

Dieter Etling

Theoretische Meteorologie

Eine
Einführung



Springer

Dieter Etling

Theoretische Meteorologie

Eine Einführung

2. Auflage

Mit 135 Abbildungen und 5 Tabellen

D III 283

DK: 551.511, 551.511.33, 551.55, 551.511.32,
551.510.522,

347/4181

INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
UNIVERSITÄT HANNOVER
HERRENHÄUSER STR. 2 - 30419 HANNOVER



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Definitionen	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Physikalische Größen und Einheiten	2
1.3	Vektor- und Tensornotation	3
2	Gase und Gasgemische	9
2.1	Thermodynamische Systeme	9
2.2	Ideale Gase	11
2.3	Reale Gase und Gasgemische	13
3	Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	17
3.1	Innere Energie	17
3.2	Erster Hauptsatz und Enthalpie	19
3.3	Das Joulesche Gesetz	21
3.4	Spezifische Wärmen	22
3.5	Funktionale Zusammenhänge für Energie und Enthalpie	24
3.6	Zustandsänderungen	25
3.7	Adiabatische Zustandsänderungen	27
4	Wasserdampf in der Atmosphäre	31
4.1	Wasserdampf als ideales Gas	31
4.2	Feuchtemaße	32
4.3	Die Zustandsgleichung für das Gemisch feuchte Luft	33
4.4	Spezifische Wärmen für feuchte Luft	35
4.5	Heterogene Systeme	37
4.6	Latente Wärmen	39
4.7	Der Wasserdampfdruck bei Sättigung	44
5	Thermodynamische Prozesse in der Atmosphäre	49
5.1	Der thermodynamische Zustand der Atmosphäre	49
5.2	Zur diabatischen Wärmezufuhr δQ	50
5.3	Zur Berücksichtigung der latenten Wärme L	56
5.4	Kondensation in der Atmosphäre	58
5.5	Der Treibhauseffekt	61
6	Der vertikale Aufbau der Atmosphäre	65
6.1	Das Geopotential	65
6.2	Die statische Grundgleichung	66
6.3	Der vertikale Temperaturgradient	72
6.4	Die statische Stabilität	75

6.5	Innere Energie und potentielle Energie in der Atmosphäre	80
7	Geschwindigkeitsfelder und deren Eigenschaften	87
7.1	Die Eulersche Zerlegung	87
7.2	Die Divergenz von Geschwindigkeitsfeldern	89
7.3	Die Vorticity	91
7.4	Die Deformation	93
7.5	Die Zirkulation eines Geschwindigkeitsfeldes	94
7.6	Die Stromfunktion	96
7.7	Das Geschwindigkeitspotential	98
7.8	Stromfunktion und Geschwindigkeitspotential	99
8	Die Kontinuitätsgleichung	101
8.1	Flüsse und Transporte	101
8.2	Die Kontinuitätsgleichung	102
8.3	Bodendrucktendenz und Kontinuitätsgleichung	105
9	Die Eulerschen Bewegungsgleichungen	107
9.1	Die Schwerkraft	107
9.2	Die Druckkraft	108
9.3	Zur Ursache von atmosphärischen Bewegungsvorgängen	111
9.4	Die Zentrifugalkraft und die Coriolis-Kraft	115
9.5	Die Bewegungsgleichungen im rotierenden System	122
9.6	Analyse der Bewegungsgleichung	123
9.7	Die Bewegungsgleichungen in Kugelkoordinaten	125
9.8	Die Bewegungsgleichungen im p -System	127
10	Der geostrophische Wind	133
10.1	Definition des geostrophischen Windes	133
10.2	Der thermische Wind	135
10.3	Geostrophischer und thermischer Wind im p -System	138
10.4	Barotrope und barokline Atmosphäre	140
10.5	Gradientwind und zyklotrophischer Wind	142
10.6	Skalenanalyse	144
11	Die Vorticitygleichung	147
11.1	Vorticitygleichung für eine zweidimensionale Strömung	147
11.2	Stromfunktion und Vorticitygleichung	150
11.3	Die Vorticitygleichung für eine dreidimensionale Strömung	151
11.4	Die linearisierte Vorticitygleichung	156
11.5	Die Zirkulationsgleichung	159
12	Gleichungen für atmosphärische Bewegungsvorgänge	163
12.1	Grundgleichungen	163
12.2	Gleichungen für synoptische Bewegungsvorgänge	164

