

Kelvin-Helmholtz-Wellen und Segelflug



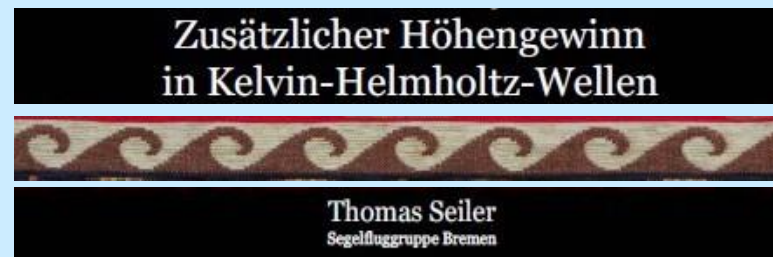
Sonderbriefmarke der Deutschen Post, 2020

Gestaltung: Bettina Walter, Foto Helmholtz-Wolken: © Sandra Mihm

Dieter Etling

Berichte über Flüge in Kelvin-Helmholtz-Wellen bei Wellenflugtreffen

2014: Thomas Seiler, 2015/2017/2025: Herbert Horbrügger, 2024: Martin Pohl



Wellentreffen Göttingen 2014

3. Oktober 2013, Acker-Welle

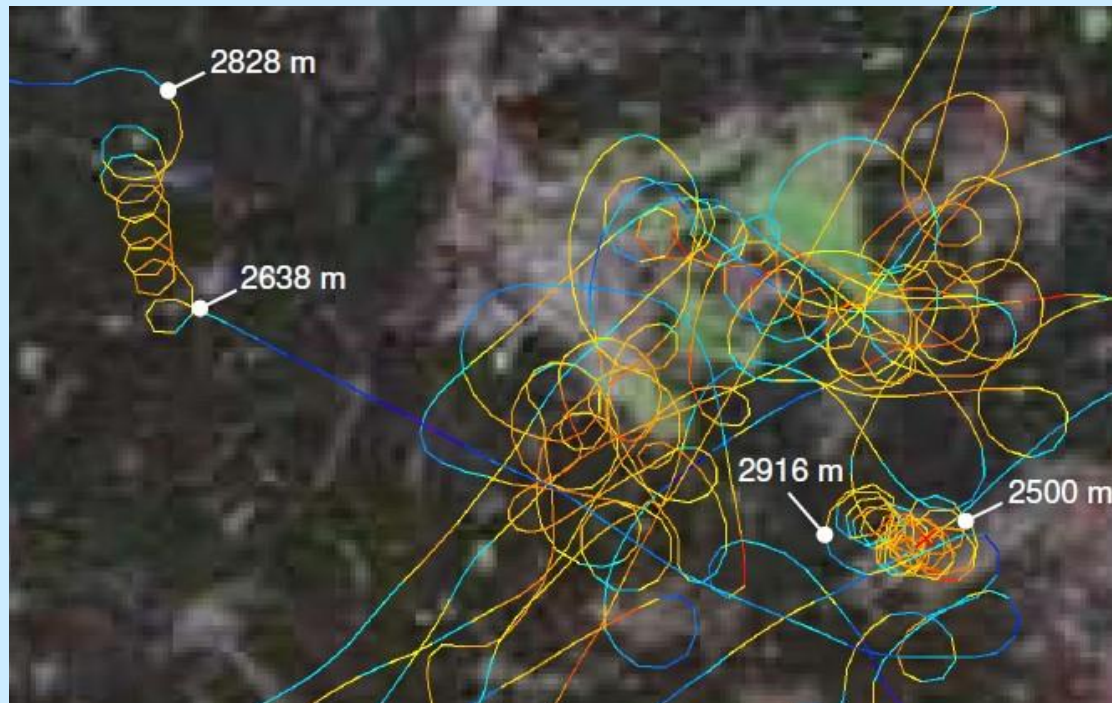
Pilotenbericht von Thomas Seiler:

Aufgrund des mit der Höhe abnehmenden Windprofils befand sich das beste Steigen in den unteren Abschnitten unter 2000 m.

Erstaunlich, dass vereinzelt Höhen über 2700 m möglich waren. Diese Höhen waren aber **nicht kontinuierlich reproduzierbar** erreichbar.

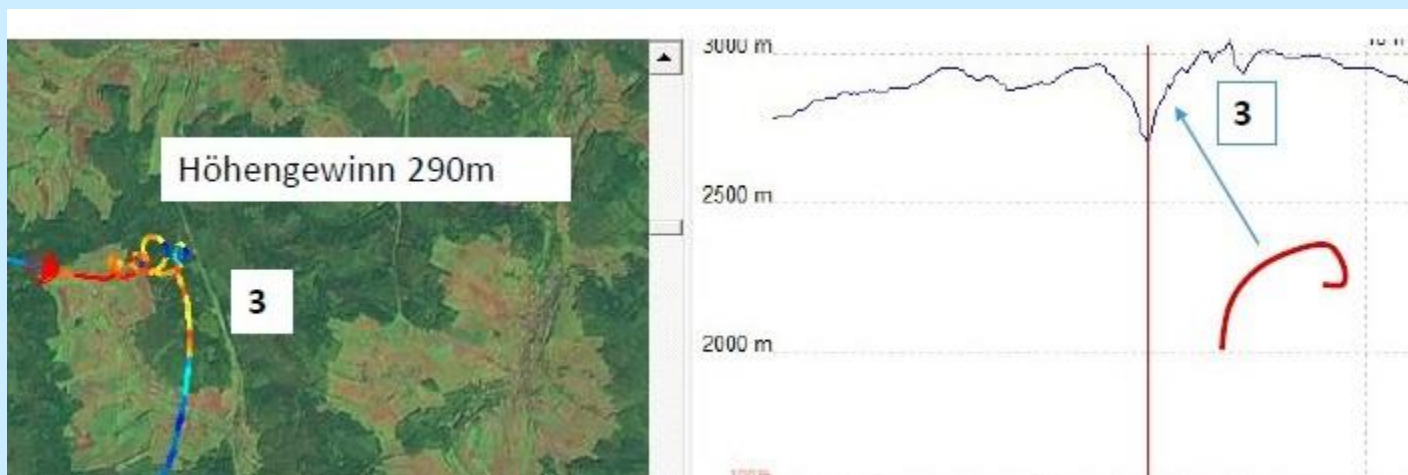
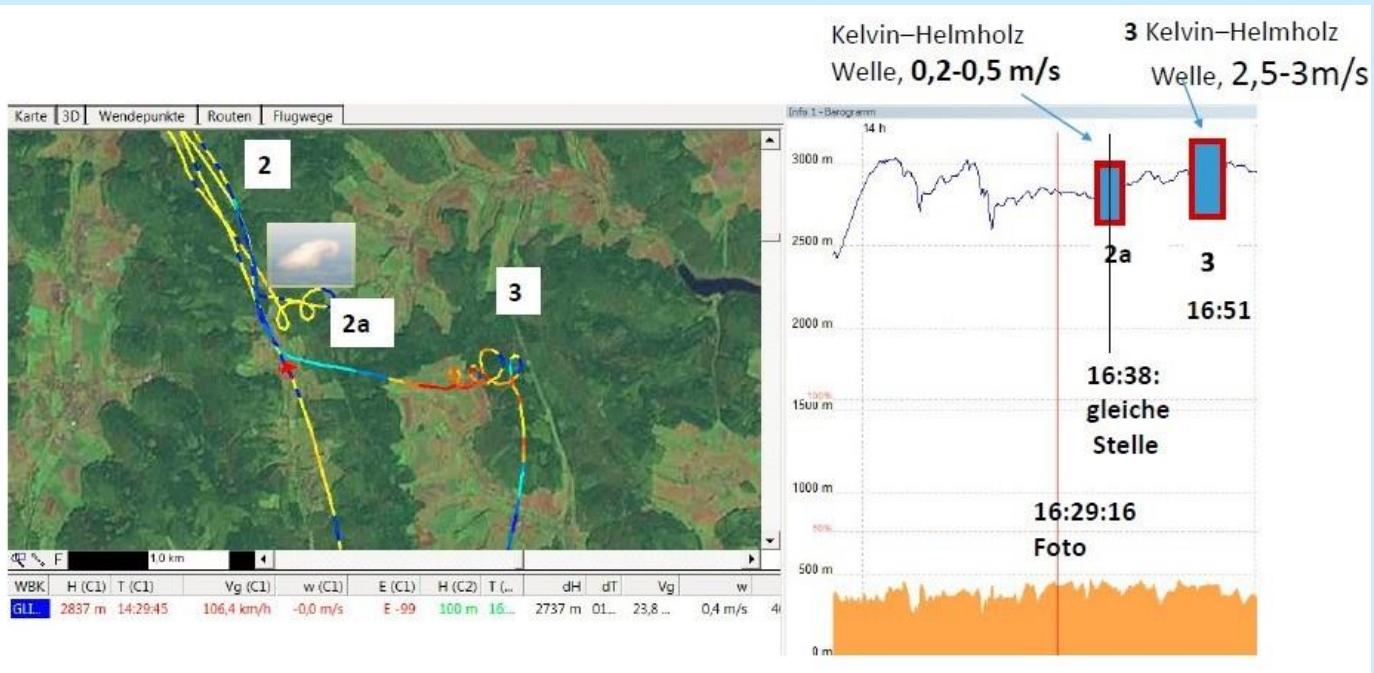
Vielmehr handelte es sich um **zeitlich und lokal begrenztes Steigen** mit leichter Turbulenz, welches mehr **Ähnlichkeit mit Thermik** hatte und auch am besten **durch Kurbeln ausgeflogen** werden konnte.

