

R. HEISE, D. ETLING

15 Schwerewellen und Rotoren

Gravity waves and rotors

Zusammenfassung

Schwerewellen und Rotoren sind als meteorologische Phänomene seit langem mit der Luftfahrt verbunden. Einerseits ermöglichen stationäre Wellenaufwinde im Lee von Gebirgen Luftsportlern ausgedehnte Streckenflüge als auch Höhenrekorde. Auf der anderen Seite stellt die Turbulenz in brechenden Schwerewellen am Rand der Tropopause und in Rotoren in der atmosphärischen Grenzschicht ein erhebliches Flugsicherheitsrisiko dar.

Summary

Gravity waves and rotors have been known in aviation for a long time. On the one hand, stationary updrafts have been used by air sports pilots for long distance and high altitude flights. On the other side, turbulence in breaking gravity waves near the tropopause and in boundary layer rotors are possible risks for flight safety.

1 Einführung

Das Thema Wellen und Rotoren wurde in der PROMET Reihe bereits im Heft 1/2 (2006) mit der Gesamtthematik Atmosphäre und Gebirge behandelt. Dort hatten DÖRNBRACK et al. (2006) neben der allgemeinen Darstellung von Schwerewellen bereits in einem separaten Kapitel auf die Auswirkungen des Systems Welle-Rotor auf die Luftfahrt hingewiesen. Die hier vorliegende Behandlung des Themas erweitert den damaligen PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al. (2006) um die Nutzung der Wellenaufwinde durch Segelflieger sowie um die Vorhersagen von Wellen und Rotoren mit Hilfe der numerischen Wettervorhersage.

Das Thema Schwerewellen in der Atmosphäre wird umfangreich in den neueren Monografien von NAPPO (2012) und SUTHERLAND (2010) behandelt. Wir beschränken uns hier wegen des besonderen Bezugs zur Aviatik auf solche Schwerewellen, die durch Gebirge induziert werden. Die schematische Darstellung solcher Wellen in Abb. 15-1 verdeutlicht diesen Aspekt anschaulich. Neben dem Verlauf von Stromlinien und den in den Aufwindgebieten der Wellen entstehenden Wolken zeigt die Abbildung die Gefährdung von Luftfahrzeugen durch Rotoren in den unteren Atmosphärenschichten sowie durch brechende Schwerewellen im oberen Bereich der Troposphäre. Den Rotoren widmen wir eigene Abschnitte am Ende dieses Aufsatzes. Zur Vervollständigung sollte in dem Kontext

erwähnt werden, das sich die Thematik auch im Bereich der Hydrosphäre speziell bei hydrodynamischen Prozessen in den Ozeanen bei entsprechender Orographie (siehe Beobachtung interner Wellen bei U-Boot-Missionen in SCHMAGER 2012) darstellt.

2 Schwerewellen

2.1 Schwingungen in der Atmosphäre

Der Begriff *Schwerewelle* hängt mit der Schwerkraft zusammen, welche über den Archimedischen Auftrieb in einer stabil geschichteten Atmosphäre Schwingungen von Luftpaketen in der Vertikalen ermöglicht. Hierbei spielt die sogenannte *Brunt-Väisälä-Frequenz* N eine wichtige Rolle. Diese verknüpft die Schwerebeschleunigung g mit dem vertikalen Gradienten der potenziellen Temperatur θ über:

$$N^2 = g/\theta \, d\theta/dz \quad (1)$$

Die Schwingungsdauer ergibt sich daraus zu $T = 2\pi/N$. Nehmen wir als praktisches Beispiel die in der Luftfahrt verwendete ICAO – Standardatmosphäre (ISA). In dieser ist $d\theta/dz = 3,5 \text{ K/km}$ und somit $N = 0,01 \text{ 1/s}$. Dies ist ein typischer Wert für N in einer stabil geschichteten Atmosphäre. Als Schwingungsdauer ergibt sich daraus: $T \approx 10$ Minuten.

Insgesamt ermöglicht der Archimedische Auftrieb (im englischen *buoyancy force* genannt) vertikale Schwingungen in einer stabil geschichteten Atmosphäre. Da Wellen salopp gesagt Schwingungen in Raum und Zeit sind, ergeben sich sogenannte Schwerewellen, wenn nicht nur ein isoliertes Luftpaket schwingt, sondern sich alle Luftpakete in einer stabilen Schichtung zu einer räumlich organisierten Schwingung zusammentun.

2.2 Gebirgswellen

2.2.1 Einführung

Gebirgswellen entstehen beim Überströmen einer stabil geschichteten Atmosphäre von möglichst quasi zweidimensionalen Bergrücken. Die Orografie dient dabei als Anregungsmechanismus für Schwerewellen, da die Luft am Luvhang zum Aufsteigen gezwungen wird und somit die zum Einsetzen der Schwingungen benötigte Auslenkung aus der Gleichgewichtslage erfährt. Ob nun im Lee eines angeströmten Gebirges auch tatsächlich Schwerewellen auftreten, hängt von vielen Faktoren ab. Neben der Mindestvoraussetzung einer stabilen Schichtung wird die Wellenbildung vom Vertikalprofil des Horizontalwindes sowie von Höhe, Breite und Form des Gebirges beeinflusst (DURRAN 2003). In den folgenden Abschnitten sei lediglich auf zwei Hauptformen eingegangen, die auch für die Luftfahrt von Interesse sind.

Zuvor gehen wir noch kurz auf den sogenannten *Scorer-Parameter* ein, der in der Wellendynamik eine wichtige Rolle spielt. Die Schwingungsfähigkeit der Atmosphäre als Voraussetzung für die Ausbildung von Schwerewellen wurde in Abschnitt 2.1 durch die *Brunt-Väisälä-Frequenz* N beschrieben. Bei den Gebirgswellen kommt als zweiter wichtiger Parameter die Windgeschwindigkeit der ankommenden Luftströmung hinzu. Der Einfachheit halber soll angenommen werden, dass der Wind seine Richtung nicht mit der Höhe ändert (eine zu starke Windrichtungsänderung führt zur Dämpfung von Schwerewellen die durch Gebirge angeregt werden). Die Anströmgeschwindigkeit sei im Folgenden mit $U(z)$ bezeichnet. In den Gleichungen zur Beschreibung von Schwerewellen kommen $N(z)$ und $U(z)$ in der Kombination N/U vor, die in der Literatur als *Scorer-Parameter* bezeichnet wird (nach dem britischen Mathematiker R. Scorer, der als einer der Ersten die Ausbildung von Leewellen beschrieben hat; SCORER 1949). Hier soll dieser Parameter mit S bezeichnet werden:

$$S(z) = N(z)/U(z) \tag{2}$$

Da der Scorer-Parameter in den relevanten Gleichungen in Form einer Wellenzahl auftritt kann diesem auch eine Wellenlänge zugeordnet werden, die hier als *Scorer-Länge* L_s bezeichnet werden soll:

$$L_s = 2\pi U/N \tag{3}$$

Die Scorer-Länge entspricht der Wellenlänge stationärer Schwerewellen in einer Strömung mit konstantem Wind U und konstanter Schichtung N . Um eine Vorstellung davon zu bekommen, welche Wellenlängen bei Schwerewellen typischerweise auftreten, ist in Tabelle 15-1 die Scorer-Länge für verschiedene Kombinationen von Schichtung (hier als Temperaturgradient $d\theta/dz$) und Windgeschwindigkeit U dargestellt.

