

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Strahlung und Energie in dem System</b>	
	<b>Atmosphäre/Erdoberfläche</b>	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	15
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	24
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	54
1.4.1	Die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche	54
1.4.2	Gesamtbilanz des Systems von Atmosphäre und Erdoberfläche	56
1.5	Temperaturen der bodennahen Luft	61
	<b>Literatur</b>	64
<b>2</b>	<b>Die vertikale Struktur der Atmosphäre</b>	67
2.1	Die Druckabnahme mit der Höhe	67
2.2	Das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre	73
2.2.1	Der trockenadiabatische Temperaturgradient und der Begriff der potenziellen Temperatur	74
2.2.2	Der feuchtadiabatische Temperaturgradient	79
2.2.3	Temperaturgradienten in der Nähe der Erdoberfläche	82

2.2.4	Das atmosphärische Temperaturprofil als Ganzes und der damit verbundene „Stockwerkaufbau“ der Atmosphäre .....	85
2.3	Schichtungsstabilität .....	89
2.3.1	Einige qualitative Überlegungen zur Schichtungsstabilität und zur Bildung von Inversionen .....	90
2.3.2	Quantitative Formulierung eines Stabilitätsmaßes, Brunt-Väisälä-Schwingungen und Schwerewellen .....	93
2.3.3	Effekte bei konvektiv-turbulenter Durchmischung und bei kollektiver Hebung und Senkung der Luft .....	96
2.3.4	Feuchtlabilität und Äquivalenttemperatur .....	98
	Literatur .....	100
<b>3</b>	<b>Atmosphärische Dynamik</b> .....	101
3.1	Kräfte in der Atmosphäre und die allgemeine Bewegungsgleichung ..	101
3.1.1	Gradient- und Coriolis-Kraft und der geostrophische Wind .....	102
3.1.2	Bewegung unter dem Einfluss von Reibungskräften .....	107
3.1.3	Der Einfluss der Schwerkraft, das Geopotenzial .....	111
3.1.4	Die allgemeine Bewegungsgleichung .....	113
3.1.5	Die Kontinuitätsgleichung, Konvergenzen und Divergenzen .....	116
3.2	Die Erhaltung der Wirbelstärke („Vorticity“) .....	120
3.2.1	Vorticity und Vorticity-Gleichung .....	120
3.2.2	Potenzielle Vorticity .....	124
3.3	Beschleunigung und Windfelder als Folge horizontaler Temperaturgefälle, barotrope und barokline Schichtung, thermischer Wind .....	131
3.4	Bodenreibung und spezielle Dynamik der bodennahen Luftsichten ..	137
	Literatur .....	143
<b>4</b>	<b>Die atmosphärische Zirkulation</b> .....	145
4.1	Globale Zirkulationsmuster .....	145
4.2	Die Zone der Westwinddrift .....	150
4.2.1	Barotrope und barokline Wellen .....	150
4.2.2	Fronten .....	157
4.2.3	Zyklen und Antizyklen in der Westwinddriftzone .....	162
4.3	Weitere Details der globalen Zirkulation .....	172
4.3.1	Passate, Hadley-Zelle und Subtropenjet .....	172
4.3.2	Zeitliche und räumliche Variationen der Strömungsmuster .....	174
4.3.3	El Niño/Southern Oscillations („ENSO“) .....	181

4.3.4	Einige Charakteristika der stratosphärischen Zirkulation und des Austauschs zwischen Stratosphäre und Troposphäre	187
4.4	Einige Anmerkungen zu kleinräumigen thermischen Zirkulationen	194
	Literatur	196
<b>5</b>	<b>Niederschlag, Wasserkreislauf, Klimazonen</b>	199
5.1	Mikrophysik der Kondensation und der Niederschlagsbildung	199
5.1.1	Die homogene Kondensation	201
5.1.2	Heterogene Kondensation	208
5.1.3	Die weitere Entwicklung des Niederschlags	212
5.2	Der globale Wasserkreislauf, Niederschlags- und Klimazonen	223
5.2.1	Der Kreislauf von Verdunstung und Niederschlag	224
5.2.2	Klimazonen und regionale Verteilung von Niederschlag und Verdunstung	228
5.3	Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch den Niederschlag	235
5.3.1	Auswaschen von Aerosolpartikeln	236
5.3.2	Auswaschen von Gasen durch den Niederschlag	242
5.4	Grundlagen der Hydrometeorologie mit stabilen Isotopen	247
5.4.1	Isotopentrennung bei der Verdunstung	248
5.4.2	Einfache Kondensationsmodelle	253
5.4.3	Stabile Isotope in der Natur	257
	Literatur	262
<b>6</b>	<b>Diffusion und Turbulenz</b>	265
6.1	Molekulare Diffusion	266
6.1.1	Ein- und dreidimensionale Zufallsbewegung als Idealtyp einer Diffusion	267
6.1.2	Diffusive Flüsse skalarer und vektorieller Beimengungen	274
6.1.3	Die Diffusionsgleichung	280
6.2	Grundlagen der Turbulenz	286
6.3	Die Beschreibung der turbulenten Bewegung	290
6.3.1	Energiedichtespektren (power spectra)	291
6.3.2	Autokorrelationen	294
6.3.3	Größenordnung der horizontalen und vertikalen Fluktuationen	298
6.4	Turbulente Diffusion	301
6.4.1	Quadratisch gemittelte Verschiebung und das Theorem von Taylor	302
6.4.2	Das Konzept der korrelierten Fluktuationen als allgemeiner Ansatz für turbulent-diffusive Flüsse und die hieraus folgende Transportgleichung	306
6.4.3	Der Gradientansatz für die turbulente Diffusion	311

