

A. DÖRNBRACK, R. HEISE, J. P. KUETTNER

# 3 Wellen und Rotoren

## Waves and rotors

### Zusammenfassung

Die Strömung über Gebirgskämme regt regelmäßig Wellenbewegungen über dem Gebirge und in seinem Lee an, deren Kämme bei geeigneten Feuchtigkeitsverhältnissen durch stationäre Lenticularis-Wolken markiert sind. In Bodennähe können sich dabei auch Rotorströmungen mit einer horizontalen Achse parallel zum Gebirgskamm ausbilden. Dieser Beitrag skizziert Meilensteine der Vermessung und numerischen Simulation dieser für die Fliegerei sehr relevanten Phänomene aus einem Zeitraum von nicht weniger als 70 Jahren.

### Abstract

Flow across mountain ridges regularly induces wave motions above the mountains and on their lee side, the crests of which are marked by lenticular clouds in suitable moisture conditions. Near the ground rotor flows around a horizontal axis parallel to the ridge are also possible. This contribution collects milestones for the measurement and numerical simulations of these phenomena with direct relevance for aviation from a period of no less than 70 years.

## 1 Einleitung

Im Frühjahr 2006 wird in und über der Sierra Nevada (USA) das **Terrain-Induced Rotor Experiment (T-REX)** stattfinden. Diese Feldkampagne wird bodengebundene Messsysteme und Forschungsflugzeuge zusammenführen, um die Struktur von Rotoren im Lee der Sierra Nevada und die durch die Gebirgsüberströmung angeregten Schwerewellen, deren Instabilitäten und das Wellenbrechen bis hinein in die Stratosphäre zu untersuchen. Der Ort im Owens Valley und die Jahreszeit von T-REX sind identisch mit den in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts durchgeführten Sierra Wave Project und dem Mountain-Wave Jet Stream Project (GRUBIŠIĆ und LEWIS 2004). Dieser Artikel versucht, die heutigen wissenschaftlichen Fragestellungen von T-REX aus den Ergebnissen vergangener Kampagnen und aktueller Anforderungen zu erklären und dabei die Höhepunkte der Rotorforschung der vergangenen Jahrzehnte aufzuzeigen. Zuerst einmal gehen wir der Frage nach:

## 2 Was sind Rotoren?

Rotoren sind Wirbel mit horizontalen Rotationsachsen parallel zu einem Gebirgskamm, die sich in der unteren Atmosphäre bei der Überströmung im Lee von Gebirgen bilden. Rotoren, auch Wirbelwalzen genannt, entwickeln sich nur, wenn die Anströmgeschwindigkeit senkrecht zum Hindernis hinreichend groß ist. Die Struktur und Entwicklung von Rotoren sind sowohl mit den über ihnen liegenden Leewellen als auch mit turbulenten Ablöseprozessen in der Grenzschicht verbunden.

Eine erste anschauliche Schilderung dieses gekoppelten Systems Welle-Rotor findet man in dem Buch „Die

hohe Schule des Segelfluges“ (Verlag Klasing & Co., Berlin 1933), aufgeschrieben von W. HIRTH nach dem Segelflug, der zur Entdeckung der Leewellen und der Rotoren unter der Moazagotl-Wolke am Riesengebirge (Abb. 3-1) führte:

*„Als nach einer halben Stunde die Vorbereitungen beendet waren, folgte der aufregendste Schlepstart meines Lebens. Durch eine außerordentlich verwirbelte Luft ging es in niedriger Höhe über Baumwipfel, Hochspannungsleitungen und Schornsteine. Kaum hatten wir uns 50 m erkämpft, warf uns eine Bö wieder auf 20 m herab. Die Motormaschine vor mir tanzte wie ein wildgewordenes Pferd. Wohl zehnmals war ich nahe daran, die Verbindung zu lösen. Aber ein schwerer Sturz der Motormaschine, durch das herabhängende Seil verursacht, hätte die Folge sein können. Also hieß es die Zähne zusammenbeißen und aushalten. Endlich, nach fünf schweren Minuten, waren 100 m Höhe gewonnen. Nun folgte eine Periode schnellen Steigens bis in 800 m Höhe ... Die Unruhe der Luft war auch in dieser Höhe außerordentlich, aber nicht mehr so gefährlich wie in der Nähe des Bodens.“*



Abb. 3-1: Das Moazagotl des Riesengebirges, fotografiert am 11. Dezember 1936. Blick von Grunau nach Süden der Strömung entgegen (zur Orientierung siehe Abb. 3-8). Die mehrfache Schichtung und die laminierte Wellenstruktur der Lenticularis-Wolke sind erkennbar; darunter die Föhnmauer und die in der Wirbelwalze durch starke Turbulenz zerrissenen Cumuli fracti (aus KÜTTNER 1938).

Diese Schilderung legt eine ausgeprägte vertikale Zweiteilung der Atmosphäre nahe: eine bodennahe, turbulente Grenzschicht und darüber eine ruhigere, oft laminare Schicht, in der Wellenflüge möglich sind. Basierend auf zahlreichen Beobachtungen und theoretischen Untersuchungen wissen wir, dass das Auftreten dieser Leewellen im wesentlichen durch zwei atmosphärische Parameter bestimmt wird: die thermische Schichtung der Atmosphäre, charakterisiert durch die BRUNT-VÄISÄLÄ Frequenz  $N$  ( $N^2 = g/\Theta_0 d\Theta_0/dz$ , mit der potentiellen Temperatur  $\Theta_0$ ), und die horizontale Windgeschwindigkeit  $U_0$ , wobei der Index „0“ einen ungestörten Zustand stromauf eines Hindernisses kennzeichnen soll.

