

Walter Roedel

Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre

Zweite überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 176 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York London Paris
Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest

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	11
1.2	Die solare Einstrahlung	15
1.2.1	Das globale Bild der Umsätze solarer Strahlung	15
1.2.2	Absorption, Streuung und spektrale Verteilung	21
	Ergänzung 1.1	
	Halbquantitative Behandlung der Rayleigh-Streuung	28
	Ergänzung 1.2	
	Die praktische Sichtweite in der Atmosphäre	33
1.3	Terrestrische Strahlung	36
1.3.1	Das globale Bild; der Treibhauseffekt	37
1.3.2	Emission und Absorption terrestrischer Strahlung	39
1.3.3	Strahlungsübertragung, Strahlungsflüsse, Strahlungskühlung	42
1.4	Strahlungs- und Energiebilanzen	46
1.4.1	Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche	46
1.4.2	Gesamtbilanz des Systems von Atmosphäre und Erdoberfläche	48
1.5	Temperaturen der bodennahen Luft	52
2	Die vertikale Struktur der Atmosphäre	56
2.1	Die Druckabnahme mit der Höhe	56
2.2	Das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre	60
2.2.1	Der trocken-adiabatische Temperaturgradient; der Begriff der potentiellen Temperatur und deren Zusammenhang mit der Entropie	61
2.2.2	Der feucht-adiabatische Temperaturgradient	66
2.2.3	Temperaturgradienten in der Nähe der Erdoberfläche	70

2.2.4	Das atmosphärische Temperaturprofil als Ganzes und der damit verbundene „Stockwerk“-Aufbau der Atmosphäre	71
2.3	Schichtungsstabilität	74
2.3.1	Einige qualitative Überlegungen zur Schichtungsstabilität und zur Bildung von Inversionen	75
2.3.2	Quantitative Formulierung eines Stabilitätsmaßes; Brunt-Väisälä-Schwingungen und Schwerewellen	78
2.3.3	Effekte bei konvektiv-turbulenter Durchmischung und bei kollektiver Hebung und Senkung der Luft	80
2.3.4	Feuchtlabilität und Äquivalenttemperatur	82
3	Atmosphärische Dynamik	85
3.1	Kräfte in der Atmosphäre und die allgemeine Bewegungsgleichung	85
3.1.1	Gradient- und Coriolis-Kraft und der geostrophische Wind .	85
3.1.2	Bewegung unter dem Einfluß von Reibungskräften	90
3.1.3	Der Einfluß der Schwerkraft; das Geopotential	94
3.1.4	Die allgemeine (Eulersche) Bewegungsgleichung	95
3.1.5	Die Kontinuitätsgleichung; Konvergenzen und Divergenzen	98
	Ergänzung 3.1 Die Coriolis-Kraft	99
3.2	Die Erhaltung der Wirbelstärke („Vorticity“)	102
3.2.1	Vorticity und Vorticity-Gleichung	102
3.2.2	Potentielle Vorticity	106
	Ergänzung 3.2 Die Ableitung der Vorticity-Gleichung aus der allgemeinen Bewegungsgleichung	110
3.3	Beschleunigungen und Windfelder als Folge horizontaler Temperaturgefälle. Barotrope und barokline Schichtung. Thermischer Wind	111
3.4	Bodenreibung und spezielle Dynamik der bodennahen Luftschichten	116
	Ergänzung 3.3 Analytische Lösung der Gleichung der planetaren Grenzschicht	119
4	Die atmosphärische Zirkulation	123
4.1	Globale Zirkulationsmuster	123
4.2	Die Zoné der Westwinddrift	127
4.2.1	Barotrope und barokline Wellen	128
4.2.2	Fronten	134

4.2.3	Zyklonen und Antizyklonen in der Westwinddriftzone	138
	Ergänzung 4.1	
	Konvergenzen und Divergenzen in baroklinen Wellen	143
4.3	Weitere Details der globalen Zirkulation	147
4.3.1	Passate, Hadley-Zelle und Subtropenjet	147
4.3.2	Zeitliche und räumliche Variationen der Strömungsmuster ..	150
4.3.3	El Niño/Southern Oscillations („ENSO“)	154
4.3.4	Einige Charakteristika der stratosphärischen Zirkulation und des Austauschs zwischen Stratosphäre und Troposphäre	158
4.4	Einige Anmerkungen zu kleinräumigen thermischen Zirkulationen	162
5	Niederschlag, Wasserkreislauf, Klimazonen	164
5.1	Mikrophysik der Kondensation und der Niederschlagsbildung	164
5.1.1	Die homogene Kondensation	166
5.1.2	Heterogene Kondensation	173
5.1.3	Die weitere Entwicklung des Niederschlags	176
	Ergänzung 5.1	
	Die Rate der homogenen Nukleation nach dem Ansatz von Zeldovich	184
5.2	Der globale Wasserkreislauf; Niederschlags- und Klimazonen	186
5.2.1	Der Kreislauf von Verdunstung und Niederschlag	187
5.2.2	Klimazonen und regionale Verteilung von Niederschlag und Verdunstung	190
	Ergänzung 5.2	
	Formeln zur Bestimmung der Verdunstungsrate	194
5.3	Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch den Niederschlag	197
5.3.1	Auswaschen von Aerosolpartikeln	198
5.3.2	Auswaschen von Gasen durch den Niederschlag	203
5.4	Grundlagen der Hydrometeorologie mit stabilen Isotopen ..	208
5.4.1	Isotopentrennung bei der Verdunstung	208
5.4.2	Einfache Kondensationsmodelle	214
5.4.3	Stabile Isotope in der Natur	217
6	Diffusion und Turbulenz	223
6.1	Molekulare Diffusion	224
6.1.1	Ein- und dreidimensionale Zufallsbewegung als Idealtyp einer Diffusion	225
6.1.2	Diffusive Flüsse skalarer und vektorieller Beimengungen ...	231

