

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.	4
1.1.3	Grundlagen der Strahlungsübertragung	6
1.1.4	Die Zusammensetzung der Erdatmosphäre	12
1.2	Die solare Einstrahlung	17
1.2.1	Das globale Bild der Umsätze solarer Strahlung.	17
1.2.2	Absorption, Streuung und spektrale Verteilung	23
	Ergänzung 1.1	
	Halbquantitative Behandlung der Rayleigh-Streuung	31
	Ergänzung 1.2	
	Die praktische Sichtweite in der Atmosphäre.	35
1.3	Terrestrische Strahlung	38
1.3.1	Das globale Bild; der Treibhauseffekt	39
1.3.2	Emission und Absorption terrestrischer Strahlung.	41
1.3.3	Strahlungsübertragung, Strahlungsflüsse, Strahlungskühlung.	45
1.4	Strahlungs- und Energiebilanzen	49
1.4.1	Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche	49
1.4.2	Gesamtbilanz des Systems von Atmosphäre und Erdoberfläche	51
1.5	Temperaturen der bodennahen Luft	54
2	Die vertikale Struktur der Atmosphäre	58
2.1	Die Druckabnahme mit der Höhe.	58
2.2	Das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre	64
2.2.1	Der trocken-adiabatische Temperaturgradient; der Begriff der potentiellen Temperatur und deren Zusammenhang mit der Entropie	64
2.2.2	Der feucht-adiabatische Temperaturgradient.	69
2.2.3	Temperaturgradienten in der Nähe der Erdoberfläche	73

2.2.4	Das atmosphärische Temperaturprofil als Ganzes und der damit verbundene „Stockwerk“-Aufbau der Atmosphäre	75
2.3	Schichtungsstabilität	78
2.3.1	Einige qualitative Überlegungen zur Schichtungsstabilität und zur Bildung von Inversionen	78
2.3.2	Quantitative Formulierung eines Stabilitätsmaßes; Brunt-Väisälä-Schwingungen und Schwerewellen.	81
2.3.3	Effekte bei konvektiv-turbulenter Durchmischung und bei kollektiver Hebung und Senkung der Luft	83
2.3.4	Feuchtlabilität und Äquivalenttemperatur	85
3	Atmosphärische Dynamik	88
3.1	Kräfte in der Atmosphäre und die allgemeine Bewegungsgleichung.	88
3.1.1	Gradient- und Coriolis-Kraft und der geostrophische Wind	89
3.1.2	Bewegung unter dem Einfluß von Reibungskräften	93
3.1.3	Der Einfluß der Schwerkraft; das Geopotential.	97
3.1.4	Die allgemeine (Eulersche) Bewegungsgleichung	99
3.1.5	Die Kontinuitätsgleichung; Konvergenzen und Divergenzen	101
	Ergänzung 3.1	
	Die Coriolis-Kraft	103
3.2	Die Erhaltung der Wirbelstärke („Vorticity“).	105
3.2.1	Vorticity und Vorticity-Gleichung	105
3.2.2	Potentielle Vorticity.	109
	Ergänzung 3.2	
	Die Ableitung der Vorticity-Gleichung aus der allgemeinen Bewegungsgleichung.	114
3.3	Beschleunigungen und Windfelder als Folge horizontaler Temperaturgefälle. Barotrope und barokline Schichtung. Thermischer Wind	115
3.4	Bodenreibung und spezielle Dynamik der bodennahen Luftschichten	120
	Ergänzung 3.3	
	Analytische Lösung der Gleichung der planetaren Grenzschicht	123
4	Die atmosphärische Zirkulation	127
4.1	Globale Zirkulationsmuster	127
4.2	Die Zone der Westwinddrift.	131
4.2.1	Barotrope und barokline Wellen.	132
4.2.2	Fronten	138
4.2.3	Zyklonen und Antizyklonen in der Westwinddriftzone.	142
	Ergänzung 4.1	
	Konvergenzen und Divergenzen in baroklinen Wellen	147

4.3	Weitere Details der globalen Zirkulation	151
4.3.1	Passate, Hadley-Zelle und Subtropenjet.	151
4.3.2	Zeitliche und räumliche Variationen der Strömungsmuster	154
4.3.3	El Niño/Southern Oscillations („ENSO“).	160
4.3.4	Einige Charakteristika der stratosphärischen Zirkulation und des Austauschs zwischen Stratosphäre und Troposphäre	165
4.4	Einige Anmerkungen zu kleinräumigen thermischen Zirkulationen	172
5	Niederschlag, Wasserkreislauf, Klimazonen	175
5.1	Mikrophysik der Kondensation und der Niederschlagsbildung	175
5.1.1	Die homogene Kondensation	177
5.1.2	Heterogene Kondensation	184
5.1.3	Die weitere Entwicklung des Niederschlags	187
	Ergänzung 5.1 Die Rate der homogenen Nukleation nach dem Ansatz von Zeldovich.	195
5.2	Der globale Wasserkreislauf; Niederschlags- und Klimazonen.	197
5.2.1	Der Kreislauf von Verdunstung und Niederschlag	198
5.2.2	Klimazonen und regionale Verteilung von Niederschlag und Verdunstung	201
	Ergänzung 5.2 Formeln zur Bestimmung der Verdunstungsrate	204
5.3	Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch den Niederschlag	208
5.3.1	Auswaschen von Aerosolpartikeln	209
5.3.2	Auswaschen von Gasen durch den Niederschlag	214
5.4	Grundlagen der Hydrometeorologie mit stabilen Isotopen	219
5.4.1	Isotopentrennung bei der Verdunstung.	220
5.4.2	Einfache Kondensationsmodelle.	225
5.4.3	Stabile Isotope in der Natur	228
6	Diffusion und Turbulenz.	234
6.1	Molekulare Diffusion.	235
6.1.1	Ein- und dreidimensionale Zufallsbewegung als Idealtyp einer Diffusion	236
6.1.2	Diffusive Flüsse skalarer und vektorieller Beimengungen	242
6.1.3	Die Diffusionsgleichung.	247
	Ergänzung 6.1 Molekularer Transport im Feld eines Temperaturgradienten; Grundlagen der Thermodiffusion und der Thermophorese.	249
	Ergänzung 6.2 Die Temperaturabhängigkeit der Diffusionskonstanten	252
6.2	Grundlagen der Turbulenz.	253

