelle : [3]

$$\lambda_B = C \cdot B \quad [km]$$

- $\lambda_B$  : Erzwungene Wellenlänge [km]; bestimmt von der Breite des Hindernisses
- B : Breite [km] des Gebirgszuges
- C : Konstante;  $C = 1.5$  bis  $C = 2$

**Einfluss des Hindernisquerschnittes (Abb. 20 und 21)**

Quelle : [3]



- $\lambda_n$  : Natürliche Wellenlänge
- $\lambda_B$  : Erzwungene Wellenlänge
- B : Breite des Hindernisses
- L : Abstand der beiden Bergrücken
- n : Ganzzahliger Faktor (1, 2, 3, usw...)



(Abb. 21)

Ein Anwendungsbeispiel für den Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit, natürlicher Wellenlänge  $\lambda_n$  und erzwungener Wellenlänge  $\lambda_B$  zeigt die Tabelle 2. Ausgehend von einem Höhenzug des Pfälzer Waldes, der Haardt (Mittelgebirge in Rheinland-Pfalz, s. Abb. 21), in der Umgebung von Neustadt an der Weinstraße, mit einer Breite von ca. 4 km ergibt sich eine erzwungene Wellenlänge  $\lambda_B$  (s. Form. 3) von 6 bis 8 km. Eine für Segelflieger nutzbare Wellenströmung würde sich damit nach der Beziehung von Corby (s. Form. 2) erst bei einer Windgeschwindigkeit von etwa  $15$  bis  $18 \text{ m s}^{-1}$  (30 bis 36 kn) ausbilden, weil dann natürliche und erzwungene Wellenlänge übereinstimmen.

### Bildung von Leewellen bei einer Westströmung an der Haardt (Tab. 2)

Hindernis		Erzwungene Wellenlänge $\lambda_B$	Windgeschwindigkeit für von Segelfliegern nutzbaren Wellen
Art	Breite B		
Haardt (Lindenberger Tal bis Gimmeldingen)	4 km	6 bis 8 km	15 - bis 18 m s <sup>-1</sup> (30 bis 36 kn)

## 4.3 Amplitude der Leewelle

Beobachtungen ergaben, dass die Amplitude der Welle im allgemeinen mit zunehmender Entfernung vom Erdboden anwächst, ein Maximum in der mittleren Troposphäre erreicht, dann wieder abnimmt und unterhalb der Tropopause gegen null geht. In Ausnahmefällen jedoch kann bei für die Wellenbildung günstigen Bedingungen nicht nur die Troposphäre, sondern auch höhere atmosphärische Schichten in Schwingungen geraten. Dann können sich die seltenen Perlmutterwolken (22 - 30 km) und raren leuchtenden Nachtwolken (75 - 90 km) in der Strato- bzw. Mesosphäre bilden.

Leider lässt sich die Welleamplitude quantitativ nur schwer erfassen, weil sie sehr komplex mit der Topographie und den Eigenschaften der herangeführten Luftmasse verknüpft und eine Funktion der Form und Ausdehnung des Gebirges sowie des Wind- und Temperaturprofils ist.

### 4.3.1 Topographische Faktoren

Zu den topographischen Faktoren zählen die Höhe des Bergrückens über Grund, der Abstand zwischen zwei Bergzügen und die Form des Hindernisses.

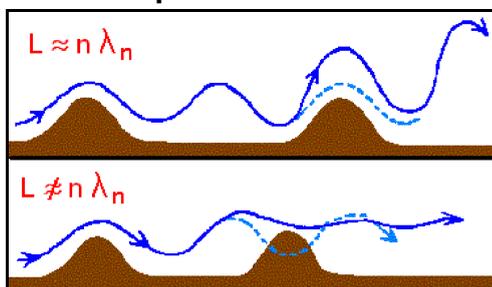
#### 4.3.1.1 Abstand zwischen zwei Bergrücken

Zeigt eine ausgedehntes Strömungshindernis wie z.B. die Alpen zwei aufeinander folgende Höhenzüge und erweisen sich die Wetterbedingungen günstig für die Wellenbildung, so kann jeder Bergrücken eine Welle erzeugen. Weil Wellen sich überlagern, Interferenz genannt, kann Verstärkung, Abschwächung oder sogar eine Auslöschung die Folge sein. Ursache dafür sind Phasenunterschiede der Wellen.

