

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                  |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                | <b>1</b>  |
| 1.1      | Was ist Sehen                                                                    | 2         |
| 1.2      | Was ist Licht                                                                    | 3         |
| 1.3      | Beschreibung von Licht als elektromagnetische Welle                              | 4         |
| 1.3.1    | Maxwellgleichungen und Wellengleichung                                           | 4         |
| 1.3.2    | Lösung von Wellengleichungen                                                     | 5         |
| 1.3.3    | Beschreibung elektromagnetischer Wellen                                          | 7         |
| 1.3.4    | Ausbreitungsgeschwindigkeit und Brechungsindex                                   | 8         |
| 1.3.5    | Energiefluss und Poyntingvektor                                                  | 8         |
| 1.3.6    | Newton: Dispersion, Wellenlängen und wahrgenommene Farbe                         | 9         |
| 1.3.7    | Spektrum elektromagnetischer Wellen                                              | 10        |
| 1.4      | Beschreibung von Licht als Teilchen                                              | 10        |
| 1.5      | Gültigkeitsbereiche der Beschreibungen durch geometrische Optik oder Wellenoptik | 11        |
| 1.6      | Vereinfachte Beschreibungsprinzipien der Optik                                   | 12        |
| 1.6.1    | Fermat-Prinzip der geometrischen Optik                                           | 13        |
| 1.6.2    | Huygens-Prinzip der Wellenoptik                                                  | 15        |
| 1.7      | Interpretation und Anwendungen des Huygens'schen Prinzips                        | 17        |
| 1.7.1    | Einschub: Beschleunigte Ladungen strahlen                                        | 17        |
| 1.7.2    | Strahlungsemission eines Hertz'schen Dipols                                      | 19        |
| 1.7.3    | Ausbreitung von Licht in Materie                                                 | 20        |
| 1.7.4    | Interpretation des Fermat'schen Prinzips                                         | 21        |
| 1.7.5    | Von Reflexion zu diffuser Streuung: der Einfluss von Oberflächenrauigkeit        | 22        |
| 1.8      | Kurzer Abriss der Wissenschaftsgeschichte der Optik                              | 23        |
|          | Verständnisfragen und Übungsaufgaben                                             | 25        |
|          | Literatur                                                                        | 26        |
| <b>2</b> | <b>Geometrische Optik</b>                                                        | <b>27</b> |
| 2.1      | Einführung                                                                       | 28        |
| 2.2      | Reflexion, Brechung und Totalreflexion                                           | 28        |
| 2.2.1    | Einfallsebene, Zeichenebene, Winkel                                              | 29        |
| 2.2.2    | Reflexionsgesetz                                                                 | 30        |
| 2.2.3    | Brechungsgesetz                                                                  | 30        |
| 2.2.4    | Totalreflexion                                                                   | 32        |
| 2.3      | Dispersion                                                                       | 33        |
| 2.4      | Anwendung von Prismen                                                            | 35        |
| 2.4.1    | Umlenkprismen                                                                    | 35        |
| 2.4.2    | Prismen in Spektrometern                                                         | 35        |

|       |                                                                              |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5   | Optische Abbildungen und Spiegel .....                                       | 38 |
| 2.5.1 | Definition optischer Abbildungen .....                                       | 38 |
| 2.5.2 | Ebene Spiegel und Winkelspiegel .....                                        | 39 |
| 2.5.3 | Nichtebene Konkav- und Konvexspiegel .....                                   | 41 |
|       | a) Abbildungsgleichung sphärischer Spiegel und Bildkonstruktion ...          | 42 |
|       | b) Mathematische Beschreibung und Vorzeichenkonventionen .....               | 44 |
|       | c) Beispiele und einfache Experimente .....                                  | 46 |
|       | d) Ausgewählte Anwendung: Nutzung der Sonnenenergie .....                    | 48 |
|       | e) Anwendungen im Alltag: Reflexion von Fenstern und<br>Fensterfronten ..... | 50 |
|       | f) Der neue Trend: Freiflächenspiegel .....                                  | 51 |
| 2.6   | Abbildungen mit Linsen .....                                                 | 51 |
| 2.6.1 | Abbildung durch einmalige Brechung .....                                     | 52 |
| 2.6.2 | Abbildung durch zweimalige Brechung: dünne Linsen .....                      | 52 |
|       | a) Beschreibende Größen und Vorzeichenkonventionen .....                     | 53 |
|       | b) Linsentypen .....                                                         | 54 |
|       | c) Bildkonstruktionen .....                                                  | 56 |
|       | d) Beispiel und einfache Experimente .....                                   | 57 |
| 2.6.3 | Abbildungsfehler .....                                                       | 59 |
|       | a) Chromatische Aberration .....                                             | 60 |
|       | b) sphärische Aberration .....                                               | 61 |
|       | c) weitere Aberrationen .....                                                | 62 |
| 2.6.4 | Abbildung durch Linsenkombinationen .....                                    | 63 |
| 2.6.5 | Dicke Linsen .....                                                           | 64 |
| 2.6.6 | Spezielle Linsen .....                                                       | 66 |
|       | a) Fresnellinsen .....                                                       | 66 |
|       | b) Gradientenindexlinsen .....                                               | 67 |
| 2.7   | Einfache optische Geräte .....                                               | 67 |
| 2.7.1 | Auge und Brille .....                                                        | 67 |
|       | a) Standardauge .....                                                        | 67 |
|       | b) Fehlsichtigkeiten .....                                                   | 68 |
|       | c) Bildorientierung und Wahrnehmung .....                                    | 68 |
| 2.7.2 | Lupe und Mikroskop .....                                                     | 68 |
| 2.7.3 | Teleskope und Strahlaufweiter .....                                          | 70 |
|       | a) Linsenteleskope .....                                                     | 70 |
|       | b) Spiegelteleskope .....                                                    | 71 |
|       | c) Strahlaufweiter .....                                                     | 72 |
| 2.7.4 | Lochkameras .....                                                            | 72 |
| 2.7.5 | Linsenkameras: von Spiegelreflexkameras zu Smartphone-Systemen ...           | 75 |
|       | a) Gesichtsfeldwinkel und Detektoren .....                                   | 75 |
|       | b) Blendenzahl .....                                                         | 76 |
|       | c) Smartphone-Objektive .....                                                | 76 |
| 2.7.6 | Projektionsgeräte .....                                                      | 77 |