$d\theta/dz$ (K/100m)	U (m/s)		
	10	20	30
0,35	6,3	12,6	18,9
1,0	3,5	7,0	10,5
3,0	2,0	4,0	6,0

Tab. 15-1: Scorer-Länge $L_s=2\pi U/N$ (in km) für verschiedene Kombinationen der thermischen Schichtung ($d\theta/dz$ in K/100 m) und der Windgeschwindigkeit (U in m/s). Der Temperaturgradient von 0,35 K/100m entspricht der ICAO-Standardatmosphäre.

Die Darstellung des vertikalen Verlaufs des Scorer-Parameters ist bei aktuellen Radiosondenaufstiegen und Modell-Temps numerischer Wettervorhersagemodelle über das Selbstbriefingsystem des DWD „pc_met“ (Software) und über Fachsysteme nationaler Wetterdienste (GGS NinJo ab Version 1.8) verfügbar und erlaubt somit eine Unterscheidung der Wellenformen (Kapitel 2.2.2 und 2.2.3).

Bei der Behandlung von gebirgsinduzierten Schwerewellen wird häufig auch die sogenannte *Froude-Zahl* (Fr) verwendet, die sich aus der Kombination des Scorer-Parameters S ($= N/U$) mit der Berghöhe H ergibt:

$$Fr = U/(HN) \tag{4}$$

Sie ermöglicht nach MASTELER und NILTON (2005) eine Differenzierung zwischen schwachen ($Fr \sim 0,3$) und starken Wellen ($Fr \geq 0,5$) sowie eine Aussage über die vertikale Ausdehnung des Wellensystems.

2.2.2 Vertikal propagierende Schwerewellen

Bei der Bestimmung der Wellenformen kommt es auf das Verhältnis der Scorer-Länge L_s zur Länge L des überströmten Berges an (DURRAN 2003).

Für den Fall $L_s \ll L$, der meist bei der Überströmung größerer Gebirge wie den Anden oder der Sierra Nevada auftritt, erhält man sogenannte vertikal propagierende hydrostatische Schwerewellen, die schematisch in Abb. 15-1 dargestellt sind. Dabei entsteht meist nur ein Wellenzug direkt über dem Gebirge, welcher allerdings sehr weit in die Troposphäre, unter günstigen Umständen sogar bis in die Stratosphäre, seine Energie transportieren kann. Dazu ist eine annähernde Höhenkonstanz des Scorer-Parameters S oder der Scorer-Länge L_s notwendig. Daher ist diese Wellenform für den Flugverkehr interessant, da sich dieser in solchen Höhenbereichen abspielt. Lenticularis-Wolken sind bei dieser Form nicht bestimmend. Vielmehr erscheint im oberen Bereich der Troposphäre ein markantes quasistationäres Cirrus-Band.

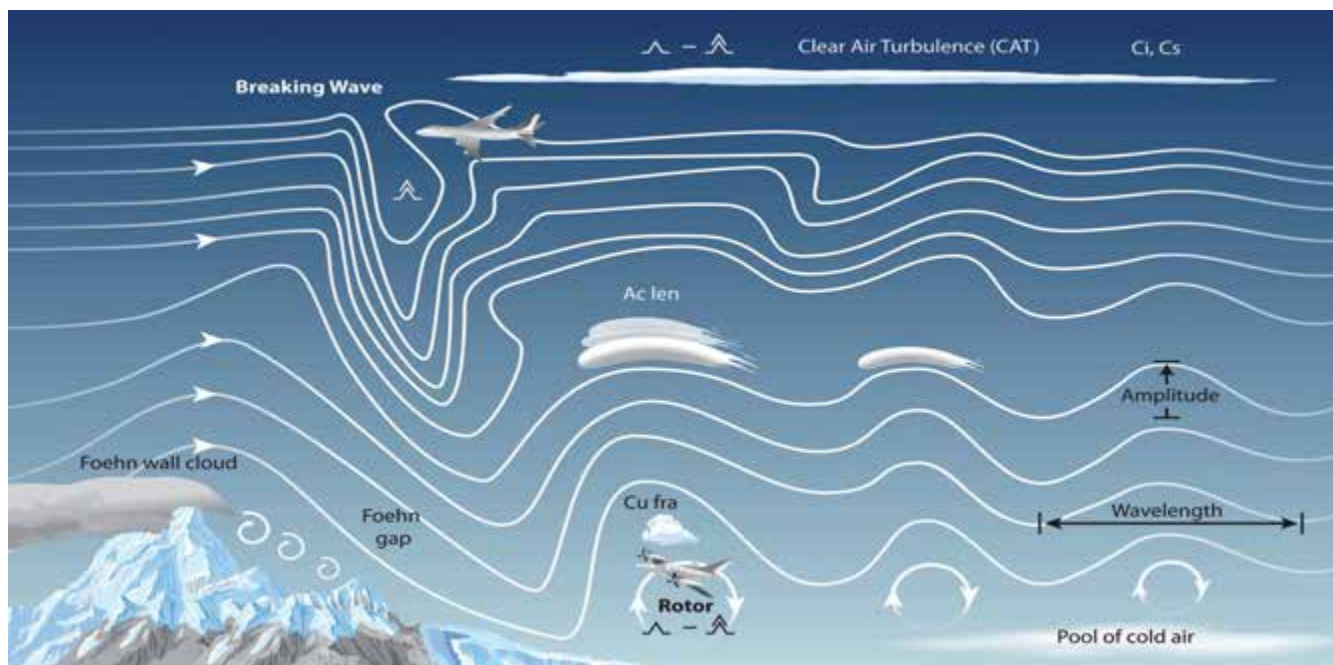


Abb. 15-1: Schema des Welle-Rotor-Systems im Lee von Gebirgen. Skizziert sind auch Gebiete, in denen eine Gefährdung des Luftverkehrs auftreten kann. Obere Bildhälfte: Turbulenz durch brechende Wellen meist der Clear Air Turbulence (CAT) zugeordnet; untere Bildhälfte: Rotorturbulenz im Bereich der Leewellen. Beide Turbulenzarten treten in der Praxis nicht gleichzeitig auf sondern getrennt bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen (siehe Text Kapitel 2). Copyright: Mountain Wave Project.

Das in Abb. 15-1 angedeutete Brechen von Schwerewellen ist dabei für den Flugverkehr von besonderem Interesse, da hierbei starke Turbulenzen (Clear Air Turbulence, CAT) auftreten, die zu erheblichen Schäden führen können. Von den zahlreichen Publikationen über das Durchfliegen von Gebieten mit CAT seien hier lediglich neuere Analysen zu brechenden Schwerewellen über den Alpen (JIANG und DOYLE 2004), den Rocky Mountains (WOLFF und SHARMAN 2008) sowie über Grönland (LANE et al. 2009) genannt. Als grobes Maß für das Auftreten von Wellenbrechen hat sich aus diesen Untersuchungen ein Wert für die Froude-Zahl von $Fr \approx 1,2$ ergeben.

