

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b> .....	13
<b>Abkürzungen</b> .....	19
<b>1. Übersicht und Einordnung</b> .....	21
1.1. Lichtwellenleiter und elektromagnetisches Spektrum .....	21
1.2. Historischer Abriß .....	22
1.3. Baugruppen .....	23
1.4. Bewertung der optischen Wellen .....	23
<b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....	27
2.1. Die Maxwellschen Gleichungen .....	27
2.2. Wellenoptische Grundlagen .....	29
2.2.1. Ebene und zylindrische optische Strukturen .....	29
2.2.1.1. Wellengleichungen in der Ebene .....	29
2.2.1.2. Wellengleichungen für zylindrische Lichtwellenleiter .....	31
2.2.2. Reflexion und Brechung optischer Wellen .....	32
2.2.2.1. Die optische Grenzfläche .....	32
2.2.2.2. Die optischen TE-Moden an der Grenzfläche .....	33
2.2.2.3. Die optischen TM-Moden an der Grenzfläche .....	35
2.2.2.4. Phasenverschiebung der Wellenkomponenten bei Reflexion .....	36
2.3. Strahlenoptische Grundlagen .....	37
2.3.1. Zum Strahlencharakter des Lichtes .....	37
2.3.2. Grundlagen der strahlenoptischen Betrachtung .....	38
2.3.3. Gleichungen im inhomogenen Medium .....	40
2.3.4. Strahlenoptische Ableitung des Brechungsgesetzes .....	42
2.3.5. Strahlenoptische Grundgleichungen für zylindrische Lichtwellenleiter .....	43
2.3.6. Berechnung der Trajektorie eines Lichtstrahls in einem Gradientenindex-LWL .....	44
2.4. Der zylindrische Stufenindex-LWL .....	46
2.4.1. Aufbau .....	46
2.4.2. Gleichungen .....	46
2.4.3. Modenausbildung im Stufenindex-LWL .....	48
2.5. Lichtausbreitung im zylindrischen Gradienten-LWL .....	51
2.5.1. Besonderheiten .....	51
2.5.2. Modenausbildung im Gradienten-LWL .....	52

<b>3.</b>	<b>Sender und Senderschaltungen</b> .....	<b>56</b>
3.1.	Einleitung .....	56
3.2.	Laserdioden .....	57
3.2.1.	Aufbau .....	57
3.2.2.	Strom-Spannungs-Kennlinien .....	58
3.2.3.	Parameter und Eigenschaften der DH-Laser .....	59
3.2.3.1.	Verstärkung und Steilheit .....	59
3.2.3.2.	Externer differentieller Quantenwirkungsgrad .....	60
3.2.3.3.	Strahlungscharakteristik .....	62
3.2.3.4.	Nichtlinearitäten bei Laserdioden .....	63
3.3.	Lichtemittierende Dioden (LED) .....	64
3.3.1.	Aufbau .....	64
3.3.2.	Die Leistungs-Strom-Kennlinien .....	65
3.3.3.	Weitere Parameter und Eigenschaften .....	65
3.3.3.1.	Strahlungscharakteristik .....	66
3.3.3.2.	Temperaturabhängigkeit .....	66
3.3.3.3.	Ausgewählte Parameter .....	67
3.4.	Zuverlässigkeit von LED und Laserdioden .....	68
3.4.1.	Zur Physik der Diodenzuverlässigkeit .....	68
3.4.1.1.	Interne Degradation .....	68
3.4.1.2.	Ohmsche Kontakt-Degradation .....	68
3.4.1.3.	Facettenschaden bei Lasern .....	69
3.4.2.	Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit .....	69
3.5.	Parametervergleich von LED und Lasern .....	71
3.6.	Senderschaltungen .....	71
3.6.1.	Aufgabenstellung .....	71
3.6.2.	LED-Senderschaltungen .....	72
3.6.3.	Lichtleistungsregelung bei Senderschaltungen .....	74
3.6.4.	Senderschaltungen mit Laserdioden (ILD) .....	75