KHW ?



KHW ?

Herbert Horbrügger, Odenwald, 6.6.2014



Berichte über Flüge in Kelvin-Helmholtz-Wellen bei Wellenflugtreffen

Vertikalwind ca. 1-3 m/s

kurzfristig ausfliegbar durch „kurbeln“ wie in Thermik

Höhengewinn ca. 300 m

Aufwindgebiete verdriften mit dem Wind

Als Kontrast: Leewellen

Vertikalwind ca. 1-10 m/s

über Stunden ausfliegbar ohne „kurbeln“

Höhengewinn einige Tausend Meter

Aufwindgebiete bleiben ortsfest

Seitlich aufgenommene KHW ähneln brechenden Wasserwellen



Foto:
Claudia Hinz



Foto:
Books Martner
NOAA-ETL

Weitere imposante Fotos von KHW können hier aus Gründen des copyright nicht dargestellt werden

Diese finden sich in großer Zahl im Internet unter Suchstichworten wie:

Kelvin Helmholtz Wellen (waves)

Kelvin Helmholtz Wolken (clouds)

Kelvin Helmholtz Instabilität (instability)

Was sind Kelvin-Helmholtz-Wellen (KHW)?

Lord Kelvin (1871) und Hermann von Helmholtz (1868)

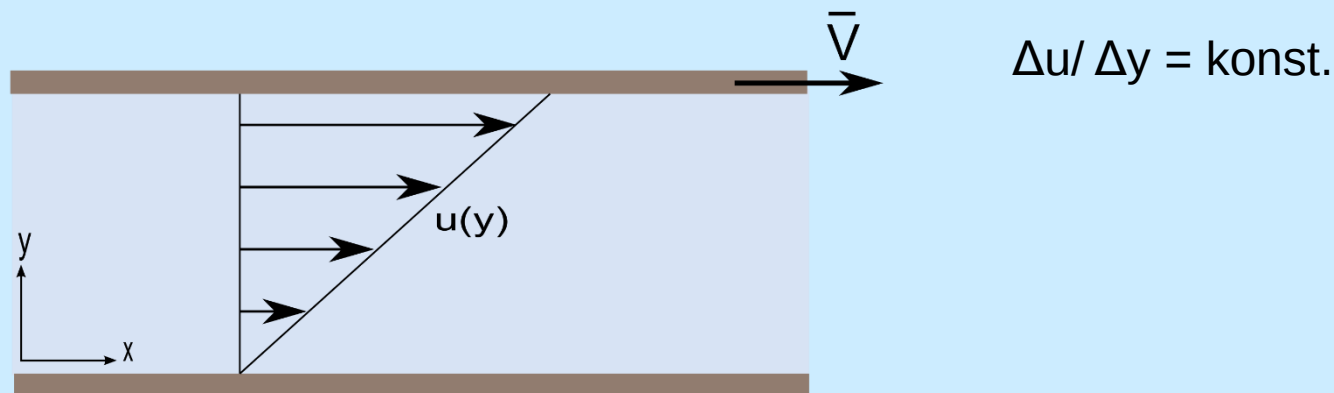
KHW sind wellenförmige **Instabilitäten** in einer Scherströmung

