

Inhaltsverzeichnis

1	Strahlung und Energie in dem System Atmosphäre/Erdoberfläche	1
1.1	Einige Grundlagen	2
1.1.1	Die Erde als Planet	2
1.1.2	Die Gesetze der thermischen Strahlung	5
1.1.3	Grundlagen der Strahlungsübertragung	7
1.1.4	Die Zusammensetzung der Erdatmosphäre	14
1.2	Die solare Einstrahlung	19
1.2.1	Das globale Bild der Umsätze solarer Strahlung	19
1.2.2	Absorption, Streuung und spektrale Verteilung	25
1.3	Terrestrische Strahlung	42
1.3.1	Das globale Bild; der Treibhauseffekt	43
1.3.2	Emission und Absorption terrestrischer Strahlung	45
1.3.3	Strahlungsübertragung, Strahlungsflüsse, Strahlungskühlung	49
1.4	Strahlungs- und Energiebilanzen	53
1.4.1	Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche	54
1.4.2	Gesamtbilanz des Systems von Atmosphäre und Erdoberfläche	55
1.5	Temperaturen der bodennahen Luft	60
	Literatur	63
2	Die vertikale Struktur der Atmosphäre	65
2.1	Die Druckabnahme mit der Höhe	65
2.2	Das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre	71
2.2.1	Der trocken-adiabatische Temperaturgradient und der Begriff der potentiellen Temperatur	72
2.2.2	Der feucht-adiabatische Temperaturgradient	76
2.2.3	Temperaturgradienten in der Nähe der Erdoberfläche	80
2.2.4	Das atmosphärische Temperaturprofil als Ganzes und der damit verbundene „Stockwerk“-Aufbau der Atmosphäre	81
2.3	Schichtungsstabilität	87

2.3.1	Einige qualitative Überlegungen zur Schichtungsstabilität und zur Bildung von Inversionen	88
2.3.2	Quantitative Formulierung eines Stabilitätsmaßes; Brunt-Väisälä-Schwingungen und Schwerewellen	91
2.3.3	Effekte bei konvektiv-turbulenter Durchmischung und bei kollektiver Hebung und Senkung der Luft	93
2.3.4	Feuchtlabilität und Äquivalenttemperatur	95
	Literatur	97
3	Atmosphärische Dynamik	99
3.1	Kräfte in der Atmosphäre und die allgemeine Bewegungsgleichung	99
3.1.1	Gradient- und Coriolis-Kraft und der geostrophische Wind	100
3.1.2	Bewegung unter dem Einfluß von Reibungskräften	104
3.1.3	Der Einfluß der Schwerkraft; das Geopotential	109
3.1.4	Die allgemeine Bewegungsgleichung	111
3.1.5	Die Kontinuitätsgleichung; Konvergenzen und Divergenzen	114
3.2	Die Erhaltung der Wirbelstärke („Vorticity“)	117
3.2.1	Vorticity und Vorticity-Gleichung	118
3.2.2	Potentielle Vorticity	122
3.2.3	Beschleunigung und Windfelder als Folge horizontaler Temperaturgefälle. Barotrope und barokline Schichtung. Thermischer Wind	129
3.3	Bodenreibung und spezielle Dynamik der bodennahen Luftschichten	135
	Literatur	141
4	Die atmosphärische Zirkulation	143
4.1	Globale Zirkulationsmuster	143
4.2	Die Zone der Westwinddrift	148
4.2.1	Barotrope und barokline Wellen	148
4.2.2	Fronten	155
4.2.3	Zyklonen und Antizyklonen in der Westwinddriftzone	159
4.3	Weitere Details der globalen Zirkulation	169
4.3.1	Passate, Hadley-Zelle und Subtropenjet	169
4.3.2	Zeitliche und räumliche Variationen der Strömungsmuster	172
4.3.3	El Niño/Southern Oscillations („ENSO“)	178
4.3.4	Einige Charakteristika der stratosphärischen Zirkulation und des Austauschs zwischen Stratosphäre und Troposphäre	185

4.4	Einige Anmerkungen zu kleinräumigen thermischen Zirkulationen	191
	Literatur	193
5	Niederschlag, Wasserkreislauf, Klimazonen	195
5.1	Mikrophysik der Kondensation und der Niederschlagsbildung	195
5.1.1	Die homogene Kondensation	197
5.1.2	Heterogene Kondensation	203
5.1.3	Die weitere Entwicklung des Niederschlags	208
5.2	Der globale Wasserkreislauf; Niederschlags- und Klimazonen	219
5.2.1	Der Kreislauf von Verdunstung und Niederschlag	220
5.2.2	Klimazonen- und regionale Verteilung von Niederschlag und Verdunstung	223
5.3	Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch den Niederschlag	230
5.3.1	Auswaschen von Aerosolpartikeln	231
5.3.2	Auswaschen von Gasen durch den Niederschlag	236
5.4	Grundlegender Hydrometeorologie mit stabilen Isotopen	242
5.4.1	Isotopentrennung bei der Verdunstung	242
5.4.2	Einfache Kondensationsmodelle	248
5.4.3	Stabile Isotope in der Natur	252
	Literatur	257
6	Diffusion und Turbulenz	261
6.1	Molekulare Diffusion	262
6.1.1	Ein- und dreidimensionale Zufallsbewegung als Idealtyp einer Diffusion	263
6.1.2	Diffusive Flüsse skalarer und vektorieller Beimengungen	270
6.1.3	Die Diffusionsgleichung	275
6.2	Grundlagen der Turbulenz	282
6.3	Die Beschreibung der turbulenten Bewegung	286
6.3.1	Energiedichtespektren („power spectra“)	287
6.3.2	Autokorrelationen	290
6.3.3	Größenordnung der horizontalen und vertikalen Fluktuationen	293
6.4	Turbulente Diffusion	296
6.4.1	Quadratisch gemittelte Verschiebung und das Theorem von Taylor	298
6.4.2	Das Konzept der korrelierten Fluktuationen als allgemeiner Ansatz für turbulent-diffusive Flüsse und die hieraus folgende Transportgleichung	302
6.4.3	Der Gradientansatz für die turbulente Diffusion	307
6.4.4	Die frei diffundierende Beimengungswolke und die $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung	315
6.5	Empirische Bestimmung der Diffusionsparameter	322
	Literatur	326