Fällt z.B. ein Wellenberg einer Welle mit dem Wellenberg einer anderen Welle zusammen dann addieren sich beide Wellenberge, so dass die Amplitude anwächst. Befinden sich also zwei Höhenzüge in Phase mit der natürlichen Wellenlänge  $\lambda_n$ , so ist ihre Schwingungsweite infolge Resonanz über dem zweiten Gebirgskamm und leewärts desselben größer (s. Abb. 20, 22). Ein zweites Bergmassiv in der richtigen Phasenentfernung zur primären Welle verstärkt damit die Schwingung, während die Amplitude dagegen abgeschwächt wird oder sogar völlig abklingen kann, wenn sich der nachfolgende Gebirgsrücken gänzlich außer Phase befindet (s. auch Abb 19, 20).

### Wellenamplitude bei zwei aufeinander folgenden Höhenzügen (Abb. 22)

Quelle : [3]



#### **Welle in Resonanz ( $L = n \lambda$ )**

*Ein zweites Bergmassiv in der richtigen Phasenentfernung zur primären Welle verstärkt die Amplitude.*

#### **Welle nicht in Resonanz ( $L \neq n \lambda$ )**

*Die Amplitude wird abgeschwächt oder klingt sogar völlig ab, wenn sich der nachfolgende Gebirgsrücken gänzlich außer Phase befindet.*

In den mittleren Alpenregionen zwischen oberem Inn und Salzach, Etsch und Gail mit den zahlreichen aufeinander folgenden Gebirgszügen ergeben sich günstige Voraussetzungen für die Ausbildung des Resonanzeffektes, so dass Segelfliegern sogar von Flugplätzen des Alpenvorlandes aus hochreichende Leewellen anfliegen können.

#### **4.3.1.2 Höhe des Bergrückens**

Mit Einschränkungen gilt, dass je höher ein Bergrücken sich über der Ebene erhebt, desto größere Werte die Wellenamplitude anzunehmen vermag. Ist das Gebirge horizontal ausgedehnt und zeigt mehrere Höhenzüge, dominiert der letzte Höhenrücken stromabwärts die Welle und bestimmt den Schwingungsaussschlag.

#### **4.3.1.3 Querschnitt des Bergrückens**

Die Amplitude ist um so stärker ausgeprägt, desto mehr der Bergquerschnitt der Form der Leewelle ähnelt. Kleine Höhenzüge mit günstigen Umrissen können deshalb größere Amplituden verursachen als es Hochgebirge vermögen, deren Querschnitt im Vergleich zur Welle zu groß oder zu gering ist.

Diese Beziehung zwischen Gebirgsquerschnitt und Amplitude ist bereits in der Aussage enthalten, dass natürliche und erzwungene Wellenlänge sich gleichen müssen, damit sich eine geordnete Wellenströmung ausbilden kann.

### 4.3.2 Wind- und Temperaturprofil der Luft

Wie bereits in 3.1. angesprochen wurde, bestimmt das vertikale Temperatur- und Windprofil die natürliche Wellenlänge  $\lambda_n$ . Große Amplituden und kurze Wellenlängen sind mit starker, kleine Amplituden und große Wellenlängen mit geringerer Stabilität verbunden, und die höchstmögliche Amplitude ist meistens in oder in der Nähe des Niveaus der maximalen Stabilität zu finden. Eine schmale stabile Schicht erzeugt größere Amplituden, als es eine Luftschicht geringerer Stabilität, aber größerer vertikaler Ausdehnung vermag.

Ausgeprägte Wellen bilden sich, wenn der Wind in Kammhöhe kleiner Hügel oder Berge eine Minimalgeschwindigkeit von etwa 15 kn und in den Gipfellagen der Hochgebirge von ca. 30 kn und eine Richtungskomponente aufweist, die nicht mehr als 30° von der senkrechten Anströmung abweicht. Maßgeblich dabei ist, dass die Windgeschwindigkeit mit der Höhe bis zur Tropopause zunimmt und die Windrichtung sich dabei nur wenig ändert.

Stärkere Richtungsänderungen oberhalb der Kammhöhe des Hindernisses verursachen eine Abschwächung der kamm senkrechten Geschwindigkeitskomponente des Windes und unterdrücken ab dem Level der Winddrehung die Wellenbildung, so dass die Amplitude immer kleiner wird und anschließend gegen null geht (s. Abb. 13, 14).