Basierend auf der linearen Wellentheorie einer homogen Anströmung (konstantes  $N$  und  $U_0$ ) kleiner Berge leiteten QUENEY (auf der f-Ebene) und LYRA (für die nichtrotierende Atmosphäre) in den 30er und 40er Jahren des 20. Jahrhunderts Bedingungen ab, unter denen sich Wellen vertikal in die Atmosphäre ausbreiten können (GILL 1982). Für die nicht-rotierende Atmosphäre muss die Bedingung  $k < \ell$  ( $k = 2\pi/\lambda_x$  ist die horizontale Wellenzahl des Hindernisses und  $\ell \approx N/U_0$  ist der SCORER-Parameter) erfüllt sein; nur unter diesen Bedingungen erlauben die linearisierten Bewegungsgleichungen vertikal propagierende Wellen (siehe auch: SMITH 1979). Schreibt man diese Bedingung  $k < \ell$  (d. h. breitere Hindernisse, oder alternativ größere Stabilität und geringere Windgeschwindigkeit) in der Form  $U_0 k < N$  auf, wird physikalisch sofort deutlich, dass propagierende Wellen vor allem bei starker stabiler Schichtung auftreten.

Löst ein Bodenhindernis bei stationärer Anströmung Schwerewellen aus, die in einer bodennahen Schicht durch Totalreflexion gefangen werden, können horizontal mehrere Wellenzüge auftreten. Wegen ihrer Position im Lee des Hindernisses werden diese als Leewellen bezeichnet. SCORER (1949) berechnete als erster Bedingungen für das Auftreten von Leewellen für vertikal veränderliche Profile  $U_0(z)$  und  $N(z)$ . Für eine Atmosphäre, bestehend aus zwei übereinanderliegenden Schichten mit jeweils konstanten SCORER-Parametern  $\ell_U$  und  $\ell_O$ , leitete SCORER folgende Bedingung für das Auftreten von Leewellen ab:  $\ell_U^2 - \ell_O^2 > \pi^2/4H^2$ , wobei  $H$  die Dicke der unteren Schicht ist. Neben dem Vorhandensein eines starken Horizontalwindes ist das Auftreten von Leewellen also vor allem mit einer Veränderung der Dichteschichtung als Funktion der Höhe verbunden, was sich in der Abnahme des SCORER-Parameters  $\ell(z)$  mit der Höhe widerspiegelt.

Die zweidimensionale Überströmung eines breiten Hügels wird für diese idealisierte Situation in Abb. 3-2 dargestellt. Die Muster der Isentropen (Linien konstanter potentieller Temperatur  $\Theta$ ) lassen auf Leewellen und Rotoren schließen. Die Rechnungen wurden mit dem anelastischen, nichthydrostatischen Modell

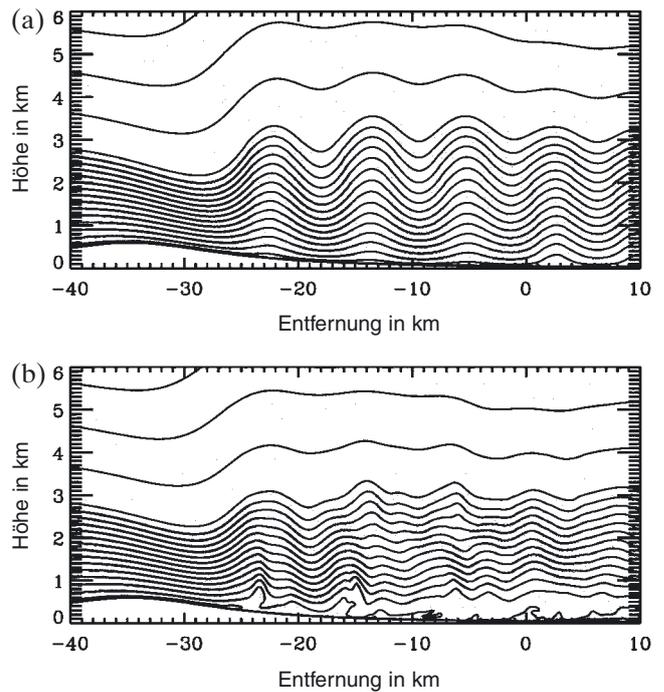


Abb. 3-2: Potentielle Temperatur ( $\Delta\Theta=1$  K) nach 2 h Integrationszeit für eine idealisierte, trockene 2D-Simulation der Überströmung eines 600 m hohen Berges ohne (a) und mit (b) innerer Reibung. Die ungestörten Anfangsbedingungen  $U_0$  und  $\Theta_0$  sind für beide Rechnungen identisch. Die thermische Schichtung ist durch schichtweise konstante Werte der BRUNT-VÄISÄLÄ Frequenz gegeben:  $N_U=0,025$  s<sup>-1</sup> für  $z < H=3$  km und  $N_O=0,01$  s<sup>-1</sup> darüber; der Horizontalwind  $U_0$  beträgt 25 m/s für alle Höhen ab 600 m über Grund, darunter fällt  $U_0$  linear auf 0 m/s bis zum Boden ab. Die räumliche Auflösung beträgt  $\Delta z=20$  m und  $\Delta x=200$  m; der Zeitschritt ist  $\Delta t=0,5$  s.

EULAG durchgeführt (GRABOWSKI und SMO-LARKIEWICZ 2002). Wie man sich leicht überzeugen kann, sind für diese Rechnungen SCORER's Bedingung gut erfüllt, und es bilden sich Wellen im Lee des Hindernisses aus. Rotoren (charakterisiert durch die sich überschlagenden Isentropen – „reversed flow“ – in Bodennähe) entstehen jedoch nur, wenn die Simulationen mit innerer Reibung und einer Haftbedingung am Boden durchgeführt werden. Besonders eindrucksvoll ist zu erkennen, dass die reibungsbehaftete Strömung eine turbulente atmosphärische Grenzschicht ausbildet, in der man vielleicht ähnliche Auf- und Abbewegungen erleben könnte, wie die von W. HIRTH geschilderten.

