

Dieter Etling



Theoretische Meteorologie

Eine Einführung

vieweg Lehrbuch
Meteorologie

D III 240

DK 551.51

Dieter Etling

Theoretische Meteorologie

Eine Einführung

311/3891 INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
UNIVERSITÄT HANNOVER
HERRENHAUSER STR. 2 - 30419 HANNOVER



vieweg

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	8
2.1	Thermodynamische Systeme	8
2.2	Ideale Gase	10
2.3	Reale Gase und Gasgemische	12
3	Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	15
3.1	Innere Energie	15
3.2	Erster Hauptsatz und Enthalpie	17
3.3	Das Joulesche Gesetz	19
3.4	Spezifische Wärmen	20
3.5	Funktionale Zusammenhänge für Energie und Enthalpie	22
3.6	Zustandsänderungen	23
3.7	Adiabatische Zustandsänderungen	25
4	Wasserdampf in der Atmosphäre	29
4.1	Wasserdampf als ideales Gas	29
4.2	Feuchtemaße	30
4.3	Die Zustandsgleichung für das Gemisch <i>feuchte Luft</i>	31
4.4	Spezifische Wärmen für feuchte Luft	33
4.5	Heterogene Systeme	35
4.6	Latente Wärmen	37
4.7	Der Wasserdampfdruck bei Sättigung	42
5	Thermodynamische Prozesse in der Atmosphäre	47
5.1	Der thermodynamische Zustand der Atmosphäre	47
5.2	Zur diabatischen Wärmezufuhr δQ	48
5.3	Zur Berücksichtigung der latenten Wärme L	54
5.4	Kondensation in der Atmosphäre	56
6	Der vertikale Aufbau der Atmosphäre	60
6.1	Das Geopotential	60
6.2	Die statische Grundgleichung	61
6.3	Der vertikale Temperaturgradient	67
6.4	Die statische Stabilität	70
6.5	Innere Energie und potentielle Energie in der Atmosphäre	75

7	Geschwindigkeitsfelder und deren Eigenschaften	81
7.1	Die Eulersche Zerlegung	81
7.2	Die Divergenz von Geschwindigkeitsfeldern	83
7.3	Die Vorticity	85
7.4	Die Deformation	87
7.5	Die Zirkulation eines Geschwindigkeitsfeldes	88
7.6	Die Stromfunktion	90
7.7	Das Geschwindigkeitspotential	92
7.8	Stromfunktion und Geschwindigkeitspotential	93
8	Die Kontinuitätsgleichung	95
8.1	Flüsse und Transporte	95
8.2	Die Kontinuitätsgleichung	96
8.3	Bodendrucktendenz und Kontinuitätsgleichung	99
9	Die Eulerschen Bewegungsgleichungen	101
9.1	Die Schwerkraft	101
9.2	Die Druckkraft	102
9.3	Zur Ursache von atmosphärischen Bewegungsvorgängen	105
9.4	Die Zentrifugalkraft und die Coriolis-Kraft	109
9.5	Die Bewegungsgleichungen im rotierenden System	116
9.6	Die Bewegungsgleichungen in Kugelkoordinaten	117
9.7	Die Bewegungsgleichungen im p -System	119
10	Der geostrophische Wind	124
10.1	Definition des geostrophischen Windes	124
10.2	Der thermische Wind	126
10.3	Geostrophischer und thermischer Wind im p -System	129
10.4	Barotrope und barokline Atmosphäre	131
10.5	Der zyklotrophische Wind	133
10.6	Skalenanalyse	134
11	Die Vorticitygleichung	136
11.1	Vorticitygleichung für eine zweidimensionale Strömung	136
11.2	Stromfunktion und Vorticitygleichung	139
11.3	Die Vorticitygleichung für eine dreidimensionale Strömung	140
11.4	Die linearisierte Vorticitygleichung	145
11.5	Die Zirkulationsgleichung	148
12	Gleichungen für atmosphärische Bewegungsvorgänge	152
12.1	Grundgleichungen	152
12.2	Gleichungen für synoptische Bewegungsvorgänge	153
12.3	Quasi-geostrophische Gleichungen	155
12.4	Die potentielle Vorticity	159
12.5	Energiegleichungen für eine reibungsfreie Atmosphäre	161

