

## Kapitel 4

### Die Vorhersage von Thermikwellen

#### 4.1 Struktur und Eigenschaften der Thermikwellen

Thermikwellen bilden sich über der Thermik oder über Cumuluswolken, wenn in einer Inversion über der konvektiven Grenzschicht eine vertikale Windscherung vorhanden ist. Thermik oder Cumuluswolken können willkürlich verteilt oder in walzenförmigen Wirbeln, d.h. in Aufwind- oder Wolkenstraßen, organisiert sein. Im letzteren Fall muß die vertikale Windscherung so ausgerichtet sein, daß die obere Strömung senkrecht oder nahezu senkrecht zu den Wolkenstraßen verläuft. Die beiden Arten der Thermikwellen werden üblicherweise als "Cumuluswellen" und "Wolkenstraßenwellen" bezeichnet, obwohl eine Bildung von Wolken für das Vorhandensein von Thermikwellen nicht notwendig ist. In der wissenschaftlichen Literatur werden Thermikwellen auch als "Konvektionswellen" bezeichnet. Seit 1985 werden sie mit Hilfe von Meßflugzeugen, Windprofilern und numerischen Modellen systematisch erforscht (Clark et al., 1986; Kuetner et al. 1987; Hauf und Clark, 1989).

##### 4.1.1 Cumuluswellen

Eine individuelle Cumuluswolke, die in eine Höhe mit stärkerer Windgeschwindigkeit aufsteigt, wird den Großteil ihres ursprünglichen horizontalen Impulses, erzeugt durch den Wind in niedrigerer Höhe, beibehalten. Folglich stellt diese Cumuluswolke ein Hindernis für die umgebende Luft dar und führt zur Entstehung einer wellenförmigen Strömung mit gleichmäßigen, quasi-laminaren, aber meist schwachen Aufwinden vor der Luvseite der Cumuluswolke (Abb. 4.1). Segelflugpiloten können in diesen Wellen außerhalb der Wolke bis weit über die Obergrenze der Cumuli aufsteigen. Tritt der Aufwind nur luvseitig auf, handelt es sich mehr um einen "Hangaufwind" am Cumulus.

Eine vertikale Scherung der Windgeschwindigkeit von mehr als 3 m/s pro 1000 m ohne eine nennenswerte Änderung der Windrichtung ist nötig, damit dieses Phänomen für Segelflieger nutzbar ist.

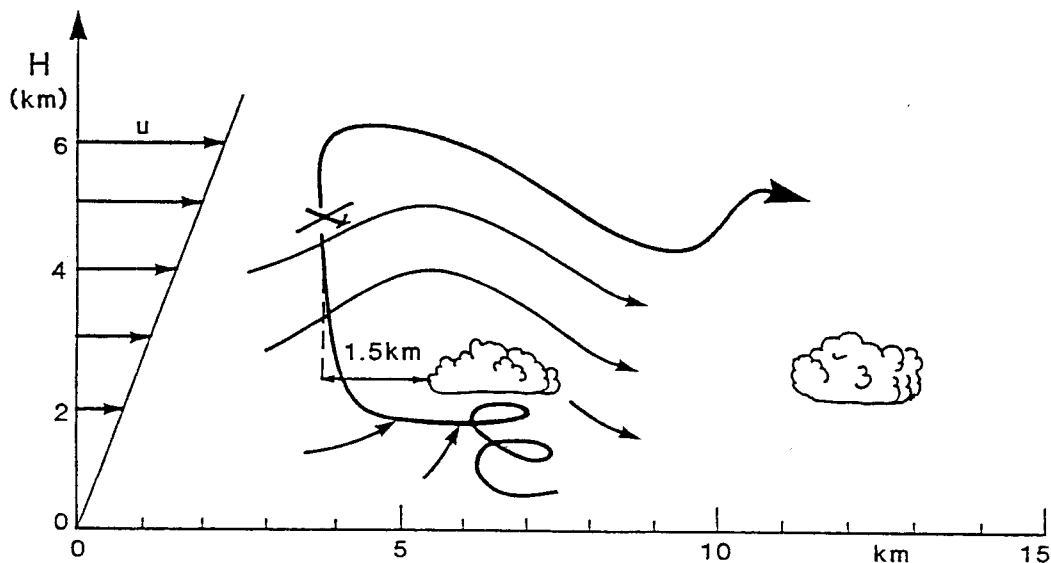


Abbildung 4.1 Schematische Darstellung einer Cumuluswelle mit dem zugehörigen Windprofil (links)

