

Teubner Studienskripten (TSS)

Mit der preiswerten Reihe **Teubner Studienskripten** werden dem Studenten ausgereifte Vorlesungsskripten zur Unterstützung des Studiums zur Verfügung gestellt. Die sorgfältigen Darstellungen, in Vorlesungen erprobt und bewährt, dienen der Einführung in das jeweilige Fachgebiet. Sie fassen das für das Fachstudium notwendige Präsenzwissen zusammen und ermöglichen es dem Studenten, die in den Vorlesungen erworbenen Kenntnisse zu festigen, zu vertiefen und weiterführende Literatur heranzuziehen. Für das fortschreitende Studium können **Teubner Studienskripten** als Repetitorien eingesetzt werden. Die auch zum Selbststudium geeigneten Veröffentlichungen dieser Reihe sollen darüber hinaus den in der Praxis Stehenden über neue Strömungen der einzelnen Fachrichtungen orientieren.

Lichtwellenleiter

Von Dr. rer. nat. Manfred Börner
Professor an der
Technischen Universität München

und Dr.-Ing. Gert Trommer
MBB München



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Professor Dr. Manfred Börner

1929 in Rochlitz/Sachsen geboren. 1949-1954 Studium der Physik an der FU Berlin, 1959 Promotion zum Dr. rer. nat. an der TH München. Berufstätigkeit von 1954-1979 am Forschungsinstitut Telefunken (später AEG-Telefunken), zuletzt als dessen Leiter. Seit 1979 Inhaber des Lehrstuhls für Technische Elektrophysik an der TU München.

Dr.-Ing. Gert Trommer

1952 in Coburg geboren. 1972-1978 Studium der Elektrotechnik an der TU München. 1978-1981 wiss. Mitarbeiter und 1981-1987 Akad. Rat a. Z. am Lehrstuhl für Technische Elektrophysik der TU München unter Prof. Maecker und Prof. Börner. 1982 Promotion zum Dr.-Ing.; seit 1987 Entwicklungsingenieur bei MBB in München.

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Börner, Manfred:

Lichtwellenleiter / von Manfred Börner u. Gert Trommer. - Stuttgart : Teubner, 1989

(Teubner-Studienskripten ; 116 : Elektrotechnik)

ISBN 978-3-519-00116-4 ISBN 978-3-322-92122-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-92122-2

NE: Trommer, Gert; GT

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1989

Ursprünglich erschienen bei B. G. Teubner Stuttgart 1989

Umschlaggestaltung: M. Koch, Reutlingen

Vorwort

Dieses Buch dient der Einführung in die nunmehr im wesentlichen abgeschlossene Theorie der Lichtführung in dielektrischen Wellenleitern. Zum physikalischen Verständnis wird in Kürze die klassische Methode der Analyse von vorgegebenen nicht-optimalen Brechzahlprofilen vorgeführt und in die sehr umfangreiche Literatur eingeführt. Die Feldverteilungen sind im Falle der sogenannten Stufenindexfaser mit Hilfe von Zylinderfunktionen darstellbar.

In optimalen Fasern sind die Impulsverzerrungen über der Frequenz einzuebnen. Es ergeben sich dann als Lösungen optimale Profile für die Brechzahl. Die Feldverteilungen werden ebenfalls gefunden und dargestellt, als Ergebnis von numerischen Rechnungen, ohne näherungsweise Benutzung von Standard-Funktionen, die unwichtig geworden sind. Auf diesen Umstand sei besonders verwiesen. Auf die numerische Behandlung der Optimierungsaufgabe mit Hilfe von Standard-Algorithmen wird großer Wert gelegt.

Das Buch entstand aus Vorlesungen für Studenten nach dem Vordiplom, an die es sich auch wendet: An Elektrotechniker und Physiker sowie Informatiker und Mathematiker mit Interesse an der Technik.

