

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Elektrostatik

|        |                                                                           |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1    | Elektrische Ladungen; Coulomb-Gesetz .....                                | 1  |
| 1.2    | Das elektrische Feld .....                                                | 5  |
| 1.2.1  | Elektrische Feldstärke .....                                              | 5  |
| 1.2.2  | Elektrischer Fluss;<br>Ladungen als Quellen des elektrischen Feldes ..... | 7  |
| 1.3    | Elektrostatisches Potential .....                                         | 8  |
| 1.3.1  | Potential und Spannung .....                                              | 9  |
| 1.3.2  | Potentialgleichung .....                                                  | 10 |
| 1.3.3  | Äquipotentialflächen .....                                                | 11 |
| 1.3.4  | Spezielle Ladungsverteilungen .....                                       | 11 |
| 1.4    | Multipole .....                                                           | 13 |
| 1.4.1  | Der elektrische Dipol .....                                               | 14 |
| 1.4.2  | Der elektrische Quadrupol .....                                           | 16 |
| *1.4.3 | Multipolentwicklung .....                                                 | 17 |
| 1.5    | Leiter im elektrischen Feld .....                                         | 18 |
| 1.5.1  | Influenz .....                                                            | 18 |
| 1.5.2  | Kondensatoren .....                                                       | 20 |
| 1.6    | Die Energie des elektrischen Feldes .....                                 | 23 |
| 1.7    | Dielektrika im elektrischen Feld .....                                    | 24 |
| 1.7.1  | Dielektrische Polarisierung .....                                         | 25 |
| 1.7.2  | Polarisationsladungen .....                                               | 25 |
| *1.7.3 | Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes<br>in Materie .....          | 27 |
| 1.7.4  | Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum .....                         | 30 |
| 1.8    | Die atomaren Grundlagen von Ladungen<br>und elektrischen Momenten .....   | 31 |
| 1.8.1  | Der Millikan-Versuch .....                                                | 31 |
| 1.8.2  | Ablenkung von Elektronen und Ionen<br>in elektrischen Feldern .....       | 32 |
| 1.8.3  | Molekulare Dipolmomente .....                                             | 33 |
| 1.9    | Elektrostatik in Natur und Technik .....                                  | 36 |
| 1.9.1  | Reibungselektrizität und Kontaktpotential .....                           | 36 |
| 1.9.2  | Das elektrische Feld der Erde<br>und ihrer Atmosphäre .....               | 37 |
| 1.9.3  | Die Entstehung von Gewittern .....                                        | 37 |
| 1.9.4  | Kugelblitze .....                                                         | 38 |

|       |                                             |    |
|-------|---------------------------------------------|----|
| 1.9.5 | Elektrostatische Staubfilter .....          | 39 |
| 1.9.6 | Elektrostatische Farbbeschichtung .....     | 39 |
| 1.9.7 | Elektrostatische Kopierer und Drucker ..... | 40 |
|       | Zusammenfassung .....                       | 41 |
|       | Übungsaufgaben .....                        | 42 |

