

# Geordnete Turbulenz

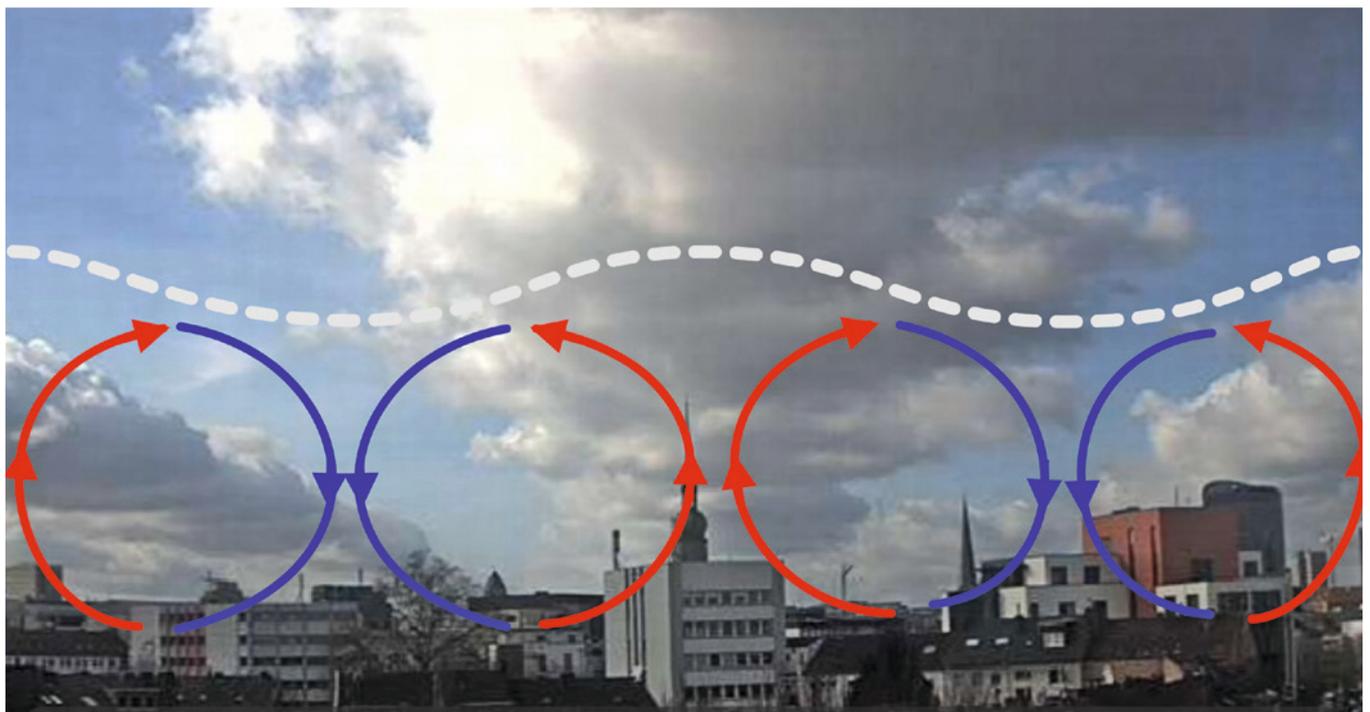
Die Entstehung von Wolkenstraßen



Wolkenstraßen sind das Ergebnis einer strukturierten „Turbulenz“, nämlich von Rollenstrukturen in der Konvektionsschicht.

AUTOREN: DETLEF MÜLLER UND CHRISTOPH KOTTMEIER, WETTERKARTEN: DWD

**Links:** Wolkenstraßen am 19.02.2022 um 12:00 UTC über Mühldorf a.Inn  
**Unten:** Zirkulationsbewegungen bei Wolkenstraßen. Hier am 19.02.2022 um 11:00 UTC über Dortmund.  
(gestrichelt: Verlauf der Inversion)

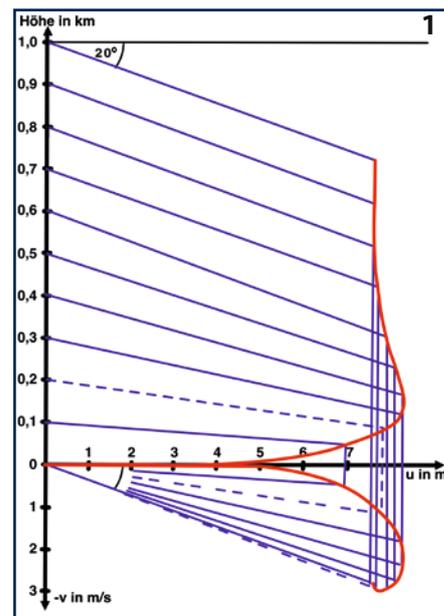


**W**olkenstraßen sind etwa in Hauptwindrichtung aufgereichte Cumuluswolken, deren Orientierung somit von der Orographie weitestgehend unabhängig ist. Die Obergrenze der Cumuluswolken hat eine einheitliche Höhe, meist durch eine Temperaturinversion nach oben begrenzt. Wolkenstraßen bilden sich vorzugsweise in frisch eingeflossener Kaltluft und sind in der Regel mit höheren Windgeschwindigkeiten verbunden. Auslösendes Moment sind Zirkulationsbewegungen in der Konvektionsschicht in Form von gegeneinander drehenden horizontalen Walzen, in deren aufwärts gerichteten Teilen sich die Cumuluswolken aufreihen. Die Länge der Wolkenstraßen beträgt oft einige zehn Kilometer, kann aber auch einige hundert Kilometer erreichen. Der Wolkenstraßenabstand beträgt etwa das Zweieinhalb- bis Dreifache der Höhe des Konvektionsraums/der Wolkenobergrenze. Die Lebensdauer einer Wolkenstraße liegt in der Größenordnung von einer Stunde. Häufig kann eine langsame Verlagerung der Straßen (und damit der Walzen) nach links senkrecht zu ihrer Längenausdehnung in Richtung des mittleren Windes beobachtet werden: Die Ausrichtung der Achse der Walzen liegt nicht unbedingt in Richtung der mittleren Strömung im Konvektionsraum, wodurch eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Achse entsteht. Wolkenstraßen können bereits bei der Bildung der ersten Cumuli des Tages beobachtet werden. Auf der anderen Seite lösen sich Wolkenstraßen auch im Laufe des Tages auf, wenn der Konvektionsraum zu sehr in die Höhe wächst oder sich die Strömungsverhältnisse ändern. Aufwindstraßen treten auch bei Blauthermik auf. Seit den 1960er Jahren wird die strukturierte Konvektion bei Kaltluftausbrüchen über dem Meer auch mit Hilfe von

Flugzeugen und entsprechenden numerischen Simulationen intensiv untersucht. Dabei wird immer wieder diskutiert, inwieweit auch andere Ursachen neben der thermischen Instabilität – also Labilität der Schichtung der Atmosphäre – eine Rolle bei der Entstehung der Wolkenstraßen spielen: Über dem Meer werden extreme Temperaturdifferenzen zwischen der vom Eis abfließenden Luft und dem Meer von bis zu 30 Kelvin gemessen, was zu extremen Temperaturgradienten und damit extremer Labilität in den unteren hundert Metern führt.

