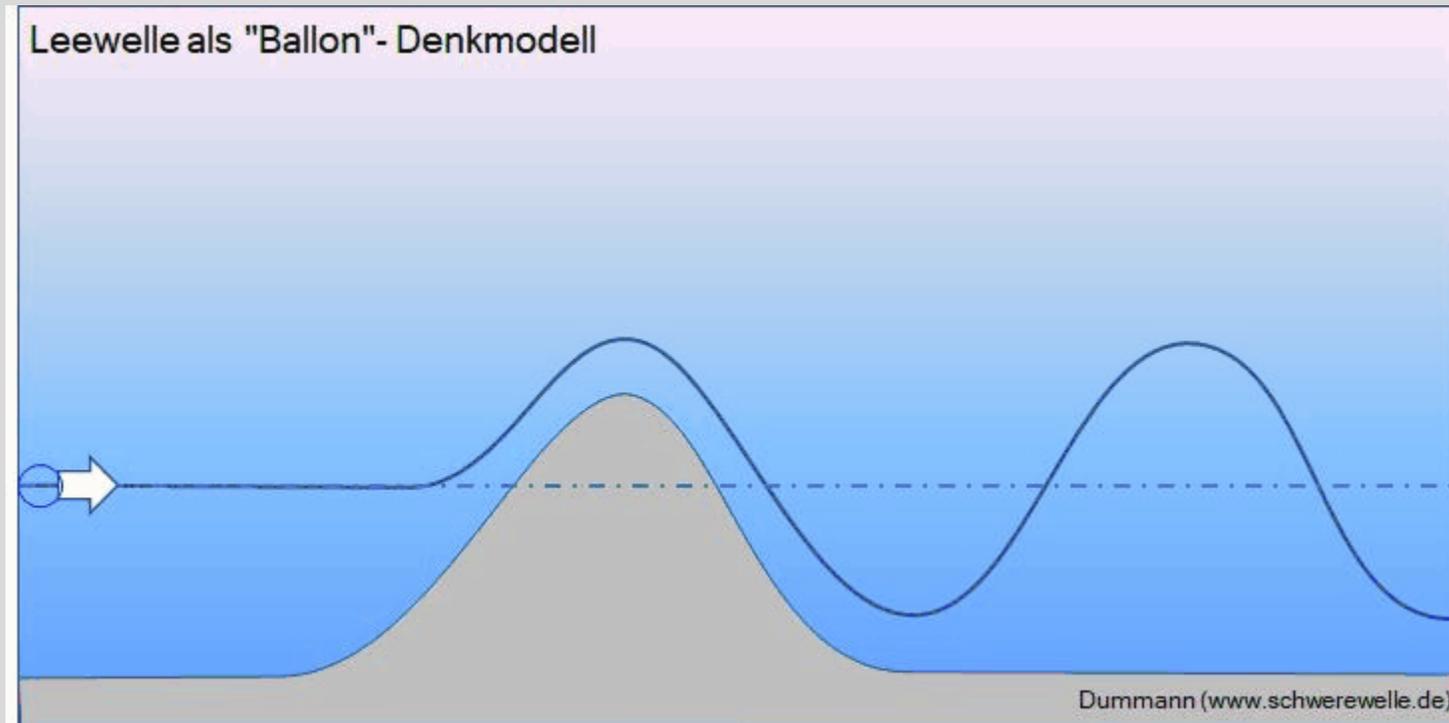


KLEINER LEEWELLEN- (DENK-) MODELLBAU...



Jörg Dummann

Jahrestreffen „Schwerewelle.de“ 2024

02.03.2024, Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover

Das überkommene Leewellen-Denkmodell

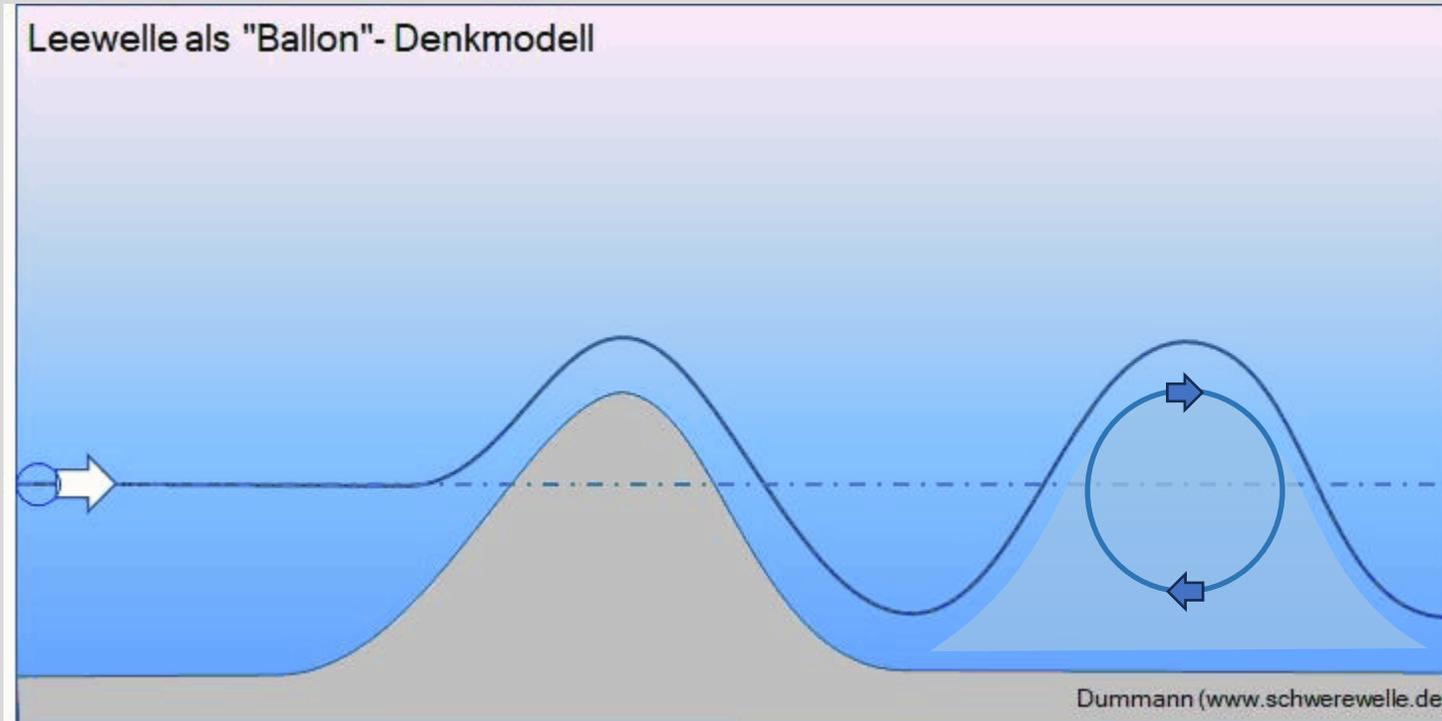
“Essentially, all models are wrong, but some are useful.”



