

A. DEFANT · FR. DEFANT

---

PHYSIKALISCHE DYNAMIK  
DER ATMOSPHERE



# PHYSIKALISCHE DYNAMIK DER ATMOSPÄRE

VON

DR. DR. h. c. ALBERT DEFANT

emer. ord. Professor für Meteorologie und Geophysik  
an der Universität Innsbruck und Honorarprof. an der  
Universität Hamburg und an der Freien Universität  
Berlin

UND

DR. FRIEDRICH DEFANT

Tit. a. o. Professor und Dozent an der Universität  
Innsbruck, Leiter der Wetterdienststelle Innsbruck  
der Zentralanstalt für Meteorologie in Wien

MIT 159 ABBILDUNGEN



AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT M. B. H.

FRANKFURT AM MAIN 1958

# Inhaltsverzeichnis

## Erstes Kapitel: *Statik der Atmosphäre*

1.01 Die Erde und ihre Atmosphäre . . . . .	1
1.02 Das Schwerfeld der Erde . . . . .	1
1.03 Fundamentale Gasgesetze . . . . .	4
1.04 Die statische Grundgleichung . . . . .	6
1.05 Die barometrische Höhenformel . . . . .	8
1.06 Auswertung der barometrischen Höhenformel und verschieden aufgebaute Atmosphären . . . . .	8
1.07 Einfache statische Grundbeziehungen zwischen Bodendruck, Höhendruck und Mitteltemperatur . . . . .	12
Literaturverzeichnis . . . . .	13

## Zweites Kapitel: *Allgemeine Thermodynamik der trockenen und feuchten Luft*

2.01 Erster Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	14
2.02 Adiabatische Zustandsänderungen trockener und feuchter ungesättigter Luft . . . . .	15
2.03 Potentielle Temperatur und Entropie . . . . .	18
2.04 Die Feuchtigkeit bei adiabatischen Verschiebungen, Kondensationsniveau . . . . .	19
2.05 Adiabatische Zustandsänderungen feuchter gesättigter Luft . . . . .	21
2.06 Pseudoadiabatische Vertikalbewegungen . . . . .	21
2.07 Verschiedene Temperaturbegriffe . . . . .	24
2.08 Adiabatenpapiere . . . . .	30
Literaturverzeichnis . . . . .	32

## Drittes Kapitel: *Zustandsänderungen in vertikalen Luftsäulen, Stabilitäts- und Labilitätsprobleme*

3.01 Stabilitätskriterien . . . . .	34
3.02 Stabilitäts- und Labilitätsenergie . . . . .	36
3.03 Schrumpfen und Strecken einer Luftsäule . . . . .	41
3.04 Quasistatische Zustandsänderungen vertikaler Luftsäulen . . . . .	44
Literaturverzeichnis . . . . .	52

## Viertes Kapitel: *Strahlung*

4.01 Grundgesetze der Strahlungslehre . . . . .	53
4.02 Solarkonstante . . . . .	61
4.03 Schwächung der Sonnenstrahlung in der Atmosphäre . . . . .	65
4.04 Das extraterrestrische Sonnenspektrum und die numerische Bestimmung der Solarkonstante . . . . .	66

4.05	Ausstrahlung der Erdoberfläche und Gegenstrahlung der Atmosphäre . . .	68
4.06	Troposphärische Strahlung, Strahlungsgleichgewicht und Strahlungsströme	69
4.07	Strahlungsgleichgewicht und Stratosphärenstrahlung sowie -temperatur .	75
4.08	Wärmebilanz . . . . .	77
	Literaturverzeichnis . . . . .	81

#### **Fünftes Kapitel: *Kinematik***

5.01	Grundbeziehungen des Stromfeldes . . . . .	83
5.02	Stromfiguren, Singularitäten des Stromfeldes und zusammengesetzte Stromfelder . . . . .	84
5.03	Stationäre Ströme, Geschwindigkeitspotential und Stromfunktion . . . .	87
5.04	Die Kontinuitätsgleichung in rechtwinkligen Koordinaten . . . . .	89
5.05	Die Kontinuitätsgleichung in Polarkoordinaten . . . . .	91
5.06	Vertikalbewegung und zeitliche Druckänderung aus Kontinuitätsbetrach- tungen . . . . .	92
	Literaturverzeichnis . . . . .	95

