



Rechnergestützter Entwurf und Simulation von optischen Verbindungen in Leiterplatten

Thomas Bierhoff und Jürgen Schrage

Siemens AG

C-LAB Report

Vol. 7 (2008) No. 3

Cooperative Computing & Communication Laboratory

ISSN 1619-7879

C-LAB ist eine Kooperation
der Universität Paderborn und der Siemens AG
www.c-lab.de
info@c-lab.de

C-LAB Report

**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 Informationsgesellschaft 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 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.

ISSN 1619-7879

C-LAB
Fürstenallee 11
33102 Paderborn
fon: +49 5251 60 60 60
fax: +49 5251 60 60 66
email: info@c-lab.de
Internet: www.c-lab.de

© Siemens AG und Universität Paderborn 2009

Alle Rechte sind vorbehalten.

Insbesondere ist die Übernahme in maschinenlesbare Form sowie das Speichern in Informationssystemen, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Siemens AG und der Universität Paderborn gestattet.

All rights reserved.

In particular, the content of this document or extracts thereof are only permitted to be transferred into machine-readable form and stored in information systems when written consent has been obtained from Siemens AG and the University of Paderborn..

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Technologie optischer Verbindungen für Leiterplatten	4
3	Entwurfsprozess und Entwurfswerkzeuge	7
4	Hybride wellen- und strahlenoptische Simulationstechnik	9
5	Simulationsbeispiele und erste Entwurfsregeln	12
6	Zusammenfassung.....	14
7	Literatur.....	15

Rechnergestützter Entwurf und Simulation von optischen Verbindungen in Leiterplatten

1 Einführung

Die Entwicklung optischer Aufbau- und Verbindungstechniken für Leiterplatten und Baugruppen gilt als vielversprechender Ansatz, um die Leistungsfähigkeit zukünftiger informationsverarbeitender System signifikant zu steigern. Diese Zukunftstechnologie wird inzwischen weltweit von führenden Unternehmen und Instituten im Bereich der Forschung und Entwicklung verfolgt [1], [2], [3], [4], [5]. Grundlegendes Konzept ist dabei die Verwendung von zusätzlichen, in die konventionelle elektrische Leiterplatte integrierten optischen Kanalwellenleitern für die Realisierung optischer Verbindungen z. B. in Computer-Backplanes bis hin zu optischen Chip-to-Chip-Verbindungen [2], [3]. Auf diese Weise entsteht eine völlig neuartige, hybride elektrisch-optische Verbindungstechnik, welche entsprechend dem rasant ansteigenden Bedarf an Bandbreite und Bandbreitendichte in zukünftigen Generationen informationsverarbeitender Systeme skaliert werden kann, u. a. durch Wellenlängenmultiplexverfahren [6].

Generell gilt heute für die Entwicklung und den Einsatz neuer Technologien in verschiedensten Anwendungsbereichen, dass ohne die Verfügbarkeit leistungsfähiger mathematischer Simulationsverfahren eine effiziente und wettbewerbsfähige Produktentwicklung (Fehlerminimierung, Designoptimierung, Entwicklungszeit- und -kostenreduktion) kaum mehr möglich ist. Ein Vorgehen nur nach der Methode Versuch und Irrtum ist teuer und langwierig. Der massive Einsatz entsprechender Elektronik-CAD Tools z. B. [7], [8], [9] beim Entwurf elektrischer Verbindungen für Leiterplatten ist heute Stand der Technik. Entsprechend wird der Entwurf optischer Verbindungssysteme für Leiterplatten geeignete Optik-CAD Tools erfordern.

Im C-LAB, dem Innovation Center des Siemens Bereichs IT Solutions and Services und der Universität Paderborn arbeiten Forscher an der Entwicklung von entsprechenden Simulations- und Design-Tools für den rechnerunterstützten Entwurf optischer Verbindungen in Leiterplatten und Baugruppen [10], [11], [12]. Diese Arbeiten unterstützen nicht nur die Weiterentwicklung der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik für Leiterplatten. Vielmehr ist die rechtzeitige Verfügbarkeit derartiger Entwurfswerkzeuge und des entsprechenden Technologie-Know-hows eine wesentliche Voraussetzung für die wettbewerbsfähige Anwendung der neuen Technologie in zukünftigen Produktentwicklungen.

