

Schwere Wellen

Dieter Etling

Wenn man in Lehrbüchern über Meteorologie unter dem Stichwort „Wellen“ nachschaut, stößt man auf Begriffe wie Rossbywellen, Schallwellen, Trägheitswellen, Kelvin-Helmholtzwellen, Zyklonenwellen und auch Schwerewellen. Fragt man Passanten auf der Strasse, was sie mit dem Begriff Wellen verbinden, bekommt man zur Antwort wohl meist „Wasserwellen“. Das ist verständlich, hat doch jeder von uns schon Wasserwellen gesehen. Bei Rossbywellen müssten selbst wir als Meteorologen einen Moment nachdenken, was das eigentlich ist und wie man diese Wellen sehen kann. Einen Wellentyp in der Atmosphäre hat aber wohl fast jeder von uns schon mit bloßem Auge beobachtet: die Schwerewellen. Nun ist die Luft ja an sich durchsichtig und daher ist es schön, dass wir Wasserdampf in der Atmosphäre haben, der sich gelegentlich in Form von Wolken zeigt. Auf dem Satellitenbild in Abb.1 sind Muster in der Bewölkung zu erkennen, die aus regelmäßig angeordneten Wolkenbändern mit dazwischen liegenden wolkenfreien Zonen bestehen. Dies sind Schwerewellen, welche durch die Wolken sichtbar gemacht werden. Eine besonders kräftige Welle mit einer großen Föhnwindlücke ist im Lee des Erzgebirges auf der Linie Dresden-Prag zu sehen. Die Wellenlänge, also der Abstand zwischen zwei Wolkenbändern, beträgt auf dem Bild zwischen 10 und 25 km. Bei kürzeren Wolkenabständen können wir die Wellen auch vom Boden aus sehen, quasi wie die Wasserwellen.

Die Deutung der Wolkenfelder im Satellitenbild als Signatur einer Welle fällt uns als Meteorologen sicher leichter als normalen Passanten, wenn man sich den schematischen Querschnitt einer solchen Situation in Abb. 2 vor Augen hält: Wolken zeigen sich dort, wo Aufwinde vorhanden sind, wolkenfreie Zonen findet man im Bereich von Abwinden. In dieser Abbildung sind auch die typischen Wolken angedeutet, die sich im Bereich von Schwerewellen hinter Gebirgen, sogenannten Leewellen, ausbilden. Die untere Wolkenschicht besteht häufig aus zerfaserten Kumuluswolken, auch Rotorwolken genannt, die sich im

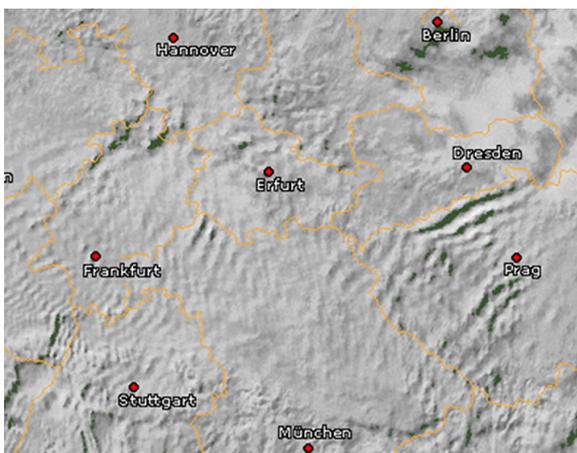


Abb. 1: Satellitenbild vom 11.12.2010 mit Signaturen von Schwerewellen (Quelle: Eumetsat/Wetter-Online).

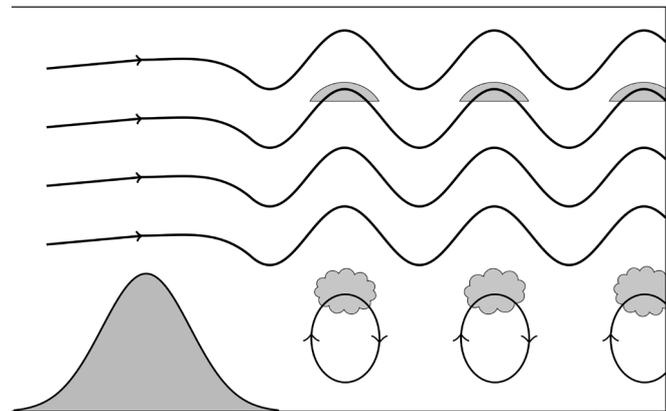


Abb. 2: Schema eines Vertikalschnitts durch Leewellen mit Stromlinien (Striche) und typischen Wolkenformen (Graufarben). Grafik: Lennart Böske.