2.2.3 Gefangene Schwerewellen (Leewellen)

Für den Fall $L_s \approx L$ treten sogenannte nicht-hydrostatische Schwerewellen auf, die sich sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen im Lee des Gebirges ausbreiten. Nimmt nun zusätzlich der Scorer-Parameter $S(z)$ mit der Höhe ab, was einer Zunahme der Scorer-Länge $L_s(z)$ entspricht, so treten sogenannte gefangene Wellen auf, wie in Abb. 15-1 dargestellt. Hiermit ist gemeint, dass sich die Wellen nur bis zu einer gewissen Höhe in der Vertikalen ausbreiten (typischerweise 5 bis 8 km) und darüber ausgedämpft werden. Dafür sind mehrere Wellenzüge im Lee des Gebirges möglich, wie auch auf dem Satellitenbild in Abb. 15-3 zu sehen. Entsprechend Tabelle 15-1 treten solche Wellenformen bevorzugt im Bereich kleinerer Gebirge wie zum Beispiel in den deutschen Mittelgebirgen auf.

Auch diese sogenannten Leewellen sind für den Flugverkehr von Interesse und zwar in verschiedener Hinsicht. Zum einen ermöglichen die ortsfesten Aufwindgebiete im Lee des Gebirges lange Flüge mit Segelflugzeugen (siehe

Kapitel 3), zum anderen stellen die mit dem Wellensystem im Bereich der atmosphärischen Grenzschicht verknüpften Rotoren (siehe Abb. 15-1) eine Gefahr für jede Art von Flugverkehr dar.

3 Schwerewellen und Segelflug

Bereits im PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al (2006) wurde auf die Entdeckung der Gebirgswellen durch Segelflieger in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts hingewiesen. Dabei wurde insbesondere die wissenschaftliche Auswertung von Wellenflügen durch KÜTTNER (1939) erwähnt. Die Erkenntnis, dass Gebirgswellen quasi stationäre Aufwindgebiete großer räumlicher Ausdehnung und langer Andauer für die Segelflieger bereitstellen, hat der Wellenfliegerei in den letzten Jahrzehnten eine Anzahl von Rekordflügen erlaubt, die vorher nicht für möglich gehalten wurden. Es sei hier der längste Segelflug aller Zeiten über 3009 km (Federation Aeronautique Internationale, FAI-Kategorie freie Distanz über 3 Wendepunkte, www.fai.org/igc-records) aus dem Jahr 2003 sowie der Rekord über eine freie gerade Strecke (OSTIV-Küttner-Preis, OSTIV = Organisation Cientifique et Technique Internationale du Vol a Voile) von 2123 km aus dem Jahr 2003 genannt, die beide vom deutschen Piloten Klaus Ohlmann gehalten werden. Diese Streckenrekorde wurden im Leewellensystem der Anden erfolgen und wären ohne eine zuverlässige Prognose der Gebirgswellen durch Meteorologen nicht möglich gewesen (siehe hierzu Abschnitt 4). Hierbei stellte der zuletzt erwähnte Weltrekordflug vom Süden Patagoniens bis in die Wellensysteme der Hochkordillere der Tupungato-Aconcagua-Region mit der Distanz von über 2000 km durch die optimale Nutzung von Jet Stream-Konstellationen eine be-

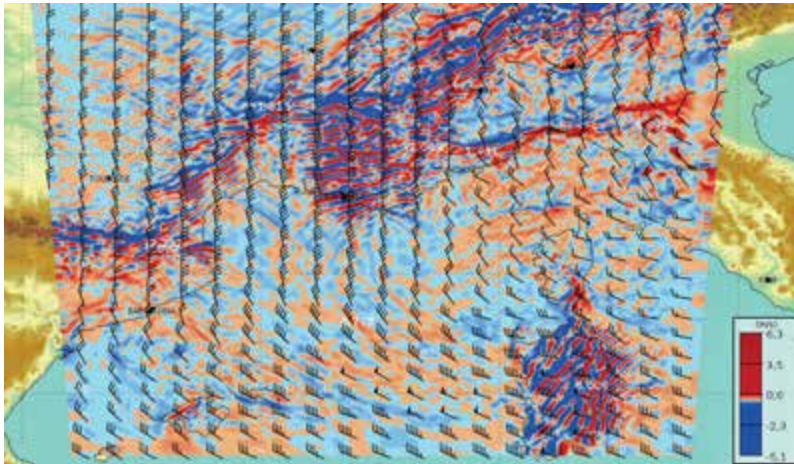


Abb. 15-2: Vorhersage der Vertikalgeschwindigkeit im Alpenraum für die Flughöhe FL100 für den 08.04.2012, 09 UTC, durch das RLMK-Modell des GeoInfoDBw (COSMO-DE/DWD).

sondere luftsportliche Herausforderung dar. Ein überzeugender Beweis des Verständnisses komplexer meteorologischer Prozesse und fliegerischer Fertigkeiten. Der räumliche und zeitliche Scale atmosphärischer Bewegungsformen hatte bis zu diesem Zeitpunkt zunächst Rekordflüge nur bis etwa 1500 km Streckenlänge vermuten lassen.

Auch der Höhenweltrekord über 15 460 m, im Jahr 2006 geflogen von Steve Fossett und Einar Enevoldson erfolgte im Aufwindbereich sehr hochreichender Gebirgswellen (siehe Abschnitt 3.2) im Lee der Anden. Bereits Joachim Küttner konnte 1955 im Rahmen des Jet Stream Projektes mit dem Segelflugzeug eine Höhe von 13 015 m erreichen und hält damit bis heute den Deutschen Höhenrekord. Im Rahmen des sogenannten PERLAN (Kunstwort für Perlmutterwolken) -Projektes (www.perlanproject.org) ist geplant, mit dem Segelflugzeug in die Stratosphäre in Höhen bis zu 27 km vorzudringen.

In Norddeutschland haben sich interessierte Wellenflieger im Projekt Mittelgebirgsleewelle (www.schwerewelle.de) zusammengeschlossen (DUMMANN 2009). Mit Hilfe von Vorhersagen von Meteorologen und der Routinemodelle COSMO-EU und COSMO-DE werden für Segelflieger Prognosen von Leewellen im Bereich der Norddeutschen Mittelgebirge wie Harz und Thüringer Wald erstellt. Im Gegenzug stellen die Piloten ihre Flugberichte zur Verfügung, so dass die Wellenvorhersage vor Ort verifiziert werden kann.

Die praktische Ausnutzung von Gebirgswellen für den Segelflug allgemein wird in OSTIV (2009) und HERTENSTEIN (2011) im Detail beschrieben. Neben den Leewellen werden von Segelfliegern auch solche Schwerewellen ausgenutzt, die durch Konvektionselemente (zum Beispiel Cumuluswolken) in einer konvektiven atmosphärischen Grenzschicht angeregt werden, wenn diese an die

darüber liegende Inversionsschicht stoßen. Diese in der Literatur als thermal waves oder convection waves bezeichneten Schwerewellen sind zum Beispiel in HAUF und CLARK (1989) beschrieben.

In einer anderen Dimension was die Größe der Gebirge und der durch sie ausgelösten Schwerewellen anbelangt, bewegt sich das Mountain Wave Project MWP (www.mountain-wave-project.com) der wissenschaftlichen und meteorologischen Sektion der OSTIV (ein assoziiertes Mitglied der FAI).