## 2. Der elektrische Strom

|       |                                                                                           |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1   | Strom als Ladungstransport .....                                                          | 45 |
| 2.2   | Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz .....                                         | 47 |
| 2.2.1 | Driftgeschwindigkeit und Stromdichte .....                                                | 47 |
| 2.2.2 | Das Ohmsche Gesetz .....                                                                  | 49 |
| 2.2.3 | Beispiele für die Anwendung des Ohmschen Gesetzes ...                                     | 50 |
| 2.2.4 | Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes<br>fester Körper; Supraleitung ..... | 52 |
| 2.3   | Stromleistung und Joulesche Wärme .....                                                   | 56 |
| 2.4   | Netzwerke; Kirchhoffsche Regeln .....                                                     | 57 |
| 2.4.1 | Reihenschaltung von Widerständen .....                                                    | 58 |
| 2.4.2 | Parallelschaltung von Widerständen .....                                                  | 58 |
| 2.4.3 | Wheatstonesche Brückenschaltung .....                                                     | 59 |
| 2.5   | Messverfahren für elektrische Ströme .....                                                | 59 |
| 2.5.1 | Strommessgeräte .....                                                                     | 59 |
| 2.5.2 | Schaltung von Amperemetern .....                                                          | 61 |
| 2.5.3 | Strommessgeräte als Voltmeter .....                                                       | 62 |
| 2.6   | Ionenleitung in Flüssigkeiten .....                                                       | 62 |
| 2.7   | Stromtransport in Gasen; Gasentladungen .....                                             | 64 |
| 2.7.1 | Ladungsträgerkonzentration .....                                                          | 64 |
| 2.7.2 | Erzeugungsmechanismen für Ladungsträger .....                                             | 64 |
| 2.7.3 | Strom-Spannungs-Kennlinie .....                                                           | 65 |
| 2.7.4 | Mechanismus von Gasentladungen .....                                                      | 67 |
| 2.7.5 | Verschiedene Typen von Gasentladungen .....                                               | 69 |
| 2.8   | Stromquellen .....                                                                        | 71 |
| 2.8.1 | Innenwiderstand einer Stromquelle .....                                                   | 71 |
| 2.8.2 | Galvanische Elemente .....                                                                | 72 |
| 2.8.3 | Akkumulatoren .....                                                                       | 74 |
| 2.8.4 | Verschiedene Typen von Batterien .....                                                    | 75 |
| 2.8.5 | Chemische Brennstoffzellen .....                                                          | 76 |
| 2.9   | Thermische Stromquellen .....                                                             | 77 |
| 2.9.1 | Kontaktpotential .....                                                                    | 77 |
| 2.9.2 | Der Seebeck-Effekt .....                                                                  | 78 |
| 2.9.3 | Thermoelektrische Spannung .....                                                          | 78 |
| 2.9.4 | Peltier-Effekt .....                                                                      | 80 |
|       | Zusammenfassung .....                                                                     | 81 |
|       | Übungsaufgaben .....                                                                      | 82 |

## 3. Statische Magnetfelder

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| 3.1 | Permanentmagnete .....                | 85 |
| 3.2 | Magnetfelder stationärer Ströme ..... | 87 |

|        |                                                                                            |     |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1  | Magnetischer Kraftfluss und magnetische Spannung . . . . .                                 | 87  |
| 3.2.2  | Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters . . . . .                                        | 88  |
| 3.2.3  | Magnetfeld im Inneren einer lang gestreckten Spule . . . . .                               | 89  |
| 3.2.4  | Das Vektorpotential . . . . .                                                              | 89  |
| 3.2.5  | Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung;<br>Biot-Savart-Gesetz . . . . .     | 90  |
| 3.2.6  | Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern<br>spezieller Stromanordnungen . . . . . | 91  |
| 3.3    | Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld . . . . .                                        | 96  |
| 3.3.1  | Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld . . . . .                               | 97  |
| 3.3.2  | Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern . . . . .                                     | 98  |
| 3.3.3  | Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft . . . . .                                    | 98  |
| 3.3.4  | Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern . . . . .                                     | 99  |
| 3.3.5  | Hall-Effekt . . . . .                                                                      | 101 |
| 3.3.6  | Das Barlowsche Rad zur Demonstration<br>der „Elektronenreibung“ in Metallen . . . . .      | 102 |
| *3.4   | Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip . . . . .                                 | 103 |
| 3.4.1  | Das elektrische Feld einer bewegten Ladung . . . . .                                       | 103 |
| 3.4.2  | Zusammenhang zwischen elektrischem<br>und magnetischem Feld . . . . .                      | 105 |
| 3.4.3  | Relativistische Transformation von Ladungsdichte<br>und Strom . . . . .                    | 106 |
| 3.4.4  | Transformationsgleichungen<br>für das elektromagnetische Feld . . . . .                    | 108 |
| 3.5    | Materie im Magnetfeld . . . . .                                                            | 109 |
| 3.5.1  | Magnetische Dipole . . . . .                                                               | 109 |
| 3.5.2  | Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität . . . . .                                   | 111 |
| 3.5.3  | Diamagnetismus . . . . .                                                                   | 113 |
| 3.5.4  | Paramagnetismus . . . . .                                                                  | 114 |
| 3.5.5  | Ferromagnetismus . . . . .                                                                 | 114 |
| 3.5.6  | Antiferro-, Ferrimagnete und Ferrite . . . . .                                             | 118 |
| *3.5.7 | Feldgleichungen in Materie . . . . .                                                       | 119 |
| 3.5.8  | Elektromagnete . . . . .                                                                   | 120 |
| 3.6    | Das Magnetfeld der Erde . . . . .                                                          | 121 |
|        | Zusammenfassung . . . . .                                                                  | 123 |
|        | Übungsaufgaben . . . . .                                                                   | 124 |

