

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	1
1.1 Begriffsbildung und Einteilungsprinzipien	1
1.1.1 Zeitlicher und räumlicher Maßstab	2
1.2 Synoptische Meteorologie	2
1.3 Klimatologie	4
1.3.1 Klimamodelle	6
1.3.2 Klimaszenarien	9
1.4 Physikalische Größen und ihre Maßeinheiten	11
<b>2 Die Erdatmosphäre: Ihre chemische Zusammensetzung, vertikale Struktur und Physik</b>	15
2.1 Zusammensetzung der Erdatmosphäre	16
2.1.1 Atmosphärischer Wasserdampf	19
2.1.2 Atmosphärisches Ozon	20
2.1.2.1 Stratosphärisches Ozon	26
2.1.2.2 Troposphärisches Ozon	40
2.1.3 Stratosphärische Aerosolschicht	42
2.1.4 Wechselwirkung Troposphäre-Stratosphäre	42
2.1.4.1 Mittlere Strömungs- und Austauschverhältnisse	43
2.1.5 Atmosphärisches Kohlendioxid	44
2.1.6 Methan	47
2.1.7 Distickstoffoxid	48
2.2 Der Treibhauseffekt	48
2.2.1 Auswirkungen des Treibhauseffektes	51
2.2.1.1 Troposphärische Erwärmung	55
2.2.1.2 Veränderung der Eisbedeckung und Vergletscherung	56
2.2.1.3 Anstieg des Meeresspiegels	57
2.2.1.4 Änderung des Niederschlagregimes	58
2.2.1.5 Änderung des Windregimes	60
2.2.2 Thermohaline Zirkulation	60
2.2.2.1 Golfstromverlauf und Klimawandel	62
2.2.2.2 Dansgaard-Oeschger-Zyklen	64

---

2.3	Vertikale Struktur der Erdatmosphäre .....	66
2.3.1	Einteilungsprinzip: Vertikaler Temperaturverlauf .....	67
2.3.1.1	Charakteristika der Troposphäre .....	67
2.3.1.2	Charakteristika der Stratosphäre .....	68
2.3.1.3	Charakteristika der Mesosphäre .....	72
2.3.1.4	Charakteristika der Thermosphäre und Exosphäre .....	73
2.3.2	Einteilungsprinzip: Solarer Strahlungsumsatz .....	74
2.3.3	Einteilungsprinzip: Ionisierungsgrad .....	74
2.3.3.1	Polarlichter .....	76
2.3.3.2	Ausbreitung von Funkwellen .....	77
2.4	Die Lufthülle der Erde als thermodynamisches System .....	78
2.4.1	Gesetze für ideale Gase .....	79
2.5	Übungen .....	81
2.6	Lösungen .....	82
3	<b>Thermodynamische Betrachtungen</b> .....	85
3.1	Wärmekapazität .....	86
3.2	Zustandsänderungen .....	87
3.2.1	Potenzielle Temperatur .....	88
3.3	Vertikaler Temperaturgradient .....	91
3.3.1	Stüve-Diagramm .....	97
3.4	Änderungen der Schichtungsstabilität .....	98
3.5	Übungen .....	100
3.6	Lösungen .....	101
4	<b>Meteorologische Größen: Ihre Messung sowie räumliche und zeitliche Variabilität</b> .....	103
4.1	Der Luftdruck .....	103
4.1.1	Hydrostatische Grundgleichung .....	105
4.1.2	Barometrische Höhenformel .....	107
4.1.3	Geopotenzial und Höhenwetterkarte .....	108
4.1.4	Standardatmosphäre .....	109
4.1.5	Luftdruckverteilung auf Meeressniveau .....	113
4.1.5.1	Isobarenformen .....	115
4.1.6	Barische Systeme der freien Atmosphäre .....	117
4.1.7	Globale Druckverteilung auf Meeressniveau .....	117
4.1.8	Zeitliche Variation des Luftdrucks .....	119
4.1.8.1	Die Luftdruckmessung .....	121
4.1.9	Übungen .....	125
4.1.10	Lösungen .....	126
4.2	Die Lufttemperatur .....	127
4.2.1	Der „Wärmezustand“ eines Körpers .....	128
4.2.2	Temperaturskalen .....	128
4.2.2.1	Empirische Skalen .....	129
4.2.2.2	Thermodynamische Temperaturskala .....	129