**Uns Segelflieger interessiert** vor allem die Wolkenstraßenentstehung über Land – bei weniger ausgeprägter thermischer Instabilität der Schichtung im Konvektionsraum. Leider gab es dazu bis heute kaum Forschungsprojekte mit einem systematischen Einsatz von Flugzeugen, Radiosonden, Messmasten und Lidar-Systemen: Wolkenstraßen treten über Land einfach weniger ausgeprägt auf und die Vermessung lässt sich nicht einfach lokal terminieren und systematisch mit dem notwendigen Equipment vorbereiten.

In den 1980er Jahren haben wir am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover versucht, die Ursache der Wolkenstraßenbildung mit Hilfe von Satellitenbildern und Routine-Radiosondenmessungen der Wetterdienste zu überprüfen. Es zeigt sich, dass sich Wolkenstraßen über Land – also im Falle begrenzter Instabilität in der Konvektionsschicht – jeweils in Verbindung mit (ausreichender) dynamischer Instabilität durch eine deutliche Windrichtungsänderung (Windscherung) mit der Höhe innerhalb des Konvektionsraums bilden. „Dynamisch instabil“ heißt in diesem Fall, dass das Strömungsprofil die Ausbildung von Turbulenz und Turbulenzstrukturen fördert. Die Windscherung nimmt dabei zunächst mit der Höhe bis zu einem



**1** Idealform der Ekman-Spirale bei neutraler thermischer Schichtung. In der unteren Hälfte sind die Strömungsvektoren als Horizontalprojektion dargestellt

Maximum – dem Wendepunkt – zu, um dann wieder abzunehmen (**Bild 2a**). Eine Scherung mit einem Wendepunkt im Windprofil quer zur Hauptströmungsrichtung findet man in unseren Breiten in einem normalen, ungestörten (barotropen) Vertikalprofil des Windes in der atmosphärischen Grenzschicht, die sich infolge der Bodenreibung bis in ca. 1 – 2 km erstreckt. In ihr nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu, die Windrichtung dreht dabei um etwa 30 Grad in unseren Breiten nach rechts. Betrachtet man den Verlauf der Windvektorspitze mit der Höhe, so beschreibt sie eine Spirale. Dieser Strömungsverlauf mit der Höhe wurde von Vagn Walfrid Ekman erstmals erklärt und entsprechend als „Ekman-Spirale“ bezeichnet (**Bild 1**). Die Windgeschwindigkeit nimmt zunächst rasch und dann langsamer mit der Höhe zu, die Windrichtung dreht in der unteren Hälfte wenig und in der oberen Hälfte deutlich nach rechts.

Dadurch entsteht ein Wendepunkt im Windprofil quer zur mittleren Windrichtung, der gut sichtbar wird, wenn man dieses Windprofil in seine Komponenten parallel und quer zur mittleren Windrichtung aufspaltet: Die Komponente quer zur mittleren Windrichtung zeigt einen etwa S-förmigen Verlauf mit einem Wendepunkt (**Bild 2a, rot**).

Ein Wendepunkt im Windprofil senkrecht zur Hauptwindrichtung ist in der Atmosphäre aber nicht nur in Verbindung mit der Ekman-Spirale bei ungestörter (barotroper) Strömung zu beobachten, sondern auch bei Windrichtungsänderungen mit der Höhe durch Advektion (barokline Atmosphäre).

Die dynamische Instabilität der Atmosphäre durch eine Scherströmung mit einem Wendepunkt kann man sich so vorstellen, dass aufsteigende Luftkörper – in Hauptwindrichtung gesehen – erst nach links und dann nach rechts ausgelenkt, und damit auf einem Halbkreis bewegt werden. Sinkt der Luftkörper ab, beschreibt er einen Halbkreis mit der gleichen Drehrichtung und schließt damit den Kreis. Diese Kreisbewegung überlagert sich der allgemeinen Strömung.

Damit wird eine Art erster Wirbel erzeugt, der weitere Wirbel mit entgegengesetzter Drehrichtung auslöst. Numerische Modellierungen können die Auswirkung der dynamischen und thermischen Instabilität auf die geordneten Konvektionsstrukturen getrennt voneinander untersuchen. In der barotropen Grenzschicht zeigen sie bei moderater konvektiver Instabilität – also keinen extremen Temperaturunterschieden zwischen dem Untergrund und der darüber fließenden Kaltluft – eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen.