#### 4. Zeitlich veränderliche Felder

|       |                                                      |     |
|-------|------------------------------------------------------|-----|
| 4.1   | Faradaysches Induktionsgesetz . . . . .              | 127 |
| 4.2   | Lenzsche Regel . . . . .                             | 130 |
| 4.2.1 | Durch Induktion angefachte Bewegung . . . . .        | 131 |
| 4.2.2 | Elektromagnetische Schleuder . . . . .               | 131 |
| 4.2.3 | Magnetische Levitation . . . . .                     | 131 |
| 4.2.4 | Wirbelströme . . . . .                               | 132 |
| 4.3   | Selbstinduktion und gegenseitige Induktion . . . . . | 132 |
| 4.3.1 | Selbstinduktion . . . . .                            | 132 |
| 4.3.2 | Gegenseitige Induktion . . . . .                     | 136 |

|     |                                                            |     |
|-----|------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4 | Die Energie des magnetischen Feldes .....                  | 138 |
| 4.5 | Der Verschiebungsstrom .....                               | 138 |
| 4.6 | Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale ..... | 140 |
|     | Zusammenfassung .....                                      | 143 |
|     | Übungsaufgaben .....                                       | 143 |

## \*5. Elektrotechnische Anwendungen

|       |                                                                         |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1   | Elektrische Generatoren und Motoren .....                               | 145 |
| 5.1.1 | Gleichstrommaschinen .....                                              | 147 |
| 5.1.2 | Wechselstromgeneratoren .....                                           | 150 |
| 5.2   | Wechselstrom .....                                                      | 151 |
| 5.3   | Mehrphasenstrom; Drehstrom .....                                        | 152 |
| 5.4   | Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen;<br>Zeigerdiagramme ..... | 155 |
| 5.4.1 | Wechselstromkreis mit Induktivität .....                                | 155 |
| 5.4.2 | Wechselstromkreis mit Kapazität .....                                   | 156 |
| 5.4.3 | Allgemeiner Fall .....                                                  | 156 |
| 5.5   | Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter .....            | 158 |
| 5.5.1 | Hochpass .....                                                          | 158 |
| 5.5.2 | Tiefpass .....                                                          | 159 |
| 5.5.3 | Frequenzfilter .....                                                    | 160 |
| 5.6   | Transformatoren .....                                                   | 161 |
| 5.6.1 | Unbelasteter Transformator .....                                        | 162 |
| 5.6.2 | Belasteter Transformator .....                                          | 162 |
| 5.6.3 | Anwendungsbeispiele .....                                               | 164 |
| 5.7   | Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen .....                        | 165 |
| 5.8   | Gleichrichtung .....                                                    | 165 |
| 5.8.1 | Einweggleichrichtung .....                                              | 166 |
| 5.8.2 | Zweiweggleichrichtung .....                                             | 166 |
| 5.8.3 | Brückenschaltung .....                                                  | 167 |
| 5.8.4 | Kaskadenschaltung .....                                                 | 168 |
| 5.9   | Elektronenröhren .....                                                  | 168 |
| 5.9.1 | Vakuum-Dioden .....                                                     | 169 |
| 5.9.2 | Triode .....                                                            | 169 |
|       | Zusammenfassung .....                                                   | 170 |
|       | Übungsaufgaben .....                                                    | 171 |