---

4.2.3	Temperaturmessung .....	129
4.2.3.1	Messprinzipien .....	130
4.2.3.2	Lineare und kubische Ausdehnungskoeffizienten .....	130
4.2.3.3	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes .....	131
4.2.3.4	Temperaturkoeffizient von Halbleiterbauelementen .....	131
4.2.3.5	Kontaktlose Temperaturmessungen .....	134
4.2.4	Basismessverfahren .....	135
4.2.4.1	Flüssigkeitsthermometer .....	135
4.2.4.2	Bimetalle .....	135
4.2.4.3	Thermoelemente .....	135
4.2.4.4	Widerstandsthermometer .....	136
4.2.5	Zeitliche und räumliche Variation der Lufttemperatur .....	136
4.2.6	Wärmetransport durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung .....	138
4.2.6.1	Wärmeleitung .....	139
4.2.6.2	Konvektion .....	140
4.2.6.3	Strahlung .....	141
4.2.7	Temperaturbestimmung in der meteorologischen Praxis .....	141
4.2.7.1	Aßmann'sches Aspirationspsychrometer (Standardgerät) .....	142
4.2.7.2	Schleuderpsychrometer .....	144
4.2.7.3	Maximumthermometer .....	144
4.2.7.4	Minimumthermometer .....	144
4.2.8	Übungen .....	145
4.2.9	Lösungen .....	147
4.3	Die Luftfeuchtigkeit .....	149
4.3.1	Gleichgewichtsformen zwischen Wasser und Wasserdampf .....	149
4.3.2	Wasserdampfdruck bei Sättigung .....	151
4.3.2.1	Relative Feuchte und Taupunkt .....	152
4.3.2.2	Taupunktdifferenz, Kumuluskondensationsniveau .....	152
4.3.3	Wasserdampf als ideales Gas .....	152
4.3.4	Feuchtigkeitsmaße .....	152
4.3.4.1	Absolute Feuchte $a$ .....	153
4.3.4.2	Spezifische Feuchte $s$ .....	153
4.3.4.3	Mischungsverhältnis $m$ .....	154
4.3.4.4	Virtuelle (scheinbare) Temperatur $T_v$ .....	155
4.3.5	Feuchtemessung .....	157
4.3.5.1	Taupunktsspiegel .....	157
4.3.5.2	Haarhygrometer .....	157
4.3.5.3	Psychrometer .....	158

---

4.3.6	Übungen . . . . .	158
4.3.7	Lösungen . . . . .	159
4.4	Meteore, Hydrometeore, Wolken und Nebel . . . . .	161
4.4.1	Wolkenbildung . . . . .	163
4.4.2	Indirekte Aerologie . . . . .	164
4.4.3	Wolkenklassifikationen . . . . .	165
4.4.3.1	Historischer Überblick . . . . .	165
4.4.3.2	Einteilungsprinzipien . . . . .	166
4.4.3.3	Wolkendefinitionen . . . . .	168
4.4.3.4	Besondere Wolken . . . . .	173
4.4.3.5	Wolken in der Wetterbeobachtung . . . . .	177
4.4.4	Nebel . . . . .	177
4.4.4.1	Strahlungsnebel . . . . .	178
4.4.4.2	Advektionsnebel . . . . .	179
4.4.4.3	Mischungsnebel . . . . .	179
4.4.4.4	Feuchter Dunst . . . . .	180
4.4.5	Übungen . . . . .	181
4.4.6	Lösungen . . . . .	182
4.5	Der Wind . . . . .	183
4.5.1	Windbestimmung an Bord . . . . .	186
4.5.2	Charakteristika des Windfeldes . . . . .	187
4.5.3	Änderung des Windes mit der Höhe . . . . .	188
4.5.3.1	Vertikale Windprofile . . . . .	188
4.5.3.2	Der nächtliche Grenzschichtstrahlstrom . . . . .	192
4.5.3.3	Bodennahe Windprofile . . . . .	195
4.5.3.4	Horizontales Windfeld . . . . .	197
4.5.3.5	Böigkeit des Windes . . . . .	198
4.5.3.6	Scherwinde . . . . .	198
4.5.3.7	Tagesgang des Windes . . . . .	199
4.5.4	Windmessung . . . . .	201
4.5.4.1	Bestimmung der Windrichtung . . . . .	201
4.5.4.2	Bestimmung der Windgeschwindigkeit . . . . .	201
4.5.4.3	Staudruckanemometer (Böenmesser) . . . . .	202
4.5.4.4	Hitzdrahtanemometer . . . . .	202
4.5.5	Übungen . . . . .	202
4.5.6	Lösungen . . . . .	203
4.6	Die Strahlung . . . . .	204
4.6.1	Solarstrahlung . . . . .	205
4.6.2	Wärmestrahlung . . . . .	207
4.6.3	Strahlungsgesetze . . . . .	207
4.6.3.1	Planck'sches Strahlungsgesetz . . . . .	208
4.6.3.2	Planck'sches Gesetz in vereinfachter Form . . . . .	209
4.6.3.3	Stefan-Boltzmann-Gesetz . . . . .	210
4.6.3.4	Wien'scher Verschiebungssatz . . . . .	212
4.6.3.5	Lambert'sches Gesetz . . . . .	212
4.6.3.6	Bouguer-Lambert-Beer-Gesetz . . . . .	213