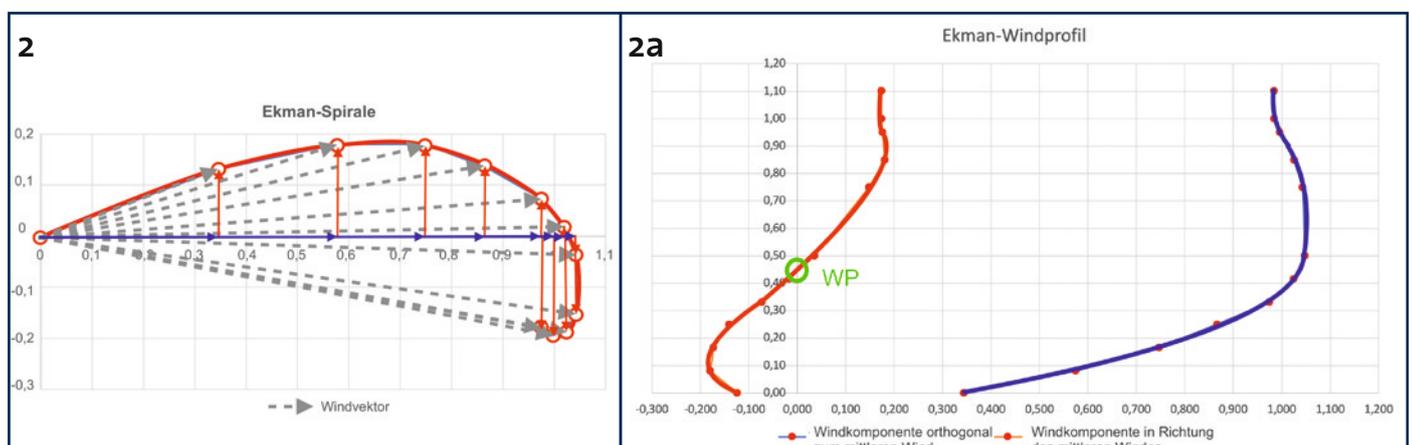
Modellierungen zur Wendepunktinstabilität bei adiabatischer Schichtung zeigten auch, dass die Höhe der Grenzschicht und die Größe der mittleren Windscherung die Wachstumsrate der Rollen beeinflussen. Diese Untersuchungen ergaben auch, dass die Wendepunktinstabilität Wellen in der stabilen Schicht oberhalb der Grenzschicht mit einer Wellenlänge, die dem Abstand von Rollenpaaren entspricht, auslöst – etwas, was auch durch Segelflüge bestätigt wird.

Bei Lidar-Beobachtungen zur Rollen-

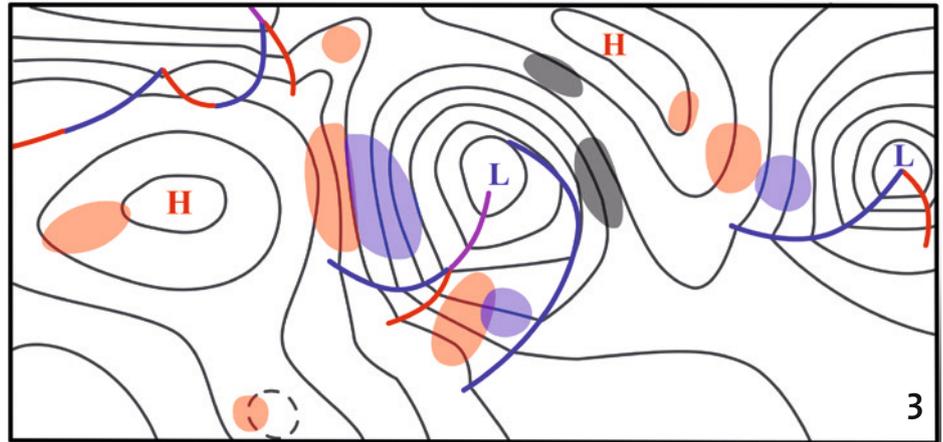
konvektion ergaben die Analysen an einem Vormittag bei wolkenfreien Bedingungen linear organisierte Regionen von Aufwinden. Sie nahmen die gesamte Grenzschicht ein, die im Beobachtungszeitraum von 100 auf 1300 m anwuchs. Der Abstand der Rollenstrukturen variierte zwischen dem 2,02 bis 2,5-fachen der Grenzschichthöhe. Die Ausrichtung orientierte sich innerhalb von 15 Grad an der Richtung mit maximaler Scherung quer zur grundsätzlichen Grenzschichtströmung. Die Rollenstrukturen verschwanden, als sich die Grenzschichtströmung abschwächte. Ein Projektteam von verschiedenen europäischen meteorologischen Diensten (EUMeTrain-Projekt, 2019) führte ebenfalls Untersuchungen zur Wolkenstraßenbildung auf Basis von Satellitenbildern und Routine-Radiosondenaufstiegen durch. Die betrachteten Fälle zeigten im Konvektionsraum durch Kaltluftadvektion verursachte Scherungen mit Wendepunkt quer zur mittleren Strömung.

**Erfahrungen aus dem Segelflug** bestätigten in den von Detlef Müller ab 1983

**2 Ungestörtes Ekman-Windprofil in der Grenzschicht mit einem Wendepunkt in der Querkomponente des Windes zur mittleren Strömungsrichtung (Öffnungswinkel 30 Grad). Grau gestrichelt zeigt in einer Horizontalprojektion die Windvektoren und die entsprechenden Windkomponenten zur mittleren Strömungsrichtung der Ekman-Spirale **2a** Das Vertikalprofil der Ekman-Spirale zerlegt in die Windkomponenten in (blau) und orthogonal (rot) zur mittleren Strömungsrichtung. Markiert ist der Wendepunkt im Windprofil orthogonal zur mittleren Strömung**



**3** Synthetische Wetterkarte, in der die Gebiete mit häufiger Wolkenstraßenbeobachtung markiert sind (blaue Flächen: Ekman-Scherströmung, rote Flächen: Barokline Scherströmung, graue Flächen: Kombination von beiden)



durchgeführten Untersuchungen an Fallbeispielen, dass sowohl die Windgeschwindigkeit als auch die Konvektionsraumhöhe wesentliche Faktoren bei der Wolkenstraßenbildung sein müssen. Für die dynamische Instabilität zeigte sich, dass zur Ausbildung von Wolkenstraßen der Wendepunkt in der Querkomponente des Windprofils idealerweise in der Mitte der Grenzschicht liegt, mindestens aber oberhalb des ersten Drittels der thermisch durchmischten Schicht. Je größer die Windscherung im Wendepunkt war, desto größer konnte auch die Abweichung von der mittleren Höhe des Konvektionsraums sein. Die Wolkenstraßen waren in einem Winkel von etwa plus bis minus 20 Grad zur Richtung mit maximaler Scherung im Wendepunkt ausgerichtet. Die Abweichung der Richtung mit maximaler Scherung im Wendepunkt und der mittleren Windrichtung erklärt auch die seitliche Bewegung der Wolkenstraßen.

Bei barotropen Verhältnissen hängt die Höhe des Wendepunktes im Ekman-Windprofil von der Windgeschwindigkeit ab: Mit wachsender Windgeschwindigkeit streckt sich die Ekman-Spirale. Deshalb muss zur Ausbildung von Rollenstrukturen ein bestimmter Geschwindigkeitswert überschritten

werden bzw. die Konvektionsschicht flach genug sein, damit der Wendepunkt in der Ekman-Spirale in einer Höhe von mindestens 1/3 der gegebenen Konvektionsschicht liegt. Multipliziert man die Höhe der Konvektionsschicht in km/h mit 35, erhält man die Windgeschwindigkeit in kmh, die notwendig ist, um Wolkenstrassen entstehen zu lassen.

