

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Optische Wellen . . . . .</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Einige Grundbegriffe der Wellenlehre . . . . .  | 1         |
| 1.1.1 Ebene harmonische Wellen . . . . .  | 1         |
| 1.1.2 Phase einer Welle; Phasenänderung längs einer Wegstrecke und innerhalb einer Zeitspanne . . . . . | 3         |
| 1.1.3 Phasengeschwindigkeit und Ausbreitungskonstante . . . . .   | 4         |
| 1.1.4 Wellenlänge . . . . .   | 6         |
| 1.1.5 Wellengruppen und Gruppengeschwindigkeit . . . . .  | 6         |
| 1.2 Elektromagnetische Wellen . . . . .   | 9         |
| 1.2.1 Mathematische Beschreibung . . . . .  | 9         |
| 1.2.2 Transversale und longitudinale Feldanteile; Wellenbezeichnungen . . . . .                         | 11        |
| 1.2.3 Polarisierung . . . . .   | 13        |
| 1.2.4 Intensität und Leistung . . . . .   | 15        |
| 1.2.5 Komplexe Notation . . . . .   | 17        |
| 1.2.6 Freie Wellenausbreitung in Vakuum . . . . .   | 17        |
| 1.3 Licht als elektromagnetische Welle . . . . .  | 18        |
| 1.3.1 Frequenzmäßige Einordnung . . . . .   | 18        |
| 1.3.2 Phasengeschwindigkeit in Materie, Brechungsindex . . . . .  | 19        |
| 1.3.3 Gruppengeschwindigkeit in Materie, Gruppenbrechungsindex  | 20        |
| 1.3.4 Kohärenz realer optischer Wellen . . . . .  | 21        |
| 1.3.5 Strahlenmodell der Lichtausbreitung . . . . .   | 23        |
| <br>  |           |
| <b>2 Lichtwellenleiter . . . . .</b>  | <b>25</b> |
| 2.1 Dielektrische Wellenleiter . . . . .  | 25        |
| 2.2 Lichtwellenleiter in Faserform . . . . .  | 26        |
| 2.2.1 Einteilung nach dem Brechzahlprofil . . . . .   | 27        |
| 2.2.2 Einteilung nach der übertragbaren Modenvielfalt . . . . .   | 29        |
| 2.3 Integriert-optische Lichtwellenleiter . . . . .   | 30        |
| 2.3.1 Streifenleiter mit aufgesetzten oder versenkten Streifen . .                                      | 30        |
| 2.3.2 Streifenleiter mit Höhenprofilierung eines Kernfilms (Rippenleiter) . . . . .                     | 31        |
| 2.3.3 Funktionstypen und Substratmaterialien . . . . .  | 32        |

|   |    |
|---|----|
| <b>3 Geometrisch-optische Lichtwege in LWL</b>  | 35 |
| 3.1 Strahlenoptische Lichtwege im Stufenindex-LWL   | 35 |
| 3.1.1 Reelle Totalreflexion an einer Trennfläche  | 35 |
| 3.1.2 Prinzip der Lichtführung im Filmwellenleiter mit Stufenprofil                                       | 37 |
| 3.1.3 Lichtausbreitung in gebogenen LWL   | 38 |
| 3.2 Prinzip der Lichtführung in Gradientenindex-LWL mit parabolischem Brechzahlprofil                     | 39 |
| 3.2.1 Virtuelle Totalreflexion  | 39 |
| 3.2.2 Lichtwege in Filmwellenleitern mit Parabelprofil  | 41 |
| 3.3 Übertragung auf rotationssymmetrische Faser-LWL   | 45 |
| 3.3.1 Meridionalstrahlen, schiefe Strahlen, Helixstrahlen   | 46 |
| 3.3.2 Akzeptanzwinkel, Akzeptanzkegel, numerische Apertur   | 47 |
| <b>4 Berücksichtigung der Wellennatur des Lichtes</b>   | 51 |
| 4.1 Stufenprofil-Filmwellenleiter   | 51 |
| 4.1.1 Stehwellen  | 51 |
| 4.1.2 Interferenz bei mehrfacher Totalreflexion: charakteristische Gleichung                              | 55 |
| 4.1.3 Moden   | 60 |
| 4.1.4 Evanescente Felder und Intensitäten   | 62 |
| 4.1.5 Modenverhalten bei Biegung des LWL  | 65 |
| 4.2 Gradientenindex-Filmwellenleiter mit Parabelprofil  | 66 |
| 4.3 Übertragung auf rotationssymmetrische Faser-LWL und auf integriert-optische LWL                       | 67 |
| <b>5 Exakte Berechnung der Lichtausbreitung</b>   | 69 |
| 5.1 Faser-LWL mit Stufenprofil  | 69 |
| 5.1.1 Entwicklung einer Wellendifferentialgleichung aus den Maxwell'schen Gleichungen                     | 69 |
