

|  | Seite |
|--|-------|
| 1. Einleitung  | 11    |
| 2. Das Skalar-, Vektor- und Tensorfeld;<br>Kinematische Analyse  | 13    |
| 2.1 Skalare und vektorielle Größen   | 13    |
| 2.2 Skalares und vektorielles Produkt  | 14    |
| 2.2.1 Mehrfache Produkte   | 17    |
| 2.3 Dyadisches Produkt - Tensorielle Größen  | 18    |
| 2.3.1 Rechenregeln für Tensoren  | 21    |
| 2.4 Differentiation von skalaren und<br>vektoriellen Größen  | 22    |
| 2.4.1 Räumliche Ableitungen  | 22    |
| 2.4.2 Zeitliche Ableitungen  | 26    |
| 2.5 Krummliniges Koordinatensystem   | 27    |
| 2.6 Integralsätze  | 33    |
| 2.6.1 Satz von GAUSS   | 34    |
| 2.6.2 Satz von STOKES  | 36    |
| 2.7 Die Bilanzgleichung  | 38    |
| 2.8 Stromlinien und Trajektorien   | 41    |
| 2.9 Darstellung von Geschwindigkeitsfeldern  | 43    |
| 2.9.1 Reine Bewegungstypen   | 46    |
| 2.10 Das natürliche Koordinatensystem  | 52    |
| 2.10.1 Darstellung von Stromfeldeigenschaften<br>eines horizontalen Geschwindigkeitsfel-<br>des in natürlichen Koordinaten           | 58    |
| 2.11 Anhang: Transportgleichungen  | 60    |
| 3. Physikalische Grundlagen  | 65    |
| 3.1 Grundbegriffe der Mechanik   | 65    |
| 3.1.1 Die NEWTON'schen Axiome; der Begriff<br>der Kraft  | 65    |
| 3.1.2 Arbeit, Energie, Leistung  | 66    |
| 3.2 Grundlagen der Thermodynamik   | 69    |
| 3.2.1 Die Zustandsgleichung für ideale Gase  | 69    |
| 3.2.2 1. Hauptsatz der Wärmelehre  | 71    |
| 3.2.3 2. Hauptsatz der Wärmelehre; der Be-<br>griff der Entropie   | 76    |
| 3.2.4 Adiabatische Prozesse  | 79    |
| 4. Die Grundgleichungen der Dynamik der Atmosphäre   | 82    |
| 4.1 Die Bewegungsgleichungen in einem<br>Inertialsystem  | 82    |
| 4.1.1 Die fundamentalen Kräfte   | 85    |
| 4.2 Die Bewegungsgleichungen in einem<br>rotierenden Koordinatensystem   | 90    |
| 4.2.1 Die Komponentendarstellung der Bewegun-<br>gsgleichungen in einem rotierenden orthogo-<br>nalen krummlinigen Koordinatensystem | 96    |
| 4.2.2 Spezifische Koordinatensysteme   | 99    |
| 4.3 Die Kontinuitätsgleichung  | 104   |

|         | Seite  |     |
|---------|--|-----|
| 4.4     | Die Bilanzgleichung für den Impuls   | 106 |
| 4.5     | Energetik der laminaren Strömung;<br>Bilanzgleichungen für die Energie             | 107 |
| 4.5.1   | Verallgemeinerte BERNOULLI-Gleichung   | 115 |
| 4.6     | Die Bilanzgleichung für die Entropie   | 116 |
| 4.7     | Wirbeldynamik  | 118 |
| 5.      | "Scale"-Analyse  | 133 |
| 5.1     | Methodik   | 134 |
| 6.      | Der vertikale Aufbau der Atmosphäre  | 141 |
| 6.1     | Das hydrostatische Gleichgewicht   | 141 |
| 6.2     | Die barometrische Höhenformel  | 144 |
| 6.3     | Modellatmosphären  | 145 |
| 6.4     | Hydrostatische Stabilität  | 151 |
| 6.5     | Energetische Betrachtungen   | 154 |
| 7.      | Quasistatische reibungsfreie atmosphärische Bewegungen                             | 161 |
| 7.1     | Die Bewegungsgleichungen für quasi-<br>statische reibungsfreie Bewegungen          | 162 |
| 7.1.1   | Quasistatische reibungsfreie Bewegungen<br>in einem kartesischen Koordinatensystem | 169 |
| 7.2     | Die Adiabatengleichung   | 171 |
| 7.3     | Die Kontinuitätsgleichung  | 174 |
| 7.4     | Quasistatische reibungsfreie Bewegungen<br>in einem natürlichen Koordinatensystem  | 175 |
| 7.4.1   | Reibungsfreie horizontale quasistatische<br>Bewegungen                             | 178 |
| 7.4.2   | Horizontale Trägheitsbewegung  | 180 |
| 7.5     | Die thermische Windgleichung   | 181 |
| 7.6     | Die Drucktendenzgleichung  | 185 |
| 7.7     | Abweichung vom geostrophischen Gleichge-<br>wicht                                  | 187 |
| 7.8     | Die Vorticitygleichung   | 193 |
| 7.8.1   | Scale-Analyse der Vorticitygleichung   | 201 |
| 7.8.2   | Darstellung der Vorticitygleichung in<br>natürlichen Koordinaten                   | 205 |
| 7.9     | "Physikalische" Koordinaten  | 207 |
| 7.9.1   | Isobare Koordinaten  | 211 |
| 7.9.1.1 | Die Bewegungsgleichungen   | 213 |
| 7.9.1.2 | Die Kontinuitätsgleichung  | 215 |
| 7.9.1.3 | 1. Hauptsatz der Wärmelehre  | 218 |
| 7.9.1.4 | Die Vorticitygleichung   | 221 |
| 7.9.1.5 | Die $\omega$ -Gleichung  | 225 |
| 7.9.1.6 | Ein Divergenztheorem - Balancegleichung  | 231 |
| 7.9.1.7 | Nichtgeostrophische Modellgleichungen  | 233 |
| 7.9.2   | Isentrope Koordinaten  | 237 |
| 7.9.2.1 | Die Bewegungsgleichungen   | 238 |
| 7.9.2.2 | Die Kontinuitätsgleichung  | 239 |