#### **Sechstes Kapitel: *Die Bewegungsgleichungen auf der rotierenden Erde***

6.01	Geschwindigkeit und Beschleunigung im rechtwinkligen Koordinaten- system und im Polarkoordinatensystem . . . . .	97
6.02	Die Bewegung eines Massenpunktes auf der rotierenden Erde . . . . .	99
6.03	Die Erhaltung des Rotationsmomentes . . . . .	100
6.04	Die allgemeinen Bewegungsgleichungen in einem rechtwinkligen krumm- linigen Koordinatensystem . . . . .	102
6.05	Die ablenkende Kraft der Erdrotation (Corioliskraft) . . . . .	104
6.06	Die vollständigen EULERSchen hydrodynamischen Bewegungsgleichungen .	107
6.07	Die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen von LAGRANGE . . . . .	109
6.08	Impulsstromform der hydrodynamischen Bewegungsgleichungen . . . . .	110
6.09	Die Bewegungsgleichungen auf einer isobaren Fläche . . . . .	111
6.10	Die Bewegungsgleichungen auf einer isentropen Fläche . . . . .	113
6.11	Die Störungsgleichungen atmosphärischer Bewegungen . . . . .	115
	Literaturverzeichnis . . . . .	116

#### **Siebentes Kapitel: *Einfache stationäre atmosphärische Horizontalströmungen***

7.01	Horizontale Luftbewegungen und ihre Klassifikation . . . . .	117
7.02	Der geostrophische Wind . . . . .	119
7.03	Die Neigung der isobaren Flächen . . . . .	120
7.04	Der Gradientwind . . . . .	121
7.05	Divergenz und Konvergenz der verschiedenen Windarten . . . . .	122
7.06	Ageostrophische Winde und Effekte einer sich ändernden Luftdruckver- teilung . . . . .	126
7.07	Die Integration der Bewegungsgleichungen für horizontale Ströme ohne Reibung . . . . .	131
	a) Trägheitsbewegung . . . . .	131
	b) Die Integration der Bewegungsgleichungen des EULERSchen Windes	133
	Literaturverzeichnis . . . . .	134

**Achtes Kapitel: Zirkulation und Vorticity**

8.01 Die räumliche Darstellung des Massenfeldes durch Systeme von Äquiskalarflächen . . . . .	135
8.02 Zirkulation und Zirkulationsbeschleunigung bei ruhender Erde . . . . .	136
8.03 Die Vorticity bei ruhender Erde . . . . .	140
8.04 Die Vorticity in natürlichen und in Polarkoordinaten . . . . .	141
a) Natürliche Koordinaten . . . . .	141
b) Polarkoordinaten . . . . .	142
8.05 Die Zirkulationsbeschleunigung bei rotierender Erde (das V. BJERKNESsche Zirkulationstheorem) . . . . .	144
8.06 Zeitliche Änderungen der Vorticity . . . . .	147
8.07 Spezielle Anwendungen des Zirkulationstheorems . . . . .	149
a) Der SANDSTRÖMSche Satz . . . . .	149
b) Der SANDSTRÖM-HELLAND-HANSENSche Zirkulationssatz . . . . .	151
8.08 Bewegungsgleichungen und Vorticity . . . . .	156
a) Die barotrope Vorticitygleichung . . . . .	156
b) Die divergenzfreie barotrope Vorticitygleichung . . . . .	157
c) Die potentielle Vorticity . . . . .	157
d) Die adiabatische Wirbelinvariante . . . . .	158
e) Vorticitygleichung und Stromfunktion . . . . .	160
Literaturverzeichnis . . . . .	160