<b>4.</b>	<b>Fotodetektoren und Empfängerschaltungen</b> .....	<b>77</b>
4.1.	Arten von Fotodetektoren .....	77
4.1.1.	Fotozelle .....	77
4.1.2.	Fotowiderstand .....	78
4.1.3.	Fotodetektoren mit Sperrschiicht .....	79
4.2.	Spezielle Fotodetektor-Halbleiterbauelemente für die LWL-Technik .....	80
4.2.1.	Anforderungen an Detektoren .....	80
4.2.2.	PIN-Fotodiode .....	81
4.2.3.	Lawinenfotodiode (APD) .....	82
4.2.4.	Vergleich von PIN- und Lawinenfotodioden .....	84
4.3.	Rauschen .....	85
4.3.1.	Allgemeines zum Rauschen in optischen Systemen .....	85
4.3.2.	Rauscherscheinungen in Fotodetektoren .....	85
4.3.2.1.	Rauschen der PIN-Diode .....	85
4.3.2.2.	Rauschvorgänge in Lawinenfotodioden .....	88
4.3.3.	Elektronisches Rauschen .....	90
4.3.3.1.	Rauschanalyse elektronischer Vierpole .....	90
4.3.3.2.	Rauschverhalten von Bipolar- und Feldeffekttransistor .....	92

4.4.	Grundlagen des Entwurfs von Empfängern für die LWL-Technik	93
4.4.1.	Aufgabenstellung	93
4.4.2.	Blockschaltbild	94
4.4.3.	Rauschanalyse optischer Empfänger	95
4.4.3.1.	Berechnung des Analogempfängers	95
4.4.3.1.1.	Signal-Rausch-Verhältnis	95
4.4.3.1.2.	Minimale optische Leistung bei optimaler Lawinenverstärkung	97
4.4.3.2.	Berechnung des Digitalempfängers	99
4.4.3.2.1.	Abschätzung der Detektorschwelle bei vorgegebener Bitfehler- rate	99
4.4.3.2.2.	Konvertierung der Bitfehlerrate in das Signal-Rausch-Verhältnis	101
4.4.3.2.3.	Signalübertragung im Digitalempfänger	102
4.4.3.2.4.	Rauschverhalten des Digitalempfängers	103
4.4.3.2.5.	Minimale Lichtimpulsenergie bei optimaler Lawinenverstärkung	105
5.	<b>Modulation</b>	108
5.1.	Besonderheiten der Modulation optischer Signale	108
5.1.1.	Analoge Modulation	109
5.1.2.	Pulsmodulation	110
5.1.3.	Digitale Modulation	110
5.2.	Direkte Modulation	111
5.2.1.	Zur Modulation von LED	111
5.2.2.	Modulation von Halbleiterlaserdioden	113
5.3.	Optische Modulatoren zur indirekten Modulation	115
5.3.1.	Modulationsmethoden	115
5.3.2.	Elektrooptische Modulatoren	115
6.	<b>Lichtwellenleiter, Eigenschaften und Aufbau</b>	118
6.1.	Dämpfung und Dispersion	118
6.1.1.	Dämpfung	118
6.1.1.1.	Absorption	118
6.1.1.2.	Streuverluste	119
6.1.1.3.	Strahlungsverluste	120
6.1.1.4.	Kern- und Mantelverluste	121
6.1.2.	Dispersion	122
6.1.2.1.	Materialdispersion	122
6.1.2.2.	Wellenleiterdispersion	123
6.1.2.3.	Modenkopplungsdispersion	123
6.1.2.4.	Profildispersion	124
6.2.	Anwendungsorientierte Parameterberechnung	124
6.2.1.	Optische Übertragungseigenschaften	124
6.2.1.1.	Dämpfung durch Mikrokrümmung	125
6.2.1.2.	Dämpfung bei sehr kurzen Lichtwellenleitern	125
6.2.2.	Mechanische Eigenschaften	126
6.2.2.1.	Zugbelastung von Lichtwellenleitern	126
6.2.2.2.	Beanspruchungen durch Verkabelung	127
6.2.3.	Weitere Eigenschaften optischer Kabel	127
6.3.	Impulsverhalten von Lichtwellenleitern	128
6.4.	Bauformen von LWL-Kabeln	130

<b>7.</b>	<b>Optische Verbindungen, Verzweigungen, Schalter</b> .....	131