München, März 1989

Die Verfasser

Widmung: Für unsere beiden Frauen Antje und Moni

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Filmwellenleiter	11
2.1	Strahlenoptische Näherung	13
2.2	Wellenoptik	17
2.2.1	Filmwellenleiter mit Stufenindex-Profil	21
2.2.1.1	Wellengleichung und Randwertproblem	21
2.2.1.2	Moden	28
2.2.1.3	Cut-off-Bedingung	38
2.2.1.4	Energiefluß im Wellenleiter	40
2.2.2	Filmwellenleiter mit Gradientenprofil	42
2.3	Streifenwellenleiter	52
3	Glasfasern	61
3.1	Strahlenoptische Näherung	62
3.2	Wellenoptik	66
3.2.1	Die vektorielle Wellengleichung	69
3.2.2	Randwertproblem und Eigenwertgleichung	72
3.2.3	Numerische Behandlung von Brechzahlssprüngen	80
3.2.4	Transformierte Wellengleichung für Multimode-Analyse	83
3.2.5	Zusammenfassung der Berechnungsverfahren	86
3.2.6	Moden	86
3.2.6.1	Feldverläufe	88
3.2.6.2	Zusammengesetzte Pseudomodern	91
3.2.6.3	Phasenkurven	94
3.2.6.4	Leistungsverteilung im Faserquerschnitt	97

4	Impulsverzerrungen in Glasfasern	101
4.1	Pulsverbreiterung in Multimode-Faser	101
4.1.1	Stufenindex-Multimode-Fasern	102
4.1.2	Gradienten-Multimode-Fasern	107
4.2	Pulsverbreiterung in Monomode-Fasern	114
4.2.1	Zusammensetzung der chromatischen Gesamtdi- spersion	118
4.2.2	Ursachen der Materialdispersion	119
4.2.3	Einfluß der Wellenleiterdispersion	125
4.2.4	Kompensierte Fasern	127
5	Dämpfungsmechanismen in der Glasfaser	131
6	Entwurf optimierter Fasern	137
6.1	Profil-Analyse	138
6.2	Profil-Synthese	142
6.2.1	Berücksichtigung des Dispersionsverlaufs	143
6.2.2	Berücksichtigung zusätzlicher optischer Eigenschaf- ten	145
6.2.3	Anwendung des Synthese-Verfahrens	148
	Literaturverzeichnis	153
	Index	154

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzipieller Aufbau eines Filmwellenleiters mit Lichteinkopplung an der linken Seite	12
2.2	Wellenfronten im Filmwellenleiter.	14
2.3	Brechzahlverlauf und Lichtführung im Filmwellenleiter mit Stufenindexprofil.	21
2.4	Qualitativer Verlauf der Feldstärke der Transversalkomponente E_y über den Querschnitt des unsymmetrischen Filmwellenleiters ($n_1 > n_2 > n_3$) für H_p -Moden	29
2.5	Die Eigenwerte des unsymmetrischen Filmwellenleiters in graphischer Darstellung für $n_1 > n_2 > n_3$	31
2.6	Graphische Darstellung der Gleichung $(V^2 - u^2)^{0.5} = u \tan(u/2)$ für die symmetrischen H_p - Moden des symmetrischen Filmwellenleiters	34
2.7	Graphische Darstellung der Gleichung $(V^2 - u^2)^{0.5} = -u \cot(u/2)$ für die antisymmetrischen H_p - Moden des symmetrischen Filmwellenleiters	35
2.8	Normiertes Phasenmaß für H_p - und E_p -Moden im schwach führenden symmetrischen Filmwellenleiter	37
2.9	Allgemeines Brechzahlprofil eines unsymmetrischen Filmwellenleiters	43
2.10	Profilfunktion $S(x)$ des Brechzahlverlaufs	49
2.11	Phasenkurven von Filmwellenleitern mit Brechzahlgradienten	50
2.12	Phasenkurven von Filmwellenleitern verschiedener Asymmetrie	51
2.13	Optische Streifenleiter a) aufliegender Streifen, b) bündig versenkter Streifen, c) vollständig versenkter Streifen	52