George Edward Pelham Box

* 18.10.1919 † 28.03.2013

Quelle: DavidMCEddy at en.wikipedia, CC BY-SA 3.0,



Hinweise / Legende:

Qualitative Darstellung - keine präzisen Kräfteparallelogramme!

Dargestellt sind:

- Wind / Advektion: weißer Pfeil
- Triggerkraft: grüner Pfeil
- Auftriebskraft: roter Pfeil
- Abtriebskraft: blauer Pfeil
- Senkrecht schraffiert ist die Bilanz aus Trägheits- sowie Ab- und Auftriebskräften
- Luftpaket:
Durchmesser variiert mit Umgebungsdruck
Dunklere Färbung: Dichte höher / Temperatur geringer als Umgebung
Hellere Färbung: Dichte geringer / Temperatur höher als Umgebung

Die Begriffe „Leewelle“ und „Gebirgswelle“ werden - wie auch allgemein üblich - synonym verwendet.

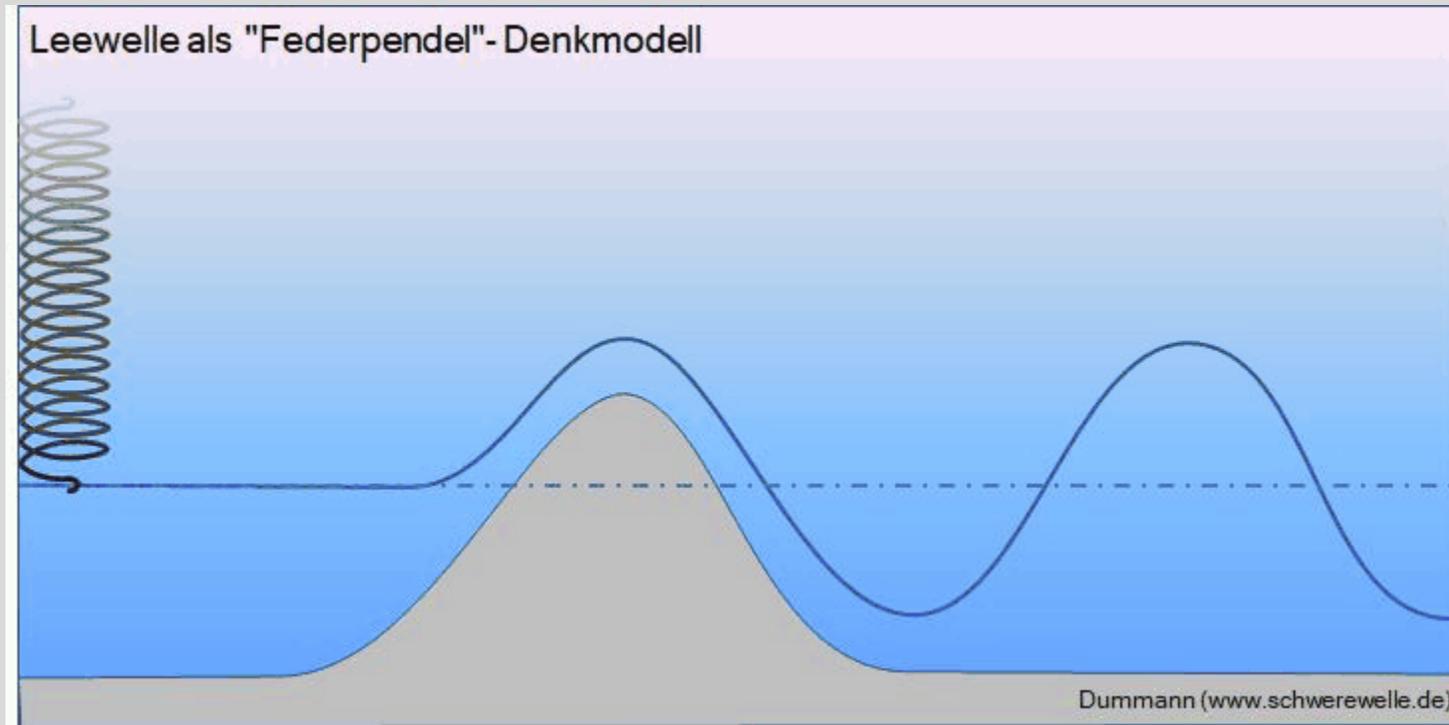
Stärken:

- Über die Windgeschwindigkeit lässt sich sowohl faustregelhaft (Georgii, Prat) als auch präzise (Brunt-Vaisala) die Wellenlänge errechnen.
- Die Darstellung gibt korrekt die Bahn und das Verhalten eines Pilotballons wieder, der in einer Wellenströmung mitgeführt wird. Es impliziert so sehr eingängig das Bild einer stationären (ortsfesten) Welle. Dadurch hat es weite Verbreitung gefunden.
Bei dem Versuch jedoch, daraus eine Erklärung für die Entstehung der Welle abzuleiten, stößt das Modell auf Schwierigkeiten:

