

**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.  
Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Actes de la Société  
Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative  
= Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 156 (1976)

**Vereinsnachrichten:** Vergleich gemessener und berechneter Charakteristiken von  
internen Schwerewellen in der unteren Atmosphäre

**Autor:** [s.n.]

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## 5. H. Richner und W. Nater (ETH-Zürich): Vergleich gemessener und berechneter Charakteristiken von internen Schwerewellen in der unteren Atmosphäre

Das Laboratorium für Atmosphärenphysik der ETH Zürich (LAPETH) untersucht zur Zeit atmosphärische Wellen. Verschiedene Instrumente stehen dazu zur Verfügung: Ein Netz von Mikrobarographen zeichnet Druckschwankungen mit Periodendauern zwischen ungefähr 1 und 30 Minuten auf. Freiballone mit Radiosonden und ein Fesselballon mit einer Einsatzhöhe bis zu 1500 m erlauben in-situ Messungen von Temperatur, Feuchtigkeit und Wind. Das nützlichste Instrument ist ein mobiler akustischer Echo Sounder – auch bekannt unter den Namen Acdar, Sodar, Akustisches Radar oder Sonar –, welcher in der Lage ist, dynamische klein- bis kleinst-räumige Phänomene in den untersten 1000 m der Atmosphäre aufzuzeigen.

Die Untersuchungen konzentrieren sich hauptsächlich auf Föhnlagen, wenn sich zwischen Kaltluftsee und Föhnluft eine ausgeprägte interne Grenzschicht gebildet hat.

### Spektrum und Ausbreitungseigenschaften von Druckschwankungen

Bereits eine visuelle Untersuchung der Aufzeichnungen der Mikrobarographen zeigte, dass im Spektrum der atmosphärischen Druckschwankungen eine Lücke besteht: Fluktuationen mit Perioden zwischen 4 und 5 Minuten scheinen sehr selten zu sein. Dieses subjektive Resultat wurde bestätigt, indem das Spektrum für verschiedene Zeitintervalle mit Hilfe der Fast-Fourier Transformation berechnet wurde (siehe Figur 1).

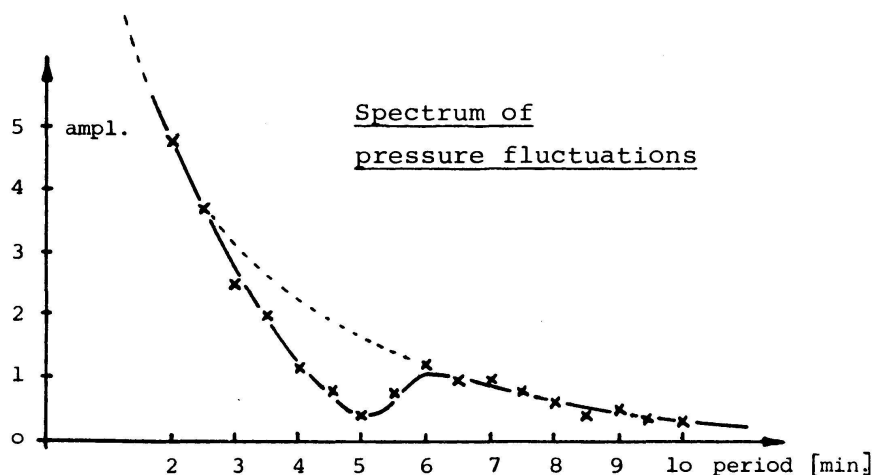


Fig. 1 Spektrum der Druckschwankungen aufgenommen am 6. Dezember 1971 in Zürich.

