

# **Modellierung der Ausbreitungseigenschaften und des Herstellungsprozesses von Gradientenindexwellenleitern in Dünnglasfolien**

**Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der  
Universität Siegen**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

**Diplom-Ingenieur Thomas Kühler**

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Elmar Griese
  2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar
- Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Mario Pacas

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2011



Forschungsberichte des Lehrstuhls für Theoretische  
Elektrotechnik & Photonik der Universität Siegen

Band 2

**Thomas Kühler**

**Modellierung der Ausbreitungseigenschaften und  
des Herstellungsprozesses von Gradientenindex-  
wellenleitern in Dünnglasfolien**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1280-4

ISSN 1869-3784

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Diese Dissertation ist an der Universität Siegen am *Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik und Photonik* unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Elmar Griese entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Griese danke ich ganz besonders für die interessante Themenstellung, die Betreuung der Promotion sowie für die Anregungen, die diese Arbeit möglich gemacht haben. Bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für die zahlreichen Diskussionen, die oft neue Ideen hervorgebracht haben. Besonders in Erinnerung bleiben wird mir die freundliche und familiäre Atmosphäre im Lehrstuhl.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar danke ich für sein Engagement als zweiter Gutachter. Ebenso gilt mein Dank der Prüfungskommission, bestehend aus Prof. Dr.-Ing. Mario Pacas, Prof. Dr. Udo Kelter und Prof. Dr. Andreas Kolb.

Für die Unterstützung als studentische Hilfskräfte und im Rahmen von Studienarbeiten dank ich Peter Schneider und Jan Hinnerk Stosch.

Ein sehr herzlicher Dank gilt meinen Eltern und insbesondere meiner Frau Sandra für ihre rückhaltlose Unterstützung.



## Kurzfassung

Steigende Datenraten auf Leiterplattenebene erfordern neue Ansätze bei der Verbindungstechnologie. Die Realisierung von elektrischen Leiterplatten mit integrierten optischen Wellenleitern ist eine Möglichkeit, die Bandbreite deutlich zu erhöhen. Ein Verfahren ist die Verwendung von Glasfolien als Zwischenlage. In diesen Glasfolien werden Wellenleiter durch eine lokale Anhebung des Brechungsindex mittels eines Diffusionsprozesses eingebracht. Diese optischen Lagen können in herkömmliche elektrische Leiterplatten einlaminiert werden. Durch den Diffusionsprozess entstehen multimodale Gradientenindex-Wellenleiter. Das Indexprofil ist stark abhängig von den Prozessparametern wie Temperatur, Ionenkonzentration und der Diffusionszeit. In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur Modellierung des Diffusionsprozesses mit der Hilfe der Methode der finiten Elemente vorgestellt. Auch die Nutzung eines elektrischen Feldes zur Unterstützung und Optimierung des Diffusionsvorganges wird betrachtet.

Die Ausbreitungseigenschaften dieser Wellenleiter können auf Grund des nicht exakt bekannten Brechzahlverlaufs nicht analytisch bestimmt werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein numerischer Ansatz basierend auf der Methode der finiten Elemente vorgestellt. Herkömmliche Ansätze mit Knoten basierenden Diskretisierungselementen führen zu dem Auftreten von nichtphysikalischen Lösungen. Deshalb wurde ein neuer Ansatz mit Kanten basierenden Diskretisierungselementen verwendet. Mit dessen Hilfe können detaillierte Informationen über die modalen Ausbreitungseigenschaften gewonnen werden.

Oft ist es im Hinblick auf die Herstellung von größerem Interesse, die Lage und Form des Brechzahlprofils auf Grund von technologischen Überlegungen festzulegen und daraus die benötigten Prozessparameter abzuleiten. Resultierend aus den Ergebnissen der Simulation des Diffusionsprozesses werden einige Untersuchungen zur Entwicklung eines Modells, dass die Abhängigkeit der verschiedenen Prozessparameter beschreibt, durchgeführt.