Unter der Leitung des Piloten und Meteorologen R. Heise und dem Rekordpiloten K. Ohlmann (über 50 Weltrekorde) sowie J. Hacker vom Airborne Research Australia wird das System Welle-Rotor in verschiedenen Gebirgsgegenden der Welt mit Hilfe von Hochleistungssegelflugzeugen, ausgerüstet mit modernster Messsensorik, wissenschaftlich untersucht. Ziel des Projektes ist es unter anderem, das Auftreten von Leewellen und Rotoren für die jeweiligen Gebiete zu dokumentieren und so eine Hilfestellung zur Ausnutzung der Wellenaufwinde und zur Vermeidung der gefährlichen Rotoren als Beitrag zur Erhöhung der Flugsicherheit zu geben. Die maximal von Ohlmann global beobachteten Vertikalgeschwindigkeiten in Wellen betrug in den letzten 40 Jahren etwa 19 m/s integriertes Steigen in 9000 m Höhe über der Cordillera del Viento (Argentinien), am Mt. Rosa (Italien) etwa 16 m/s und Pic de Bure (Frankreich) etwa 14 m/s. Zusätzlich erfolgten flugzeuggestützte Messkampagnen atmosphärischer Parameter (OSTIV, 2009, beziehungsweise Abb. 15-4 (b)). In Kombination mit entwickelten Wellenvorhersageverfahren erfolgten Planungen diverser Rekordflüge neuer Dimensionen wie zum Beispiel eingangs geschildert.

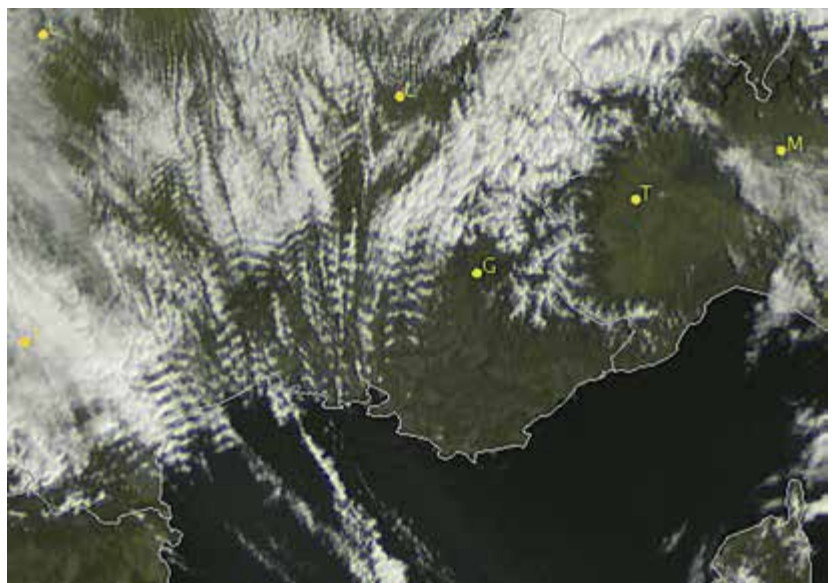


Abb. 15-3: METEOSAT 9-Satellitenbild (VIS) für den Vorhersagetermin in Abb. 15-2, 08.04.2012, 09 UTC (Quelle: EUMETSAT/DWD). Die Leewellen im Bereich der Alpen sind im linken Bildteil zu erkennen.

4 Vorhersage von Schwerewellen

Angesichts der vielen Faktoren, die bei der Entstehung von Schwerewellen im Bereich von Gebirgen eine Rolle spielen (siehe Abschnitt 2) besteht die effektivste Möglichkeit zur Vorhersage von Gebirgswellen in der Ausgabe entsprechender Parameterfelder als Produkt der numerischen Wettervorhersage. Hierbei kommt es auf die horizontale Gitterweite der Modelle an. Wenn ein atmosphärisches Phänomen einigermaßen durch die Modelle aufgelöst werden soll, muss dieses durch vier Gitterpunkte erfasst werden. Die Ausdehnung eines Wetterphänomens sollte somit größer als $4\Delta x$ sein, wobei Δx die Gitterweite des Modells ist. Anders ausgedrückt sollte die Gitterweite geringer als ein Viertel der Objektausdehnung sein. In Tabelle 15-1 wurden typische Wellenlängen von Schwerewellen aufgeführt. Diese liegen im Bereich 10 bis 20 km. Somit sollte die Modellauflösung weniger als 4 km betragen. Dies ist erst seit neuerem in der Routinevorhersage der Wetterdienste der Fall, beim DWD wird diese Bedingung durch das Modell COSMO-DE erfüllt (hier ist $\Delta x = 2,8$ km). In der Tat werden Schwerewellen durch das nichthydrostatische COSMO-DE-Modell aufgelöst wie das unten angeführte Beispiel eindrucksvoll zeigt.

Bei `pc_met` werden die Parameterfelder der Vertikalgeschwindigkeit für die einzelnen Höhen im Band von 500 m bis 8000 m für den Bereich Deutschland und den nördlichen Teil der Alpen beziehungsweise Alpenhauptkamm (COSMO-DE-Modellgebiet) seit einigen Jahren für Kunden der Luftfahrt bis zum Prognosezeitpunkt $T + 21$ h bereitgestellt.

Der Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeoInfDBw) verfügt in diesem Zusammenhang über die Fähigkeit das COSMO-DE außerhalb dieses Gebietes einzusetzen (Bezeichnung RLMK). Als Beispiel für den südlichen Teil der Alpen sei hier die Wellenvorhersage für den 08. April 2012 für FL 100 in Abb. 15-2 dargestellt. Es werden für große Teile der Alpen, für die Pyrenäen sowie Korsika bzw. Sardinien Schwerewellen vorhergesagt, wobei die maximalen Vertikalgeschwindigkeiten mehr als ± 6 m/s betragen! Ein solch starkes Wellenereignis müsste gut in den Wolkenformen auf Satellitenbildern zu sehen sein, wenn die Feuchteverhältnisse es erlauben. In der Tat zeigt das Satellitenbild in Abb. 15-3 für den gleichen Termin zahlreiche Schwerewellen im Bereich des Vorhersagegebietes. Damit kann für diesen Termin die Wellenvorhersage des RLMK/COSMO-DE bestätigt werden. Eine quantitative Verifikation hinsichtlich der Wellenstärke (Auf- und Abwinde) ist damit natürlich nicht möglich. Hier helfen nun die im Abschnitt 3 erwähnten Segelflieger, die sich anhand der Vorhersage großräumiger Wellenmuster von `pc_met` orientieren, die Wellenaufwinde erfliegen und optimal für Langstreckenflüge ausnutzen. Wellenflugberichte der Piloten und Daten des Global Navigation Satellite System (GNSS) Flight Recorder erlauben dann erste Verifikationen dieser neuen Modellparametervorhersagen. In diesem Fall ist

dies durch den MWP-Piloten Klaus Ohlmann geschehen, der an diesem Tag im dargestellten Wellengebiet in der Provence (Mt. Ventoux bis Pic de Bure) Wellenaufwinde von 5 bis 7 m/s beobachtete und im Rotor ein extrem turbulentes Steigen von bis zu ± 11 m/s vorfand. Dem Piloten gelang bei dieser Starkwindwetterlage (Mistral) in den Aufwindssystemen ein außergewöhnlicher Streckenflug mit einer Distanz von 1427 km.