In der Natur hängt die Entwicklung und Stärke von Rotoren u. a. sehr stark von der Bodenbeschaffenheit ab. DOYLE and DURRAN (2002) untersuchten systematisch die Stärke (charakterisiert durch den Betrag der horizontalen Rückströmung) simulierter Rotoren für variierende Impuls- und Wärmeflüsse am Boden. Die Stärke und Mächtigkeit des Rotors nimmt mit zunehmenden Impulsfluss (proportional der Oberflächenrauigkeit) ab, wohingegen eine Erhöhung des

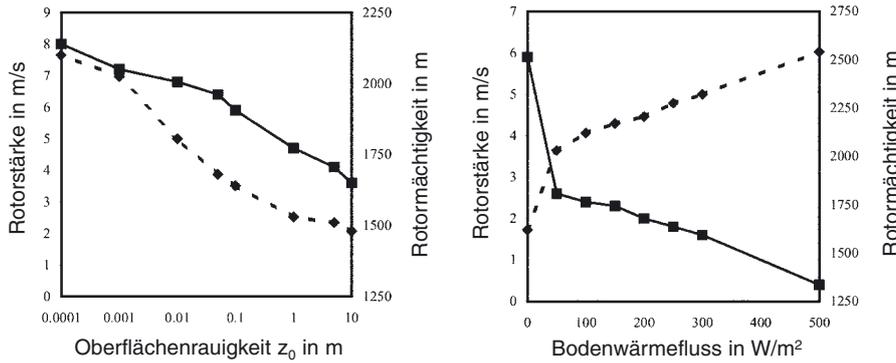


Abb. 3-3: Abhängigkeit der Rotorstärke (in m/s – durchgezogene Linie) und -mächtigkeit (in m – gestrichelte Linie) als Funktion der Oberflächenrauigkeit  $z_0$  und des Wärmeflusses am Boden. Die Ergebnisse stammen aus idealisierten 2D numerischen Simulationen von DOYLE und DURRAN (2002) mit ähnlicher Konfiguration wie unsere Simulationen in Abb. 3-2.

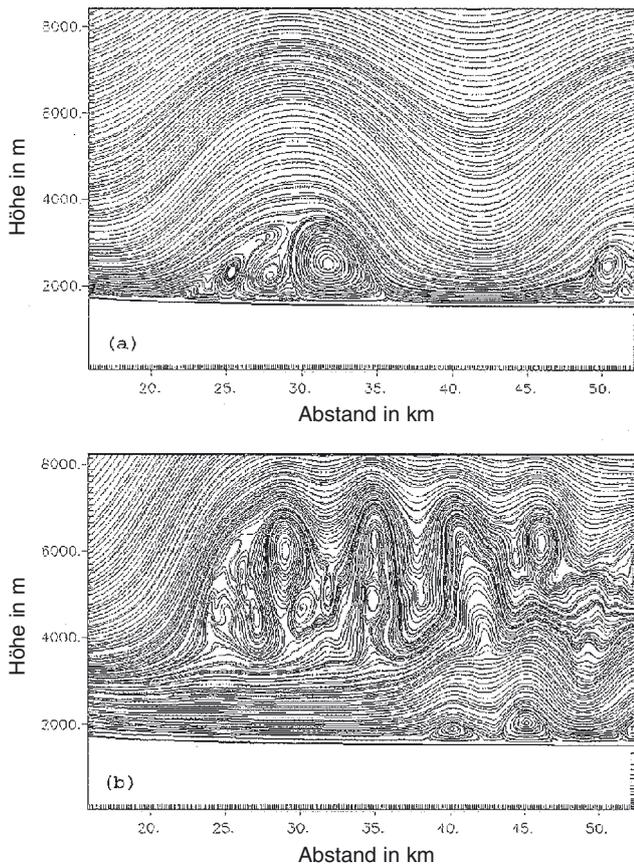


Abb. 3-4: Stromlinien aus einer idealisierten 2D-Simulation von HERTENSTEIN und KUETTNER (2005), die die Höhe von Rotoren in Abhängigkeit der vertikalen Windscherung  $dU_0/dz$  in der Inversionsschicht zwischen 4,2 und 4,8 km zeigen. Oben:  $dU_0/dz=10^{-2} s^{-1}$ , unten:  $dU_0/dz=0$ . Der Gipfel des Hindernisses liegt bei  $x=0$  in einer Höhe von 4000 m.



Abb. 3-5: Wellenwolken am 27. 10. 2004 um 10:30 UTC am Flughafen von Bilbao, Spanien, aufgenommen von Lufthansa-Pilot Schramme. Der Landeanflug der B737 erfolgte direkt durch die Rotorlinie und war durch extreme Turbulenz gekennzeichnet (siehe Text S. 21).

Wärmeflusses zwar die vertikale Erstreckung des Rotors ausdehnt, aber deutlich die horizontale Rückströmung verringert (Abb. 3-3).

Aber auch andere Faktoren beeinflussen die vertikale Erstreckung von Rotoren. Basierend auf realitätsnahen Anströmprofilen aus dem Sierra Wave Project haben HERTENSTEIN und KUETTNER (2005) mittels idealisierter 2D numerischer Simulationen herausgefunden, dass die vertikale Scherung des Horizontalwindes in einer Inversionsschicht bestimmt, ob sich Rotoren ausbilden, die über die Höhe des Hindernisses hinauschießen oder unter der Gipfelhöhe bleiben (Abb. 3-4).

