

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Historische Entwicklung der Meteorologie . . . . .         | 2         |
| 1.2      | Raumzeitliche Skalen atmosphärischer Phänomene . . . . .   | 3         |
| 1.3      | Das Vorhersageproblem . . . . .                            | 5         |
| <b>2</b> | <b>Wetterbeobachtungen</b>                                 | <b>11</b> |
| 2.1      | Messmethoden . . . . .                                     | 12        |
| 2.2      | Wolken, Klassifikation und Eigenschaften . . . . .         | 14        |
| 2.3      | Radarmeteorologie . . . . .                                | 18        |
| 2.4      | Satellitenmeteorologie . . . . .                           | 24        |
| 2.4.1    | Die Kanäle im solaren Spektralbereich . . . . .            | 26        |
| 2.4.2    | Die Kanäle im terrestrischen Spektralbereich . . . . .     | 28        |
| 2.4.3    | Beispiel für die Interpretation von Satellitenbildern      | 31        |
| 2.5      | Datenassimilation, numerische Wettervorhersage . . . . .   | 36        |
| <b>3</b> | <b>Mathematische Beschreibung atmosphärischer Prozesse</b> | <b>41</b> |
| 3.1      | Skalare und Vektoren . . . . .                             | 41        |
| 3.2      | Differentialoperatoren . . . . .                           | 44        |
| 3.3      | Bilanzgleichungen . . . . .                                | 45        |
| 3.4      | Koordinatensysteme . . . . .                               | 46        |
| 3.4.1    | Das geographische Koordinatensystem . . . . .              | 46        |
| 3.4.2    | Das natürliche Koordinatensystem . . . . .                 | 47        |
| 3.4.3    | Das thermische Koordinatensystem . . . . .                 | 50        |
| 3.4.4    | Die generalisierte Vertikalkoordinate . . . . .            | 50        |
| 3.4.5    | Die Tangentialebene . . . . .                              | 52        |
| 3.5      | Das prognostische Gleichungssystem . . . . .               | 52        |
| 3.5.1    | Die thermo-hydrodynamischen Zustandsvariablen              | 53        |
| 3.5.2    | Die Wärmegleichung . . . . .                               | 54        |
| 3.5.3    | Die Kontinuitätsgleichungen . . . . .                      | 56        |
| 3.5.4    | Die Bewegungsgleichung . . . . .                           | 58        |
| 3.6      | Die Skalenanalyse . . . . .                                | 60        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4 Grundlagen der Dynamik und Thermodynamik</b>                             | <b>65</b>  |
| 4.1 Hydrostatische Instabilität . . . . .                                     | 66         |
| 4.2 Barotropie und Baroklinität . . . . .                                     | 70         |
| 4.3 Horizontale Gleichgewichtswinde . . . . .                                 | 74         |
| 4.3.1 Der geostrophische Wind . . . . .                                       | 75         |
| 4.3.2 Der Gradientwind . . . . .  | 77         |
| 4.3.3 Der Reibungswind . . . . .  | 78         |
| 4.3.4 Der zyklostrophische und der antitriptische Wind                        | 80         |
| 4.4 Der thermische Wind . . . . .   | 81         |
| 4.5 Schichtungsstabilität und Temperaturadvektion . . . . .                   | 83         |
| 4.6 Der ageostrophische Wind . . . . .  | 85         |
| 4.6.1 Approximationsformen der horizontalen Bewe-<br>gungsgleichung . . . . . | 86         |
| 4.6.2 Der ageostrophische Wind bei horizontaler Bewe-<br>gung . . . . .       | 89         |
| 4.6.3 Der Einfluss der Vertikalbewegung auf $\mathbf{v}_{ag}$ . . . . .       | 93         |
| 4.7 Trajektorien und Stromlinien . . . . .                                    | 93         |
| 4.8 Die vertikale Neigung von Druckgebilden . . . . .                         | 100        |