13 Wellen in der Atmosphäre	165
13.1 Periodische Bewegungen in der Atmosphäre: Wellen	165
13.2 Schallwellen	167
13.3 Schwerewellen	168
13.3.1 Externe Schwerewellen	169
13.3.2 Interne Schwerewellen	172
14 Instabilitäten und Zyklogese	177
14.1 Stabilitätsanalyse	177
14.2 Barotrope Instabilität	179
14.3 Barokline Instabilität	184
14.4 Kleinräumige Instabilitäten	194
15 Einführende Bemerkungen zur Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation	197
15.1 Die Allgemeine Atmosphärische Zirkulation	197
16 Einführung in die numerische Wettervorhersage	202
16.1 Numerische Wettervorhersage	202
17 Bewegungsgleichungen mit Reibung	210
17.1 Oberflächenkräfte	210
17.2 Die Navier-Stokes-Gleichungen	212
17.3 Einfache Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen	217
17.4 Die Boussinesq-Approximation	222
18 Die gemittelten Bewegungsgleichungen	225
18.1 Begriffe und Regeln zur Mittelbildungen	225
18.2 Die Reynolds-Gleichungen	229
18.3 Gradientansatz und Mischungsweg für turbulente Transporte . . .	233
19 Kinetische Energie einer turbulenten Strömung	239
19.1 Gleichung für die gesamte kinetische Energie	239
19.2 Gleichung für die kinetische Energie der mittleren Strömung	240
19.3 Gleichung für die Turbulenzenergie	241
19.4 Maßzahlen für die Turbulenz	245
19.5 Mikro- und Makroturbulenz	249
20 Die atmosphärische Grenzschicht	254
20.1 Die Einteilung der atmosphärischen Grenzschicht	254
20.2 Die bodennahe Grenzschicht: Die Prandtl-Schicht	256
20.3 Das Windprofil in der Prandtl-Schicht	257
20.4 Das Windprofil bei diabatischer Schichtung	260
20.4.1 Erläuterungen zum allgemeinen Sprachgebrauch	260
20.4.2 Die Monin-Obukhov-Stabilitätslänge	261

20.4.3	Das Windprofil und der Diffusionskoeffizient	262
20.4.4	Die Profildfunktionen in der Prandtl-Schicht	264
20.5	Das Potenzprofil für die Windgeschwindigkeit	266
20.6	Das Temperaturprofil in der Prandtl-Schicht	269
20.6.1	Temperaturprofil und Profildfunktion	269
20.6.2	Die Profilmethode für turbulente Flüsse	272
20.7	Die atmosphärische Grenzschicht: Ekman-Schicht	273
20.7.1	Die Ekman-Spirale	273
20.8	Die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht	277
20.9	Die turbulente Schubspannung in der Ekman-Schicht	278
20.10	Die Ekman-Spirale oberhalb einer Prandtl-Schicht	279
20.11	Grenzschicht-Modelle mit einem Mischungswegansatz	283
20.12	Die Wechselwirkung zwischen Grenzschicht und freier Atmosphäre	285
21	Die Ausbreitung von Substanzen in der Atmosphäre	291
21.1	Die Diffusionsgleichung	291
21.2	Die Konzentrationsverteilung für momentane Punktquellen	293
21.3	Konzentrationsverteilung für kontinuierliche Punktquellen	295
21.4	Die Konzentrationsverteilung als Gaußsche Normalverteilung	298
21.5	Diffusion unter Berücksichtigung des Erdbodens	299
21.6	Praktische Anwendung der Ausbreitungsrechnung	301
	Literaturverzeichnis	305
	Sachwortverzeichnis	313