Barotrope Verhältnisse findet man allgemein auf der Rückseite von Kaltfronten auf der Nord- bis Nordostflanke eines Hochdruckgebietes mit nahezu geradlinigem Verlauf der Isobaren. Ein Anhaltspunkt für eine ungestörte Strömung ist eine Windrichtungsänderung in der Reibungsschicht von etwa 30 Grad und darüber gleichbleibender Windrichtung.

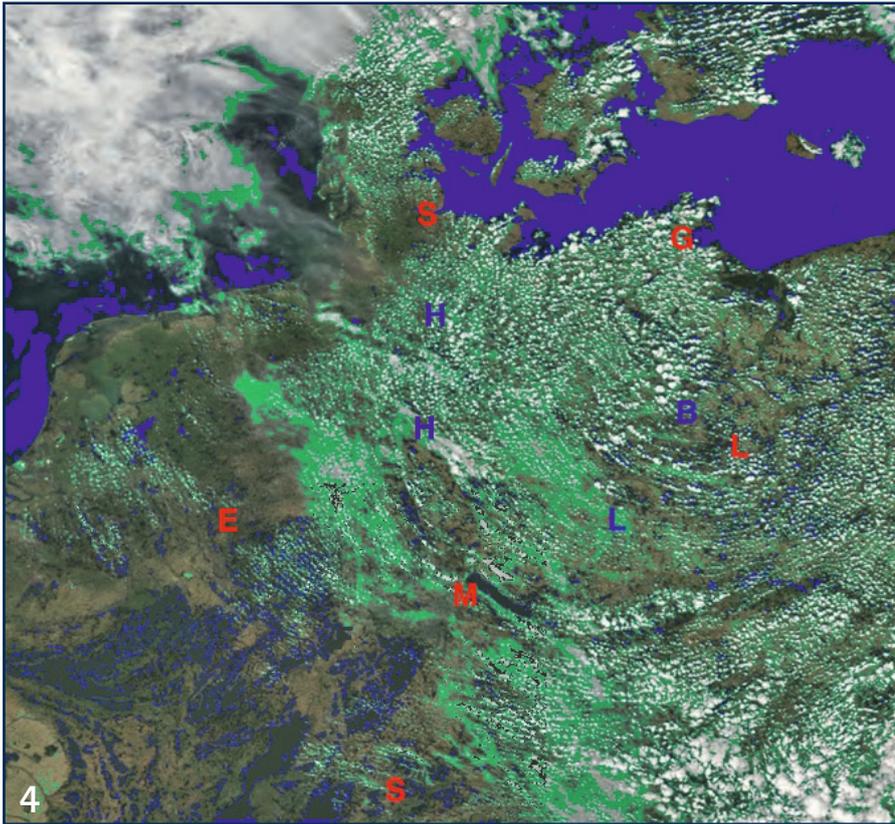
Verbreitet findet man auch heute noch in der Literatur die von Joachim Kuettner (1971) aufgestellte Theorie zur Wolkenstraßenbildung, die bei einem durch eine Inversion nach oben begrenzten Thermikraum eine mit der Höhe etwa gleichbleibende Windrichtung und ein Windgeschwindigkeitsmaximum etwa an der Wolkenuntergrenze fordert. Ignoriert man die Anforderung nach „mit der Höhe etwa gleichbleibender Windrichtung“ und fordert stattdessen eine Windrichtungsänderung um etwa 30 Grad, passt die Beschreibung sehr gut

zu Wolkenstraßenbeobachtungen und -modellierungen zu Wendepunktinstabilität bei barotropen Verhältnissen: Die Ekman-Spirale zeigt ein Geschwindigkeitsmaximum etwas oberhalb des Wendepunktes (**Bild 2a**).

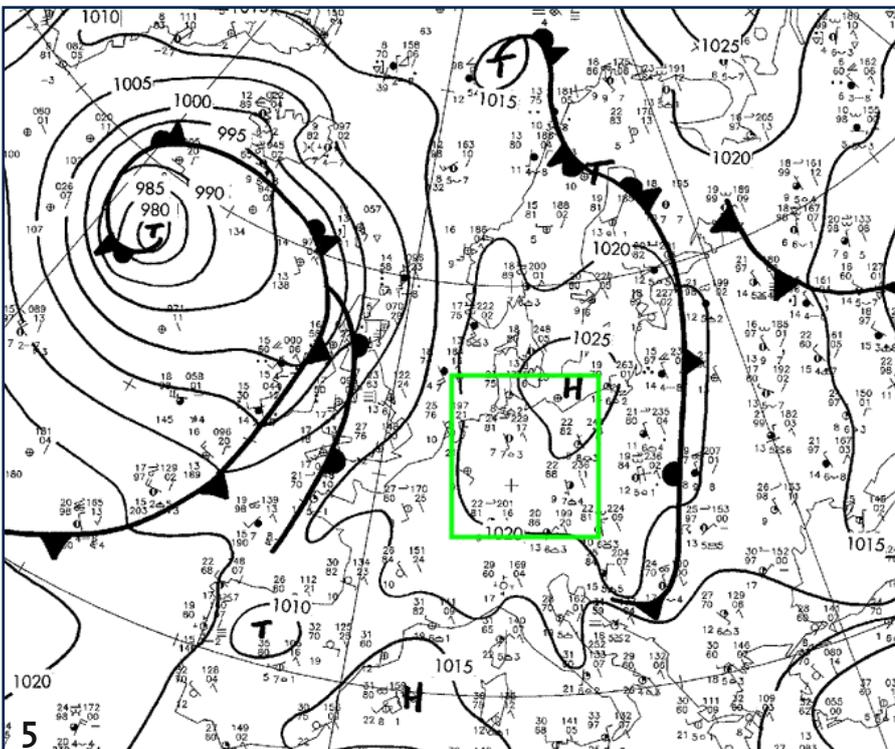
Aber auch unter baroklinen Strömungsbedingungen treten Wolkenstraßen in Verbindung mit Wendepunkt-Windprofilen auf, so z. B. in Hochdruckkeilen und Zwischenhochs oder vor neuen Störungen (**Bild 3**). Die Isobaren sind auf den Bodenwetterkarte stärker gekrümmt und die Windgeschwindigkeit ist mäßig ( $\geq 20$  km/h). Immer bedarf es einer Höhenbegrenzung des Konvektionsraums unterhalb von 3000 m. Hier ist die Vorhersage von Wolkenstraßen bedeutend schwieriger. Ein Hilfsmittel für die Vorhersage kann jetzt nur die Winddrehung in der thermisch durchmischten Schicht sein, die einen Grenzwinkel überschreiten muss. Der Grenzwinkel lässt sich etwa mit der Formel