|       | a) Analoge Geräte: Overheadprojektoren .....                                 | 78 |
|       | b) Digitale Projektoren .....                                                | 79 |
| 2.7.7 | Lichtleiter .....                                                            | 80 |
|       | a) Einführung und einfache Experimente .....                                 | 80 |
|       | b) Lichtausbreitung in Stufenindexfasern .....                               | 81 |
|       | c) Modendispersion: zeitliche Verschmierung .....                            | 83 |
|       | d) Ausbreitung in inhomogenen Medien: Gradientenindexfasern ....             | 84 |
|       | e) Verluste bei Biegung von Lichtleitern .....                               | 86 |
|       | f) Schwächung in Fasern: das db-Maß .....                                    | 87 |

|          |                                                                                                       |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.8      | Blenden in optischen Strahlengängen (weiterführendes Thema) . . . . .                                 | 88  |
| 2.8.1    | Aperturblenden, Pupillen und abbildender Strahlengang . . . . .                                       | 89  |
| 2.8.2    | Feldblenden, Luken und bildbegrenzender Strahlengang . . . . .                                        | 91  |
| 2.9      | Ray Tracing und Optiksoftware . . . . .                                                               | 92  |
|          | Verständnisfragen und Übungsaufgaben . . . . .                                                        | 95  |
|          | Reflexion und Brechung, Strahlverläufe, Dispersion, Prismen . . . . .                                 | 95  |
|          | Spiegel . . . . .                                                                                     | 96  |
|          | Linsen und optische Geräte, Blenden . . . . .                                                         | 98  |
|          | Literatur . . . . .                                                                                   | 100 |
| <b>3</b> | <b>Wellenoptik</b> . . . . .                                                                          | 103 |
| 3.1      | Einführung . . . . .                                                                                  | 104 |
| 3.2      | Materialeigenschaft Brechungsindex . . . . .                                                          | 105 |
| 3.2.1    | Einfaches mikroskopisches Modell für den Brechungsindex . . . . .                                     | 105 |
|          | a) Brechungsindex von 1-atomigen Gasen und Dielektrika<br>durch elektronische Polarisierung . . . . . | 106 |
|          | b) Warum dominiert für sichtbares Licht die elektronische<br>Polarisation? . . . . .                  | 108 |
|          | c) Vergleich des klassischen mit dem quantenmechanischen<br>Ergebnis . . . . .                        | 109 |
|          | d) Brechungsindex von Metallen . . . . .                                                              | 109 |
| 3.2.2    | Abschwächung von Strahlung in Materie . . . . .                                                       | 110 |
| 3.2.3    | Übersicht ausgewählter optischer Materialien . . . . .                                                | 110 |
|          | a) Gase . . . . .                                                                                     | 111 |
|          | b) Flüssigkeiten . . . . .                                                                            | 111 |
|          | c) Dielektrische Festkörper . . . . .                                                                 | 112 |
|          | d) Metalle . . . . .                                                                                  | 114 |
| 3.3      | Lineare Polarisierung . . . . .                                                                       | 116 |
| 3.3.1    | Einfache Polarisatoren und Gesetz von Malus . . . . .                                                 | 116 |
| 3.3.2    | Linearpolarisation durch Reflexion: Brewsterwinkel . . . . .                                          | 118 |
| 3.4      | Reflexion und Transmission an Grenzflächen . . . . .                                                  | 120 |
| 3.4.1    | Fresnel-Gleichungen für nichtmagnetische Dielektrika . . . . .                                        | 120 |
| 3.4.2    | Winkelabhängige Reflexion und Transmission transparenter<br>Materialien . . . . .                     | 121 |
|          | a) Reflexionsgrad von Glas bei senkrechtem Einfall: Einfluss der<br>Dispersion . . . . .              | 121 |
|          | b) Reflexionsgrade für den Luft-Glas-Übergang als Funktion des<br>Einfallswinkels . . . . .           | 122 |
|          | c) Transmission planparalleler Platten . . . . .                                                      | 122 |
| 3.4.3    | Ergebnisse für absorbierende Materialien . . . . .                                                    | 124 |
| 3.4.4    | Etwas unsichtbar machen: sind Tarnkappen möglich? . . . . .                                           | 126 |
| 3.5      | Optische Anisotropie, Doppelbrechung und Polarisierung . . . . .                                      | 126 |
| 3.5.1    | Mikroskopische Begründung der Anisotropie . . . . .                                                   | 127 |
| 3.5.2    | Konsequenz der Anisotropie für die Ausbreitung von Licht . . . . .                                    | 129 |
|          | a) Optisches Phänomen Doppelbrechung . . . . .                                                        | 129 |
|          | b) Mikroskopische Begründung des optischen Phänomens . . . . .                                        | 130 |
| 3.5.3    | Phasenverschiebungen und allgemeine Beschreibung der<br>Polarisation von Licht . . . . .              | 132 |
| 3.5.4    | Doppelbrechende optische Komponenten . . . . .                                                        | 134 |
| 3.6      | Wellenphänomene bei Totalreflexion. . . . .                                                           | 135 |
| 3.6.1    | Totalreflexion und evaneszente Wellen . . . . .                                                       | 135 |
| 3.6.2    | ATR Spektroskopie . . . . .                                                                           | 136 |



|          |                                                                                           |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.3    | Nichtgeradlinige Lichtausbreitung in optisch inhomogenen Medien .....                     | 137        |
| 3.6.4    | Wellenoptische Phänomene in Lichtleitern .....                                            | 138        |
| 3.7      | Interferenz und Beugung .....                                                             | 139        |
| 3.7.1    | Interferenzphänomene .....                                                                | 140        |
|          | a) Interferenz zweier ebener Wellen .....                                                 | 140        |
|          | b) Doppelblende .....                                                                     | 141        |
|          | c) Doppelspalt .....                                                                      | 142        |
|          | d) Vielfachspalte und Gitter .....                                                        | 143        |
|          | e) Anwendung Gitterspektrometer .....                                                     | 144        |
|          | f) Anwendung Zweistrahlinterferometer .....                                               | 146        |
|          | g) Anwendung dielektrische Beschichtungen .....                                           | 147        |
| 3.7.2    | Beugung .....                                                                             | 149        |