Schwächen:

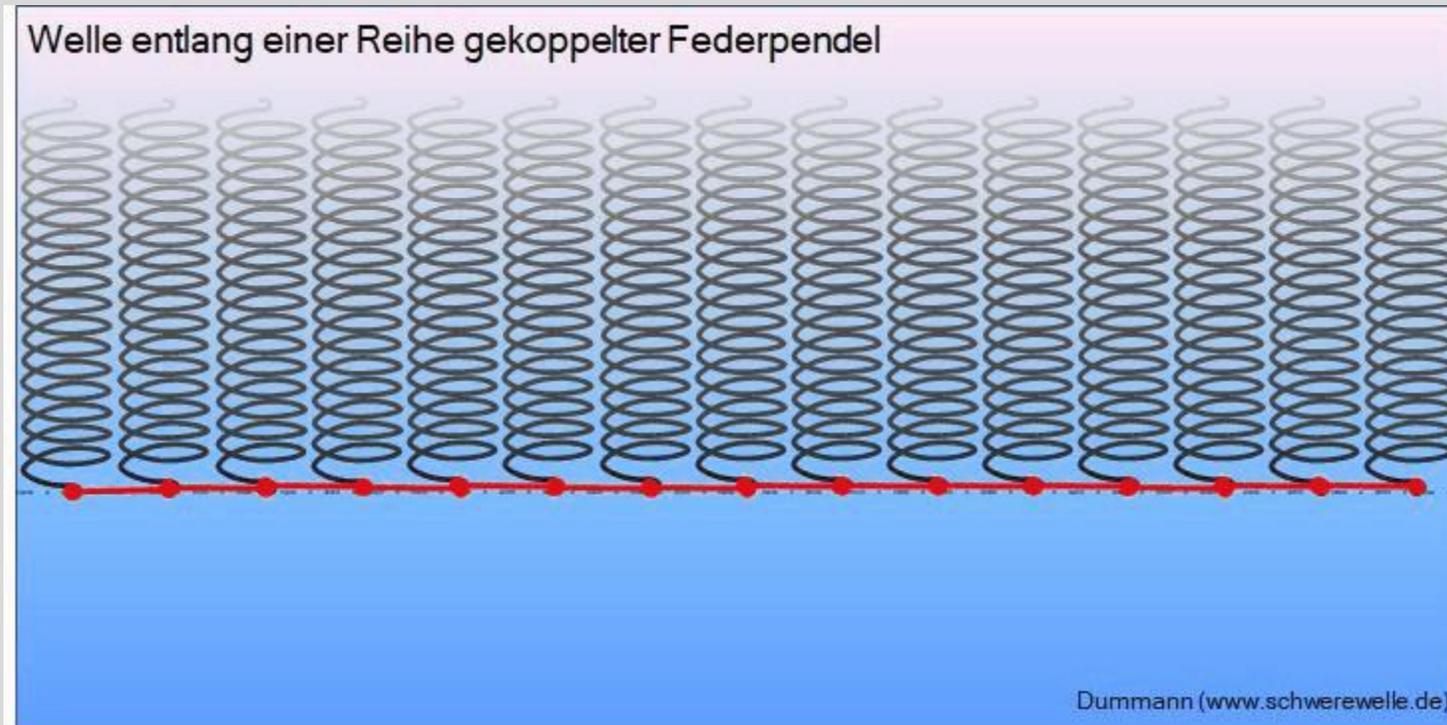
- Die Größe des Luftpakets ist willkürlich festgelegt. Da die Nachbarpakete derselben Bewegung unterliegen, gibt es gar keine thermodynamischen Effekte zwischen Luftpaketen dieser Dimensionierung und der Umgebungsluft
- Eine Umkehrung der Windrichtung unter dem Rotor ist (Die Trennung der „Windschicht“ vom Boden wird im Modell angenommen) nicht beobachtbar.
- Dargestellt ist keine Welle, sondern eine mit dem Wind versetzte Oszillation. Wellen transportieren keine Materie, sondern nur Energie.
- U.w.m.: Plateausituation, Lage der Primärwelle, Föhnstürme... nicht erklärbar.

Denkmodell: Eine Leewelle als Folge eines vom Wind versetzten Oszillators,
z.B. eines vertikal schwingenden Federpendels



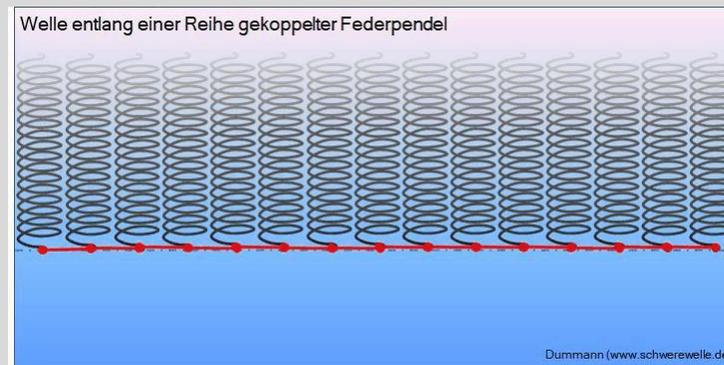
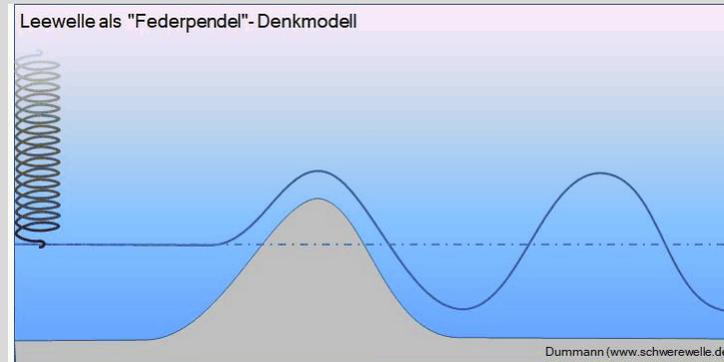
Transportiert wird nicht nur Energie sondern auch Materie - eben das Federpendel, das sich fortbewegt...