## 6. Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen

|       |                                                        |     |
|-------|--------------------------------------------------------|-----|
| 6.1   | Der elektromagnetische Schwingkreis .....              | 173 |
| 6.1.1 | Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen .....        | 174 |
| 6.1.2 | Erzwungene Schwingungen .....                          | 175 |
| 6.2   | Gekoppelte Schwingkreise .....                         | 176 |
| 6.3   | Erzeugung ungedämpfter Schwingungen .....              | 178 |
| 6.4   | Offene Schwingkreise; Hertzscher Dipol .....           | 180 |
| 6.4.1 | Experimentelle Realisierung eines Senders .....        | 181 |
| 6.4.2 | Das elektromagnetische Feld des schwingenden Dipols .. | 182 |

|       |                                                   |     |
|-------|---------------------------------------------------|-----|
| 6.5   | Die Abstrahlung des schwingenden Dipols .....     | 187 |
| 6.5.1 | Die abgestrahlte Leistung .....                   | 187 |
| 6.5.2 | Strahlungsdämpfung .....                          | 188 |
| 6.5.3 | Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung ..... | 189 |
| 6.5.4 | Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung ..... | 190 |
|       | Zusammenfassung .....                             | 192 |
|       | Übungsaufgaben .....                              | 193 |

## 7. Elektromagnetische Wellen im Vakuum

|       |                                                                          |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1   | Die Wellengleichung .....                                                | 195 |
| 7.2   | Ebene elektrische Wellen .....                                           | 196 |
| 7.3   | Periodische Wellen .....                                                 | 197 |
| 7.4   | Polarisation elektromagnetischer Wellen .....                            | 198 |
| 7.4.1 | Linear polarisierte Wellen .....                                         | 198 |
| 7.4.2 | Zirkular polarisierte Wellen .....                                       | 198 |
| 7.4.3 | Elliptisch polarisierte Wellen .....                                     | 199 |
| 7.4.4 | Unpolarisierte Wellen .....                                              | 199 |
| 7.5   | Das Magnetfeld elektromagnetischer Wellen .....                          | 199 |
| 7.6   | Energie- und Impulstransport durch elektromagnetische Wellen ...         | 200 |
| 7.7   | Messung der Lichtgeschwindigkeit .....                                   | 204 |
| 7.7.1 | Die astronomische Methode von Ole Rømer .....                            | 204 |
| 7.7.2 | Die Zahnradmethode von Fizeau .....                                      | 205 |
| 7.7.3 | Phasenmethode .....                                                      | 205 |
| 7.7.4 | Bestimmung von $c$ aus der Messung von Frequenz<br>und Wellenlänge ..... | 206 |
| 7.8   | Stehende elektromagnetische Wellen .....                                 | 206 |
| 7.8.1 | Eindimensionale stehende Wellen .....                                    | 206 |
| 7.8.2 | Dreidimensionale stehende Wellen;<br>Hohlraumresonatoren .....           | 207 |
| *7.9  | Wellen in Wellenleitern und Kabeln .....                                 | 210 |
| 7.9.1 | Wellen zwischen zwei planparallelen leitenden Platten ...                | 210 |
| 7.9.2 | Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt .....                            | 212 |
| 7.9.3 | Drahtwellen; Lecherleitung; Koaxialkabel .....                           | 215 |
| 7.9.4 | Beispiele für Wellenleiter .....                                         | 217 |
| 7.10  | Das elektromagnetische Frequenzspektrum .....                            | 218 |
|       | Zusammenfassung .....                                                    | 220 |
|       | Übungsaufgaben .....                                                     | 221 |

## 8. Elektromagnetische Wellen in Materie

|       |                                                                |     |
|-------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1   | Brechungsindex .....                                           | 223 |
| 8.1.1 | Makroskopische Beschreibung .....                              | 224 |
| 8.1.2 | Mikroskopisches Modell .....                                   | 224 |
| 8.2   | Absorption und Dispersion .....                                | 227 |
| 8.3   | Wellengleichung für elektromagnetische Wellen in Materie ..... | 231 |
| 8.3.1 | Wellen in nichtleitenden Medien .....                          | 231 |
| 8.3.2 | Wellen in leitenden Medien .....                               | 232 |
| 8.3.3 | Die elektromagnetische Energie von Wellen in Medien ...        | 234 |

