

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Formelzeichen, Schreibweise	13
1 Einführung	17
1.1 Bedeutung der optischen Informationsübertragung	17
1.2 Dämpfung und Dispersion als maßgebende Systemparameter	18
1.2.1 Dämpfung	18
1.2.2 Dispersion (Laufzeitstreuung) und Bitrate	20
1.3 Typen, Parameter und Standards der Lichtwellenleitertechniken	21
1.3.1 Kurzstreckentechnik	21
1.3.2 Multimodetechnik mit Gradientenfasern	23
1.3.3 Monomodetechnik	25
1.4 Herstellung der Lichtwellenleiter für die Nachrichtentechnik	26
1.5 Entwicklungstendenzen	28
1.6 Berechnung von Lichtwellenleitern	28
1.6.1 Strahlenoptische und WKB-Berechnung	29
1.6.2 Wellenoptische Berechnung	30
2 Wellen, Strahlen, Moden	31
2.1 Lösungen der Wellengleichung in kartesischen Koordinaten	31
2.1.1 Allgemeine Lösung	31
2.1.2 Ebene Welle	33
2.1.3 Ausbreitungs-, Stehwellen- und Abklingverhalten	34
2.1.4 Reflexion und Brechung	35
2.1.4.1 Reflexionsfaktor und Snelliussches Gesetz	35
2.1.4.2 Leitungsersatzschaltung, Kaustik	37
2.1.5 Skalare Betrachtung	39
2.2 Eikonal- und Strahlengleichung	40
2.3 Strahl- und Wellenführung im dielektrischen Wellenleiter, Modenspektrum	42
2.3.1 Strahlenoptische Lösung	42
2.3.2 Wellenoptische Lösung	44
2.3.2.1 Feldanpassung	44
2.3.2.2 Transversale Ersatzschaltung	45
2.3.2.3 Diskussion des Planarwellenleiters	46
2.3.3 Näherungslösungen und ihre Fehler	48
2.3.3.1 Transversale Ersatzschaltungen und skalare Näherung	48
2.3.3.2 Fehler der strahlenoptischen Berechnung (WKB-Berechnung)	49
2.4 Laufzeitstreuung und Bandbreite	51
2.4.1 Frequenz- und Zeitbereich	51
2.4.2 Gruppenlaufzeit, Gruppengeschwindigkeit	51
2.4.3 Materialdispersion	53
2.4.4 Zeitliche Momente	55
2.4.5 Reihendarstellung der Spektralfunktionen nach Momenten	56
2.4.6 Reihendarstellung des Übertragungsmaßes nach Momenten	57

2.5	Beugung, Auflösung, Gaußstrahl, Phasenraum	58
2.5.1	Kirchhoffsches Beugungsintegral	58
2.5.2	Fresnel- und Fraunhofer-Beugung	59
2.5.3	Auflösungsvermögen	61
2.5.4	Gaußstrahl	62
2.5.5	Phasenraum, Liouvillesches Theorem	64
2.6	Kohärenz und Interferenzfähigkeit, Modenrauschen	66
3	Strahlenoptische Betrachtung (WKB-Betrachtung) von Multimodefasern	67
3.1	Normierte Parameter	67
3.2	Geführte Moden	68
3.2.1	Charakteristische Gleichung	68
3.2.2	WKB-Methode und Variablentransformation	70
3.2.3	Feldverteilungen	71
3.3	Leckmoden	72
3.4	Strahlungsmoden, Mantellicht	74
3.5	Modenzahlen	74
3.6	Phasenraum von LWL	76
3.6.1	Phasenraumgrenze für die geführten Moden	76
3.6.2	Aufteilung von Phasenraum und Leistung auf die Moden	78
3.6.3	Phasenraumgrenze für die Leckmoden	79
3.7	Anregung	80
3.7.1	Koppelwirkungsgrad	80
3.7.2	70-%-Anregung	81
3.8	Nah- und Fernfeld	82
3.9	Laufzeitstreuung, Profilloptimierung, Gewichtsfunktion	82
3.9.1	Modenlaufzeiten	82
3.9.2	Dispersionsgleichgewichtsbedingung	83
3.9.3	Profilloptimierung	85
3.9.4	Impulsantwort	86
3.10	Fasern mit Störungen, Modenkopplung	88
