

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 2. Auflage	V
1 Einleitung	1
2 Licht	6
2.1 Was ist Licht?	6
2.2 Teilchen oder Welle	7
2.2.1 Das Wellenbild	9
2.2.2 Das Strahlenbild	11
2.3 Leistung, Pegel und Energie elektromagnetischer Wellen	12
3 Glasfasern	14
3.1 Lichtführung in wellenleitenden Strukturen	14
3.1.1 Wellenleitung in Schichten	14
3.1.2 Wellenleitung in Glasfasern	15
3.2 Lichtübertragung in Glasfasern, Multi-Mode- und Single-Mode-Fasern	18
3.2.1 Glasfasern	18
3.2.2 Lichtausbreitung in der Glasfaser, Akzeptanzwinkel, numerische Apertur	18
3.2.3 Transversale Moden in Glasfasern, Modenmischung	20
3.2.4 Ein-Moden-Bedingung, Cut-off-Wellenlänge in Glasfasern	27
3.2.5 Modenfelddurchmesser	27
3.3 Dämpfung in Glasfasern	28
3.3.1 UV-Absorption	29
3.3.2 Rayleigh-Streuung	29
3.3.3 Absorption an Wasser	30
3.3.4 IR-Absorption	31
3.3.5 Dämpfungsverlauf in Glasfasern	31
3.4 Dispersion und Dispersionskompensation in Glasfasern	32
3.4.1 Begriff und Auswirkung der Dispersion	32
3.4.2 Mechanismen der Dispersion	35
3.4.2.1 Modendispersion	36
3.4.2.2 Materialdispersion	37
3.4.2.3 Wellenleiterdispersion	39
3.4.2.4 Chromatische Dispersion	41
3.4.2.5 Bandbreite-Länge-Produkt	42
3.4.2.6 Polarisations-Moden-Dispersion (PMD)	43
3.4.2.7 Dispersionskompensation	45
3.4.3 Glasfasertypen	47

4	Faserverbindungen, Koppler und Schalter	50
4.1	Stecker und Spleiße	50
4.1.1	Spleiße	50
4.1.2	Stecker	51
4.2	Funktionsweise von Kopplern und Schaltern	54
4.2.1	Koppelemente	54
4.2.2	Typen von Kopplern	56
4.2.2.1	Stirnflächenkoppler	56
4.2.2.2	Oberflächenkoppler	58
4.2.3	Schalter	60
4.2.3.1	Mechanisches Schalten	60
4.2.3.2	Elektrooptisches Schalten	61
4.2.3.3	Mechanooptisches Schalten	65
4.2.3.4	Mikro-Elektromechanische Systeme (MEMS)	67
4.2.3.5	Thermische Schalter	69
5	Optische Sender	70
5.1	Hauptelemente des Halbleiterlasers	70
5.2	Aktives Element	71
5.2.1	Bandstruktur von Halbleitern, direkte und indirekte Übergänge	72
5.2.2	Materialauswahl	73
5.2.3	Lichtemission im Halbleiter, LED	76
5.2.3.1	Rekombination im Halbleiter	76
5.2.3.2	Linienbreite	78
5.2.3.3	p-n-Übergang als Grundstruktur, LED	79
5.2.4	Halbleitersender – Grundstruktur	80
5.2.4.1	Doppelheterostruktur-Laser (DH-Diode)	80
5.2.4.2	Multi-Quantum-Well-Struktur (MQW)	81
5.3	Resonator	82
5.3.1	Fabry-Perot-Laser	82
5.3.2	Dynamischer Single-Mode-Laser (DSM)	85
5.4	Lasereigenschaften	87
5.4.1	P-I-Kennlinie, Temperaturverhalten, Degradation	87
5.4.2	Spektrum von Halbleiterlasern	88
5.4.3	Abstrahlcharakteristik	88
5.5	Ausgewählte Lasertypen für optische Netze	89
5.5.1	MQW-Laser mit DFB-Resonator als Kantenstrahler	89
5.5.2	Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) als Flächenstrahler	92
6	Modulation von Laserlicht	94
6.1	Aufgabe und Problemstellung der Lasermodulation	94
6.2	Modulationsverfahren der optischen Nachrichtentechnik	95
6.2.1	Amplitudenmodulation, Intensitätsmodulation (AM, PM)	95
6.2.2	Puls-Amplituden-Modulation (PAM)	95
6.2.3	Puls-Position-Modulation (PPM)	96
6.2.4	Puls-Code-Modulation (PCM)	96