| 5.1.2 Geführte Moden als Lösung der „reduzierten“ Differentialgleichung                                   | 72 |
| 5.1.3 Lösungsversuch: LP-Moden (Moden mit einheitlich in derselben Richtung linear polarisierten Feldern) | 74 |
| 5.1.4 LP-Modenbilder in Stufenprofilfasern  | 79 |
| 5.1.5 Strahlungsmoden und Leckmoden   | 87 |
| 5.1.6 Kern-Mantel-Leistungsaufteilung, Moden-cutoff   | 89 |
| 5.1.7 Übergang zur Einmodigkeit, Gauß'sche Näherung für $LP_{01}$   | 91 |
| 5.1.8 Modenberechnung bei Verzicht auf einheitliche lineare Polarisation                                  | 92 |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.2      | Modenfelder in Gradientenprofilfasern . . . . .  | 94         |
| 5.3      | Modenfelder in integriert-optischen Lichtwellenleitern . . . . .                           | 96         |
| <b>6</b> | <b>Einige Grundlagen der optischen Nachrichtenübertragung . . . . .</b>                    | <b>99</b>  |
| 6.1      | Analoge und digitale Signale . . . . .   | 99         |
| 6.2      | Nachrichtenübertragung in Trägerfrequenztechnik . . . . .                                  | 100        |
| 6.2.1    | Analoge Übertragung . . . . .  | 101        |
| 6.2.2    | Binäre digitale Übertragung . . . . .  | 103        |
| 6.2.3    | Optische Wellen als Nachrichtenträger . . . . .  | 104        |
| 6.2.4    | Übertragungsgeschwindigkeit . . . . .  | 105        |
| 6.3      | Der Einfluß des Rauschens . . . . .  | 105        |
| 6.3.1    | Signal-Rausch-Verhältnis . . . . .   | 106        |
| 6.3.2    | Abnahme des Signal-Rausch-Verhältnisses durch Laufzeitunterschiede . . . . .               | 107        |
| 6.3.3    | Ursachen der Laufzeitunterschiede: Dispersion . . . . .                                    | 112        |
| 6.4      | Systemkenngrößen für die Übertragung von leistungsmoduliertem Licht . . . . .              | 114        |
| <b>7</b> | <b>Verluste in Lichtwellenleitern . . . . .</b>  | <b>115</b> |
| 7.1      | Quantitative Erfassung der Dämpfung . . . . .  | 115        |
| 7.2      | Dämpfung in Glasfaser-LWL . . . . .  | 118        |
| 7.2.1    | Intrinsische Verluste: IR-Absorption, Rayleighstreuung . .                                 | 118        |
| 7.2.2    | Extrinsische Verluste: Absorption durch Verunreinigungen, Makrobiegung der Faser . . . . . | 121        |
| 7.2.3    | Modenabhängigkeit der Dämpfung . . . . .   | 123        |
| 7.2.4    | Intrinsische Dämpfung in LWL aus Sulfidglas oder Fluoridglas . . . . .                     | 126        |
| 7.3      | Dämpfung in POF-Fasern . . . . .   | 128        |
| 7.4      | Dämpfung in integriert-optischen LWL . . . . .   | 130        |
| <b>8</b> | <b>Modenlaufzeitunterschiede (Modendispersion) . . . . .</b>                               | <b>133</b> |
| 8.1      | Laufzeiten nach dem Strahlenmodell in Stufenprofil- und Gradientenprofilfasern . . . . .   | 133        |
| 8.1.1    | Strahloptische Laufzeiten im Stufenprofil . . . . .  | 134        |
| 8.1.2    | Strahloptische Laufzeiten im Parabelprofil . . . . .                                       | 135        |
| 8.2      | Exakte Theorie der Modenlaufzeiten von LP-Moden . . . . .                                  | 138        |
| 8.2.1    | Stufenindex-LWL . . . . .  | 138        |
| 8.2.2    | Gradientenindex-LWL mit Potenzprofil . . . . .   | 143        |

|   |            |
|---|------------|
| 8.2.3 Profiloptimierung . . . . .   | 146        |
| <b>9 Einfluß der spektralen Breite der Lichtquelle: chromatische Dispersion . . . . .</b>     | <b>147</b> |
| 9.1 Mathematische Beschreibung . . . . .  | 149        |
| 9.1.1 Beiträge zur chromatischen Dispersion, Dispersionskoeffizienten . . . . .               | 149        |
