

Inhaltsverzeichnis

1	Optische Wellen	1
1.1	Einige Grundbegriffe der Wellenlehre	1
1.1.1	Ebene harmonische Wellen	1
1.1.2	Phase einer Welle; Phasenänderung längs einer Wegstrecke und innerhalb einer Zeitspanne	3
1.1.3	Phasengeschwindigkeit und Ausbreitungskonstante	4
1.1.4	Wellenlänge	6
1.1.5	Wellengruppen und Gruppengeschwindigkeit	6
1.2	Elektromagnetische Wellen	9
1.2.1	Mathematische Beschreibung	9
1.2.2	Transversale und longitudinale Feldanteile; Wellenbezeichnungen	11
1.2.3	Polarisation	13
1.2.4	Intensität und Leistung	15
1.2.5	Komplexe Notation	17
1.2.6	Freie Wellenausbreitung in Vakuum	17
1.3	Licht als elektromagnetische Welle	18
1.3.1	Frequenzmäßige Einordnung	18
1.3.2	Phasengeschwindigkeit in Materie, Brechungsindex	19
1.3.3	Gruppengeschwindigkeit in Materie, Gruppenbrechungsindex	20
1.3.4	Kohärenz realer optischer Wellen	21
1.3.5	Strahlenmodell der Lichtausbreitung	23
2	Lichtwellenleiter	25
2.1	Dielektrische Wellenleiter	25
2.2	Lichtwellenleiter in Faserform	26
2.2.1	Einteilung nach dem Brechzahlprofil	27
2.2.2	Einteilung nach der übertragbaren Modenvielfalt	29
2.3	Integriert-optische Lichtwellenleiter	30
2.3.1	Streifenleiter mit aufgesetzten oder versenkten Streifen	30
2.3.2	Streifenleiter mit Höhenprofilierung eines Kernfilms (Rippenleiter)	31
2.3.3	Funktionstypen und Substratmaterialien	32

3	Geometrisch-optische Lichtwege in LWL	35
3.1	Strahlenoptische Lichtwege im Stufenindex-LWL	35
3.1.1	Reelle Totalreflexion an einer Trennfläche	35
3.1.2	Prinzip der Lichtführung im Filmwellenleiter mit Stufenprofil	37
3.1.3	Lichtausbreitung in gebogenen LWL	38
3.2	Prinzip der Lichtführung in Gradientenindex-LWL mit parabolischem Brechzahlprofil	39
3.2.1	Virtuelle Totalreflexion	39
3.2.2	Lichtwege in Filmwellenleitern mit Parabelprofil	41
3.3	Übertragung auf rotationssymmetrische Faser-LWL	45
3.3.1	Meridionalstrahlen, schiefe Strahlen, Helixstrahlen	46
3.3.2	Akzeptanzwinkel, Akzeptanzkegel, numerische Apertur	47
4	Berücksichtigung der Wellennatur des Lichtes	51
4.1	Stufenprofil-Filmwellenleiter	51
4.1.1	Stehwellen	51
4.1.2	Interferenz bei mehrfacher Totalreflexion: charakteristische Gleichung	55
4.1.3	Moden	60
4.1.4	Evaneszente Felder und Intensitäten	62
4.1.5	Modenverhalten bei Biegung des LWL	65
4.2	Gradientenindex-Filmwellenleiter mit Parabelprofil	66
4.3	Übertragung auf rotationssymmetrische Faser-LWL und auf integriert-optische LWL	67
5	Exakte Berechnung der Lichtausbreitung	69
5.1	Faser-LWL mit Stufenprofil	69
5.1.1	Entwicklung einer Wellendifferentialgleichung aus den Maxwell'schen Gleichungen	69
5.1.2	Geführte Moden als Lösung der „reduzierten“ Differentialgleichung	72
5.1.3	Lösungsversuch: LP-Moden (Moden mit einheitlich in derselben Richtung linear polarisierten Feldern)	74
5.1.4	LP-Modenbilder in Stufenprofilfasern	79
5.1.5	Strahlungsmoden und Leckmoden	87
5.1.6	Kern-Mantel-Leistungsaufteilung, Moden-cutoff	89
5.1.7	Übergang zur Einmodigkeit, Gauß'sche Näherung für LP_{01}	91
5.1.8	Modenberechnung bei Verzicht auf einheitliche lineare Polarisation	92