KHW werden auch als „Scherungswellen“ bezeichnet

Scherung: die Geschwindigkeit ändert sich quer zu ihrer Richtung

Scherung formal: Geschwindigkeitsgradient = $du/dy \approx \Delta u / \Delta y$

Instabilität: Strömungszustand durch Störungen aus dem Gleichgewicht



Einfache Scherströmung

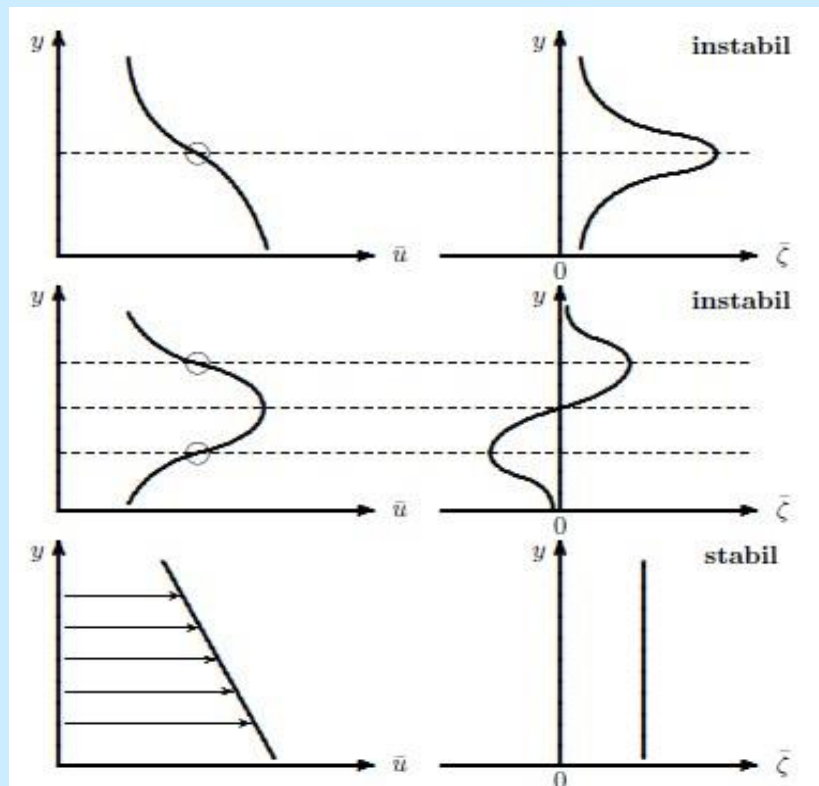
© wikimedia commons, CC BY-SA 3.0

In der Atmosphäre ändert sich der Wind fast immer mit der Höhe, somit ist auch Windscherung vorhanden

Wieso sind KHW dennoch selten?

Windprofil und Windscherung müssen spezielle Eigenschaften haben:

Das Vertikalprofil der Windscherung muss ein Extremum aufweisen



Wind

Scherung

Im Bereich von Inversionen

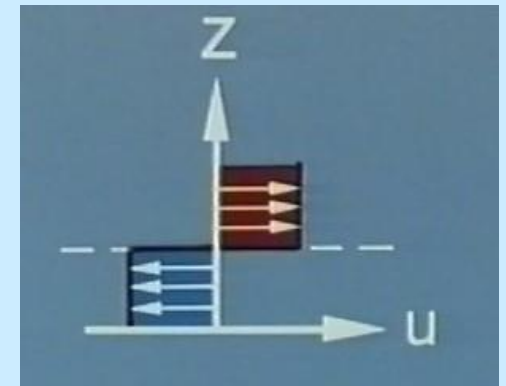
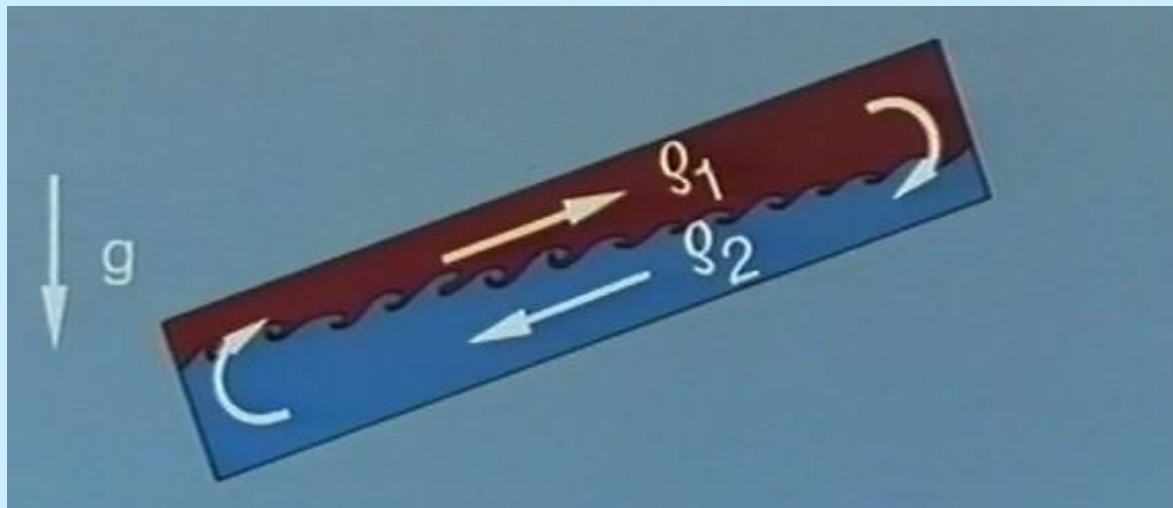
Jet Stream (Tropopause)

instabil: Bildung von KHW
stabil: keine Bildung von KHW



g = Schwerkraft

ϱ = Dichte



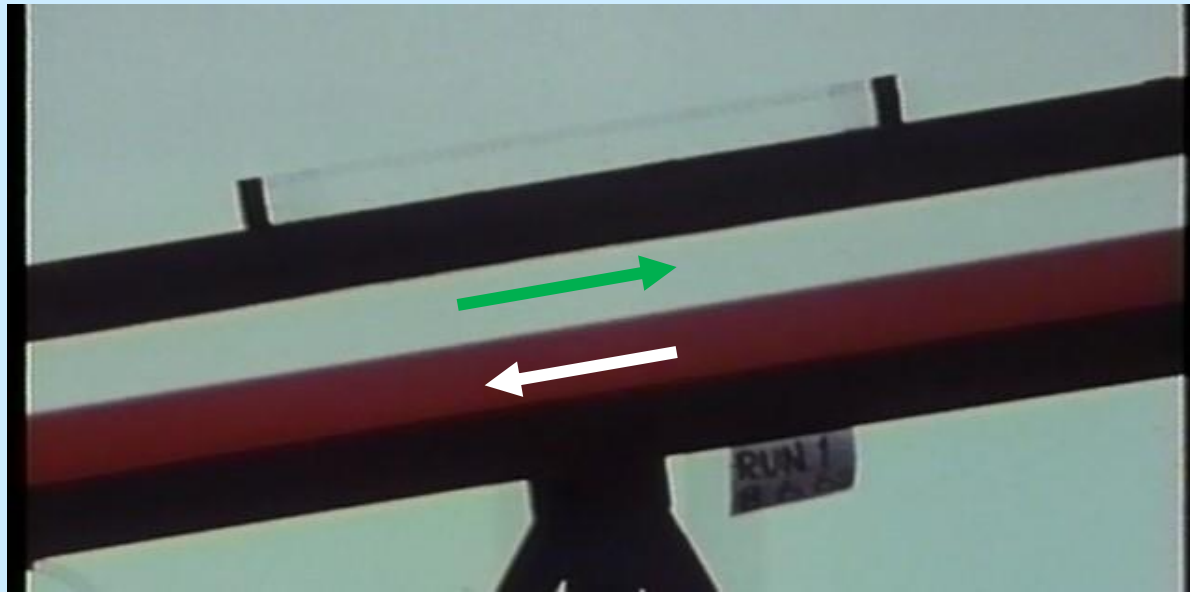
Erzeugung einer Scherströmung bei einem einfachen Laborexperiment zu KHW. Pfeile: Richtung der Strömung

Nachfolgend gezeigte Fotos stammen aus Experimenten mit einem 6 m langen Kipptank, bei denen 2 Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte verwendet wurden. Die Bilder wurden von Prof. S.A. Thorpe, Universität Southampton, zur Verfügung gestellt, welcher die Experimente in den Jahren 1968/69 durchgeführt hat