---

4.6.4	Solarkonstante . . . . .	214
4.6.4.1	Räumlich und zeitlich gemittelte Einstrahlung . . . . .	214
4.6.5	Strahlungsmodifikationen . . . . .	215
4.6.5.1	Streuung . . . . .	215
4.6.5.2	Absorption . . . . .	221
4.6.5.3	Reflexion . . . . .	224
4.6.6	Strahlungshaushalt Erde-Atmosphäre . . . . .	225
4.6.7	Wärmeverteilung im Wasser . . . . .	227
4.6.8	Strahlungsmessung . . . . .	228
4.6.8.1	Messung der direkten Sonnenstrahlung . . . . .	229
4.6.8.2	Messung der Globalstrahlung . . . . .	229
4.6.8.3	Effektive Ausstrahlung (langwellige Strahlung) . . . . .	229
4.6.8.4	Strahlungsbilanzmesser . . . . .	230
4.6.9	Übungen . . . . .	230
4.6.10	Lösungen . . . . .	231
4.7	Aerosole und Sichtweite . . . . .	233
4.7.1	Aerosole . . . . .	234
4.7.1.1	Bildung und Abbau von Aerosolen . . . . .	235
4.7.1.2	Verweilzeit in der Atmosphäre . . . . .	237
4.7.1.3	Aerosolquellen . . . . .	238
4.7.1.4	Aerosolkomponenten und ihre Entstehung . . . . .	239
4.7.1.5	Wirkung von Aerosolen auf das Klima . . . . .	245
4.7.2	Meteorologische Sichtweite . . . . .	250
4.7.3	Experimentelle Bestimmung der Sichtweite . . . . .	254
4.7.3.1	Transmissionsmethoden . . . . .	255
4.7.3.2	Streulichtmethoden . . . . .	256
4.7.3.3	Kontrastmethoden . . . . .	257
4.7.3.4	Methoden der digitalen Bildauswertung . . . . .	257
4.7.4	Übungen . . . . .	260
4.7.5	Lösungen . . . . .	261
5	Satelliten als Hilfsmittel der Analyse und Diagnose . . . . .	263
5.1	Satelliten und Satellitensysteme . . . . .	267
5.1.1	Geostationäre Satelliten . . . . .	267
5.1.2	Polumlaufende Satelliten . . . . .	267
5.1.3	Globales System . . . . .	268
5.2	Satellitenbildinformationen . . . . .	269
5.2.1	Bildformate . . . . .	270
5.2.2	Eigenschaften der Bilddaten . . . . .	271
5.2.3	Atmosphärische Fenster und Absorptionsbereiche . . . . .	271
5.2.4	Bilddaten . . . . .	272
5.3	Satellitenprodukte . . . . .	273
5.4	Analyse einer Bodenwetterkarte mittels Satellitenbildern . . . . .	274
5.4.1	Analyse des Tiefdruckgebietes „Franjo“ . . . . .	275
5.4.2	Satellitenbildauswertung . . . . .	276
5.5	Übungen . . . . .	278
5.6	Lösungen . . . . .	279