$$b \geq 330 \cdot h / u_{\text{mittel}}$$

abschätzen, wobei  $b$  der Winkel der Windrichtungsänderung in Grad und  $u_{\text{mittel}}$  die mittlere Windgeschwindigkeit der durchmischten Schicht in km/h sind. In erster Näherung lassen sich diese empirischen Formeln auf ein morgendliches Windprofil und den Segelflugwetterbericht mit vorherge-



**4** Wolkenstraßen am 23.08.2009. Mit roten Buchstaben sind die Radiosondenstationen des Deutschen Wetterdienstes gekennzeichnet, mit blauen einige größere Städte



**5** Bodenwetterkarte vom 23.08.2009 um 12 UTC. Der Rahmen markiert den Satellitenbildausschnitt von Bild 4 mit dem Zwischenhoch „Mara“

sagter Konvektionsraumhöhe anwenden. Besser ist natürlich die Berechnung basierend auf hochauflösenden Windvorhersagen, wie sie einige private Vorhersagedienste bereitstellen. Ein erstes Indiz für Gebiete mit Wolkenstraßenpotential kann aber auch **Bild 3** liefern, wobei Gebiete mit höheren Windgeschwindigkeiten grundsätzlich ein höheres Potential besitzen.

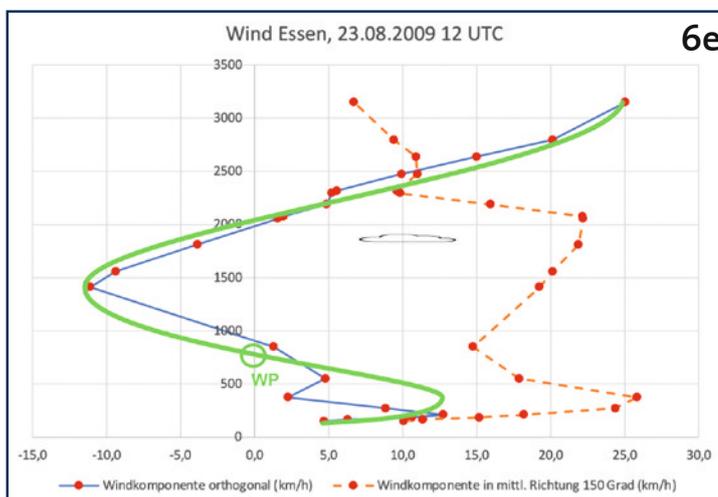
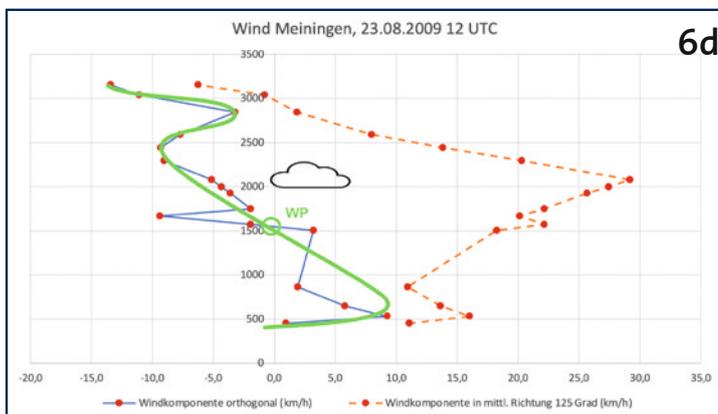
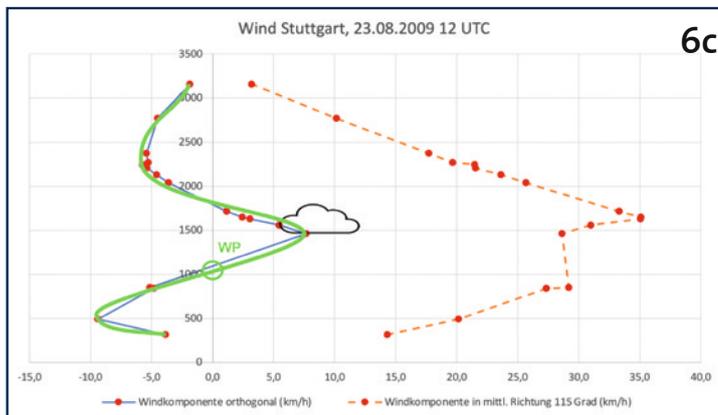
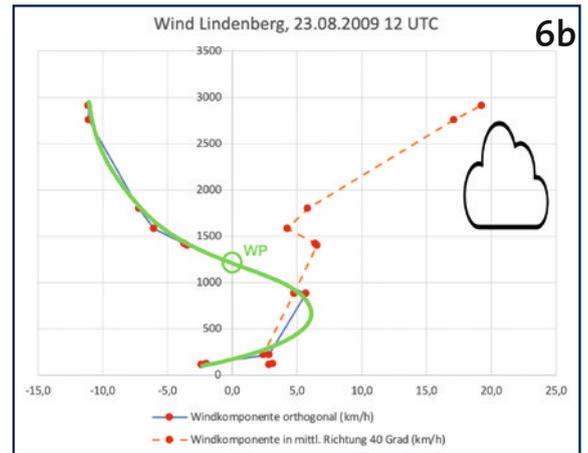
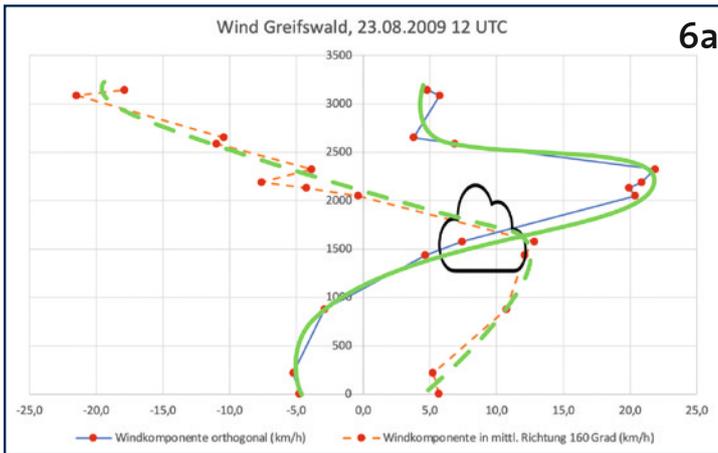
Im Gegensatz zu den Wolkenstraßen treten kürzere Aufreihungen von Cumuluswolken häufig schon bei Bodewinden von 15 km/h auf. Hierbei handelt es sich nicht um regelmäßig verteilte Wolkenbänder, sondern um wenige, nicht unbedingt in Hauptwindrichtung aufgereichte, einzelne Cumuli. Eine Ursache hierfür haben wir im vorangegangenen Artikel beschrieben. Eine andere sind orographische Strukturen.

