

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 (<i>gain switching</i>)	232
12.7.2	Güteschalten (<i>Q switching</i>)	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	Empfängselemente	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	<i>p-i-n</i> -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 <i>Board-to-Board</i> -Verbindungen	363
18.1.4 <i>Chip-to-Chip</i> -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 <i>Read-Only</i> 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