

Dieter Etling

Theoretische Meteorologie

Eine Einführung

3. erweiterte und aktualisierte Auflage

Mit 149 Abbildungen

 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	23
3.5	Funktionale Zusammenhänge für Energie und Enthalpie	24
3.6	Zustandsänderungen	26
3.7	Adiabatische Zustandsänderungen	28
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	81
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 Bernoulli-Gleichung	115
9.5	Die Zentrifugalkraft und die Coriolis-Kraft	117
9.6	Die Bewegungsgleichungen im rotierenden System	124
9.7	Analyse der Bewegungsgleichung	125
9.8	Die Bewegungsgleichungen in Kugelkoordinaten	127
9.9	Die Bewegungsgleichungen im p -System	129
10	Der geostrophische Wind	135
10.1	Definition des geostrophischen Windes	135
10.2	Der thermische Wind	137
10.3	Geostrophischer und thermischer Wind im p -System	140
10.4	Barotrope und barokline Atmosphäre	142
10.5	Gradientwind und zyklostrophischer Wind	144
10.6	Skalenanalyse	146
11	Die Vorticitygleichung	149
11.1	Vorticitygleichung für eine zweidimensionale Strömung	149
11.2	Stromfunktion und Vorticitygleichung	152
11.3	Die Vorticitygleichung für eine dreidimensionale Strömung	153
11.4	Die linearisierte Vorticitygleichung	159
11.5	Die Zirkulationsgleichung	162
12	Gleichungen für atmosphärische Bewegungsvorgänge	169
12.1	Grundgleichungen	169

12.2	Gleichungen für synoptische Bewegungsvorgänge	170
12.3	Quasi-geostrophische Gleichungen	172
12.4	Die Omega-Gleichung	176
12.5	Die potentielle Vorticity	177
12.6	Energiegleichungen für eine reibungsfreie Atmosphäre	180
12.7	Die Boussinesq-Approximation	183
13	Wellen in der Atmosphäre	187
13.1	Periodische Bewegungen in der Atmosphäre: Wellen	187
13.2	Schallwellen	189
13.3	Schwerewellen	190
13.3.1	Externe Schwerewellen	191
13.3.2	Interne Schwerewellen	195
13.3.3	Schwerewellen über ebenem Untergrund	199
13.3.4	Schwerewellen über nicht-ebenem Untergrund	201
14	Instabilitäten und Zyklonese	207
14.1	Stabilitätsanalyse	207
14.2	Barotrope Instabilität	209
14.3	Barokline Instabilität	214
14.3.1	Störungsgleichungen für das Zwei-Schichten-Modell	214
14.3.2	Störungsanalyse	219
14.3.3	Erläuterungen zum Mechanismus der baroklinen Instabilität	222
14.4	Kleinräumige Instabilitäten	227
15	Wirbeldynamik	231
15.1	Wirbel in der Atmosphäre	231
15.2	Die Wirbelgleichung	232
15.3	Mechanismen der Wirbelbildung	233
16	Einführende Bemerkungen zur Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation	237
16.1	Die Allgemeine Atmosphärische Zirkulation	237
17	Einführung in die numerische Wettervorhersage und Klimamo- dellierung	243
17.1	Numerische Wettervorhersage	243
17.2	Einführung in die Klimamodellierung	250
18	Bewegungsgleichungen mit Reibung	255
18.1	Oberflächenkräfte	255
18.2	Die Navier-Stokes-Gleichungen	257
18.3	Einfache Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen	262
19	Die gemittelten Bewegungsgleichungen	267

19.1	Begriffe und Regeln zu Mittelbildungen	267
19.2	Die Reynolds-Gleichungen	271
19.3	Gradientansatz und Mischungsweg für turbulente Transporte . . .	275
20	Kinetische Energie einer turbulenten Strömung	281
20.1	Gleichung für die gesamte kinetische Energie	281
20.2	Gleichung für die kinetische Energie der mittleren Strömung . . .	282
20.3	Gleichung für die Turbulenzenergie	283
20.4	Maßzahlen für die Turbulenz	287
20.5	Mikro- und Makroturbulenz	291
21	Die atmosphärische Grenzschicht	297
21.1	Die Einteilung der atmosphärischen Grenzschicht	297
21.2	Die bodennahe Grenzschicht: Die Prandtl-Schicht	299
21.3	Das Windprofil in der Prandtl-Schicht	300
21.4	Das Windprofil bei diabatischer Schichtung	303
21.4.1	Erläuterungen zum allgemeinen Sprachgebrauch	303
21.4.2	Die Monin-Obukhov-Stabilitätslänge	304
21.4.3	Das Windprofil und der Diffusionskoeffizient	305
21.4.4	Die Profilmfunktionen in der Prandtl-Schicht	307
21.5	Das Potenzprofil für die Windgeschwindigkeit	309
21.6	Das Temperaturprofil in der Prandtl-Schicht	312
21.6.1	Temperaturprofil und Profilmfunktion	312
21.6.2	Die Profilmethode für turbulente Flüsse	315
21.7	Die atmosphärische Grenzschicht: Ekman-Schicht	316
21.8	Die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht	320
21.9	Die turbulente Schubspannung in der Ekman-Schicht	321
21.10	Die Ekman-Spirale oberhalb einer Prandtl-Schicht	322
21.11	Grenzschicht-Modelle mit einem Mischungswegansatz	327
21.12	Die Wechselwirkung zwischen Grenzschicht und freier Atmosphäre	328
21.13	Die instationäre Ekman-schicht	333
21.14	Das Temperaturprofil in der Grenzschicht	336
22	Die Ausbreitung von Substanzen in der Atmosphäre	341
22.1	Die Diffusionsgleichung	341
22.2	Die Konzentrationsverteilung für momentane Punktquellen	343
22.3	Konzentrationsverteilung für kontinuierliche Punktquellen	345
22.4	Die Konzentrationsverteilung als Gaußsche Normalverteilung . . .	348
22.5	Diffusion unter Berücksichtigung des Erdbodens	349
22.6	Praktische Anwendung der Ausbreitungsrechnung	351
22.7	Lagrange Partikelmodelle	354
	Literaturverzeichnis	361
	Sachwortverzeichnis	371