| <b>5 Kinematik horizontaler Strömungen</b>                                    | <b>105</b> |
| 5.1 Die lokale Geschwindigkeitsdyade . . . . .                                | 105        |
| 5.2 Die Divergenz . . . . .   | 109        |
| 5.3 Die Vorticity . . . . .   | 113        |
| 5.4 Die Vorticitygleichung . . . . .  | 115        |
| 5.5 Trägheitsinstabilität und dynamische Instabilität . . . . .               | 120        |
| 5.5.1 Trägheitsinstabilität . . . . .   | 123        |
| 5.5.2 Dynamische Instabilität . . . . .                                       | 126        |
| <b>6 Die quasigeostrophische Theorie</b>                                      | <b>129</b> |
| 6.1 Die Grundannahmen der quasigeostrophischen Theorie .                      | 129        |
| 6.2 Die quasigeostrophischen Modellgleichungen . . . . .                      | 131        |
| 6.2.1 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .                         | 133        |
| 6.2.2 Die Vorticitygleichung . . . . .  | 133        |
| 6.2.3 Die $\omega$ -Gleichung . . . . .                                       | 137        |
| 6.3 Die Trenberth Form der $\omega$ -Gleichung . . . . .                      | 140        |
| 6.4 Die Q-Vektor Form der $\omega$ -Gleichung . . . . .                       | 143        |
| 6.5 Beispiele zur Interpretation der $\omega$ -Gleichung . . . . .            | 154        |
| 6.6 Stabilitätsbetrachtungen . . . . .  | 162        |
| <b>7 Die potentielle Vorticity</b>  | <b>165</b> |
| 7.1 Definition und Erhaltungseigenschaften der PV . . . . .                   | 166        |
| 7.2 Charakteristische Werte, Anomalien der PV . . . . .                       | 168        |
| 7.3 Das PV-Invertierungsprinzip . . . . .                                     | 173        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 7.4       | Die Leezyklogenese . . . . .  | 177        |
| 7.5       | Beispiele zur PV-Analyse . . . . .                                    | 179        |
| 7.5.1     | Zyklogenese über dem Atlantik . . . . .                               | 179        |
| 7.5.2     | Bildung eines Kaltlufttropfens . . . . .                              | 184        |
| 7.5.3     | Alpenüberströmung . . . . .   | 190        |
| <b>8</b>  | <b>Die globale Zirkulation</b>  | <b>195</b> |
| 8.1       | Thermisch direkte und indirekte Zirkulation . . . . .                 | 196        |
| 8.2       | Vereinfachtes Schema der globalen Zirkulation . . . . .               | 197        |
| 8.3       | Jetstreams und Jetstreaks . . . . .                                   | 205        |
| 8.4       | Luftmassentransformationen . . . . .                                  | 211        |
| 8.5       | Wetterlagen unter dem Einfluss unterschiedlicher Luftmassen . . . . . | 217        |
| 8.5.1     | Nordwestlage . . . . .  | 217        |
| 8.5.2     | Ostlage . . . . .   | 220        |
| 8.5.3     | Südwestlage . . . . .   | 223        |
| <b>9</b>  | <b>Europäische Großwetterlagen</b>                                    | <b>229</b> |
| 9.1       | Großwetterlagen, -typen und Zirkulationsformen . . . . .              | 230        |
| 9.2       | Beispiele europäischer Großwetterlagen . . . . .                      | 234        |
| <b>10</b> | <b>Rossby-Wellen</b>  | <b>265</b> |
| 10.1      | Raumzeitliche Variabilität planetarer Wellen . . . . .                | 266        |
| 10.2      | Barotrope Wellen . . . . .  | 274        |
| 10.3      | Barokline Wellen . . . . .  | 277        |
| 10.4      | Das Zweischichtenmodell – barokline Instabilität . . . . .            | 281        |
| 10.4.1    | Das Zweischichtenmodell . . . . .                                     | 283        |
| 10.4.2    | Barokline Instabilität . . . . .                                      | 285        |
| 10.4.3    | Energetische Betrachtungen . . . . .                                  | 290        |
