Stübbe

Modellierungsverfahren für die zeiteffiziente Simulation von optischen Verbindungen auf Leiterplattenebene

c-lab

C-LAB Publication

Herausgegeben von
Published by

Dr. Wolfgang Kern, Siemens AG
Prof. Dr. Franz-Josef Rammig, Universität Paderborn

Das C-LAB - Cooperative Computing & Communication Laboratory - leistet Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und gewährleistet deren Transfer an den Markt. Es wurde 1985 von den Partnern Nixdorf Computer AG (nun Siemens AG) und der Universität Paderborn im Einvernehmen mit dem Land Nordrhein-Westfalen gegründet.
Die Vision, die dem C-LAB zugrunde liegt, geht davon aus, daß die gewaltigen Herausforderungen beim Übergang in die kommende Informations- und Wissensgesellschaft nur durch globale Kooperation und in tiefer Verzahnung von Theorie und Praxis gelöst werden können. Im C-LAB arbeiten deshalb Mitarbeiter von Hochschule und Industrie unter einem Dach in einer gemeinsamen Organisation an gemeinsamen Projekten mit internationalen Partnern eng zusammen.

C-LAB - the Cooperative Computing & Cooperation Laboratory - works in the area of research and development and safeguards its transfer into the market. It was founded in 1985 by Nixdorf Computer AG (now Siemens AG) and the University of Paderborn under the auspices of the State of North-Rhine Westphalia.
C-LAB's vision is based on the fundamental premise that the gargantuan challenges thrown up by the transition to a future information and knowledge society can only be met through global cooperation and deep interworking of theory and practice. This is why, under one roof, staff from the university and from industry cooperate closely on joint projects within a common research and development organization together with international partners. In doing so, C-LAB concentrates on those innovative subject areas in which cooperation is expected to bear particular fruit for the partners and their general well-being.

C-LAB Publication

Band 33

Oliver Stübbe

Modellierungsverfahren für die zeiteffiziente Simulation von optischen Verbindungen auf Leiterplattenebene

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9139-6
ISSN 1438-3527

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

FAKULTÄT FÜR
ELEKTROTECHNIK,
INFORMATIK UND
MATHEMATIK

Modellierungsverfahren für die zeiteffiziente Simulation von optischen Verbindungen auf Leiterplattenebene

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn
vorgelegte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Oliver Stübbe
Oer-Erkenschwick

Referent: Prof. Dr.-Ing Gerd Mrozynski
Korreferent: Prof. Dr.-Ing Rolf Schuhmann

Tag der mündlichen Prüfung: 03.12.2009

Paderborn, den 30.03.2010

Diss. EIM-E/258

Meinen Großeltern
Oswald und Irma Misch
gewidmet.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe *Optical Interconnection Technology* des C-LABs, dem gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungslabor der Siemens AG und der Universität Paderborn.

Für die Betreuung und die Übernahme des Hauptreferates dieser Arbeit möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Mrozynski danken. Während meines gesamten Promotionsvorhabens hat er mich stets durch zahlreiche Anregungen und Diskussionen unterstützt. Weiter gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Schuhmann, der das Korreferat und den Vorsitz der Promotionskommission übernommen hat. Auch möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Jürgen Schrage herzlich bedanken, der es mir ermöglichte, mein Promotionsvorhaben in seiner Arbeitsgruppe durchzuführen.

Bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Thomas Bierhoff und Dr.-Ing. Matthias Stallein möchte ich mich für die intensiven und fruchtbaren Diskussionen über Strahlen- und Wellenoptik bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank meinen Kollegen Dipl.-Ing. Yasin Sönmez, Dipl.-Ing. Amir Wallrabenstein und Dipl.-Ing. Andrej Hein für die zahlreichen Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt Frau Dipl. oec. troph. Sabine Panten, die unermüdlich meine Arbeit Korrektur gelesen hat. Auch möchte ich mich bei meinen Judoka bedanken, die mir immer wieder geholfen haben, den Kopf für neue Gedankenansätze frei zu bekommen. Bei meiner Mutter Hella Nauta möchte ich mich für die finanzielle Unterstützung während des Studiums bedanken.

Mein allergrößter Dank gilt meiner Frau Tatjana und meinen Kindern Simon, Frauke und Laura. Ohne die aufopferungsvolle Unterstützung meiner Frau, die mir stets den Rücken freigehalten hat, wäre die vorliegende Arbeit nicht verwirklicht worden. Gerade in der letzten Phase waren die gemeinsamen Wochenenden rar.

Beverungen-Amelunxen *Oliver Stübbe*
März 2010

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **1**
1.1. Zielsetzung und Inhalt der Arbeit 3

2. Grundlagen **5**
2.1. Strahlverfolgung im dielektrischen Material 6
2.1.1. Maxwellsche Gleichungen für nichtbewegte Medien 7
2.1.2. Bestimmung der Eikonalgleichung 9
2.1.3. Strahlkomponenten im homogenen dielektrischen Medium 12
2.1.4. Reflexion und Transmission an dielektrischen Grenzflächen 14
2.1.5. Absorptionsverluste 20
2.1.6. Einfluss von rauen Wellenleiterberandungen 22
2.2. Modellierung der aktiven Komponenten 24
2.2.1. Modellierung der Detektoren 24
2.2.2. Modellierung der Quellen 26
2.3. Signaltheoretische Bestimmung der Übertragungseigenschaften 30
2.3.1. Anstiegszeit 31
2.3.2. 3dB-Grenzfrequenz 32
2.4. Zusammenfassung 34

