

# Großräumige Atmosphärendynamik

Prof. V. Wirth

(Zi. 426, Tel.: 39-22868, E-mail: vwirth@uni-mainz.de)

## TEIL I: 2D BALANCIERTE DYNAMIK

### 1 Zweidimensionale barotrope Dynamik

#### Grundsätzliches

Divergenzfreie 2D Strömung auf der  $f$ - und  $\beta$ -Ebene; Stromfunktions-Vorticity-Formalismus als einfachste Version des PV-Denkens

#### Spezielle Lösungen und Techniken

Greensfunktion für die barotrope Wirbelgleichung; Punktwirbel; Konturendynamik; Monopol; Rankine-Wirbel; Modon als Modell für atmosphärische Blockierung;  $n$  Punktwirbel

#### Wellenlösungen

2D Rossbywellen auf der  $\beta$ -Ebene; Rossbywellenmechanismus im PV-Bild; stationäre Rossbywellen; Wellenpaket und Gruppengeschwindigkeit; Fernwirkung durch meridionale Ausbreitung von Rossbywellenpaketen; Anregung einer 2D Rossbywelle durch einen Berg (sehr spitz und sinusförmig, mit und ohne Dämpfung); Residuensatz; Charney-Eliassen-Modell für stationäre planetare Rossbywellen; barotrope Dynamik auf der Kugel (Rossby-Haurwitz-Wellen); Rossbywelle längs einer PV-Diskontinuität; meridionale Ausbreitung barotroper Rossbywellen in einer Scherströmung; WKB; barotrope Instabilität, stabilisierende Wirkung von  $\beta$

#### 2D Turbulenz

Erhaltung von Energie und Enstrophie; Unterschied zur 3D Dynamik; Spektrale Darstellung; inverse Kaskade der Energie; wirbelartige und filamentartige Strukturen (Interpretation im Ortsraum); Entstehung kohärenter Wirbelstrukturen; Rhines- $\beta$ -Skala; Unterschied zwischen vorticityartigem und passivem Skalar

### 2 Das quasi-geostrophische Flachwassermodell

#### Gundlegendes

FW-Dynamik unterstützt sowohl (schnelle) Schwerewellen als auch (langsame) Rossbywellen; Konzept der Balance; Margules-Front; Skalierung; asymptotische Theorie; Rossbyzahl, Froudezahl

und Burgerszahl; quasigeostrophische PV-Gleichung; Invertierbarkeit für den quasigeostrophischen Wind; PV-Denken; elliptische partielle Differentialgleichung; Greensfunktion für den 2D Helmholtzoperator; Rossbyradius; Interpretation der einzelnen Terme der qg PV; Zusammenhang zwischen Flachwasser-PV und qg Flachwasser-PV; Q-Vektor im FW-System; Eliassen-Problem im FW-System; nichtlineare axialsymmetrische Monsunzirkulation im FW-System (Lösung des thermischen Gleichgewichts und drehimpulserhaltende Lösung); ageostrophischer Wind; isallobarer Wind; Rolle des ageostrophischen Windes

## **Flachwasserwellen**

Dispersionsrelation; Rossby- und Schwerewellen; Kelvinwelle; linearisierte qg PV-Gleichung; Dispersionsrelation von qg Flachwasserwellen; Gruppengeschwindigkeit; Nicht-Doppler-Effekt; Struktur eines FW-Rossbywelle; Rolle des ageostrophischen Windes bei der Phasenausbreitung; Asymmetrie hinsichtlich der Ausbreitung ost- bzw. westwärts; Dispersion einer Anfangsstörung; Orographisch erzwungene FW-Rossbywellen; äquatoriale Wellen im FW-System

## **Weitere Themen**

Lineare Normalmodeninitialisierung; Lineare geostrophische Anpassung

## **3 Wellenenergie und Wellenaktivität**

Kinetische und verfügbare potentielle Energie; Gleichungen für die Wellenenergie; Phasenmittelung; Wellenaktivität und EP-Fluss; EP-Relation; EP-Theorem für lineare konservative Wellen mit stationärer Amplitude; beinahe ebene Rossbywellen; WKB; Grundstrom-Welle-Wechselwirkung; TEM-Gleichungen

## **TEIL II: 3D BALANCIERTE DYNAMIK**

### **4 Die primitiven Gleichungen in Druckkoordinaten**

Primitive Gleichungen; hydrostatische Näherung; Druckkoordinaten; verallgemeinerte Vertikalkoordinaten; log-p Koordinaten