#### Amplitude, Wellenlänge und statische Stabilität (Tab. 3)

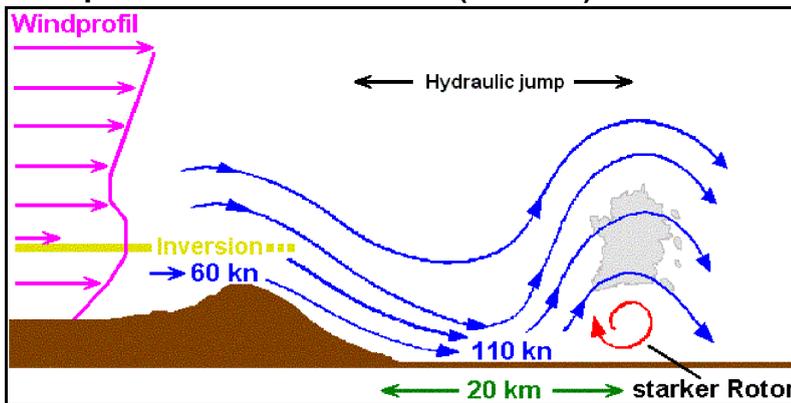
Stabilität	Amplitude	Wellenlänge
gering	klein	groß
groß	groß	klein

## 5. Rotoren

Bei höheren Windgeschwindigkeiten können sich auf der Leeseite nicht nur ausgeprägte Wellen entwickeln, sondern es bilden sich in tieferen Luftschichten hauptsächlich unter den Wellenbergen auch quasi-stationäre, walzenförmige Luftwirbel mit horizontaler, gebirgsparalleler Achse, die Rotoren genannt werden. Der stärkste Rotor tritt normalerweise unmittelbar auf der Abwindseite des Gebirges unter dem ersten Wellenberg auf.

Windprofil mit starkem Rotor (Abb. 23)

[Quelle: 3]



Durch die wogenförmigen Strömungsverhältnisse kommt es unter dem Wellental zu einer Drängung der Stromlinien mit höheren und unter dem Wellenberg zu einer Ausweitung mit geringeren Windgeschwindigkeiten. Nach Bernoulli (Form. 3) muss deshalb der statische Druck unter dem Wellental sinken und unter dem Wellenberg steigen. Dadurch kann sich das allgemeine Druckgefälle in Bodennähe umkehren und eine gegen die Hauptströmung gerichtete Bodenströmung entstehen, die einen ortsfesten Luftwirbel erzeugt, den Rotor.

Rotoren entstehen dadurch, dass die wogenförmigen Strömungsverhältnisse unter dem Wellental zu einer Drängung der Stromlinien mit höheren und unter dem Wellenberg zu einer Ausweitung mit geringeren Windgeschwindigkeiten führen. Nach Bernoulli (Form. 3) muss deshalb der statische Druck unter dem Wellental sinken und unter dem Wellenberg steigen. Dadurch kann sich das allgemeine Druckgefälle in Bodennähe umkehren und eine gegen die Hauptströmung gerichtete Bodenströmung entstehen, die einen ortsfesten Luftwirbel erzeugt, den Rotor. Die Strömungsverhältnisse unmittelbar hinter dem Hindernis werden auch als überschüssende Strömung oder "Hydraulic jump" bezeichnet.

### Gesetz von Bernoulli (Form. 3)

$$p_{ges} = p_{dyn} + p_{stat} = konst.$$

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

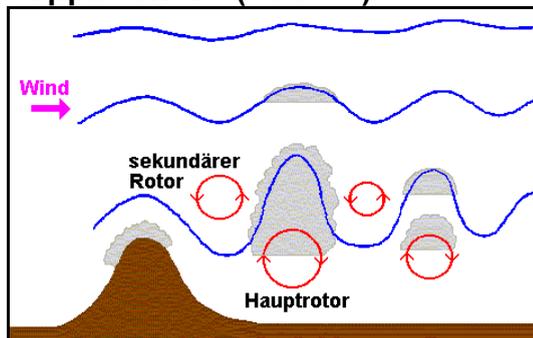
$$p_{ges} = \frac{1}{2} \rho v^2 + p_{stat} = konst.$$

- $p_{ges}$  : Gesamtdruck [ $N\ m^{-2}$ ]
- $p_{dyn}$  : Dynamischer Druck oder Staudruck [ $N\ m^{-2}$ ]
- $p_{stat}$  : Statischer Druck oder Luftdruck [ $N\ m^{-2}$ ];  $p_{stat} = g \cdot \rho \cdot h$
- $\rho$  : Dichte [ $kg\ m^{-3}$ ] der Luft; wird als konstant betrachtet
- $v$  : Strömungsgeschwindigkeit [ $m\ s^{-1}$ ] der Luft