$t = \text{Zeit}$

t_1



t_2



Experimentfotos von S. A. Thorpe

t3

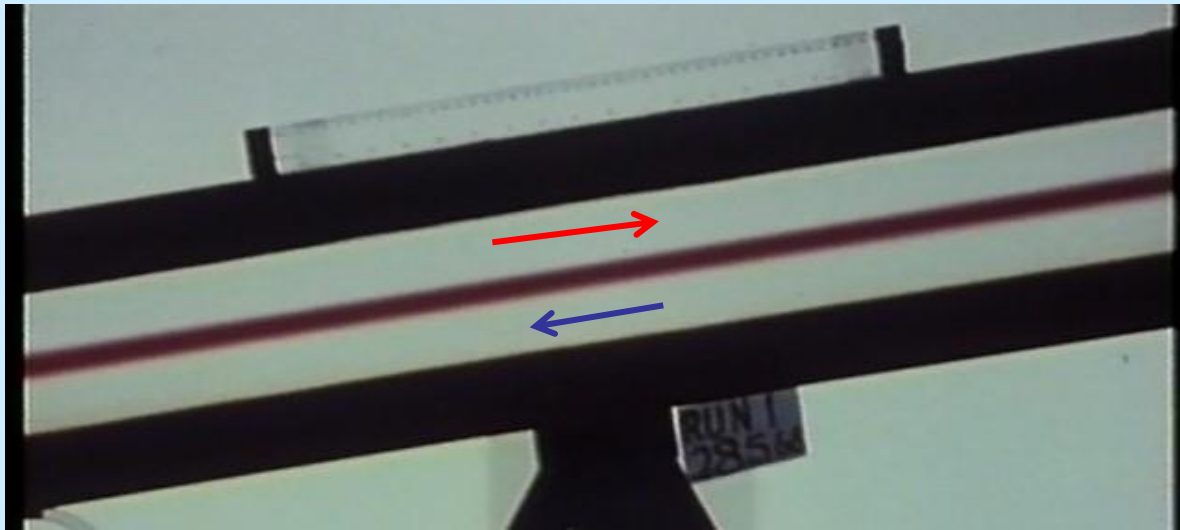


t4

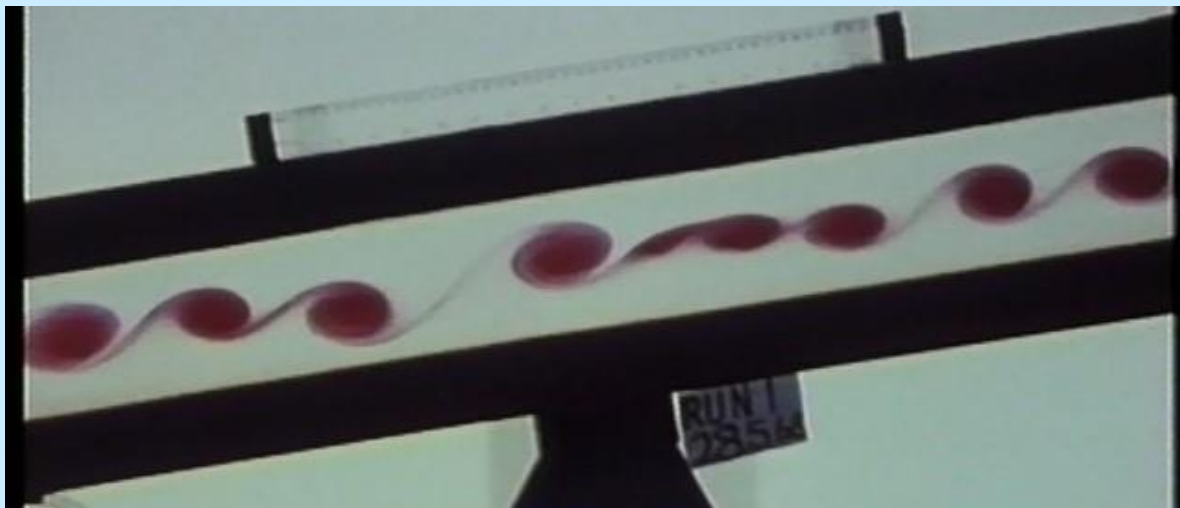


t4: KHW - Endstadium: turbulenter Zerfall
Atmosphäre: Clear Air Turbulenz (CAT)

t1



t2



t2: Bildung einzelner Wirbel („Katzenaugen“)

KHW in Atmosphäre und Laborexperiment

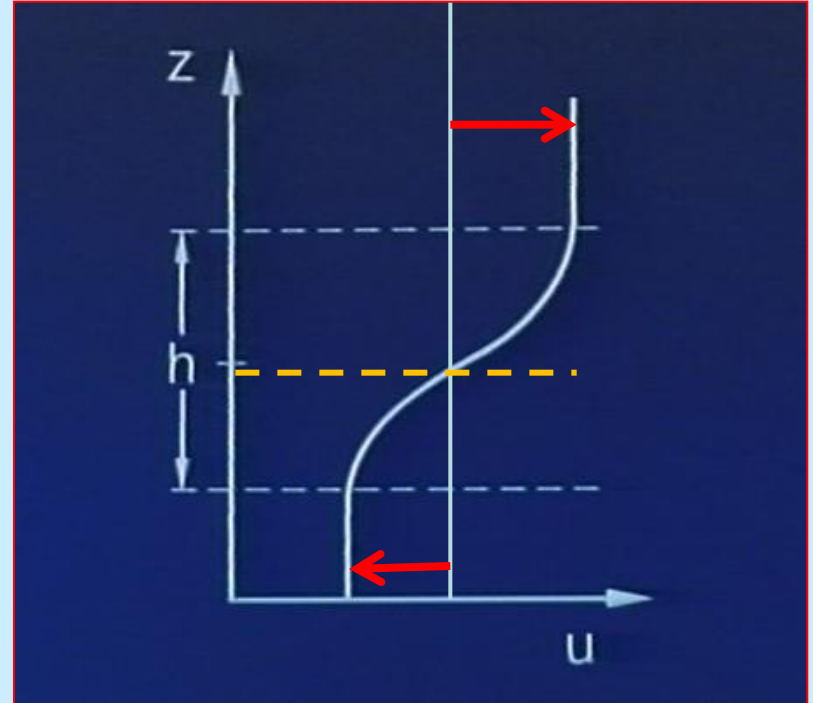
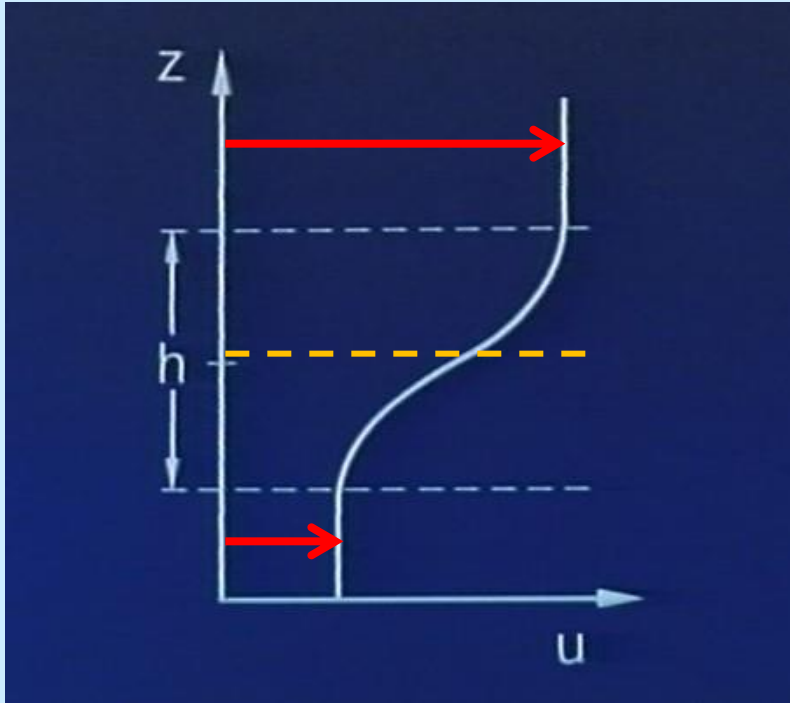


