
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	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
2	Die Erdatmosphäre: Ihre chemische Zusammensetzung, vertikale Struktur und Physik	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	38
2.1.3	Stratosphärische Aerosolschicht	41
2.1.4	Wechselwirkung Troposphäre-Stratosphäre	42
2.1.4.1	Mittlere Strömungs- und Austauschverhältnisse	42
2.1.5	Atmosphärisches Kohlendioxid	44
2.1.6	Methan	46
2.1.7	Distickstoffoxid	47
2.2	Der Treibhauseffekt	48
2.2.1	Auswirkungen des Treibhauseffektes	50
2.2.1.1	Troposphärische Erwärmung	53
2.2.1.2	Veränderung der Eisbedeckung und Vergletscherung	53
2.2.1.3	Anstieg des Meeresspiegels	55
2.2.1.4	Änderung des Niederschlagsregimes	57
2.2.1.5	Änderung des Windregimes	58
2.2.2	Thermohaline Zirkulation	58
2.2.2.1	Golfstromverlauf und Klimawandel	60
2.2.2.2	Dansgaard-Oeschger-Zyklen	62

2.3	Vertikale Struktur der Erdatmosphäre	64
2.3.1	Einteilungsprinzip: Vertikaler Temperaturverlauf	65
2.3.1.1	Charakteristika der Troposphäre	65
2.3.1.2	Charakteristika der Stratosphäre	66
2.3.1.3	Charakteristika der Mesosphäre	70
2.3.1.4	Charakteristika der Thermosphäre und Exosphäre	71
2.3.2	Einteilungsprinzip: Solarer Strahlungsumsatz	72
2.3.3	Einteilungsprinzip: Ionisierungsgrad	72
2.3.3.1	Polarlichter	73
2.3.3.2	Ausbreitung von Funkwellen	75
2.4	Die Lufthülle der Erde als thermodynamisches System	76
2.4.1	Gesetze für ideale Gase	76
2.5	Übungen	78
2.6	Lösungen	79
3	Thermodynamische Betrachtungen	83
3.1	Wärmekapazität	84
3.2	Zustandsänderungen	85
3.2.1	Potenzielle Temperatur	86
3.3	Vertikaler Temperaturgradient	89
3.3.1	Stüve-Diagramm	95
3.4	Änderungen der Schichtungsstabilität	96
3.5	Übungen	98
3.6	Lösungen	99
4	Meteorologische Größen: Ihre Messung sowie räumliche und zeitliche Variabilität	101
4.1	Der Luftdruck	101
4.1.1	Hydrostatische Grundgleichung	103
4.1.2	Barometrische Höhenformel	105
4.1.3	Geopotenzial und Höhenwetterkarte	106
4.1.4	Standardatmosphäre	107
4.1.5	Luftdruckverteilung auf Meeresniveau	111
4.1.5.1	Isobarenformen	113
4.1.6	Barische Systeme der freien Atmosphäre	115
4.1.7	Globale Druckverteilung auf Meeresniveau	115
4.1.8	Zeitliche Variation des Luftdrucks	117
4.1.8.1	Die Luftdruckmessung	119
4.1.9	Übungen	123
4.1.10	Lösungen	124
4.2	Die Lufttemperatur	125
4.2.1	Der „Wärmezustand“ eines Körpers	126
4.2.2	Temperaturskalen	126
4.2.2.1	Empirische Skalen	127
4.2.2.2	Thermodynamische Temperaturskala	127

4.2.3	Temperaturmessung	127
4.2.3.1	Messprinzipien	128
4.2.3.2	Lineare und kubische Ausdehnungskoeffizienten	128
4.2.3.3	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes	129
4.2.3.4	Temperaturkoeffizient von Halbleiterbauelementen	129
4.2.3.5	Kontaktlose Temperaturmessungen	132
4.2.4	Basismessverfahren	133
4.2.4.1	Flüssigkeitsthermometer	133
4.2.4.2	Bimetalle	133
4.2.4.3	Thermoelemente	133
4.2.4.4	Widerstandsthermometer	134
4.2.5	Zeitliche und räumliche Variation der Lufttemperatur	134
4.2.6	Wärmetransport durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung	136
4.2.6.1	Wärmeleitung	137
4.2.6.2	Konvektion	138
4.2.6.3	Strahlung	139
4.2.7	Temperaturbestimmung in der meteorologischen Praxis	139
4.2.7.1	Abmann'sches Aspirationspsychrometer (Standardgerät)	139
4.2.7.2	Schleuderpsychrometer	142
4.2.7.3	Maximumthermometer	142
4.2.7.4	Minimumthermometer	142
4.2.8	Übungen	143
4.2.9	Lösungen	145
4.3	Die Luftfeuchtigkeit	147
4.3.1	Gleichgewichtsformen zwischen Wasser und Wasserdampf	147
4.3.2	Wasserdampfdruck bei Sättigung	149
4.3.2.1	Relative Feuchte und Taupunkt	150
4.3.2.2	Taupunktsdifferenz, Kumuluskondensationsniveau	150
4.3.3	Wasserdampf als ideales Gas	150
4.3.4	Feuchtigkeitsmaße	150
4.3.4.1	Absolute Feuchte a	151
4.3.4.2	Spezifische Feuchte s	151
4.3.4.3	Mischungsverhältnis m	152
4.3.4.4	Virtuelle (scheinbare) Temperatur T_v	153
4.3.5	Feuchtemessung	155
4.3.5.1	Taupunktsspiegel	155
4.3.5.2	Haarhygrometer	155
4.3.5.3	Psychrometer	156