2 Technologie optischer Verbindungen für Leiterplatten

Für die Realisierung optischer Wellenleiter innerhalb einer Leiterplatte wird überwiegend über die Verwendung von in die Leiterplatte integrierten, optischen Kanalwellenleitern aus Polymermaterial berichtet [1], [2], [4]. Die lichtführenden Wellenleiter-Kernstrukturen werden hierzu z. B. mit Hilfe photolithographischer Verfahren inner-

halb einer planaren Schicht strukturiert. Weitere Strukturierungsverfahren sind Laserdirektanschreibverfahren oder Prägeverfahren. Die resultierende optische Lage wird anschließend mittels Lamination in die Leiterplatte integriert. Bild 1 zeigt den Querschnitt durch eine in FR4 einlamierte optische Lage.

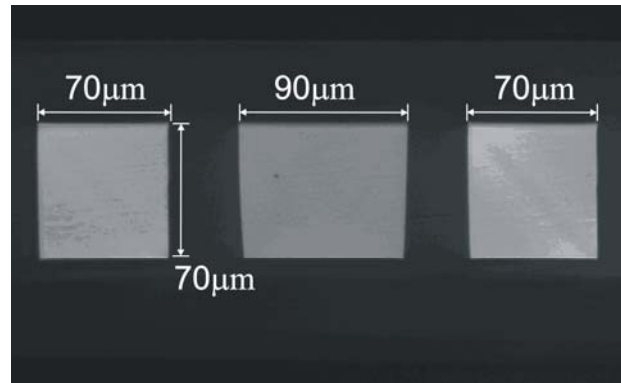


Bild 1: Schliffbild einer optischen Lage mit drei integrierten Wellenleiterkernen

Neben den Herstellungstechnologien für strukturierte optische Lagen und deren Integration in elektrisch-optische Leiterplatten sind durchgängige Lösungen für den Entwurf und die Simulation der optischen Verbindungssysteme erforderlich. Aufgrund der zu erwartenden Komplexität optischer Verbindungstopologien innerhalb einer optischen Lage, beginnend bei einfachen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bis hin zu komplexen Mehrpunkt-Topologien, sowie einer Vielzahl der das Übertragungsverhalten beeinflussenden Parameter werden hierfür neue, speziell auf die Entwurfsaufgabe ausgerichtete, rechnergestützte Entwurfs- und Simulationswerkzeuge benötigt. Dabei kommt vor allem der Simulationstechnik eine besondere Bedeutung zu, da bisher keine praktikablen Lösungen für die effiziente Berechnung des Übertragungsverhaltens der hier betrachteten sog. hochmultimodalen planar-integrierten optischen Verbindungssysteme bekannt sind.

Entwurf- und Simulation optischer Verbindungen erfordert ganzheitliche Sichtweise

Mit Hilfe der Entwurfs- und Simulationswerkzeuge sollten die optischen Verbindungssysteme hinsichtlich ihres stationären und transienten Übertragungsverhaltens hinreichend genau modelliert, simuliert, analysiert und optimiert werden können. Neben der Signaldämpfung und dem Übersprechverhalten, vornehmlich an den optischen Koppelstellen, gehören zu den wesentlichen zu analysierenden Übertragungseigenschaften die Laufzeit, Dispersion und Flankensteilheit des optischen Signals entlang einer Wellenleiterkernstruktur. Es zeigt sich, dass hierfür eine ganzheitliche Sichtweise des optischen Signalpfads erforderlich ist.

