Inhaltsverzeichnis

Einleitung 1

1 Was ist Licht? 5
- 1.1 Blick in die Geschichte . . . 5
- 1.2 Die Wellengleichung . . . 10
- 1.3 Lösungen der Wellengleichung . . . 12
  - 1.3.1 Ebene Welle . . . 12
  - 1.3.2 Kugelwelle . . . 15
  - 1.3.3 Zylinderwelle . . . 18
- 1.4 Darstellung von Photonen im Wellenbild . . . 19
  - 1.4.1 Unendlich ausgedehnte ebene Welle . . . 20
  - 1.4.2 Gauß'sches Wellenpaket . . . 20
  - 1.4.3 Photon als Gauß'sches Wellenpaket . . . 21
- 1.5 Was ist ein Lichtstrahl? . . . 22
- 1.6 Wie beobachtet man Licht? . . . 25

2 Interferenz, Kohärenz und Polarisation 27
- 2.1 Interferenz . . . 27
  - 2.1.1 Mathematische Beschreibung . . . 28
  - 2.1.2 Interferometertypen . . . 30
- 2.2 Kohärenz und Lichtquellen . . . 32
  - 2.2.1 Zeitliche Kohärenz . . . 34
  - 2.2.2 Räumliche Kohärenz . . . 40
- 2.3 Polarisation . . . 43

3 Streuung und Beugung 49
- 3.1 Dipolstrahlung . . . 49
- 3.2 Streuung . . . 51
- 3.3 Beugung — eine physikalische Darstellung . . . 54
  - 3.3.1 Spaltbeugung . . . 56
  - 3.3.2 Gitterbeugung . . . 58
- 3.4 Inkohärente Abstrahlung: Lambert'sches Strahlungsgesetz . . . 60

4 Brechung und Absorption 63
4.1 Dielektrika . . . 63
4.2 Polarisierbarkeit . . . 64
4.3 Optische Eigenschaften atomarer Oszillatoren . . . 68
4.4 Brechungsindex, Absorptionskoeffizient und Ausbreitungskonstante . 69
4.5 Dispersion . . . 70
4.6 Brechung . . . 72
4.6.1 Brechungsindex und Lichtgeschwindigkeit . . . 72
4.6.2 Snellius'sches Brechungsgesetz . . . 73
4.7 Totalreflexion . . . 75
4.8 Reflexions- und Transmissionsgrad . . . 77

5 Lichtausbreitung im freien Raum 81
5.1 Helmholtz-Gleichung . . . 82
5.2 Gauß'scher Strahl . . . 83
5.3 Winkelspektrum . . . 86
5.4 Lichtausbreitung und Winkelspektrum . . . 88
5.5 Kirchhoff-Näherung . . . 91
5.6 Nahfeld- und Fernfeldbeugung . . . 94
5.6.1 Kirchhoff'sches Beugungsintegral . . . 94
5.6.2 Fresnel-Beugung . . . 95
5.6.3 Fraunhofer-Beugung . . . 98
5.7 Optische Abbildung . . . 101
5.7.1 Kohärente Abbildung . . . 102
5.7.2 Inkohärente Abbildung . . . 103
5.7.3 Aberrationen . . . 104
5.8 Holographie . . . 105
5.9 Quergedämpfte Wellen . . . 106

6 Lichtausbreitung in dielektrischen planaren Wellenleitern 109
6.1 Geometrisch-optische Beschreibung . . . 109
6.2 Beugungsoptische Beschreibung eines planaren Wellenleiters . . . 111
6.3 Moden in einem Wellenleiter . . . 113
6.4 Feldverteilungen der Moden im symmetrischen Wellenleiter . . . 114

7 Lichtausbreitung in Glasfasern 121
7.1 Einkopplung in eine Glasfaser . . . 122
7.2 Glasfasern mit Stufenindexprofil . . . 124
7.3 Gradientenindexfasern . . . 132
7.3.1 Fasern mit kontinuierlichem Brechzahlverlauf . . . 132
7.3.2 Optische Wege in einer Gradientenindexfaser . . . 133

8 Glasfasern für die optische Übertragungstechnik 139
8.1 Entwicklung der Glasfasertechnik 139
8.2 Herstellung von Glasfasern 141
8.3 Dämpfung 141
8.3.1 Materialabsorption 143
8.3.2 Streuverluste 144
8.3.3 Strahlungsverluste durch Krümmung der Faser 146
8.4 Bandbreite faseroptischer Übertragungsstrecken 148
8.5 Dispersion 151
8.5.1 Modendispersion 152
8.5.2 Materialdispersion 154
8.5.3 Wellenleiterdispersion 158
8.5.4 Polarisationsmodendispersion 158