4.3.6	Übungen	156
4.3.7	Lösungen	157
4.4	Meteore, Hydrometeore, Wolken und Nebel	159
4.4.1	Wolkenbildung	161
4.4.2	Indirekte Aerologie	162
4.4.3	Wolkenklassifikationen	163
4.4.3.1	Historischer Überblick	163
4.4.3.2	Einteilungsprinzipien	164
4.4.3.3	Wolkendefinitionen	166
4.4.3.4	Besondere Wolken	171
4.4.3.5	Wolken in der Wetterbeobachtung	175
4.4.4	Nebel	175
4.4.4.1	Strahlungsnebel	176
4.4.4.2	Advektionsnebel	177
4.4.4.3	Mischungsnebel	177
4.4.4.4	Feuchter Dunst	178
4.4.5	Übungen	179
4.4.6	Lösungen	180
4.5	Der Wind	181
4.5.1	Windbestimmung an Bord	184
4.5.2	Charakteristika des Windfeldes	185
4.5.3	Änderung des Windes mit der Höhe	186
4.5.3.1	Vertikale Windprofile	186
4.5.3.2	Der nächtliche Grenzschichtstrahlstrom	190
4.5.3.3	Bodennahe Windprofile	193
4.5.3.4	Horizontales Windfeld	195
4.5.3.5	Böigkeit des Windes	196
4.5.3.6	Scherwinde	197
4.5.3.7	Tagesgang des Windes	197
4.5.4	Windmessung	198
4.5.4.1	Bestimmung der Windrichtung	198
4.5.4.2	Bestimmung der Windgeschwindigkeit	199
4.5.4.3	Staudruckanemometer (Böenmesser)	200
4.5.4.4	Hitzdrahtanemometer	200
4.5.5	Übungen	200
4.5.6	Lösungen	201
4.6	Die Strahlung	202
4.6.1	Solarstrahlung	203
4.6.2	Wärmestrahlung	205
4.6.3	Strahlungsgesetze	205
4.6.3.1	Planck'sches Strahlungsgesetz	206
4.6.3.2	Planck'sches Gesetz in vereinfachter Form	207
4.6.3.3	Stefan-Boltzmann-Gesetz	208
4.6.3.4	Wien'scher Verschiebungssatz	210
4.6.3.5	Lambert'sches Gesetz	210
4.6.3.6	Bouguer-Lambert-Beer-Gesetz	211

4.6.4	Solarkonstante	212
4.6.4.1	Räumlich und zeitlich gemittelte Einstrahlung	212
4.6.5	Strahlungsmodifikationen	213
4.6.5.1	Streuung	213
4.6.5.2	Absorption	219
4.6.5.3	Reflexion	222
4.6.6	Strahlungshaushalt Erde-Atmosphäre	223
4.6.7	Wärmeverteilung im Wasser	225
4.6.8	Strahlungsmessung	226
4.6.8.1	Messung der direkten Sonnenstrahlung	227
4.6.8.2	Messung der Globalstrahlung	227
4.6.8.3	Effektive Ausstrahlung (langwellige Strahlung)	227
4.6.8.4	Strahlungsbilanzmesser	228
4.6.9	Übungen	228
4.6.10	Lösungen	229
4.7	Aerosole und Sichtweite	231
4.7.1	Aerosole	232
4.7.1.1	Bildung und Abbau von Aerosolen	232
4.7.1.2	Verweilzeit in der Atmosphäre	234
4.7.1.3	Aerosolquellen	236
4.7.1.4	Aerosolkomponenten und ihre Entstehung	237
4.7.1.5	Wirkung von Aerosolen auf das Klima	243
4.7.2	Meteorologische Sichtweite	248
4.7.3	Experimentelle Bestimmung der Sichtweite	252
4.7.3.1	Transmissionsmethoden	253
4.7.3.2	Streulichtmethoden	254
4.7.3.3	Kontrastmethoden	255
4.7.3.4	Methoden der digitalen Bildauswertung	255
4.7.4	Übungen	258
4.7.5	Lösungen	259
5	Satelliten als Hilfsmittel der Analyse und Diagnose	261
5.1	Satelliten und Satellitensysteme	265
5.1.1	Geostationäre Satelliten	265
5.1.2	Polumlaufende Satelliten	265
5.1.3	Globales System	266
5.2	Satellitenbildinformationen	267
5.2.1	Bildformate	268
5.2.2	Eigenschaften der Bilddaten	269
5.2.3	Atmosphärische Fenster und Absorptionsbereiche	269
5.2.4	Bilddaten	270
5.3	Satellitenprodukte	271
5.4	Analyse einer Bodenwetterkarte mittels Satellitenbildern	272
5.4.1	Analyse des Tiefdruckgebietes „Franjo“	273
5.4.2	Satellitenbildauswertung	274