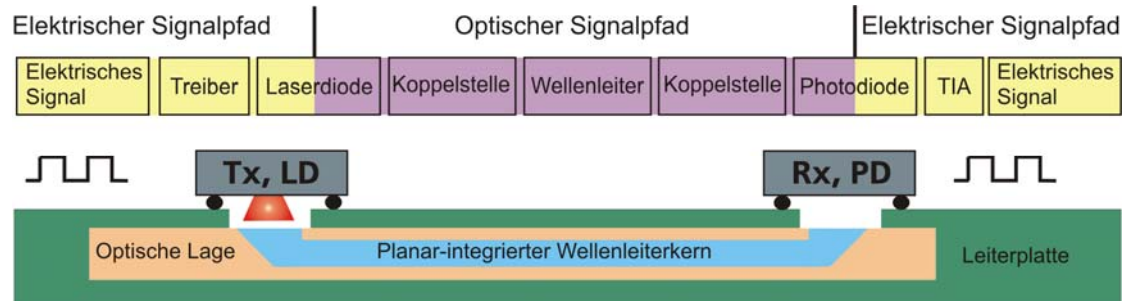


Bild 2: Komponenten eines optischen Übertragungspfades

Der Entwurf und die Simulation der auf planar-integrierten optischen Wellenleitern basierenden Verbindungssysteme umfassen somit vollständig den in Bild 2 dargestellten optischen Signalpfad. Der Pfad beginnt an der optischen Ausgangsseite der Quelle, i. d. R. eine vertikal emittierende Laserdiode (LD) mit ihrem charakteristischen räumlichen Emissionsspektrum und endet an der optischen Eingangsseite des Empfängers, zumeist eine PIN-Photodiode (PD). Ziel ist es, anhand von Simulationen eine hinreichend genaue Vorhersage der zu erwartenden Signalintegrität entlang des optischen Signalpfades zu treffen. Diese ist letztlich als Qualitätskriterium eines Entwurfes für eine optische Verbindung zu bewerten. Dafür sind zwei wesentliche Simulationaufgaben zu bewältigen: Zum einen muß die Ein- bzw. Auskopplung des optischen Signals zwischen den aktiven Komponenten (LD, PD) und den planar-integrierten optischen Wellenleitern berechnet werden, zum anderen muss die Signalausbreitung in dem optischen Wellenleitersystem mit Längen bis zu mehreren Metern unter Berücksichtigung einer Reihe charakteristischer Wellenleiter-eigenschaften simuliert werden. Letztere sind insbesondere die Kerengeometrie des optischen Wellenleiters, die Rauigkeit der Wellenleiterwände im Kern-Mantel-Bereich, die Brechzahlen der Kern- und Mantelmaterialien des Wellenleiters sowie deren Materialabsorptionseigenschaften. Darüber hinaus wird das Übertragungsverhalten der hier betrachteten optischen Verbindungen i. d. R. massiv durch das Routing, die Länge der Wellenleiter und die Eigenschaften optischer Koppelstellen beeinflusst.

3 Entwurfsprozess und Entwurfswerkzeuge

Neben einer weitgehenden Kompatibilität der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik zur bestehenden Leiterplattentechnik wird auch eine hohe Kompatibilität im Entwurfsprozess angestrebt. Ziel ist es also, die Schritte im Entwurfsablauf für eine optische Lage soweit wie möglich an den bekannten Entwurfsprozess elektrischer Verbindungen anzulehnen.