### **5 Das Konzept der balancierten Strömung**

Geostrophische Balance; thermischer Wind; barotrope und barokline Schichtung; Konzept der Balance; zonalsymmetrisches Eliassen-Problem; Sekundärzirkulation; elliptische partielle Differentialgleichung; Wirkung der Sekundärzirkulation; stratosphärische Saugpumpe; "Downward Control"

## 6 Quasigeostrophische Theorie

Referenzzustand; Skalierung; asymptotische Entwicklung in die Rossbyzahl; quasigeostrophische PV; Interpretation der einzelnen Terme von  $q_g$ ; Invertierbarkeit; qg PV Inversion; Temperatur liefert die untere Randbedingung; Bretherton's Trick; Beschreibung einer Oberflächentemperaturanomalie als  $\delta$ -artige PV-Anomalie; Ertel PV versus qg PV; isentrope Gradienten der Ertel PV; Ertel PV auf isentropen Flächen; Q-Vektor;  $\omega$ -Gleichung in Q-Vektor-Formulierung; Rolle des ageostrophischen Winds

## 7 Rossbywellen

Lösung der linearisierten qg PV Gleichung; Dispersionsrelation für 3D Rossbywellen; Anwachsen der Amplitude mit der Höhe; Gruppengeschwindigkeit; Wellenaktivität und EP-Fluss; Charney-Drazin; qg vertikale Normalmoden im stabil geschichteten Ozean und in der Atmosphäre; Separationsansatz; äquivalente Tiefe; äquivalentes Flachwasserproblem; externer und interner Rossbyradius; barotroper Mode und barokline Moden; freie und erzwungene Moden im Zweischichtenmodell

## 8 Grundstrom-Welle-Wechselwirkung

EP-Relation für lineare konservative Wellen; EP-Theorem; Nichtbeschleunigungstheorem; Zusammenhang mit dem Kelvin-Theorem; schwach nichtlineare Wechselwirkung mit dem Grundstrom; Euler'sche zonale Mittelung; Artefakt der Euler'schen Mittelung; Stokes-Drift; Transformierte Euler'sche Mittelung (TEM); TEM-Gleichungen; duale Rolle des EP-Flusses; Anschauliche Erklärung der Differenz zwischen konventioneller Euler'scher Mittelung und TEM; plötzliche Stratosphärenenerwärmungen

## 9 Symmetrische Instabilität

(Hydro-)statische Stabilität; Trägheitsstabilität bei Vorhandensein einer geostrophischen Scherströmung; Kombination der beiden; Trägheitsschwerewellen; Absoluter Impuls; Kriterien für Trägheitsstabilität; Kombination/Verallgemeinerung: Symmetrische (In)Stabilität; Kriterium für symmetrische Instabilität; isentroper Meridionalgradient des absoluten Impulses;  $f \times PV$ ; Auftreten von symmetrischer Instabilität; Richardsen-Zahl; Zusammenhang mit dem Eliassenproblem (Elliptizität der relevanten Gleichung); Regenbänder in Frontalzonen

## 10 Barokline Instabilität und Zyklogenese

### Auftreten von barokliner Instabilität

Notwendige Kriterien für Normalmodeninstabilität (Charney-Stern-Theorem mit und ohne Bretherton's Trick); Zusammenhang mit Rayleigh's Wendepunktkriterium; barokline versus barotrope Instabilität; Mechanismus der Normalmodeninstabilität im PV-Bild; Phasenkopplung und Vorzeichenumkehr des mittleren PV-Gradienten; BI als Erklärung von Zyklogenese; BI im Zweischichtenmodell;

## Eady-Modell

Das Eady-Modell für BI; Struktur eines Eigenwertproblems; "Short-wave cutoff"; instabiler Mode; maximale Wachstumsrate; Struktur der Eady-Eigenmoden; Eady-Randwellen und deren Wechselwirkung; Energetik der Eady-Instabilität; Anzapfen der verfügbaren potentiellen Energie; Instabilitätskeil; Beobachtung: planetare Wellen im zeitlichen Mittel, aber synoptische Wellen in der Momentaufnahme; nachfolgende (schwach-nichtlineare) Wechselwirkung mit dem Grundstrom;