**Neuntes Kapitel: Diskontinuitätsflächen**

9.01 Klassifikation der Diskontinuitätsflächen . . . . .	162
9.02 Grenzflächenbedingungen . . . . .	163
a) Kinematische Grenzflächenbedingung . . . . .	163
b) Dynamische Grenzflächenbedingung . . . . .	164
9.03 Grenzflächen zwischen bewegten Medien . . . . .	164
9.04 Stationäre Grenzflächen . . . . .	166
a) Die Neigung der Grenzfläche zwischen zwei Luftkörpern . . . . .	166
b) Die Neigung der isobaren Flächen in den beiden Luftkörpern . . . . .	167
9.05 Stationäre Lagerung verschiedenartiger Luftmassen . . . . .	169
9.06 Wirbel in zweifach geschichteten Medien . . . . .	171
9.07 Auf- und Abgleitbewegungen an stationären Grenzflächen . . . . .	173
9.08 Die Änderungen des geostrophischen Windes mit der Höhe. (Die thermische Windgleichung) . . . . .	177
Literaturverzeichnis . . . . .	180

**Zehntes Kapitel: Turbulenz und Austausch**

10.01 Zähigkeit und REYNOLDSSche Zahl . . . . .	181
10.02 Die Bewegungsgleichungen mit Berücksichtigung der Reibung . . . . .	183
10.03 Laminare und turbulente Luftströmungen . . . . .	184
10.04 Gleichungen für die Mittelwerte der turbulenten Bewegung . . . . .	187
10.05 Theorie des Mischungsweges und vertikale Geschwindigkeitsprofile . . . . .	190
a) Die einfachste dimensionsrichtige Annahme für $l$ . . . . .	192
b) Die KÁRMÁNSche Festlegung des Mischungsweges . . . . .	193
c) Das Geschwindigkeitsprofil nach ROSSBY und MONTGOMERY . . . . .	193

d)	Das universelle Geschwindigkeitsprofil . . . . .	194
e)	Potenzgesetze zur Darstellung der Geschwindigkeitsprofile . . . . .	195
f)	Windgeschwindigkeitsprofile nach den Beobachtungen . . . . .	196
10.06	Die turbulente Diffusion von Luftmasseneigenschaften und der turbulente Massenaustausch . . . . .	197
a)	Horizontale und vertikale Vermischung . . . . .	197
b)	Die Übertragung von Luftmasseneigenschaften durch turbulenten Massenaustausch . . . . .	199
c)	Die Beziehung zwischen Austausch und Mischungsweg . . . . .	201
10.07	Vorticity Transfer Hypothese und die statistische Theorie der Turbulenz	
a)	Vorticity Transfer Theorie . . . . .	203
b)	Die statistische Theorie der Turbulenz . . . . .	205
10.08	Die Stabilität in einer geschichteten Luftströmung (Das RICHARDSONSche Stabilitätskriterium der Turbulenz) . . . . .	213
	Literaturverzeichnis . . . . .	216

### Elftes Kapitel: *Reibung und Turbulenz in der Atmosphäre*

11.01	Bodenreibung . . . . .	219
11.02	Die Windänderung mit der Höhe (EKMAN-Spirale) . . . . .	223
11.03	Die Verteilung der Turbulenzreibung mit der Höhe. . . . .	227
11.04	Erweiterung der Theorie der Windänderung mit der Höhe . . . . .	229
11.05	Lokale Windzirkulationen unter Berücksichtigung der Turbulenzreibung	
a)	Theorie der Hangwinde . . . . .	235
b)	Land- und Seewind . . . . .	237
11.06	Der vertikale Wärmetransport durch Turbulenz und seine Wirkung auf die tägliche Temperaturänderung in der Höhe . . . . .	240
a)	Konstanter turbulenter Wärmeleitfähigkeitskoeffizient . . . . .	241
b)	Mit der Höhe variabler turbulenter Wärmeleitfähigkeitskoeffizient . . . . .	243
c)	Wirkung von Auftriebskräften auf den vertikalen Wärmetransport (freie Konvektion) . . . . .	244
11.07	Der tägliche Gang des Windes in den unteren Schichten . . . . .	247
11.08	Verdunstung und Turbulenz . . . . .	249
11.09	Horizontalaustausch und seine Wirkung . . . . .	254
a)	Bestimmung der Größenordnung des Horizontalaustausches . . . . .	254
b)	Die Wirkung des Horizontalaustausches auf das mittlere meridionale Temperaturprofil . . . . .	259
	Literaturverzeichnis . . . . .	265

