

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Strahlung und Energie in dem System</b>	
	<b>Atmosphäre/Erdoberfläche</b>	<b>1</b>
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
	Literatur	64
<b>2</b>	<b>Die vertikale Struktur der Atmosphäre</b>	<b>67</b>
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>	<b>101</b>
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 Luftschichten ..	137
	Literatur .....	143
<b>4</b>	<b>Die atmosphärische Zirkulation .....</b>	<b>145</b>
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	Zyklonen und Antizyklonen 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>	<b>199</b>
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>	<b>265</b>
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 Luftschichten, Diffusion und Austausch in Bodennähe</b>	<b>333</b>
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 Transfergeschwindigkeiten	365
7.3.1	Transferwiderstand und Transfergeschwindigkeit	366
7.3.2	Bulk-Transferkoeffizienten	371
7.3.3	Modelle für den Transferwiderstand und die Transfergeschwindigkeit 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>	<b>397</b>
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>