7.1.	Goniometrische Grundgleichungen .....	131
7.2.	Goniometrische Kenngrößen der optischen Quellen .....	132
7.3.	Kopplung der optischen Quelle mit dem Lichtwellenleiter .....	133
7.3.1.	Einfluß der numerischen Apertur .....	133
7.3.2.	Wirkungsgrad der Kopplung .....	134
7.3.2.1.	Direkte Kopplung zwischen optischer Quelle und Stufenindex-LWL .....	134
7.3.2.2.	Direkte Kopplung zwischen optischer Quelle und Gradientenindex-LWL .....	135
7.3.2.3.	Indirekte Kopplung mit Linsenanordnungen .....	137
7.3.3.	Weitere Konstruktionsformen der Lichtein- und Lichtauskopplung .....	139
7.4.	Verbindungen zwischen Lichtwellenleitern .....	141
7.4.1.	Verlustquellen .....	141
7.4.2.	Lösbare Verbindungen von Einfach-LWL .....	143
7.4.3.	Nichtlösbare Verbindungen von Einfach-LWL .....	144
7.4.3.1.	Fusionstechnologie .....	144
7.4.3.2.	Klebetchnologie .....	145
7.4.4.	Verbindungen von Mehrfach-LWL .....	145
7.5.	Verzweigungstechnik .....	146
7.6.	Optische Schalter .....	148
<b>8.</b>	<b>Systementwurf mit Lichtwellenleitern</b> .....	150
8.1.	Parameterauswahl .....	150
8.1.1.	Wellenlänge .....	150
8.1.2.	Sendedioden .....	150
8.1.3.	LWL-Typen .....	151
8.1.4.	Empfänger .....	152
8.1.5.	Systemauswahl .....	152
8.2.	Klassifizierung der LWL-Systeme .....	152
8.3.	Auswahlprinzipien für Senderschaltungen, Empfängerschaltungen und Lichtwellenleiter .....	153
8.3.1.	Problemstellung .....	153
8.3.2.	Auswahl der Lichtwellenleiter .....	155
8.3.3.	Auswahl der Empfängerschaltungen .....	155
8.3.4.	Auswahl der Senderschaltungen .....	157
8.4.	Datenübertragungsnetzwerke für die Prozeßautomatisierung .....	157
8.4.1.	Modulare Übertragungsbaugruppen .....	157
8.4.2.	Entwurf von Datenübertragungsnetzwerken .....	159
8.4.3.	LWL-Datenbus .....	160
8.4.3.1.	Dynamikbereich .....	160
8.4.3.2.	Leistungsverhältnis .....	161
8.4.3.3.	Gesamte Systemverluste .....	162
8.4.3.4.	Größenordnungen der Parameter .....	162
8.4.3.5.	Das modifizierte Duplex-Datenbus-System .....	163
8.4.3.6.	Vergleichende Bewertung der LWL-Bus-Systeme .....	163

8.5.	Signalübertragungsverfahren in der Meß- und Automatisierungstechnik...	164
8.6.	Beeinflussung von LWL-Übertragungsstrecken .....	165
8.6.1.	Systematisierung der Einflußfaktoren .....	165
8.6.2.	Elektromagnetische Beeinflussung .....	165
8.6.3.	Mechanische Beeinflussung .....	165
8.6.4.	Klimatische Beeinflussung .....	165
8.6.5.	Radioaktive Beeinflussung .....	166
8.7.	Näherungsverfahren zum Entwurf von LWL-Systemen .....	166
8.7.1.	Zielstellung .....	166
8.7.2.	Die optische Leistungsbilanz .....	166
8.7.3.	Bandbreite des LWL-Systems .....	168
8.7.4.	Grafisches Verfahren zur Abschätzung der Systemparameter...	169
8.8.	Sicherheit bei der Arbeit mit LWL-Systemen.....	170
<b>9.</b>	<b>Messungen in der LWL-Technik .....</b>	<b>172</b>
9.1.	Übersicht .....	172
9.2.	Messung der LWL-Parameter .....	173
9.2.1.	Grundlegende Meßverfahren .....	173
9.2.2.	Messung der Übertragungsverluste .....	174
9.2.3.	Messung der Streuverluste .....	176