Nach dem Gesetz von Bernoulli ist die Summe aus dem statischen und dynamischen Druck an jedem Ort für eine Stromlinie konstant (s. Form. 3). Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und damit größerem dynamischen Druck  $p_{dyn}$  (unter dem Wellental) muss daher der statische Druck  $p_{stat}$  abnehmen bzw. bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten (unter dem Wellenberg) und deshalb kleinerem  $p_{dyn}$  muss  $p_{stat}$  ansteigen.

In Verbindung mit diesen Leewirbeln können bei ausreichender Luftfeuchte Rotorwolken vorkommen, die ein cumulusähnliches Aussehen mit einer glatten Oberseite zeigen, aber im Gegensatz zu Quellwolken oft einige Kilometer lang sind. Ihre Untergrenze befindet sich häufig etwa in Kammhöhe des wellenauslösenden Berghindernisses. Das Bewegungsverhalten von Fragmenten von Rotorwolken lässt vermuten, dass an den Rändern von großen Rotoren sekundäre Rotoren mit horizontalen oder vertikalen Achsen existieren (s. Abb. 24).

**Doppelrotoren (Abb. 24)**



[Quelle: 3]

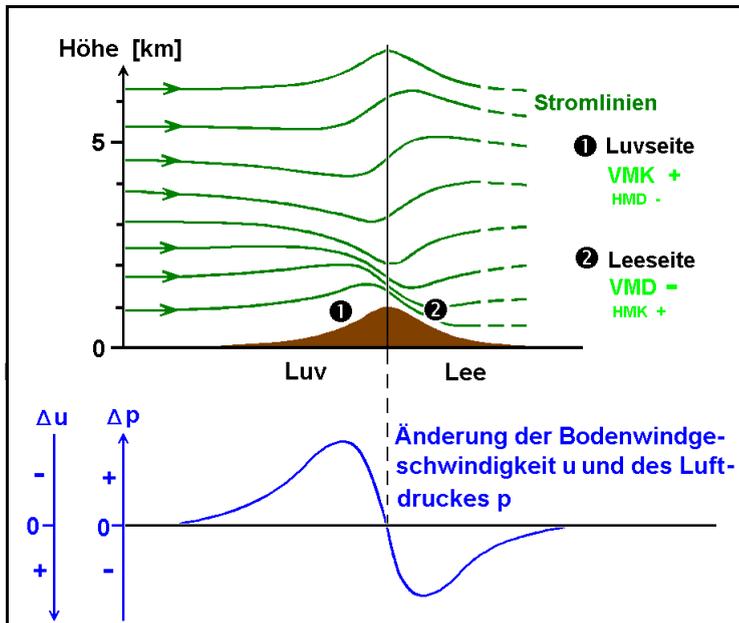
*In Verbindung mit diesen Leewirbeln können bei ausreichender Luftfeuchte Rotorwolken vorkommen, die ein cumulusähnliches Aussehen mit einer glatten Oberseite zeigen, aber im Gegensatz zu Quellwolken oft einige Kilometer lang sind. Ihre Untergrenze befindet sich häufig etwa in Kammhöhe des wellenauslösenden Berghindernisses. Das Bewegungsverhalten von Fragmenten von Rotorwolken lässt vermuten, dass an den Rändern von großen Rotoren sekundäre Rotoren mit horizontalen oder vertikalen Achsen existieren.*

## 6. Orographische Druckänderungen

Die Strömungsverhältnisse in den unteren Schichten im Umfeld eines Höhenzuges verursachen vertikale Massenvergenzen, die zu Druckänderungen führen. Auf der Luvseite steigt der Luftdruck durch vertikale Massenkonzentration und im Lee fällt er durch vertikale Massendivergenz (s. Abb. 25). Die Variation der ursprünglichen Druckverteilung im Bereich des Höhenzuges ändert nun die Strömungsverhältnisse. Das Absinken in der Höhe beginnt in den unteren Schichten bereits vor dem Berggipfel und die Luft wird dabei über den Kamm hinweg aufgrund des höheren Druckes im Luv zusätzlich noch beschleunigt (s. Abb. 25). Durch diese Geschwindigkeitsänderungen entstehen horizontale Massenvergenzen, Divergenz auf der Luvseite und Konvergenz auf der Leeseite, die den anfänglichen Druckänderungen entgegen wirken, so dass die bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten extremen Druckvariationen zum größten Teil ausgeglichen werden. Trotzdem vermag die Orographie den Luftdruck kleinräumig so kräftig zu modifizieren, dass besonders auf der Leeseite von großen Bergzügen Fallwinde in Sturm- und sogar Orkanstärke auftreten können.

