

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                       |          |
|----------|-------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Motivation und wissenschaftliche Fragestellung</b> | <b>1</b> |
| <b>2</b> | <b>Diffusion einphasiger Kontinua</b>                 | <b>7</b> |
| 2.1      | Tensoranalysis und Hauptinvarianten . . . . .         | 8        |
| 2.1.1    | Vektoralgebra . . . . .                               | 8        |
| 2.1.2    | Singuläre und reguläre Matrizen . . . . .             | 13       |
| 2.1.3    | Die charakteristische Gleichung . . . . .             | 15       |
| 2.1.4    | Hauptinvarianten . . . . .                            | 16       |
| 2.1.5    | Cayley-Hamilton-Theorem . . . . .                     | 18       |
| 2.1.6    | Materielle und räumliche Beschreibung . . . . .       | 19       |
| 2.1.7    | Unimodulare und Orthogonale Abbildungen . . . . .     | 21       |
| 2.1.8    | Euklid'sche Transformation . . . . .                  | 21       |
| 2.1.9    | Materielle Objektivität und Symmetrie . . . . .       | 22       |
| 2.1.10   | Isotropie . . . . .                                   | 24       |
| 2.2      | Bewegung und Transport . . . . .                      | 25       |
| 2.2.1    | Flächen- und Volumenelemente . . . . .                | 25       |
| 2.2.2    | Deformation und polare Zerlegung . . . . .            | 26       |
| 2.2.3    | Streck- und Deformationstensoren . . . . .            | 27       |
| 2.2.4    | Verzerrungs- und Rotationsgeschwindigkeit . . . . .   | 28       |
| 2.2.5    | Expansionsrate . . . . .                              | 30       |
| 2.2.6    | Adjungierter Tensor . . . . .                         | 30       |
| 2.2.7    | Geometrische Transporttheoreme . . . . .              | 31       |
| 2.2.8    | Totales Differential . . . . .                        | 32       |
| 2.2.9    | Materielle Ableitung . . . . .                        | 33       |
| 2.2.10   | Reynolds-Transporttheorem . . . . .                   | 34       |
| 2.2.11   | Massenerhaltung . . . . .                             | 35       |
| 2.2.12   | Scherspannung . . . . .                               | 35       |
| 2.2.13   | Dissipation . . . . .                                 | 37       |
| 2.3      | Thermodynamik und natürliche Konvektion . . . . .     | 38       |
| 2.3.1    | Molekulare Kinetik . . . . .                          | 39       |
| 2.3.2    | Druck eines Gases . . . . .                           | 39       |
| 2.3.3    | Ideale und reale Gase . . . . .                       | 42       |

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.4    | Virialsatz . . . . .                                               | 45        |
| 2.3.5    | Auftrieb und Boussinesq-Approximation . . . . .                    | 46        |
| 2.3.6    | Innere Energie . . . . .                                           | 47        |
| 2.3.7    | Spezifische Wärmen . . . . .                                       | 49        |
| 2.3.8    | Reaktionswärme . . . . .                                           | 51        |
| 2.3.9    | Energie- und Enthalpiebilanz . . . . .                             | 52        |
| 2.3.10   | Buckingham- $\Pi$ -Theorem . . . . .                               | 54        |
| 2.3.11   | Entdimensionierter Transport . . . . .                             | 57        |
| 2.4      | Statistische Modellierung chaotisch fluktuierender Strömungen      | 60        |
| 2.4.1    | Die Wahrscheinlichkeitsdichte . . . . .                            | 60        |
| 2.4.2    | Zeitliche Mittelung . . . . .                                      | 61        |
| 2.4.3    | Korrelation . . . . .                                              | 62        |
| 2.4.4    | Statistisches Moment . . . . .                                     | 62        |
| 2.4.5    | Ergodenannahme . . . . .                                           | 63        |
| 2.4.6    | Kontinuität . . . . .                                              | 64        |
| 2.4.7    | Mittlere Geschwindigkeit . . . . .                                 | 64        |
| 2.4.8    | Lokale Isotropie . . . . .                                         | 66        |