Numerische Simulationen von Rotoren sind sehr aufwendig, da man die turbulenten Ablöseprozesse am Boden räumlich auflösen muss und die hohen Windgeschwindigkeiten durch das COURANT-FRIEDRICH-LEVY Kriterium einen kleinen Zeitschritt erzwingen. Eigene numerische Experimente während der Vorbereitung dieses Artikels zeigten zudem, dass die numerischen Lösungen sehr sensitiv auf minimale Änderungen in den ungestörten Anfangsbedingungen  $U_0$  und  $\Theta_0$  reagieren; dies lässt die Vorhersage der Position, Stärke und Höhe von Rotoren zu einer großen Herausforderung werden.

Bei passenden Feuchteverhältnissen weist die Anwesenheit von flachen Altocumuli lenticulares am Himmel auf Wellen und Rotoren hin. Diese Wolken mit dem glatten, abgerundeten oberen Rand und der konkaven Wolkenbasis sind quasi-stationäre Erscheinungen im Lee des Gebirges. Die Wolkenpartikel bilden sich kontinuierlich an der meist glatten Einströmkante und die Tröpfchen oder Eiskristalle verdampfen an der stromab gelegenen Seite. Unterhalb dieser Wolken beobachtet man aber auch häufig Cumuli fracti, die durch die starken Turbulenzen zerrissen werden (siehe Abb. 3-1). Abb. 3-5 zeigt ein Beispiel von zusammenhängenden Wellenwolken, aufgenommen nach dem Durchgang einer Kaltfront auf dem Flughafen von Bilbao. Was es mit diesem Foto auf sich hat, beschreiben wir im nächsten Abschnitt, der die Frage zu beantworten sucht:

### 3 Welche Auswirkungen hat das System Welle-Rotor auf die Luftfahrt?

In der kommerziellen und allgemeinen Luftfahrt sind die Turbulenzen durch Rotoren und brechende Leewellen grundsätzlich bekannt; in der Ausbildung von Piloten werden Rotoren jedoch nur kurz in der Rubrik Gebirgsmeteorologie erwähnt. Allerdings lassen zahlreiche Unfallberichte darauf schließen, dass das Auftreten und die Auswirkungen von Rotoren auf Luftfahrzeuge häufig unterschätzt werden. Erfahrungen aktiver Piloten, Ausbilder und Vorhersager für den Luftverkehr unterscheiden folgende Konsequenzen des Systems Welle-Rotor für die kommerzielle, die allgemeine und die militärische Luftfahrt:

Vertikal nach oben propagierende Wellen können im oberen Luftraum (in großer Höhe über dem auslösenden orographischen Hindernis) brechen (s. Abb. 3-6). Brechende Leewellen werden im fliegerischen Sprachgebrauch der Clear Air Turbulence (CAT) gleichgesetzt. Ein spektakuläres Beispiel ist die Beschädigung des Tragflügels und der Verlust eines Triebwerks einer DC-8 Frachtmaschine im Lee der Rocky Mountains (CLARK et al. 2000). Intensive Leewellenaktivität kann unter Umständen den Überflug hochreichender Gebirge (z. B. Anden, Himalaja) durch extreme Vertikalwinde (bis zu 20 m/s) und welleninduzierte Turbulenzen stark behindern oder sogar unmöglich machen.

Im Bereich zwischen der optimalen Reise Flughöhe und dem höchsten aerodynamisch möglichen Fluglevel verringert sich das „fliegbare“ Geschwindigkeitsband eines Flugzeuges. Für eine B737 mit 51 t Gewicht liegt in FL370 (37000 ft ≈ 11,1 km) der mögliche Geschwindigkeitsbereich für den Geradeausflug zwischen 185 und 260 kn. Diese „fliegbare“ Spanne von 75 kn (~38 m/s) reduziert sich bei leichten Ausweichmanövern (Kurven mit größerer Schräglage) weiter um 55 kn auf 20 kn. Bei starken vertikalen Auf- und Abwinden der Leewellen ist dann ein korrektes Halten der Flughöhe fliegerisch nicht möglich und kann zu

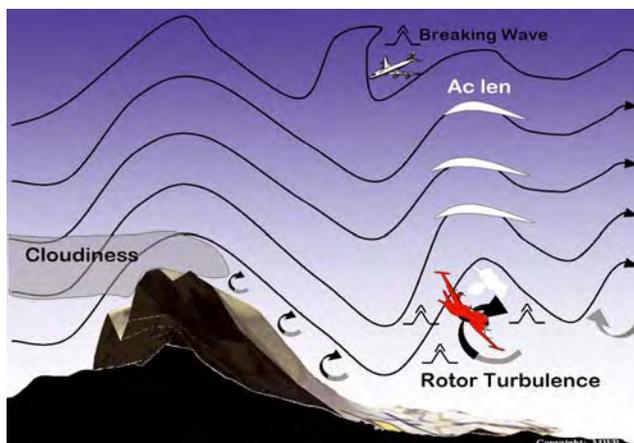


Abb. 3-6: Turbulenzgefährdete Gebiete (A) im Lee eines Gebirges: in brechenden Wellen in der Höhe und an Rotoren in Bodennähe.

kritischen Flugzuständen führen. Schwach motorisierte Luftfahrzeuge können eine zugewiesene Flughöhe (eine Notwendigkeit im mittlerweile stark frequentierten Luftraum der mittleren Troposphäre) unter Umständen überhaupt nicht halten.