##### 4.1.2 Wolkenstraßenwellen

Die Bedingungen zur Bildung von Wolkenstraßen sind in Abschnitt 2.4.4 beschrieben. Damit Wellen an Wolkenstraßen auftreten können, sollte die vertikale Windscherung der Windkomponente senkrecht zur Wolkenstraße oberhalb der Inversion mehr als 3 m/s pro 1000 m betragen. Die Wolkenstraßen verhalten sich dann genauso wie parallel hintereinander angeordnete Gebirgszüge und der Segelflieger kann über die Luvseite der Wolkenstraße in das Wellensystem einsteigen (Jaekisch, 1968 und 1972), (Abb. 4.2).

##### 4.1.3 Wellen ohne Konvektionsbewölkung

Die in 4.1.1 und 4.1.2 genannten Phänomene treten analog auch bei Blauthermik auf.

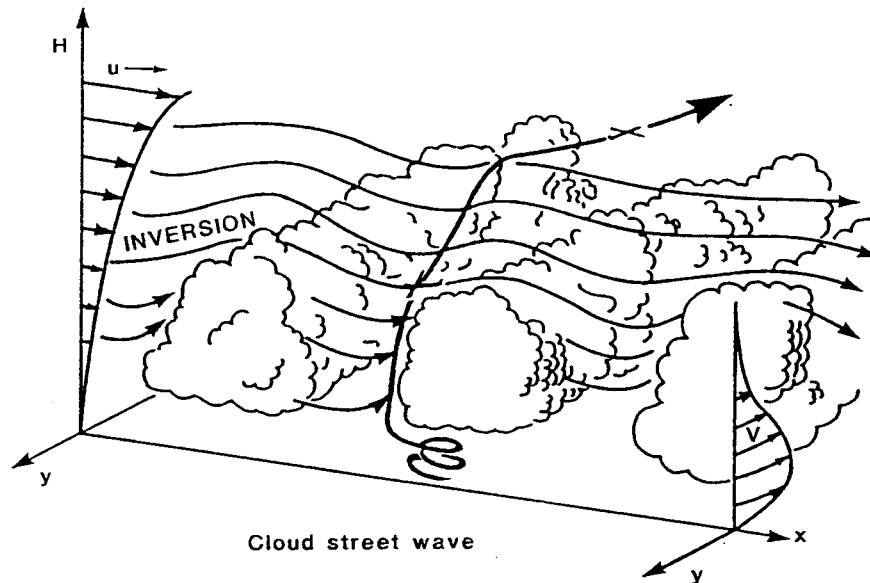


Abbildung 4.2 Wellen über Wolkenstraßen. Die notwendigen Windbedingungen sind durch die Windprofile dargestellt. Der Höhenwind (links) steht in etwa senkrecht zur unteren Strömung in der Konvektionsschicht (rechts)