5.2	Modenfelder in Gradientenprofilfasern	94
5.3	Modenfelder in integriert-optischen Lichtwellenleitern	96
6	Einige Grundlagen der optischen Nachrichtenübertragung . .	99
6.1	Analoge und digitale Signale	99
6.2	Nachrichtenübertragung in Trägerfrequenztechnik	100
6.2.1	Analoge Übertragung	101
6.2.2	Binäre digitale Übertragung	103
6.2.3	Optische Wellen als Nachrichtenträger	104
6.2.4	Übertragungsgeschwindigkeit	105
6.3	Der Einfluß des Rauschens	105
6.3.1	Signal-Rausch-Verhältnis	106
6.3.2	Abnahme des Signal-Rausch-Verhältnisses durch Laufzeitunterschiede	107
6.3.3	Ursachen der Laufzeitunterschiede: Dispersion	112
6.4	Systemkenngrößen für die Übertragung von leistungsmoduliertem Licht	114
7	Verluste in Lichtwellenleitern	115
7.1	Quantitative Erfassung der Dämpfung	115
7.2	Dämpfung in Glasfaser-LWL	118
7.2.1	Intrinsische Verluste: IR-Absorption, Rayleighstreuung	118
7.2.2	Extrinsische Verluste: Absorption durch Verunreinigungen, Makrobiegung der Faser	121
7.2.3	Modenabhängigkeit der Dämpfung	123
7.2.4	Intrinsische Dämpfung in LWL aus Sulfidglas oder Fluoridglas	126
7.3	Dämpfung in POF-Fasern	128
7.4	Dämpfung in integriert-optischen LWL	130
8	Modenlaufzeitunterschiede (Modendispersion)	133
8.1	Laufzeiten nach dem Strahlenmodell in Stufenprofil- und Gradientenprofilfasern	133
8.1.1	Strahlenoptische Laufzeiten im Stufenprofil	134
8.1.2	Strahlenoptische Laufzeiten im Parabelprofil	135
8.2	Exakte Theorie der Modenlaufzeiten von LP-Moden	138
8.2.1	Stufenindex-LWL	138
8.2.2	Gradientenindex-LWL mit Potenzprofil	143

8.2.3	Profiloptimierung	146
9	Einfluß der spektralen Breite der Lichtquelle: chromatische Dispersion	147
9.1	Mathematische Beschreibung	149
9.1.1	Beiträge zur chromatischen Dispersion, Dispersionskoeffizienten	149
9.1.2	Dispersionsnullstelle und dispersionsverschobene Faser	154
9.1.3	Verbesserung des Dispersionsverlaufes von Einmodenfasern durch W-Profile	156
9.2	Abschätzung der durch chromatische Dispersion verursachten Laufzeitunterschiede	158
10	Impulsverbreiterung und 3-dB-Grenzfrequenz	161
10.1	Impulsübertragung	161
10.1.1	Pulsantwortfunktion und das Problem der Leistungsaddition	161
10.1.2	Quantitative Erfassung der Impulsverbreiterung	163
10.1.3	Impulsverbreiterung einer Einmodenfaser	165
10.1.4	Impulsverbreiterung einer Vielmodenfaser	167
10.2	Analogübertragung	173
10.2.1	Bandbreite einer Einmodenfaser	176
10.2.2	Bandbreite einer Vielmodenfaser	177
10.3	Dispersion im Datenblatt; Bandbreite-Länge-Produkte	178
10.3.1	Einmoden-LWL	178
10.3.2	Vielmoden-LWL	179
11	Grenzen optischer Übertragungssysteme durch Dämpfung und Dispersion	183
11.1	Analoge Übertragung	184
11.2	Digitale Übertragung (PCM-Übertragung)	187
12	Meßwerterfassung mit Lichtwellenleiter-Sensoren	191
12.1	Einige Grundbegriffe der Sensorik	191
12.2	Einteilung der Sensoren	192
12.3	Optische Sensorik mit Lichtwellenleitern	194
12.3.1	Extrinsische LWL-Sensoren: LWL in Sensoren	194