2.14	Transversales elektrisches Feld der E_{lm}^x - bzw. E_{lm}^y - Moden niedrigster Ordnung in optischen Streifenleitern. . .	54
2.15	Schema der Bestimmung der effektiven Brechzahl $n_{eff l}(x, y_i)$ an diskreten Orten y_i für einen $E_{lm}^{x,y}$ -Mode des Streifenleiters	57
2.16	Schema der Bestimmung der Phasenkonstante β_{lm} bei bereits bekanntem funktionalen Verlauf der effektiven Brechzahl $n_{eff l}(x, y)$ für einen $E_{lm}^{x,y}$ -Mode	57
2.17	Streifenleiter mit Stufenindexprofil	58
2.18	Normierte Phasenkurven des schwach führenden Streifenleiters für verschiedene Seitenverhältnisse D_y/D_x . . .	60
3.1	Typischer Aufbau einer Glasfaser	62
3.2	Komponenten des Wellenvektors $n_K k$ in Zylinderkoordinaten	63
3.3	Schraubenbahnen und deren Querschnittsprojektion . . .	65
3.4	Bereich zwischen R_1 und R_2 , in dem radial stehende Wellen möglich sind.	66
3.5	Zylinderfunktionen der Ordnung $m = 0$ und $m = 1$	71
3.6	Brechzahlverlauf und Phasenkonstante	75
3.7	Gradientenprofil mit Brechzahlssprung an der Stelle $r = R_s$	81
3.8	Idealisiertes Einfachsprung-Profil	83
3.9	Schema zur Berechnung der Eigenwerte	87
3.10	Radiale Verläufe der E-Felder der ersten Moden einer Stufenindex-Faser	89
3.11	Feldbild der E_{01} -Welle in der Stufenfaser	90
3.12	Feldbild der H_{01} -Welle in der Stufenfaser	91
3.13	Feldbild der HE_{11} -Welle in der Stufenfaser	92
3.14	Schema zur Zusammensetzung linear polarisierter Pseudomodens aus reinen Moden	92
3.15	Transversales elektrisches Feld von LP_{11} -Moden und ihre Überlagerung aus den genauen Wellentypen	93
3.16	Normiertes Phasenmaß B der linear polarisierten LP_{mq} -Moden einer schwach führenden Stufenindex- Glasfaser .	96
3.17	Relative Leistung P_k/P im Kern für schwach geführte LP_{mq} -Moden	98

4.1	Gruppenlaufzeitfaktor $d(VB)/dV$ der Kernwellen von schwach f	104
4.2	Intensit	106
4.3	Optischer Weg eines Lichtstrahls in einer Gradienten- und in einer Stufenindex-Faser	108
4.4	Brechzahlverlauf von Potenzprofilen	109
4.5	Impulsantwort von Multimodefasern mit Potenzprofilen.	110
4.6	Gruppenindex als Funktion der effektiven Brechzahl f	112
4.7	Gruppenindex n_g als Funktion der effektiven Brechzahl n_{eff} f	113
4.8	Prinzipieller Verlauf des Absorptionskoeffizienten κ und des Brechungsindex n' in der Umgebung einer Resonanz.	121
4.9	Brechzahlverlauf von reinem SiO_2 (A) und mit 7.9 m% GeO_2 dotiertem SiO_2 (B).	123
4.10	Materialdispersion f	124
4.11	Prinzipieller Verlauf der Phasenkurve $\beta(k)$ einer Glasfaser mit Kernbrechzahl n_K und Mantelbrechzahl n_M .	125
4.12	Prinzipieller Verlauf der ersten Ableitung $d\beta/dk$ f	126
4.13	Prinzipieller Verlauf der zweiten Ableitung $d^2\beta/dk^2$ f	126
4.14	Beispiel von Dispersionskompensation an nur einer Wellenl	128
4.15	Beispiel einer dispersionskompensierten Breitbandfaser.	129
5.1	Spektraler Verlauf von Monomodefasern	133
6.1	Brechzahlprofil der Breitbandfaser	140
6.2	Dispersionsverlauf der Faser von Abb.6.1	140
6.3	Radialer Verlauf des HE_{11} -Modes der Gradientenfaser	141
6.4	Radialer Verlauf des HE_{21} -Modes der Gradientenfaser	142
6.5	Prinzipieller Ablauf eines rekursiv-analytischen Profil-Synthese-Verfahrens	143

6.6	Prinzipieller Verlauf eines direkten Profil-Synthese-Verfahrens	143
6.7	Struktur des direkten Synthese-Verfahrens	147
6.8	Synthetisiertes Brechzahlprofil mit 25 Stützpunkten für $D_i(\lambda) = 0$ $1.35 \mu m < \lambda < 1.7 \mu m$	149
6.9	Dispersionsverlauf des Brechzahlprofils von Abb. 6.8	150
6.10	Synthetisierte Stufenindex-Profile für verschiedene Stützstellen k_i	151
6.11	Tatsächlicher Dispersionsverlauf der Brechzahlprofile von Abb. 6.10	152