

Volkmar Brückner

Optische Nachrichtentechnik

Volkmar Brückner

Optische Nachrichtentechnik

Grundlagen und Anwendungen



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Professor Dr. sc. nat. Volkmar Brückner

Geboren 1949 in Zeitz. Von 1968 bis 1974 Physikstudium an der Lomonossow-Universität Moskau, 1977 Promotion zum Dr. rer. nat. an der Lomonossow-Universität. Von 1977 bis 1995 Friedrich-Schiller-Universität Jena, 1983 Promotion zum Dr. sc. nat. und 1983 facultas docendi an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Von 1983 bis 1984 Gastforscher an der Universität Amsterdam. Professor für Experimentalphysik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena 1987, Gastprofessor an der Universität Amsterdam 1992 und 1994, von 1994 bis 1995 Gastprofessor an der Autonomen Universität Puebla in Mexiko. Seit 1995 Professor für Optische Nachrichtentechnik Deutsche Telekom Fachhochschule Leipzig, seit 1998 Rektor Deutsche Telekom Fachhochschule Leipzig.

1. Auflage August 2003

Alle Rechte vorbehalten

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2003

Ursprünglich erschienen bei B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2003

www.teubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

ISBN 978-3-519-00418-9 ISBN 978-3-663-10958-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-10958-7

Vorwort

Wir leben in einem Informationszeitalter – das heißt, die zu übertragenden Datenmengen werden immer größer und die Übertragungsgeschwindigkeit wird immer höher. Die Datenübertragung der Gegenwart erfolgt sowohl mit mobilen Komponenten (Handy und UMTS seien als Stichworte genannt) als auch mittels Festnetz, bestehend aus Kupferkabeln und in enorm zunehmendem Maße aus Glasfasern. Bereits jetzt kann der Nutzer nicht unterscheiden, welchen Weg der Datenstrom nimmt – nur im Festnetz, nur über Funk oder, wie meistens, eine Kombination zwischen beiden. Dieser Prozess des Zusammenwachsens von Festnetz und Mobilfunk wird sich noch verstärken – schon bald wird man das mobile Telefon zu Hause für das Festnetz benutzen.

Damit wird klar, dass das Festnetz und folglich die Glasfasertechnik einen wichtigen Platz behaupten wird. Dabei greift man in zunehmendem Masse auf *optische Übertragungstechniken* zurück, weil diese auf Grund ihrer physikalischen Grenzen für extrem breitbandige Übertragung bestens geeignet sind. Das bedeutet aber auch, dass Glasfasern, Halbleiterlaser, Empfänger, Koppler, optische Stecker, optische Filter, Zusammenführung optischer Signale (Multiplexing), optische Verteiler (Demultiplexer) usw. eine immer größere Rolle spielen werden – und damit ist auch das Wissen um die Prozesse in diesen optischen Komponenten und um die physikalisch-technischen Grenzen gefragt.

Vor den Lehrenden im Bereich der optischen Nachrichtentechnik steht somit die Aufgabe, für Studierende an Hochschulen wie auch für die Weiterbildung z.B. von Kommunikationstechnikern diese zum Teil sehr komplizierten Prozesse didaktisch aufzubereiten. Das vorliegende Lehrbuch basiert auf Grundkenntnissen der Physik und der Mathematik. Dabei nutze ich bewusst langjährige Vorlesungserfahrungen an der Fachhochschule der Deutschen Telekom in Leipzig. Aus vielen Gesprächen, vor allem mit Studierenden, ergibt sich immer wieder, dass eine scheinbar klare Sache noch lange nicht klar sein muss und immer wieder neue Fragen und Probleme entstehen.

Das zentrale Anliegen dieses Lehrbuches ist also eine *verständliche* Darlegung der Probleme und das Umsetzen in Formeln oder in praktisch verwendbare Empfehlungen. Damit einher geht naturgemäß eine vorrangig qualitative Betrachtungsweise, ohne dabei in alle Details des formalen mathematischen Apparats einzudringen. An erster Stelle steht also die Beschreibung der Vorgänge. Dieser *rote Faden* wird durch viele Beispiele und Beispielberechnungen sowie durch die Illustration von Zusammenhängen mittels einfacher mathematischer Programme (hier mittels Mathcad) erläutert. Die Möglichkeiten dieser mathematischen Pro-

gramme sind natürlich viel umfassender, als es im Rahmen eines „starrten Lehrbuchs“ dargelegt werden kann. Entsprechende mathematische Programme können deshalb gern beim Autor abgerufen werden (www.fh-telekom-leipzig.de/~brueckner). Anhand praktischer Beispiele werden weiterhin die Probleme bzw. Grenzen einer rein optischen Datenübertragung erläutert. Nach der Lektüre dieses Buches sollten die Studierenden in der Lage sein, die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der optischen Nachrichtentechnik in der Fachliteratur bzw. auf Fachtagungen zu verstehen und einzuordnen