6.1.3	Die Diffusionsgleichung	237
	Ergänzung 6.1	
	Molekularer Transport im Feld eines Temperaturgradienten; Grundlagen der Thermodiffusion und der Thermophorese ..	238
	Ergänzung 6.2	
	Die Temperaturabhängigkeit der Diffusionskonstanten	241
6.2	Grundlagen der Turbulenz	242
6.3	Die Beschreibung der turbulenten Bewegung	246
6.3.1	Energiedichtespektren („power spectra“)	247
6.3.2	Autokorrelationen	250
6.3.3	Größenordnung der horizontalen und vertikalen Fluktuationen	253
6.4	Turbulente Diffusion	256
6.4.1	Quadratisch gemittelte Verschiebung und das Theorem von Taylor	258
6.4.2	Das Konzept der korrelierten Fluktuationen als allgemeiner Ansatz für turbulent-diffusive Flüsse und die hieraus folgende Transportgleichung	261
6.4.3	Der Gradientansatz für die turbulente Diffusion	266
6.4.4	Die frei diffundierende Beimischungswolke und die $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung	273
	Ergänzung 6.3	
	Versuch einer Theorie der $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung	275
6.5	Empirische Bestimmung der Diffusionsparameter	278
7	Dynamik der bodennahen Luftschichten; Diffusion und Austausch in Bodennähe	284
7.1	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei neutraler Temperaturschichtung	284
7.1.1	Das logarithmische Windprofil	285
7.1.2	Der Einfluß wechselnder Bodenreibung	292
7.2	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei thermisch nichtneutraler Schichtung	296
7.2.1	Kenngrößen zur Parametrisierung labilisierender oder stabilisierender Auftriebskräfte	297
7.2.2	Zusammenhang zwischen Flüssen und Gradienten	303
7.2.3	Der Einfluß von Wasserdampf auf die Stabilität bzw. Labilität	308
7.2.4	Freie Konvektion	310
7.3	Transport skalarer Beimengungen zur Erdoberfläche hin bzw. von der Erdoberfläche weg; Transferwiderstände und Transfergeschwindigkeiten	313

7.3.1	Transferwiderstand und Transfergeschwindigkeit	314
7.3.2	Bulk-Transferkoeffizienten	319
7.3.3	Modelle für den Transferwiderstand und die Transfergeschwindigkeit skalarer Beimengungen in der laminar-viskosen Unterschicht	321
7.3.4	Gasaustausch zwischen Luft und Wasser	327
7.3.5	Trockene Deposition von Aerosolpartikeln	332
7.4	Einige Anmerkungen zum Anschluß an die Ekman-Schicht und an die äußere Atmosphäre	336
8	Klimarelevante Spurengase	340
8.1	Überblick	340
8.2	Kohlendioxid	343
8.2.1	Übersicht	343
8.2.2	Der säkulare CO ₂ -Anstieg	348
8.2.3	Kohlendioxid im Ozean	350
8.2.4	Einfluß ozeanischer Karbonatsedimente	356
8.3	Ozon in der Stratosphäre	358
8.3.1	Ozonproduktion	358
8.3.2	Abbaureaktionen	360
8.3.3	Anthropogene Einflüsse auf die Ozonschicht; das „Ozonloch“	364
8.4	Methan, troposphärisches Ozon und weitere Spurengase ...	370
9	Aerosole	377
9.1	Entstehung und Lebenslauf atmosphärischer Aerosole	377
9.1.1	Aerosolproduktion: Nukleation und Dispersion	377
9.1.2	Lebenslauf troposphärischer Aerosole; Größenverteilungen	384
9.1.3	Globale Aerosolquellen; Häufigkeit chemischer Elemente ..	391
9.2	Grundzüge der Aerosoldynamik	395
9.2.1	Reibungskräfte	395
9.2.2	Thermische Diffusion und thermische Koagulation	401
	Ergänzung 9.1 Der Gradient einer Beimengung an einer Kugeloberfläche ..	408
9.3	Stratosphärische Aerosole	410
10	Das Klima: Variationen und Modelle	417
10.1	Klimaänderungen in der Vergangenheit	418
10.2	Klimamodelle	428
10.2.1	Überblick	429

10.2.2 Zirkulationsmodelle („general circulation models“, GCM) ..	434
10.3 Das Problem des Nachweises anthropogener Klimaänderungen	443
Literatur- und Quellenhinweise	449
Sachverzeichnis	461