Aufwindbereich der Rotoren unterhalb der Wellenberge bilden. In den höheren Luftschichten werden die Wellen meist durch Lenticulariswolken sichtbar, die manchmal sehr spektakuläre Formen annehmen (häufig im Meteorologischen Kalender oder auf der Titelseite der Mitteilungen DMG zu finden).

Entstehung von Schwerewellen

Die physikalische Ursache zur Bildung von Schwerewellen und deren mathematische Beschreibung wird vornehmlich in Büchern zur Theoretischen Meteorologie oder zur Dynamik der Atmosphäre diskutiert. Leider ist die Theorie der atmosphärischen Schwerewellen nicht ganz so einfach, weshalb als Titel dieses Aufsatzes auch „Schwere Wellen“ gewählt wurde, also kein Druckfehler. Versuchen wir es hier mal mit einfachen Worten.

Zunächst kommt der Begriff Schwerewelle von der Schwerkraft als Hauptursache dieser Wellen. Entsprechend dem Schema in Abb. 2 erfolgt die periodische Auslenkung der Luftpartikel in der Vertikalen, also in oder gegen die Richtung der Schwerkraft. Hier kommt nun der vielleicht noch von der Schule her bekannte Archimedische Auftrieb ins Spiel: in einem Fluid (Flüssigkeit oder Gas) sinkt eine Masse unter dem Einfluss der Schwerkraft ab, wenn sie schwerer ist als die Masse des Fluids, welches sie verdrängt (z. B. Stein im Wasser). Ist sie leichter als das Umgebungsfluid, so steigt die Masse auf (z.B. Heliumballon in der Luft). Formal lässt sich der Archimedische Auftrieb mit den Dichten des Massenpartikels ρ_p und des Umgebungsfluids ρ_u schreiben als: $A = -g(\rho_p - \rho_u)$, wobei g ($= 9.8 \text{ m/s}^2$) die Schwerebeschleunigung ist. In der Meteorologie verwenden wir statt der Partikeldichte ρ_p dessen potenzielle Temperatur θ_p . Der Archimedische Auftrieb lautet dann $A = g(\theta_p - \theta_u)$: im Vergleich zur Umgebungsluft (θ_u) wärmere Luftpakete steigen auf, kältere sinken ab.

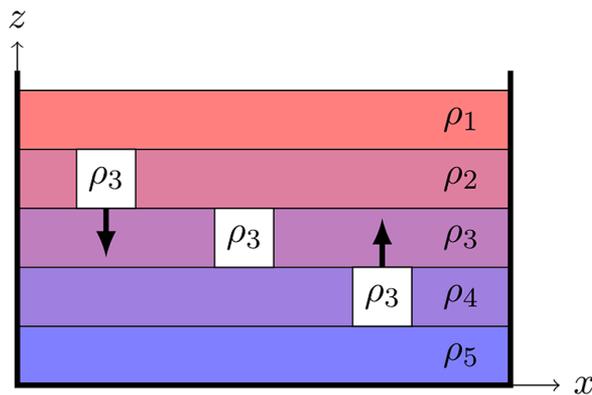


Abb. 3: Bewegungsrichtung eines aus seiner Ruhelage ausgelenkten Luftpartikels in einer stabil geschichteten Atmosphäre (Grafik: Lennart Böske).