9 Mikrooptik und integrierte Optik 159
9.1 Von der Makro- zur Mikrooptik 159
9.2 Klassifizierung mikrooptischer Elemente 160
9.3 Lithographische Herstellungsverfahren 161
9.4 Räumliche Mikrooptik 162
9.4.1 Refraktive Mikrooptik 162
9.4.2 Diffraktive Mikrooptik 165
9.4.3 Integrierte Freiraumoptik 170
9.5 Integrierte Wellenleiteroptik 172
9.5.1 Wellenleiterstrukturen 172
9.5.2 Materialien 173
9.5.3 Gekoppelte Wellenleiter 173
9.5.4 Elektrooptische Modulatoren als integrierte Wellenleiter . . . 177
9.5.5 Ankopplung an Wellenleiter 179
9.5.6 Linsen in Wellenleitern 182
9.6 Wellenleiter in photonischen Kristallen 183

10 Nichtlineare Optik 185
10.1 Physikalische Grundlagen 185
10.2 Nichtlineare Wellengleichung 186
10.3 Nichtlinearität zweiter Ordnung 188
10.3.1 Frequenzverdoppelung 188
10.3.2 Elektrooptischer Effekt 189
10.4 Nichtlinearität dritter Ordnung 191
10.4.1 Erzeugung der dritten Harmonischen 191
10.4.2 Optischer Kerr-Effekt 191

10.5 χ_3-Effekte 192
10.5.1 Selbstphasenmodulation, Selbstfokussierung und räumliche Solitonen 192
10.5.2 Zeitliche Solitonen 194
10.5.3 Optische Bistabilität 195
10.5.4 Nichtlineare optische Logikgatter 196

11 Elektrooptik und Akustooptik 199
11.1 Grundlagen der Elektrooptik 199
11.2 Elektrooptische Bauelemente 200
11.2.1 Phasenmodulatoren 201
11.2.2 Intensitätsmodulatoren 202
11.2.3 Räumliche Lichtmodulatoren 202
11.3 Photorefraktive Materialien 206
11.4 Grundlagen der Akustooptik 209
11.5 Akustooptische Bauelemente 211
11.5.1 Akustooptische Modulatoren 211
11.5.2 Akustooptische Scanner 213

12 Laser 215
12.1 Optische Verstärkung und Rückkopplung 215
12.1.1 Laserprinzip 216
12.1.2 Eigenschaften von Laserverstärkern 218
12.1.3 Beispiele für Laserverstärker 220
12.1.4 Erbium-dotierte Faserverstärker 220
12.2 Laserresonator 222
12.3 Laserbetrieb 225
12.4 Spektrum der Laserstrahlung 225
12.5 Räumliche Verteilung der Lasermoden 227
12.6 Modenselektion 228
12.6.1 Transversale Moden 229
12.6.2 Longitudinale Moden 229
12.6.3 Polarisation 229
12.6.4 Wellenlänge 231
12.7 Gepulste Laser 231
12.7.1 Gewinnschalten (*gain switching*) 232
12.7.2 Güteschalten (*Q switching*) 232
12.7.3 Modenkopplung 233

13 Halbleiter **237**
13.1 Halbleitermaterialien 237
13.2 Leitungsmechanismen 240
13.2.1 Eigenleitung 240
13.2.2 n- und p-Leitung 241
13.3 Die Bandstruktur der Energieniveaus in Halbleitern 242
13.4 Energiezustände im Halbleiter 247
13.5 Elektron-Loch-Paare 249
13.6 Konzentration von Elektronen und Löchern 249
13.7 Übergänge 252

14 Wechselwirkung von Licht mit Halbleitern **255**
14.1 Erzeugung und Rekombination von Elektron-Loch-Paaren 255
14.1.1 Rekombinationsprozesse 256
14.1.2 Rekombinationsraten, Massenwirkungsgesetz 257
14.2 Injektion von Ladungsträgern 259
14.3 Absorptions- und Emissionsprozesse 260
14.4 Direkte und indirekte Halbleiter 261
14.5 Interner Quantenwirkungsgrad 265
14.6 Spontane Emission, stimulierte Emission und Absorption 267
14.7 Einstein-Koeffizienten für Emission und Absorption 268
14.7.1 Spontane Emission 269
14.7.2 Absorption und stimulierte Emission 269
14.7.3 Beziehung zwischen den Einstein-Koeffizienten für Absorption und Emission 269
14.8 Emission und Absorption im Halbleiter 272
14.8.1 Besetzungswahrscheinlichkeiten 272
14.8.2 Dichte der optischen Zustände 273
14.8.3 Übergangswahrscheinlichkeiten 274
14.9 Spektrale Strahlungscharakteristik für die spontane Emission 274