Foto:
Brooks Martner
NOAA_ETL



Foto:
S.A. Thorpe

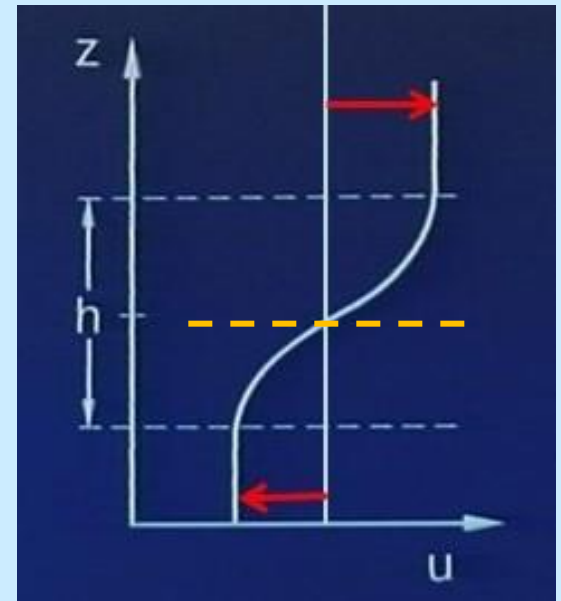
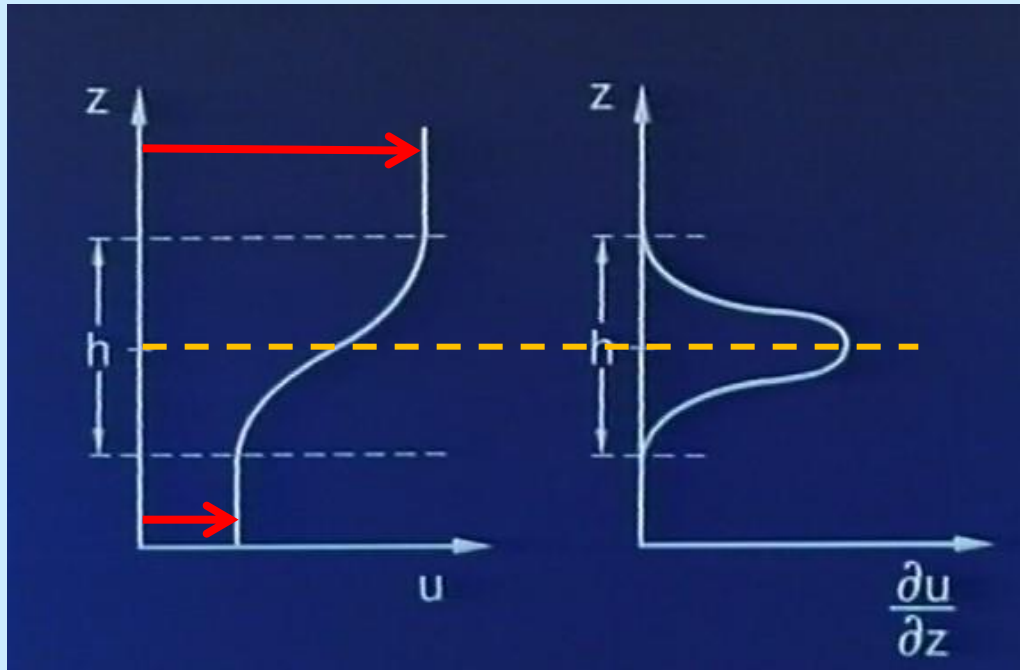
Vertikales Geschwindigkeitsprofil



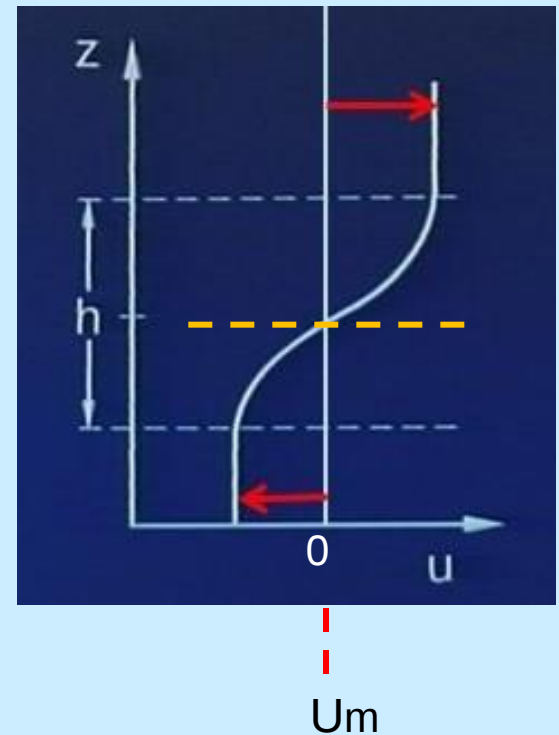
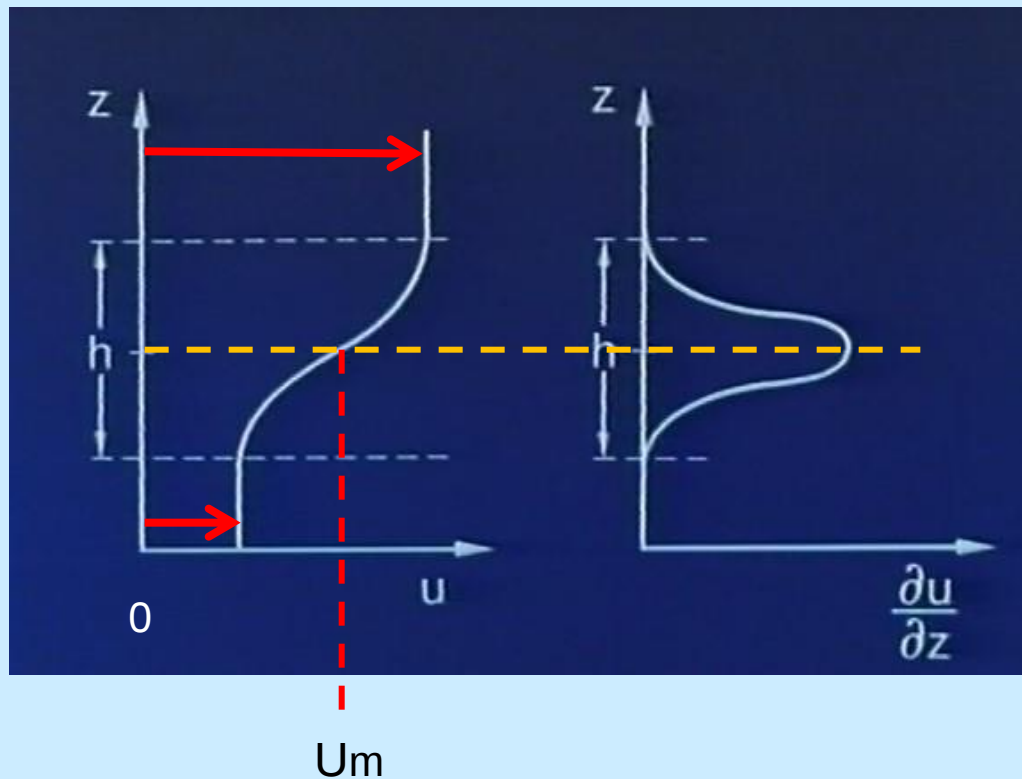
h = Dicke der Scherschicht