#### 4.2 Die Felder der Boden- und Höhenkarten

Thermikwellen treten viel häufiger auf als allgemein von den Flugsportlern angenommen wird. Die dazu notwendigen Grenzwerte der vertikalen Windscherung werden häufig erfüllt. Beobachtungen zufolge können die Scherungswerte im Zusammenhang mit Thermikwellen aber auch sehr viel höher liegen und bis zu 10 m/s pro 1000 m und mehr erreichen. Eine günstige synoptische Situation für das Auftreten von Thermikwellen ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Diese Region (Kansas, USA) mit Thermikwellen liegt unter einem postfrontalen Hochdruckrücken mit Absinken. Eine nördliche Strömung wird entlang antizyklonal gekrümmter Isobaren herangeführt. Die Höhenströmung kommt aus NW und ist leicht zyklonal. Die Windgeschwindigkeit nimmt auf der Rückseite des Höhentrogens mit der Höhe stark zu. Die vertikalen Profile von Temperatur und Wind weisen in diesem Fall eine Inversion oberhalb der konvektiven Grenzschicht und eine starke zonale Scherung (über 10 m/s pro 1000 m) auf. Während diese Bedingungen für die Entwicklung von Thermikwellen günstig sind, hat jedoch die starke Windzunahme mit der Höhe einen negativen Einfluß auf die vertikale Ausbreitung der Wellen analog zu den Resonanzwellen ("trapped waves"), (vergleiche Kapitel 3).

Die erforderlichen Vertikalprofile zeigen üblicherweise eine neutral geschichtete konvektive Grenzschicht, d.h. die potentielle Temperatur bleibt mit der Höhe konstant, und eine darüberliegende kräftige Inversion mit einer trockenen stabil geschichteten Höhenluft. Wegen der trockenen Höhenluft sind die Thermikwellen nur sehr selten (bei Advektion feuchter Luft) durch Lenticularis-Wolken gezeichnet. Das Windprofil für die Cumuluswellen muß die zuvor erwähnten vertikalen Windscherungen in Höhe von 3-10 m/s pro 1000 m unterhalb und oberhalb der Inversion aufweisen.

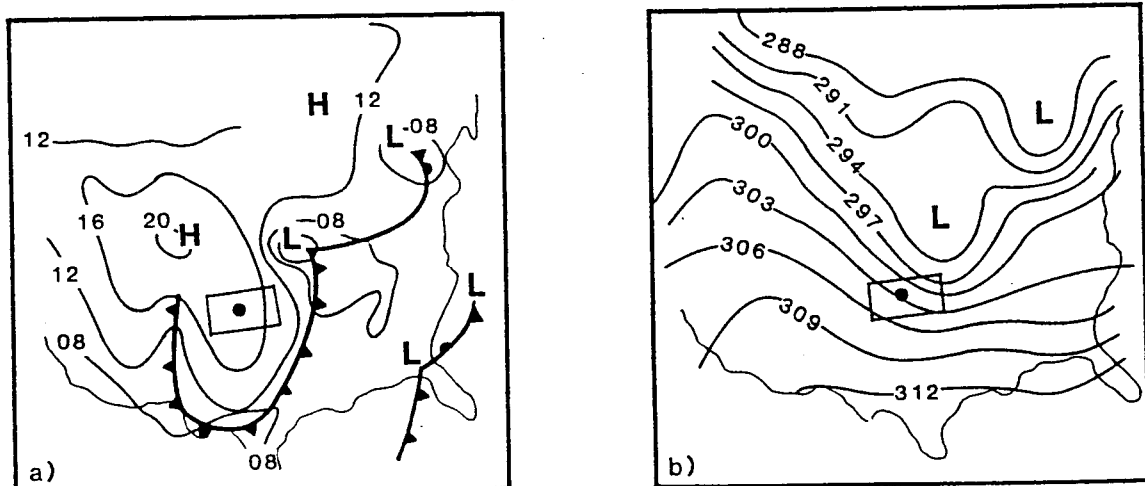


Abbildung 4.3 Wetterkarten vom 27. April 1988 00 UTC beim Auftreten von Thermikwellen über Kansas (USA) während einer Meßkampagne mit der NCAR Electra  
a) Bodenkarte      b) 700 hPa Höhenkarte

Die Abbildung 4.4 zeigt eine typische Vertikalsondierung in einem Meßgebiet beim Auftreten von Thermikwellen. Eine starke Zunahme der potentiellen Temperatur und eine starke Abnahme des Mischungsverhältnisses sind deutlich zu erkennen. Die Änderung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in Höhe der Inversion ist typisch für Wellen oberhalb von Wolkenstraßen.