Gekoppelte Oszillatoren: Einfaches physikalisches Modell einer Welle



Transportiert wird nur Energie - die Pendel verbleiben an Ort und Stelle.

Leewellen als vom Wind versetzte vertikal schwingende Materie?



Wellen transportieren nur Energie, keine Materie...

Schwerewellen in Fluiden (Flüssigkeiten, Gase)

Ein geschichtetes Fluid schwingt (Fluid-Oszillator)

60 5 Internal gravity waves

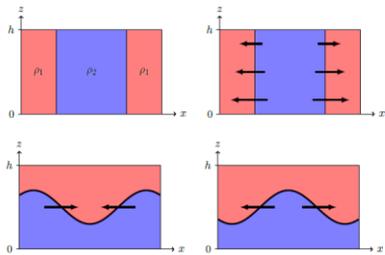


Fig. 5.17: Development of a two layer fluid with densities ρ_2 (heavy fluid, blue) and ρ_1 (light fluid, red) initially separated by vertical sidewalls (upper left). The hydrostatic pressure forces after the removal of the walls are indicated by arrows in the upper right. Later possible stages of fluid motion are shown in the lower part of the figure.

Quelle: Dieter Etling
Atmospheric Gravity Waves and Soaring Flight -
Physical principles and practical applications, S.
60

as free publication available online at:
www.schwerewelle.de



(Dargestellt sind Auf- (rot) und Abtriebskräfte (blau), die Bilanz aus diesen und der Trägheitskraft (strichliert) sowie hydrodynamische Kräfte (grau))

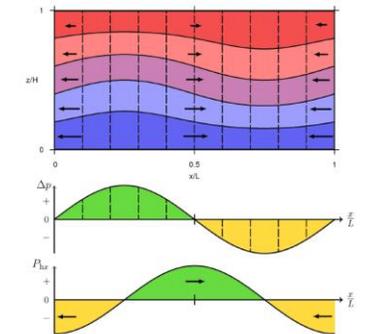


Fig. 5.18: Hydrostatic pressure forces acting in the gravity wave shown in Fig. 5.17. Top: strength and direction of pressure forces as indicated by arrows at some locations in the wave. The vertical dashed lines indicate columns with fluid parts of different density (blue: dense, red: less dense). Middle: hydrostatic pressure variations Δp at the surface ($z = 0$) as induced by the wave. Bottom: variation of the hydrostatic pressure force P_h at the surface. Arrows indicate the direction of forces.

Quelle: Ebenda, S. 61

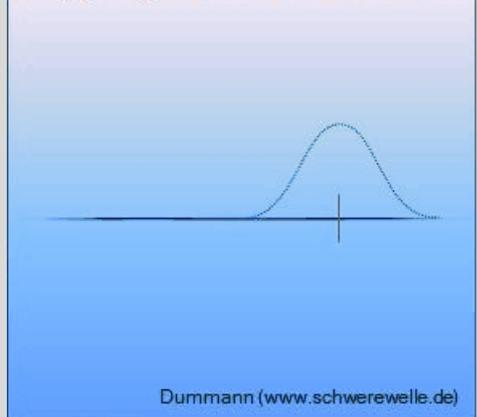
- Die Größe des betrachteten „Luftpakets“ entspricht einem Wellenberg / Wellental
- Hier: Auslösung durch Auslenkung aus dem thermodynamischen Gleichgewicht (in einem diskontinuierlich (-> Grenzfläche) oder auch kontinuierlich (nicht dargestellt) geschichteten Fluidkörper).
- Innere Dynamik des „Luftpakets“: Absinken ist begleitet von Diffluenz, Aufsteigen von Konfluenz.
- In der Horizontalen wirken dynamisch bedingte Druckkräfte, in der der Vertikalen statisch bedingte.
- Es erfolgt eine ständig wechselnde Umwandlung von der statischen Energieform in die kinetische - und zurück.
- Somit ist eine Auslösung sowohl vertikal über die Änderung der statischen Energieform, als auch horizontal über die der kinetischen Energieform möglich.

Gekoppelte Fluid-Oszillatoren: z.B. ringförmige Schwerewellen in Fluiden



Ringwelle auf einer Wasseroberfläche ausgelöst durch einen singulären vertikalen Impuls von oben nach unten

Kopplung von Fluid-Oszillatoren



Kopplung von Fluid-Oszillatoren:
(Dargestellt sind die jeweiligen Summen der kinetischen (grau) und potenziellen (blau) Energieform.)

Kinematik von Schwerewellen



(Dargestellt sind Auf- (rot) und Abtriebskräfte (blau), die Bilanz aus diesen und der Trägheitskraft (strichliert) sowie hydrodynamische Kräfte (grau))

Vertikaler Schnitt durch eine Ringwelle an einer Grenzfläche,
ausgelöst durch einen singulären vertikalen Impuls von unten nach oben.
(Schwerewellen sind nicht an Grenzflächen gebunden.
Sie treten auch in kontinuierlich geschichteten Medien auf.)

Hier in der Animation wird die Wellenenergie am rechten und linken Bildrand absorbiert.
(Würde sie anstatt dessen reflektiert werden, käme es bei entsprechender Dimensionierung des Systems zu einer "stehenden Welle". Diese wird, um den Vortrag nicht zu umfangreich werden zu lassen, hier nicht dargestellt.)



Ringwelle an einer atmosphärischen Grenzfläche ausgelöst durch einen singulären vertikalen Impuls oder - wahrscheinlicher - einen Dauerimpuls von unten nach oben.

(Die Auswirkung der Impulsbeschaffenheit auf die entstehende Welle soll hier nicht untersucht werden.)