|         | Seite   |     |
|---------|---|-----|
| 7.9.2.3 | Die Vorticitygleichung  | 241 |
| 7.9.2.4 | Der Einfluß der Gebirge auf die großräumige Strömung                  | 242 |
| 8.      | Wellenbewegungen in der Atmosphäre                                    | 246 |
| 8.1     | Darstellung von Wellen  | 247 |
| 8.2     | Perturbationstheorie  | 252 |
| 8.3     | Schallausbreitung in einem kräftefreien Gas                           | 255 |
| 8.4     | Einfache Schwereloszillation  | 256 |
| 8.5     | Die Grundgleichungen für die Wellenausbreitung in der Atmosphäre      | 257 |
| 8.5.1   | Dispersionsgleichung  | 261 |
| 8.5.2   | Energie und Impulstransport durch Wellen                              | 267 |
| 8.5.3   | Randbedingungen   | 271 |
| 8.6     | Schwerewellen an Diskontinuitäten                                     | 274 |
| 8.7     | Der Einfluß der vertikalen Windscherung auf Schwerewellen             | 282 |
| 8.8     | Leewellen   | 284 |
| 8.8.1   | Impuls- und Energietransport zufolge von Leewellen                    | 294 |
| 8.9     | ROSSBY-Wellen   | 297 |
| 8.9.1   | Energietransport zufolge von ROSSBY-Wellen                            | 301 |
| 8.9.2   | Erzwungene ROSSBY-Wellen  | 303 |
| 8.10    | Barotrope Instabilität  | 311 |
| 8.11    | Zyklogenese - Barokline Instabilität                                  | 315 |
| 9.      | Energetik der Atmosphäre  | 326 |
| 9.1     | Die verfügbare potentielle Energie                                    | 332 |
| 9.2     | Energetik barokliner Wellen   | 340 |
| 9.3     | Energetik der globalen Zirkulation                                    | 345 |
| 9.3.1   | Der Energiezyklus der Atmosphäre nach E.N. LORENZ                     | 354 |
| 9.4     | Der Impulshaushalt der Atmosphäre                                     | 363 |
| 10.     | Die Grenzschicht der Atmosphäre                                       | 370 |
| 10.1    | Turbulente Bewegungen   | 370 |
| 10.2    | Das Turbulenzkonzept nach REYNOLDS                                    | 373 |
| 10.3    | Die Energetik einer turbulenten Strömung                              | 379 |
| 10.4    | Die BOUSSINESQ-Approximation  | 387 |
| 10.5    | Das Schließungsproblem - Austauschkonzept                             | 391 |
| 10.5.1  | Das Konzept der Mischungsweglänge nach PRANDTL - Austausch vom Impuls | 393 |
| 10.5.2  | Der turbulente Wärmetransport   | 395 |
| 10.6    | Das RICHARDSON-Kriterium  | 398 |
| 10.7    | Der Aufbau der Grenzschicht der Atmosphäre                            | 400 |
| 10.7.1  | Die PRANDTL-Schicht   | 402 |
| 10.7.2  | Die EKMAN-Schicht   | 407 |

|   | Seite |
|---|-------|
| 10.7.2.1 Die Sekundärzirkulation in der EKMAN-Schicht                     | 415   |
| 10.8 Die Ausbreitung von Schadstoffen in der atmosphärischen Grenzschicht | 418   |
| 11. Grundlagen der numerischen Wettervorhersage                           | 427   |
| 11.1 Problemstellung  | 427   |
| 11.2 Filterung  | 430   |
| 11.3 Parametrisierung   | 434   |
| 11.4 Schlußbemerkungen  | 438   |
| Anhang  | 441   |
| A. Die äquivalentpotentielle Temperatur                                   | 441   |
| B. Maße und Einheiten   | 443   |
| C. Wichtige Konstanten und Parameter                                      | 446   |
| Bildquellenverzeichnis  | 449   |
| Sachwörterverzeichnis   | 450   |