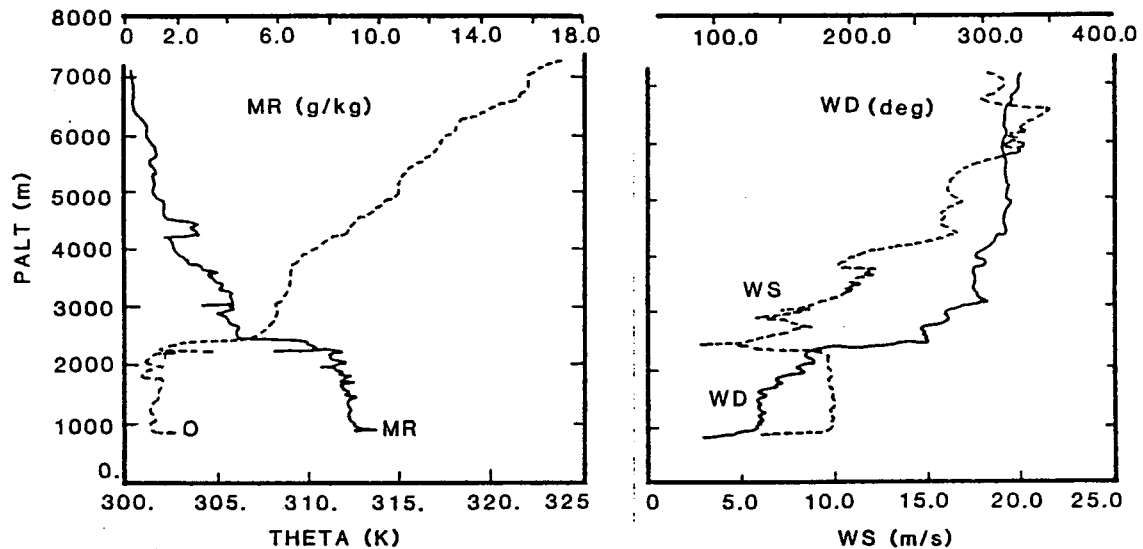


Abbildung 4.4 Vertikalsondierung von potentieller Temperatur, Mischungsverhältnis, Windrichtung und Windgeschwindigkeit als Funktion der Druckhöhe aus den Daten des NCAR Sabreliner in einem Feld von Thermikwellen in der Nähe North Platte, Nebraska, USA am 20. Mai 1986

### 4.3 Die Struktur der Thermikwellen

Thermikwellen sind normalerweise schwächer als Leewellen. In Mitteleuropa liegen die typischen Aufwindgeschwindigkeiten zwischen 1 und 2 m/s, die Wellenlängen zwischen 4 und 10 km bei einem Mittelwert von 7 km. Thermikwellen können wie Leewellen als "Ausbreitungswellen" und "Resonanzwellen" (trapped waves) auftreten. Im ersten Fall können sie in der gesamten Troposphäre bis 9 oder 10 km ausbreiten. Durch die vertikale Windscherung treten sie allerdings sehr viel häufiger als Resonanzwellen auf und erreichen dann etwa 4 bis 5 km Höhe.

Abbildung 4.5 zeigt ein solches Wellenfeld, das durch ein vom Flugzeug nach unten schauendes LIDAR kenntlich sichtbar gemacht wurde. Die Obergrenze der hier dunklen konvektiven Grenzschicht zeigt die vertikalen Ausbuchtungen der Inversion durch die Konvektion, die die Wellenbewegung auslösen. Der Wind in der Grenzschicht kommt aus Nord (aus dem Bild heraus). Der Wind in der Schicht darüber kommt aus Westen (von links nach rechts). Die Wellenlänge beträgt 7 km und die Vertikalbewegungen wurden vom Meßflugzeug mit  $\pm 2,2$  m/s gemessen.