### Zwölftes Kapitel: *Atmosphärische Energetik*

12.01	Energieformen und ihre Transformationswege . . . . .	269
12.02	Die Energieleistungen . . . . .	271
12.03	Die Energie abgeschlossener Systeme . . . . .	273
a)	Die Energiegleichung von Luftkörpern (nach M. MARGULES) . . . . .	273
b)	Die potentielle Energie der horizontalen Druckverteilung . . . . .	275
c)	Die MARGULESSchen Betrachtungen über die vertikalen Umlagerungen von Luftmassen . . . . .	277
12.04	Die Vernichtung von Energie durch Turbulenz . . . . .	285

12.05 Die Energiebilanz der Atmosphäre und ihr thermodynamischer Wirkungsgrad . . . . .	288
Literaturverzeichnis . . . . .	292

**Dreizehntes Kapitel: Die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre**

13.01 Übersicht über die mittleren Zustandsverhältnisse der Atmosphäre	
a) Einleitung . . . . .	294
b) Der mittlere Grundzustand der Atmosphäre in der Horizontalen . . . . .	296
c) Der mittlere Grundzustand der Atmosphäre in Meridionalschnitten . . . . .	305
d) Die Horizontalardarstellung des Kernes des Westwindbandes und die mittlere vertikale Windverteilung desselben . . . . .	312
13.02 Die theoretischen Grundlagen für die Erklärung der mittleren Verhältnisse der allgemeinen Zirkulation . . . . .	313
a) Verschiedenheiten des jährlichen Ganges der meteorologischen Elemente in horizontaler und vertikaler Richtung . . . . .	313
b) Die durch den Wärmegegensatz Äquator—Pol bedingte Meridionalzirkulation auf der ruhenden Erde (Anwendung des Zirkulationstheorems auf die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre) . . . . .	322
c) Der Einfluß der Erdrotation und Reibung auf die atmosphärische Zirkulation . . . . .	326
d) Die JEFFREYSSCHE Theorie der Übertragung des Drehmomentes in der Atmosphäre . . . . .	331
e) Die Meridionalzirkulation in der Tropenzone und ihr Drehmomentbudget . . . . .	338
f) Schematische Darstellung von Meridionalschnitten der atmosphärischen Zirkulation . . . . .	345
13.03 Der Polarwirbel der gemäßigten und höheren Breiten. Theoretische Überlegungen zu seinem Aufbau und seiner Erhaltung. Stabilitätsfragen der zonalen Zirkulation . . . . .	350
a) Die Stabilitätsverhältnisse der zonalen Westwindströmung der mittleren Breiten . . . . .	350
b) Verschiedene meridionale Geschwindigkeitsprofile bei bestimmten Bedingungen des Drehmoments und der Vorticity . . . . .	353
c) ROSSBY'S Erklärung des mittleren meridionalen Windprofils der oberen Troposphäre der gemäßigten Breiten . . . . .	357
13.04 Die atmosphärischen Störungen der außertropischen Breiten in den mittleren und höheren Atmosphärenschichten . . . . .	369
a) Lange Wellen in den höheren Niveaus der Westwindtrift . . . . .	369
b) Einfache kinematische und hydrostatische Eigenschaften langer Wellen der oberen Westwindtrift . . . . .	371
c) Die barotrope Theorie der langen Wellen in der Westwindtrift . . . . .	376
d) Stabilitätsfragen für planetarische Wellen in der Westwindtrift unter Berücksichtigung ihrer Vertikalerstreckung . . . . .	380
e) Die Gruppengeschwindigkeit und Dispersion planetarischer Wellen in einer barotropen Atmosphäre . . . . .	386
f) Der Einfluß der Achsenneigung der Wellentröge und -rücken von planetarischen Wellen auf ihre Fortpflanzung und ihr Wachstum . . . . .	389