#### Fallbeispiele von Wolkenstraßenbeobachtungen

Um die oben dargestellte Theorie zur Entstehung von Konvektionsrollen zu veranschaulichen, möchten wir die Gegebenheiten an zwei Tagen exemplarisch darstellen:

#### Wolkenstraßenbildung bei barokliner Wetterlage am 23.08.2009

In den Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft 02/2011 findet man einen Bildbeitrag zum Thema „Wolkenstrukturen“. Hier findet man Wolkenaufreihungen entlang der Strömung um das Zwischenhoch „Mara“ mit Kern nahe Berlin. In seinem Einflussbereich bildeten sich in erwärmter Polarluft bei Advektion und Absinken im Laufe des Tages Cumuli, die sich entsprechend der ausfließenden Luft konzentrisch um das Zentrum des Hochs anordneten, teils in regelrechten „Wolkenstraßen“. Im Satellitenbild (**Bild 4**) sind diese Strukturen südlich bis westlich von Berlin gut auszumachen. **Bild 5** zeigt die entsprechende Bodenwetterkarte.



An diesem Zwischenhoch-Tag wurden über 1200 Streckenflüge mit bis zu 950 km im OLC gemeldet, die sich über nahezu ganz Deutschland (nördlich der Donau) verteilten.

Die Auswertung der mittäglichen Radiosondenaufstiege (*Bild 6a-e*) zeigen in Regionen mit Wolkenaufreihungen Windprofile mit einem Wendepunkt in der Querkomponente der Strömung zur mittleren Strömung. Diese sind Ergebnis im Wesentlichen von advektiven Prozessen, die typisch für räumlich begrenzte Zwischenhochs sind.

**Bild 6a:** Greifswald liegt knapp nördlich des Hochdruckkerns. Der Wind ist im unteren Konvektionsraum (2200 m, Absinkinverion) schwach und dreht im oberen Bereich bei Zunahme auf 20km/h um 140 Grad von 120 auf 260 Grad, bis 3000 m Höhe gar auf 325 Grad! Aufgrund der starken Winddrehung gibt keine einheitliche Grundströmung mit eindeutigem Wendepunkt in der Konvektionsschicht. Entsprechend zeigen die Cumuluswolkenstrukturen im Satellitenbild kein einheitliches Bild bzw. keine Aufreihungsstruktur.

**Bild 6b:** Lindenberg liegt am südöstlichen Rand des Hochdruckkerns. Hier sind schwache Aufreihungen der Cumuli aus etwa 50 Grad mit Basis in 1600 m GND und Tops bei 2800 m zu

beobachten. Die Windgeschwindigkeit ist mit unter 10 km/h bis zur Inversion in 2800 m schwach und schwenkt von Ost auf Nord (Kaltluftadvektion). Darüber kommt der Wind aus Nord mit gut 20 km/h. Das Windprofil zeigt einen Wendepunkt quer zur mittleren Strömung (Wind aus 40 Grad). Die Windrichtungsänderung in der Konvektionsschicht beträgt 105 Grad und erfüllt damit – trotz der geringen Windgeschwindigkeit – das oben beschriebene Kriterium für barokline Strömungen.

**Bild 6c:** Stuttgart ist in Richtung SSW deutlich weiter vom Hochdruckkern entfernt. Flache Cumuli sind bei einer Basis bei etwa 1200 m GND aus etwa 110 Grad ausgerichtet. Das Windprofil

zeigt ein Geschwindigkeitsmaximum in Basisniveau mit 35 km/h und eine Drehung nach rechts um 40 Grad, um im Bereich der Absinkinversion wieder 45 Grad nach links auf 85 Grad bei deutlicher Geschwindigkeitsabnahme zurückzudrehen. Auch wenn die Windgeschwindigkeit hier deutlich höher ist als in Norddeutschland: Das Strömungsverhalten inkl. des Wendepunkts auf 115 Grad in der Mitte der Konvektionsschicht lässt sich auch unterhalb von 1500 m nicht allein durch barotrope Prozesse erklären. Auf jeden Fall erfüllt die Scherung im Konvektionsraum das Kriterium für Wolkenstraßenbildung.

**Bild 6d:** Das Windgeschwindigkeitsprofil von Meiningen ähnelt sehr dem von Stuttgart (um 5 km/h schwächer),

allerdings nicht die orthogonale Komponente zur mittleren Strömung: Hier ist bald über dem Untergrund eine Linksdrehung von 155 auf 120 Grad festzustellen: Die Linksdrehung des Windes setzt hier deutlich tiefer als in Stuttgart ein. Das Kriterium für Wolkenstraßenbildung wird auch hier erfüllt. Die Ausrichtung der Wolkenaufreihungen passt zur Richtung mit der maximalen Scherung im Wendepunkt etwa auf halber Konvektionsraumhöhe.