### 4.4 Flugtechnik

Um den Wellenaufwind an der Luvseite der Wolke zu erreichen (Abb. 4.1), fliegt man von der Wolkenbasis gegen den Höhenwind vor. Wichtig ist, daß der Pilot den Vorflug gegen den Wind auch 1 - 2 km vor der Wolke noch fortsetzt, weil hier der maximale Aufwind der Thermikwelle herrscht. In diesem Bereich können in der quasi-laminaren Wellenströmung Höhen bis weit über die Wolkenobergrenze hinaus erreicht werden. Von dort kann man mit dem Wind von Wolke zu Wolke im Delphinstil abfliegen (siehe Abb. 4.1). In Wolkenstraßenwellen (Abb. 4.2) kann der Segelflieger bei Seitenwind mit hoher Geschwindigkeit oberhalb der Wolkenstraßen entlang fliegen, ohne kreisen zu müssen. Ebenso ist es möglich, windabwärts zu fliegen, indem man von einer Wolkenstraße zur nächsten hüpf. Aufgrund der geringen Steigwerte kann man in Thermikwellen mit Segelflugzeugen keine so hohen Reisefluggeschwindigkeiten erreichen wie innerhalb der konvektiven Grenzschicht. Der Vorteil des thermischen Wellenfluges liegt jedoch darin, daß man einen Überlandflug noch fortführen kann, wenn die Thermik bereits eingeschlafen ist, weil die Thermikwellen bis etwa zwei Stunden über das Thermikende hinaus bestehen.

Alle oben genannten Flugtechniken können benutzt werden, um einen Überlandflug auszudehnen. Daher sollte die Wettervorhersage auf die Möglichkeiten von Thermikwellen hinweisen.

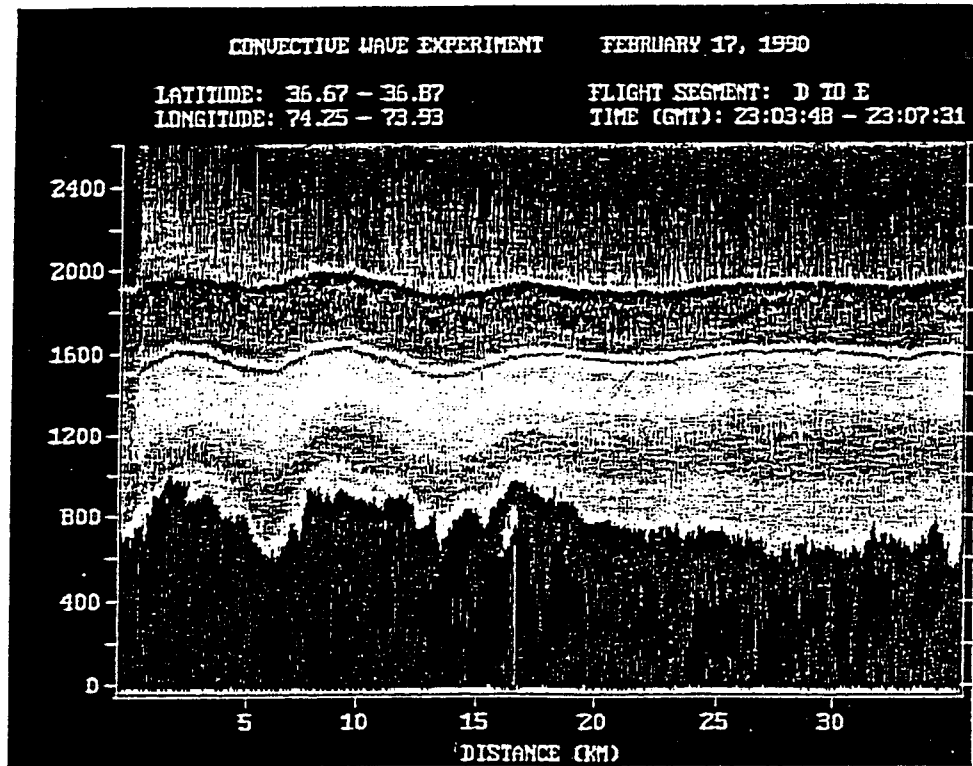


Abbildung 4.5

Thermikwellen über einer konvektiven Grenzschicht (dunkle untere Schicht) beobachtet vom LIDAR der NCAR Electra