

Walter
Roedel

PHYSIK unserer Umwelt

DIE ATMOSPHÄRE



Springer
Verlag

Walter Roedel

Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre

Mit 172 Abbildungen

283/3517 INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
UNIVERSITÄT HANNOVER
HERRENHAUSER STR. 2 3000 HANNOVER 21

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	51
2	Die vertikale Struktur der Atmosphäre	54
2.1	Die Druckabnahme mit der Höhe	54
2.2	Das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre	58
2.2.1	Der trocken-adiabatische Temperaturgradient; der Begriff der potentiellen Temperatur und deren Zusammenhang mit der Entropie	59
2.2.2	Der feucht-adiabatische Temperaturgradient	64
2.2.3	Temperaturgradienten in der Nähe der Erdoberfläche	68

2.2.4	Das atmosphärische Temperaturprofil als Ganzes und der damit verbundene „Stockwerk“-Aufbau der Atmosphäre	69
2.3	Schichtungsstabilität	72
2.3.1	Einige qualitative Überlegungen zur Schichtungsstabilität und zur Bildung von Inversionen	73
2.3.2	Quantitative Formulierung eines Stabilitätsmaßes; Brunt-Väisälä-Schwingungen und Schwerewellen	76
2.3.3	Effekte bei konvektiv-turbulenter Durchmischung und bei kollektiver Hebung und Senkung der Luft	78
2.3.4	Feuchtlabilität und Äquivalenttemperatur	80
3	Atmosphärische Dynamik	83
3.1	Kräfte in der Atmosphäre und die allgemeine Bewegungsgleichung	83
3.1.1	Gradient- und Coriolis-Kraft und der geostrophische Wind ..	83
✓ 3.1.2	Bewegung unter dem Einfluß von Reibungskräften	88
3.1.3	Der Einfluß der Schwerkraft; das Geopotential	92
3.1.4	Die allgemeine (Eulersche) Bewegungsgleichung	93
3.1.5	Die Kontinuitätsgleichung; Konvergenzen und Divergenzen Ergänzung 3.1 Die Coriolis-Kraft	96 97
3.2	Die Erhaltung der Wirbelstärke („Vorticity“)	100
3.2.1	Vorticity und Vorticity-Gleichung	100
3.2.2	Potentielle Vorticity	104
	Ergänzung 3.2 Die Ableitung der Vorticity-Gleichung aus der allgemeinen Bewegungsgleichung	108
3.3	Beschleunigungen und Windfelder als Folge horizontaler Temperaturgefälle. Barotrope und barokline Schichtung. Thermischer Wind	109
3.4	Bodenreibung und spezielle Dynamik der bodennahen Luftschichten	114
	Ergänzung 3.3 Analytische Lösung der Gleichung der planetaren Grenzschicht <i>(Ekman-Spirale)</i>	117
4	Die atmosphärische Zirkulation	121
4.1	Globale Zirkulationsmuster	121
4.2	Die Zone der Westwinddrift	125
4.2.1	Barotrope und barokline Wellen	126
4.2.2	Fronten	130

4.2.3	Zyklonen und Antizyklonen in der Westwinddriftzone	134
	Ergänzung 4.1	
	Konvergenzen und Divergenzen in baroklinen Wellen	140
4.3	Weitere Details der globalen Zirkulation	143
4.3.1	Passate, Hadley-Zelle und Subtropenjet	144
4.3.2	Zeitliche und räumliche Variationen der Strömungsmuster	146
✓ 4.3.3	El Niño/Southern Oscillations („ENSO“)	150
4.3.4	Einige Charakteristika der stratosphärischen Zirkulation und des Austauschs zwischen Stratosphäre und Troposphäre	154
4.4	Einige Anmerkungen zu kleinräumigen thermischen Zirkulationen	158
5	Niederschlag, Wasserkreislauf, Klimazonen	160
5.1	Mikrophysik der Kondensation und der Niederschlagsbildung	160
5.1.1	Die homogene Kondensation	162
5.1.2	Heterogene Kondensation	169
5.1.3	Die weitere Entwicklung des Niederschlags	172
	Ergänzung 5.1	
	Die Rate der homogenen Nukleation nach dem Ansatz von Zeldovich	180
5.2	Der globale Wasserkreislauf; Niederschlags- und Klimazonen	182
5.2.1	Der Kreislauf von Verdunstung und Niederschlag	183
5.2.2	Klimazonen und regionale Verteilung von Niederschlag und Verdunstung	186
	Ergänzung 5.2	
	Formeln zur Bestimmung der Verdunstungsrate	190
5.3	Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch den Niederschlag	193
5.3.1	Auswaschen von Aerosolpartikeln	194
5.3.2	Auswaschen von Gasen durch den Niederschlag	199
5.4	Grundlagen der Hydrometeorologie mit stabilen Isotopen	204
5.4.1	Isotopentrennung bei der Verdunstung	204
5.4.2	Einfache Kondensationsmodelle	210
5.4.3	Stabile Isotope in der Natur	213
✗ 6	Diffusion und Turbulenz	219
6.1	Molekulare Diffusion	220
6.1.1	Ein- und dreidimensionale Zufallsbewegung als Idealtyp einer Diffusion	221
6.1.2	Diffusive Flüsse skalarer und vektorieller Beimengungen	227

