

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 2. Auflage .....	V
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Licht .....</b>	<b>6</b>
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
<b>3 Glasfasern .....</b>	<b>14</b>
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

<b>4 Faserverbindungen, Koppler und Schalter</b> .....	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
<b>5 Optische Sender</b> .....	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
<b>6 Modulation von Laserlicht</b> .....	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
<b>7</b>	<b>Optische Empfänger .....</b>	<b>106</b>
7.1	Empfängerprinzipen .....	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
<b>8</b>	<b>Elemente optischer Netze .....</b>	<b>120</b>
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

<b>9 Messtechnik in Glasfasern und optischen Übertragungssystemen</b> .....	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 Rückstremessungen, 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
<b>10 Nichtlineare Effekte in Glasfasern</b> .....	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
<b>11 Passive und aktive Netze</b> .....	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
<b>Lösungen der Aufgaben</b> .....	191
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	194
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	195