Auch für den deutschen Mittelgebirgsraum kann die COSMO-DE-Vorhersage durch Segelflieger bestätigt werden. Deren Flugberichte werden regelmäßig unter www.schwerewelle.de veröffentlicht, wobei neben der Angabe der Gebiete von Wellenaufwinden besonders die aus den beobachteten Steigwerten der Flugzeuge abgeleiteten Werte der Vertikalgeschwindigkeiten in Leewellen interessieren.

5 Gefährdung des Flugverkehrs durch Schwerewellen

Die orographisch erzeugte Turbulenz hat einen erheblichen Einfluß auf die Flugsicherheit sowie die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Kapazitäten in der Luftfahrt. Im Zuge des weltweit zunehmenden Flugverkehrs und der Flugzeugdichte im Luftraum gewinnt dieser Sachverhalt zunehmend an Bedeutung. Neue Konzepte der Luftfahrt (*Next Generation Air Transportation System (NextGen)*, *Single European Sky ATM Research Program (SESAR)*) widmen sich demzufolge verstärkt Projekten der Turbulenzvorhersage. Turbulenz war gemäß der Auswertung des National Safety Transportation Board (2011) in den Jahren 2007 bis 2009 mit Abstand die meist verbreitete Unfallursache verschiedener Flugzeugtypen in den USA (1/3 aller Flugunfälle nach Part 121) und führte zu 29 schwerverletzten Passagieren beziehungsweise Crewmitgliedern. Von 1991 bis 2001 gab es in den USA 509 Flugunfälle durch Turbulenz davon 115 mit letalem Ausgang. Auf die Allgemeine Luftfahrt entfielen davon 416 Unfälle. 16 Fälle wurden hier der Ursache Leewellen (Mountain Wave) zugeordnet (NATIONAL AVIATION SAFETY DATA ANALYSIS CENTER 2004).

Neuere Untersuchungen zur Gefährdung des Flugverkehrs durch Schwerewellen wurden bereits in Abschnitt 2.2.2 zitiert.

Neben orografisch bedingten Schwerewellen spielen zunehmend auch solche Wellen eine Rolle in der Luftfahrt, die durch hochreichende Konvektionswolken (Cumulonimbus) angeregt werden. Die damit verbundenen Turbulenzerscheinungen werden in der Literatur unter dem Begriff *Convective Induced Turbulence (CIT)* zusammengefasst. Es fehlt hier der Platz, um das Problem CIT und Luftverkehr zu diskutieren. Hierfür verweisen wir auf den Übersichtsartikel von LANE et al. (2012).

Computergestützte Algorithmen des Autopiloten verschiedener Flugzeugmuster zeigen Schwierigkeiten bei

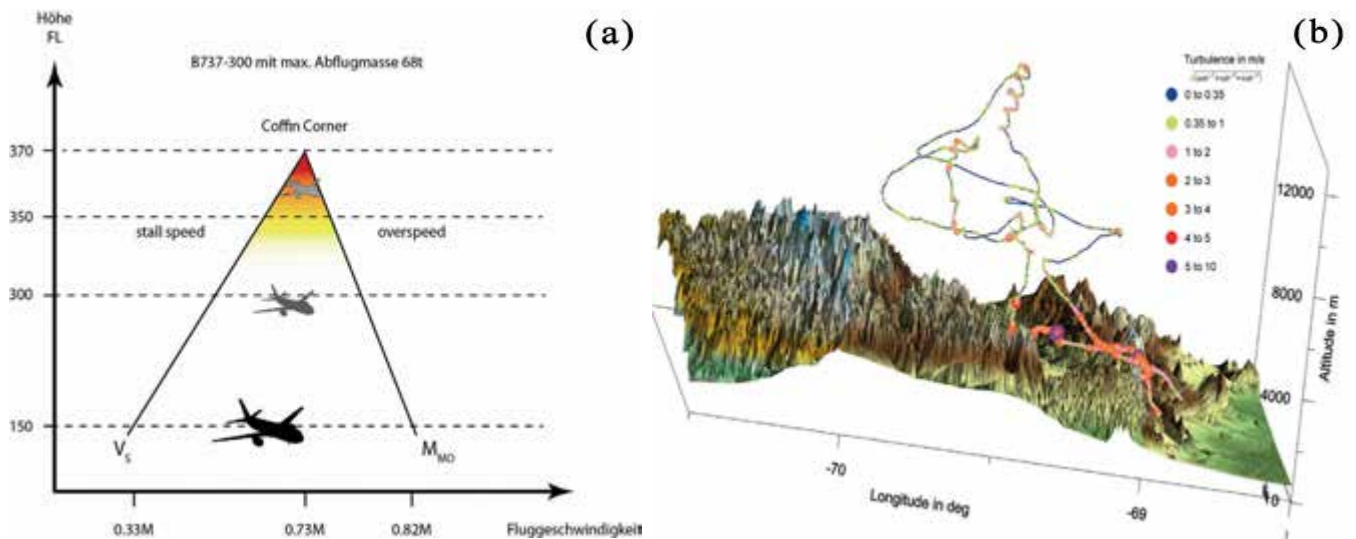


Abb. 15-4: (a) Skizzierter Zusammenhang der Annäherung der Mindest- (V_s - stall speed) und Maximalfluggeschwindigkeit (*maximum operational Mach Number*, MMo) einer Boeing B737-300 bei maximal möglicher Abflugmasse (68 t) und zunehmender Höhe. Bei Flügen in der Flughöhe kurz vor der *Coffin Corner* (englisch für „Sargecke“) besteht die Gefahr des Strömungsabrisses bei Kurvenflug und Turbulenz. (b) Turbulenzmessung mit BATprobe über dem Tupungato-Aconcagua bis 12 500 m Höhe im Rahmen der Forschungsexpedition des *Mountain Wave Project*. Im unteren Bereich vor allem bei den Rotoren wurde starke Turbulenz gemessen. In der Höhe in dem Wellensystem nur schwach bis mäßige Turbulenz. Quelle: Mountain Wave Project.

der Bewältigung der durch Schwerewellen verursachten starken horizontalen und vertikalen Windscherungen. Zahlreiche Zwischenfälle (Incident-Kriterien) belegen dieses Problem. Diese Reports sind von Seiten der Luftfahrzeughersteller und Luftverkehrsgesellschaften nicht öffentlich bzw. stark begrenzt zugänglich. Bei modernen Flugzeugen mit hoher aerodynamischer Güte (geringer Widerstand) kann bei zunehmender Gegenwindkomponente (die durch die von Wellen verursachten Windscherungen entsteht) unter Umständen die Zunahme der Fluggeschwindigkeit (engl. *indicated airspeed*) kritische Werte (*overspeed*) trotz Leerlaufstellung der Triebwerke erreichen. Je nach Regelungsprogramm der automatischen Triebwerkssteuerung (*auto thrust*) wird versucht diese Energie durch leichtes Hochziehen beziehungsweise ein sofortiges Verlassen der Flughöhe und Nutzung eines höheren Flight Levels abzubauen. Um bei Wellen mit kurzer Wellenlänge den Fluktuationen der Vertikalgeschwindigkeit (down- beziehungsweise updrafts) zu entgehen und den Passagierkomfort in der kommerziellen Luftfahrt zu gewährleisten, erfolgt meist ein Wechsel der Flughöhe. **Pilot Reports** (PIREP's) der Flugzeuge bilden hier weiterhin die Planungsgrundlage.