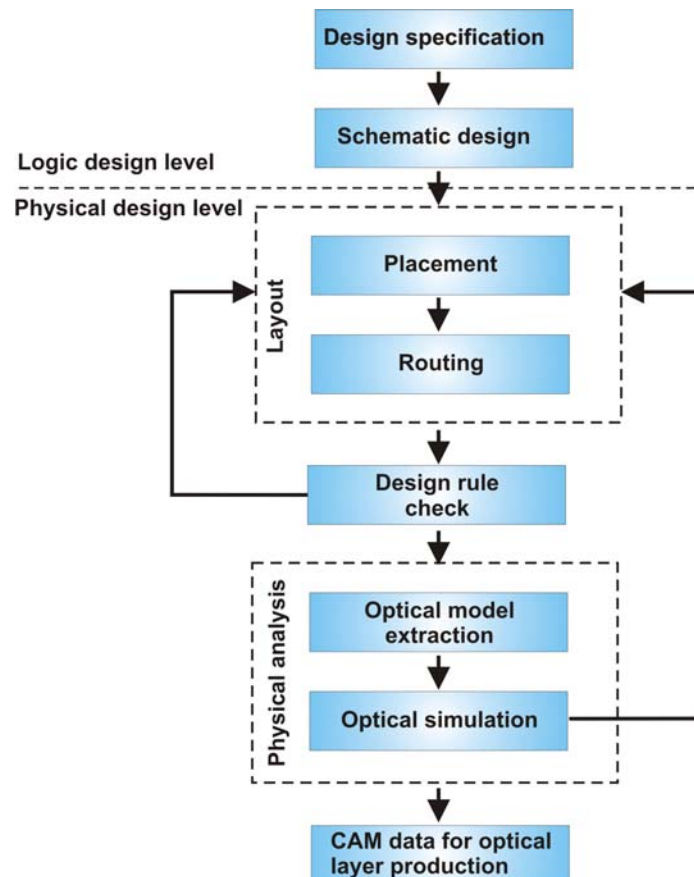


Bild 3: Entwurfsprozess für eine optische Lage mit planar-integrierten optischen Wellenleitern

Bild 3 zeigt die wesentlichen Schritte des Entwurfsprozesses für eine optische Lage. Der an dieser Stelle im weiteren betrachtete physikalische Entwurf setzt auf die aus den vorhergegangenen Schritten „*Design Specification*“ und „*Schematic Design*“ hervorgegangene Netzliste auf. Um die Netzliste in ein geeignetes Layout einer optischen Lage umzusetzen, werden zunächst die Platzierungen der optischen Quellen und Empfänger sowie deren mikrooptische Ein- und Ausgänge vorgenommen („*Placement*“). Im nachfolgenden Schritt werden dann die optischen Ein- und Ausgänge entsprechend der Netzliste durch geeignet dimensionierte planar-integrierte Wellenleiter verbunden („*Routing*“).

Die Durchführung dieser komplexen Entwurfsarbeiten erfordert die Unterstützung durch angepasste Entwurfswerkzeuge, die auf die Merkmale der optischen Verbindungstechnik zugeschnitten sind. Erweitert um spezifische Entwurfsregeln für opti-

sche Verbindungen, können diese dann auch bei der Vermeidung von Designfehlern in der frühen Phase des physikalischen Entwurfes unterstützen („*Design Rule Check*“). Der Forschungsprototyp eines im C-LAB entwickelten Layoutwerkzeuges ist in Bild 4 dargestellt. *Placement* und *Routing* erfolgen hier noch manuell.