3.10.1	Überblick über die Berechnungsmethoden	88
3.10.1.1	Ersatzlichtwellenleiter bei Krümmung	89
3.10.1.2	Gleichungen für die gekoppelten Wellen	89
3.10.1.3	Statistische Gleichungen für die gekoppelte Leistung	91
3.10.2	Modell für einen LWL-Abschnitt	92
3.10.3	Erweiterung auf LWL-Ketten	94
4	Wellenoptische Betrachtung, Monomodefasern	96
4.1	Skalare Lösung für die Stufenfaser	96
4.1.1	Feldansätze	96
4.1.2	Eigenwertgleichung und Modendiagramm	99
4.1.3	Phasenkoeffizienten und Gruppenlaufzeiten	102
4.1.4	Strahlungs- und Leckmoden	103
4.2	Skalare Lösung für den parabolischen LWL	103
4.3	Vektorielle Lösung für die Stufenfaser	104
4.3.1	Exakte Lösung	104
4.3.1.1	Feldansätze	104
4.3.1.2	Eigenwertgleichungen	106
4.3.2	Näherungen für schwach führende LWL, Relationen zu den LP-Moden	108

4.3.2.1	Eigenwerte	108
4.3.2.2	Felder	108
4.3.2.3	Annäherung der Hybridmoden durch LP-Moden	109
4.4	Numerische Berechnung von LWL	111
4.5	Modenanregung	114
4.6	Monomode-LWL mit Stufenprofil	116
4.6.1	Feldverteilung, Monomodebereich	116
4.6.2	Dispersion	118
4.7	Monomode-LWL mit anderen Profilen	120
4.7.1	Gaußapproximation des Feldes, Ersatz-SLWL	120
4.7.2	Dispersion und Breitbanddispersionsoptimierung	122
4.7.3	Mikrokrümmungsverluste	124
4.8	Polarisationsdispersion, polarisationserhaltende MLWL	125
4.8.1	Wirkungen von Anisotropie	125
4.8.2	Ursachen der Anisotropie, Polarisationsdispersion	126
4.8.3	Polarisationserhaltende Lichtwellenleiter	127
4.9	Optimale Sendeimpulsbreite bei sehr kurzen Impulsen	128
5	Strahlungsquellen	131
5.1	Lichtemittierende Dioden	131
5.1.1	Energieschema eines nicht- bzw. eines dotierten Halbleiters	132
5.1.2	pn-Übergang einer Lumineszenzdiode	132
5.1.3	Spezielle Lumineszenzdioden für LWL-Systeme	135
5.1.4	Wirkungsgrad der Lumineszenzdiode	136
5.1.5	Abstrahlcharakteristik	137
5.2	Laser	138
5.2.1	Wirkungsweise des Lasers	139
5.2.1.1	Spontane Emission	139
5.2.1.2	Induzierte Emission	140
5.2.1.3	Absorption	140
5.2.1.4	Besetzungsinversion	141
5.2.1.5	Optischer Resonator	141
5.3	Halbleiterlaser	142
5.3.1	Prinzipielle Arbeitsweise des Halbleiterlasers	143
5.3.2	Aufbau spezieller cw-Laser	144
5.3.2.1	Gewinngeführte Laserdioden	146
5.3.2.2	Indexgeführte Laserdiode	147
5.3.2.3	Dynamische Einmodenlaser (single mode laser, DSM-Laser)	148
5.4	Elektrische und optische Eigenschaften von Laserdioden	149
5.4.1	Licht-Strom-Kennlinie	149
5.4.2	Schwellstrom	150
5.4.3	Wirkungsgrad der Laserdiode	152
5.4.4	Abstrahlcharakteristik der Laserdiode	152
5.4.5	Spektralcharakteristik der Laserdiode	153
5.5	Gegenüberstellung wesentlicher Kenngrößen von Lumineszenz- und Laserdioden	154
5.6	Modulation der Lumineszenzdiode und der Laserdiode	154
5.6.1	Modulation der Lumineszenzdiode	156
5.6.1.1	Direkte Intensitätsmodulation	156
5.6.1.2	Indirekte Intensitätsmodulation	159
5.6.2	Modulation der Laserdiode	159

10	<i>Inhaltsverzeichnis</i>	