Der Zwischenfall BARREL (1987) belegt anschaulich die Bedeutung für die militärische Luftfahrt. Beim Abflug von der kanadischen Militärbasis Goose Bay geriet das Tankflugzeug VC-10 der Royal Air Force in extrem turbulente Wellensysteme mit starken Nick- und Rollmomenten des Luftfahrzeugs. Die Einhaltung des Flugregimes (Klappenstellung und Triebwerksleistung) in den vorgegebenen Grenzwerten war durch starke Fluggeschwindigkeitsänderungen bedingt durch Windscherungen nahezu unmöglich. Es bestand die unmittelbare Gefahr dass das Lastvielfache des Flugzeugs überschritten wird. Die Aussage des Piloten „die Beherrschung des Luftfahrzeugs hing am seide-

nen Faden“ verdeutlicht die Dramatik im Cockpit. Zudem bedeutet eine Veränderung des Flugzeugschwerpunktes durch eine Lageverschiebung der Fracht beziehungsweise Transportgutes durch starke Turbulenzen eine Limitierung der Einsatzfähigkeit. Eine besondere Bedeutung kommt diesem Fakt bei taktischen Flügen der militärischen Luftfahrzeuge zu.

Bei brechenden Wellen (siehe Abb. 15-1) werden oft Strukturschäden an der Flugzeugzelle beobachtet. RALPH et al. (1997) untersucht in dem Zusammenhang die extreme Turbulenz einer brechenden Welle über den Rocky Mountains, die zum Verlust eines Triebwerks und Beschädigungen an der Flugzeugflächenspitze einer DC-8 mit Notlandung in Denver führte.

Abb. 15-4 (a) verdeutlicht die fliegerische Herausforderung für Piloten in Wellensystemen mit ihren starken vertikalen Windscherungen. Im Vergleich sind in Abb. 15-4 (b) Turbulenzmessungen des Mountain Wave-Projekt über den Anden bis 12 500 m Höhe dargestellt. Im unteren Höhenbereich (bis FL 250) steht dem Luftfahrzeugführer ein relatives breites Geschwindigkeitsband zwischen Mindestfluggeschwindigkeit und Höchstgeschwindigkeit zur Verfügung. Der starken Turbulenz kann durch Fluggeschwindigkeits- beziehungsweise Triebwerksleistungsveränderungen begegnet werden. Mit zunehmender Höhe verringert sich dieses Band und bei der dort vorhandenen Turbulenz mit nur schwacher bis mäßiger Intensität (Abb. 15-4 (b)) ist der Pilot weiterhin gezwungen, das Luftfahrzeug in seinem verfügbaren Geschwindigkeitsregime beziehungsweise im Flight Level zu halten. Zusätzliche Erläuterungen zur aerodynamischen Thematik „Coffin Corner“ am Beispiel der Parameter einer Boeing B737 kann DÖRNBRACK et al. (2006) entnommen werden.

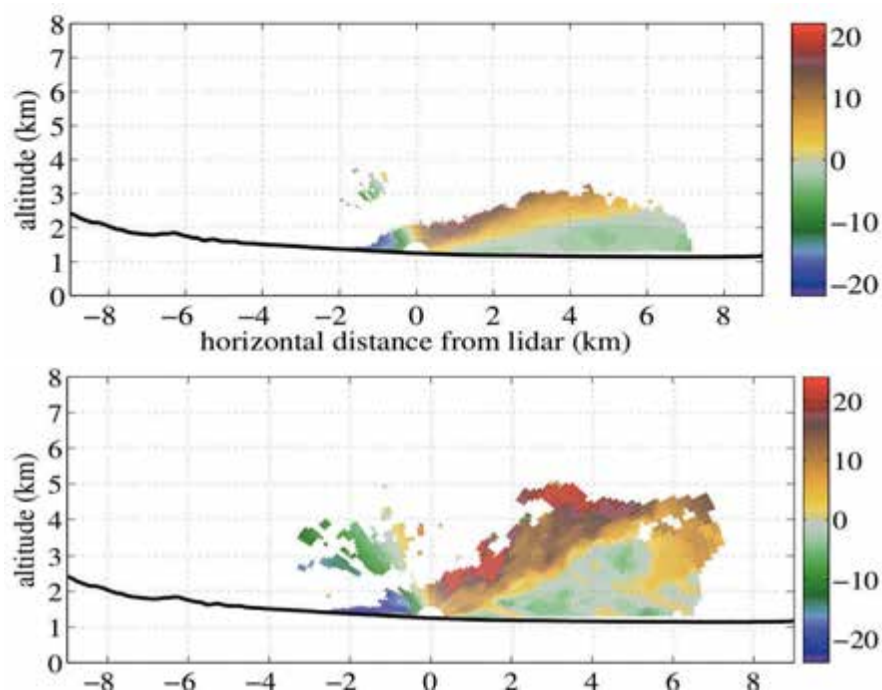


Abb. 15-5: Beobachtung eines Rotors mit dem Doppler-Lidar des DLR während der Feldmesskampagne T-REX. Dargestellt ist die Radialkomponente der Windgeschwindigkeit. Positive Werte: vom Lidar weg, negative Werte: zum Lidar hin. Farbskala: Windgeschwindigkeit in m/s. Im oberen Bildteil ist das 10-Minuten-Mittel der Windmessungen dargestellt. Die Lage des Lidar ist durch den Halbkreis bei 0 km angedeutet. Man erkennt sehr schön das Rückströmen im unteren Teil des Rotors (grünliche Farben). Im unteren Bildteil ist eine Momentaufnahme des Windfeldes dargestellt, bei der die turbulente Struktur der Rotorströmung zum Ausdruck kommt. Quelle: DLR.

6 Rotoren

6.1 Einführung

Rotoren sind horizontale Wirbelwalzen in der atmosphärischen Grenzschicht unterhalb der Leewellen wie in Abb. 15-1 skizziert. Im Gegensatz zu den glatt erscheinenden Lenticularis Wolken im oberen Bereich der Wellen (siehe Abb. 15-1) wo der Wind im eigentlichen Sinne durchweht, verursachen Rotoren stark zerklüftete Kumuluswolken (englisch *cloud puffs*). Die Entdeckung der äußerst turbulenten Luftströmung in Rotoren durch den Segelflieger W. Hirth in Schlesien wurde bereits im PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al. eindrucksvoll beschrieben. Auch KÜTTNER (1939) hat bei seiner Kartierung der Leewellen des Riesengebirges die Lage der Rotoren identifiziert (siehe Abb. 3-8 in DÖRNBRACK et al.).

Das erste große Feldexperiment zur Erforschung von Leewellen und Rotoren fand im Jahr 1955 im Bereich des Owens Valley im Lee der Sierra Nevada statt (*Sierra Wave Project*, siehe WHELAN 2000). Das Foto

eines dabei aufgetretenen gewaltigen Rotors der im Lee der Sierra Nevada im Owens Valley bis über 6000 m den Sand aufwirbelte und dem Piloten eines zweimotorigen Kampfflugzeuges (Gesamtgewicht 7 t) vom Typ Lockheed P-38 das Segeln ohne Motorkraft in der Aufwindseite bis 30 000 ft (9144 m) ermöglichte (WHELAN 2000), findet sich in vielen Publikationen zum Rotorproblem (zum Beispiel DALE und DURRAN 2004). Das Folge-Experiment T-REX (*Terrain-induced Rotor Experiment*) wurde 50 Jahre später an gleicher Stelle durchgeführt (GRUBISIC et al., 2008). Bei diesem Experiment wurde auch ein Doppler-Lidar des DLR Oberpfaffenhofen eingesetzt (KÜHNLEIN et al. 2013). Ein Beispiel der Lidar-Messungen für einen Rotorfall ist in Abb. 15-5 dargestellt.