Quelle: Wikipedia

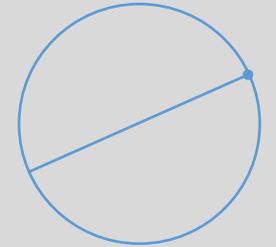
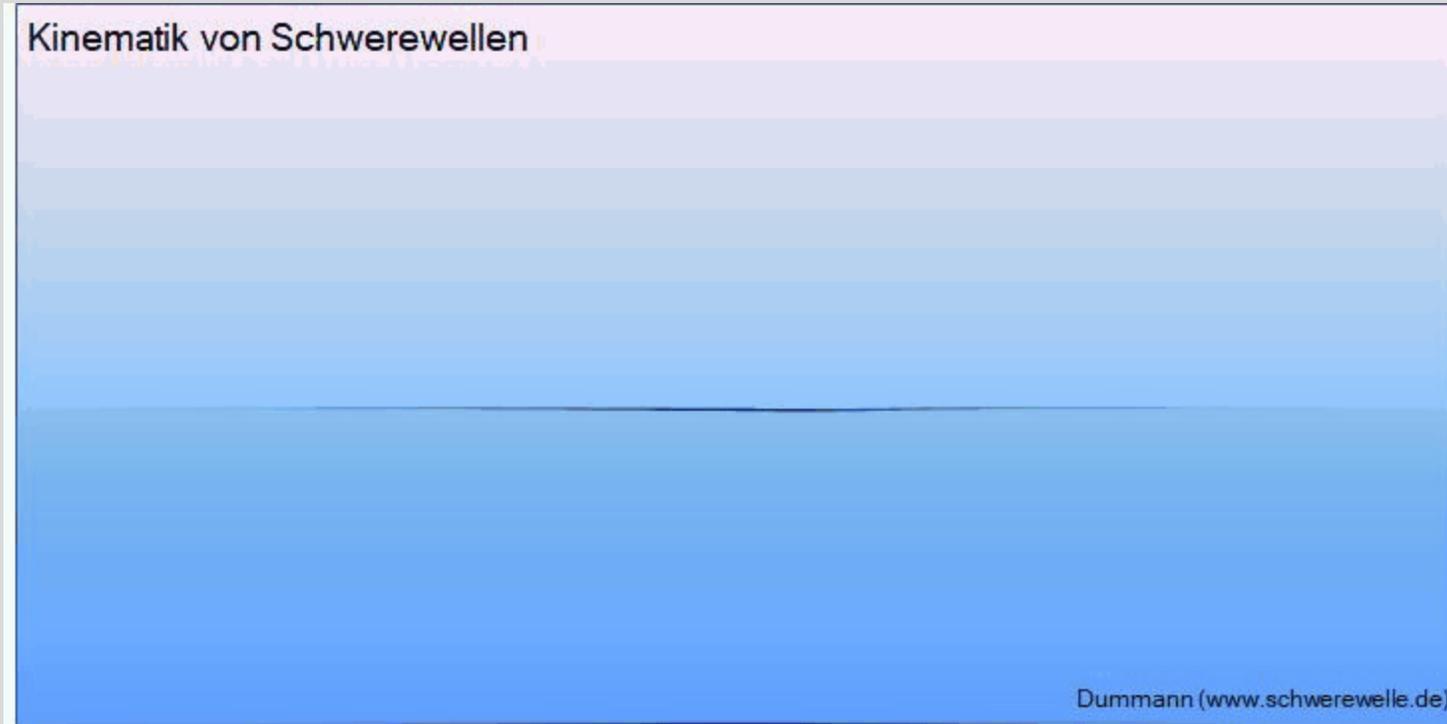
Schwerewellen in Fluiden: die Orbital-Bewegung



Kein Denkmodell sondern
physikalische Realität:
Die Orbitalbewegung...

Quelle: ? (via Dieter Etling)

Kinematik von Schwerewellen



(Dargestellt sind Auf- (rot) und Abtriebskräfte (blau), die Bilanz aus diesen und der Trägheitskraft (strichliert) sowie hydrodynamische Kräfte (grau))

Nur der zentrale Oszillator gibt - als Folge des Auslöseprozesses - Energie horizontal in alle Richtungen ab.
Alle Nachbarwellen transportieren Energie - an der dargestellten Grenzflächen horizontal - in eine einzige Richtung.
Die Orbitaldrehrichtung bestimmt die Richtung des Energietransports und damit auch die Ausbreitungsrichtung -
bei mit der Höhe abnehmender Dichte in der Fluid-Schichtung bedeutet Linksdrehung Ausbreitung nach links)

Schwerewellen in Fluiden: die Orbital-Bewegung

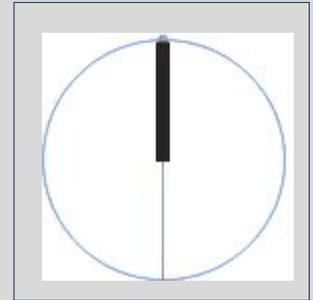


Eine Hilfs-Vorstellung:
Kettenreaktion kippender
Dominosteine...

Kinematik von Schwerewellen

Folgefolie:

Dummann (www.schwerewelle.de)



Ein umfallender Dominostein
markiert einen Viertelkreis des
Orbitals.

Um die Darstellung zu vereinfachen betrachten wir im Folgenden nicht mehr sämtliche Kräfte, sondern beschränken uns auf die resultierende Orbitalbewegung

Die Anzahl der Orbitale und ihre Position im Wellenzug ist beliebig. Sie können sich überlappen. Tatsächlich ist ihr Abstand infinitesimal klein.

Schwerewellen in der Atmosphäre

Ausbreitung von externen Schwerewellen

Walter Georgii schilderte schon früh eine Orbitalbewegung bei Scherungswellen (Kelvin-Helmholtz) („Flugmeterologie“, 1927, S.25), was durch die überkämpfenden Wogen bei denselben auch eindrucksvoll belegt wird...



„Kelvin-Helmholtz-Wirbel in der Atmosphäre, Monte Duval, Australien“
Quelle: Wikipedia



Veranschaulichung des Aufsteilens einer Schwerewelle unter Verwendung der Darstellung der Orbitalbewegung. (Die Geschwindigkeit der Orbitalbewegung ist konstant.)