Atmosphäre

Laborexperiment



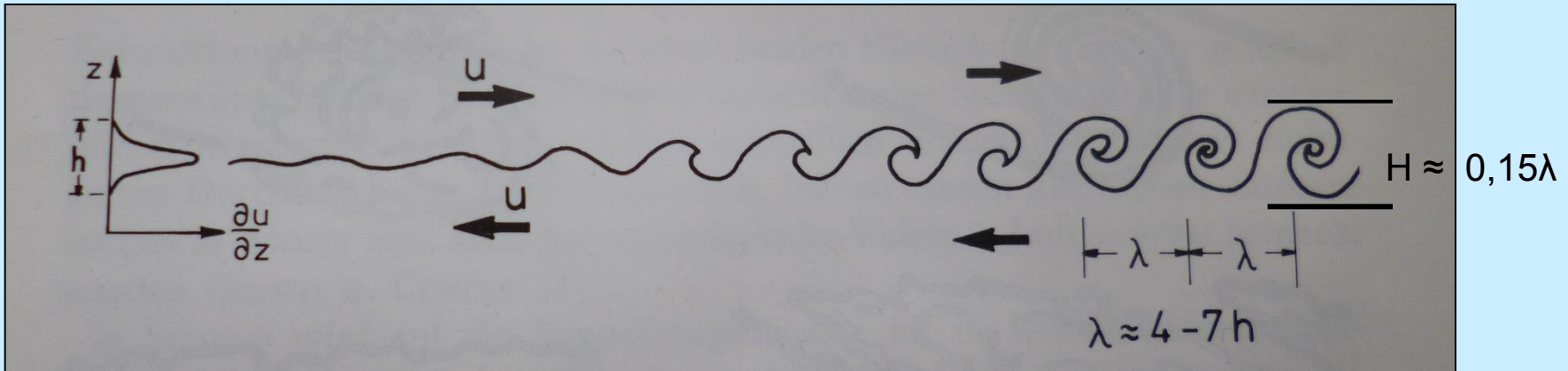
Beide Strömungen haben das gleiche Scherungsprofil du/dz ,
daher entstehen in beiden Fällen KHW



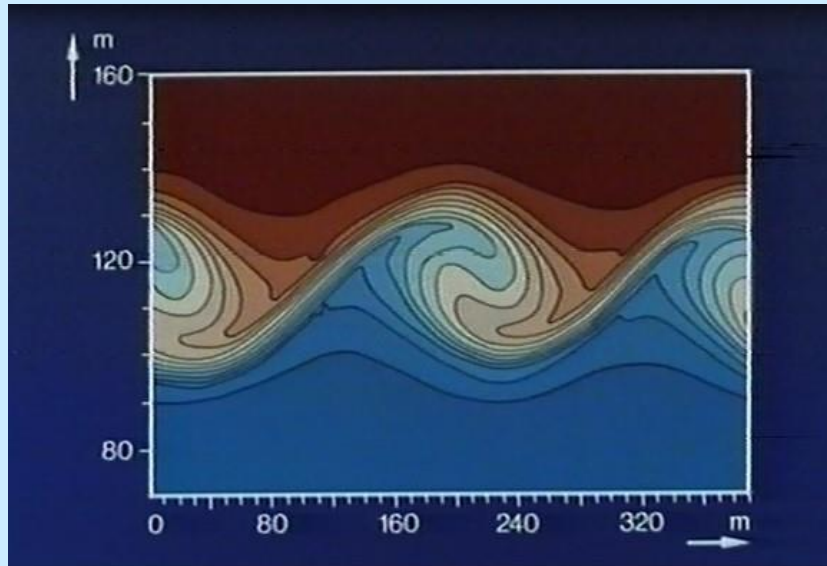
U_m = mittlere Geschwindigkeit der Scherschicht

KHW bewegen sich horizontal mit U_m

Zeitliche (räumliche) Entwicklung der Grenzfläche (Scherungs-Maximum)



Beispiel: $h = 100 \text{ m}$, $\lambda = 400 - 700 \text{ m}$, $H = 60 - 105 \text{ m}$
 $h = 500 \text{ m}$, $\lambda = 2 \text{ km} - 3,5 \text{ km}$, $H = 300 \text{ m} - 525 \text{ m}$