12.3.2	Intrinsische LWL-Sensoren: <i>LWL als Sensor</i>	195
12.3.3	LWL in hybriden Sensoren	197
13	Beispiele extrinsischer optischer Sensoren	199
13.1	Füllstandsanzeiger	200
13.2	Abstandssensor durch Phasenlaufzeitmessung	201
13.3	Temperatursensor	204
13.4	Polarisationssensor (Polarimeter)	206
13.4.1	Aufbau und Wirkungsweise	206
13.4.2	Mathematische Behandlung	207
13.4.3	Erzeugung linearer Doppelbrechung am Beispiel des elasto-optischen Effektes und des Kerr-Effektes	210
13.4.4	Querempfindlichkeit und optische Gleichtaktunterdrückung	212
14	Intrinsische Sensoren mit Standardfasern	215
14.1	Mikrobiegungssensor	215
14.2	Sensorwirkung durch Abänderung der Mantelbrechzahl	216
14.3	Evanescent field sensor	218
14.4	„Verteilte“ Intensitätssensoren und OTDR-Auswertung	220
14.5	Sensoren mit Bragg-Gitter im Glasfaserkern	223
15	Polarisationscharakteristik von Faser-LWL	229
15.1	Polarisation in Vielmodenfasern	229
15.2	Polarisation in Standard-Einmodenfasern	232
15.3	Fasern mit modifiziertem linearen Polarisationsanteil	234
15.3.1	Fasern mit reduzierter eigener linearer Anisotropie (LoBi fiber)	234
15.3.2	Fasern mit verstärkter eigener linearer Anisotropie (HiBi fiber)	234
15.3.3	Polarisationsmodenkopplung	237
15.3.4	HiBi-Fasern als Polarisatoren	239
15.4	Fasern mit modifiziertem zirkularen Polarisationsanteil	240
16	Intrinsische faseroptische Polarimeter	241
16.1	Einbringen zusätzlicher linearer Anisotropie	242
16.2	Einbringen zusätzlicher zirkularer Anisotropie	246

17 Interferometrische Sensoren: Grundlagen	253
17.1 Sensorik durch Änderung optischer Weglängen	253
17.2 Messung von Phasendifferenzen mit Zweistrahlinterferometern	254
17.3 Zweistrahlinterferometer als Sensor	257
17.4 Anforderungen an die Lichtquelle	259
17.5 Lichtwellenleiter in Zweistrahlinterferometern	261
18 Sensoren mit LWL-Interferometern nach Mach-Zehnder und nach Michelson	265
18.1 Mach-Zehnder-Interferometer als Sensor	265
18.1.1 Interferometeraufbau und Sensorkennlinie	265
18.1.2 Linearisierung der Kennlinie durch aktive Rückkoppelung	269
18.1.3 Einsatzmöglichkeiten	274
18.2 Michelson-Interferometer als Sensor	275
18.2.1 Interferometeraufbau und Sensorkennlinie	275
18.2.2 Linearisierung der Kennlinie durch Phasenmodulation	277
19 Faseroptisches Sagnac-Interferometer als Drehratensensor	283
19.1 Aufbau des Interferometers	283
19.2 Sagnac-Effekt	285
19.3 Berechnung des Phasenversatzes infolge Rotation	287
19.4 Technische Realisierung; Linearisierung der Kennlinie	290
19.5 Einsatz von Sagnac-Drehratensensoren	295
A1 Anhang: Sellmeier-Beschreibung der Wellenlängen-abhängigkeit der Brechzahl	297
A2 Anhang: Zentrum und effektive Breite eines Zeitpulses bzw. einer Spektrallinie	301
A3 Anhang: Polarisierung von Licht	303
A4 Anhang: Mathematische Beschreibung der Polarisierung mit dem Jones-Formalismus	311
A4.1 Jones-Vektoren	311

A4.2 Polarisationsoptische Bauelemente und Jones-Matrizen	313
A4.2.1 Linearpolarisator	313
A4.2.2 Linearer Retarder (lineare Doppelbrechung, lineare optische Anisotropie)	314
A4.2.3 Zirkularer Retarder (zirkulare Doppelbrechung, zirkulare optische Anisotropie)	317
A4.2.4 Eigenzustände polarisationsoptischer Bauelemente . . .	319
A5 Anhang: Vereinfachte mathematische Beschreibung von Kopplern mit Einmoden-LWL	
	321
A6 Anhang: Transversaler Pockels-Effekt (transversaler linearer elektrooptischer Effekt)	
	327
Literaturverzeichnis	
	331
Sachverzeichnis	
	333