12.3	Quasi-geostrophische Gleichungen	166
12.4	Die Omega-Gleichung	170
12.5	Die potentielle Vorticity	171
12.6	Energiegleichungen für eine reibungsfreie Atmosphäre	174
12.7	Die Boussinesq-Approximation	177
13	Wellen in der Atmosphäre	181
13.1	Periodische Bewegungen in der Atmosphäre: Wellen	181
13.2	Schallwellen	183
13.3	Schwerewellen	184
13.3.1	Externe Schwerewellen	185
13.3.2	Interne Schwerewellen	188
14	Instabilitäten und Zyklogenese	195
14.1	Stabilitätsanalyse	195
14.2	Barotrope Instabilität	197
14.3	Barokline Instabilität	202
14.3.1	Störungsgleichungen für das Zwei-Schichten-Modell	202
14.3.2	Störungsanalyse	207
14.3.3	Erläuterungen zum Mechanismus der baroklinen Instabilität	210
14.4	Kleinräumige Instabilitäten	215
15	Wirbeldynamik	219
15.1	Wirbel in der Atmosphäre	219
15.2	Die Wirbelgleichung	220
15.3	Mechanismen der Wirbelbildung	221
16	Einführende Bemerkungen zur Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation	225
16.1	Die Allgemeine Atmosphärische Zirkulation	225
17	Einführung in die numerische Wettervorhersage	231
17.1	Numerische Wettervorhersage	231
18	Bewegungsgleichungen mit Reibung	241
18.1	Oberflächenkräfte	241
18.2	Die Navier-Stokes-Gleichungen	243
18.3	Einfache Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen	248
19	Die gemittelten Bewegungsgleichungen	253
19.1	Begriffe und Regeln zu Mittelbildungen	253
19.2	Die Reynolds-Gleichungen	257
19.3	Gradientansatz und Mischungsweg für turbulente Transporte	261
20	Kinetische Energie einer turbulenten Strömung	267

20.1 Gleichung für die gesamte kinetische Energie	267
20.2 Gleichung für die kinetische Energie der mittleren Strömung	268
20.3 Gleichung für die Turbulenzenergie	269
20.4 Maßzahlen für die Turbulenz	273
20.5 Mikro- und Makroturbulenz	277
21 Die atmosphärische Grenzschicht	283
21.1 Die Einteilung der atmosphärischen Grenzschicht	283
21.2 Die bodennahe Grenzschicht: Die Prandtl-Schicht	285
21.3 Das Windprofil in der Prandtl-Schicht	286
21.4 Das Windprofil bei diabatischer Schichtung	289
21.4.1 Erläuterungen zum allgemeinen Sprachgebrauch	289
21.4.2 Die Monin-Obukhov-Stabilitätslänge	290
21.4.3 Das Windprofil und der Diffusionskoeffizient	291
21.4.4 Die Profilmfunktionen in der Prandtl-Schicht	293
21.5 Das Potenzprofil für die Windgeschwindigkeit	295
21.6 Das Temperaturprofil in der Prandtl-Schicht	298
21.6.1 Temperaturprofil und Profilmfunktion	298
21.6.2 Die Profilmethode für turbulente Flüsse	301
21.7 Die atmosphärische Grenzschicht: Ekman-Schicht	302
21.7.1 Die Ekman-Spirale	302
21.8 Die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht	306
21.9 Die turbulente Schubspannung in der Ekman-Schicht	307
21.10 Die Ekman-Spirale oberhalb einer Prandtl-Schicht	308
21.11 Grenzschicht-Modelle mit einem Mischungswegansatz	312
21.12 Die Wechselwirkung zwischen Grenzschicht und freier Atmosphäre	313
21.13 Das Temperaturprofil in der Grenzschicht	319
22 Die Ausbreitung von Substanzen in der Atmosphäre	325
22.1 Die Diffusionsgleichung	325
22.2 Die Konzentrationsverteilung für momentane Punktquellen	327
22.3 Konzentrationsverteilung für kontinuierliche Punktquellen	329
22.4 Die Konzentrationsverteilung als Gaußsche Normalverteilung	332
22.5 Diffusion unter Berücksichtigung des Erdbodens	333
22.6 Praktische Anwendung der Ausbreitungsrechnung	335
Literaturverzeichnis	339
Sachwortverzeichnis	349