**Schematische Darstellung der Stromlinien, Bodenwind- und -druckänderungen in der Umgebung eines Höhenzuges (Abb. 25)**

[Quelle: 3]



Ausgezogene : Stromlinien der Luft  
ne Linien

$\Delta u$  : Änderung der Bodenwindgeschwindigkeit

$\Delta p$  : Änderung des Bodenluftdruckes

VMK : Vertikale Massenkongruenz

VMD : Vertikale Massendivergenz

HMD : Horizontale Massendivergenz

HMK : Horizontale Massenkongruenz

+, - : Druckanstieg, -fall

*Die Drängung der Stromlinien bedeutet höhere Windgeschwindigkeiten (s. Änderung des Bodenwindes).*

*Auf der Luvseite herrscht Druckfall, auf der Leeseite Druckanstieg (s. Änderung des Bodenluftdruckes).*

*Das Absinken in den unteren Schichten beginnt bereits vor dem Bergkamm.*

## 7. Lenticulariswolken

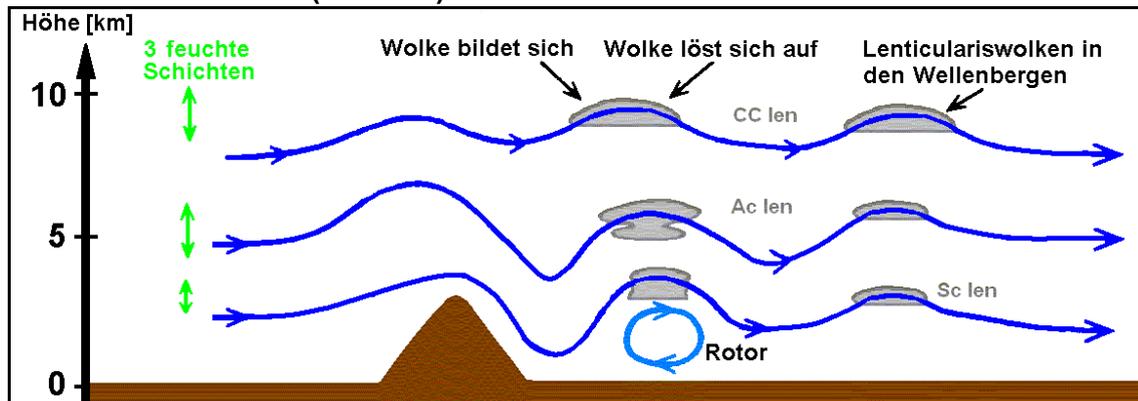
Einen eindeutigen sichtbaren Beweis, dass Wellen in der Umgebung Höhenzügen auftreten, liefern die weit zu beobachtenden quasistationären Lenticulariswolken. Diese Wolkenform lässt sich daran erkennen, dass sie trotz des starken Höhenwindes mehr oder minder ortsfest über dem Gelände auf der Leeseite des Bergrückens stehen. Der Grund hierfür ist, dass sie sich bei ausreichender Luftfeuchte auf der Vorderseite eines Wellenberges durch den Hebungs- und den nachfolgenden Kondensations- oder Sublimationsprozess immer wieder neu bilden, während sie in der Absinkbewegung nach dem Wellenkamm und der damit verbundenen Verdunstung bzw. Eisverdunstung ständig wieder auflösen. Sie zeigen deshalb häufig ein linsen- oder mandelförmiges Aussehen mit gewöhnlich deutlichen Umrissen.

Manchmal können Lenticulariswolken auch mit geringeren Geschwindigkeiten als die der Luftströmung driften, aber sie sind dann nur kurzlebig. Diese Wolkenart kann sich aber auch über flachem Terrain in Wellen ausprägen, die sich im Vorfeld von heranziehenden Kaltfronten in der präfrontalen Warmluft entwickeln.