6.4.4	Die frei diffundierende Beimengungswolke und die $K \sim \sigma^{4/3}$ -Beziehung . . . . .	319
6.5	Empirische Bestimmung der Diffusionsparameter . . . . .	325
Literatur	330	
<b>7</b>	<b>Dynamik der bodennahen Luftsichten, Diffusion und Austausch in Bodennähe</b> . . . . .	333
7.1	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei neutraler Temperaturschichtung . . . . .	333
7.1.1	Das logarithmische Windprofil . . . . .	334
7.1.2	Der Einfluss wechselnder Bodenreibung . . . . .	341
7.2	Austausch und Dynamik in der Prandtl-Schicht bei thermisch nicht-neutraler Schichtung . . . . .	346
7.2.1	Kenngrößen zur Parametrisierung labilisierender oder stabilisierender Auftriebskräfte . . . . .	346
7.2.2	Zusammenhang zwischen Flüssen und Gradienten . . . . .	354
7.2.3	Der Einfluss von Wasserdampf auf die Stabilität bzw. Labilität . . . . .	359
7.2.4	Freie Konvektion . . . . .	362
7.3	Transport skalarer Beimengungen zur Erdoberfläche hin bzw. von der Erdoberfläche weg, Transferwiderstände und Transfersgeschwindigkeiten . . . . .	365
7.3.1	Transferwiderstand und Transfersgeschwindigkeit . . . . .	366
7.3.2	Bulk-Transferkoeffizienten . . . . .	371
7.3.3	Modelle für den Transferwiderstand und die Transfersgeschwindigkeit skalarer Beimengungen in der laminar-viskosen Unterschicht . . . . .	373
7.3.4	Gasaustausch zwischen Luft und Wasser . . . . .	380
7.3.5	Trockene Deposition von Aerosolpartikeln . . . . .	385
7.4	Einige Anmerkungen zum Anschluss an die Ekman-Schicht und an die äußere Atmosphäre . . . . .	390
Literatur	394	
<b>8</b>	<b>Atmosphärische Spurengase</b> . . . . .	397
8.1	Überblick . . . . .	399
8.1.1	Radikalchemie . . . . .	399
8.1.2	Heterogene Reaktionen . . . . .	401
8.1.3	Reaktionsgeschwindigkeiten und atmosphärische Lebensdauer . . . . .	402
8.2	Wichtige chemische Reaktionszyklen in der Atmosphäre . . . . .	406
8.2.1	Ozon in der Stratosphäre . . . . .	407
8.2.2	Ozonproduktion und -verteilung . . . . .	407
8.2.3	Abbaureaktionen . . . . .	409
8.2.4	Das „Ozonloch“ . . . . .	416
8.2.5	Vulkanische Einflüsse auf die Ozonschicht . . . . .	422
8.2.6	Globale Ozonabnahme . . . . .	424

8.3	Ozonchemie in der Troposphäre	427
8.3.1	Photochemische Smogbildung	429
8.3.2	Oxidationskapazität der Atmosphäre	433
8.4	Kohlendioxid	434
8.4.1	Übersicht	434
8.4.2	Der säkulare CO <sub>2</sub> -Anstieg	440
8.4.3	Kohlendioxid im Ozean	444
8.4.4	Einfluss ozeanischer Karbonatsedimente	450
8.5	Kreisläufe weiterer atmosphärischer Spurengase	452
8.5.1	CH <sub>4</sub> und CO	454
8.5.2	Schwefelverbindungen	457
8.5.3	Stickstoffverbindungen	459
8.5.4	Halogenverbindungen	460
	Literatur	462
<b>9</b>	<b>Aerosole</b>	<b>469</b>
9.1	Entstehung und Lebenslauf atmosphärischer Aerosole	469
9.1.1	Aerosolproduktion: Nukleation und Dispersion	470
9.1.2	Lebenslauf troposphärischer Aerosole und Größenverteilungen	479
9.1.3	Globale Aerosolquellen und Häufigkeit chemischer Elemente	487
9.2	Grundzüge der Aerosoldynamik	492
9.2.1	Reibungskräfte	493
9.2.2	Thermische Diffusion und thermische Koagulation	499
9.3	Stratosphärische Aerosole	509
9.4	Troposphärische Aerosole und atmosphärischer Strahlungshaushalt	517
	Literatur	522
<b>10</b>	<b>Klima und Klimaveränderungen</b>	<b>527</b>
10.1	Klimaänderungen in der Vergangenheit	528
10.1.1	Paläoklima	528
10.1.2	Klima seit der Industrialisierung	537
10.2	Kenngrößen zur Beschreibung des Klimawandels: Klimaantriebe und Klimasensitivität	541
10.2.1	Verschiedene Definitionen für das radiative forcing	545
10.2.2	Übersicht über verschiedene Klimaantriebe	549
10.2.3	Rückkopplungsmechanismen und Klimasensitivität	553
10.2.4	Methoden zur Bestimmung der Klimaempfindlichkeit	561
10.3	Klimamodelle	563
10.3.1	Überblick	563
10.3.2	Zirkulationsmodelle (general circulation models, GCM)	569
10.3.3	Klimaprognosen	576
	Literatur	581
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>587</b>