|          | a) Fraunhoferbeugung am Spalt: einfache Bestimmung der Minima (und Maxima) .....          | 151        |
|          | b) Fraunhoferbeugung für beliebige Blenden, Rechteck-, Loch- und Kreisringblenden .....   | 153        |
|          | c) Fraunhofer-Beugung an Doppelspalt, Mehrfachblenden und Gitter .....                    | 157        |
|          | d) Prinzip von Babinet: komplementäre Blenden .....                                       | 159        |
|          | e) Beugungsobjekte vorgegebener Symmetrie mit statistischer räumlicher Verteilung .....   | 160        |
|          | f) Fourieroptik : das Array Theorem .....                                                 | 161        |
|          | g) Lochblende oder Kugel: 2-dimensionale Beugung oder 3-dimensionale Streuung .....       | 163        |
| 3.7.3    | Kohärenz .....                                                                            | 164        |
|          | a) Zeitliche Kohärenz: .....                                                              | 165        |
|          | b) Räumliche Kohärenz: .....                                                              | 167        |
| 3.7.4    | Bildentstehungstheorie und Auflösungsvermögen optischer Instrumente .....                 | 168        |
|          | a) Inkohärente Punktlichtquellen im Unendlichen .....                                     | 168        |
|          | b) Kohärente Punktlichtquellen im Unendlichen .....                                       | 170        |
|          | c) Abbe'sche Abbildungstheorie, Auflösungsvermögen Mikroskop und räumliches Filtern ..... | 170        |
| 3.7.5    | Ausblick: Metalinsen und linsenlose Abbildungen .....                                     | 174        |
|          | Verständnisfragen und Übungsaufgaben .....                                                | 174        |
|          | Literatur .....                                                                           | 176        |
| <b>4</b> | <b>Wechselwirkung von Strahlung mit Materie: Quantenoptik .....</b>                       | <b>181</b> |
| 4.1      | Einleitung .....                                                                          | 181        |
| 4.1.1    | Beginn der Quantenphysik .....                                                            | 181        |
| 4.1.2    | Welle-Teilchen-Dualismus .....                                                            | 183        |
| 4.1.3    | Vom Bohr-Modell zur Schrödingergleichung .....                                            | 184        |
| 4.2      | Quantisierte Energieniveaus .....                                                         | 185        |
| 4.2.1    | Atome .....                                                                               | 185        |
| 4.2.2    | Moleküle .....                                                                            | 188        |
|          | a) Elektronische Energieniveaus .....                                                     | 188        |
|          | b) Vibrations- und Rotationsanregungen .....                                              | 189        |
|          | Moleküle mit mehr als zwei Atomen .....                                                   | 190        |
| 4.2.3    | Energieniveaus in Festkörpern .....                                                       | 191        |
|          | a) Kristalline Festkörper .....                                                           | 191        |
|          | b) Amorphe Körper/Fluide, insbesondere Wasser .....                                       | 193        |

|          |                                                                                       |     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3      | Wechselwirkung von Licht mit Materie: Resonante Übergänge .....                       | 194 |
| 4.3.1    | Atome .....                                                                           | 194 |
| 4.3.2    | Moleküle .....                                                                        | 196 |
|          | a) Vibrationen isoliert .....                                                         | 196 |
|          | b) Rotationen isoliert .....                                                          | 197 |
|          | c) Schwingungs-Rotationsbanden .....                                                  | 198 |
|          | d) Übergänge zwischen elektronischen Zuständen:                                       |     |
|          | Franck-Condon-Prinzip .....                                                           | 198 |
|          | e) Übersicht Molekülspektren .....                                                    | 200 |
| 4.3.3    | Beispiele: gelöste Farbstoffe, Olivenöl und gasförmige Jodmoleküle ...                | 200 |
|          | a) Farbstoffmoleküle in der Technik .....                                             | 200 |
|          | b) Farbstoffmoleküle in Nahrungsmitteln .....                                         | 201 |
|          | c) Spektren elektronisch angeregter molekularer zweiatomiger                          |     |
|          | Gase: das Beispiel $I_2$ .....                                                        | 202 |
| 4.3.4    | Nichtmetallische Festkörper .....                                                     | 203 |
| 4.3.5    | Metalle .....                                                                         | 205 |
| 4.4      | Wechselwirkung von Licht mit Materie: nichtresonante Anregung .....                   | 205 |
| 4.4.1    | Elastische Streuung an Objekten mit $\varnothing_{Obj} \ll \lambda$ .....             | 206 |
|          | a) Rayleighstreuung an Atomen und Molekülen .....                                     | 206 |
|          | b) Streuung durch Dichtefluktuationen in Flüssigkeiten .....                          | 207 |
|          | c) Seitliche Streuung in Gasen, Flüssigkeiten und transparenten                       |     |
|          | Festkörpern .....                                                                     | 207 |
|          | d) Quantenmechanische Beschreibung der Rayleigh-Streuung .....                        | 208 |
| 4.4.2    | Inelastische Streuung an Molekülen: Ramanstreuung .....                               | 209 |
| 4.4.3    | Streuung an Objekten mit $\varnothing_{Obj} \cong / \gg \lambda$ : Mie-Streuung ..... | 209 |
|          | a) Einführung .....                                                                   | 209 |
|          | b) Theorie .....                                                                      | 211 |
|          | c) Ausgewählte Ergebnisse .....                                                       | 212 |
|          | Verständnisfragen und Übungsaufgaben .....                                            | 215 |
|          | Literatur: Nützliche Lehrbücher/Monographien .....                                    | 216 |
| <b>5</b> | <b>Detektoren und Lichtquellen</b> .....                                              | 219 |
| 5.1      | Detektoren .....                                                                      | 220 |
| 5.1.1    | Einführung .....                                                                      | 220 |
| 5.1.2    | Thermische Detektoren .....                                                           | 220 |
|          | a) Thermoelement/Thermosäule .....                                                    | 220 |
|          | b) Bolometer .....                                                                    | 221 |
|          | c) Pyroelektrische Sensoren .....                                                     | 221 |
| 5.1.3    | Fotoelektrische Detektoren .....                                                      | 222 |
|          | a) Äußerer Fotoeffekt und Fotomultiplier .....                                        | 222 |