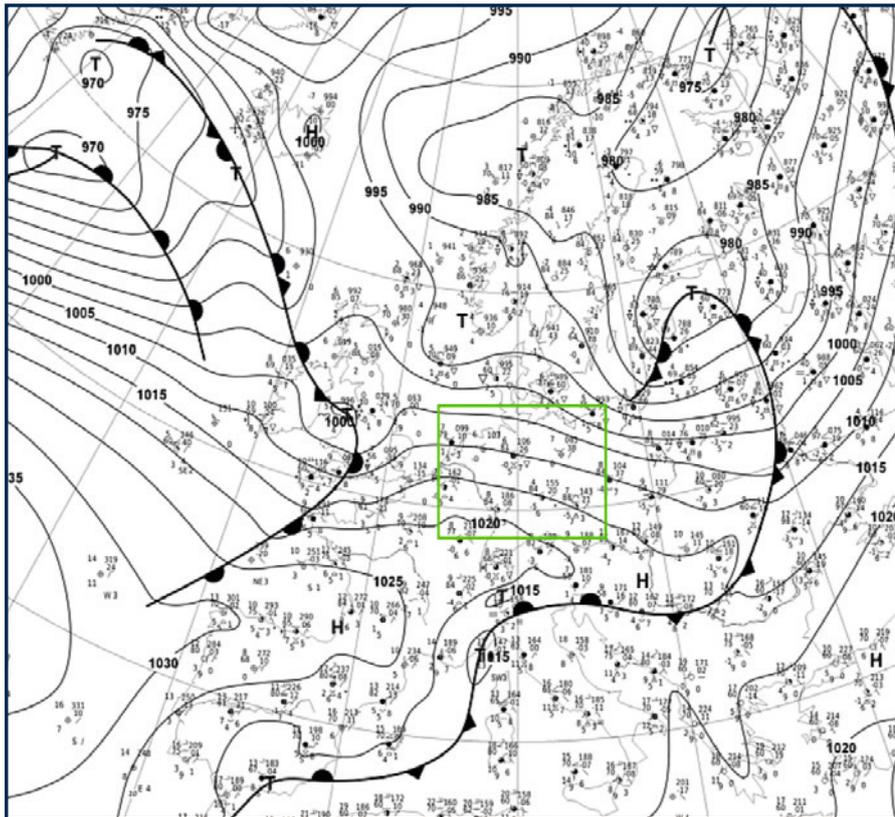
**Bild 6e:** Auch in Essen zeigt die Strömung im Konvektionsraum bei Windgeschwindigkeiten um 20 km/h eine deutliche Linksdrehung (von 185 auf 120 Grad)! Essen befindet sich deutlich westlich vom Hochdruckkern vor der heran-



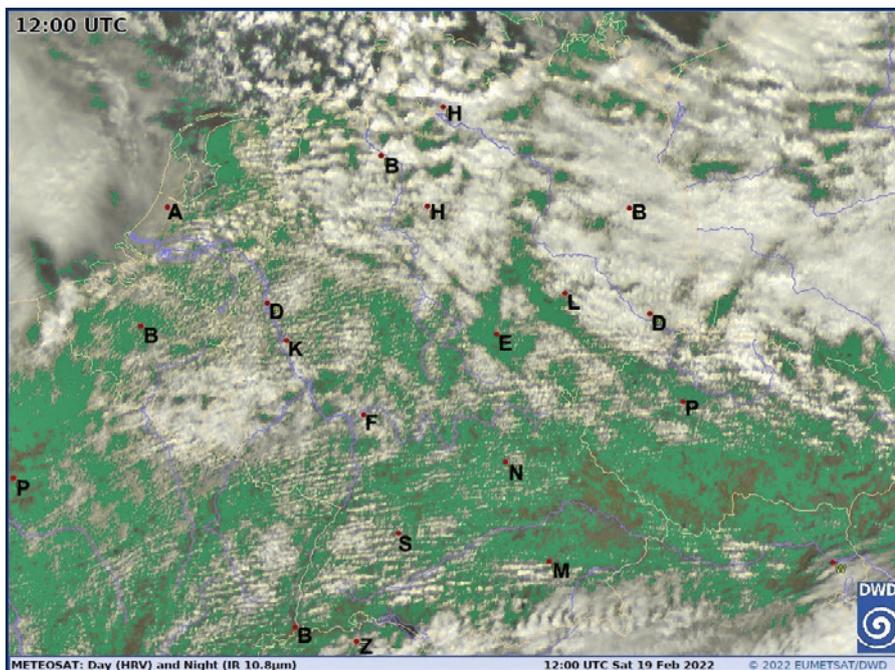
Alle Informationen rund um die faszinierende Sportart!  
**Segelfliegen Magazin** als Jahresabo jetzt bestellen unter



[www.segelfliegen-magazin.com](http://www.segelfliegen-magazin.com)



**7** Bodenwetterkarte vom 19.02.2022 um 12:00 UTC.  
Der grüne Rahmen markiert den Satellitenbildausschnitt von Bild 8



**8** Wolkenstraßen am 19.02.2022 um 12 UTC. Mit Buchstaben sind einige Städte in Deutschland gekennzeichnet

nahenden nächsten Warmfront. Entsprechend dreht der Wind in der Höhe deutlich nach rechts (Warmluftadvektion). Die Wolken-Aufreihungen sind in Richtung 140 Grad ausgerichtet (stromauf), der Wendepunkt im Strömungsprofil liegt bei etwa 150 Grad.