15 Sende- und Empfangselemente für die optische Übertragungstechnik **279**
15.1 Sendeelemente 279
15.1.1 Emissionsspektrum und Auswahl geeigneter Materialien . . . 279
15.1.2 Grundlegende Bauformen: Kantenemitter und Oberflächenemitter 281
15.2 Leuchtdioden 282
15.2.1 Optische Ausgangsleistung 282
15.2.2 Temperaturverhalten 284

15.2.3 Zeitliches Verhalten 285
15.2.4 Bauformen 286
15.3 Laserdioden 287
15.3.1 Prinzip 287
15.3.2 Moden und Verstärkung 290
15.3.3 Kennlinie einer Laserdiode 293
15.3.4 Typen von Halbleiterlaserdioden 294
15.4 Empfangselemente 297
15.4.1 Photoleitung 297
15.4.2 Photodioden 298
15.4.3 Quantenwirkungsgrad und spektrale Empfindlichkeit 299
15.4.4 Ansprechzeit 300
15.4.5 Strom-Spannungs-Kennlinie 301
15.4.6 *p-i-n*-Photodiode 302
15.4.7 Avalanche-Photodiode 303
15.4.8 MSM-Photodioden 304

16 Optische Übertragungstechnik 307
16.1 Aufbau einer optischen Übertragungsstrecke 308
16.2 Sender 309
16.2.1 Kodierung 309
16.2.2 Lichtquellen 311
16.2.3 Kopplung Lichtquelle–Faser 314
16.3 Übertragungsstrecke 315
16.3.1 Leistungsbilanz für eine Übertragungsstrecke 315
16.3.2 Faser–Faser-Kopplung 319
16.4 Empfänger 322
16.4.1 Detektion digitaler Signale, Bitfehlerrate 323
16.4.2 Empfängerempfindlichkeit 324
16.4.3 Filterung zur Minimierung der Intersymbol Interference . . . 325
16.4.4 Augendiagramm 326
16.4.5 Einfluß des Rauschens auf die Fehlerwahrscheinlichkeit . . . 326
16.4.6 Rauschquellen in optischen Empfängern 329
16.5 Optischer Überlagerungsempfang 333
16.5.1 Heterodyn-Empfang mit Amplitudenmodulation 335
16.5.2 Homodynempfang mit Amplitudenmodulation 337
16.5.3 Signal-zu-Rausch-Verhältnis für Homodynempfang und PSK . 337
16.6 Übertragung mit Erbium-dotierten Faserverstärkern 338
16.6.1 Systemanwendungen 338
16.6.2 Rauschverhalten optischer Verstärker 339

17 Optische Netze **343**
17.1 Grundbegriffe für Kommunikationssysteme 344
17.1.1 Kommunikationstopologien 344
17.1.2 Multiplexverfahren 347
17.1.3 Zeitmultiplex und räumliches Multiplex 348
17.1.4 Wellenlängenmultiplex 349
17.1.5 Kodemultiplex 350
17.2 WDM-Systeme 351
17.2.1 Von Breitband-WDM zu DWDM 351
17.2.2 WDM-Netzwerke 351
17.2.3 WDM-Komponenten 352
17.3 Crossconnects 356
17.4 Signalregeneration in optischen Netzen 358

18 Optische Verbindungstechnik und optische Informationsverarbeitung **361**
18.1 Optische Verbindungstechnik 361
18.1.1 Grenzen elektrischer Verbindungen 361
18.1.2 Hierarchie der optischen Verbindungstechnik 362
18.1.3 *Board-to-Board*-Verbindungen 363
18.1.4 *Chip-to-Chip*-Verbindungen 364
18.2 Optische Informationsverarbeitung 365
18.2.1 Analog-optische Informationsverarbeitung 365
18.2.2 Digitale optische Informationsverarbeitung 367
18.2.3 Optoelektronische Bauelemente für die optische Informationsverarbeitung 369

19 Optische Speichertechnik **373**
19.1 Speichertechnik in Computern und Begriffsbestimmungen 374
19.2 Klassifizierung optischer Speicher 375
19.3 Zweidimensionale optische Speicher 376
19.3.1 Compact Disk als *Read-Only* Speichermedium 376
19.3.2 Digital Versatile Disk 380
19.3.3 Einmal beschreibbare optische Speicher 380
19.3.4 Löschbare optische Speicher 382
19.4 Magnetooptische Speicherung 383
19.5 Dreidimensionale optische Speichertechnik 386
19.5.1 Grundlegende Betrachtungen 386
19.5.2 Zwei-Photon-Absorption 387
19.5.3 Holographische 3-D Speicherung 387

Anhang **391**
A Fourier-Transformation 391
B Lineare Systeme 393
C Methode der stationären Phase 395
D Zentraler Grenzwertsatz 396
E Wiener-Khintchin-Theorem 396
F Leistungsdichtespektrum einer Zufallsfolge von binären Pulsen 397

Glossar **399**

Symbole und Abkürzungen **411**

Literatur **419**

Index **423**