|          | b) innerer Fotoeffekt: Photodioden .....                                              | 223 |
| 5.2      | Beispiele für den Einsatz von Detektoren .....                                        | 225 |
| 5.2.1    | Einzeldetektoren in Spektrometern .....                                               | 225 |
|          | a) Beispiel Sonnenlichtspektren mit Gitterspektrometer .....                          | 225 |
|          | b) Detektoren in verschiedenen Spektrometertypen .....                                | 226 |
|          | c) Beispiel: Analyse derselben Lichtquelle mit                                        |     |
|          | Gitterspektrometer bei zwei Blazewellenlängen .....                                   | 227 |
| 5.2.2    | Flächenhafte Detektoren: focal plane arrays .....                                     | 227 |
|          | a) Spektrale Empfindlichkeiten .....                                                  | 227 |
|          | b) Räumliche Auflösung .....                                                          | 227 |
|          | c) Probleme messender Systeme: Non-uniformity Korrekturen .....                       | 229 |

|        |                                                                                         |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3    | Lichtquellen                                                                            | 229 |
| 5.3.1  | Temperaturstrahler                                                                      | 230 |
|        | a) Schwarzkörperstrahlung                                                               | 230 |
|        | b) Reale Temperaturstrahler und Emissionsgrad                                           | 231 |
|        | c) Glüh- und Halogenlampen                                                              | 231 |
| 5.3.2  | Entladungsbasierte Lichtquellen                                                         | 234 |
|        | a) Gasentladungslampen                                                                  | 234 |
|        | b) Spektrallampen                                                                       | 234 |
|        | c) Leuchtstofflampen                                                                    | 235 |
|        | d) Hoch- und Höchstdrucklampen                                                          | 235 |
| 5.3.3  | Leuchtdioden                                                                            | 237 |
|        | a) Prinzip                                                                              | 237 |
|        | b) Aufbau                                                                               | 237 |
|        | c) Materialien                                                                          | 238 |
|        | d) LEDs für weißes Licht                                                                | 239 |
|        | e) Temperaturabhängige Emission                                                         | 240 |
| 5.3.4  | Laser                                                                                   | 240 |
|        | a) Prinzip und Eigenschaften                                                            | 240 |
|        | b) Aufbau und Unterteilung                                                              | 241 |
|        | c) Beispiel Helium-Neon-Laser: Polarisation, longitudinale<br>Moden und Linienbreiten   | 243 |
|        | d) Beispiel Halbleiterlaser                                                             | 245 |
|        | e) Beispiel grüner Laserpointer                                                         | 247 |
| 5.3.5  | Laserstrahlen und Augensicherheit                                                       | 249 |
|        | a) Laserklassen                                                                         | 249 |
|        | b) Abschätzung typischer Bestrahlungsstärken von Sonne<br>und Lasern                    | 250 |
|        | Verständnisfragen und Übungsaufgaben                                                    | 251 |
|        | Literatur                                                                               | 251 |
| 6      | Visuelle Wahrnehmung                                                                    | 255 |
| 6.1    | Einleitung                                                                              | 256 |
| 6.1.1  | Quantitative Wahrnehmung mit dem Auge                                                   | 258 |
| 6.1.2  | Additive Farbmischung                                                                   | 259 |
| 6.1.3  | Lichtdetektion im Auge                                                                  | 261 |
| 6.2    | Subjektive Helligkeitswahrnehmung: von der Radiometrie zur Fotometrie                   | 262 |
| 6.2.1  | Einleitung                                                                              | 262 |
| 6.2.2  | Begriffe und Einheiten der Radiometrie                                                  | 264 |
| 6.2.3  | Lambertstrahler                                                                         | 266 |
| 6.2.4  | Entfernungsgesetz                                                                       | 267 |
| 6.2.5  | Radiometrisches Grundgesetz: Strahlungstransport von einer<br>Quelle zu einem Empfänger | 267 |
| 6.2.6  | Radiometrie bei Sonne und Mond                                                          | 267 |
|        | a) Sonne                                                                                | 267 |
|        | b) Mond                                                                                 | 268 |
| 6.2.7  | Begriffe und Einheiten der Fotometrie                                                   | 268 |
| 6.2.8  | Helligkeit und Leuchtdichte                                                             | 269 |
| 6.2.9  | Leuchtdichte, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke in Natur und<br>Umwelt                  | 270 |
| 6.2.10 | Lichtausbeute und Effizienz von Lichtquellen                                            | 271 |
| 6.3    | Quantitative Beschreibung von Farbe: Farbmetriken                                       | 273 |
| 6.3.1  | Empfindlichkeitskurven der Sehzellen                                                    | 273 |
| 6.3.2  | Farbmischung: Normspektralwerte, Spektrallinienzug und<br>CIE 1932 Farbdiaagramm        | 274 |



|          |                                                                                             |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.3    | Praktische Berechnung von Farborten mithilfe der Normspektralwertkurven .....               | 277        |
| 6.3.4    | Besonderheiten des Farbdigramms und empfindungsgemäße Farbsysteme .....                     | 279        |
| 6.3.5    | Farbwiedergabeindex .....                                                                   | 281        |
| 6.3.6    | Farbsysteme in der Praxis für digitale Bildverarbeitung und Farbdruck .....                 | 281        |
| 6.4      | Entstehung von Farben in Technik und Natur .....                                            | 282        |
| 6.4.1    | Einleitung .....                                                                            | 282        |
| 6.4.2    | Vergleich von additiver und idealer subtraktiver Mischung .....                             | 283        |
| 6.4.3    | Reale Kombination von additiver und subtraktiver Mischung in der Umwelt .....               | 284        |
|          | Verständnisfragen und Übungsaufgaben .....                                                  | 287        |
|          | Literatur .....                                                                             | 289        |
| <b>7</b> | <b>Licht und die Atmosphäre der Erde .....</b>                                              | <b>291</b> |