Für den einfachen Fall Stein (p) im Wasser (u) gibt es wegen $\rho_p > \rho_u$ nur eine Möglichkeit: absinken. In einer Schwerewelle besteht die Vertikalbewegung eines Luftpartikels aber aus periodischen Auf- und Abwärtsbewegungen (siehe Abb. 2). Dies ist nur in einem stabil geschichteten Fluid möglich, wie in Abb. 3 schematisch dargestellt. Egal, ob ich das Partikel aus seiner Gleichgewichtslage ($\rho_p = \rho_u$) nach oben oder unten auslenke, es wird entsprechend der Archimedischen Beziehung immer in Richtung seiner Ausgangslage beschleunigt. Die resultierende Bewegung ist eine Schwingung in der Vertikalen um die Ruhelage, wobei die Schwingungsfrequenz durch die Schichtung des Fluids bestimmt wird. In der Atmosphäre ist dies die bekannte Brunt-Väisälä Frequenz, benannt nach dem britischen Meteorologen Brunt und dem finnischen Meteorologen Väisälä. Diese wird üblicherweise mit N bezeichnet und hängt mit der thermischen Schichtung, hier ausgedrückt durch den Vertikalgradienten der potenziellen Temperatur θ , wie folgt zusammen: $N^2 = (g/\theta)(d\theta/dz)$. Nehmen wir als Beispiel die US-Standardatmosphäre. In dieser nimmt die Lufttemperatur in den unteren Kilometern um 0.65 K/100 m ab. Dies entspricht einer Zunahme der potenziellen Temperatur um 0,35 K/100m. Damit erhält man für die Brunt-Väisälä Frequenz: $N = 0.01$ 1/s. N ist als Kreisfrequenz aber etwas unanschaulich, weshalb wir daraus die Schwingungsdauer T berechnen. Für die US-Standardatmosphäre erhält man $T \approx 600$ Sekunden oder 10 Minuten.

Wie kommt es nun zur Ausbildung von Wellen? Betrachten wir dazu im einfachsten Fall noch einmal Abb. 2 und verfolgen ein Luftpaket auf seinem Weg über das Gebirge. Nach Auslenkung aus seiner Gleichgewichtslage beim Überströmen des Gebirges wird es Schwingungen in der Vertikalen ausführen, wie oben erläutert. Gleichzeitig wird es durch den Wind in das Lee verfrachtet. Die Bahn des Luftpaketes erhält somit die Form einer Wellenbewegung in Windrichtung. Da alle sich hinter ihm befindlichen Luftpakete ebenfalls diese Bahn beschreiben, verbleibt eine stationäre Wellenbewegung. Die Wellenlänge ist dabei der Abstand zweier Wellenberge oder Wellentäler. Sie lässt sich leicht abschätzen aus der Beziehung Entfernung

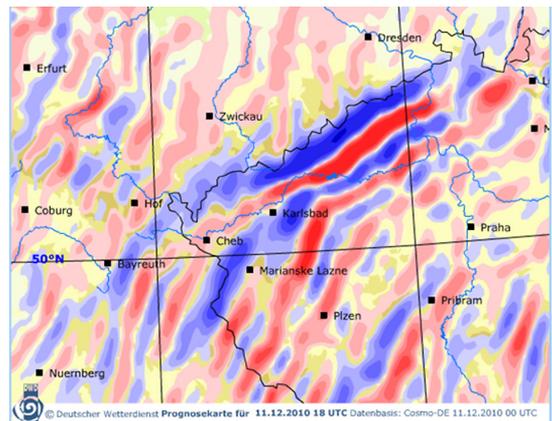


Abb. 4: Vorhersage der Vertikalgeschwindigkeit in Flugfläche 100 (entspricht etwa 3 km Höhe) für die Situation des Satellitenbildes in Abb.1 mit dem DWD-Modell COSMO-DE. Im Bereich des Erzgebirges betragen die maximalen Auf- und Abwinde etwa 3 m/s, die Wellenlänge liegt bei 24 km (© DWD).

(Wellenlänge L) = Geschwindigkeit (U) mal Zeit, wobei hier mit Zeit die Schwingungsdauer T gemeint ist. Somit: $L = UT$. Nehmen wir als Beispiel eine Anströmgeschwindigkeit $U=10$ m/s, so erhalten wir für die US-Standardatmosphäre: $L = 6$ km, bei $U=20$ m/s ergibt sich $L = 12$ km.

Diese einfache Erklärung zur Ausbildung von Schwerewellen, insbesondere von Leewellen, soll an dieser Stelle genügen. Die tatsächliche Wellenphysik ist wesentlich komplexer, handelt es sich doch um ein ständiges Wechselspiel von Auftriebs- und Druckkräften. So füllen denn auch Arbeiten zu Schwerewellen in der Atmosphäre tausende von Seiten in Fachjournalen und speziellen Fachbüchern. Wer an einer etwas ausführlicheren Darstellung zur Physik von Schwerewellen interessiert ist, kann diese zum Beispiel in der Broschüre „Atmospheric gravity waves and soaring flight“ finden (siehe Literaturhinweise).