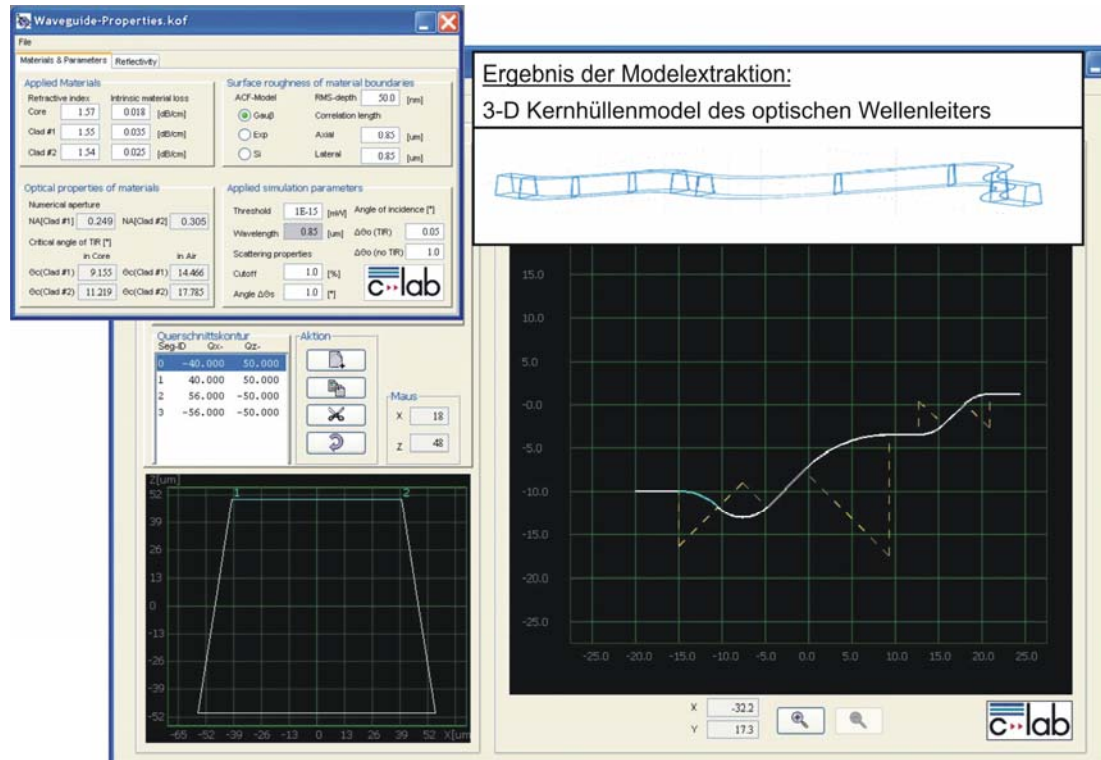


Bild 4: Prototyp einer Entwurfsumgebung für optische Lagen

Wurde der Layout-Entwurf einer optischen Lage erstellt, können die Übertragungseigenschaften einzelner optischer Netze mit Hilfe einer effizienten optischen Simulation ermittelt und bezüglich der Entwurfsspezifikation bewertet werden. Hierzu ist zunächst eine Modellextraktion („*Optical Model Extraction*“) aus den vorliegenden Layoutdaten notwendig. Dabei werden die für die Simulation erforderlichen physikalischen Modelle der Verbindungskomponenten (z. B. Wellenleiterkernsegmente, mikrooptische Leistungsteiler für Verzweigungen, Koppelkomponenten usw.) erstellt, parametrisiert und zu einem *Simulation Set-up* für das jeweilige Netz zusammengefügt. Innerhalb der in Bild 4 dargestellten Entwurfsumgebung erfolgt die Modellextraktion automatisch. Nach erfolgreicher Modellextraktion kann dann eine optische Simulation aus der Entwurfsumgebung heraus gestartet und gesteuert werden. Bei dem hier verwendeten Optik-Simulator handelt es sich um ein spezielles, hinsichtlich der besonderen Anforderungen an die Analyse der betrachteten planar-integrierten optischen Wellenleiter optimiertes Werkzeug, welches auf einem hybriden wellen- und strahlenoptischen Verfahren basiert. Auf die zugrundeliegende Simulationstechnik wird im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen.

Für die Auswertung der Simulationsergebnisse stehen weitere Werkzeuge innerhalb der Entwurfsumgebung zur Verfügung. Ausgehend von den Ergebnissen können

z. B. Re-Design-Informationen für eine Entwurfsoptimierung in den Entwurfsprozess einfließen. Simulationsbeispiele einer stationären und einer transienten Analyse werden in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert. Ergibt die Auswertung der Simulationsergebnisse, dass die Entwurfsspezifikationen erfüllt werden, können die Layoutdaten nach Transformation in das Extended Gerber Format für die Herstellung der optischen Lage an ein CAM-System übergeben werden.

4 Hybride wellen- und strahlenoptische Simulationstechnik

Die numerische Simulationstechnik ist ein wesentlicher Bestandteil des Entwurfsprozesses einer optischen Lage und dient der Vorhersage des stationären und transienten Übertragungsverhaltens ausgewählter optischer Wellenleiterverbindungen. Dabei muss die Simulationstechnik die optische Signalausbreitung für eine hinreichend genaue Vorhersage der Übertragungseigenschaften und der Signalintegrität auf Grundlage der elektromagnetischen Wellenausbreitung berechnen.

Durch die transversalen Abmessungen des lichtführenden Wellenleiterkerns, die bezüglich der optischen Wellenlänge des Lichtes zu beurteilen sind, wird die Auswahl potentieller Verfahren zur Berechnung der Wellenausbreitung stark eingeschränkt. So weisen die realen Wellenleiter zumeist näherungsweise rechteckförmige Kernquerschnitte auf, die mit $50\mu\text{m}$ bis $100\mu\text{m}$ Kerndurchmesser mehr als zehnmal größer sind als konventionelle, in der Weitverkehrstechnik verwendete optische Glasfasern. Bezieht man ihre transversalen Abmessungen auf eine für vertikal emittierende Laserdioden typische Wellenlänge von $0.85\mu\text{m}$, so ergeben sich relative Kerndurchmesser von mehr als 60 Wellenlängen. Konventionelle numerische Verfahren wie die *Finite Element Method*, *Finite Difference Method*, *Beam Propagation Method* etc. [13], [14], [15], können bei diesen großen transversalen Kernabmessungen aufgrund des erforderlichen Speicherbedarfs und der extrem langen Rechenzeiten nicht effizient zum Einsatz kommen. Insbesondere die longitudinalen Kernabmessungen der zu simulierenden Wellenleiterstrukturen von einigen Metern schließen den Einsatz dieser Verfahren praktisch aus.