Aber auch Turbulenzen in Rotoren können zu extremer Beeinflussung des Flugverkehrs führen, wie folgendes jüngere Beispiel vom Lufthansa-Flug LH 4500 von Frankfurt/Main nach Bilbao (Spanien) am 27. Oktober 2004 verdeutlicht. Auf der Rückseite einer Kaltfront (Abb. 3-7a) herrschte im Anflug der B737 auf Bilbao eine straffe Südströmung mit 65–70 kn in 3000 ft. Der Sinkflug auf die Landebahn 12 (Ausrichtung auf 120°) erfolgte im Lee der umliegenden Berge direkt durch eine Rotorlinie (Abb. 3-7b). Am Boden wurde ein böiger Südostwind mit einem Mittelwert

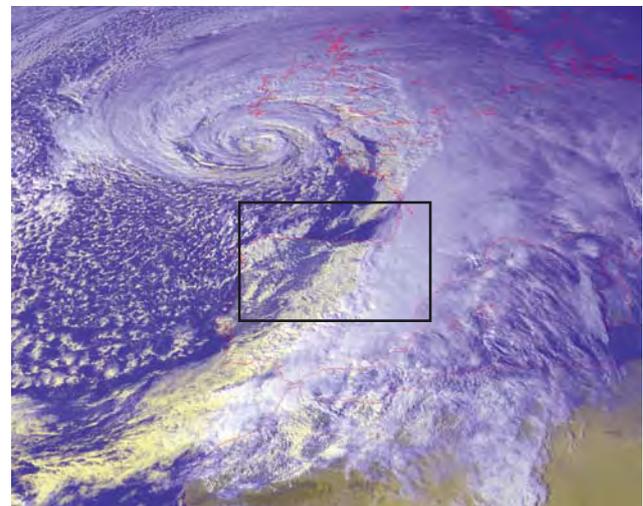


Abb. 3-7a: Hochauflöstes METEOSAT 8 Satellitenbild vom 27. Oktober 2004 um 1430 UTC. Das Tief „Carolin“ lag südwestlich von Irland und die Nord-Süd ausgerichtete Kaltfront über Spanien in der Mitte des Bildes führte zu einer starken Südströmung im postfrontalen Bereich. Am Unterrand des Bildes erkennt man den nordwestlichen Teil von Afrika (Bildbearbeitung durch Waldemar Krebs, DLR Oberpfaffenhofen).

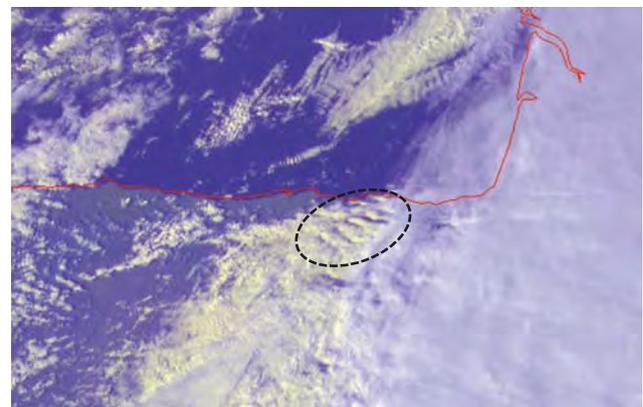


Abb. 3-7b: In diesem Ausschnitt von Abb. 3-7a erkennt man in der Nähe von Bilbao streifenförmig angeordnete Wolkenwalzen westlich des Cirruschirms (innerhalb der gestrichelten Ellipse). Die Wolkenlücken deuten auf welleninduzierte Absinkzonen im Lee des kantabrischen Gebirges hin.

von 25 kn und Windspitzen bis zu 50 kn beobachtet. Die Schwankungen der Fluggeschwindigkeit der B737 betragen 20 bis 30 kn und die vom Flugkapitän beobachtete Turbulenz wurde als extrem klassifiziert.

Der Pilot (er nahm das Photo in Abb. 3-5 auf) ist ein rotorererfahrener Segelflieger. Er hat in seiner 30-jährigen Flugerfahrung diese ungewöhnlich starke Rotorturbulenz bis zu diesem Ereignis noch nicht erlebt; ein eindrucksvolles Beispiel, dass heute Turbulenz in Rotoren eine unmittelbare Gefahr auch für die kommerzielle Luftfahrt mit großen Maschinen darstellen kann.

Viele Luftfahrzeugbesatzungen meiden im Normalfall bei solchen atmosphärischen Bedingungen exponierte Flughäfen in der Nähe von Gebirgen. Kommt man jedoch ungewarnt in ein solches Gebiet, werden unerfahrene Piloten vom akustischen „WIND SHEAR“-Hinweis im Cockpit gewarnt und versuchen gemäß Flugbuchanweisung (windshear encounter) in niedriger Höhe ein „Durchstarten“ („GO AROUND“). Diese Verfahrensweise ist jedoch bei Bedingungen wie denen in Bilbao gefährlich, weil dort ein Weiterflug im engen, ansteigenden Tal erfolgen müsste. Bei Ausfall eines Triebwerks ist durch Leistungsverlust und die starken Abwinde der Rotoren ein Aufprall oder Flugunfall sehr wahrscheinlich. Nur ein versierter, geschulter und rotorererfahrener Pilot ist in der Lage, die Aufwindbereiche der Rotoren zu nutzen und den Leistungsverlust des Flugzeugs zu kompensieren und somit das Risiko zu minimieren.

Neben den direkten Auswirkungen auf das Flugzeug führen auch moderate Turbulenzen zu einer erschwerten Ablesbarkeit von Bordinstrumenten und zu erheblichen Einschränkungen im Komfort der Passagiere, die manchmal zu schweren Verletzungen von Passagieren und Kabinenpersonal führen.