| 2.4.9    | Null-Gleichungs-Modell . . . . .                                   | 67        |
| 2.4.10   | Turbulente kinetische Energie $k$ . . . . .                        | 68        |
| 2.4.11   | Turbulente Viskosität . . . . .                                    | 69        |
| 2.5      | Modellierung isotroper Turbulenz . . . . .                         | 70        |
| 2.5.1    | $k$ -Gleichung . . . . .                                           | 70        |
| 2.5.2    | Ansatz für den turbulenten Transport . . . . .                     | 72        |
| 2.5.3    | Diffusion und Dissipation . . . . .                                | 73        |
| 2.5.4    | Transport isotroper Turbulenz mit dem $k$ - $\epsilon$ -Modell . . | 74        |
| 2.5.5    | Energieerhaltung in der Turbulenz . . . . .                        | 75        |
| 2.5.6    | Modellierung der turbulenten Grenzschicht . . . . .                | 76        |
| 2.5.7    | Logarithmisches Wandgesetz . . . . .                               | 78        |
| 2.5.8    | Turbulente Wandspannung . . . . .                                  | 79        |
|          | Zusammenfassung . . . . .                                          | 81        |
| <b>3</b> | <b>Diffusion molekularer Strömungen</b>                            | <b>83</b> |
| 3.1      | Expansion, Phasenübergänge und Irreversibilität . . . . .          | 84        |
| 3.1.1    | Prinzip von Caratheodory . . . . .                                 | 85        |
| 3.1.2    | Entropiebilanz . . . . .                                           | 88        |
| 3.1.3    | Entropieproduktion . . . . .                                       | 88        |
| 3.1.4    | Entropiefunktionen . . . . .                                       | 89        |
| 3.1.5    | Entropieproduktion einer isobaren Gasmischung . . .                | 90        |
| 3.1.6    | Thermodynamisches Gleichgewicht . . . . .                          | 95        |
| 3.1.7    | Maxwell-Relationen . . . . .                                       | 97        |

|        |                                                                    |     |
|--------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.8  | Joule-Thomson-Effekt . . . . .                                     | 100 |
| 3.1.9  | Massenwirkungsgesetze . . . . .                                    | 102 |
| 3.1.10 | Clausius-Clapeyron'sches Gesetz . . . . .                          | 106 |
| 3.2    | Transsonische Strömungen . . . . .                                 | 108 |
| 3.2.1  | Bernoulli-Gleichungen . . . . .                                    | 109 |
| 3.2.2  | Kesselenthalpie . . . . .                                          | 110 |
| 3.2.3  | Schallgeschwindigkeit . . . . .                                    | 111 |
| 3.2.4  | Kompressibilitätseffekte . . . . .                                 | 112 |
| 3.2.5  | Senkrechter Verdichtungsstoß . . . . .                             | 113 |
| 3.2.6  | Sprungbedingungen . . . . .                                        | 114 |
| 3.2.7  | Schräger Verdichtungsstoß . . . . .                                | 118 |
| 3.2.8  | Entropiezuwachs an Verdichtungsstößen . . . . .                    | 120 |
| 3.2.9  | Rankine-Hugoniot-Beziehung . . . . .                               | 121 |
| 3.2.10 | Kritische Schallgeschwindigkeit . . . . .                          | 124 |
| 3.2.11 | Isentrope Zustandsänderungen . . . . .                             | 125 |
| 3.2.12 | Machzahltransformation und Maximalgeschwindigkeit . . . . .        | 127 |
| 3.2.13 | Lavaldüse . . . . .                                                | 128 |
| 3.3    | Molekulare Thermodynamik . . . . .                                 | 131 |
| 3.3.1  | Phasenraum und die Boltzmann-Gleichung . . . . .                   | 132 |
| 3.3.2  | Molekulare Kinetik verdünnter Gase . . . . .                       | 134 |
| 3.3.3  | Geschwindigkeitsverteilungsfunktion . . . . .                      | 135 |
| 3.3.4  | Interpretation der Standardabweichung . . . . .                    | 139 |
| 3.3.5  | Molekülgeschwindigkeitsverteilung . . . . .                        | 141 |
| 3.3.6  | Interpretation statistischer Momente . . . . .                     | 144 |
| 3.3.7  | Molekulare kinetische Energie . . . . .                            | 145 |