Vorhersage von Schwerewellen

Die heutigen Wettervorhersagemodelle der Wetterdienste sind für Regionalvorhersagen häufig auch in einer Version mit geringer horizontaler Gitterweite von etwa 2 km vorhanden. Da Schwerewellen typische Wellenlängen von 10-20 km aufweisen müssten diese in den Modellergebnissen auftauchen. In den üblichen Online-Produkten des DWD oder der privaten Wetterdienste sind diese aber nicht zu finden, da ja auch Kunden als Abnehmer für das Produkt Schwerewellen vorhanden sein müssen.

Als solche gelten bisher nur Segelflieger, welche die ortsfesten Aufwindgebiete im Bereich von Leewellen ausnutzen und daher an einer Vorhersage von Schwerewellen interessiert sind. Hierfür bietet etwa der DWD in seinem Produkt `pc_met` auch eine Vorhersage für die Felder der Vertikalgeschwindigkeit aus dem Modell COSMO-DE für verschiedene Flugflächen an. Als Beispiel ist in Abb. 4 die Vorhersage für die Situation auf dem Satellitenbild in Abb.1 für die Flugfläche 100, entspricht etwa einer Höhe von 3 km, dargestellt. Die Übereinstimmung ist von der Struktur der Auf- und Abwindgebiete im Vergleich zum Satellitenbild sehr gut, auch wenn keine Verifikation der Werte der Vertikalgeschwindigkeiten vorliegen. Solche

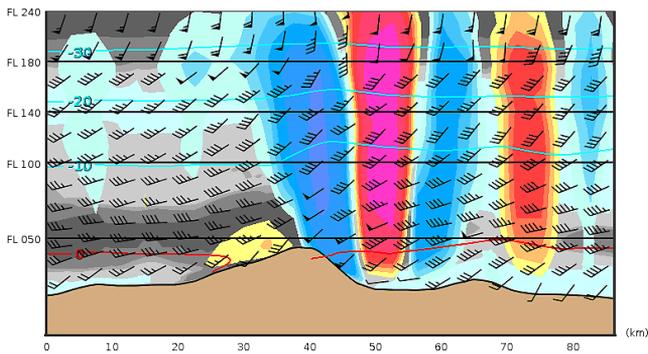


Abb. 5: Beispiel einer Vorhersage von Höhenwinden (Windpfeile) und Vertikalgeschwindigkeit (Farbflächen) entlang eines Vertikalschnitts im Bereich des Riesengebirges mit dem Modell COSMO-DE des DWD. Die maximalen Aufwinde liegen bei 3 m/s, die Wellenlänge beträgt etwa 23 km (© DWD).

Verifikationen erfolgen aber regelmäßig durch die Segelflieger selbst, die ihre Wellenflüge nach den Vorhersagen aus `pc_met` planen. Ihre Flugberichte, die z. B. auf www.schwerewelle.de publiziert werden, zeugen regelmäßig von der recht guten Übereinstimmung von Vorhersage und erfolgten Aufwindgebieten. Neuerdings werden in `pc_met` auch Vertikalschnitte von Leewellen bereitgestellt, die eine Auskunft über die Vertikalerstreckung des Wellensystems geben. Ein Beispiel einer derartigen Wellenvorhersage für das Gebiet des Riesengebirges ist in Abb. 5 gezeigt.

Auch der Geoinformationsdienst der Bundeswehr erstellt mit einer abgewandelten COSMO-DE-Version (RLMK) regelmäßig Wellenvorhersagen für Gebiete mit hoher Topografie, z. B. Alpen oder Himalaya, in denen sehr starke Wellen mit Vertikalgeschwindigkeiten von 5-15 m/s auftreten können. Diese sind für den zivilen und militärischen Flugverkehr von Bedeutung, da eine Querung solcher Wellen im einfachsten Fall für die Passagiere ungemütlich ist (das hat sicher jeder schon mal erlebt, der in einer Passagiermaschine über die Alpen geflogen ist). Die mit Schwerewellen verbundene Turbulenz, die besonders beim Brechen von Wellen mit großer Amplitude auftritt und im Fachjargon als CAT (Clear Air Turbulence) bezeichnet wird, kann dagegen recht gefährlich werden. So ermöglicht eine Wellenvorhersage mit hochauflösenden Wettervorhersagemodellen nicht nur eine Planung des Freizeitvergnügens von Segelfliegern sondern trägt auch zur Sicherheit im Flugverkehr bei. Näheres zu letzterem Aspekt findet man in Kap. 15 des neuen Heftes der Fortbildungszeitschrift *promet* zum Thema „Flugmeteorologie“ (siehe Inhaltsangabe zu Heft 1/2, Jahrg. 39, unter „medial“).