Für die allgemeine Luftfahrt, wo der Betrieb der Luftfahrzeuge vorwiegend nach Sichtflugregeln erfolgt, gilt: Bei Sonderlande- und kleineren Sportflugplätzen führt die fehlende Kenntnis des Rotorstandortes zu kritischen Landeanflügen oder sogar zum Absturz des Fluggerätes infolge Strömungsabriss. Für Gleitschirm- und Drachenflieger sowie für Ballonfahrer sind die Turbulenzen in den Rotoren fliegerisch kaum beherrschbar. Eine Belastung der Flugzeugzelle von Ultraleicht- und Leichtflugzeugen oberhalb der Zulassungsgrenzen kann zu Verlust der Tragflächen und Steuerruder führen.

Im Bereich der militärischen Luftfahrt, insbesondere im Tiefflug, ist bei Hubschraubern die starke vertikale Windscherung in den Rotoren mit einer hohen mechanischen Belastung der Steuerelemente verbunden. Ein Abscheren der Aufhängung von Rotorblättern bei bestimmten Einsatzmustern kann dabei nicht ausgeschlossen werden. Das unkontrollierte Auf- und Ab-

pendeln (oszillierende Nickbewegungen) von Jets im militärischen Tiefflug unter 1000 ft kann zu Bodenberührungen mit fatalen Folgen führen. Verschiedene Typen von großen Transportflugzeugen verfügen über eine herstellerbedingte Limitierung bei Flügen in mäßiger und starker Turbulenz. Eine Flugmission in Regionen mit vorhergesagter Turbulenz dieser Stärke ist flugausschließend, weil eine Veränderung des Schwerpunktes des Transporters durch nicht ausreichend befestigten Güter und Fahrzeuge im Frachtraum zum Absturz führen kann.

Im nächsten Abschnitt wollen wir uns kurz vor Augen führen, wie die wissenschaftliche Erforschung von Rotoren und Wellen vor siebzig Jahren begann, deswegen ein:

#### 4 Historischer Rückblick: Die Entdeckung der Leewelle

Der 17. März 1933 war der Tag der Entdeckung der Leewelle. Über dem Hirschberger Tal in Schlesien steht die dort wohlbekannt Lenticularis-Wolke, die man im Volksmund „Moazagotl“ nennt (Abb. 3-1). Trotz des starken Südwindes bewegt sie sich nicht. Wolf Hirth – ein inzwischen weltbekannter Segelfliegpionier – beobachtet sie aufmerksam vom Hirschberger Flugplatz (zur geographischen Orientierung, siehe Abb. 3-8). Als er zu der 5 km entfernten Segelflugschule Grunau, dessen Direktor er ist, hinüberblickt, sieht er ein Segelflugzeug in schier unglaublicher Höhe über dem Südhang der Schule segeln. Zu dieser Zeit galt (nach einer Faustregel), dass man im „Hangflug“ höchstens die doppelte Hanghöhe erreichen könne, also über dem 200 m hohen Südhang höchstens 400 m. Dieses Segelflugzeug mit dem Piloten Hans Deutschmann aber flog weit über 1000 m hoch und schien noch weiter zu steigen. Hirth sprang in sein Segelflugzeug und ließ sich vom Hirschberger Flugplatz hoch schleppen. An diesem Tag entdeckte er nicht nur die Leewellen, sondern auch die unter ihnen liegenden Rotoren. Er beschreibt seinen Schleppflug mit den eindrucksvollen Worten, die wir im Abschnitt 2 zitierten, um den Leser bildlich in das gekoppelte System Welle-Rotor einzuführen. Die beiden Segelflugzeuge stiegen auf 1400 m. Von dieser Höhe konnten sie das 25 km weiter südlich vorgelagerte, etwas 1500 m hohe Riesengebirge klar sehen. Hirth zog die korrekte Schlussfolgerung, dass die Aufwinde nicht durch den kleinen Grunauer Hügel, sondern durch das Riesengebirge ausgelöst wurden.

Nach diesem Flug wurde beschlossen, das Stromfeld zwischen Riesengebirge und Grunau auf folgende Weise zu erforschen: Sollte bei einem zukünftigen Segelflug-Wettbewerb (an dem gewöhnlich 20 bis 30 Segelflugzeuge teilnahmen) eine Moazagotl-Wolke erscheinen, werden alle Piloten verpflichtet, einen Barographen mitzuführen und einen Flugbericht auszufül-

len, der Vertikal-Bewegung sowie Höhe und Position über Grund registriert. Das Ereignis fand nach langem Warten am 21. Mai 1937 statt. Es lieferte – ohne jegliche staatlich-finanzielle Unterstützung, die es damals für solche Zwecke noch nicht gab – ein umfassendes Material von 22 Flugberichten und 66 Flugstunden im Stromfeld.

Die Kompression des Materials in einer maßstabsgetreuen Auf- und Seitensicht ohne die heute übliche graphischen Überhöhung (Abb. 3-8) zeigte alternierende Auf- und Abwindfelder von etwa 8 km Wellenlänge und Vertikalbewegungen von durchschnittlich 4 bis 5 m/s. Die Wolkenbasis des Mozaogotl's lag bei 5 bis 6 km Höhe. Damit war die Wellennatur des Phänomens bewiesen. Nun galt es, seinen Höhenbereich zu bestimmen und insbesondere der Frage nachzugehen, ob sich die Wellenstruktur bis zur Tropopause erstreckte. Diese Aufgabe nahm sich KÜTTNER selbst vor. Am 14. September 1937 segelte er in der vordersten Welle des Riesengebirges auf knapp 7000 m Höhe, musste aber den Flug wegen Sauerstoff-Mangels und Kälte abbrechen. Der mitgeführte Meteorograph registrierte Höhe, Feuchtigkeit, Aufstieg-Geschwindigkeit und Temperatur. In der Gipfelhöhe, die nur 2,5 km unterhalb der Tropopause lag, zeigte die Luft noch etwa 2 m/s Aufwind. Damit war angezeigt, dass das Leewellensystem sich bis zur Tropopause erstreckt und dass ein verhältnismäßig kleines Gebirge von 25 km Länge und 1,5 km Höhe die gesamte Troposphäre in Schwingung versetzen kann, wobei das Wellensystem auf einer rollenlagerähnlichen Rotorschicht von höchster Turbulenz ruht. Diese – der heutige Leser würde sagen: „experimentellen“ – Ergebnisse veranlassten LYRA, einen Schüler Ludwig PRANDTL's, die erste Theorie der internen Leewellen zu entwickeln.

