

Inhaltsverzeichnis

I Einleitung

| | | |
|---|----------------------------|---|
| 1 | Ein erster Überblick | 3 |
|---|----------------------------|---|

II Physikalische Grundlagen

| | | |
|-------|---|----|
| 2 | Strahlenoptische Behandlung | 15 |
| 2.1 | Wellenleitung durch Totalreflektion | 15 |
| 2.2 | Stufenindexfaser | 17 |
| 2.3 | Modendispersion | 20 |
| 2.4 | Gradientenprofilfasern | 22 |
| 2.5 | Kopplung von Moden | 24 |
| 2.6 | Unzulänglichkeit der Strahlenoptik | 24 |
| 3 | Wellenoptische Behandlung | 27 |
| 3.1 | Maxwellgleichungen | 27 |
| 3.2 | Wellengleichung | 29 |
| 3.3 | Linearer und nichtlinearer Brechungsindex | 30 |
| 3.3.1 | Linearer Fall | 30 |
| 3.3.2 | Nichtlinearer Fall | 31 |
| 3.4 | Separation nach Koordinaten | 33 |
| 3.5 | Moden | 35 |
| 3.6 | Lösungen für $m = 0$ | 39 |
| 3.7 | Lösungen für $m = 1$ | 40 |
| 3.8 | Lösungen für $m > 1$ | 42 |
| 3.9 | Feldverteilung in den Moden | 43 |
| 3.10 | Zahlenbeispiel | 45 |
| 3.11 | Anzahl der Moden | 46 |
| 3.12 | Energietransport | 47 |
| 4 | Laufzeitverzerrungen: Dispersion | 51 |
| 4.1 | Materialdispersion | 52 |
| 4.1.1 | Beschreibung per Ableitung nach der Wellenlänge | 54 |
| 4.1.2 | Beschreibung per Ableitung nach der Frequenz | 56 |
| 4.2 | Wellenleiter- und Profildispersion | 57 |
| 4.3 | Normale und anomale Dispersion, Nullstelle | 58 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.4 | Auswirkung der Dispersion | 60 |
| 4.5 | Dispersionsoptimierung | 63 |
| 4.5.1 | Gradientenindex-Fasern | 63 |
| 4.5.2 | W-Fasern | 64 |
| 4.5.3 | T-Fasern | 66 |
| 4.5.4 | „Quadruple Clad“-Fasern | 67 |
| 4.5.5 | Dispersionsverschoben oder dispersionsflach? | 68 |
| 4.6 | Polarisationsmodendispersion | 68 |
| 4.6.1 | Beschreibung der Polarisationsmodendispersion | 69 |
| 4.6.2 | Vermeidung der Polarisationsmodendispersion | 70 |
| 4.7 | „Holey Fibers“ | 72 |
| 5 | Verluste | 75 |
| 5.1 | Biegeverluste | 77 |
| 5.2 | Andere Verluste | 80 |
| 5.3 | Fasern aus anderen Materialien | 81 |
| 5.3.1 | Fluoride | 82 |
| 5.3.2 | Chalkogenide | 82 |
| 5.3.3 | Hohlkernfasern | 83 |
| 5.3.4 | Kunststoff-Fasern | 84 |