| 3.3.8  | Lighthill-Gas . . . . .                                            | 145 |
| 3.3.9  | Natürliche Gase . . . . .                                          | 147 |
| 3.4    | Moleküldiffusion . . . . .                                         | 148 |
| 3.4.1  | Mittlere Geschwindigkeit . . . . .                                 | 148 |
| 3.4.2  | Molekulare Kollision . . . . .                                     | 149 |
| 3.4.3  | Molekulare Energiediffusion . . . . .                              | 151 |
| 3.4.4  | Molekulare Stöße an ideal glatten Wänden . . . . .                 | 153 |
| 3.4.5  | Molekulare/partikuläre Diffusion . . . . .                         | 155 |
| 3.4.6  | Dynamik kompressibler Gase . . . . .                               | 158 |
| 3.4.7  | Transport der Erhaltungsgrößen . . . . .                           | 159 |
| 3.4.8  | Modellierung der Geschwindigkeitskorrelationen . . . . .           | 160 |
| 3.4.9  | Mittlerer molekularer Impuls . . . . .                             | 161 |
| 3.4.10 | Interpretation der molekularen Transportgleichung . . . . .        | 163 |
| 3.5    | Thermodynamische Konsistenz der molekularen Modellierung . . . . . | 165 |
| 3.5.1  | Transport der molekularen Geschwindigkeitsvarianz . . . . .        | 165 |

|          |                                                       |            |
|----------|-------------------------------------------------------|------------|
| 3.5.2    | Gewichtetes Tripelmoment . . . . .                    | 167        |
| 3.5.3    | Statistischer Transport . . . . .                     | 172        |
| 3.5.4    | Modellierung kompressibler Strömungen . . . . .       | 176        |
| 3.5.5    | Druck und Dissipation . . . . .                       | 177        |
| 3.5.6    | Entropieproduktion . . . . .                          | 178        |
| 3.5.7    | Analogien zur makroskopischen Thermodynamik . . . . . | 180        |
|          | Zusammenfassung . . . . .                             | 182        |
| <b>4</b> | <b>Diffusion monodisperser Zweiphasenströmungen</b>   | <b>185</b> |
| 4.1      | Partikelinteraktion . . . . .                         | 186        |
| 4.1.1    | Impulserhaltung . . . . .                             | 186        |
| 4.1.2    | Reibungsfreier Strömungswiderstand . . . . .          | 187        |
| 4.1.3    | Stokes'scher Strömungswiderstand . . . . .            | 188        |
| 4.1.4    | Normierter Widerstandskoeffizient $f$ . . . . .       | 188        |
| 4.1.5    | Cunningham-Korrekturfaktor . . . . .                  | 189        |
| 4.1.6    | Kompressibilitätseffekte . . . . .                    | 191        |
| 4.1.7    | Gravitation und Auftriebskräfte . . . . .             | 192        |
| 4.1.8    | Druckinduzierte Kräfte . . . . .                      | 194        |
| 4.1.9    | Partikelbewegungsgleichungen . . . . .                | 194        |
| 4.1.10   | Basset-Boussinesq-Oseen-Gleichung . . . . .           | 195        |
| 4.1.11   | Partikel/Wand-Interaktion . . . . .                   | 198        |
| 4.2      | Partikelbewegung . . . . .                            | 200        |
| 4.2.1    | Volumenanteil . . . . .                               | 200        |
| 4.2.2    | Effektive Dichte . . . . .                            | 201        |
| 4.2.3    | Massen- und Volumenbruch . . . . .                    | 202        |
| 4.2.4    | Das Relaxationszeitmaß . . . . .                      | 202        |
| 4.2.5    | Flusszeitmaß . . . . .                                | 203        |
| 4.2.6    | Geschwindigkeitsrelaxation . . . . .                  | 204        |
| 4.2.7    | Kollisionszeit . . . . .                              | 206        |
| 4.2.8    | Verschiedene Kopplungsparameter . . . . .             | 207        |
| 4.3      | Statistische Filterung . . . . .                      | 209        |
| 4.3.1    | Massenerhaltung der Partikelphase . . . . .           | 209        |
| 4.3.2    | Impulserhaltung der Partikelphase . . . . .           | 209        |
| 4.3.3    | Energieerhaltung der Partikelphase . . . . .          | 211        |
| 4.3.4    | Energetische Phaseninteraktion . . . . .              | 214        |