| 10.5      | Stabilitätsverhalten barokliner Wellen . . . . .                      | 293        |
| 10.5.1    | Stabile und gedämpfte Wellen . . . . .                                | 294        |
| 10.5.2    | Instabile Wellen . . . . .  | 309        |
| 10.6      | Abschließende Bemerkungen . . . . .                                   | 315        |
| <b>11</b> | <b>Zyklonen und Antizyklonen</b>                                      | <b>319</b> |
| 11.1      | Zyklogenese und Antizyklogenese . . . . .                             | 320        |
| 11.1.1    | Die Drucktendenzgleichung . . . . .                                   | 321        |
| 11.1.2    | Die lokale zeitliche Änderung der Vorticity . . . . .                 | 324        |
| 11.1.3    | Die Verlagerung der Druckgebilde . . . . .                            | 325        |
| 11.1.4    | Vergenzen in der Höhenströmung . . . . .                              | 326        |
| 11.1.5    | Zyklogenese an einer Frontalwelle . . . . .                           | 328        |
| 11.1.6    | Auflösung der Druckgebilde – Ekman-Pumping . .                        | 331        |

|  |            |
|--|------------|
| 11.2 Die Polarfronttheorie . . . . .                                   | 335        |
| 11.2.1 Der Lebenszyklus einer Idealzyklone . . . . .                   | 336        |
| 11.2.2 Kalte und warme Okklusion . . . . .                             | 339        |
| 11.2.3 Tiefstiefs und Zyklonenfamilien . . . . .                       | 340        |
| 11.2.4 Kritische Anmerkungen zur Polarfronttheorie . .                 | 342        |
| 11.3 Weitere Zyklonenmodelle . . . . .                                 | 346        |
| 11.3.1 Das Shapiro-Keyser Zyklonenmodell . . . . .                     | 346        |
| 11.3.2 Das STORM Zyklonenmodell . . . . .                              | 348        |
| 11.4 Rapide Zyklogenese . . . . .                                      | 350        |
| <b>12 Fronten und Frontalzonen</b>                                     | <b>365</b> |
| 12.1 Materielle Diskontinuitätsfläche und Feldtheorie . . . . .        | 366        |
| 12.2 Kinematische Eigenschaften von Fronten und Frontalzonen . . . . . | 368        |
| 12.3 Ana- und Katafronten . . . . .                                    | 379        |
| 12.4 Frontogenese . . . . .  | 384        |
| 12.5 Die Sawyer-Eliassen Zirkulation . . . . .                         | 392        |
| 12.6 Fronten und Conveyor Belts . . . . .                              | 399        |
| 12.6.1 Die Warmfront . . . . .   | 400        |
| 12.6.2 Die Ana-Kaltfront . . . . .                                     | 404        |
| 12.6.3 Die Kata-Kaltfront . . . . .                                    | 406        |
| 12.6.4 Die Okklusionsfront . . . . .                                   | 412        |
| 12.7 Frontenanalyse . . . . .  | 419        |
| 12.8 Konzeptionelle Modelle – Fluch oder Segen? . . . . .              | 423        |
| <b>13 Mesoskalige meteorologische Prozesse</b>                         | <b>427</b> |
| 13.1 Gewitter . . . . .  | 428        |
| 13.1.1 Einzel-, Multi- und Superzellen . . . . .                       | 429        |
| 13.1.2 Voraussetzungen für die Gewitterbildung . . . . .               | 432        |
| 13.2 Mesoskalige konvektive Systeme . . . . .                          | 436        |
| 13.2.1 Größenordnungen und Formen . . . . .                            | 436        |
| 13.2.2 Squall Lines . . . . .  | 437        |
| 13.2.3 Konvergenzlinien . . . . .                                      | 441        |
| 13.3 Nebel . . . . .   | 447        |
| 13.3.1 Entstehungsmechanismen . . . . .                                | 448        |
| 13.3.2 Nebelprognose . . . . .   | 450        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>455</b> |
| <b>Sachverzeichnis</b>   | <b>475</b> |