---

<b>6 Kräfte in einem rotierenden Bezugssystem</b> .....	281
6.1 Die Gradientkraft .....	281
6.1.1 Vertikalkomponente der Gradientkraft .....	282
6.1.2 Horizontalkomponente der Gradientkraft .....	283
6.2 Die Schwerkraft .....	284
6.3 Die Reibungskraft .....	285
6.4 Die Zentrifugal- und Corioliskraft .....	285
6.4.1 Unterschiedliche Koordinatensysteme .....	286
6.4.2 Zentrifugal- und Coriolisbeschleunigung .....	286
6.4.3 Coriolisparameter .....	288
6.5 Übungen .....	290
6.6 Lösungen .....	291
<b>7 Horizontale Bewegungsgleichungen</b> .....	295
7.1 Der geostrophische Wind .....	296
7.2 Der Gradientwind .....	297
7.3 Der zyklostrophische Wind .....	299
7.4 Trägheitsströmungen .....	299
7.5 Der Bodenwind .....	300
7.6 Übungen .....	302
7.7 Lösungen .....	304
<b>8 Eigenschaften von Geschwindigkeitsfeldern</b> .....	305
8.1 Konvergenz und Divergenz .....	305
8.1.1 Horizontaldivergenz als Skalarprodukt .....	307
8.1.2 Horizontaldivergenz in natürlichen Koordinaten .....	307
8.2 Krümmungs- und Scherungsvorticity .....	308
8.2.1 Krümmungs- und Scherungsvorticity in natürlichen Koordinaten .....	309
8.3 Zirkulation .....	310
8.4 Kontinuitätsgleichung .....	311
8.5 Übungen .....	312
8.6 Lösungen .....	313
<b>9 Luftmassen und Wetterlagen</b> .....	315
9.1 Luftmassenklassifikation nach Scherhag .....	316
9.1.1 Charakterisierung von Luftmassen .....	318
9.1.1.1 Kontinentale arktische Polarluft ( $cP_A$ ) und kontinentale Polarluft ( $cP$ ) .....	318
9.1.1.2 Maritime arktische Polarluft ( $mP_A$ ) und maritime Polarluft ( $mP$ ) .....	320
9.1.1.3 Gealterte maritime Polarluft ( $mP_T$ ) und gealterte kontinentale Polarluft ( $cP_T$ ) .....	322
9.1.1.4 Maritime Tropikluft ( $mT$ ) und kontinentale Tropikluft ( $cT$ ) .....	323
9.1.1.5 Gemäßigte maritime Tropikluft ( $mT_p$ ) .....	325

---

9.1.1.6	Gemäßigte kontinentale Tropikluft ( $cT_p$ ) . . . . .	326
9.1.1.7	Afrikanische Tropikluft ( $cT_s$ ) . . . . .	326
9.1.1.8	Mittelmeertropikluft ( $mT_s$ ) . . . . .	327
9.1.2	Modifikation von Luftmassen . . . . .	327
9.1.3	Wetterlagen . . . . .	330
<b>10</b>	<b>Die Tiefdruckgebiete der gemäßigtten Breiten</b> . . . . .	333
10.1	Polarfrontzyklonen . . . . .	333
10.1.1	Lebenszyklus einer Zyklone – Polarfronttheorie . . . . .	335
10.1.1.1	Entwicklungsbeginn . . . . .	336
10.1.1.2	Bodendruckfall und Wellenbildung . . . . .	336
10.1.1.3	Idealzyklone . . . . .	337
10.1.1.4	Okklusionsprozess . . . . .	337
10.1.1.5	Bodenrog . . . . .	338
10.1.1.6	Kompensationseffekt . . . . .	338
10.1.1.7	Allgemeine Regeln für die Verlagerung von Zyklonen . . . . .	339
10.1.2	Fronten . . . . .	339
10.1.3	Frontmodelle . . . . .	341
10.1.3.1	Warmfronten . . . . .	342
10.1.3.2	Kaltfronten . . . . .	344
10.2	Konvektionszyklone . . . . .	348
10.3	Leezyklogenese . . . . .	350
10.3.1	Theoretische Erklärung . . . . .	352
10.3.2	Ablaufschema . . . . .	353
10.3.3	Zyklogenese . . . . .	354
10.4	Polare Mesozyklone ( <i>Polar Low</i> ) . . . . .	354
10.4.1	Empirische Untersuchungsergebnisse . . . . .	355
10.4.2	Verlagerungsregeln . . . . .	355
10.4.3	Polar Lows in der Norwegischen See und vor der Küste Norwegens . . . . .	355
10.4.4	Wettercharakteristika . . . . .	356
10.5	Übungen . . . . .	356
10.6	Lösungen . . . . .	357
<b>11</b>	<b>Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre</b> . . . . .	359
11.1	Strahlungsbilanz des Systems Erde-Atmosphäre . . . . .	359
11.1.1	Modellzirkulation nach Hadley . . . . .	360
11.1.2	Modifikationen der Hadley-Zirkulation . . . . .	361
11.1.3	Vertikale Zirkulationsräder . . . . .	361
11.1.4	Meridionale Energietransporte . . . . .	363
11.1.5	Zusammenfassung der Energiebilanzbetrachtungen . . . . .	364
11.2	Dynamische Betrachtungen . . . . .	365
11.2.1	Subtropische Hochdruckgebiete . . . . .	366
11.2.2	Tropische Zirkulation . . . . .	367
11.2.3	ITCZ und ihre Besonderheiten . . . . .	367
11.2.4	Monsuntief über Indien . . . . .	370