Nach dem 2. Weltkrieg wurde die phänomenologische Untersuchung der Rotoren und Wellen durch die legendären und wegweisenden Projekte in der Sierra Nevada fortgeführt; einen guten Ein- und Überblick bekommt man durch den umfassenden Artikel von GRUBIŠIĆ and LEWIS (2004) und das spannende

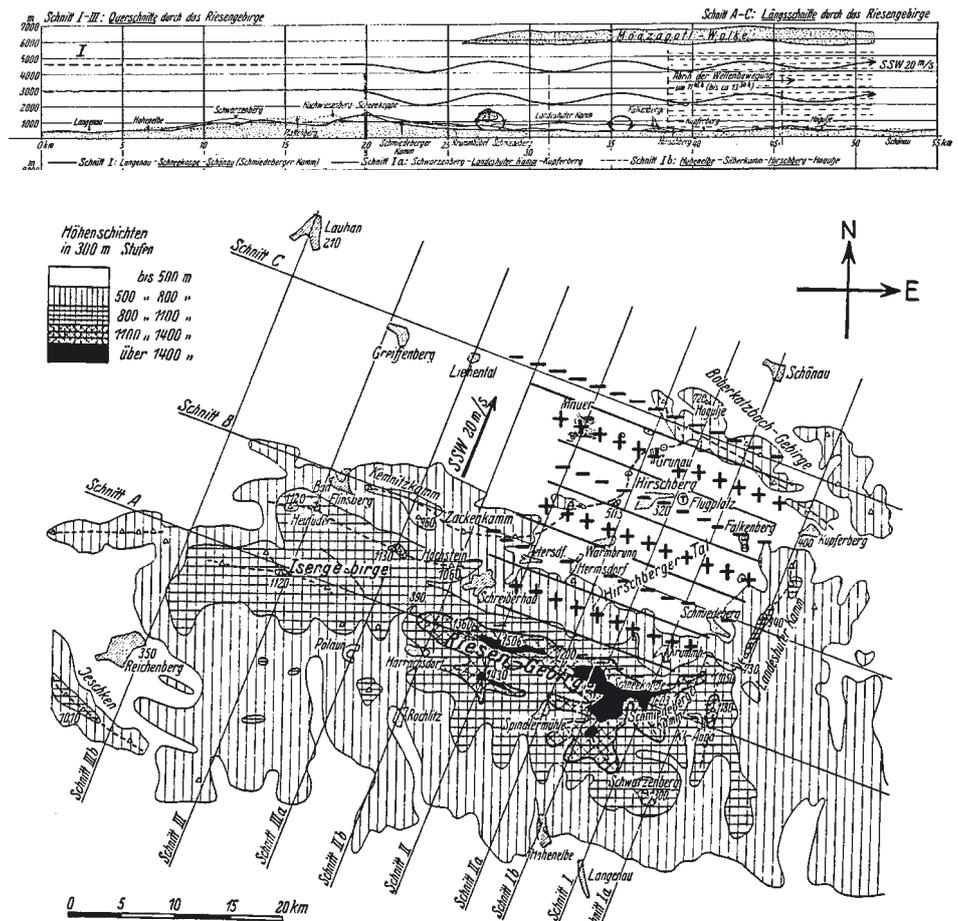


Fig. 32. Grundriß zu Fig. 31, 21. Mai 1937, vormittags. Pluszeichen: Gebiete aufsteigender Luftbewegung. Minuszeichen: Gebiete absteigender Luftbewegung.

Abb. 3-8: Erste dokumentierte dreidimensionale Struktur des gekoppelten Systems Welle-Rotor. Die Ergebnisse basieren auf simultan durchgeführten Messungen von 22 Segelflugzeugen im Lee des Riesengebirges im Mai 1937 (KÜTTNER 1938). Der Querschnitt (oben) läuft längs der Strömungsrichtung von SSW (links) nach NNW (rechts) mit einem der Pilotenperspektive entlehnten Höhen-Längen-Verhältnis von 1:1.

Buch von WHELAN (2000). In den meisten der nachfolgenden Feldprogramme (z. B. ALPEX, MAP; vgl. VOLKERT; Kapitel 8 in diesem Heft) standen zwar gebirgsinduzierte Schwerewellen und deren Brechen mit im Blickpunkt, die Entstehung und Morphologie von Rotoren und deren Wechselwirkung mit den Leewellen wurde jedoch nicht weiter erforscht. Das zeigt sich auch in der recht geringen Anzahl von wissenschaftlichen Publikationen, die sich den Rotoren widmen.

### 5 Wissenschaftliche Ziele von T-REX

Wie wir in den vorangegangenen Abschnitten gesehen haben, stellt das gekoppelte System Welle-Rotor noch heute große Herausforderungen sowohl an die numerische Modellierung wie auch an eine akkurate Vorhersage. Die Grunderkenntnisse über Wellen und Rotoren und ihrer Eigenschaften wurden durch die ersten Flüge im Riesengebirge und bei den Feldmesskampagnen in der Sierra Nevada gewonnen und dokumentiert. MAP führte diese Tradition 1999 fort. Während

MAP allerdings waren die gemessenen und modellierten Wellen noch verwickelter aufgebaut und unmittelbar beeinflusst durch das viel komplexere Alpenrelief. Die Ausbreitung von gebirgsinduzierten Wellen bis hinein in die mittlere Atmosphäre wird in einem der vorangegangenen *promet*-Hefte illustriert (siehe PREUSSE und DÖRNBRACK 2005).

