

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                         |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                                                       | <b>1</b>  |
| 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</b> | <b>Die Erdatmosphäre: Ihre chemische Zusammensetzung, vertikale Struktur und Physik</b> | <b>15</b> |
| 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<br>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         |
| <b>3</b> | <b>Thermodynamische Betrachtungen .....</b>                                                      | <b>83</b>  |
| 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         |
| <b>4</b> | <b>Meteorologische Größen: Ihre Messung sowie räumliche<br/>und zeitliche Variabilität .....</b> | <b>101</b> |
| 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<br>Ausdehnungskoeffizienten               | 128 |
| 4.2.3.3 | Temperaturkoeffizient des elektrischen<br>Widerstandes         | 129 |
| 4.2.3.4 | Temperaturkoeffizient von<br>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<br>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<br>(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<br>und Wasserdampf        | 147 |
| 4.3.2   | Wasserdampfdruck bei Sättigung                                 | 149 |
| 4.3.2.1 | Relative Feuchte und Taupunkt                                  | 150 |
| 4.3.2.2 | Taupunktsdifferenz,<br>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        |
| <b>5</b> | <b>Satelliten als Hilfsmittel der Analyse und Diagnose .....</b> | <b>261</b> |
| 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        |
| <b>6</b> | <b>Kräfte in einem rotierenden Bezugssystem .....</b>                                         | <b>279</b> |
| 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        |
| <b>7</b> | <b>Horizontale Bewegungsgleichungen .....</b>                                                 | <b>293</b> |
| 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        |
| <b>8</b> | <b>Eigenschaften von Geschwindigkeitsfeldern .....</b>                                        | <b>303</b> |
| 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        |
| <b>9</b> | <b>Luftmassen und Wetterlagen .....</b>                                                       | <b>313</b> |
| 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 <sub>p</sub> ) .....               | 324        |
| 9.1.1.6   | Gemäßigte kontinentale Tropikluft (cT <sub>p</sub> ) .....           | 325        |
| 9.1.1.7   | Afrikanische Tropikluft (cT <sub>s</sub> ) .....                     | 325        |
| 9.1.1.8   | Mittelmeertropikluft (mT <sub>s</sub> ) .....                        | 325        |
| 9.1.2     | Modifikation von Luftmassen .....                                    | 325        |
| 9.1.3     | Wetterlagen .....                                                    | 328        |
| <b>10</b> | <b>Die Tiefdruckgebiete der gemäßigten Breiten .....</b>             | <b>331</b> |
| 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 ( <i>Polar Low</i> ) .....                        | 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        |
| <b>11</b> | <b>Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre .....</b>                   | <b>357</b> |
| 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        |
| <b>12</b> | <b>Konvektive Ereignisse und Systeme</b>      | <b>389</b> |
| 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        |
| <b>13</b>                       | <b>Tropische Wirbelstürme .....</b>                        | <b>427</b> |
| 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        |
| <b>14</b>                       | <b>Farbtafeln .....</b>                                    | <b>463</b> |
| <b>Anhang</b> .....             |                                                            | <b>479</b> |
| <b>Quellenverzeichnis</b> ..... |                                                            | <b>489</b> |
| <b>Sachverzeichnis</b> .....    |                                                            | <b>503</b> |