| 4.3.5    | Volumenbruch-Korrelation . . . . .                    | 215        |
| 4.3.6    | Prinzipien der gewichteten Mittelung . . . . .        | 216        |
| 4.3.7    | Gradientendarstellung . . . . .                       | 218        |
| 4.3.8    | Filterdifferenz . . . . .                             | 219        |
| 4.3.9    | Volumenbruch-Geschwindigkeitskorrelationen . . . . .  | 220        |

|          |                                                              |            |
|----------|--------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.10   | Relativgeschwindigkeit . . . . .                             | 221        |
| 4.3.11   | Modellierung der Korrelation disperser Phasen . . . . .      | 222        |
| 4.3.12   | Phasengewichtete Kontinuität . . . . .                       | 224        |
| 4.4      | Statistischer Partikeltransport . . . . .                    | 225        |
| 4.4.1    | Reibungskräfte . . . . .                                     | 225        |
| 4.4.2    | Gravitation . . . . .                                        | 227        |
| 4.4.3    | Auftriebskräfte . . . . .                                    | 228        |
| 4.4.4    | Druckinduzierte Kräfte . . . . .                             | 228        |
| 4.4.5    | Scherinduzierte Kräfte . . . . .                             | 229        |
| 4.4.6    | Impulserhaltung . . . . .                                    | 232        |
| 4.4.7    | Phasentransfer . . . . .                                     | 233        |
| 4.4.8    | Phaseninteraktion . . . . .                                  | 234        |
| 4.4.9    | Druck- und Gravitationseinfluss . . . . .                    | 236        |
| 4.4.10   | Phasengewichteter Impulstransport . . . . .                  | 237        |
| 4.5      | Modellierung der Partikeldiffusion . . . . .                 | 239        |
| 4.5.1    | Aufspaltung . . . . .                                        | 239        |
| 4.5.2    | Konvektionsterm . . . . .                                    | 240        |
| 4.5.3    | Instationärer Transport . . . . .                            | 242        |
| 4.5.4    | Diffusion und Interaktion . . . . .                          | 242        |
| 4.5.5    | Transport der Turbulenz der kontinuierlichen Phase . . . . . | 245        |
| 4.5.6    | Transport der Varianz der Partikelgeschwindigkeit . . . . .  | 248        |
| 4.5.7    | Transport der Kovarianz der Geschwindigkeiten . . . . .      | 252        |
|          | Zusammenfassung . . . . .                                    | 256        |
| <b>5</b> | <b>Diffusion eines polydispersen Mehrphasengemischs</b>      | <b>259</b> |
| 5.1      | Diffusion einer Suspension . . . . .                         | 260        |
| 5.1.1    | Konzentration und Molenbruch . . . . .                       | 260        |
| 5.1.2    | Partialdruck und Sättigungskonzentration . . . . .           | 263        |
| 5.1.3    | Kontinuität eines Gemischs . . . . .                         | 264        |
| 5.1.4    | Konzentration einer Suspension . . . . .                     | 266        |
| 5.1.5    | Modellierung der Diffusionsgeschwindigkeit . . . . .         | 267        |
| 5.1.6    | Massentransport an der Phasengrenzfläche . . . . .           | 269        |
| 5.1.7    | Transportgleichung . . . . .                                 | 270        |
| 5.1.8    | Vergleich mit exakter Lösung . . . . .                       | 270        |
| 5.1.9    | Sättigungsverlauf . . . . .                                  | 274        |
| 5.2      | Selbstähnlichkeit polydisperser Systeme . . . . .            | 276        |
| 5.2.1    | Trema und Generator . . . . .                                | 277        |
| 5.2.2    | Die fraktale Dimension . . . . .                             | 278        |
| 5.2.3    | Skaleninvariante Tropfenverbände . . . . .                   | 278        |
| 5.2.4    | Tremakonstante $\gamma$ . . . . .                            | 280        |

|        |                                                               |     |
|--------|---------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.5  | Variation des Generators . . . . .                            | 281 |
| 5.2.6  | Wahrscheinlichkeitsdichte des Tropfendurchmessers . .         | 281 |