Werden Wellenwolken von einzelnen Hügeln oder Bergrücken ausgelöst, so lässt sich meist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen ihnen und der Orographie feststellen. Oft jedoch ist das gebirgige Gelände wesentlich komplexer gegliedert und besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Hindernissen, die Lenticulariswolken erzeugen können. Das Himmelsbild sieht dann besonders bei hoher troposphärischer Luftfeuchte oft chaotisch aus und eine direkte Beziehung zwischen Lenticulariswolken und dem verursachenden Gebirgsrelief lässt sich kaum oder gar nicht erkennen.

Lenticulariswolken (Abb. 26)

Quelle : [3]



## 7.1 Sc len

Im Gegensatz zu Rotorwolken entstehen orographische Lenticulariswolken meist in einer laminaren Wellenströmung, so dass sie im allgemeinen deutlich ausgeprägte, glatte Umrisse aufweisen. Dieses gilt besonders für Lenticulariswolken der mittleren und hohen Troposphäre. In tieferen Schichten jedoch werden Form und quasistationäre Natur dieser Wolken weniger augenfällig, weil hier häufig weitere, nicht orographisch ausgelöste Bewölkung aufzutreten vermag und die Strömungsverhältnisse zusätzlich, z.B. durch Turbulenz verursacht, teilweise sehr komplex sein können.

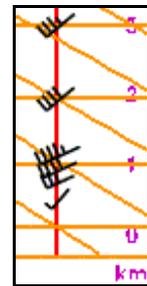
Bereits vorhandene tiefen Wolken werden dann durch die Welle modifiziert, so dass nahezu ortsfeste wolkenfreie Räume oder hellere Wolkenstreifen im Bereich der Wellentäler entstehen und die Wellenberge durch fast stationäre Zonen oder dunklere Bänder von Wolken gekennzeichnet sind.

## Stratocumulus lenticularis (Abb. 27)



8.02.2006, 16.25 UTC,  
Dreieich-Offenthal

*In tieferen Schichten ist als graue Wolke Sc len zu erkennen. Obwohl verbreitet Regen- und Graupelschauer auftraten, die thermische Schichtung also labil war, hat sich bei einem kräftigen, richtungsbeständigen Wind eine schwache Welle, möglicherweise durch den östlichen Rand des Rheintalgrabens ausgelöst und in den Absinkgebieten (Stabilisierung) zwischen den Quellwolken entstehend, gebildet.*



*Ac len lässt sich ebenfalls feststellen und der feste Niederschlag - Schnee oder Frostgraupelschauer - wird an den dunklen Fallstreifen in der Bildmitte und am rechten Bildrand wahrnehmbar. Der Schnee ist dann beim weiteren Fall überwiegend geschmolzen.*

## 7.2 Ac len

Im mittleren Wolkenstockwerk zeigen Lenticulariswolken die typische, auffallende linsen- bzw. mandelartige Form mit den glatten Umrissen. Besonders markant ausgeprägt lassen sich einzelne Wellenwolken bei relativen Luftfeuchten von 30 bis 60 % beobachten, weil in diesem Fall die Wolkenbildung nur im Bereich der maximalen Aufwindregion der Welle stattfindet. Wie bereits erwähnt, sind die glatten Wolkenränder einer Lenticulariswolke ein Indiz dafür, dass die Strömung laminar ist. Scharf abgegrenzte obere Wolkenränder entstehen dabei immer dann, wenn über der Wolke in der Umgebungsluft der Wasserdampfgehalt abnimmt. Falls dort ein markanter, plötzlicher Rückgang der Luftfeuchte zu verzeichnen ist, so wie es an Inversionen der Fall sein kann, wird die Wolkenobergrenze als klar umrissener, nahezu den Stromlinien der Luft folgender Bereich sichtbar.

Bei einer allmählichen Abnahme des Wasserdampfgehaltes oberhalb des Wolkengipfels dagegen ist dieser konvexer gekrümmt als die Stromlinien.

Betrachtet man die Wolkenuntergrenze, so sieht sie mehr oder weniger abgeplattet aus, wenn der vertikale Feuchtegradient unterhalb der Basis gering ist. Mitunter hat die Untergrenze auch eine konkave Form, dann nämlich, wenn der Wasserdampfgehalt der Luft dort markant abnimmt.