Quelle: https://twitter.com/clever_reports/status/1500934253177192451/photo/1

Kinematik von Gebirgswellen - Ausbreitung in Richtung des Leehangs
(Hier: Windstille)



Dummann (www.schwerewelle.de)

Achtung Denkmodell! Die Übertragung des Konzepts auf Leewellen ist hier lediglich ein plausibler Analogieschluss.

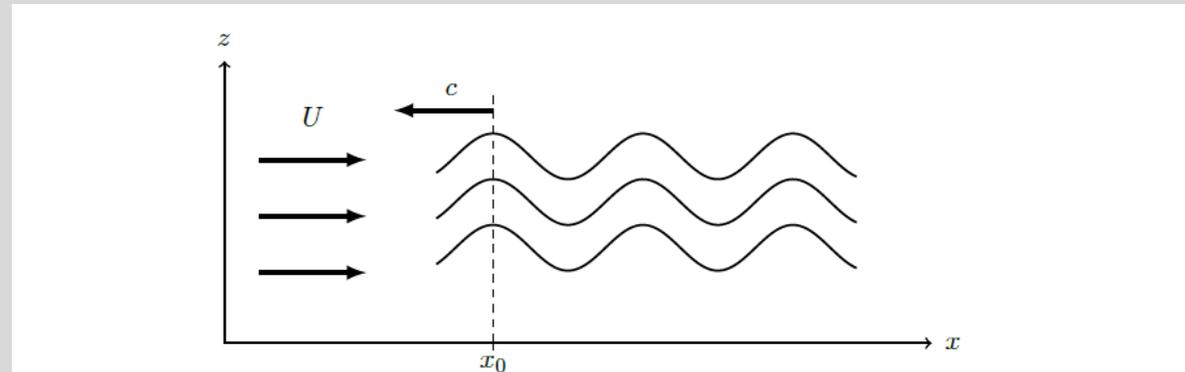


Fig. 5.9: Schematic of a stationary gravity wave with phase speed c opposite to the constant wind speed U . The ridges and troughs are fixed in space with respect to the surface (x -direction).

Schematische Darstellung einer stationären (ortsfesten) Schwerewelle

Quelle: Dieter Etling. Atmospheric Gravity Waves and Soaring Flight - Physical principles and practical applications, S. 49 as free publication available online at: www.schwerewelle.de

Und hier mussten sich die Orbitale dem von mir gewollten öden, technisch trocken dimensionierten Wellenzug unterwerfen. Man erkennt, dass sie dazu in den Wellentälern schneller drehen als unter den Kämmen.

Orbitale sind vielgestaltig und komplex: Es sind nicht immer ideale Kreise, sondern können auch stehende oder liegende Ellipsen sein. Sie können in der Vertikalen asymmetrisch sein. Darüber hinaus kann die Rotationsgeschwindigkeit in einem Orbital variieren. Sie müssen nicht ortsfest sein und können wandern, was cycloide oder trochoidale Wellenformen erzeugt.

Leewellen als Stationäre Schwerewellen

Kinematik von Gebirgswellen - Ausbreitung in Richtung des Leehangs
(Hier: Windstille)

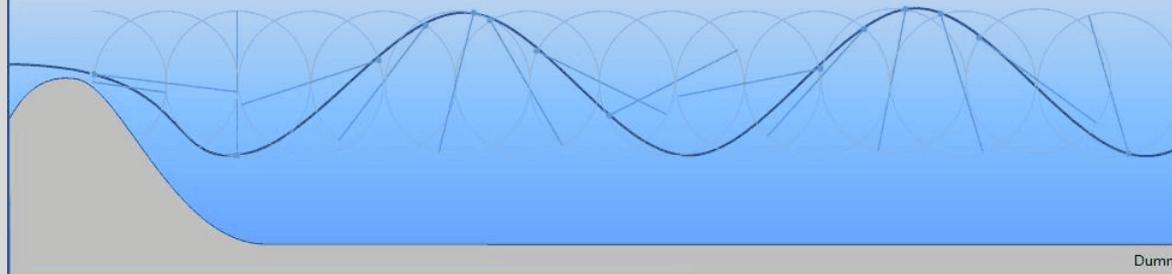


Dummann (www.schwerewelle.de)

Der uns "normal" erscheinende Fall, dass die Wellenausbreitung den Windversatz exakt kompensiert ist durchaus ein sehr spezieller.

Er ist nur unausweichlich an das Objekt unseres Interesses "Leewelle" geknüpft.

Kinematik von Gebirgswellen - Ausbreitung in Richtung des Leehangs
(Hier: (Gegen-)Windgeschwindigkeit = Wellenausbreitungsgeschwindigkeit)



Dummann (www.schwerewelle.de)

Um stationär (ortsfest) werden zu können muss dieser Welle ein Wind mit einer Geschwindigkeit (nach rechts) entgegenwehen, die genau der Ausbreitungsgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) der Welle (nach links) entspricht.

Leewellen als Stationäre Schwerewellen

Kinematik von Gebirgswellen - Ausbreitung in Richtung des Leehangs
(Hier: (Gegen-)Windgeschwindigkeit = Wellenausbreitungsgeschwindigkeit)