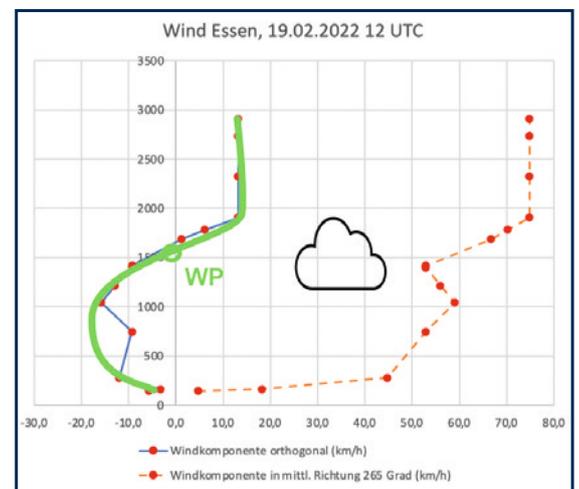
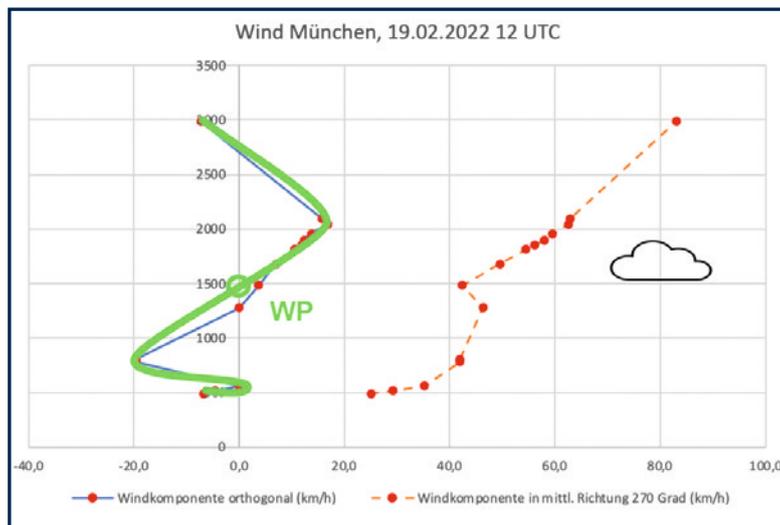
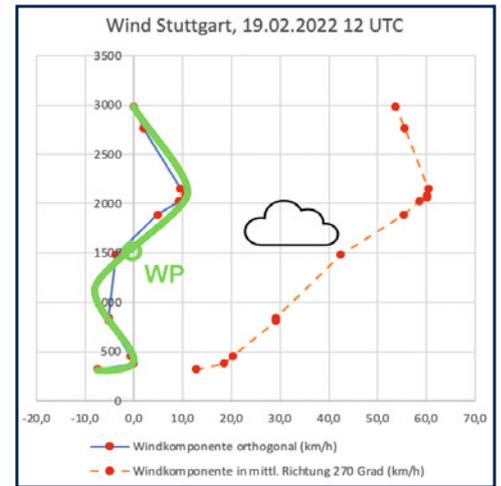
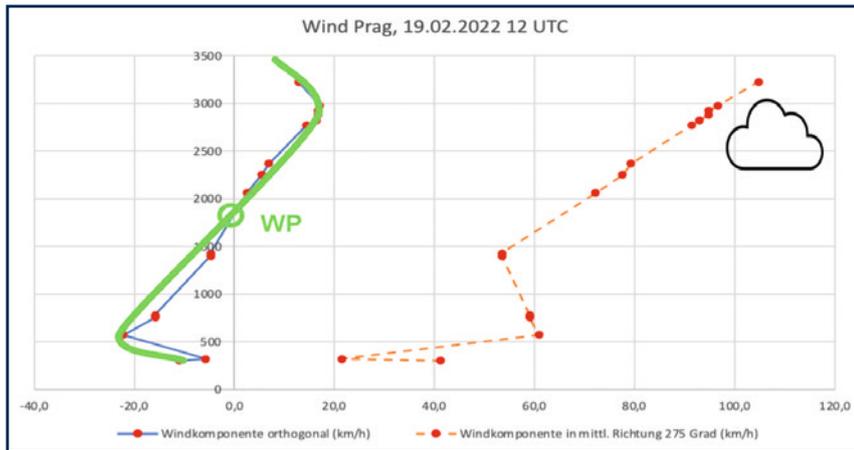
#### Wolkenstraßenbildung durch barotrope Scherung am 19.02.2022

Mitte Februar lag Deutschland in einer ausgeprägten Westdrift mit hohen Windgeschwindigkeiten und z. T. geringer Baroklinität (nahezu geradliniger Verlauf der Isobaren/Isohypsen am Boden und in der Höhe zwischen Störungen, *(Bild 7)*). Bei Windgeschwindigkeiten bis 60 km/h im Konvektionsraum bildeten sich in Bereichen mit einer Inversion bei 1500 m Höhe GND (Essen, Stuttgart, München) Wolkenstraßen aus *(Bild 8)*. Die Auswertung der mittäglichen Radiosondenaufstiege zeigen über Prag, München, Stuttgart und Essen eine Rechtsdrehung des Windes in der Grenzschicht zwischen 20 Grad (Stuttgart) und 30 Grad (München). Gebiete mit höherreichender Konvektion sind durch offene Zellen/Schauerbewölkung gekennzeichnet *(Bild 9)*.

Eine „ideale“ Ekman-Spirale wird man in Radiosondenprofilen der konvektiven Grenzschicht zur Mittagszeit nicht finden: Neben der Baroklinität wirken die turbulente und konvektive Durchmischung, die das mittlere Windprofil glättet und den Wendepunkt anhebt. Bei nächtlicher, stabiler Schichtung ist der Wendepunkt oft ausgeprägter.

**Fazit:** Wolkenstraßen, soweit es sich nicht um Cumulusaufreihungen über Bergkämmen handelt, können sich bilden, wenn:

- der Konvektionsraum durch eine Inversion nach oben begrenzt ist
- eine Grundströmung von >15 km/h vorherrscht
- im barotropen Fall: am Rand von



## 9 Windkomponenten vom 19.02.2022 um 12:00 UTC über Prag, München, Stuttgart und Essen

dynamischen Hochdruckgebieten in Regionen, in denen Isobaren geradlinig verlaufen und die Windschwindigkeiten hoch sind

- im baroklinen Fall: am Rand von Zwischenhochs („thermischen Hochs“)

oder Hochdruckkeilen wie Isobaren stärker gekrümmt sind und deutliche Windrichtungsänderung im Konvektionsraum existieren.

Da diese Informationen auch vor einem Flugtag aus frei verfügbaren Quellen

(Flugwetterprognosen für die Luftfahrt des DWD „GAFOR“, aber auch „WETTERZENTRALE.DE“ mit seinen Temps („Skew-T diagramme“)) recht gut bekannt sind, können sie bei der Streckenflugplanung berücksichtigt werden. ♦

### Literaturverzeichnis:

- Brümmer, B. and H. Schlünzen: Cloud streets during KonTur. KonTur – convection and turbulence experiment, preliminary scientific results. Hamburger Geophysikalische Zeitschriften H.57, 63-77, 1882.
- Etling, D. & R.A. Brown.: Roll vortices in the planetary boundary layer: A review. Boundary-Layer Meteorology volume 65, S. 215–248, 1993.
- Ferrare, R.A, J.L. Schols, E.W. Eloranta, R. Coulter: Lidar Observations of Banded Convection during BLX83. Journal of Applied Meteorology and Climatology Vol. 30, 1991.
- Müller, D., D. Etling, Ch. Kottmeier and R.Roth: On the occurrence of cloud streets over northern Germany. Quarterly Journal Soc. 111, 1985.