
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	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 Niederschlagsregimes	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	Thermodynamische Betrachtungen	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	Meteorologische Größen: Ihre Messung sowie räumliche und zeitliche Variabilität	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 Meeresniveau	113
4.1.5.1	Isobarenformen	115
4.1.6	Barische Systeme der freien Atmosphäre	117
4.1.7	Globale Druckverteilung auf Meeresniveau	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	Abmann'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

6 Kräfte in einem rotierenden Bezugssystem	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
7 Horizontale Bewegungsgleichungen	295
7.1 Der geostrophische Wind	296
7.2 Der Gradientwind	297
7.3 Der zyklotropische Wind	299
7.4 Trägheitsströmungen	299
7.5 Der Bodenwind	300
7.6 Übungen	302
7.7 Lösungen	304
8 Eigenschaften von Geschwindigkeitsfeldern	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
9 Luftmassen und Wetterlagen	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
10	Die Tiefdruckgebiete der gemäßigten Breiten	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	Bodentrog	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
11	Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre	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	Konvektive Ereignisse und Systeme	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

13 Tropische Wirbelstürme	429
13.1 Wettersysteme 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 Hurricane Center Miami</i>	461
14 Farbtafeln	463
Anhang	479
Quellenverzeichnis	489
Sachverzeichnis	503