5.5	Übungen	276
5.6	Lösungen	277
6	Kräfte in einem rotierenden Bezugssystem	279
6.1	Die Gradientkraft	279
6.1.1	Vertikalkomponente der Gradientkraft	280
6.1.2	Horizontalkomponente der Gradientkraft	281
6.2	Die Schwerkraft	282
6.3	Die Reibungskraft	283
6.4	Die Zentrifugal- und Corioliskraft	283
6.4.1	Unterschiedliche Koordinatensysteme	284
6.4.2	Zentrifugal- und Coriolisbeschleunigung	284
6.4.3	Coriolisparameter	286
6.5	Übungen	288
6.6	Lösungen	289
7	Horizontale Bewegungsgleichungen	293
7.1	Der geostrophische Wind	294
7.2	Der Gradientwind	295
7.3	Der zyklotropische Wind	297
7.4	Trägheitsströmungen	297
7.5	Der Bodenwind	298
7.6	Übungen	300
7.7	Lösungen	302
8	Eigenschaften von Geschwindigkeitsfeldern	303
8.1	Konvergenz und Divergenz	303
8.1.1	Horizontaldivergenz als Skalarprodukt	305
8.1.2	Horizontaldivergenz in natürlichen Koordinaten	305
8.2	Krümmungs- und Scherungsvorticity	306
8.2.1	Krümmungs- und Scherungsvorticity in natürlichen Koordinaten	307
8.3	Zirkulation	308
8.4	Kontinuitätsgleichung	309
8.5	Übungen	310
8.6	Lösungen	311
9	Luftmassen und Wetterlagen	313
9.1	Luftmassenklassifikation nach Scherhag	314
9.1.1	Charakterisierung von Luftmassen	316
9.1.1.1	Kontinentale arktische Polarluft (cP_A) und kontinentale Polarluft (cP)	316
9.1.1.2	Maritime arktische Polarluft (mP_A) und maritime Polarluft (mP)	319
9.1.1.3	Gealterte maritime Polarluft (mP_T) und gealterte kontinentale Polarluft (cP_T)	320

9.1.1.4	Maritime Tropikluft (mT) und kontinentale Tropikluft (cT)	321
9.1.1.5	Gemäßigte maritime Tropikluft (mT _p)	324
9.1.1.6	Gemäßigte kontinentale Tropikluft (cT _p)	325
9.1.1.7	Afrikanische Tropikluft (cT _s)	325
9.1.1.8	Mittelmeertropikluft (mT _s)	325
9.1.2	Modifikation von Luftmassen	325
9.1.3	Wetterlagen	328
10	Die Tiefdruckgebiete der gemäßigten Breiten	331
10.1	Polarfrontzyklonen	331
10.1.1	Lebenszyklus einer Zyklone – Polarfronttheorie	333
10.1.1.1	Entwicklungsbeginn	334
10.1.1.2	Bodendruckfall und Wellenbildung	334
10.1.1.3	Idealzyklone	335
10.1.1.4	Okklusionsprozess	335
10.1.1.5	Bodentrog	336
10.1.1.6	Kompensationseffekt	336
10.1.1.7	Allgemeine Regeln für die Verlagerung von Zyklonen	337
10.1.2	Fronten	337
10.1.3	Frontmodelle	339
10.1.3.1	Warmfronten	340
10.1.3.2	Kaltfronten	342
10.2	Konvektionszyklone	346
10.3	Leezyklogenese	348
10.3.1	Theoretische Erklärung	350
10.3.2	Ablaufschema	351
10.3.3	Zyklogenese	352
10.4	Polare Mesozyklone (Polar Low)	352
10.4.1	Empirische Untersuchungsergebnisse	353
10.4.2	Verlagerungsregeln	353
10.4.3	Polar Lows in der Norwegischen See und vor der Küste Norwegens	353
10.4.4	Wettercharakteristika	354
10.5	Übungen	354
10.6	Lösungen	355
11	Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre	357
11.1	Strahlungsbilanz des Systems Erde-Atmosphäre	357
11.1.1	Modellzirkulation nach Hadley	358
11.1.2	Modifikationen der Hadley-Zirkulation	359
11.1.3	Vertikale Zirkulationsräder	359
11.1.4	Meridionale Energietransporte	361
11.1.5	Zusammenfassung der Energiebilanzbetrachtungen	362