|         |                                                                                                |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.4     | Wellen an Grenzflächen zwischen zwei Medien .....                                              | 235 |
| 8.4.1   | Randbedingungen für elektrische<br>und magnetische Feldstärke .....                            | 236 |
| 8.4.2   | Reflexions- und Brechungsgesetz .....                                                          | 236 |
| 8.4.3   | Amplitude und Polarisierung von reflektierten<br>und gebrochenen Wellen .....                  | 237 |
| 8.4.4   | Reflexions- und Transmissionsvermögen<br>einer Grenzfläche .....                               | 238 |
| 8.4.5   | Brewsterwinkel .....                                                                           | 240 |
| 8.4.6   | Totalreflexion .....                                                                           | 241 |
| 8.4.7   | Änderung der Polarisierung bei schrägem Lichteinfall .....                                     | 242 |
| 8.4.8   | Phasenänderung bei der Reflexion .....                                                         | 243 |
| 8.4.9   | Reflexion an Metalloberflächen .....                                                           | 244 |
| *8.4.10 | Medien mit negativem Brechungsindex .....                                                      | 245 |
| 8.5     | Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien;<br>Doppelbrechung .....                             | 246 |
| 8.5.1   | Ausbreitung von Lichtwellen<br>in anisotropen Medien .....                                     | 247 |
| 8.5.2   | Brechungsindex-Ellipsoid .....                                                                 | 249 |
| 8.5.3   | Doppelbrechung .....                                                                           | 251 |
| 8.6     | Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht .....                                          | 253 |
| 8.6.1   | Erzeugung von linear polarisiertem Licht<br>durch Reflexion .....                              | 254 |
| 8.6.2   | Erzeugung von linear polarisiertem Licht<br>beim Durchgang durch dichroitische Kristalle ..... | 254 |
| 8.6.3   | Doppelbrechende Polarisatoren .....                                                            | 255 |
| 8.6.4   | Polarisationsdreher .....                                                                      | 257 |
| 8.6.5   | Optische Aktivität .....                                                                       | 257 |
| 8.6.6   | Spannungsdoppelbrechung .....                                                                  | 259 |
| 8.7     | Nichtlineare Optik .....                                                                       | 260 |
| 8.7.1   | Optische Frequenzverdopplung .....                                                             | 261 |
| 8.7.2   | Phasenanpassung .....                                                                          | 261 |
| 8.7.3   | Optische Frequenzmischung .....                                                                | 262 |
|         | Zusammenfassung .....                                                                          | 264 |
|         | Übungsaufgaben .....                                                                           | 265 |

## 9. Geometrische Optik

|       |                                           |     |
|-------|-------------------------------------------|-----|
| 9.1   | Grundaxiome der geometrischen Optik ..... | 268 |
| 9.2   | Die optische Abbildung .....              | 269 |
| 9.3   | Hohlspiegel .....                         | 270 |
| 9.4   | Prismen .....                             | 274 |
| 9.5   | Linsen .....                              | 275 |
| 9.5.1 | Brechung an einer gekrümmten Fläche ..... | 276 |
| 9.5.2 | Dünne Linsen .....                        | 277 |
| 9.5.3 | Dicke Linsen .....                        | 280 |
| 9.5.4 | Linsensysteme .....                       | 281 |
| 9.5.5 | Zoom-Linsensysteme .....                  | 283 |

|       |                                                     |     |
|-------|-----------------------------------------------------|-----|
| 9.5.6 | Linsenfehler .....                                  | 283 |
| 9.5.7 | Die aplanatische Abbildung .....                    | 292 |
| 9.5.8 | Asphärische Linsen .....                            | 293 |
| 9.6   | Matrixmethoden der geometrischen Optik .....        | 294 |
| 9.6.1 | Die Translationsmatrix .....                        | 294 |
| 9.6.2 | Die Brechungsmatrix .....                           | 294 |
| 9.6.3 | Die Reflexionsmatrix .....                          | 295 |
| 9.6.4 | Transformationsmatrix einer Linse .....             | 295 |
| 9.6.5 | Abbildungsmatrix .....                              | 296 |
| 9.6.6 | Matrizen von Linsensystemen .....                   | 297 |
| 9.6.7 | Jones-Vektoren .....                                | 297 |
| 9.7   | Geometrische Optik der Erdatmosphäre .....          | 299 |
| 9.7.1 | Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre ..... | 299 |
| 9.7.2 | Scheinbare Größe des aufgehenden Mondes .....       | 301 |
| 9.7.3 | Fata Morgana .....                                  | 301 |
| 9.7.4 | Regenbogen .....                                    | 302 |
|       | Zusammenfassung .....                               | 304 |
|       | Übungsaufgaben .....                                | 305 |