6.3	Direkte Modulation von Halbleiterlasern	97
6.4	Externe Modulation von Halbleiterlasern	103
6.4.1	Phasen- und Frequenzmodulation	103
6.4.2	Intensitätsmodulation	104
7	Optische Empfänger	106
7.1	Empfängerprinzipien	106
7.2	pin-Diode	108
7.3	Lawinenphotodiode (APD)	109
7.4	Rauschen in Empfängern, Bit-Fehler-Rate (BER)	111
7.4.1	Schrotrauschen	112
7.4.2	Intensitätsrauschen	112
7.4.3	Thermisches Rauschen (Nyquist-Rauschen)	113
7.4.4	Multiplikationsrauschen	114
7.4.5	Bitfehlerrate	115
7.4.6	Optisches Heterodyn	116
8	Elemente optischer Netze	120
8.1	Optische Verstärker	120
8.1.1	Erbiumdotierte Faserverstärker (EDFA)	120
8.1.1.1	Verstärkung in erbiumdotierten Glasfasern	120
8.1.1.2	Rauschen in EDFAs, ASE	123
8.1.1.3	Dichtes Wellenlängenmultiplexing (DWDM) und EDFA	125
8.1.1.4	Experimentelle Realisierung von EDFAs	126
8.1.1.5	Weitere mit seltenen Erden dotierte Verstärker	128
8.1.2	Raman-Verstärker	128
8.1.2.1	Der Raman-Effekt	128
8.1.2.2	Stokes-Verschiebung, Verstärkungsspektrum	129
8.1.2.3	Experimentelle Realisierung	132
8.1.2.4	Probleme im Raman-Verstärker	132
8.1.2.5	Rauschen im Raman-Verstärker	133
8.1.3	Halbleiterverstärker (SOA)	133
8.2	Optische Elemente für Multiplexer und Demultiplexer	136
8.2.1	Optische Filter für Multiplexern und Demultiplexern	137
8.2.1.1	Filter auf Basis der Interferenz	137
8.2.1.2	Fabry-Perot-Filter	139
8.2.1.3	Faser-Bragg-Gitter	139
8.2.1.4	Phased-Array-Anordnungen	140
8.2.1.5	Optischer Isolator	141
8.2.1.6	Optischer Zirkulator	142
8.2.2	Optischer Add-Drop-Multiplexer	143
8.2.3	Optischer Cross-Connector	145

9 Messtechnik in Glasfasern und optischen Übertragungssystemen	147
9.1 Messtechnik an Glasfasern	147
9.1.1 Messung des Brechzahlprofils	147
9.1.1.1 Nahfeld-Abtastmethode (near field scanning)	147
9.1.1.2 Strahlbrechungsmethode (refracted near field technique)	148
9.1.2 Dämpfungsmessungen	148
9.1.2.1 Abschneide- und Einfügeverfahren	149
9.1.2.2 Rückstreuungsmessungen, OTDR-Methode	150
9.1.3 Dispersionsmessungen	153
9.1.3.1 Messung im Zeitbereich	153
9.1.3.2 Messung im Frequenzbereich	154
9.2 Messung der Übertragungsqualität	155
9.2.1 Messung des Bit-Fehler-Verhältnisses, Empfängerempfindlichkeit	155
9.2.2 Augendiagramm	156
10 Nichtlineare Effekte in Glasfasern	159
10.1 Nichtlinearitäten in der Optik	161
10.2 Nichtlineare Effekte in Glasfasern	162
10.2.1 Nichtlineare Streueffekte in Glasfasern	162
10.2.1 Nichtlineare Effekte dritter Ordnung in Glasfasern, 4-Wellen-Mischung	163
10.3 Chirp in Glasfasern	165
10.4 Polarisations-Dispersions-Management mit Nichtlinearitäten	167
10.4.1 Reduzierung des Chirps	167
10.4.2 Nutzung des Chirps	168
10.5 Aktive Kompensation der Dispersion	170
10.6 Solitonen	172
11 Passive und aktive Netze	175
11.1 Kommunikationstopologien	178
11.2 Multiplexverfahren	179
11.2.1 Raummultiplex	180
11.2.2 Zeitmultiplex	181
11.2.3 Wellenlängenmultiplex	183
11.3 WDM-Systeme	188
11.4 Signalregeneration	190
Lösungen der Aufgaben	191
Literaturverzeichnis	194
Sachwortverzeichnis	195