11.2	Dynamische Betrachtungen	363
11.2.1	Subtropische Hochdruckgebiete	364
11.2.2	Tropische Zirkulation	365
11.2.3	ITCZ und ihre Besonderheiten	365
11.2.4	Monsuntief über Indien	368
11.3	Die außertropische Zirkulation	368
11.4	Zusammenfassung der dynamischen Betrachtungen	368
11.5	Die Monsunzirkulation	368
11.5.1	Monsune im Indischen Ozean	369
11.5.1.1	Monsunkriterien	369
11.5.1.2	Asiatisch-afrikanischer Monsunbereich	370
11.5.1.3	Monsune über dem Indik	371
11.6	ENSO (El Niño Southern Oscillation)	374
11.6.1	La Niña	377
11.6.2	El Niño	378
11.6.3	ENSO Index (MEI)	380
11.7	Nordatlantische Oszillation (NAO)	380
11.8	Fernwirkungen	383
11.8.1	Arktische Oszillation (AO)	383
11.8.2	Nordpazifische Oszillation (NPO)	384
11.8.3	Pazifische dekadische Oszillation (PDO)	385
11.9	Übungen	386
11.10	Lösungen	387
12	Konvektive Ereignisse und Systeme	389
12.1	Hochreichende Konvektion	390
12.1.1	Klassifikation von Gewittern	392
12.1.1.1	Einzellige Gewitter	395
12.1.1.2	Mehrzellige Gewitter	397
12.1.1.3	Mesoskalige konvektive Komplexe	397
12.1.1.4	Superzellen	398
12.2	Verlagerung von Gewittern	401
12.3	Gewittertypen	401
12.3.1	Luftmasseneigene Gewitter	402
12.3.2	Frontgewitter	402
12.3.3	Höheninduzierte Gewitter	403
12.4	Gewitter als luftelektrische Erscheinungen	403
12.4.1	Gewitterstatistik	404
12.4.2	Elektrische Struktur von Gewitterwolken	406
12.4.2.1	Dipolmodell	406
12.4.2.2	Tripolmodell	407
12.4.3	Gewitterblitze	409
12.4.3.1	Blitzarten	409
12.4.3.2	Blitzentladung	411

12.4.3.3	Typen von Blitzentladungen	413
12.4.3.4	Maßnahmen zum Blitzschutz	415
12.5	Gewitter mit Tornadobildung	419
12.5.1	Meteorologische Bedingungen	421
12.5.2	Tornadoentwicklung	422
12.5.3	Tornadoskalen	422
12.5.4	Tornadostatistik	422
12.6	Kleintromben	425
13	Tropische Wirbelstürme	427
13.1	Wettersysteme in den Tropen	429
13.2	Empirische Befunde	433
13.3	Räumliche und zeitliche Verteilung	437
13.4	Struktur einer tropischen Zyklone	440
13.5	Skalen zur Intensitätsbestimmung	442
13.6	Wirbelstürme über dem Nordatlantik	444
13.7	Meteorologische Navigationshilfen	448
13.7.1	Berechnung der maximalen Windgeschwindigkeiten ...	448
13.7.2	Orkanverlagerung	449
13.7.3	Seegang und Dünung	449
13.7.4	Drucktendenzen	450
13.7.5	Nautische Hinweise	450
13.7.6	Entfernung vom Zentrum	451
13.7.7	Verlagerungsregeln	452
13.7.8	Wetterrouting	453
13.8	Grafisches Plottverfahren	455
13.8.1	Vorgehensweise und Wettersituation	455
13.8.2	Bestimmung des Ausweichkurses	456
13.9	Die 40°- Methode	458
13.10	Verfahren des <i>National Hurricane Center Miami</i>	459
14	Farbtafeln	463
Anhang		479
Quellenverzeichnis		489
Sachverzeichnis		503

Meteorologie

Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der
Atmosphäre

Klose, B.

2016, XIX, 524 S., Softcover

ISBN: 978-3-662-43621-9