| 5.2.7  | Tropfenverdunstung . . . . .                                  | 282 |
| 5.2.8  | Variation der Skalierung . . . . .                            | 284 |
| 5.2.9  | Resultierende Wahrscheinlichkeitsdichte . . . . .             | 285 |
| 5.2.10 | Oberflächendichte eines Tropfenverbandes . . . . .            | 286 |
| 5.3    | Wärme- und Stoffdiffusion polydisperser Systeme . . . . .     | 288 |
| 5.3.1  | Veränderung der Anzahldichte . . . . .                        | 288 |
| 5.3.2  | Veränderung des Volumenbruchs . . . . .                       | 289 |
| 5.3.3  | Verdunstungsrate . . . . .                                    | 291 |
| 5.3.4  | Tropfenspezifischer Massentransfer . . . . .                  | 293 |
| 5.3.5  | Massentransferrelaxation und Massenkopplung . . . .           | 293 |
| 5.3.6  | Thermische Relaxation und Energiekopplung . . . .             | 295 |
| 5.3.7  | Feuchtigkeitsanteil und -diffusion . . . . .                  | 297 |
| 5.3.8  | Wärmeübertragung . . . . .                                    | 298 |
| 5.3.9  | Sättigungsdruck . . . . .                                     | 299 |
| 5.3.10 | Absolute Luftfeuchtigkeit . . . . .                           | 300 |
| 5.3.11 | Molare Anteile und relative Luftfeuchtigkeit . . . .          | 301 |
| 5.4    | Wärme- und Stoffdiffusion an Phasengrenzflächen . . . . .     | 302 |
| 5.4.1  | Oberflächenspannung . . . . .                                 | 303 |
| 5.4.2  | Verdunstungsenthalpie . . . . .                               | 305 |
| 5.4.3  | Dimensionslose Kennzahlen . . . . .                           | 306 |
| 5.4.4  | Massentransferkoeffizient . . . . .                           | 308 |
| 5.4.5  | Korrektur des Wärmeübergangs . . . . .                        | 308 |
| 5.4.6  | Iterativer Algorithmus zur Bestimmung . . . . .               | 310 |
| 5.4.7  | Charakteristisches Verdunstungszeitmaß . . . . .              | 310 |
| 5.4.8  | Resultierender Massentransport . . . . .                      | 311 |
| 5.4.9  | Wärmestrahlung und Wärmetransport . . . . .                   | 313 |
| 5.4.10 | Turbulenter Wärmetransport . . . . .                          | 316 |
| 5.4.11 | Turbulenter Impulstransport . . . . .                         | 317 |
| 5.4.12 | Turbulenztransport . . . . .                                  | 319 |
| 5.5    | Verallgemeinerte Modellierung der Partikeldiffusion . . . . . | 321 |
| 5.5.1  | Gleichgewichtsdiffusion . . . . .                             | 321 |
| 5.5.2  | Diffusionszeitmaß . . . . .                                   | 323 |
| 5.5.3  | Dissipation . . . . .                                         | 324 |
| 5.5.4  | Strömungswiderstand . . . . .                                 | 324 |
| 5.5.5  | Partikelkollisionen . . . . .                                 | 325 |
| 5.5.6  | Kopplung für disperse Partikelphasen . . . . .                | 327 |
| 5.5.7  | Phasenübergreifende Korrelation der Partikeldiffusion         | 328 |
| 5.5.8  | Modellierung des Strukturparameters $C_\alpha$ . . . . .      | 329 |

|          |                                                             |            |
|----------|-------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.9    | Globale Dissipations- und Restitutionsleistung . . . .      | 331        |
| 5.5.10   | Turbulente Diffusivität . . . . .                           | 332        |
| 5.5.11   | Partikel/Wand-Kollisionen . . . . .                         | 333        |
|          | Zusammenfassung . . . . .                                   | 336        |
| <b>6</b> | <b>Plasmadiffusion</b>                                      | <b>339</b> |
| 6.1      | Hybride Euler-Darstellung eines Mehrphasengemischs . . . .  | 340        |
| 6.1.1    | Allgemeine Kontinuität . . . . .                            | 340        |
| 6.1.2    | Allgemeine Impulserhaltung . . . . .                        | 341        |
| 6.1.3    | Phasenspezifische Geschwindigkeiten . . . . .               | 344        |
| 6.1.4    | Referenzgeschwindigkeit . . . . .                           | 346        |
| 6.1.5    | Koeffizienten der hybriden Euler/Euler-Darstellung . .      | 348        |
| 6.1.6    | Dichteabweichung und Massentransfer . . . . .               | 349        |