Strahlenoptische Verfahren hingegen [10], [16], die die Wellenausbreitung auf Grundlage der geometrischen Optik berechnen, können erst eingesetzt werden, wenn die betrachteten Raumbereiche groß gegenüber der optischen Wellenlänge sind. Sie eignen sich somit hervorragend zur Berechnung der Wellenausbreitung in den Kernstrukturen der hier betrachteten planar-integrierten optischen Wellenleiter, da sie die Wellenausbreitung in den optisch homogenen Kernbereichen der Wellenleiter auch über große Wellenleiterlängen speicher- und rechenzeiteffizient berechnen können. Allerdings führen konventionelle, rein strahlenoptische Simulationstechniken [17], bei denen nur die Anzahl der verfolgten geometrischen Strahlen zur Berechnung eines quantisierten Leistungstransportes ausgewertet wird, nicht zu befriedigenden Simulationsergebnissen. Zudem erlauben sie nur die Vorhersage von stationären nicht aber von transienten Übertragungseigenschaften. Erweitert man jedoch diese Technik so [16], daß auch physikalische Eigenschaften (Polarisationszustand, Phasenlage, optischer Leistungsfluss, Laufzeit etc.) eines verfolgten Strahls entlang des Strahlenpfades berechnet werden, können erheblich genauere Simulationsergebnisse zur Vorhersage der Wellenausbreitung erzielt werden, die zudem auch eine transiente Analyse der Übertragungseigenschaften zulassen.

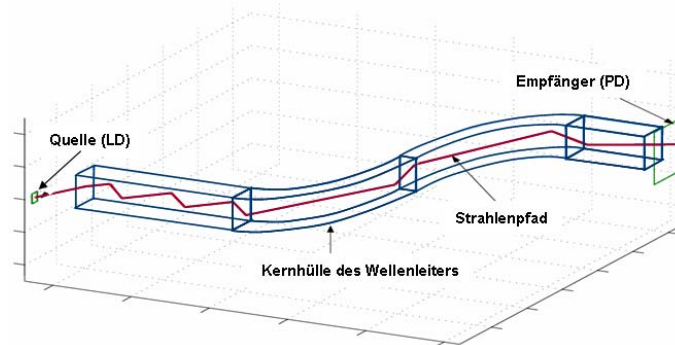
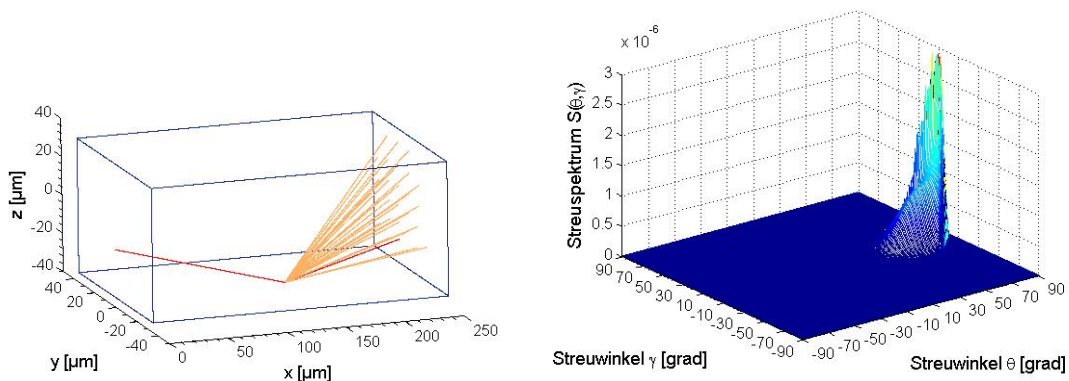


Bild 5: Modular aufgebaute Wellenleiterkernhülle bestehend aus vier Kernsegmenten. Ein geführter Strahlenpfad ist exemplarisch angegeben.