---

11.3	Die außertropische Zirkulation . . . . .	370
11.4	Zusammenfassung der dynamischen Betrachtungen . . . . .	370
11.5	Die Monsunzirkulation . . . . .	370
11.5.1	Monsune im Indischen Ozean . . . . .	371
11.5.1.1	Monsunkriterien . . . . .	371
11.5.1.2	Asiatisch-afrikanischer Monsunbereich . . . . .	372
11.5.1.3	Monsune über dem Indik . . . . .	373
11.6	ENSO (El Niño Southern Oscillation) . . . . .	377
11.6.1	La Niña . . . . .	380
11.6.2	El Niño . . . . .	381
11.6.3	ENSO Index (MEI) . . . . .	382
11.7	Nordatlantische Oszillation (NAO) . . . . .	383
11.8	Fernwirkungen . . . . .	384
11.8.1	Arktische Oszillation (AO) . . . . .	385
11.8.2	Nordpazifische Oszillation (NPO) . . . . .	386
11.8.3	Pazifische dekadische Oszillation (PDO) . . . . .	387
11.9	Übungen . . . . .	388
11.10	Lösungen . . . . .	389
12	<b>Konvektive Ereignisse und Systeme</b> . . . . .	391
12.1	Hochreichende Konvektion . . . . .	393
12.1.1	Klassifikation von Gewittern . . . . .	395
12.1.1.1	Einzellige Gewitter . . . . .	397
12.1.1.2	Mehrzellige Gewitter . . . . .	399
12.1.1.3	Mesoskalige konvektive Komplexe . . . . .	399
12.1.1.4	Superzellen . . . . .	401
12.2	Verlagerung von Gewittern . . . . .	403
12.3	Gewittertypen . . . . .	403
12.3.1	Luftmasseneigene Gewitter . . . . .	404
12.3.2	Frontgewitter . . . . .	404
12.3.3	Höheninduzierte Gewitter . . . . .	405
12.4	Gewitter als luftelektrische Erscheinungen . . . . .	405
12.4.1	Gewitterstatistik . . . . .	407
12.4.2	Elektrische Struktur von Gewitterwolken . . . . .	408
12.4.2.1	Dipolmodell . . . . .	409
12.4.2.2	Tripolmodell . . . . .	410
12.4.3	Gewitterblitze . . . . .	411
12.4.3.1	Blitzarten . . . . .	412
12.4.3.2	Blitzentladung . . . . .	412
12.4.3.3	Typen von Blitzentladungen . . . . .	415
12.4.3.4	Maßnahmen zum Blitzschutz . . . . .	419
12.5	Gewitter mit Tornadobildung . . . . .	421
12.5.1	Meteorologische Bedingungen . . . . .	423
12.5.2	Tornadoentwicklung . . . . .	424
12.5.3	Tornadoskalen . . . . .	424
12.5.4	Tornadostatistik . . . . .	424
12.6	Kleintromben . . . . .	428

---

<b>13 Tropische Wirbelstürme</b> .....	429
13.1 Wetersysteme in den Tropen .....	431
13.2 Empirische Befunde .....	435
13.3 Räumliche und zeitliche Verteilung .....	439
13.4 Struktur einer tropischen Zyklone .....	442
13.5 Skalen zur Intensitätsbestimmung .....	444
13.6 Wirbelstürme über dem Nordatlantik .....	446
13.7 Meteorologische Navigationshilfen .....	449
13.7.1 Berechnung der maximalen Windgeschwindigkeiten ..	450
13.7.2 Orkanverlagerung .....	450
13.7.3 Seegang und Dünung .....	452
13.7.4 Drucktendenzen .....	452
13.7.5 Nautische Hinweise .....	453
13.7.6 Entfernung vom Zentrum .....	453
13.7.7 Verlagerungsregeln .....	453
13.7.8 Wetterrouting .....	455
13.8 Grafisches Plottverfahren .....	457
13.8.1 Vorgehensweise und Wettersituation .....	457
13.8.2 Bestimmung des Ausweichkurses .....	458
13.9 Die 40°- Methode .....	459
13.10 Verfahren des <i>National Hurricce Center Miami</i> .....	461
<b>14 Farbtafeln</b> .....	463
<b>Anhang</b> .....	479
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	489
<b>Sachverzeichnis</b> .....	503