Außer in den genannten Feldexperimenten ist das Rotorproblem hauptsächlich durch eine große Anzahl von numerischen Simulationen behandelt worden, von denen hier nur diejenigen von DOYLE und DURRAN (2004) und VOSPER (2004) genannt werden sollen. Im Wesentlichen hat sich dabei ergeben, dass die Rotoren durch ein Zusammenspiel der Leewellen mit der turbulenten Reibung in der Grenzschicht entstehen. Die Untersuchung von VOSPER hat darüber hinaus den Einfluss einer abgehobenen Inversion bei der Rotorbildung hinter typischen Mittelgebirgen aufgezeigt. Es sind zwar auch Rotoren im

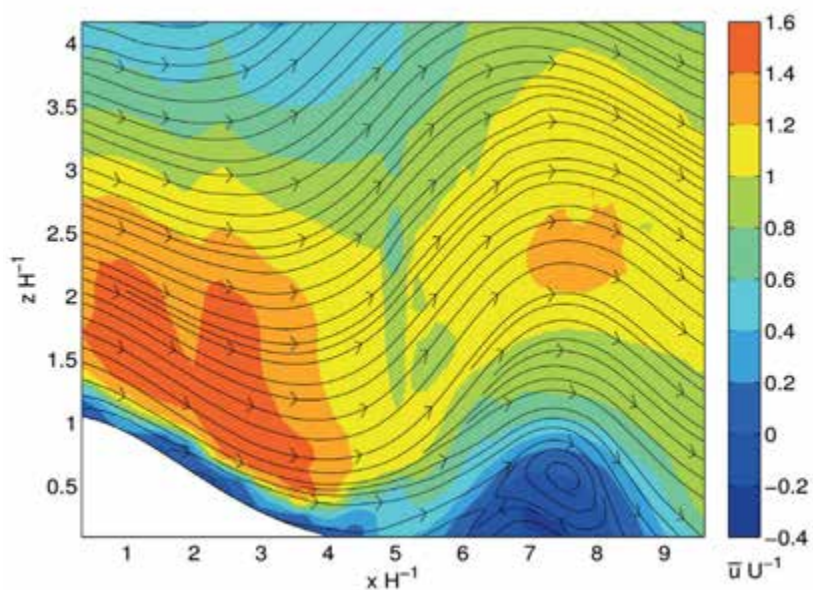


Abb. 15-6: Darstellung einer Rotorströmung aus Laborexperimenten in einem geschichteten Wassertank. Stromlinien (schwarz) und Geschwindigkeitsfeld (farbig). Die Ortsangaben sind mit der Berg- (Hindernis-) Höhe H normiert, das Geschwindigkeitsfeld mit der freien Anströmung U . Quelle: Knigge (2012).

Wellensystem oberhalb der Grenzschicht in solchen Simulationen gefunden worden (siehe DÖRNBRACK et al. 2006), wir beschränken uns aber hier auf die Grenzschichtrotoren, da sie für die Luftfahrt von besonderem Interesse sind.

Die Strömungsverhältnisse in Rotoren sind in den oben erwähnten numerischen Simulationen dargestellt. Wir zeigen hier Ergebnisse von Laborexperimenten zu Leewellen und Rotoren (KNIGGE 2012), aus denen die Rotorstruktur auch sehr schön ersichtlich ist. Die Analyse des Strömungsfeldes mittels PIV (*Particle Image Velocimetry*) ist in Abb. 15-6 dargestellt. Man erkennt die hohen Windgeschwindigkeiten am Leehang vor dem Eintritt in den Rotor und die Rückströmung in Richtung Hindernis (Berg) im unteren Teil der Grenzschicht.

6.2 Vorhersage von Rotoren

Soweit den Autoren bekannt ist, wird für die Luftfahrt noch keine routinemäßige Vorhersage für das Auftreten von Rotoren erstellt. Aus den Erfahrungen der Segelflieger kann aber angenommen werden, dass Leewellen im Bereich der Gebirge je nach Höhe des Hindernisses weit im Lee praktisch immer mit Rotoren unterhalb der Gipfelhöhe verbunden sind. Somit könnte eine Leewellenvorhersage (siehe Abschnitt 4) im Prinzip auch als Rotorvorhersage aufgefasst werden, wobei über die Stärke der Rotoren (außer bei den empirischen Daten) noch keine Information vorliegen. Diese ließe sich möglicherweise aus den Daten des COSMO-DE-Modells extrahieren, da dort die Grenzschicht, in welcher die Rotoren auftreten, gut aufgelöst ist. Testrechnungen mit dem Modellparameter turbulente kinetische Energie (TKE) und Vertikalwindwerten (V_z) auf Grundlage des RLMK/COSMO-DE wurden bereits in diesem Zusammenhang durch die Autoren durchgeführt. Erste Ergebnisse demonstrieren einen erfolgsversprechenden Ansatz.

Auf Grundlage von Pilotenmeldungen hat zudem das Mountain Wave-Projekt global über 200 empirische Rotorpositionen katalogisiert (Koordinaten, Vertikalgeschwindigkeiten, Rotorhöhe, Turbulenzklassifikation) und in einem Vektordatensatz zusammengefasst.

6.3 Gefährdung des Flugverkehrs durch Rotoren.

Wie bereits bei der Entdeckung der Rotoren als Teil des Leewellensystems durch Segelflieger festgestellt, ist die Luftströmung in Rotoren außerordentlich turbulent, besonders im Vergleich zur quasi laminaren ruhigen Strömung in den oberhalb gelegenen Wellen. Im PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al. wurde die Auswirkungen von Rotoren auf die zivile Luftfahrt am drastischen Beispiel eines Lufthansa Flugs nach Bilbao demonstriert. Hier kam es nicht nur zu Turbulenzen hinsichtlich der Vertikalbewegung sondern auch zu extremen horizontalen Windscherungen im Bereich von 20 bis 30 kn während des Landeanflugs welcher durch den Rotor erfolgte.

Zusammengefasst gibt es folgende Auswirkungen auf Luftfahrzeuge bei der Passage von Rotoren:

- Starke abrupte Geschwindigkeits- und Fluglageänderungen meist verbunden mit Windscherungswarnungen der Flugüberwachungssysteme,
- Richtungsstabilität und Rollmomente bei Starts und Landungen durch abrupte Windrichtungs- und Geschwindigkeitsänderungen (siehe Unfallbericht B737-500 auf dem Flughafen Denver; National Transportation Safety Board 2010),
- Reduzierung der Steiggeschwindigkeit beim Start, Gefahr markanter Abwinde beziehungsweise Hindernisberührung,
- die Windgeschwindigkeit am Boden kann in Verbindung durch Rotoren und Föhnsturm das zwei- bis dreifache der Windgeschwindigkeit gegenüber der Windgeschwindigkeit in Bergkammhöhe betragen (siehe Flugzwischenfall VC-10; BARREL 1987),
- durch die Turbulenzen ist die Ablesbarkeit der Instrumente im Cockpit stark eingeschränkt,
- bei Hubschraubern birgt die Gefahr des Einfluges in einen Rotor im Gebirge, dass die Auf- und Abwinde durch die Leistung nicht kompensiert werden kann. Zusätzlich ist ein Hubschrauber im Schwebезustand (Rettungseinsätze im Gebirge) sehr böenanfällig.

