

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 Horizontaldarstellung 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
Vierzehntes Kapitel: Numerische Wettervorhersage		
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
Fünfzehntes Kapitel: Atmosphärische Gezeiten und gezeitenähnliche Erscheinungen		
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