| 9.1.2 Dispersionsnullstelle und dispersionsverschobene Faser . . . . .                        | 154        |
| 9.1.3 Verbesserung des Dispersionsverlaufes von Einmodenfasern durch W-Profilen . . . . .     | 156        |
| 9.2 Abschätzung der durch chromatische Dispersion verursachten Laufzeitunterschiede . . . . . | 158        |
| <b>10 Impulsverbreiterung und 3-dB-Grenzfrequenz . . . . .</b>                                | <b>161</b> |
| 10.1 Impulsübertragung . . . . .  | 161        |
| 10.1.1 Pulsantwortfunktion und das Problem der Leistungsaddition . . . . .                    | 161        |
| 10.1.2 Quantitative Erfassung der Impulsverbreiterung . . . . .                               | 163        |
| 10.1.3 Impulsverbreiterung einer Einmodenfaser . . . . .                                      | 165        |
| 10.1.4 Impulsverbreiterung einer Vielmodenfaser . . . . .                                     | 167        |
| 10.2 Analogübertragung . . . . .  | 173        |
| 10.2.1 Bandbreite einer Einmodenfaser . . . . .   | 176        |
| 10.2.2 Bandbreite einer Vielmodenfaser . . . . .  | 177        |
| 10.3 Dispersion im Datenblatt; Bandbreite-Länge-Produkte . . . . .                            | 178        |
| 10.3.1 Einmoden-LWL . . . . .   | 178        |
| 10.3.2 Vielmoden-LWL . . . . .  | 179        |
| <b>11 Grenzen optischer Übertragungssysteme durch Dämpfung und Dispersion . . . . .</b>       | <b>183</b> |
| 11.1 Analoge Übertragung . . . . .  | 184        |
| 11.2 Digitale Übertragung (PCM-Übertragung) . . . . .   | 187        |
| <b>12 Meßwerterfassung mit Lichtwellenleiter-Sensoren . . . . .</b>                           | <b>191</b> |
| 12.1 Einige Grundbegriffe der Sensorik . . . . .  | 191        |
| 12.2 Einteilung der Sensoren . . . . .  | 192        |
| 12.3 Optische Sensorik mit Lichtwellenleitern . . . . .                                       | 194        |
| 12.3.1 Extrinsische LWL-Sensoren: LWL <i>in</i> Sensoren . . . . .                            | 194        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 12.3.2 Intrinsische LWL-Sensoren: LWL <i>als</i> Sensor . . . . .  | 195        |
| 12.3.3 LWL in hybriden Sensoren . . . . .  | 197        |
| <br>   |            |
| <b>13 Beispiele extrinsischer optischer Sensoren . . . . .</b>   | <b>199</b> |
| 13.1 Füllstandsanzeiger . . . . .  | 200        |
| 13.2 Abstandssensor durch Phasenlaufzeitmessung . . . . .  | 201        |
| 13.3 Temperatursensor . . . . .  | 204        |
| 13.4 Polarisationssensor (Polarimeter) . . . . .   | 206        |
| 13.4.1 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .  | 206        |
| 13.4.2 Mathematische Behandlung . . . . .  | 207        |
| 13.4.3 Erzeugung linearer Doppelbrechung am Beispiel des<br>elastooptischen Effektes und des Kerr-Effektes . . . . . | 210        |
| 13.4.4 Querempfindlichkeit und optische Gleichtaktunterdrückung  | 212        |
| <br>   |            |
| <b>14 Intrinsische Sensoren mit Standardfasern . . . . .</b>   | <b>215</b> |
| 14.1 Mikrobiegungssensor . . . . .   | 215        |
| 14.2 Sensorwirkung durch Abänderung der Mantelbrechzahl . . . . .  | 216        |
| 14.3 Evanescent field sensor . . . . .   | 218        |
| 14.4 „Verteilte“ Intensitätssensoren und OTDR-Auswertung . . . . .   | 220        |
| 14.5 Sensoren mit Bragg-Gitter im Glasfaserkern . . . . .  | 223        |
| <br>   |            |
| <b>15 Polarisationscharakteristik von Faser-LWL . . . . .</b>  | <b>229</b> |
| 15.1 Polarisation in Vielmodenfasern . . . . .   | 229        |
| 15.2 Polarisation in Standard-Einmodenfasern . . . . .   | 232        |
| 15.3 Fasern mit modifiziertem linearen Polarisationsanteil . . . . .   | 234        |