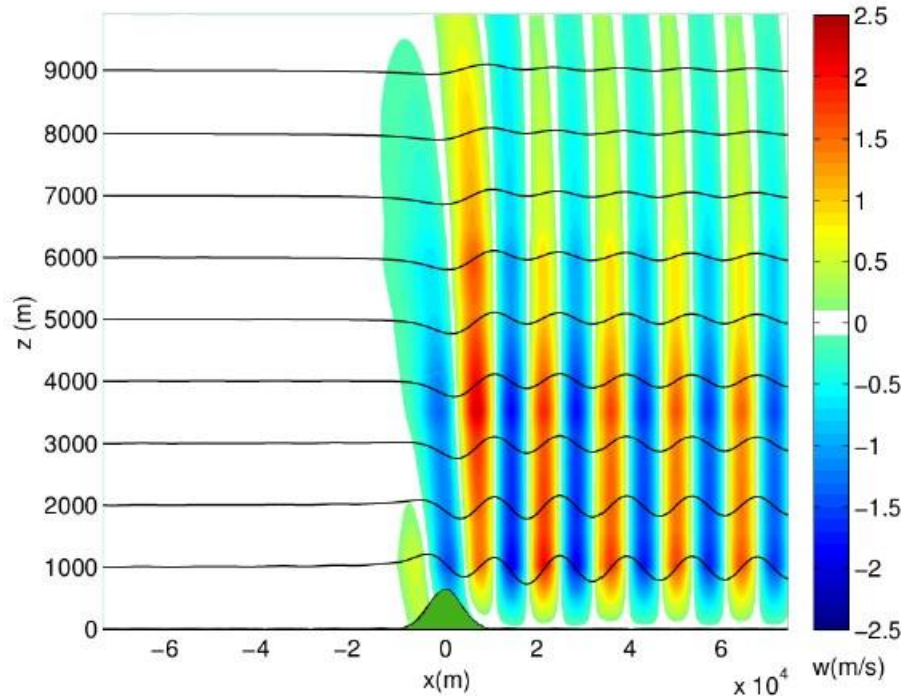


numerische Simulation
G. Koppenwallner, 1986

$h = 50 \text{ m}$
 $\lambda = 200$
 $H \approx 30 \text{ m}$

Feld der Vertikalgeschwindigkeit

Leewelle

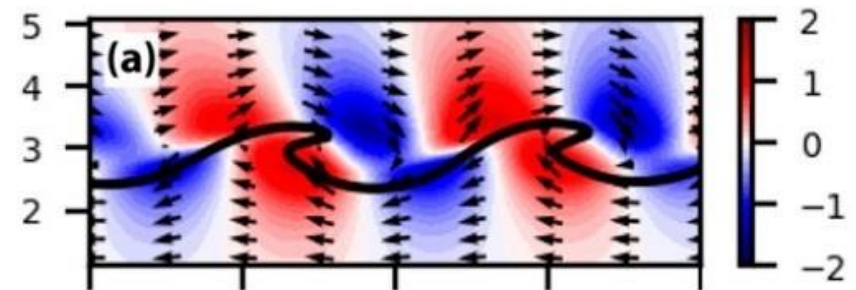


Andauer: einige Stunden

Vertikale Erstreckung: einige km

KHW

Simulation von Grasmick et al.,
2021, J.Atmos.Sci., Vol 68.



weniger als 1 Stunde

einige 100 m

Eigenschaften von KHW:

KHW bestehen aus aneinander gereihten Wirbeln mit gleichem Drehsinn in einer Scherschicht der vertikalen Dicke h (ca. 20 m – 500 m)

Wellenlänge: $L \approx 4 - 7 h$, (ca. 100 m – 4 km)

Amplitude: $A \approx 0.1 - 0.2 L$ (ca. 10 m – 300 m)

Andauer: $T \approx 10 - 60$ min.

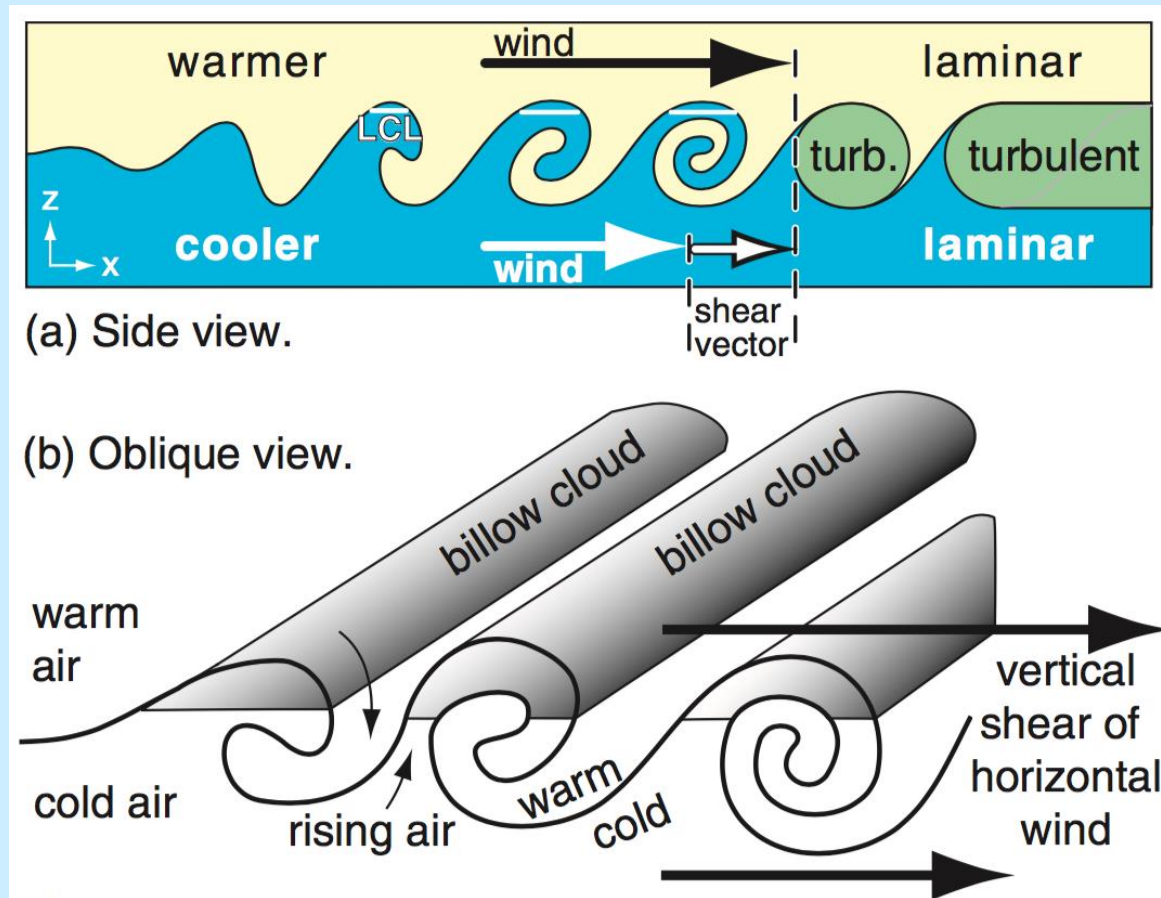
Horizontale Verlagerung: mit dem mittleren Wind in der Scherschicht

Aufwinde für Segelflug: $W \approx 1 - 4$ m/s

Strecke fliegen in Kelvin-Helmholtz-Wellen möglich?

Dies hängt von der lateralen Erstreckung von KHW ab

Schematische 3D-Struktur von KHW



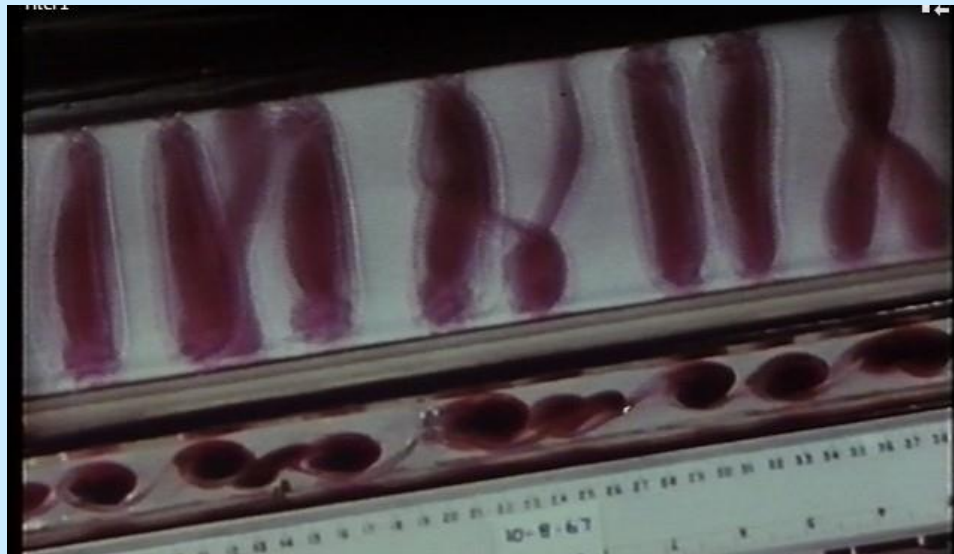
billow cloud = Wogenwolke

Räumliche Struktur von KHW



Aufsicht

Seitenansicht



Wirbelwalzen

Aus den Tankexperimenten von S.A. Thorpe



Wogenwolken (vermutlich) verursacht durch flächenhafte KHW



Aus H. Horbrügger : Großflächige Scherungswellen über
Brandenburg 9.6.2024, Wellenfliegertreffen 2025, Braunschweig