9.2.4.	Messung der Absorptionsverluste .....	176
9.2.5.	Messung der Verzerrungen und der Bandbreite .....	177
9.2.5.1.	Messungen im Zeitbereich .....	178
9.2.5.2.	Messungen im Frequenzbereich .....	179
9.2.6.	Messung der Brechzahlen des Lichtwellenleiters.....	179
9.2.6.1.	Methode der Interferenz .....	180
9.2.6.2.	Methode des gebrochenen Nahfeldes .....	181
9.3.	LWL-Kabelprüfung .....	181
9.4.	Fehlerratenmessung in LWL-Systemen .....	182
<b>10.</b>	<b>Anwendungsbeispiele der Meß- und Automatisierungstechnik .....</b>	<b>184</b>
10.1.	Meßwerterfassung, LWL-Sensoren .....	184
10.1.1.	Übersicht .....	184
10.1.2.	Mach-Zehnder-LWL-Interferometer .....	185
10.1.3.	LWL-Gradientenfeld-Magnetometer .....	186
10.1.4.	Dualkern-Monomoden-LWL-Sensor .....	187
10.1.5.	LWL-Interferometer-Sensor mit passiver quadratischer Demodulation .....	187
10.1.6.	LWL-Sensor auf der Basis der Krümmungsverluste .....	189
10.1.7.	LWL-Magnetfeld-Sensor mit metallischen Gläsern .....	189
10.1.8.	LWL-Sensor für magnetooptische Strommessungen in Hochspannungsanlagen .....	189
10.1.9.	LWL-gekoppelter Wismut-Silizium-Oxid-Sensor .....	190
10.1.10.	Hilfsenergiefreie optoelektronische Strom- und Spannungsmessung auf Hochspannungspotential .....	191
10.1.11.	Potentialfreie Messung hoher zeitveränderlicher elektrischer Felder mit Lichtwellenleitern .....	191

10.1.12.	Schwingungs- und Beschleunigungssensor mit Lichtwellenleitern	192
10.1.13.	Drucksensor mit Lichtwellenleitern .....	192
10.2.	Kopplung der Elektroenergieübertragung mit der Nachrichten- und Prozeß- datenübertragung .....	193
10.2.1.	Freileitungsseile mit Lichtwellenleitern .....	193
10.2.2.	LWL-System für Instandhaltungsinformationen von Hoch- spannungsfreileitungen .....	195
10.2.3.	Komplexes überregionales LWL-Informationssystem .....	196
10.3.	Beispiele zur LWL-Signalübertragung in der Automatisierungstechnik....	197
10.3.1.	Lichtwellenleiter für Automatisierungsnetze mit Computern....	197
10.3.2.	Integrierte digitale Energieanlagenautomatisierung mit Licht- wellenleitern .....	199
10.4.	Direkte Bildübertragung mit Lichtwellenleitern .....	199
10.5.	Mikroprozessor-Bus-Systeme mit planarem Lichtwellenleiter .....	199
10.6.	LWL-Energieübertragung für Schweißroboter .....	201
<b>11.</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>202</b>
11.1.	Langwellen-LWL-Technik .....	202
11.2.	Integrierte Funktionseinheiten .....	203
11.3.	Sensoren .....	204
11.4.	Lichtwellenleiter zur optischen Energieübertragung für technologische Prozesse .....	205
<b>Anhang</b>	.....	<b>206</b>
A 1.	Optische und elektrische Leistung und Bandbreite in LWL-Systemen ....	206
A 2.	Mathematisches Modell des Rauschprozesses in Fotodektoren .....	208
A 3.	Zugbelastung von Lichtwellenleitern .....	210
A 4.	Beispiel zur Berechnung von LWL-Übertragungstrecken .....	212
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	<b>215</b>
<b>Sachwörterverzeichnis</b>	.....	<b>236</b>