## Weitere Modelle und Zyklogenese

Charney-Modell; Zyklogenese; lineare und nichtlineare Phase; Lebenszyklen; komplexe 3D Strömung; Entstehung von Wolken; Förderbänder; barokline Anpassung; Zyklonenzugbahnen

## 11 Frontogenese

Kinematische Beschreibung; Q-Vektor zur Beschreibung des geostrophischen Antriebs der Verstärkung des Temperaturgradienten; semigeostrophische Theorie; Q-Vektor liefert Antrieb für die Sekundärzirkulation; Sawyer-Eliassen-Gleichung; quasigeostrophische versus semigeostrophische Frontogenese

## 12 Nichtmodales Wachstum und Singulärvektoren

Modales versus nichtmodales Wachstum; Definition einer Norm; temporäres Wachstum; Beispiel einer barotropen Scherströmung; Orr-Mechanismus (Lamellen-Jalousien-Mechanismus); normaler Operator; Vollständiger Satz von orthogonalen Eigenvektoren; selbstadjungierter Operator und reelle Eigenwerte; Aufspaltung der Energie auf einzelne Moden (Parseval); maximales Anwachsen über einen endlichen Zeitraum; Propagator; Singuläre Vektoren; Anwendung in der Ensemblevorhersage

---

## Übung

Übungsaufgaben zum Stoff der Vorlesung, meist ein Übungsblatt pro Woche.

---

## Computerpraktikum

Im Computerpraktikum geht es um Rossbywellen im Rahmen des quasigeostrophischen Flachwassermodells. Mit Hilfe eines einfachen Programms (geschrieben in der Sprache *Python*) werden numerische Experimente durchgeführt, die dazu dienen sollen, Intuition in die (teils nicht-intuitiven) Eigenschaften von Rossbywellen zu gewinnen.

## Empfohlene Literatur

### Nachschlagewerke

- Holton, J. R., J. A. Curry, and J. A. Pyle (editors), 2003: *Enzyklopedia of Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- Gleichman, T. S., editor, 2000: *Glossary of Meteorology*. American Meteorological Society, 855 pp., Boston, Massachusetts, U.S.A.

Das letztgenannte Glossar ist auch online erhältlich (google "AMS glossary")

### Mathematik und Numerik

- Abramowitz, M., and I. A. Stegun, 1970: *Handbook of mathematical functions. With formulas, graphs, and mathematical tables*. M. Abramowitz and I. A. Stegun, Eds.; ninth printing, 1970. Dover Publications, Inc., New York, 1046 pp.
- Bronstein, I. N., and K. A. Semendjajew, 1980: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, 860 pp.
- Durrant, D. R., 1999: *Numerical Methods for Wave Equations in Geophysical Fluid Dynamics*. Springer, 465 pp.
- Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, 1992: *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*. Second edition, Cambridge University Press, 818 pp.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, 1996: *Numerical Recipes in Fortran 90. The Art of Parallel Scientific Computing*. Second edition, Cambridge University Press, 1486 pp.

### Allgemeine Hydrodynamik

- Aitchison, D. J., 1990: *Elementary Fluid Dynamics*. Clarendon Press, Oxford, 397 pp.
- Batchelor, G. K., 1967: *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 615 pp.
- Kundu, P. K., 1990: *Fluid Mechanics*. Academic Press, 638 pp.
- Oertel jr., H., Herausgeber, 2002: *Prandtl-Führer durch die Strömungslehre. Grundlagen und Phänomene*. Vieweg, 704 pp., 11. Auflage.

### Geophysikalische Hydrodynamik

- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489 pp.
- Gill, A. E., 1980: *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, Inc., 662 pp.
- Holton, J. R., 2004: *An Introduction to Dynamical Meteorology*. Elsevier Academic Press, 529 pp., fourth edition.
- James, I. N., 1994: *Introduction to Circulating Atmospheres*. Cambridge University Press, 422 pp.
- Lindzen, R. S., 1990: *Dynamics in Atmospheric Physics*. Cambridge University Press, 310 pp.

Pedlosky, J., 1987: *Geophysical Fluid Dynamics*. Second edition, Springer, 710 pp.

Vallis, G. K., 2006: *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

### **Weiteres zur Meteorologie**

Goody, R. M., and J. C. G. Walker, 1972: *Atmospheres*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 150 pp.

Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 1977: *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. Academic Press, 467 pp. [inzwischen verfügbar in einer deutlich überarbeiteten 2. Auflage]