6.3	Die Beschreibung der turbulenten Bewegung.	257
6.3.1	Energiedichtespektren („power spectra“)	258
6.3.2	Autokorrelationen.	260
6.3.3	Größenordnung der horizontalen und vertikalen Fluktuationen . . .	264
6.4	Turbulente Diffusion	267
6.4.1	Quadratisch gemittelte Verschiebung und das Theorem von Taylor .	268
6.4.2	Das Konzept der korrelierten Fluktuationen als allgemeiner Ansatz für turbulent-diffusive Flüsse und die hieraus folgende Transportgleichung.	273
6.4.3	Der Gradientansatz für die turbulente Diffusion	277
6.4.4	Die frei diffundierende Beimengungswolke und die $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung	284
	Ergänzung 6.3	
	Versuch einer Theorie der $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung.	287
6.5	Empirische Bestimmung der Diffusionsparameter	290
7	Dynamik der bodennahen Luftschichten; Diffusion und Austausch in Bodennähe.	295
7.1	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei neutraler Temperaturschichtung	295
7.1.1	Das logarithmische Windprofil.	296
7.1.2	Der Einfluß wechselnder Bodenreibung	303
7.2	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei thermisch nichtneutraler Schichtung	307
7.2.1	Kenngrößen zur Parametrisierung labilisierender oder stabilisierender Auftriebskräfte.	308
7.2.2	Zusammenhang zwischen Flüssen und Gradienten	314
7.2.3	Der Einfluß von Wasserdampf auf die Stabilität bzw. Labilität.	319
7.2.4	Freie Konvektion.	321
7.3	Transport skalarer Beimengungen zur Erdoberfläche hin bzw. von der Erdoberfläche weg; Transferwiderstände und Transfargeschwindigkeiten	324
7.3.1	Transferwiderstand und Transfargeschwindigkeit	325
7.3.2	Bulk-Transferkoeffizienten.	330
7.3.3	Modelle für den Transferwiderstand und die Transfargeschwindigkeit skalarer Beimengungen in der laminar-viskosen Unterschicht	331
7.3.4	Gasaustausch zwischen Luft und Wasser	338
7.3.5	Trockene Deposition von Aerosolpartikeln	342
7.4	Einige Anmerkungen zum Anschluß an die Ekman-Schicht und an die äußere Atmosphäre.	347

8	Strahlungs- und klimarelevante Spurengase	351
8.1	Überblick	351
8.2	Kohlendioxid	354
8.2.1	Übersicht	355
8.2.2	Der säkulare CO ₂ -Anstieg	359
8.2.3	Kohlendioxid im Ozean	364
8.2.4	Einfluß ozeanischer Karbonatsedimente	369
8.3	Ozon in der Stratosphäre	372
8.3.1	Ozon-Produktion und -Verteilung	372
8.3.2	Abbau-Reaktionen	374
8.3.3	Anthropogene und vulkanische Einflüsse auf die Ozonschicht; das „Ozon-Loch“	380
8.4	Methan, troposphärisches Ozon und weitere Spurengase	388
9	Aerosole	395
9.1	Entstehung und Lebenslauf atmosphärischer Aerosole	395
9.1.1	Aerosolproduktion: Nukleation und Dispersion.	396
9.1.2	Lebenslauf troposphärischer Aerosole; Größenverteilungen	402
9.1.3	Globale Aerosolquellen; Häufigkeit chemischer Elemente	410
9.2	Grundzüge der Aerosoldynamik.	413
9.2.1	Reibungskräfte	413
9.2.2	Thermische Diffusion und thermische Koagulation	419
	Ergänzung 9.1 Der Gradient einer Beimengung an einer Kugeloberfläche	427
9.3	Stratosphärische Aerosole	428
9.4	Troposphärische Aerosole und atmosphärischer Strahlungshaushalt	435
10	Das Klima: Variationen und Modelle	440
10.1	Klimaänderungen in der Vergangenheit	441
10.2	Klimamodelle	452
10.2.1	Überblick	453
10.2.2	Zirkulationsmodelle („general circulation models“, GCM)	458
10.3	Bewertung von Klimasignalen; das Problem des Nachweises anthropogener Klimaänderungen	467
	Literatur- und Quellenhinweise	475
	Sachverzeichnis	491