## 10. Interferenz, Beugung und Streuung

|        |                                                              |     |
|--------|--------------------------------------------------------------|-----|
| 10.1   | Zeitliche und räumliche Kohärenz .....                       | 307 |
| 10.2   | Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen .....           | 309 |
| 10.3   | Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz ..... | 310 |
| 10.3.1 | Fresnelscher Spiegelversuch .....                            | 310 |
| 10.3.2 | Youngscher Doppelspaltversuch .....                          | 311 |
| 10.3.3 | Interferenz an einer planparallelen Platte .....             | 312 |
| 10.3.4 | Michelson-Interferometer .....                               | 313 |
| 10.3.5 | Das Michelson-Morley-Experiment .....                        | 315 |
| 10.3.6 | Sagnac-Interferometer .....                                  | 318 |
| 10.3.7 | Mach-Zehnder Interferometer .....                            | 319 |
| 10.4   | Vielstrahl-Interferenz .....                                 | 319 |
| 10.4.1 | Fabry-Pérot-Interferometer .....                             | 322 |
| 10.4.2 | Dielektrische Spiegel .....                                  | 325 |
| 10.4.3 | Antireflexschicht .....                                      | 326 |
| 10.4.4 | Anwendungen der Interferometrie .....                        | 327 |
| 10.5   | Beugung .....                                                | 328 |
| 10.5.1 | Beugung als Interferenzphänomen .....                        | 329 |
| 10.5.2 | Beugung am Spalt .....                                       | 330 |
| 10.5.3 | Beugungsgitter .....                                         | 332 |
| 10.6   | Fraunhofer- und Fresnel-Beugung .....                        | 336 |
| 10.6.1 | Fresnelsche Zonen .....                                      | 336 |
| 10.6.2 | Fresnelsche Zonenplatte .....                                | 339 |
| *10.7  | Allgemeine Behandlung der Beugung .....                      | 340 |
| 10.7.1 | Das Beugungsintegral .....                                   | 340 |
| 10.7.2 | Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt .....         | 341 |
| 10.7.3 | Fresnel-Beugung an einer Kante .....                         | 342 |
| 10.7.4 | Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung .....         | 342 |

|         |                                                |     |
|---------|------------------------------------------------|-----|
| 10.7.5  | Babinetsches Theorem .....                     | 343 |
| *10.8   | Fourierdarstellung der Beugung .....           | 345 |
| 10.8.1  | Fourier-Transformation .....                   | 345 |
| 10.8.2  | Anwendung auf Beugungsprobleme .....           | 346 |
| 10.9    | Lichtstreuung .....                            | 347 |
| 10.9.1  | Kohärente und inkohärente Streuung .....       | 347 |
| 10.9.2  | Streuquerschnitte .....                        | 349 |
| 10.9.3  | Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung ..... | 350 |
| 10.10   | Atmosphären-Optik .....                        | 350 |
| 10.10.1 | Lichtstreuung in unserer Atmosphäre .....      | 350 |
| 10.10.2 | Halo-Erscheinungen .....                       | 353 |
| 10.10.3 | Aureole um den Mond .....                      | 353 |
|         | Zusammenfassung .....                          | 354 |
|         | Übungsaufgaben .....                           | 355 |