Entdeckung der Schwerewellen

Auch wenn die durch Schwerewellen ausgelösten regelmäßigen Wolkenformationen den Menschen sicher schon seit Jahrhunderten aufgefallen sein müssten, sind atmosphärische Wellen als deren Ursache erst seit den 30er Jahre des letzten Jahrhunderts erkannt worden. Im Gebiet des Riesengebirges geriet eine Gruppe von Segelfliegern um Wolf Hirth in den Wellenaufwind der sogenannten Moazagotl-Wolke und erkannten die Möglichkeit diese stationären Aufwindgebiete für längere Flüge zu nutzen. Im Jahr 1937 erfolgten dann Segelflieger unter der Leitung von Joachim Küttner (Preisträger der Alfred-Wegner-Medaille der DMG) systematisch das Wellensystem des Riesengebirges. Die Ergebnisse der Auswertungen von beobachteten Steig- und Fallgebieten sind in Abb. 6 dargestellt.

Seitdem sind Leewellensysteme in vielen Teilen der Erde gefunden worden. Besonders kräftige Wellen findet man z. B. im Bereich der Sierra Nevada, USA, wo bereits 1952-55 Feldexperimente zur Erforschung hochreichender Schwerewellen stattfanden und bei denen Joachim Küttner mit dem Segelflugzeug eine Höhe von 13 km erreichte (bis heute deutscher Höhenrekord). Die sehr ausgedehnten Leewellensysteme der Anden ermöglichen früher für nicht möglich gehaltene Rekordflüge im Segelflug. So wurden dort die bisher längste Distanz von 3009 km im Jahr 2002 durch die Piloten Klaus Ohlmann und Klaus Rabeder erflogen und der Höhenweltrekord über 15,4 km durch Steve Fosset und Einar Enevoldson im Jahr 2003 aufgestellt. Auch hierbei halfen die Wellenprognosen durch Wettervorhersagemodelle, ohne die eine Planung derartiger Extremunternehmen gar nicht möglich ist.

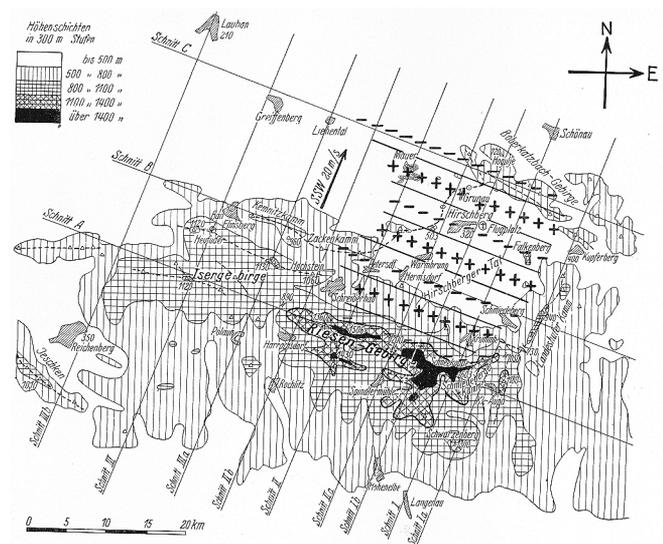


Abb. 6: Lage von Fall- und Steiggebieten im Lee des Riesengebirges, wie sie am 21. Mai 1937 von Segelfliegern beobachtet wurde (Quelle: Küttner, 1939).

Literaturhinweise

- DÖRNBRACK, A.R., HEISE, R., KÜTTNER, J.: Wellen und Rotoren. In: *promet*, Jahrg. 32, Heft 1/2, 2006, S.18-24.
 HEISE, R., ETILING, D.: Schwerewellen und Rotoren. - In: *promet*, Jahrg. 39, Heft 1/2, 2014.
 KÜTTNER, J.: Moazagotl und Föhnwelle. - *Beträge zur Physik der freien Atmosphäre*, Bd. 25, 1939, S. 79-114.
 BROSCHEURE „Atmospheric gravity waves and soaring flight“, 2014, 118 S. - Online frei verfügbar unter: www.schwerewelle.de