| 7.1      | Bestandteile der Atmosphäre .....                                                           | 291        |
| 7.1.1    | Gasförmige Bestandteile der Atmosphäre .....                                                | 291        |
|          | a) Trockene Luft .....                                                                      | 291        |
|          | b) Wasserdampf .....                                                                        | 292        |
|          | c) Ozonschicht und geladene Teilchen .....                                                  | 293        |
| 7.1.2    | Wassertropfen .....                                                                         | 295        |
|          | a) Entstehung und typische Größen .....                                                     | 295        |
|          | b) Tropfenformen .....                                                                      | 298        |
|          | c) Fallgeschwindigkeiten .....                                                              | 298        |
| 7.1.3    | Eiskristalle .....                                                                          | 299        |
|          | a) Entstehung .....                                                                         | 299        |
|          | b) Formen und Größen .....                                                                  | 300        |
|          | c) Orientierungen und Fallgeschwindigkeiten .....                                           | 301        |
| 7.1.4    | Aerosole .....                                                                              | 302        |
|          | a) Ursprung .....                                                                           | 303        |
|          | b) Größenverteilungen und Verweildauern .....                                               | 303        |
| 7.2      | Der vertikale Aufbau der Atmosphäre .....                                                   | 304        |
| 7.3      | Physikalische Prozesse des Lichts mit den Bestandteilen der Atmosphäre ...                  | 305        |
| 7.4      | Klassifikation der Phänomene atmosphärischer Optik .....                                    | 305        |
| 7.4.1    | Einteilung nach theoretischen Modellen .....                                                | 306        |
| 7.4.2    | Einteilung nach Bestandteilen der Atmosphäre .....                                          | 306        |
| 7.4.3    | Praktische Einteilung nach Phänomenen .....                                                 | 307        |
|          | Literatur .....                                                                             | 307        |
| <b>8</b> | <b>Luftspiegelungen: Oasen, Seeungeheuer und weitere Spielereien der Fata Morgana .....</b> | <b>309</b> |
| 8.1      | Luftspiegelungen in Kultur und Gesellschaft .....                                           | 310        |
| 8.2      | Die astronomische Refraktion und Flimmern der Sterne .....                                  | 311        |
| 8.3      | Verwandte Wahrnehmungstäuschungen .....                                                     | 315        |
| 8.3.1    | Abplattung des Himmelsgewölbes .....                                                        | 315        |
| 8.3.2    | Mondillusion .....                                                                          | 315        |
| 8.4      | Luftspiegelungen: Qualitative Beschreibung und Beobachtungen .....                          | 317        |
| 8.4.1    | Untere Luftspiegelungen .....                                                               | 317        |
|          | a) qualitative Erklärung .....                                                              | 317        |
|          | b) Beobachtungen .....                                                                      | 319        |
| 8.4.2    | Obere Spiegelungen .....                                                                    | 321        |
|          | a) Qualitative Erklärung .....                                                              | 321        |
|          | b) Beobachtungen .....                                                                      | 322        |



|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.5      | Quantitative Beschreibung von Luftspiegelungen .....                     | 325        |
| 8.5.1    | Brechungsindexverlauf in der Atmosphäre .....                            | 325        |
| 8.5.2    | Geradlinige und gekrümmte Lichtstrahlen in der Atmosphäre .....          | 326        |
| 8.5.3    | Ducts: Lichtleiter in der Atmosphäre .....                               | 329        |
| 8.5.4    | Strahlverfolgungsmethoden: ein ausgewähltes Ergebnis .....               | 331        |
| 8.6      | Simulationsexperimente von Luftspiegelungen .....                        | 332        |
| 8.6.1    | Sichtbarmachung der Luftunruhe .....                                     | 332        |
| 8.6.2    | Untere Spiegelungen .....                                                | 334        |
| 8.6.3    | Obere Spiegelungen .....                                                 | 334        |
|          | Literatur .....                                                          | 337        |
| <b>9</b> | <b>Regenbögen</b> .....                                                  | <b>341</b> |
| 9.1      | Bemerkungen zur Kulturgeschichte des Regenbogens .....                   | 342        |
| 9.1.1    | Regenbogen im Christentum .....                                          | 342        |
|          | a) Friedenszeichen .....                                                 | 342        |
|          | b) Das Jüngste Gericht .....                                             | 343        |
|          | c) Symbol der Verherrlichung .....                                       | 343        |
| 9.1.2    | Das Brückensymbol .....                                                  | 343        |
| 9.1.3    | Das Glückszeichen .....                                                  | 344        |
| 9.1.4    | Der Unglücksbote, Unglücksbringer .....                                  | 344        |
| 9.1.5    | Darstellungen in der Kunst .....                                         | 345        |
| 9.1.6    | Regenbogensymbole im 20. Jahrhundert .....                               | 345        |
| 9.2      | Beobachtungen zum Regenbogen .....                                       | 346        |
| 9.3      | Einfache Erklärung des Regenbogens mithilfe der geometrischen Optik .... | 350        |
| 9.3.1    | Regentropfen .....                                                       | 350        |
| 9.3.2    | Der primäre Regenbogen .....                                             | 352        |
|          | a) Leuchterscheinung beim Regenbogenwinkel .....                         | 352        |
|          | b) Die Farben des Regenbogens und räumliche Ausdehnung .....             | 355        |
|          | c) Andauerndes Wechselspiel .....                                        | 356        |
| 9.3.3    | Der sekundäre und höhere Regenbögen .....                                | 356        |
| 9.4      | Besonderheiten bei Regenbögen durch die Wellennatur des Lichts .....     | 359        |
| 9.4.1    | Polarisation des Regenbogens .....                                       | 359        |
| 9.4.2    | Überzählige Bögen und Farben im Regenbogen .....                         | 360        |
| 9.4.3    | Weißer Nebelbögen .....                                                  | 363        |
| 9.4.4    | Vollständige Beschreibung mithilfe der Elektrodynamik:                   |            |
|          | Mie-Theorie .....                                                        | 363        |
| 9.4.5    | Weitere Besonderheiten .....                                             | 365        |