| III Technische Voraussetzungen der Fasertechnologie | | |
| 6 | Herstellung und mechanische Eigenschaften | 87 |
| 6.1 | Der Werkstoff Glas | 87 |
| 6.1.1 | Historisches | 87 |
| 6.1.2 | Struktur | 88 |
| 6.1.3 | Glasbruch | 91 |
| 6.2 | Die Herstellung von Glasfasern | 93 |
| 6.2.1 | Herstellung der Preform | 93 |
| 6.2.2 | Ziehen der Faser aus der Preform | 97 |
| 6.3 | Mechanische Festigkeit von Glasfasern | 99 |
| 6.3.1 | Neues Glas | 99 |
| 6.3.2 | Verringerung der Festigkeit | 100 |
| 7 | Messung wichtiger Faserparameter | 103 |
| 7.1 | Verluste | 103 |
| 7.2 | Dispersion | 104 |
| 7.3 | Geometrie des Faseraufbaus | 108 |
| 7.4 | Geometrie der Feldverteilung | 110 |
| 7.4.1 | Nahfeldmethoden | 111 |
| 7.4.2 | Fernfeldverfahren | 113 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.5 | Grenzwellenlänge | 115 |
| 7.6 | Messtechnik mit „OTDR“ | 117 |
| 8 | Bauelemente der Fasertechnologie | 119 |
| 8.1 | Kabelaufbau | 119 |
| 8.2 | Präparation von Faserenden | 121 |
| 8.3 | Verbindungen | 122 |
| 8.3.1 | Lösbare Verbindungen | 122 |
| 8.3.2 | Feste Verbindungen | 125 |
| 8.4 | Elemente zur spektralen Beeinflussung | 127 |
| 8.4.1 | Fabry-Perot-Filter | 127 |
| 8.4.2 | Faser-Bragg-Strukturen | 127 |
| 8.5 | Elemente zur Polarisations-Beeinflussung | 128 |
| 8.5.1 | Polarisations-Stellglieder | 128 |
| 8.5.2 | Polarisatoren | 130 |
| 8.6 | Richtungsabhängige Elemente | 130 |
| 8.6.1 | Isolatoren | 130 |
| 8.6.2 | Zirkulatoren | 132 |
| 8.7 | Elemente zur Kopplung zwischen Fasern | 133 |
| 8.7.1 | Richtkoppler | 133 |
| 8.7.2 | Wellenlängenabhängige Koppler | 136 |
| 8.8 | Optische Verstärker | 136 |
| 8.8.1 | Verstärker mit aktiven Fasern | 138 |
| 8.8.2 | Halbleiterverstärker | 141 |
| 8.9 | Lichtquellen | 141 |
| 8.9.1 | Licht aus Halbleitern | 142 |
| 8.9.2 | Lumineszenzdioden | 142 |
| 8.9.3 | Laserdioden | 143 |
| 8.9.4 | Faserlaser | 148 |
| 8.10 | Lichtempfänger | 149 |
| 8.10.1 | Prinzip der pn- und pin-Dioden | 149 |
| 8.10.2 | Materialien | 151 |
| 8.10.3 | Geschwindigkeit | 152 |
| 8.10.4 | Rauschen | 152 |
| 8.10.5 | Lawinendioden | 152 |