Der regelmäßige Aufbau der Kämme der Sierra Nevada (Quasi-Zweidimensionalität) lässt einfachere Wellenstrukturen, Rotoren und Brechungsgebiete im Lee entstehen. Dies erlaubt nicht nur eine verbesserte Beobachtung, sondern auch einen genaueren Vergleich der verschiedenen Modellvorhersagen.

Das Ziel von T-REX ist eine umfassende Untersuchung des gekoppelten Systems Leewelle-Rotor-Grenzschicht. Dazu sollen insbesondere Dynamik und Struktur des Systems Welle-Rotor und ihrer Abhängigkeit von den Anströmbedingungen vermessen werden. In diesem Experiment möchte man die Entstehung, interne Struktur und die zeitliche Entwicklung von Wellen und Rotoren mit den modernsten Messgeräten in der Natur studieren. Neben drei Forschungsflugzeugen wird es ein umfangreiches Bodennetz geben. Es sollen Doppler-LIDARsysteme zur Vermessung der Aerosolrückstreuung und vor allem des dreidimensionalen Windfeldes eingesetzt werden. Windprofiler und SODARs ergänzen die bodengebundenen Fernerkundungsgeräte. Und natürlich wird es ein umfangreiches meteorologisches Messnetz aus automatischen Wetterstationen, Mikrobarographen, Strahlungsmessungen und Flussmessungen geben. Die Wind und Temperaturprofile stromauf werden mittels Ballonmessungen bestimmt.

Die modernen und leistungsfähigen Rechner ermöglichen es heutzutage außerdem, die Rotoren mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu simulieren. Inwiefern das im echtzeitnahen Vorhersagemodus möglich sein wird, ist eine der spannenden Fragen des Experimentes T-REX.

## 6 Ausblick

Neben der wissenschaftlichen Erforschung des Phänomens Welle-Rotor bei T-REX und der daraus zu erwartenden Verbesserung ihrer numerischen Modellierung und Vorhersage ist sicherlich die Verbreitung moderner Erkenntnisse über die Wellen und Rotoren von entscheidender Wichtigkeit. Die genaue Kenntnis des Strömungszustandes in der Nähe von Gebirgen ist notwendig, um Flugunfälle in der allgemeinen und kommerziellen Luftfahrt zu vermeiden. Die Mountain-Wave Projektgruppe der OSTIV (<http://www.mountain-wave-project.de>), der erfahrene Sportpiloten und Flugmeteorologen angehören, nutzen Lehrbeispiele

bei ihren Fachvorträgen und Seminaren, um auf die unmittelbaren Gefahren durch Wellen und Rotoren hinzuweisen. Basierend auf eigenen Erfahrungen empfehlen sie Alternativen und verweisen auf ihre routinemäßig erstellte Turbulenzvorhersagen und die empirische Rotorendatenbank. Die Einordnung und Klassifikation der Rotoren leistet somit einen unmittelbaren Beitrag zu Flugsicherheit.

## Literatur

- CLARK, T. L., W. D. HALL, R. M. KERR, D. MIDDLETON, L. RADKE, F. M. RALPH, P. J. NEIMAN, D. LEVINSON, 2000: Origins of aircraft-damaging clear-air turbulence during the 9 December 1992 Colorado downslope windstorm: Numerical simulations and comparison with observations. *J. Atmos. Sci.* **57**, 1105-1131.
- DOYLE, J. D., D. R. DURRAN, 2002: The dynamics of mountain-wave induced rotors. *J. Atmos. Sci.* **59**, 186-201.
- GILL, A. E., 1982: Atmosphere-ocean dynamics. *Academic Press*, 662 S.
- GRABOWSKI, W. W., P. K. SMOLARKIEWICZ, 2002: A multiscale anelastic model for meteorological research. *Mon. Wea. Rev.* **130**, 939-956.
- GRUBIŠIĆ, V., J. M. LEWIS, 2004: Sierra wave project revisited – 50 years later. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **85**, 1127-1142.
- HERTENSTEIN, R. F., J. P. KUETTNER, 2005: Rotor types associated with steep lee topography: Influence of the wind profile. *Tellus A* **57**, 117-135.
- KÜTTNER, J., 1938: Moazagotl und Föhnwelle. *Beitr. Phys. fr. Atmos.* **25**, 79-114.
- PREUSSE, P., A. DÖRNBRACK, 2005: Interne Schwerewellen in der mittleren Atmosphäre. *Promet* **31**, 53-55.
- SCORER, R. S., 1949: Theory of waves in the lee of mountains. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **75**, 41-56.
- SMITH, R. B., 1979: The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*. **21**, 87-230.
- WHELAN, R. F., 2000: Exploring the monster. Mountain lee waves: The aerial elevator. *Wind Canyon Books, Inc.*, Niceville, Florida, USA, 196 S.

## Internet-Links

- Druckversion des Selbstlern-Kurses „Mountain waves and downslope winds“:  
<http://meted.ucar.edu/mesoprims/mtnwave/print.htm#1>
- Mountain-Wave Projekt Gruppe der OSTIV:  
<http://www.mountain-wave-project.de>
- Das Perlan-Projekt:  
<http://www.firnspiegel.com/perlan/>
- NRL Mountain Wave Forecast Model:  
<http://uap-www.nrl.navy.mil/dynamics/html/mwfm.html>
- DLR Aktivitäten im Rahmen von T-REX:  
<http://www.pa.op.dlr.de/arctic/projects.html>
- T-REX Seite  
<http://www.joss.ucar.edu/trex>