Dies gelingt durch die Kombination von „Methoden der elektromagnetischen Feldtheorie lokal ebener Wellen“ mit „Ray-Tracing-Verfahren“ und führt dann zu einer als „hybrides wellen- und strahlenoptisches Verfahren“ bezeichneten Simulationstechnik [16]. Dabei werden parallel zu den geometrischen Strahlenpfaden entsprechend Bild 5 auch die Eigenschaften lokal ebener Wellen entlang jedes Strahlenpfades berechnet. Um dies zu ermöglichen sind wellenoptische Modelle zur Berücksichtigung von Materialeigenschaften (z. B. intrinsische Absorption, Volumenstreuung, Brechzahlverlauf) in das hybrid strahlenoptische Simulationsverfahren zu integrieren [16]. Zudem müssen speziell entwickelte wellenoptische Modelle in das Verfahren integriert werden, die rechenzeiteffizient die Reflexion und Streuung (s. Bild 6b.) lokal ebener Wellen beim Auftreffen auf die zumeist rauen dielektrischen Grenzflächen der Wellenleiterwände hinreichend genau nachbilden können [10], [16].



6a Lokaler Streuprozess

6b Räumliches Streuleistungsspektrum

Bild 6: Strahlenpfade eines lokalen Streuprozesses mit wellenoptisch modelliertem Streuspektrum

Hinsichtlich der Rechenzeit optimierte Methoden der Schnittpunktsuche zur Bestimmung des geometrischen Strahlenpfades (vgl. Bild 5) sowie eine skalierbare diffuse, semi-sequentielle Strahlverfolgung runden das Simulationsverfahren ab [16]. Letztere ermöglicht das Berücksichtigen von zusätzlichen Strahlenpfaden gestreuter, lokal

ebener Wellen, die beim Auftreffen des Strahlenpfades auf eine raue Wellenleiterkernwand aus lokalen Streuprozessen (siehe Bild 6a) hervorgehen. Die semi-sequentielle Vorgehensweise stellt eine Mischform aus den klassischen sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgungsmethoden kommerzieller Ray-Tracing Simulationswerkzeuge wie TracePro [18] oder Zemax [19] dar. Sie beruht auf dem in Bild 4 und 5 dargestellten modularen Aufbau der Wellenleiterkernhülle. Innerhalb eines Kernsegmentes wird eine flexible nicht-sequentielle Strahlverfolgung durchgeführt. Verlässt der Strahl das Kernsegment über seine Stirnflächen, wird die Strahlverfolgung im nächsten Kernsegment weitergeführt. Dies entspricht einer rechenzeiteffizienten, sequentiellen Vorgehensweise in der Strahlverfolgung, so dass die hier betrachtete Strahlverfolgung eine rechenzeiteffiziente Mischform darstellt.

Die Auswertung der Ergebnisse der hybriden wellen- und strahlenoptischen Simulation erfolgt mit Hilfe eines optischen Empfängermodells durch Integration der optischen Leistungen der auf den Empfänger auftreffenden lokal ebenen Wellen. Dabei können ortsaufgelöste Leistungsverteilungen über der sensitiven Fläche des Empfängers zur Auswertung des Nahfeldes herangezogen werden. Ebenso können winkelaufgelöste Leistungsverteilungen zur Auswertung des Fernfeldes verwendet werden. Beide Verteilungen beschreiben stationäre Übertragungseigenschaften des optischen Wellenleiters, mit denen unter anderem der Ausleuchtungsgrad der numerischen Apertur sowie des Wellenleiterkerns vorhergesagt werden kann. Um die transienten Übertragungseigenschaften des Wellenleiters untersuchen zu können, wird durch Auswerten der Strahlaufzeiten eine zeitaufgelöste Leistungsverteilung mit Hilfe des Empfängermodells berechnet (vgl. Bild 7), die unter der Voraussetzung einer sprungförmigen Anregung der Quellstrahlen der Sprungantwort des optischen Wellenleiters entspricht.