IV Nichtlineare Phänomene in Glasfasern

| | | |
|----------|---|------------|
| 9 | Grundlegendes zu den nichtlinearen Prozessen | 157 |
| 9.1 | Nichtlinearität in Fasern vs. „in bulk“ | 157 |
| 9.2 | Kerr-Nichtlinearität | 159 |
| 9.3 | Aufstellen der Wellengleichung | 160 |
| 9.3.1 | Hüllkurvengleichung ohne Dispersion | 160 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.3.2 | Dispersion berücksichtigt durch Fouriertechnik | 162 |
| 9.3.3 | Die kanonische Wellengleichung: „NLSG“ | 165 |
| 9.3.4 | Diskussion der Teilbeiträge zur Wellengleichung | 166 |
| 9.3.5 | Dimensionslose NLSG | 168 |
| 9.4 | Lösungen der NLSG | 170 |
| 9.4.1 | Modulationsinstabilität | 170 |
| 9.4.2 | Das fundamentale Soliton | 171 |
| 9.4.3 | Anregung des fundamentalen Solitons | 174 |
| 9.4.4 | Kollisionen von Solitonen | 178 |
| 9.4.5 | Solitonen höherer Ordnung | 179 |
| 9.4.6 | Dunkelsolitonen | 181 |
| 9.5 | Exkurs: Solitonen in anderen Bereichen der Physik | 182 |
| 9.6 | Weitere $\chi^{(3)}$ -Prozesse | 184 |
| 9.7 | Inelastische Streuprozesse | 186 |
| 9.7.1 | Stimulierte Brillouinstreuung | 188 |
| 9.7.2 | Stimulierte Ramanstreuung | 193 |
| 10 | Ein Katalog nichtlinearer Prozesse | 197 |
| 10.1 | Normale Dispersion | 197 |
| 10.1.1 | Spektrale Verbreiterung | 197 |
| 10.1.2 | Pulskompression | 198 |
| 10.1.3 | „Gechirpte“ Verstärkung | 200 |
| 10.1.4 | Optisches Wellenbrechen | 201 |
| 10.2 | Anomale Dispersion | 203 |
| 10.2.1 | Modulationsinstabilität | 203 |
| 10.2.2 | Fundamentale Solitonen | 203 |
| 10.2.3 | Solitonenkompression | 204 |
| 10.2.4 | Solitonenlaser und Additiv-Puls-Modenkopplung | 205 |
| 10.2.5 | Pulswechselwirkung | 206 |
| 10.2.6 | Selbstfrequenzverschiebung | 208 |
| 10.2.7 | Langstreckenübertragung mit Solitonen | 210 |
| V | Technologische Anwendungen der Glasfasern | |
| 11 | Anwendungen in der Telekommunikation | 213 |
| 11.1 | Grundzüge der Nachrichtentechnik | 213 |
| 11.1.1 | Signale | 213 |
| 11.1.2 | Modulation | 214 |
| 11.1.3 | Abtastung | 218 |
| 11.1.4 | Codierung | 220 |
| 11.1.5 | TDM und WDM | 220 |
| 11.1.6 | RZ und NRZ | 222 |
| 11.1.7 | Störungen | 224 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 11.1.8 | Übertragung und Kanalkapazität | 227 |
| 11.2 | Nichtlineare Übertragung | 228 |
| 11.2.1 | Ein einzelner Wellenlängenmultiplex-Kanal | 229 |
| 11.2.2 | Mehrere WDM-Kanäle | 232 |
| 11.2.3 | Alternierende Dispersion („Dispersionsmanagement“) | 234 |
| 11.3 | Technisches | 237 |
| 11.3.1 | Betriebsüberwachung | 237 |
| 11.3.2 | Augendiagramm | 238 |
| 11.3.3 | Filterung mit Begrenzung des Bitnebensprechens | 239 |
| 11.4 | Telekommunikation: Eine Wachstumsbranche | 240 |
| 11.4.1 | Historische Entwicklung | 240 |
| 11.4.2 | Die Grenzen des Wachstums | 245 |
| 12 | Faseroptische Sensoren | 249 |
| 12.1 | Warum Sensoren? Warum faseroptisch? | 249 |
| 12.2 | Lokale Messungen | 251 |
| 12.2.1 | Druckmessung | 251 |
| 12.2.2 | Hydrophon | 251 |
| 12.2.3 | Temperaturmessung | 253 |
| 12.2.4 | Dosimetrie | 254 |
| 12.3 | Verteilte Messungen | 255 |
| VI | Anhänge | |
| A | Das Dezibel | 261 |
| A.1 | Definition | 261 |
| A.2 | Absolutwerte | 262 |
| A.3 | Mögliche Irritationen | 262 |
| A.4 | Lichtabsorption in dB | 263 |
| B | Skineffekt | 265 |
| C | Besselfunktionen | 267 |
| C.1 | Bezeichnungen der verschiedenen Funktionen | 267 |
| C.2 | Zusammenhänge zwischen diesen Funktionen | 268 |
| C.3 | Rekursionsformeln | 268 |
| C.4 | Eigenschaften der J_m und K_m | 268 |
| C.5 | Nullstellen von J_0 , J_1 und J_2 | 269 |
| C.6 | Abbildung der gängigsten Funktionen | 269 |
| D | Optik mit Gauß'schen Strahlen | 271 |
| D.1 | Warum Gaußstrahlen? | 271 |
| D.2 | Formeln für Gaußstrahlen | 272 |
| D.3 | Gaußstrahlen und Glasfasern | 274 |

| | | |
|----------|--|-----|
| E | Beziehungen für | |
| | Sekans Hyperbolicus | 275 |
| F | Autokorrelationsmessung | 277 |
| | F.1 Messung ultrakurzer Zeiten | 277 |
| | F.1.1 Korrelation | 277 |
| | F.1.2 Autokorrelation | 278 |
| | F.1.3 Autokorrelationsmessungen | 279 |
| | F.1.4 Katalog von Autokorrelationsformen | 280 |
| | Glossar | 283 |
| | Literaturverzeichnis | 289 |
| | Stichwortverzeichnis | 297 |