5.7	Modulationsschaltungen	162
5.7.1	Modulationsschaltungen mit Lumineszenzdiode und Laserdiode	162
6	Fotoempfänger – optoelektrische Wandler	164
6.1	Wirkprinzipien	164
6.1.1	Wirkungsweise der Fotodiode	164
6.1.2	Kennlinie einer Fotodiode	165
6.1.3	Wandlungsprozeß im optischen Empfänger	166
6.2	Kenngrößen des optoelektrischen Wandlers	171
6.2.1	Quantenwirkungsgrad	171
6.2.2	Spektrale Empfindlichkeit	171
6.2.3	Rauschbegrenzte Empfindlichkeit	173
6.2.3.1	Ersatzschaltung mit Rauschquellen	173
6.2.3.2	(Rausch-)Qualitätskriterien für optische Empfänger	175
6.3	Eigenschaften spezieller Dioden für die LWL-Technik	177
6.3.1	pin-Fotodiode	177
6.3.2	Avalanche-Fotodiode	178
6.4	Empfängerschaltungen	184
6.4.1	Struktur der Empfängerschaltungen	184
6.4.2	Vorverstärker	186
6.4.2.1	Vorverstärker mit Fototransistor	186
6.4.2.2	Vorverstärker mit Fotodioden	187
6.4.3	Optische Empfänger mit Fotodioden	189
7	Verbindungs- und Kopplungstechnik	190
7.1	Grundlegende Gesetze der optischen Strahlung	190
7.1.1	Einordnung der optischen Informationsübertragung in das Gebiet der optischen Strahlung	190
7.1.2	Lambertstrahler	190
7.1.3	Fotometrisches Grundgesetz	192
7.1.4	Lambertsches Kosinusetz	193
7.2	Ankopplung eines Lichtwellenleiters an eine Strahlungsquelle	195
7.3	Verbindungstechnik	200
7.3.1	Steckverbinder	200
7.3.1.1	Kopplungsprinzipien	201
7.3.1.1.1	Stirnflächenkopplung	201
7.3.1.1.2	Kopplung mittels Tapers	201
7.3.1.1.3	Linsenkopplung	202
7.3.1.2	Koppelverluste	203
7.3.1.2.1	Koppelverluste durch unterschiedliche Parameter der Lichtwellenleiter	204
7.3.1.2.2	Koppelverluste auf Grund fertigungsbedingter Toleranzen	206
	– Verluste bei Abstand der Stirnflächen	207
	– Verluste bei Achsversatz	208
	– Verluste bei verkippten Stirnflächen	209
	– Verluste bei Schräganschliff der Stirnflächen	209
	– Verluste auf Grund einer rauen Oberfläche	211
7.3.1.3	Aufbau von Steckverbindern	211
7.3.2	Spleißverbindungen	213
7.3.2.1	Schweißverbindungen	213
7.3.2.2	Klebeverbindungen	214

8	Komponenten zur Lichtverzweigung	215
8.1	Optisches Viertor	215
8.2	Optische Verzweigungen	217
8.3	Optische Schalter	221
9	Integrierte Optik	222
9.1	Überblick	222
9.2	Elektrooptische Bauelemente auf LiNbO_3 -Basis	223
9.2.1	Mach-Zehnder-Interferometer	223
9.2.2	Richtkopplerumschalter	224
9.2.3	X-Schalter	226
9.3	Berechnungsverfahren für planare und Kanalwellenleiter	227
9.3.1	Planare Wellenleiter	227
9.3.1.1	Transversale Resonanzmethode	228
9.3.1.2	WKB-Lösung	229
9.3.2	Kanalwellenleiter	230
9.3.2.1	Marcatilmodell	230
9.3.2.2	Methode der Effektivbrechzahl	230
9.4	Berechnungsverfahren für Bauelemente	232
9.4.1	Berechnung von Richtkopplern	232
9.4.2	Strahlausbreitungsmethode	233
10	Lichtwellenleiterübertragungssysteme	235
10.1	Grundlegende Eigenschaften	235
10.2	Analoge Systeme	239
10.2.1	Grundlegendes über analoge Systeme	239
10.2.2	Spezielle analoge Systeme	241
10.3	Digitale Systeme	244
