

551-5  
551.51  
551.510

Walter Roedel

# Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre

Mit 172 Abbildungen

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

**5bi 5**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Strahlung und Energie in dem System Atmosphäre/Erdoberfläche</b>	<b>1</b>
1.1	Ejnige 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
<b>2</b>	<b>Die vertikale Struktur der Atmosphäre</b>	<b>54</b>
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
<b>3</b>	<b>Atmosphärische Dynamik</b> . . . . .	<b>83</b>
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. . . . . Ergänzung 3.2 Die Ableitung der Vorticity-Gleichung aus der allgemeinen Bewegungsgleichung. . . . .	104 108
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. . . . . Ergänzung 3.3 Analytische Lösung der Gleichung der planetaren Grenzschicht. . . . .	114 117
<b>4</b>	<b>Die atmosphärische Zirkulation</b> . . . . .	<b>121</b>
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 Nino/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
<b>5</b>	<b>Niederschlag, Wasserkreislauf, Klimazonen . . . . .</b>	<b>160</b>
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
<b>6</b>	<b>Diffusion und Turbulenz . . . . .</b>	<b>219</b>
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 $K \sim a^{4/3}$ -Beziehung . . . . .	271
6.5	Empirische Bestimmung der Diffusionsparameter . . . . .	274
<b>7</b>	<b>Dynamik der bodennahen Luftschichten; Diffusion und Austausch in Bodennähe . . . . .</b>	<b>280</b>
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
<b>8</b>	<b>Klimarelevante Spurengase</b> . . . . .	<b>336</b>
8.1	Überblick . . . . .	336
8.2	Kohlendioxid . . . . .	339
8.2.1	Übersicht . . . . .	339
8.2.2	Der säkulare CO <sub>2</sub> -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
<b>9</b>	<b>Aerosole</b> . . . . .	<b>369</b>
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
<b>10</b>	<b>Klimaänderungen</b> . . . . .	<b>407</b>
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
	<b>Literatur- und Quellenhinweise . . . . .</b>	<b>439</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>451</b>