| 9.5      | Einfache Experimente .....                                               | 367        |
| 9.5.1    | Experimente mit weißem Licht .....                                       | 367        |
|          | a) Wassertropfen aus dem Gartenschlauch .....                            | 367        |
|          | b) „Regenbogen“ von einer großen Glaskugel .....                         | 367        |
|          | c) Minimalablenkung an der Glaskugel im Experiment .....                 | 368        |
|          | d) „Regenbogen“ von einem einzelnen Wassertropfen .....                  | 369        |
|          | e) Polarisation des Regenbogens .....                                    | 369        |
| 9.5.2    | Experimente mit einfarbigem Licht .....                                  | 369        |
|          | a) Demonstration der Airy-Ringe bei einfarbiger Beleuchtung .....        | 369        |
|          | b) Ausmessung der Winkelverteilungen der Ringsysteme .....               | 370        |
|          | c) Lichtwege im „Tropfen“ und höhere Regenbögen .....                    | 371        |
|          | d) Regenbögen anderer Flüssigkeiten und weitere Experimente .....        | 371        |
| 9.6      | Übersicht über die Wissenschaftsgeschichte des Regenbogens .....         | 372        |
|          | Literatur .....                                                          | 375        |



|           |                                                                         |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>10</b> | <b>Koronen, Glorien und verwandte Erscheinungen</b>                     | <b>379</b> |
| 10.1      | Vorbemerkungen                                                          | 380        |
| 10.2      | Koronen                                                                 | 380        |
| 10.2.1    | Beschreibung des Phänomens                                              | 380        |
| 10.2.2    | Koronaerscheinungen in der Kultur und die Bezeichnungsweise von Koronen | 382        |
| 10.2.3    | Grundlegende Erklärung der Korona                                       | 382        |
|           | a) Qualitative Erklärung durch Beugung                                  | 383        |
|           | b) Beugung von Licht an kreisförmigen Hindernissen                      | 383        |
|           | c) Entstehen des Phänomens in der Natur                                 | 384        |
| 10.2.4    | Details der Erklärung von Koronen                                       | 385        |
|           | a) Entstehen farbiger Ringe                                             | 385        |
|           | b) Öffnungswinkel der Ringe und Tropfengröße                            | 385        |
|           | c) Vergleich der Beugungstheorie mit Mie-Theorie                        | 387        |
|           | d) Breite der Tropfengrößenverteilung                                   | 387        |
|           | e) Tropfengrößenbereich für Entstehen von Koronen                       | 389        |
| 10.2.5    | Koronen ohne Wassertropfen                                              | 389        |
|           | a) Beobachtungen an Wolken mit Eiskristallen                            | 389        |
|           | b) Pollenkoronen                                                        | 390        |
| 10.2.6    | Irisierende Wolken                                                      | 392        |
| 10.2.7    | Bishop'scher Ring                                                       | 392        |
| 10.2.8    | Einfache Experimente                                                    | 395        |
|           | a) 2-dimensionale einzelne Kreisblende                                  | 395        |
|           | b) 2-dimensionale statistische Verteilung vieler Kreisblenden           | 395        |
|           | c) 2-dimensionale Verteilung Blenden mit pollenähnlicher Geometrie      | 396        |
|           | d) 3-dimensionale Proben: Bärlappsporen                                 | 397        |
|           | e) Beschlagene Scheiben                                                 | 398        |
| 10.3      | Das Brockengespenst und weitere Glorienercheinungen                     | 399        |
| 10.3.1    | Beschreibung des Phänomens                                              | 399        |
| 10.3.2    | Inspiration eines Nobelpreises                                          | 401        |
| 10.3.3    | Grundlegende Erklärung der Glorien                                      | 402        |
|           | a) Glorie als Beugungsphänomen: Die Hypothese von Van de Hulst          | 402        |
|           | b) Probleme der Interpretation durch die Beugungstheorie                | 403        |
|           | c) Bestätigung der Erklärung durch die Mie-Theorie                      | 405        |
|           | d) Ausgewählte Ergebnisse der Mie Theorie                               | 406        |
| 10.3.4    | Details der Erklärung von Glorien                                       | 406        |
|           | a) Farbe der Ringe                                                      | 406        |
|           | b) Öffnungswinkel der Ringe und Tropfengröße                            | 406        |
|           | c) Breite der Tropfengrößenverteilung                                   | 408        |
|           | d) Polarisierung                                                        | 409        |
|           | e) Glorien an Eiskristallen                                             | 409        |
| 10.3.5    | Beobachtung von Glorien                                                 | 409        |
|           | a) Erdgebundene Beobachtungen                                           | 409        |
|           | b) Beobachtungen aus dem Weltraum                                       | 410        |
| 10.3.6    | Einfache Experimente                                                    | 410        |
|           | a) Nachweis leuchtender Kreislänge in Rückwärtsrichtung                 | 410        |
|           | b) Beugungsexperimente                                                  | 411        |
|           | c) Künstliche farbige Glorienbeobachtungen                              | 412        |
|           | Literatur                                                               | 413        |

|           |                                                                                    |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>11</b> | <b>Haloerscheinungen am Himmel: Natürliche Ursache oder göttliche</b>              |     |
|           | <b>Warnung?</b>                                                                    | 417 |
| 11.1      | Mythen und Aberglauben                                                             | 418 |
| 11.2      | Beschreibung typischer Beobachtungen                                               | 419 |
| 11.3      | Eiskristalle in der Atmosphäre                                                     | 421 |
| 11.3.1    | Geometrien                                                                         | 421 |
| 11.3.2    | Orientierungen                                                                     | 421 |
| 11.4      | Haloerscheinungen durch Lichtbrechung in Eiskristallen                             | 422 |
| 11.4.1    | Lichtablenkung durch zweimalige Brechung in Eiskristallen                          | 422 |
| 11.4.2    | Nebensonnen                                                                        | 423 |
|           | a) Sonne am Horizont (Sonnenhöhe $0^\circ$ )                                       | 423 |
|           | b) Sonne am Himmel (Sonnenhöhe $> 0^\circ$ )                                       | 426 |
| 11.4.3    | Ringhalos                                                                          | 427 |
|           | a) $22^\circ$ -Ringe                                                               | 427 |