13.05	Atmosphärische Störungen der außertropischen Breiten in den unteren Atmosphärenschichten . . . . .	392
	a) Wellenarten und wellenerzeugende Kräfte . . . . .	392
	b) Der Einfluß der Erddrehung: Zyklonenwellen . . . . .	396
	c) Übersicht über die Theorie der Zyklonenwellen . . . . .	399
	d) Die Lebensgeschichte der extratropischen Zyklone und ihr dreidimensionaler Aufbau in der unteren Troposphäre . . . . .	403
	e) Die zusammengesetzte extratropische Zyklone und ihre Dynamik . . . . .	406
	f) Zyklonenfamilien . . . . .	418
13.06	Betrachtungen über die Frage der verschiedenen Arten der Zyklognese . . . . .	420
	a) Wellenzyklognese an der Polarfront . . . . .	420
	b) Die Riegeltheorie von F. M. EXNER . . . . .	421
	c) Zyklognese durch Kaltluftausbrüche in die Westwindtrift nach E. PALMÉN . . . . .	422
	d) Verhältnisse im Warmluftvorstoß von S bis SE vor einem Kälteausruch . . . . .	433
	e) Trägheitsbewegung in isentropen Flächen und Zyklognese nach J. BJERKNES . . . . .	437
	f) Jetstreamstruktur und Zyklognese . . . . .	441
	g) RÆTHJENS Anschauungen über Frontalzyklognese . . . . .	443
13.07	Die Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation . . . . .	446
	1. Einleitung . . . . .	446
	2. Die Schwankungen mehrjähriger bis mehrwöchiger Dauer . . . . .	447
	a) Aktionszentren . . . . .	448
	b) Indexschwankungen der atmosphärischen Zirkulation . . . . .	449
	c) Die Umwandlungen eines Low Index- in einen High Index-Zirkulationstyp und die umgekehrte Umwandlung eines High- in einen Low-Index . . . . .	453
	3. Vermutliche Ursachen der Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation . . . . .	458
	Literaturverzeichnis . . . . .	465
<b>Vierzehntes Kapitel: Numerische Wettervorhersage</b>		
14.01	Einleitung und Formulierung des Problems . . . . .	469
14.02	Die dreidimensionalen Grundgleichungen in quasi-geostrophischer Annäherung . . . . .	470
14.03	Das advektive Modell . . . . .	473
14.04	Das barotrope Modell . . . . .	475
14.05	Die KIBEL-EXNERSche Methode . . . . .	476
14.06	Das Zweischichten-Modell von N. PHILLIPS . . . . .	477
14.07	Das 2½-dimensionale Modell von EADY . . . . .	479
14.08	Vergleich der Modelle und Rechenvorgang bei ihrer Verwendung . . . . .	482
14.09	Die graphische Integration der barotropen Vorticitygleichung nach FJØRTOFT . . . . .	487
	Literaturverzeichnis . . . . .	490
<b>Fünfzehntes Kapitel: Atmosphärische Gezeiten und gezeitenähnliche Erscheinungen</b>		
15.01	Einleitung; Beobachtungstatsachen . . . . .	492
15.02	Grundlagen der Theorie der gezeitenartigen Schwingungen der Atmosphäre . . . . .	495



15.03	Theorie der gezeitenähnlichen Schwingungen auf der rotierenden Erde . .	500
15.04	Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen der Atmosphäre bei ruhender und rotierender Erde . . . . .	503
	a) Eigenschwingungen bei ruhender Erde . . . . .	503
	b) Eigenschwingungen bei rotierender Erde . . . . .	504
	c) Erzwungene Schwingungen . . . . .	507
15.05	Gezeitenähnliche Schwankungen der Atmosphäre bei beliebigem atmosphärischen Aufbau . . . . .	512
15.06	Berücksichtigung der Strahlungskomponente in der täglichen Temperaturschwankung . . . . .	515
	Literaturverzeichnis . . . . .	516
	Namenverzeichnis . . . . .	519
	Sachverzeichnis . . . . .	522