## Summary

Increasing demand on bandwidth on printed circuit boards rises the necessity for new interconnection concepts. For this reason, several methods for integrating optical waveguides into electrical printed circuit boards are known. A novel approach is a local increase of the refractive index within thin-glass sheets by ion-exchange processes resulting in optical layers with embedded graded-index waveguides. These optical layers can be combined with conventional electrical layers in order to obtain electro-optical printed circuit boards. The ion-exchange process produces graded-index multimode waveguides where the index profile depends strongly on the process and its parameters like temperature, ion concentration and diffusion time. This work presents an approach to describe and to model the diffusion process by using the finite element method. For optimisation of the resulting index profile, the application of an electrical field is investigated.

The propagation characteristics of these waveguides cannot be determined by analytical methods. A method based on finite elements is presented. Because nodal based elements lead to spurious modes, vector based discretisation elements are used. The results are detailed information about the modal propagation characteristics and the power distribution of the guided modes.

From manufacturers point of view, deriving the process parameters from the desired position and shape of the refractive index profile is of great interest. For that reason, the results of the diffusion process are investigated with regard to the dependencies between the different parameters.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Anwendung optischer Technologien . . . . .	1
1.2	Wellenleiterherstellung . . . . .	5
1.3	Modellierung und Simulation . . . . .	7
1.4	Übersicht . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Elektromagnetische Wellenausbreitung</b>	<b>13</b>
3.1	Sinusförmige Zeitabhängigkeit . . . . .	13
3.2	Wellengleichung . . . . .	14
3.2.1	Vektorielle Wellengleichung . . . . .	14
3.2.2	Skalare Wellengleichung . . . . .	15
3.3	Randbedingungen . . . . .	15
3.3.1	Randbedingungen zwischen zwei homogenen Materialien . . . . .	15
3.3.2	Perfekt leitende Oberfläche . . . . .	16
3.4	Randwertprobleme . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Methode der Finiten Elemente</b>	<b>19</b>
4.1	Randwertproblem . . . . .	20
4.2	Formulierung des Funktionals . . . . .	21
4.3	Das Variationsprinzip . . . . .	22
4.4	Diskretisierung mit Knoten basierenden Elementen . . . . .	24
4.4.1	Interpolationsfunktionen . . . . .	25
4.4.2	Nichtphysikalische Moden . . . . .	27
4.5	Kantenelemente . . . . .	29
4.5.1	Lokale Koordinaten . . . . .	30
4.5.2	Interpolationsfunktionen . . . . .	31
4.6	Validierung . . . . .	32
4.6.1	Hohlleiter . . . . .	32

4.6.2	Inhomogener Hohlleiter . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Ionenaustauschprozesse</b>	<b>45</b>
5.1	Eigenschaften von Gläsern . . . . .	46
5.2	Thermische Diffusion . . . . .	48
5.2.1	Diffusionsgleichung . . . . .	49
5.2.2	Eindimensionale Diffusion . . . . .	50
5.2.3	Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten . . . . .	51
5.2.4	Konzentrationsabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten . . . . .	52
5.3	Feldgestützte Diffusion . . . . .	53
5.3.1	Nernst-Einstein-Relation . . . . .	53
5.3.2	Beschreibung der feldgestützten Diffusion . . . . .	54
5.3.3	Eindimensionale feldgestützte Diffusion . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Wellenleiterherstellung durch Diffusion</b>	<b>59</b>
6.1	Herstellung von Wellenleitern durch Ionenaustausch . . . . .	59
6.2	Eigenschaften und Parameter des Herstellungsprozesses . . . . .	61
6.3	Konzentrationsprofil bei thermischer Diffusion . . . . .	63
6.3.1	Eindiffusion . . . . .	64
6.3.2	Ausdiffusion . . . . .	68
6.4	Konzentrationsprofil bei feldgestützter Diffusion . . . . .	75
6.5	Bestimmung des Brechzahlprofils . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Charakterisierung der Wellenleiter</b>	<b>85</b>
7.1	Problembeschreibung . . . . .	85
7.2	Wellenleitermoden . . . . .	86
7.3	Dispersionskurve . . . . .	87
<b>8</b>	<b>Modell zur Gewinnung der Prozessgrößen</b>	<b>93</b>
8.1	Interpolation des Brechzahlprofils . . . . .	93
8.2	Temperaturabhängigkeit . . . . .	97
8.3	Einfluss der Maskenbreite . . . . .	98
8.4	Einfluss der Diffusionszeiten . . . . .	102
8.5	Bestimmung der Prozessparameter . . . . .	106
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>