|           | b) $46^\circ$ -Ringe                                                               | 429 |
|           | c) Gibt es auch Nebensonnen zum $46^\circ$ -Halo?                                  | 429 |
| 11.4.4    | Zirkumzenital- und Zirkumhorizontalbogen                                           | 430 |
| 11.4.5    | Umschriebener Halo und Berührungsbögen                                             | 433 |
| 11.5      | Haloerscheinungen durch Reflexionen an Eiskristallen                               | 433 |
| 11.5.1    | Horizontalkreis                                                                    | 433 |
| 11.5.2    | $120^\circ$ -Nebensonnen                                                           | 434 |
| 11.5.3    | Untersonnen und Sonnensäulen                                                       | 435 |
| 11.6      | Haloerscheinungen durch Kombinationen von Brechung und Reflexion                   | 438 |
| 11.7      | Überblick über in mittleren Breiten häufig beobachtbare Haloerscheinungen          | 439 |
| 11.8      | Seltene oder komplexe Haloerscheinungen und Himmelsarchäologie                     | 440 |
| 11.9      | Computersimulationen                                                               | 443 |
| 11.10     | Experimente                                                                        | 444 |
| 11.10.1   | Drehbares Glasprisma: Bestimmung des Minimalwinkels                                | 445 |
| 11.10.2   | Rotierendes Glasprisma: Nebensonnen und Horizontalkreis                            | 445 |
| 11.10.3   | Rotierendes Hexagon: Nebensonnen, Horizontalkreis, Untersonne und Unternebensonnen | 446 |
| 11.10.4   | Demonstration des oberen Berührungsbogens                                          | 447 |
| 11.10.5   | Demonstrationen von Ringhalos                                                      | 448 |
|           | Literatur                                                                          | 449 |
| <b>12</b> | <b>Lichtstreuung und Himmelsfarben</b>                                             | 453 |
| 12.1      | Eigenschaften des Himmels für eine molekulare Atmosphäre                           | 454 |
| 12.1.1    | Geschichtliches                                                                    | 454 |
| 12.1.2    | Rayleigh-Streuung und Blauer Himmel                                                | 455 |
|           | a) Farbabhängigkeit der Rayleigh-Streuung: das Blau des klaren Himmels             | 456 |
|           | b) Polarisierung des Himmelslichts                                                 | 457 |
|           | c) Schwächung des Lichts durch die Atmosphäre: die optische Dicke                  | 460 |
|           | d) Schwächung des Lichts als Funktion der Zenitdistanz: Air-Mass                   | 463 |
|           | e) Weißer Horizont und Helligkeiten des Himmels bei Rayleigh-Streuung              | 464 |
|           | f) Blaue Berge                                                                     | 466 |
|           | g) Welche Farbe hat der Nachthimmel?                                               | 468 |
| 12.2      | Himmelsfarben realer Atmosphären: von Pastellfarben und glutrotem Himmel           | 468 |
| 12.2.1    | Kultur und Geschichte                                                              | 469 |
| 12.2.2    | Ergebnisse der Mie-Streuung erläutert an Beispielen                                | 470 |
|           | a) Farbabhängigkeit der Mie-Streuung: blaue Sonne, blauer Mond                     | 470 |

|           |                                                                                       |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|           | b) Teilchengrößenabhängigkeit bei der Mie-Streuung:<br>durch Regen sehen . . . . .    | 473        |
|           | c) Schwächung des Lichts durch Mie-Streuung:<br>undurchsichtige Wolken . . . . .      | 474        |
|           | d) Winkelabhängigkeit bei Mie-Streuung: der Staub im Zimmer . . . .                   | 474        |
|           | e) Polarisation bei Mie-Streuung: der tägliche Regenbogen in<br>den Wolken . . . . .  | 475        |
| 12.2.3    | Übliche Farben von Sonne/Mond . . . . .                                               | 476        |
|           | a) Farben bei klarer Atmosphäre: Rayleigh-Streuung . . . . .                          | 476        |
|           | b) Farben bei zusätzlicher Streuung an Aerosolen . . . . .                            | 479        |
| 12.2.4    | Helligkeit und Farben der Atmosphäre . . . . .                                        | 480        |
|           | a) Beleuchtungsstärke durch den Himmel . . . . .                                      | 481        |
|           | b) Modell zum Verständnis der Farberscheinungen . . . . .                             | 481        |
|           | c) Entstehung der Farben in Horizontnähe bei reiner<br>Rayleigh-Streuung . . . . .    | 482        |
|           | d) Zusätzliche Streuung an Aerosolen . . . . .                                        | 483        |
|           | e) Das Purpurlicht . . . . .                                                          | 485        |
|           | f) Himmelfarben bei Dämmerung in Zenitnähe . . . . .                                  | 486        |
|           | g) Himmelfarben als Funktion der Winkeldistanz zur Sonne . . . . .                    | 489        |
| 12.2.5    | Wolkenfarben . . . . .                                                                | 490        |
|           | a) Weiße Wolken . . . . .                                                             | 490        |
|           | b) farbige Wolken . . . . .                                                           | 492        |
| 12.2.6    | Farbige Wasserreflexionen bei tief stehender Sonne . . . . .                          | 492        |
| 12.2.7    | Computersimulationen der optischen<br>Transmission der Atmosphäre . . . . .           | 493        |
| 12.3      | Experimente . . . . .                                                                 | 494        |
| 12.3.1    | Abschätzung der Dicke der Atmosphäre . . . . .                                        | 494        |
| 12.3.2    | Demonstrationsexperimente zu Rayleigh- und Mie-Streuung . . . . .                     | 495        |
|           | a) Reine Gase und Luft . . . . .                                                      | 495        |
|           | b) Blauer und weißer Rauch . . . . .                                                  | 497        |
|           | c) Flüssigkeiten . . . . .                                                            | 498        |
|           | d) Teilchen definierter Größe. . . . .                                                | 499        |
|           | e) Teilchenwachstum bei chemischen Reaktionen . . . . .                               | 500        |
|           | Literatur . . . . .                                                                   | 502        |
| <b>13</b> | <b>Weitere Phänomene aufgrund von Lichtstreuung . . . . .</b>                         | <b>505</b> |
| 13.1      | Sichtweiten . . . . .                                                                 | 506        |
| 13.1.1    | Geometrische Sichtweiten . . . . .                                                    | 506        |
| 13.1.2    | Erhöhung der Sichtweite durch Refraktion . . . . .                                    | 507        |
| 13.1.3    | Sinnesphysiologie und Wahrnehmung . . . . .                                           | 508        |
| 13.1.4    | Einfluss der Lichtstreuung in der Atmosphäre auf den Kontrast . . .                   | 509        |
|           | a) Rayleighstreuung an Luftmolekülen . . . . .                                        | 509        |
|           | b) Absorption von Ozon und Stickoxiden . . . . .                                      | 511        |