6.1.3	Die Diffusionsgleichung	233
	Ergänzung 6.1	
	Molekularer Transport im Feld eines Temperaturgradienten; Grundlagen der Thermodiffusion und der Thermophorese ..	234
	Ergänzung 6.2	
	Die Temperaturabhängigkeit der Diffusionskonstanten	237
6.2	Grundlagen der Turbulenz	238
6.3	Die Beschreibung der turbulenten Bewegung	242
6.3.1	Energiedichtespektren („power spectra“)	243
6.3.2	Autokorrelationen	246
6.3.3	Größenordnung der horizontalen und vertikalen Fluktuationen	249
6.4	Turbulente Diffusion	252
6.4.1	Quadratisch gemittelte Verschiebung und das Theorem von Taylor	254
6.4.2	Das Konzept der korrelierten Fluktuationen als allgemeiner Ansatz für turbulent-diffusive Flüsse und die hieraus folgende Transportgleichung	257
6.4.3	Der Gradientansatz für die turbulente Diffusion	262
6.4.4	Die frei diffundierende Beimengungswolke und die $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung	269
	Ergänzung 6.3	
	Versuch einer Theorie der $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung	271
6.5	Empirische Bestimmung der Diffusionsparameter	274
X 7	Dynamik der bodennahen Luftschichten; Diffusion und Austausch in Bodennähe	280
7.1	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei neutraler Temperaturschichtung	280
7.1.1	Das logarithmische Windprofil	281
7.1.2	Der Einfluß wechselnder Bodenreibung	288
7.2	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei thermisch nichtneutraler Schichtung	292
7.2.1	Kenngrößen zur Parametrisierung labilisierender oder stabilisierender Auftriebskräfte	293
7.2.2	Zusammenhang zwischen Flüssen und Gradienten	299
7.2.3	Der Einfluß von Wasserdampf auf die Stabilität bzw. Labilität	304
7.2.4	Freie Konvektion	306
7.3	Transport skalarer Beimengungen zur Erdoberfläche hin bzw. von der Erdoberfläche weg; Transferwiderstände und Transfergeschwindigkeiten	309

7.3.1	Transferwiderstand und Transfergeschwindigkeit	310
7.3.2	Bulk-Transferkoeffizienten	315
7.3.3	Modelle für den Transferwiderstand und die Transfergeschwindigkeit skalarer Beimengungen in der laminar-viskosen Unterschicht	317
7.3.4	Gasaustausch zwischen Luft und Wasser	323
7.3.5	Trockene Deposition von Aerosolpartikeln	328
7.4	Einige Anmerkungen zum Anschluß an die Ekman-Schicht und an die äußere Atmosphäre	332
8	Klimarelevante Spurengase	336
8.1	Überblick	336
8.2	Kohlendioxid	339
8.2.1	Übersicht	339
8.2.2	Der säkulare CO ₂ -Anstieg	344
8.2.3	Kohlendioxid im Ozean	346
8.2.4	Einfluß ozeanischer Karbonatsedimente	352
8.3	Ozon in der Stratosphäre	354
8.3.1	Ozonproduktion	354
8.3.2	Abbaureaktionen	355
8.3.3	Anthropogene Einflüsse auf die Ozonschicht; das „Ozonloch“	358
8.4	Methan, troposphärisches Ozon und weitere Spurengase ...	362
9	Aerosole	369
9.1	Entstehung und Lebenslauf atmosphärischer Aerosole	369
9.1.1	Aerosolproduktion: Nukleation und Dispersion	369
9.1.2	Lebenslauf troposphärischer Aerosole; Größenverteilungen	376
9.1.3	Globale Aerosolquellen; Häufigkeit chemischer Elemente ..	382
9.2	Grundzüge der Aerosoldynamik	385
9.2.1	Reibungskräfte	386
9.2.2	Thermische Diffusion und thermische Koagulation	392
	Ergänzung 9.1 Der Gradient einer Beimengung an einer Kugeloberfläche .	399
9.3	Stratosphärische Aerosole	400
10	Klimaänderungen	407
10.1	Klimaänderungen in der Vergangenheit	408
10.2	Klimamodelle	418
10.2.1	Überblick	418

10.2.2	Zirkulationsmodelle („general circulation models“, GCM) ..	423
10.3	Das Problem des Nachweises anthropogener Klimaänderungen	432
	Literatur- und Quellenhinweise	439
	Sachverzeichnis	451