

1	Einleitung	1
2	Licht	9
2.1	Was ist Licht?	9
2.2	Teilchen oder Welle	11
2.2.1	Das Wellenbild	13
2.2.2	Das Strahlenbild	15
2.3	Leistung, Pegel und Energie elektromagnetischer Wellen	16
3	Glasfasern	21
3.1	Lichtführung in wellenleitenden Strukturen	21
3.1.1	Wellenleitung in Schichten	23
3.1.2	Wellenleitung in Glasfasern	24
3.2	Lichtübertragung in Glasfasern, Multi-Mode- und Single-Mode-Fasern	26
3.2.1	Lichtausbreitung in der Glasfaser, Akzeptanzwinkel, numerische Apertur	26
3.2.2	Transversale Moden in Glasfasern, Modenmischung	28
3.2.3	Ein-Moden-Bedingung, Cut-off-Wellenlänge in Glasfasern ...	35
3.2.4	Modenfelddurchmesser	36
3.3	Dämpfung in Glasfasern	37
3.3.1	UV-Absorption	38
3.3.2	Rayleigh-Streuung	38
3.3.3	Absorption an Wasser	39
3.3.4	IR-Absorption	40
3.3.5	Dämpfungsverlauf in Glasfasern	41
3.4	Dispersion in Glasfasern	42
3.4.1	Begriff und Auswirkung der Dispersion	42
3.4.2	Mechanismen der Dispersion	46
3.4.3	Spezielle Fasern	54
3.4.4	Glasfasertypen	56

XI

4	Faserverbindungen und Koppler	59
4.1	Stecker und Spleiße	59
4.1.1	Spleiße	60
4.1.2	Stecker	60
4.2	Funktionsweise von Kopplern und Schaltern	64
4.2.1	Koppelelemente	64
4.2.2	Typen von Kopplern	66
5	Optische Sender	71
5.1	Hauptelemente des Halbleiterlasers	71
5.2	Aktives Element	73
5.2.1	Gitterstruktur von Halbleitern	74
5.2.2	Bandstruktur von Halbleitern, direkte und indirekte Übergänge	76
5.2.3	Materialauswahl	78
5.2.4	Lichtemission im Halbleiter, LED	81
5.2.5	Halbleitersender – Grundstruktur	85
5.3	Resonator	87
5.3.1	Fabry-Perot-Laser	88
5.3.2	Dynamischer Single-Mode-Laser (DSM)	91
5.4	Lasereigenschaften	93
5.4.1	P-I-Kennlinie, Temperaturverhalten, Degradation	93
5.4.2	Spektrum von Halbleiterlasern	95
5.4.3	Abstrahlcharakteristik	95
5.5	Ausgewählte Lasertypen für optische Netze	96
5.5.1	MQW-Laser mit DFB-Resonator als Kantenstrahler	96
5.5.2	Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) als Flächenstrahler	99
6	Modulation von Laserlicht	101
6.1	Aufgabe und Problemstellung der Lasermodulation	101
6.2	Modulationsverfahren der optischen Nachrichtentechnik	103
6.2.1	Amplitudenmodulation, Intensitätsmodulation (AM, PM)	103
6.2.2	Puls-Amplituden-Modulation (PAM)	103
6.2.3	Puls-Position-Modulation (PPM)	104
6.2.4	Pulse-Code-Modulation (PCM)	104
6.3	Direkte Modulation von Halbleiterlasern	105
6.4	Externe Modulation von Halbleiterlasern	112
6.4.1	Phasen- und Frequenzmodulation	112
6.4.2	Intensitätsmodulation	113
7	Optische Empfänger	115
7.1	Empfängerprinzipien	116
7.2	pin-Diode	118

7.3	Lawinenphotodiode (APD)	119
7.4	Rauschen in Empfängern, Bit-Fehler-Rate (BER).	121
7.4.1	Schrotrauschen	123
7.4.2	Intensitätsrauschen	123
7.4.3	Thermisches Rauschen (Nyquist-Rauschen)	124
7.4.4	Multiplikationsrauschen	125
7.4.5	Bitfehlerrate	126
7.4.6	Optisches Heterodyn	128
8	Bestandteile optischer Netze	131
8.1	Schalter für optische Netze	132
8.1.1	Mechanisches Schalten.	132
8.1.2	Elektrooptisches Schalten.	133
8.1.3	Mechanooptisches Schalten	138
8.1.4	Mikro-Elektromechanische Systeme (MEMS)	138
8.1.5	Thermische Schalter	139
8.2	Filter für optische Netze.	141
8.2.1	Filter auf Basis der Interferenz (Dünnschichtfilter)	141
8.2.2	Fabry–Perot-Filter	143
8.2.3	Faser-Bragg-Gitter	144
8.2.4	Phased-Array-Anordnungen.	144
8.2.5	Anwendungen optischer Filter	145
8.3	Signalregeneration	151
8.4	Optische Verstärker (Re-Amplification).	152
8.4.1	Erbium dotierter Faserverstärker (EDFA)	153
8.4.2	Raman-Verstärker	160
8.4.3	Halbleiterverstärker (SOA).	171
8.5	Dispersionskompensation (Re-Shaping)	175
8.5.1	Anwendung dispersionskompensierender Fasern	175
8.5.2	Dispersionskompensation mit Faser-Bragg-Gittern	177
8.6	Taktwiederherstellung (Re-Timing), Clock recovery	178
8.6.1	Taktrückgewinnung durch Nutzung nichtlinearer Methoden	179
8.6.2	Taktrückgewinnung durch Entscheidungsrückkoppelung	180
9	Messtechnik in Glasfasern und optischen Übertragungssystemen	183
9.1	Messtechnik an Glasfasern.	184
9.1.1	Messung des Brechzahlprofils	184
9.1.2	Dämpfungsmessungen	185
9.1.3	Dispersionsmessungen	190
9.2	Messung der Übertragungsqualität	192
9.2.1	Messung des Bit-Fehler-Verhältnisses, Empfängerempfindlichkeit	192
9.2.2	Augendiagramm	193

10	Nichtlineare Effekte in Glasfasern	197
10.1	Nichtlineare Effekte in Glasfasern	200
10.1.1	Nichtlineare Streueffekte in Glasfasern	201
10.1.2	Nichtlineare Effekte dritter Ordnung in Glasfasern, 4-Wellen-Mischung, Selbstphasenmodulation, Kreuz-Phasen-Modulation	201
10.1.3	Intensität mit nichtlinearen Effekten dritter Ordnung in Glasfasern	203
10.2	Chirp in Glasfasern	204
10.3	Polarisations-Dispersions-Management mit Nichtlinearitäten	206
10.3.1	Reduzierung des Chirps	206
10.3.2	Nutzung des Chirps	207
10.4	Äktive Kompensation der Dispersion	210
10.5	Solitonen	212
11	Passive und aktive Netze	215
11.1	Globale Netze	215
11.2	Kommunikationstopologien	220
11.3	Optische Multiplexverfahren	221
11.3.1	Raummultiplex (SDM)	222
11.3.2	Zeitmultiplex (TDM)	223
11.3.3	Wellenlängenmultiplex	225
11.4	WDM-Systeme	233
	Hilfe zu den Aufgaben	237
	Lösungen der Aufgaben	241
	Literatur	245
	Stichwortverzeichnis	247