|           | c) Zusätzliche Streuung an Wassertropfen: kurze Sichtweiten . . . . .                 | 511        |
|           | d) Absorption und Streuung durch Aerosole . . . . .                                   | 514        |
|           | e) Fernsicht jenseits geometrischer Grenzen bis 250 km . . . . .                      | 514        |
|           | f) Fernsicht jenseits 400 km: Kriterien und Beobachtungen. . . . .                    | 518        |
| 13.1.5    | Erhöhung von Kontrast und Sichtweite im Infrarot . . . . .                            | 519        |
| 13.1.6    | Einfache Laborexperimente zu Sichtweiten . . . . .                                    | 521        |
| 13.2      | Beobachtbarkeit atmosphärischer Phänomene: Beispiel Halos<br>und Regenbögen . . . . . | 522        |
| 13.3      | Farben des Wassers . . . . .                                                          | 523        |
| 13.3.1    | Klares kaltes blaues Wasser . . . . .                                                 | 524        |
| 13.3.2    | Klares heißes farbiges Wasser . . . . .                                               | 526        |



|           |                                                                                           |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.3.3    | Wasserfarben und Sichtweiten bei Anwesenheit zusätzlicher Inhaltsstoffe . . . . .         | 527        |
| 13.3.4    | Bestimmung von Sichttiefen in Gewässern: Secchi-Scheiben . . . . .                        | 529        |
| 13.3.5    | Von blauem Wasser zu blauem Eis . . . . .                                                 | 529        |
| 13.4      | Das grüne Leuchten . . . . .                                                              | 530        |
| 13.4.1    | Refraktion: die Atmosphäre als Prisma . . . . .                                           | 531        |
| 13.4.2    | Einfluss der Streuung und Winkelauflösung des Phänomens . . . . .                         | 532        |
| 13.4.3    | Die Notwendigkeit von Luftspiegelungen . . . . .                                          | 533        |
| 13.4.4    | Physiologische Effekte . . . . .                                                          | 534        |
| 13.4.5    | Grüne Säume bei Planetenbeobachtungen . . . . .                                           | 534        |
| 13.5      | Rückstreuung von rauen Oberflächen: Heiligenschein und <i>Opposition Effect</i> . . . . . | 535        |
| 13.6      | Licht- und Schattenstrahlen in der Atmosphäre . . . . .                                   | 537        |
| 13.6.1    | Schatten durch Berge, Wolken und Bäume . . . . .                                          | 537        |
| 13.6.2    | Schattenstrahlen im Experiment . . . . .                                                  | 540        |
| 13.6.3    | Das Rätsel des Spaceshuttle . . . . .                                                     | 541        |
|           | Literatur . . . . .                                                                       | 542        |
| <b>14</b> | <b>Bis in die Stratosphäre und darüber hinaus . . . . .</b>                               | <b>545</b> |
| 14.1      | Blitze: Entladungen in der Atmosphäre und <i>air glow</i> . . . . .                       | 546        |
| 14.2      | Polare stratosphärische Wolken und leuchtende Nachtwolken . . . . .                       | 551        |
| 14.3      | Polarlichter . . . . .                                                                    | 553        |
| 14.4      | Kometen, Meteore und künstliche Himmelskörper . . . . .                                   | 557        |
| 14.4.1    | Kometen . . . . .                                                                         | 557        |
| 14.4.2    | Meteore . . . . .                                                                         | 560        |
| 14.4.3    | Beobachtung künstlicher Himmelskörper: ISS und Satelliten . . . . .                       | 562        |
| 14.5      | Finsternisse im Sonnensystem . . . . .                                                    | 563        |
| 14.5.1    | Definition von Finsternis und Transit . . . . .                                           | 563        |
| 14.5.2    | Ursachen von Sonnen- und Mondfinsternissen . . . . .                                      | 564        |
| 14.5.3    | Beobachtungen während totaler Sonnenfinsternisse . . . . .                                | 567        |
| 14.5.4    | Farbe und Licht bei Mondfinsternissen . . . . .                                           | 572        |
| 14.5.5    | Transits . . . . .                                                                        | 575        |
|           | a) Merkur und Venus vor der Sonne . . . . .                                               | 576        |
|           | b) Monde vor dem Saturn . . . . .                                                         | 577        |
|           | c) Transits und Raumsonden . . . . .                                                      | 577        |
|           | d) Transits von Exoplaneten . . . . .                                                     | 577        |
| 14.5.6    | Totale Sonnenfinsternisse bis 2045 . . . . .                                              | 578        |
| 14.5.7    | Mondfinsternisse bis 2040 . . . . .                                                       | 581        |
| 14.6      | Wie viele Sterne sind für das Auge sichtbar? . . . . .                                    | 582        |
| 14.6.1    | Transmission der vertikalen Atmosphäre . . . . .                                          | 582        |
| 14.6.2    | Nachtsicht . . . . .                                                                      | 582        |
| 14.6.3    | Sternbeobachtungen mit dem Auge . . . . .                                                 | 582        |
| 14.6.4    | Sichtweiten ins Weltall mit dem bloßen Auge . . . . .                                     | 585        |
| 14.6.5    | Lichtverschmutzung . . . . .                                                              | 586        |
| 14.6.6    | Sternbeobachtungen durch interstellare Wolken und Nebel im nahen Infrarot . . . . .       | 586        |
| 14.7      | Wahrgenommene Farbe von Planeten, Monden und Sternen . . . . .                            | 587        |
| 14.7.1    | Farbe von Planeten und Monden . . . . .                                                   | 588        |
|           | a) Gesteinsplaneten und Monde ohne Atmosphäre . . . . .                                   | 588        |
|           | b) Gesteinsplaneten und Monde mit wenig Atmosphäre . . . . .                              | 588        |
|           | c) terrestrische Planeten und Monde mit Atmosphäre . . . . .                              | 589        |
|           | d) Gasplaneten . . . . .                                                                  | 589        |
| 14.7.2    | Farbe von Sternen . . . . .                                                               | 590        |

---

|        |                                                        |            |
|--------|--------------------------------------------------------|------------|
| 14.8   | Warum ist es nachts überhaupt dunkel? .....            | 591        |
| 14.8.1 | Warum es nachts taghell sein sollte! .....             | 592        |
| 14.8.2 | Warum es nachts dunkel ist! .....                      | 594        |
|        | a) Absorption durch Gas- und Staubwolken .....         | 594        |
|        | b) Nicht ausreichende, endliche Zahl von Sternen ..... | 594        |
| 14.8.3 | Gravitationslinsen .....                               | 596        |
|        | Epilog .....                                           | 599        |
|        | Literatur .....                                        | 599        |
|        | <b>Stichwortverzeichnis .....</b>                      | <b>603</b> |