In vielen Fällen sind KHW in der lateralen Erstreckung begrenzt :



KHW im Wolkenmeer Foto: Claudia Hinz



KHW vom Segelflugzeug aus betrachtet, Foto: Thomas Seiler

Fazit:

Großflächige KHW möglich in höheren Luftschichten oder über homogenem Gelände

Grund: keine singulären Störungsanregungen

Lateral begrenzte KHW möglich in den unteren Luftschichten und gebirgigem Gelände

Grund: lokale Anregung durch Thermik oder Kraftwerks-Kühltürme bzw. lokale Orographie

Streckenflug parallel zu den KHW im Prinzip kurzzeitig möglich



© Zugspitze.panomax.com

Zusammenfassung:

In KHW treten Vertikalgeschwindigkeiten auf, die zum Segelflug genutzt werden können

Folgende Eigenschaften von KHW erschweren jedoch deren Ausnutzung:

- Die vertikale Erstreckung ist auf einige hundert Meter beschränkt
- Die laterale Erstreckung ist häufig auf wenige km beschränkt
- Die zeitliche Andauer der KHW beträgt weniger als 1 Stunde
- KHW wandern mit dem mittleren Wind in der Scherschicht
- KHW benötigen spezielle Bedingungen bezüglich der Windprofile
- KHW sind nicht genau vorhersagbar (Instabilität)

Somit: Flüge in KHW sind nicht gezielt planbar sondern eher „Zufallsfunde“

Anhang: Experimente mit KHW während der Veranstaltung

während der Veranstaltung wurden auch KHW in einem kleinen Wellentank (30 cm Länge) erzeugt. Beispiele nachfolgend. Da einige Anwesenden nach der Erwerbmöglichkeit des Tanks nachfragten, sei hier eine der möglichen Bezugsquellen genannt (weitere im Internet):

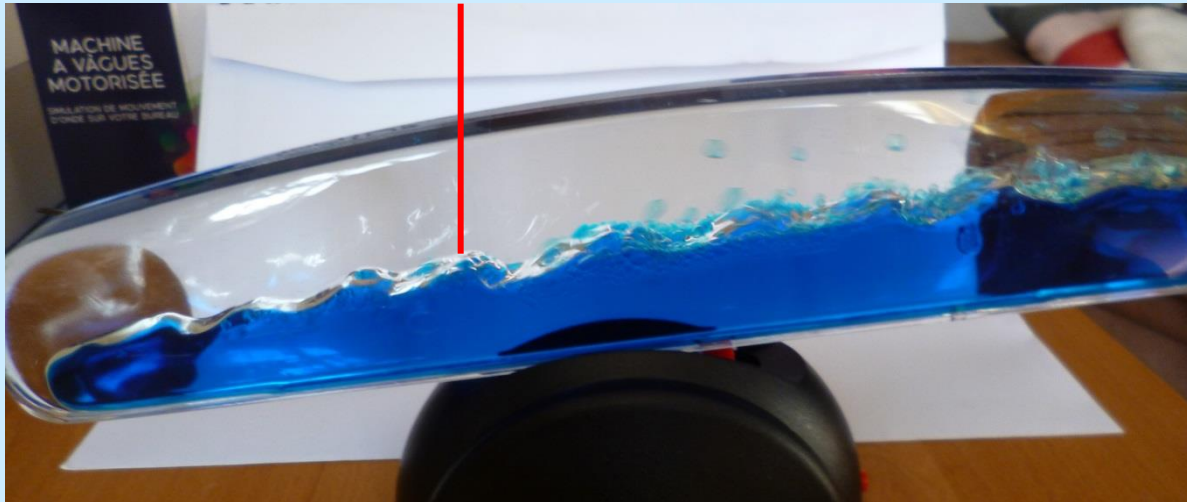
www.experimentis-shop.de

Kleine Wellenmaschine mit Motor

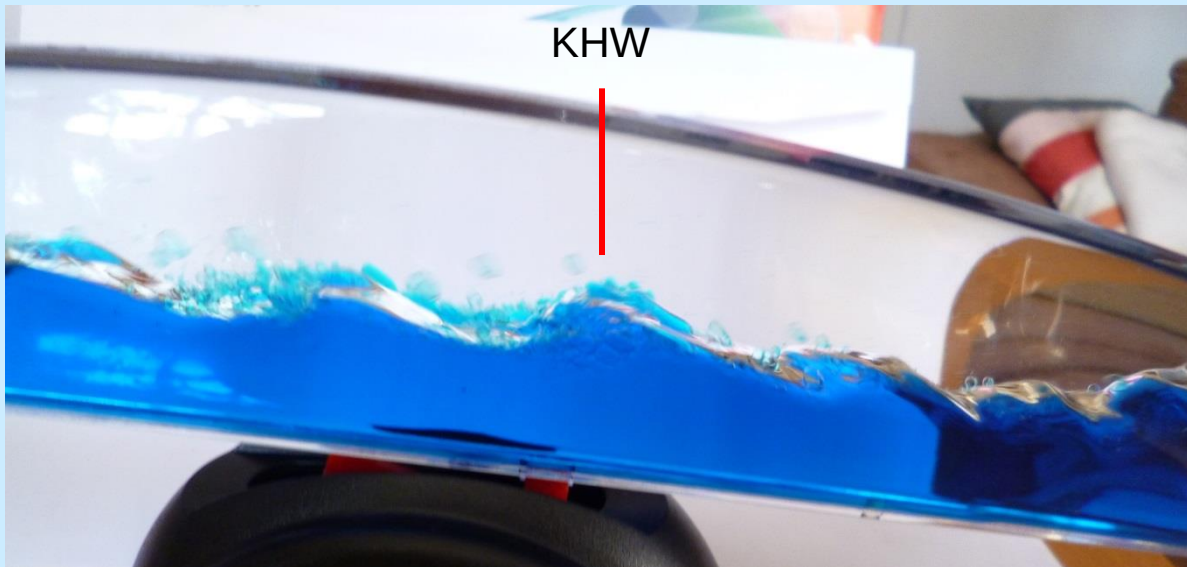
Preis: 32,95 € · Lieferung: 4,95 €



KHW



KHW



Experimente zu KHW während des Schwerewellen-Treffens