3. Aufbau und Analyse des passiven optischen Pfades **37**
3.1. Der passive optische Pfad 38
3.1.1. Komponenten des passiven optischen Pfades 38
3.1.2. Aufbautechnische Charakteristika der eingebetteten Wellenleiter . . 40
3.2. Parameterabhängigkeit des transienten Übertragungsverhaltens 41
3.2.1. Variation der Wellenleiterlänge 41
3.2.2. Variation der Stimulation 43
3.2.3. Einfluss des Trajektorienverlaufs 44
3.3. Stand der Technik zur Bestimmung des transienten Übertragungsverhaltens 47
3.3.1. Physikalische Strahlverfolgung 47
3.3.2. Mehrtoransatz und rekursive Faltung 50
3.4. Zusammenfassung 54

4. Methodik für die Erstellung von Modellen für die zeiteffiziente Simulation 57
4.1. Modulares Konzept für die Modellgenerierung . . . 58
4.2. Modellierungsebenen . . . 59
4.2.1. Modellierung in der Mikroebene . . . 59
4.2.2. Modellierung in der Makroebene . . . 60
4.3. Generierung leistungsfähiger Modelle für die zeiteffiziente Simulation . . . 61
4.3.1. Konforme Beschreibung der Kerngrenzhüllen . . . 63
4.3.2. Integrationskonzept . . . 65
4.3.3. Strategien zur Generierung von zeiteffizienten Modellen . . . 66
4.4. Zusammenfassung . . . 69

5. Modelle für Schichtwellenleiterstrukturen 71
5.1. Planarer Schichtwellenleiter . . . 72
5.1.1. Analytische Strahlparameterberechnung . . . 72
5.1.2. Zeiteffizienz des Verfahrens . . . 75
5.1.3. Blockschaltbild . . . 76
5.2. Schichtwellenleiter mit konstant gekrümmter Trajektorie . . . 78
5.2.1. Analytische Strahlparameterberechnung . . . 78
5.2.2. Zeiteffizienz des Verfahrens . . . 84
5.2.3. Blockschaltbild . . . 87
5.3. Zusammenfassung . . . 87

6. Modelle für Kanalwellenleiter und mikrooptische Komponenten 89
6.1. Prinzip des virtuellen Schichtwellenleiters . . . 90
6.1.1. Blockschaltbild des virtuellen Schichtwellenleiters . . . 94
6.2. Zeiteffiziente Berechnungsverfahren für komplexe Strukturen . . . 94
6.2.1. Kombinieren von Verfahren zur Strahlparameterberechnung . . . 94
6.2.2. Reduzierung der Anzahl der virtuellen Schichtwellenleiter . . . 96
6.3. Evaluation und Verifikation des Verfahrens . . . 97
6.3.1. Kanalwellenleiter mit gerader Wellenleitertrajektorie . . . 98
6.3.2. Direktverbindung basierend auf kaskadierten Segmenten . . . 106
6.4. Zusammenfassung . . . 115

7. Mehrtormodell für Kanalwellenleiter und mikrooptische Komponenten 117
7.1. Bestimmung der Koppelmatrix des Mehrtores . . . 119
7.2. Beschaffenheit der Koppelmatrix . . . 122
7.3. Beschreibung der Simulationsdurchführung . . . 123
7.4. Evaluation des Verfahrens . . . 124
7.4.1. Kanalwellenleiter mit gerader Trajektorie . . . 125
7.4.2. Kanalwellenleiter mit konstant gekrümmter Trajektorie . . . 130
7.4.3. Analyse eines komplexen Systems . . . 134
7.5. Zusammenfassung . . . 139

8. Zeiteffiziente Analyse eines symmetrischen Leistungsteilers 141
8.1. Aufbau des symmetrischen Leistungsteilers . . . 142
8.2. Analyse mit Hilfe des analytischen Verfahrens . . . 143
8.2.1. Partitionierungskonzept und Blockschaltbild . . . 143
8.2.2. Vergleich der Simulationsergebnisse . . . 146

8.3. Anwendung des Mehrtormodells . . . 148
8.3.1. Partitionierungskonzept und Blockschaltbild . . . 149
8.3.2. Vergleich der Simulationsergebnisse . . . 150
8.4. Vergleich der verwendeten Verfahren . . . 152
8.4.1. Abweichungen zwischen den Verfahren . . . 152
8.4.2. Effizienz der verwendeten Verfahren . . . 154

9. Schlussbetrachtungen 157
9.1. Zusammenfassung . . . 157
9.2. Ausblick . . . 160

A. Verzeichnis der verwendeten Symbole 163
A.1. Physikalische Konstanten . . . 163
A.2. Formelzeichen . . . 163

B. Zusätzlich verwendete Strukturen 167
B.1. Koppelmodul . . . 167
B.2. Planare dreieckförmige Hilfsstruktur . . . 168

C. Mathematik 169
C.1. Verwendete Funktionen . . . 169
C.2. Fouriertransformation . . . 170
C.3. Eigenschaften von Systemen . . . 170
C.3.1. Linearität . . . 170
C.3.2. Zeitinvarianz . . . 170
C.4. Vektoranalysis . . . 171
C.4.1. Der Nablaoperator . . . 171
C.4.2. Vektoridentitäten . . . 171
C.5. Empirische Kovarianz und Korrelationskoeffizient . . . 171

Tabellenverzeichnis 173

Abbildungsverzeichnis 178

Literaturverzeichnis 179