Viele waren am Zustandekommen dieses Buches direkt oder indirekt beteiligt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Jürgen Krauser für viele Gespräche und Vorschläge für die gemeinsame Arbeit, besonders jedoch für das kritische Durchsehen des Manuskripts. Dankenswerterweise hat Herr Dipl.-Ing. André Schuster durch viele praktische Hinweise und mit der Durchführung einer Reihe von Laborexperimenten beigetragen, ebenso Frau Heidrun Schumacher, die viele Formulierungen kritisch unter die Lupe genommen hat. Herrn Jürgen Weiß vom Teubner-Verlag danke ich für den Ansporn, dieses Manuskript überhaupt zu verfassen, und für viele technische Hinweise. Schließlich gebührt meiner Frau Ute und meinem Sohn Michael Dank dafür, dass sie mir die Zeit gegönnt haben, dieses Buch zu schreiben.

Leipzig, im Juni 2003

Professor Dr. sc. nat. Volkmar Brückner
Deutsche Telekom Fachhochschule Leipzig

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Glasfasern	16
2.1	Lichtübertragung in Glasfasern, Multi-Mode- und Single-Mode-Fasern	16
2.1.1	Lichtausbreitung in der Glasfaser, Akzeptanzwinkel, numerische Apertur	16
2.1.2	Transversale Moden in Glasfasern, Modenmischung	19
2.1.3	Ein-Moden-Bedingung, Cut-off-Wellenlänge in Glasfasern	25
2.1.4	Modenfelddurchmesser	25
2.2	Dämpfung in Glasfasern	27
2.2.1	UV-Absorption	27
2.2.2	Rayleigh-Streuung	27
2.2.3	Absorption an Wasser	29
2.2.4	IR-Absorption	30
2.2.5	Dämpfungsverlauf in Glasfasern	30
2.3	Dispersion und Dispersionskompensation in Glasfasern	31
2.3.1	Begriff und Auswirkung der Dispersion	31
2.3.2	Mechanismen der Dispersion	34
2.3.2.1	Modendispersion	34
2.3.2.2	Materialdispersion	36
2.3.2.3	Wellenleiterdispersion	37
2.3.2.4	Chromatische Dispersion	38
2.3.2.5	Bandbreite-Länge-Produkt	40
2.3.2.6	Polarisations-Moden-Dispersion (PMD)	40
2.3.2.7	Dispersionskompensation	42
2.3.3	Glasfasertypen	45
2.4	Messtechnik an Glasfasern	47
2.4.1	Messung des Brechzahlprofils	47
2.4.1.1	Nahfeld-Abtastmethode (near field scanning)	47
2.4.1.2	Strahlbrechungsmethode (refracted near field technique)	48
2.4.2	Dämpfungsmessungen	49
2.4.2.1	Abschneide- und Einfügeverfahren	49
2.4.2.2	Rückstreuungsmessung, OTDR-Methode	50
2.4.3	Dispersionsmessungen	54
2.4.3.1	Messung im Zeitbereich	55
2.4.3.2	Messung im Frequenzbereich	56