## 11. Optische Instrumente

---

|        |                                                                        |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1   | Das Auge .....                                                         | 357 |
| 11.1.1 | Aufbau des Auges .....                                                 | 357 |
| 11.1.2 | Kurz- und Weitsichtigkeit .....                                        | 359 |
| 11.1.3 | Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges ...                  | 359 |
| 11.2   | Vergrößernde optische Instrumente .....                                | 360 |
| 11.2.1 | Die Lupe .....                                                         | 361 |
| 11.2.2 | Das Mikroskop .....                                                    | 362 |
| 11.2.3 | Das Fernrohr .....                                                     | 364 |
| 11.3   | Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten .....                 | 366 |
| 11.3.1 | Auflösungsvermögen des Fernrohrs .....                                 | 366 |
| 11.3.2 | Auflösungsvermögen des Auges .....                                     | 368 |
| 11.3.3 | Auflösungsvermögen des Mikroskops .....                                | 368 |
| 11.3.4 | Abbesche Theorie der Abbildung .....                                   | 370 |
| 11.4   | Die Lichtstärke optischer Instrumente .....                            | 371 |
| 11.5   | Spektrographen und Monochromatoren .....                               | 372 |
| 11.5.1 | Prismenspektrographen .....                                            | 373 |
| 11.5.2 | Gittermonochromator .....                                              | 374 |
| 11.5.3 | Das spektrale Auflösungsvermögen<br>von Spektrographen .....           | 374 |
| 11.5.4 | Ein allgemeiner Ausdruck<br>für das spektrale Auflösungsvermögen ..... | 378 |
|        | Zusammenfassung .....                                                  | 379 |
|        | Übungsaufgaben .....                                                   | 380 |

## 12. Neue Techniken in der Optik

---

|        |                                         |     |
|--------|-----------------------------------------|-----|
| 12.1   | Konfokale Mikroskopie .....             | 381 |
| 12.2   | Optische Nahfeldmikroskopie .....       | 383 |
| 12.3   | Aktive und adaptive Optik .....         | 384 |
| 12.3.1 | Aktive Optik .....                      | 384 |
| 12.3.2 | Adaptive Optik .....                    | 385 |
| 12.3.3 | Interferometrie in der Astronomie ..... | 387 |

|        |                                                       |            |
|--------|-------------------------------------------------------|------------|
| 12.4   | Holographie .....                                     | 387        |
| 12.4.1 | Aufnahme eines Hologramms .....                       | 388        |
| 12.4.2 | Die Rekonstruktion des Wellenfeldes .....             | 390        |
| 12.4.3 | Weißlichtholographie .....                            | 391        |
| 12.4.4 | Holographische Interferometrie .....                  | 392        |
| 12.4.5 | Anwendungen der Holographie .....                     | 394        |
| *12.5  | Fourieroptik .....                                    | 395        |
| 12.5.1 | Die Linse als Fouriertransformator .....              | 395        |
| 12.5.2 | Optische Filterung .....                              | 397        |
| 12.5.3 | Optische Mustererkennung .....                        | 399        |
| *12.6  | Mikrooptik .....                                      | 400        |
| 12.6.1 | Diffraktive Optik .....                               | 400        |
| 12.6.2 | Fresnel-Linse und Linsenarrays .....                  | 402        |
| 12.6.3 | Herstellung diffraktiver Optik .....                  | 403        |
| 12.6.4 | Refraktive Mikrooptik .....                           | 404        |
| *12.7  | Optische Wellenleiter und integrierte Optik .....     | 404        |
| 12.7.1 | Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern .....     | 404        |
| 12.7.2 | Lichtmodulation .....                                 | 406        |
| 12.7.3 | Kopplung zwischen benachbarten Wellenleitern .....    | 407        |
| 12.7.4 | Integrierte optische Elemente .....                   | 408        |
| 12.8   | Optische Lichtleitfasern .....                        | 408        |
| 12.8.1 | Lichtausbreitung in optischen Lichtleiterfasern ..... | 409        |
| 12.8.2 | Absorption in optischen Fasern .....                  | 410        |
| 12.8.3 | Pulsausbreitung in Fasern .....                       | 411        |
| 12.8.4 | Nichtlineare Pulsausbreitung; Solitonen .....         | 413        |
| 12.9   | Optische Nachrichtenübertragung .....                 | 414        |
|        | Zusammenfassung .....                                 | 415        |
|        | Übungsaufgaben .....                                  | 416        |
|        | <b>Lösungen der Übungsaufgaben .....</b>              | <b>417</b> |
|        | <b>Farbtafeln .....</b>                               | <b>473</b> |
|        | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                     | <b>481</b> |
|        | <b>Sachwortverzeichnis .....</b>                      | <b>487</b> |