| 15.3.1 Fasern mit reduzierter eigener linearer Anisotropie<br>(LoBi fiber) . . . . .                                 | 234        |
| 15.3.2 Fasern mit verstärkter eigener linearer Anisotropie<br>(HiBi fiber) . . . . .                                 | 234        |
| 15.3.3 Polarisationsmodenkopplung . . . . .  | 237        |
| 15.3.4 HiBi-Fasern als Polarisatoren . . . . .   | 239        |
| 15.4 Fasern mit modifiziertem zirkularen Polarisationsanteil . . . . .   | 240        |
| <br>   |            |
| <b>16 Intrinsische faseroptische Polarimeter . . . . .</b>   | <b>241</b> |
| 16.1 Einbringen zusätzlicher linearer Anisotropie . . . . .  | 242        |
| 16.2 Einbringen zusätzlicher zirkularer Anisotropie . . . . .  | 246        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>17 Interferometrische Sensoren: Grundlagen</b> . . . . .  | 253 |
| 17.1 Sensorik durch Änderung optischer Weglängen . . . . .   | 253 |
| 17.2 Messung von Phasendifferenzen mit Zweistrahlinterferometern . . . . .                         | 254 |
| 17.3 Zweistrahlinterferometer als Sensor . . . . .   | 257 |
| 17.4 Anforderungen an die Lichtquelle . . . . .  | 259 |
| 17.5 Lichtwellenleiter in Zweistrahlinterferometern . . . . .                                      | 261 |
| <br>   |     |
| <b>18 Sensoren mit LWL-Interferometern nach Mach-Zehnder und nach Michelson</b> . . . . .          | 265 |
| 18.1 Mach-Zehnder-Interferometer als Sensor . . . . .  | 265 |
| 18.1.1 Interferometeraufbau und Sensorkennlinie . . . . .  | 265 |
| 18.1.2 Linearisierung der Kennlinie durch aktive Rückkoppelung .                                   | 269 |
| 18.1.3 Einsatzmöglichkeiten . . . . .  | 274 |
| 18.2 Michelson-Interferometer als Sensor . . . . .   | 275 |
| 18.2.1 Interferometeraufbau und Sensorkennlinie . . . . .  | 275 |
| 18.2.2 Linearisierung der Kennlinie durch Phasenmodulation . .                                     | 277 |
| <br>   |     |
| <b>19 Faseroptisches Sagnac-Interferometer als Drehratensensor</b> .                               | 283 |
| 19.1 Aufbau des Interferometers . . . . .  | 283 |
| 19.2 Sagnac-Effekt . . . . .   | 285 |
| 19.3 Berechnung des Phasenversatzes infolge Rotation . . . . .                                     | 287 |
| 19.4 Technische Realisierung; Linearisierung der Kennlinie . . . .                                 | 290 |
| 19.5 Einsatz von Sagnac-Drehratensensoren . . . . .  | 295 |
| <br>   |     |
| <b>A1 Anhang: Sellmeier-Beschreibung der Wellenlängen-abhängigkeit der Brechzahl</b> . . . . .     | 297 |
| <br>   |     |
| <b>A2 Anhang: Zentrum und effektive Breite eines Zeitpulses bzw. einer Spektrallinie</b> . . . . . | 301 |
| <br>   |     |
| <b>A3 Anhang: Polarisation von Licht</b> . . . . .   | 303 |
| <br>   |     |
| <b>A4 Anhang: Mathematische Beschreibung der Polarisation mit dem Jones-Formalismus</b> . . . . .  | 311 |
| A4.1 Jones-Vektoren . . . . .  | 311 |

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>A4.2 Polarisationsoptische Bauelemente und Jones-Matrizen . . . . .</b>                                    | 313 |
| A4.2.1 Linearpolarisator . . . . .  | 313 |
| A4.2.2 Linearer Retarder (lineare Doppelbrechung, lineare optische Anisotropie) . . . . .                     | 314 |
| A4.2.3 Zirkularer Retarder (zirkulare Doppelbrechung, zirkulare optische Anisotropie) . . . . .               | 317 |
| A4.2.4 Eigenzustände polarisationsoptischer Bauelemente . . . . .   | 319 |
| <br><b>A5 Anhang: Vereinfachte mathematische Beschreibung von Kopplern mit Einmoden-LWL . . . . .</b>         | 321 |
| <br><b>A6 Anhang: Transversaler Pockels-Effekt (transversaler linearer elektrooptischer Effekt) . . . . .</b> | 327 |
| <br><b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>   | 331 |
| <br><b>Sachverzeichnis . . . . .</b>  | 333 |