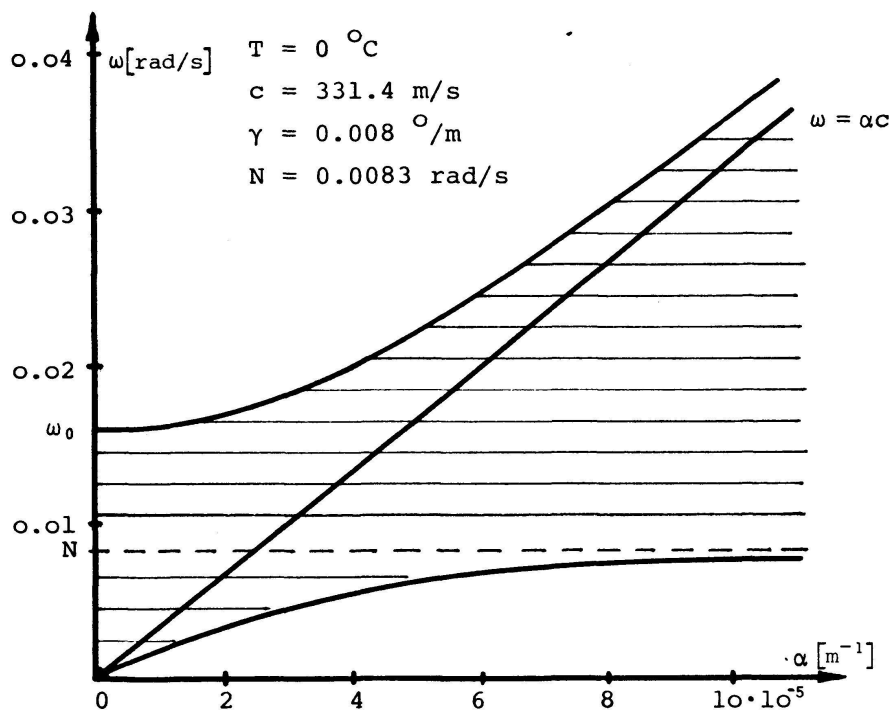


Fig. 2 Wellenzahl-Frequenz-Diagramm für eine Atmosphäre mit einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  und einer lapse rate von  $8^{\circ}/\text{km}$ .  $\alpha$  ist die horizontale Wellenzahl in  $\text{m}^{-1}$  und  $\omega$  ist die Frequenz in  $\text{rad/s}$ .

Löst man die Wellengleichung für eine isotherme, geschichtete Atmosphäre im Schwerfeld so erhält man die in Figur 2 dargestellte Beziehung zwischen horizontaler Wellenzahl  $\alpha$  und Frequenz  $\omega$ .  $\omega = \omega_0$  stellt die minimale Frequenz einer akustischen Welle dar,  $\omega = N$  ist die Brunt-Vaisälä-Frequenz. Die ausgezogenen Linien zeigen die Beziehung zwischen horizontaler Wellenzahl und Frequenz für Wellen, die sich ausschliesslich horizontal ausbreiten, d.h. die vertikale Wellenzahl ist hier null. In der gesamten Region oberhalb des oberen Astes können jedoch akustische Wellen und in der gesamten Region unterhalb des unteren Astes können Schwerewellen auftreten. Dabei ist die vertikale Wellenzahl jedoch nicht mehr unbedingt gleich null. Die Gerade  $\omega = \alpha c$  stellt die Lamb Welle dar, also die nicht-dispersive, horizontale Welle, welche sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Im übrigen können im schraffierten Gebiet zwischen den Achsen nur vertikale, abklingende Wellen auftreten.

Die erwähnte, experimentell gefundene Lücke im Spektrum der Druckschwankungen lässt sich sehr gut mit der Lücke zwischen  $N$  und  $\omega_0$  in Übereinstimmung bringen. Zudem ist ersichtlich, dass Druckschwankungen mit Periodendauern von weniger als 4 Minuten auf akustische Wellen zurückzuführen sind. Um Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung der Druckschwankungen zu bestimmen, wurde ein Netz von 10 Mikrobarographen aufgestellt. Die Durchgangszeiten charakteristischer Wellenformen wurden an jeder Station festgehalten. Diese Zeiten wurden in ein Modell eingegeben, das die Richtung und die Phasengeschwindigkeit für eine

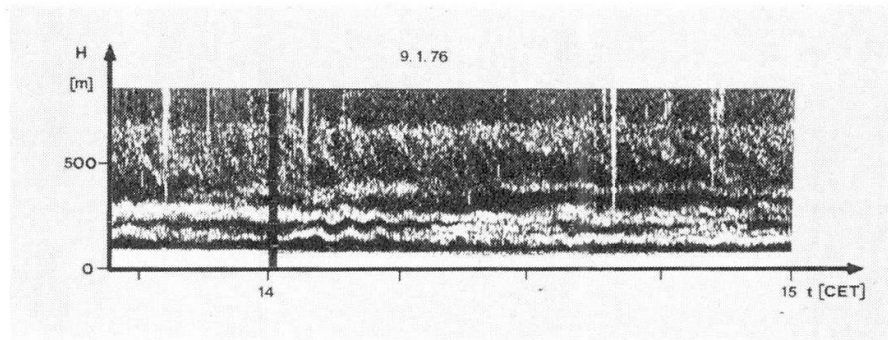


Fig. 3 AES-Aufzeichnung mit Zopfwellen (obere Hälfte) und sinusförmige Wellen (untere Hälfte).

sphärische, sich isotrop ausbreitende Welle berechnete. Als Ausbreitungsgeschwindigkeit erhielt man  $20.47 \pm 0.30$  m/s. Dieser Wert – für fünfzig Fälle aus je rund hundert Kombinationen von 3 Stationen berechnet – zeigt eine für Messungen in der Atmosphäre äusserst geringe Standardabweichung. Der Wert selbst steht in guter Übereinstimmung mit der Theorie: unter der Annahme rein horizontaler Ausbreitung erhält man rund 22 m/s. Es bleiben jedoch gewisse Zweifel über die Signifikanz der Standardabweichung. In der Literatur findet man experimentell bestimmte Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 20 m/s, es wurden jedoch auch schon Werte von 10 und 40 m/s publiziert, die allerdings nur aufgrund von Messungen mittels zwei oder drei Stationen berechnet wurden.