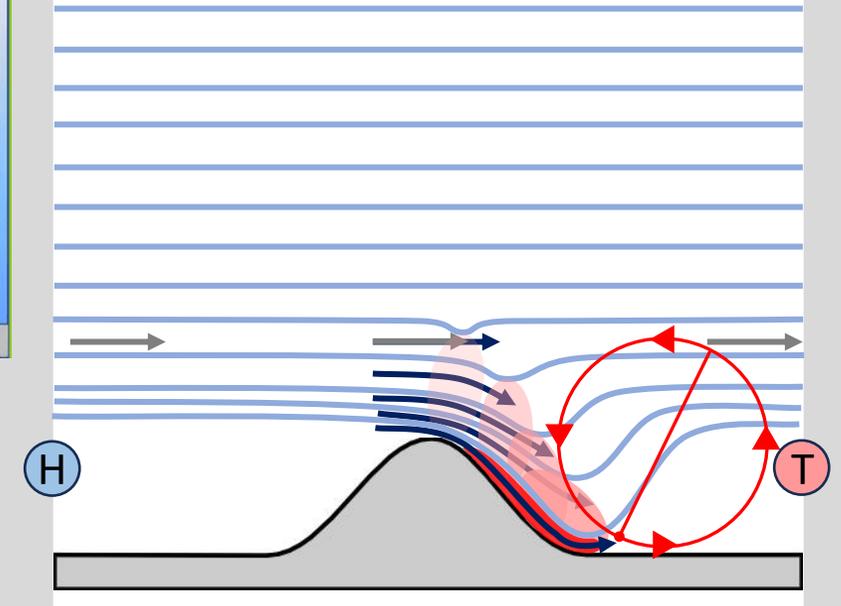
Triggerprozess?



Dummann (www.schwerewelle.de)

- Verengung des Strömungsquerschnitts durch Lage der Inversion knapp über dem Kamm
- Beschleunigung der Strömung nach Venturi
- Druckerniedrigung nach Bernoulli
- Lokale Auslenkung der Inversionfläche nach unten
- Weitere Verengung des Strömungsquerschnitts: ein sich selbst verstärkender Prozess beginnt
- Schließlich Erreichen des Transportmaximums im verengten Strömungsquerschnitt
- Dadurch Behinderung des Druckausgleichs zwischen Hoch- und Tiefdruckgebiet
- Ausbildung von lokalem Tiefdruck im Leebereich
- Weitere Verengung des Strömungsquerschnitts, Anschmiegen der Inversion an den Leehang, Auftreten von Föhnstürmen / Downslope Windstorms
- Linksdrehende Orbitale in dem ausgelösten Wellenzug der o.a. Darstellung sind die Folge

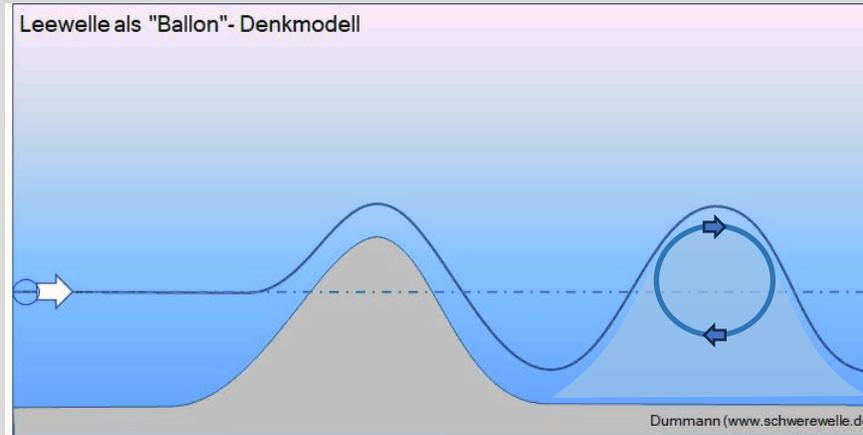
Auslösung von Leewellen



Grenzen eines Denkmodells:

Häufig weht ein Leewellen-erzeugender Wind nicht direkt vom Hoch zum Tief, sondern isobarenparallel...

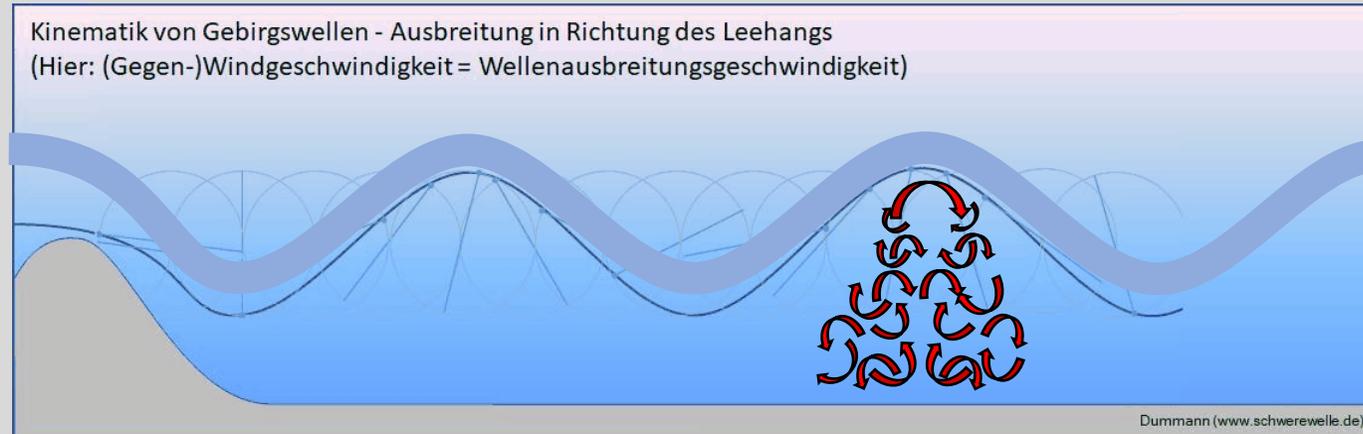
Das überkommene Denkmodell:



Das erweiterte Denkmodell:.



Usefull...?