7	Dynamik der bodennahen Luftschichten; Diffusion und Austausch in Bodennähe	329
7.1	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei neutraler Temperaturschichtung	329
7.1.1	Das logarithmische Windprofil	330
7.1.2	Der Einfluß wechselnder Bodenreibung	337
7.2	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei thermisch nichtneutraler Schichtung	342
7.2.1	Kenngrößen zur Parametrisierung	
	labilisierender oder stabilisierender Auftriebskräfte	343
7.2.2	Zusammenhang zwischen Flüssen und Gradienten	350
7.2.3	Der Einfluß von Wasserdampf auf die Stabilität bzw. Labilität	355
7.2.4	Freie Konvektion	358
7.3	Transport skalarer Beimengungen zur Erdoberfläche hin bzw. von der Erdoberfläche weg; Transferwiderstände und Transfargeschwindigkeiten	361
7.3.1	Transferwiderstand und Transfargeschwindigkeit	362
7.3.2	Bulk-Transferkoeffizienten	368
7.3.3	Modelle für den Transferwiderstand und die Transfargeschwindigkeit skalarer Beimengungen in der laminar-viskosen Unterschicht	370
7.3.4	Gasaustausch zwischen Luft und Wasser	377
7.3.5	Trockene Deposition von Aerosolpartikeln	382
7.4	Einige Anmerkungen zum Anschluß an die Ekman-Schicht und an die äußere Atmosphäre	387
	Literatur	391
8	Atmosphärische Spurengase	393
8.1	Überblick	395
8.1.1	Radikalchemie	395
8.1.2	Heterogene Reaktionen	397
8.1.3	Reaktionsgeschwindigkeiten und atmosphärische Lebensdauer	398
8.2	Wichtige chemische Reaktionszyklen in der Atmosphäre	402
8.2.1	Ozon in der Stratosphäre	403
8.2.2	Ozon-Produktion und -Verteilung	403
8.2.3	Abbau-Reaktionen	404
8.2.4	Das „Ozon-Loch“	412
8.2.5	Vulkanische Einflüsse auf die Ozonschicht	418
8.2.6	Globale Ozonabnahme	419
8.3	Ozonchemie in der Troposphäre	422
8.3.1	Photochemische Smog-Bildung	424
8.3.2	Oxidationskapazität der Atmosphäre	427
8.4	Kohlendioxid	428

8.4.1	Übersicht	428
8.4.2	Der säkulare CO ₂ -Anstieg	434
8.4.3	Kohlendioxid im Ozean	438
8.4.4	Einfluß ozeanischer Karbonatsedimente	444
8.5	Kreisläufe weiterer atmosphärischer Spurengase	446
8.5.1	CH ₄ und CO	448
8.5.2	Schwefelverbindungen	451
8.5.3	Stickstoffverbindungen	453
8.5.4	Halogenverbindungen	455
	Literatur	456
9	Aerosole	463
9.1	Entstehung und Lebenslauf atmosphärischer Aerosole	463
9.1.1	Aerosolproduktion: Nukleation und Dispersion	464
9.1.2	Lebenslauf troposphärischer Aerosole; Größenverteilungen	473
9.1.3	Globale Aerosolquellen; Häufigkeit chemischer Elemente	481
9.2	Grundzüge der Aerosoldynamik	486
9.2.1	Reibungskräfte	487
9.2.2	Thermische Diffusion und thermische Koagulation	493
9.3	Stratosphärische Aerosole	502
9.4	Troposphärische Aerosole und atmosphärischer Strahlungshaushalt	510
	Literatur	515
10	Klima und Klimaveränderungen	521
10.1	Klimaänderungen in der Vergangenheit	522
10.1.1	Paläoklima	522
10.1.2	Klima seit der Industrialisierung	532
10.2	Einfache Kenngrößen zur Beschreibung des Klimawandels: Klimaantriebe und Klimasensitivität	536
10.2.1	Verschiedene Definitionen für das Radiative Forcing	541
10.2.2	Übersicht über verschiedene Klimaantriebe	545
10.2.3	Rückkopplungsmechanismen und Klimasensitivität	548
10.2.4	Methoden zur Bestimmung der Klimaempfindlichkeit	556
10.3	Klimamodelle	558
10.3.1	Überblick	558
10.3.2	Zirkulationsmodelle („general circulation models“, GCM)	565
	Literatur	577
	Sachverzeichnis	581