10.3.1	Grundlegendes über digitale Systeme	244
10.3.1.1	Zusammenhang zwischen Signal-Rausch-Verhältnis und der Bitfehler- rate	248
10.3.1.2	Optische Mindestempfangsleistung bei digitaler Übertragung (Grenz- empfindlichkeit)	251
10.3.1.3	Pulskodemodulation	253
10.3.1.4	Augendiagramm	255
10.3.1.5	Kodierung	256
10.3.2	Spezielle digitale Systeme	261
10.3.2.1	PCM 30 (2,048 Mbit/s)	261
10.3.2.2	PCM 120 (8,448 Mbit/s)	262
10.3.2.3	PCM 480 (34,368 Mbit/s)	265
10.3.2.4	PCM 1920 (140 Mbit/s)	266
10.3.2.5	PCM 7680 (565 Mbit/s)	268
10.3.2.6	PCM-Systeme höherer Hierarchiestufen	270
10.3.2.7	Lichtwellenleitersysteme für den Teilnehmeranschlußbereich	270
10.4	LWL-Übertragungssysteme mit erhöhter Leistungsfähigkeit	271
10.4.1	Duplexbetrieb	271
10.4.2	Wellenlängenmultiplextechnik	272
10.4.2.1	Prismenmultiplexer und Prismendemultiplexer	273
10.4.2.2	Beugungsgitter als Multiplexer bzw. Demultiplexer	274
10.4.2.3	Multiplexer und Demultiplexer aus dielektrischen Dünnschichtfiltern	275

10.4.3	Optischer Überlagerungsempfang	277
10.4.4	Optische Bussysteme	283
11	Meßverfahren der optischen Informationsübertragung und der Lichtwellenleiter- technik	285
11.1	Erzielen einer angenäherten Modengleichgewichtsverteilung	285
11.1.1	70%-Anregung	285
11.1.2	Modenmischung mit Vorlauflichtwellenleiter	287
11.1.3	Modenmischung mit Vorlauflichtwellenleiter, konzentrierte Form	287
11.1.4	Modenmischung mit Modenfilter	287
11.2	Messen der numerischen Apertur	288
11.3	Messen der optischen Leistung bzw. des optischen Pegels	289
11.4	Messen der Dämpfung	290
11.4.1	Meßbedingungen	290
11.4.2	Meßmethoden	291
11.4.2.1	Abschneideverfahren (cut-back-method)	291
11.4.2.2	Einfügeverfahren (insertion-loss-method)	292
11.4.2.3	Dämpfungsmessung an Monomode-Lichtwellenleitern	292
11.4.3	Dämpfungsmessung an Steckverbindungen	293
11.4.3.1	Meßverfahren mit identischem Lichtwellenleiter	293
11.4.3.2	Meßverfahren mit kurzer konfektionierter Leitung	294
11.5	Reflektometerverfahren	294
11.5.1	Reflektometer zur Fehlerortung	294
11.5.2	Reflektometer als Dämpfungsmeßgerät	297
11.5.3	Reflektometer als Rückstreumeßgerät; Rückstreuverfahren	297
11.6	Messung der Basisbandbreite bzw. Dispersion	300
11.6.1	Vorbemerkungen	300
11.6.2	Bandbreitenmessung von Multimodefasern	302
11.6.2.1	CCITT-Empfehlung G.651	302
11.6.2.2	Ausführungsbeispiel eines Impulsmeßplatzes	302
11.6.3	Dispensionsmessung von Monomodefasern	304
11.7	Messung des Brechzahlprofils	306
11.7.1	Überblick	306
11.7.2	Nahfeldtechnik	307
11.7.3	Eliminierung des Leckmodeneinflusses bei der Nahfeldmessung	308
11.7.4	RNF-Verfahren	311
11.8	Bestimmung des Felddurchmessers von Monomodefasern	314
11.8.1	Transversalversatzverfahren	314
11.8.2	Ermittlung aus dem Nah- oder Fernfeld	315
11.9	Bestimmung der Grenzwellenlänge	316
11.9.1	Technik der übertragenen Leistung	317
11.9.2	Technik des Modenfeldradius	318
	Literaturverzeichnis	319
	Sachwörterverzeichnis	326