#### Wellenstrukturen in Aufzeichnungen des Akustischen Echo Sounders

Ein zusätzliches Instrument, das für die Untersuchung atmosphärischer Wellen eingesetzt wird, ist der Akustische Echo Sounder (AES). Seine Wirkungsweise ist analog der eines Radars. Mit seiner Hilfe können atmosphärische Wellen aufgrund der mit ihnen verbundenen Temperaturfluktuationen sichtbar gemacht werden.

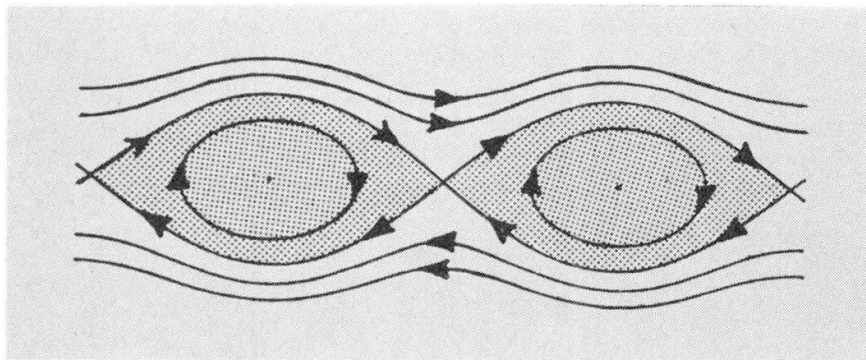


Fig. 4 Schematische Darstellung von Katzenaugen-Wellen (aus Gossard und Hooke).

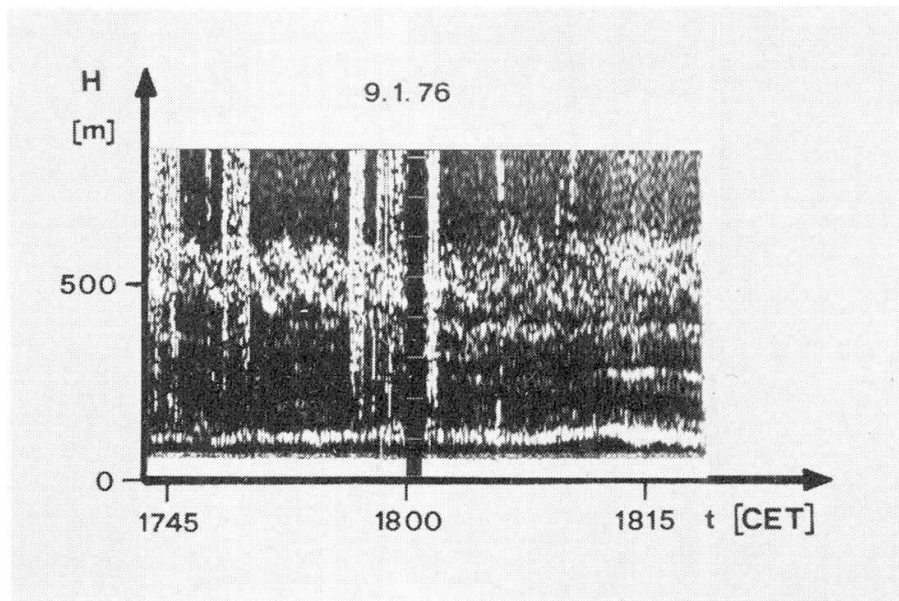


Fig. 5 AES-Aufzeichnung mit Katzenaugenwellen auf einer Höhe von ca. 500 m.

Figur 3 zeigt sogenannte Zopfwellen (englisch: "braids"). Die Periode dieser wellenartigen Strukturen ist ungefähr 190 s, ihre Amplitude um 200 m. Es wird angenommen, dass Zopfwellen wegen dynamischer Instabilität auftreten, welche ihrerseits durch vertikale Scherungen hervorgerufen sind. Delisi und Corcos haben jedoch experimentell nachgewiesen, dass solche Wellen auch in horizontalen Scherungen auftreten können. Richter und Gossard schliessen aus FMCW-Radar-Beobachtungen, dass sich diese Wellen mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten.