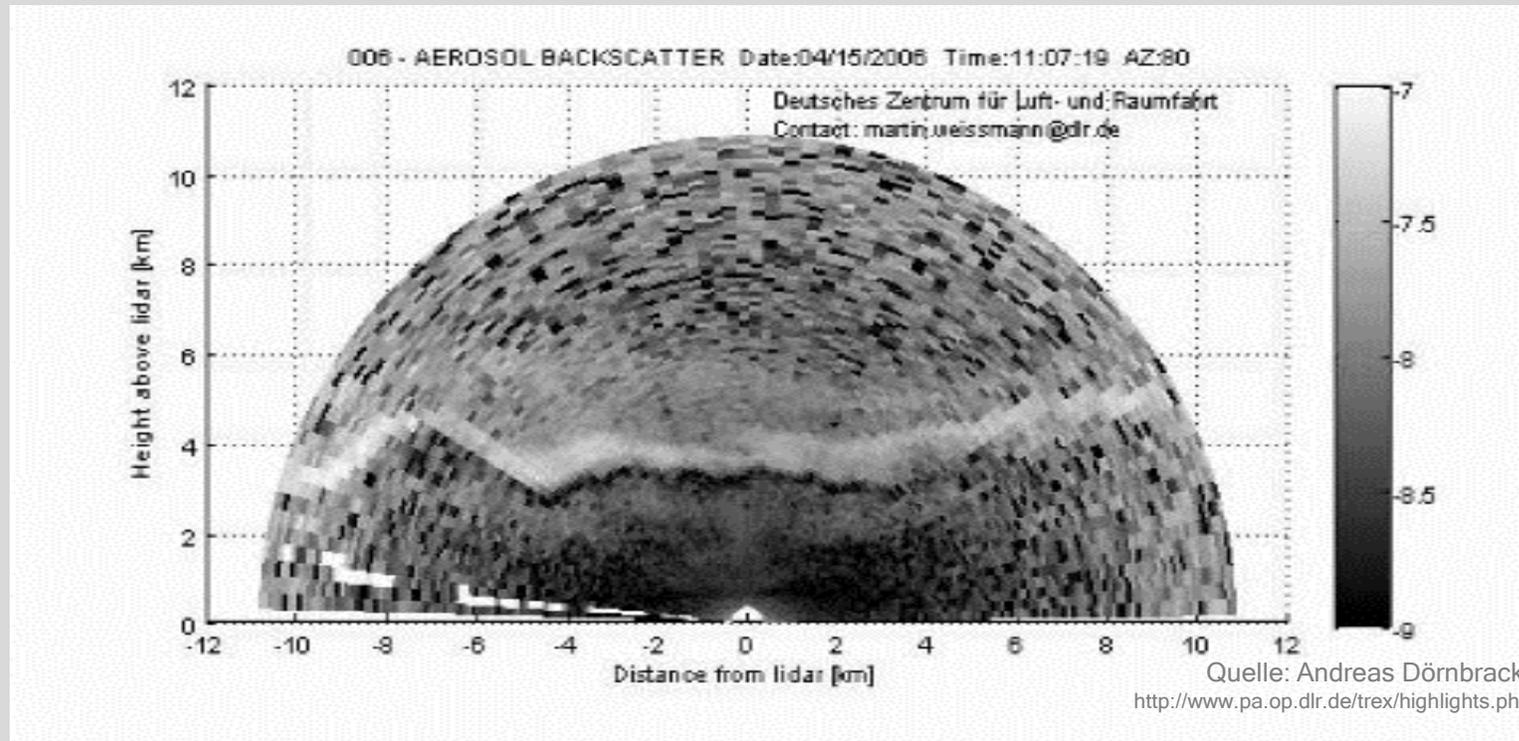


- Die Berechnung der Wellenlänge lässt sich nach wie vor über die Windgeschwindigkeit sowohl faustregelhaft (Georgii, Prat) als auch präzise (Brunt-Vaisala) vornehmen - wohlgermerkt nur für den speziellen Fall dass Windgeschwindigkeit und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit genau komplementär sind.
- Der Rotor wird als Folge der unter den Wellenkämmen gegen die Strömungsrichtung gerichteten Orbitalbewegung interpretiert. Es gibt keine anhaltende Umkehrung der Windrichtung unter dem Rotor. (Ggfs. aber in den Rotorwolkentops eine Drehbewegung durch Mitnahmeeffekte der aufliegenden Schicht in Windrichtung)
- Die Lage der Primärwelle näher am Hindernis als von der Länge der Folgewellen her zu erwarten, erklärt sich durch eine erhöhte Orbitalgeschwindigkeit (Föhnsturm, „Downslope windstorms“) am Leeang.
- Es wird ersichtlich, warum in Scherungswellen keine Rotoren auftreten: die Drehrichtung der Orbitale ist gleich der Windrichtung.
- Das Denkmodell ergänzt harmonisch das des dynamischen Föhns. Beide Modelle zusammen erklären die Entstehung von Wellen auch an Plateaukanten, sowie die von Föhnstürmen / „Downslope Windstorms“...

Und - last not least - die reale Komplexität:

Eine Zeitraffersequenz (4,5 Std.) von LIDAR-Scans einer Leewelle an der Sierra Nevada gewonnen im Rahmen der Feldkampagne des T-REX*-Forschungsprogramms.

(* Terrain-Induced Rotor Experiment)



Und es geht weiter:

Welches kohärente, in sich konsistente Denkmodell erlaubt auch das anschauliche Verständnis des Phänomens „hydraulischer Sprung“, dessen Charakteristik manche Leewellen aufweisen? ...der Solitonen der „Morning Glory“-Wellen? ...der großen, rein hydrostatischen Wellen über großen Gebirgen?

Und näherliegend: Was passiert über dem hier diskutierten Bereich der externen Schwerewellen an der bodennahen Inversion im Reich der darüber zu findenden, internen Schwerewellen? Es werden grundsätzlich die gleichen Mechanismen sein, die sie ausmachen - aber ohne die Beschränkung auf eine horizontale Ausbreitung und darüber hinaus sich reflektierend, absorbierend, überlagernd, beugend, brechend...

Übrigens: Die absolute Laminarität der Strömung im oberen Regime einer Leewelle lässt sich plausibel dadurch erklären, dass sie die Inversionsfläche abbildet. und... ach...: ...brechen eigentlich alle Leewellen (entsprechend der postulierten Orbitaldrehrichtung) nach Luv...?

Denkt mit! . . . Übt Kritik! . . . Denkt weiter...