3	Optische Sender	57
3.1	Hauptelemente des Halbleiterlasers	57
3.2	Aktives Element	58
3.2.1	Bandstruktur von Halbleitern, direkte und indirekte Übergänge ...	58
3.2.2	Materialauswahl	60
3.2.3	Doppelheterostruktur-Laser (DH-Diode)	62
3.2.4	Multi-Quantum-Well-Struktur (MQW)	64
3.3	Resonator	65
3.4	Lasereigenschaften	65
3.4.1	P-I-Kennlinie, Temperaturverhalten, Degradation	66
3.4.2	Spektrum von Halbleiterlasern	67
3.4.3	Abstrahlcharakteristik	68
3.5	Halbleiter-Lasertypen	68
3.5.1	Fabry-Perot-Laser	68
3.5.2	Dynamischer Single-Mode-Laser (DSM)	71
3.6	Ausgewählte Lasertypen für optische Netze	74
3.6.1	MQW-Laser mit DFB-Resonator als Kantenstrahler	74
3.6.2	Vertical Surface Emitting Laser (VCSEL) als Flächenstrahler	78
4	Optische Verstärker	79
4.1	Erbiumdotierte Faserverstärker (EDFA)	79
4.1.1	Verstärkung in erbiumdotierten Glasfasern	79
4.1.2	Rauschen in EDFA's, ASE	83
4.1.3	Dichtes Wellenlängenmultiplexing (DWDM) und EDFA	85
4.1.4	Experimentelle Realisierung von EDFA's	86
4.1.5	Weitere mit seltenen Erden dotierte Verstärker	87
4.2	Raman-Verstärker	88
4.2.1	Der Raman-Effekt	88
4.2.2	Stokes-Verschiebung, Verstärkungsspektrum	89
4.2.3	Experimentelle Realisierung	92
4.2.4	Probleme im Raman-Verstärker	92
4.2.5	Rauschen im Raman-Verstärker	93
4.3	Halbleiterverstärker (SOA)	94
5	Koppler und Schalter in der optischen Nachrichtentechnik ...	97
5.1	Funktionsweise von Koppler, Schalter, Multiplexern und Demultiplexern	97
5.1.1	Koppler	97
5.1.2	Schalter	99
5.1.3	Multiplexer und Demultiplexer	100

5.2	Grundaufbau von Schaltern	101
5.2.1	Mechanisches Schalten	101
5.2.2	Elektrooptisches Schalten ..	101
5.2.3	Mechanooptisches Schalten	106
5.2.4	Thermische Schalter	110
5.3	Grundaufbau von Multiplexern und Demultiplexern	111
5.3.1	Interferenzfilter	111
5.3.2	Fabry-Perot-Filter	112
5.3.3	Faser-Bragg-Gitter	112
5.3.4	Phased-Array-Anordnungen	113
5.4	Stecker und Spleiße	114
5.4.1	Spleiße	115
5.4.2	Stecker	116
5.5	Anwendungen von Kopplern und Schaltern	119
5.5.1	Optischer Add-Drop-Multiplexer	119
5.5.2	Optischer Cross-Connector	120
6	Modulation von Laserlicht	123
6.1	Aufgabe und Problemstellung der Lasermodulation	123
6.2	Modulationsverfahren der optischen Nachrichtentechnik	124
6.2.1	Amplitudenmodulation, Intensitätsmodulation (AM, PM)	124
6.2.2	Puls-Amplituden-Modulation (PAM)	124
6.2.3	Puls-Position-Modulation (PPM)	125
6.2.4	Puls-Code-Modulation (PCM)	126
6.3	Direkte Modulation von Halbleiterlasern	127
6.4	Externe Modulation von Halbleiterlasern	135
6.4.1	Phasen- und Frequenzmodulation	135
6.4.2	Intensitätsmodulation	136
7	Optische Empfänger	139
7.1	Empfängerprinzip	139
7.2	pin-Diode	142
7.3	Lawinenphotodiode (APD)	143
7.4	Rauschen in Empfängern, Bit-Fehler-Rate (BER)	146
7.4.1	Schrotrauschen	148
7.4.2	Intensitätsrauschen	148
7.4.3	Thermisches Rauschen (Nyquist-Rauschen)	148
7.4.4	Multiplikationsrauschen	150
7.4.5	Bitfehlerrate	151
7.5	Optisches Heterodyn	153

8	Nichtlineare Effekte in Glasfasern und deren Anwendung	157
8.1	Nichtlinearitäten in der Optik	157
8.2	Nichtlineare Effekte in Glasfasern	159
8.2.1	Nichtlineare Streueffekte in Glasfasern	159
8.2.2	Nichtlineare Effekte dritter Ordnung in Glasfasern	160
8.3	Chirp in Glasfasern	162
8.4	Polarisations-Dispersions-Management (PDM) mit Nichtlinearitäten	164
8.4.1	Reduzierung des Chirps	165
8.4.2	Nutzung des Chirps	166
8.5	Aktive Kompensation der Dispersion	168
8.6	Solitonen	171
	Literaturverzeichnis	173
	Sachwortverzeichnis	175