### **Alto cumulus lenticularis (Abb. 28)**

Quelle : [11]



*Ac len in Südamerika, Chile*

### **Alto cumulus lenticularis (Abb. 29)**



*Ac len im Frankfurter Raum, in Dreieich-Offenthal, 04.07.2005*

Manchmal tritt an den Rändern von hohen, glatten Wellenwolken Irisieren auf, das wahrscheinlich auf die Brechung der Sonnenstrahlung an sehr kleinen, stark unterkühlten Wassertröpfchen zurückzuführen ist.

### Irisierender Altocumulus lenticularis (Abb. 30)

Quelle : [12]



Gelegentlich zeigen Lenticulariswolken eine zusätzliche wellenförmige Struktur, deren Wellenlänge allerdings wesentlich geringer als die der Leewellen ist. Die relevanten Faktoren, welche die Ausprägung von diesen undulatus-Formen fördern, sind die vertikale Windscherung und die Labilität. Die Scherung kann durchaus eine Folge der allgemeinen Strömungsverhältnisse sein, aber gewöhnlich ist sie ein Produkt der Wellenbewegung.

### Altocumulus lenticularis (Abb. 31)

Quelle : [13]



10.5.06, 05.30 UTC Uhr, Italien,  
Sizilien, Taormina

*Ac len am Etna.*

## 7.3 Cc len

Große, aus Eiskristallen bestehende lenticulare Bögen sind keineswegs ungewöhnlich und vor allen Dingen über großen Gebirgsmassiven wie den Alpen anzutreffen. Wenn sie sich bei kräftigen Leewellen ausbilden, gleichen sie in ihrem Erscheinungsbild und Umrissen von nicht irisierendem Ac len, zeigen aber die typische faserige Struktur von Eiswolken.

Bisweilen tritt im Tropopausenbereich in Verbindung mit Leewellen mäßige bis starke Turbulenz auf, die ab und zu im Aussehen der Wolke sichtbar wird.

Cirrocumulus lenticularis bildet sich nicht nur im Bereich von Hochgebirgen, wie durch eine ganze Reihe von Beobachtungen über den Britischen Inseln nachgewiesen wurde, sondern auch Hindernisse von nur 300 m Höhe können Wellen im Tropopausenniveau auslösen, deren Amplitude genügend groß ist, um Wolken zu erzeugen.

Sehr ist häufig sogar die vertikale Versetzung der Luft in dieser Höhe essentiell mächtiger als das Hindernis, das die Welle erzeugt.

### **Cirrocumulus lenticularis (Abb. 32)**



*Cc len im Alpenraum*

## Literatur

- [1] Liljequist, G.H., Cehak, C. : *Allgemeine Meteorologie;* 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn, 1984
- [2] Meteorological Office : *A Course in Elementary Meteorology;* Second Edition, Her Majesty's Stationery Office, London 1978
- [3] WMO : *The airflow over mountains; Report of working group for aerology;* WMO Technical note No. 34, WMO-No. 98. TP. 43, Genf 1960
- [4] WMO : *The airflow over mountains; Research 1958-1972* WMO Technical note No. 127, WMO-No. 355, Genf 1973
- [5] Top-Wetter im Internet : <http://www.top-wetter.de/themen/foehn.htm>
- [6] Internet : [http://content.answers.com/main/content/wp/en/thumb/c/ca/300px-Wpdms\\_shdrff020l\\_owens\\_valley.jpg](http://content.answers.com/main/content/wp/en/thumb/c/ca/300px-Wpdms_shdrff020l_owens_valley.jpg)
- [7] Internet : *WMO-Wolkenatlas;* [http://www.lib.utexas.edu/maps/us\\_2001/california\\_ref\\_2001.jpg](http://www.lib.utexas.edu/maps/us_2001/california_ref_2001.jpg)
- [8] WMO-Wolkenatlas : *Aufnahme aus dem Flugzeug von R. Symons, Bishop, Kalifornien, USA*
- [9] Kurz, M. : *Synoptische Meteorologie; Leitfaden 8 für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst, 2. Auflage 1990*
- [10] von Kalckreuth, Jochen : *Segeln über den Alpen; Verlag Bucheli Zug und Motorbuchverlag Stuttgart, 4. Auflage 1976*
- [11] Jacobs, W., Dr. : *BTZ Langen*
- [12] American Meteorology Society : *Glossary of Meteorology, Lee wave;* <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/search?id=lee-wave1>
- [12] Schiller, Stefan : *FH 22*
- [13] Rustler, Walter : *65527 Niedernhausen, Erlenweg 33*