In Figur 4 sind Katzenaugen-Wellen schematisch dargestellt, die bereits 1880 von Lord Kelvin theoretisch behandelt wurden. Unter der Annahme eines Windfeldes

$$U = \beta z + i \Delta U_s e^{-\gamma z} e^{ikx}$$

d.h. eines linear mit der Höhe ändernden Windfeldes mit einer überlagerten sinusförmigen Störung, kann die Begrenzung zwischen den Rotoren und den wellenförmigen Stromlinien berechnet werden zu

$$z = \pm 2 \sqrt{\Psi_s / \beta} \sin \frac{kx}{2}$$

$\Psi_s$  ist dabei die Stromlinienstörung. Figur 5 zeigt Katzenaugenwellen, wie sie vom AES aufgezeichnet wurden. Wir hoffen, durch genaue Messung des Windfeldes die Gültigkeit der Theorie zu überprüfen, was – soweit wir wissen – für die reale Atmosphäre noch nicht geschehen ist.

Der untere Wellenzug in Figur 3 wurde eingehend analysiert, indem aus Temperatur- und Windprofilen die theoretische, kritische Wellenlänge berechnet und mit der experimentell bestimmten verglichen wurde. Aufgrund der einfachen Helmholtz Theorie ergibt sich für die minimale Wellen-

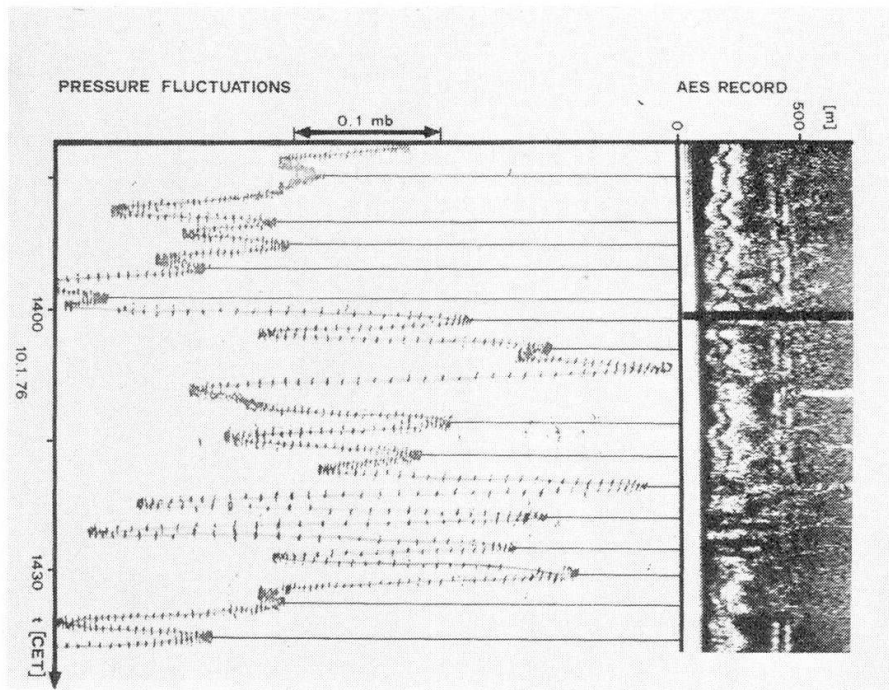


Fig. 6 Schwerewellen simultan aufgezeichnet durch den AES und durch einen Mikrobarographen. Frequenz und Phase stimmen sehr genau überein, während die Amplituden verschieden sind.

länge 25 m, aufgrund einer verfeinerten Theorie von Reiter 38 m. Die gemessene Wellenlänge von 110 m ist somit um einen Faktor 3 über der kritischen Wellenlänge. Es kann somit geschlossen werden, dass es sich bei den beobachteten Wellen mit Sicherheit um Schwerewellen handelte. Auch die Richardsonzahl, welche 4.7 betrug, lag eindeutig über den kritischen Werten von 0.25 (aus der einfachen Theorie) bzw. von 0.5 (aus einer verfeinerten Theorie von Sekioka), welche die untere Grenze für die Existenz von Schwerewellen darstellen.

Figur 6 zeigt die Aufzeichnung einer Welle durch den AES und die korrespondierenden Druckschwankungen. Phase und Frequenz der Druckschwankungen lassen sich eindeutig der atmosphärischen Welle zuordnen, während die Amplitude wahrscheinlich durch Druckschwankungen aus entfernteren Quellen gestört ist.

#### Literatur

- Delisi, D.P. and Corcos, G.: A study of internal waves in a wind tunnel. *Boundary Layer Meteorol.* 5, 121-137, 1973.
- Gossard, E. and Hooke, W.: *Waves in the atmosphere*. Amsterdam, Oxford, New York 1975.
- Kallistratova, M.A.: Experimental investigation of sound wave scattering in the atmosphere. *Trudy instituta fiziki atmosfery, Atmosfer'naya turbulentnost'*, No. 4, pp. 203-256. (Translated by Foreign Technology Division, WB-AFB, Ohio, FTD-TT-63-441/1+2+4).