| 6.1.7    | Volumenbruch und effektive Dichte . . . . .                 | 351        |
| 6.1.8    | Transport der Separationsgeschwindigkeit . . . . .          | 351        |
| 6.1.9    | Allgemeine Gleichungen der hybriden Betrachtung . .         | 354        |
| 6.1.10   | Wirbelviskositätsapproximation . . . . .                    | 356        |
| 6.2      | Dynamik ionisierter Gase . . . . .                          | 359        |
| 6.2.1    | Ionendiffusion . . . . .                                    | 359        |
| 6.2.2    | Elektrische Leitung mittels Diffusion ionisierter Gase .    | 360        |
| 6.2.3    | Ionisationsenergie . . . . .                                | 363        |
| 6.2.4    | De-Broglie-Wellenlänge eines Elektrons . . . . .            | 365        |
| 6.2.5    | Entartung von Molekülen . . . . .                           | 366        |
| 6.2.6    | Eggert-Saha-Gleichung . . . . .                             | 368        |
| 6.2.7    | Zustandssumme und kanonisches Ensemble . . . . .            | 370        |
| 6.2.8    | Ionentemperatur . . . . .                                   | 373        |
| 6.2.9    | Ionisationsgrad schwach geladener Plasmen . . . . .         | 375        |
| 6.3      | Ionisation von Plasmen . . . . .                            | 376        |
| 6.3.1    | Elektrische Leitfähigkeit von Plasmen . . . . .             | 376        |
| 6.3.2    | Plasmafrequenz . . . . .                                    | 379        |
| 6.3.3    | Debye'sche Abschirmlänge . . . . .                          | 382        |
| 6.3.4    | Reduzierte Masse und Energietransport . . . . .             | 384        |
| 6.3.5    | Coulomb-Streuung . . . . .                                  | 386        |
| 6.3.6    | Stoßquerschnitte im Plasma . . . . .                        | 388        |
| 6.3.7    | Berücksichtigung der Mehrfachstreuung . . . . .             | 389        |
| 6.3.8    | Modellierung des Ionisation . . . . .                       | 392        |
| 6.3.9    | Rekombination durch Dreierstoß . . . . .                    | 394        |
| 6.4      | Modellierung der molekularen Geschwindigkeitsverteilung . . | 395        |
| 6.4.1    | Transportanteile der Boltzmann-Gleichung . . . . .          | 396        |
| 6.4.2    | Kollisionsanteile der Boltzmann-Gleichung . . . . .         | 399        |

|         |                                                             |     |
|---------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 6.4.3   | Das $\hat{H}$ -Theorem . . . . .                            | 402 |
| 6.4.4   | BGK-Modellierung der Boltzmann-Gleichung . . . . .          | 404 |
| 6.4.5   | Näherungsansatz erster Ordnung . . . . .                    | 406 |
| 6.4.6   | Störung des isotropen Gleichgewichts . . . . .              | 407 |
| 6.4.7   | Nicht-konservative Euler-Gleichungen . . . . .              | 410 |
| 6.4.7.1 | Kontinuität im Phasenraum . . . . .                         | 411 |
| 6.4.7.2 | Impulstransport im Phasenraum . . . . .                     | 411 |
| 6.4.7.3 | Energietransport im Phasenraum . . . . .                    | 413 |
| 6.4.8   | Analogie zur Chapman-Enskog-Entwicklung . . . . .           | 414 |
| 6.4.9   | Diffusion in einem Lighthill-Gas . . . . .                  | 416 |
| 6.4.10  | Energie- und Enthalpietransport im Phasenraum . . . . .     | 419 |
| 6.5     | Plasmamodellierung mittels Multi-Fluid-Modells . . . . .    | 424 |
| 6.5.1   | Boltzmann-Transport verschiedener Teilchenklassen . . . . . | 424 |
| 6.5.2   | Erhaltungsgrößen und Klasseninteraktion . . . . .           | 426 |
| 6.5.3   | Massenaustausch zwischen Teilchenklassen . . . . .          | 428 |
| 6.5.4   | Impulsaustausch zwischen Teilchenklassen . . . . .          | 429 |
| 6.5.5   | Interne und externe Kollisionsfrequenzen . . . . .          | 430 |
| 6.5.6   | Energieaustausch zwischen Teilchenklassen . . . . .         | 432 |
| 6.5.7   | Transportgleichungen der Neutralteilchenklasse . . . . .    | 434 |
| 6.5.8   | Transportgleichungen der Elektronenklasse . . . . .         | 436 |
| 6.5.9   | Transportgleichungen der Ionenklasse . . . . .              | 438 |
|         | Zusammenfassung . . . . .                                   | 441 |

## 7 Zusammenfassung