Die wirbelwalzenförmige Strömung produziert Auf- und Abwindgebiete mit Vertikalgeschwindigkeiten im Mittelgebirge bis maximal ± 3 m/s und im Hochgebirge von $\pm 5-10$ m/s, in Extremfällen und orographischen begünstigten Regionen bis $\pm 12-15$ m/s.

Allgemein besteht die Gefahr des Kontrollverlustes der Manövrierfähigkeit des Piloten bei Low Level-Flügen und die Gefahr der Bodenberührung (*flight into terrain*) bei der allgemeinen Luftfahrt und militärischen Flügen (Nickbewegungen beim taktischen Tiefflug). Zusätzlich wird bei Turbulenzereignissen beim Überschreiten der Betriebsgrenzen des Luftfahrzeuges eine aufwendige Wartungs- und Instandhaltungsprüfung (*maintenance check*) notwendig.

7 Ausblick

Schwerewellen in der oberen Atmosphäre und Rotoren im Bereich der Grenzschicht werden auch in Zukunft den Flugverkehr vor Herausforderungen stellen. Allerdings nimmt die Vorhersagbarkeit dieser Phänomene und damit deren Vermeidbarkeit aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren zu. Dies liegt einerseits am verbesserten Verständnis von Schwerewellen und Rotoren durch zahlreiche Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet, wie zum Beispiel dem erwähnten Rotor-Experiment T-REX. Zum anderen verbessert sich die Auflösung der numerischen Wettervorhersagemodelle immer weiter, so dass die atmosphärischen Erscheinungen Schwerewellen und Rotoren demnächst direkt als skalige Prozesse vorhergesagt werden können. Dies ist teilweise schon heute beim DWD-Modell COSMO-DE der Fall. Bisherige empirische Ansätze in der Flugwetter-

beratung und Parametrisierungen in den Vorhersagemodellen, die zum Beispiel auf Kriterien wie kritischer Froude- oder Richardsonzahl beruhen, können dann durch direkte Auflösung von Schwerewellen und Rotoren in den Modellergebnissen zunehmend ersetzt werden.

Literatur

- BARREL, G.R., 1987: In der Leewellenströmung- ein Zwischenfall mit einer Lehre. *Flugsicherheit*, Fachliche Mitteilung für fliegende Verbände der Bundeswehr 1, 15-18.
- DOYLE, J.D., D.R.DURRAN, 2004: Recent developments in the theory of atmospheric rotors. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **85**, 337-442.
- DÖRNBRACK, A., R.HEISE, J.P.KÜTTNER, 2006: Wellen und Rotoren. *Promet* **32**, Heft 1/2, 18-24.
- DUMMANN, J., 2009: A report on glider-pilot activities to document leewave events in northern Germany and their aims. *Technical Soaring* **33**, 109-116.
- DURRAN, D.R., 2003: Lee waves and mountain waves. In: Holton, J.R., J.A.Curry. eds.; *Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Elsevier Science*, 1161-1169.
- GRUBISIC, V., und 14 Koautoren, 2008: The terrain-induced rotor experiment. A field campaign overview including observed highlights. *Bull.Amer.Meteorol.Soc.* **89**, 1513-1533.
- HAUF, T., T.L.CLARK, 1989: Three-dimensional numerical experiments on convectively forced atmospheric gravity waves. *Q.J.Royal.Meteorol.Soc.* **115**, 309-322
- HERTENSTEIN, R., 2011: Riding on air. Ridge, Wave and Convergence Lift. *Soaring Books and Supplies*, Minneapolis, USA, 103 pp.
- JIANG, D., J.D.DOYLE, 2004: Gravity wave breaking over the central ALPS: Role of complex terrain. *J.Atmos.Sci.* **61**, 2249-2266.
- KNIGGE, C., 2012: Untersuchungen von atmosphärischen Gebirgsrotoren mit Hilfe von Laborexperimenten und Grobstruktursimulationen. Dissertation, Fakultät Mathematik und Physik, *Leibniz Universität Hannover*, 155 Seiten.
- KÜHNLEIN, C., A. DÖRNBRACK, M. WEISSMANN, 2013: High resolution Doppler-Lidar observations of transient downslope flows and rotors. *Mon.Wea.Rev.* **141**, 3257-3272.
- KÜTTNER, J., 1939: Moazagotl und Föhnwelle. Beitr. *Phys. fr. Atmos.* **25**, 79-114.
- LANE, T.P., J.D.DOYLE, R.D.SHARMAN, M.A, SHAPIRO, C.D.WATSON, (2009): Statistics and dynamics of aircraft encounters of turbulence over Greenland. *Mon. Wea.Rev.* **137**, 2687-2702.
- LANE, T.P. und 4 Koautoren, 2012: Recent advances in the understanding of near cloud turbulence. *Bull. Amer.Meteorol.Soc.* **93**, 499-515.
- MASTELER, R., N.RENNO, 2005: The Froude Number as a Predictor of Mountain Lee Wave Phenomenon. *Technical Soaring* **29**, No 3., 78-88.
- NAPPO, C., 2012: Introduction to atmospheric gravity waves. Second Edition, Academic Press, London, 400 pp.
- NATIONAL AVIATION SAFETY DATA ANALYSIS CENTER, 2004: Review of Aviation Accidents Involving Weather Turbulence in the United States 1992-2001, NASDAC, 31 pp.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2010: Runway Side Excursion during Attempted Take-off in Strong and Gusty Crosswind Conditions, B737-500, Denver, Colorado, Dec 20, 2008, NTSB/AAR-10/04.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2011: Review of U.S. Civil Aviation Accidents 2007-2009, NTSB/ARA-11/01, 58 pp.
- OSTIV, 2009: Weather forecasting for soaring flight. *WMO* **1038**, World Meteorological Organization, Genf, 64 pp.
- RALPH, F.M., P.J.NEIMAN, 1997: Lidar Observations of a breaking mountain wave associated with extreme turbulence. *Geophys. Res. Letters* **24**, 663-666.
- SCHMAGER, G., 2012: Beobachtung interner Schwerewellen durch U34 – eine Auswertung aus ozeanographischer Sicht, Fortbildungsunterlage Abteilung Geoinformationswesen des Marinamtes der Bundeswehr.
- SCORER, R.S., 1949: Theory of waves in the lee of mountains. *Quart.J.R.Meteorol.Soc.* **75**, 41-56.
- SUTHERLAND, B.J., 2010: Atmospheric gravity waves. *Cambridge University Press*, Cambridge, 394 pp.
- VOSPER, S.B., 2004: Inversion effects on mountain lee waves. *Q.J.R.Meteorol.Soc.* **130**, 1723-1748.
- WHELAN, R.F., 2000: Exploring the monster. Mountain lee waves: The aerial elevator. *Wind Canyon Books*, Niceville, Florida, 196 pp.
- WOLFF, M.G., R.D.SHARMAN, 2008: Climatology of upper-level turbulence over the contiguous United States. *J.Appl.Meteor.Climatol.* **47**, 2198-2214.