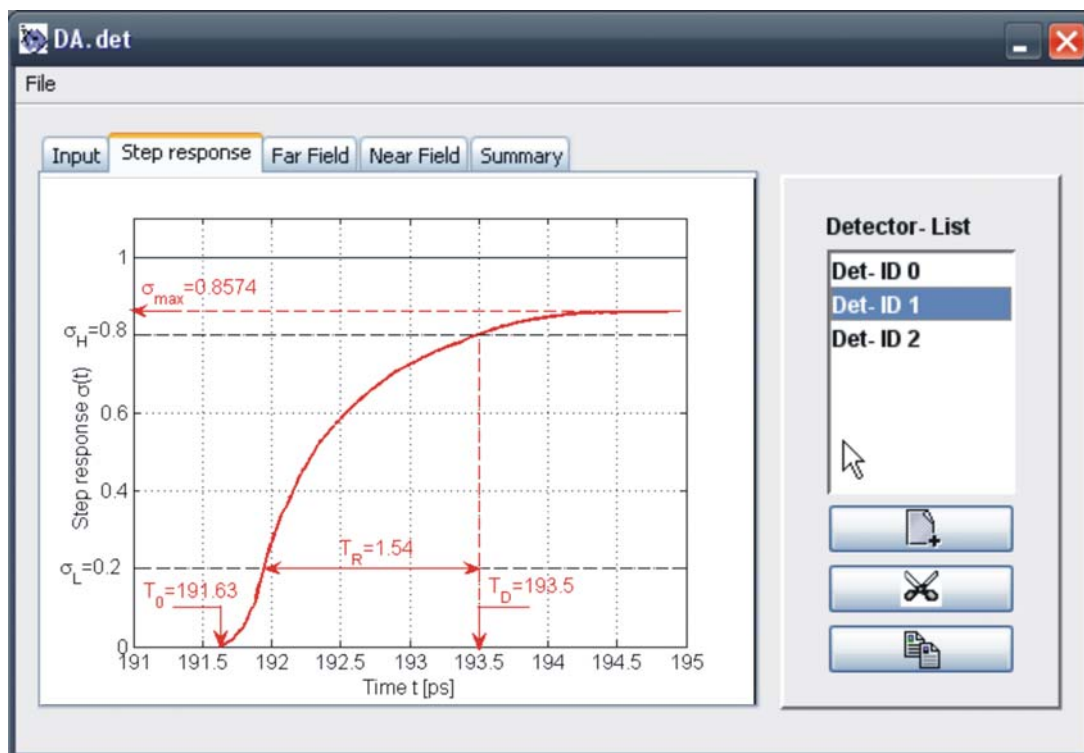


Bild 7: Zeitbereichsanalyse mittels simulierter Sprungantwort einer planar-integrierten Wellenleiterkrümmung (Axiale Länge $L_A = 36.56$ mm, Radius $R = 8$ mm, $n = 1.57$)

Durch Auswerten der Sprungantwort lassen sich dann charakteristische Zeitbereichsgrößen (Signallaufzeit T_D , Anstiegszeit T_R , Signaldispersion T_M) als auch stationäre Größen (Signaldämpfung, Leistungsreserve) der Signalübertragung extrahieren und somit die Signalintegrität entlang der optischen Übertragungsstrecke anhand dieser Parameter prüfen.

5 Simulationsbeispiele und erste Entwurfsregeln

Neben der numerischen Verifikation des Entwurfes optischer Verbindungen im Rahmen des Entwurfsprozesses dient die optische Simulation auch der Extraktion von Entwurfsregeln und zur Bestimmung der maximal erreichbaren Übertragungsbreiten der optischen Wellenleiter. Dazu werden nachfolgend exemplarisch die Simulationsergebnisse einer stationären und einer transienten Analyse vorgestellt und diskutiert.

Beispiel 1: Krümmungsverluste

Zunächst werden die Ergebnisse einer stationären Analyse betrachtet, die der Ermittlung von minimalen Krümmungsradien für den Entwurf von gekrümmten Wellenleitern dient. Kleine Krümmungsradien sind hinsichtlich des Freiheitsgrades im Entwurf wünschenswert, führen aber bei zu klein gewählten Radien zu signifikanten Leistungsverlusten auf Grund von Abstrahlungen im Bereich der Krümmung.

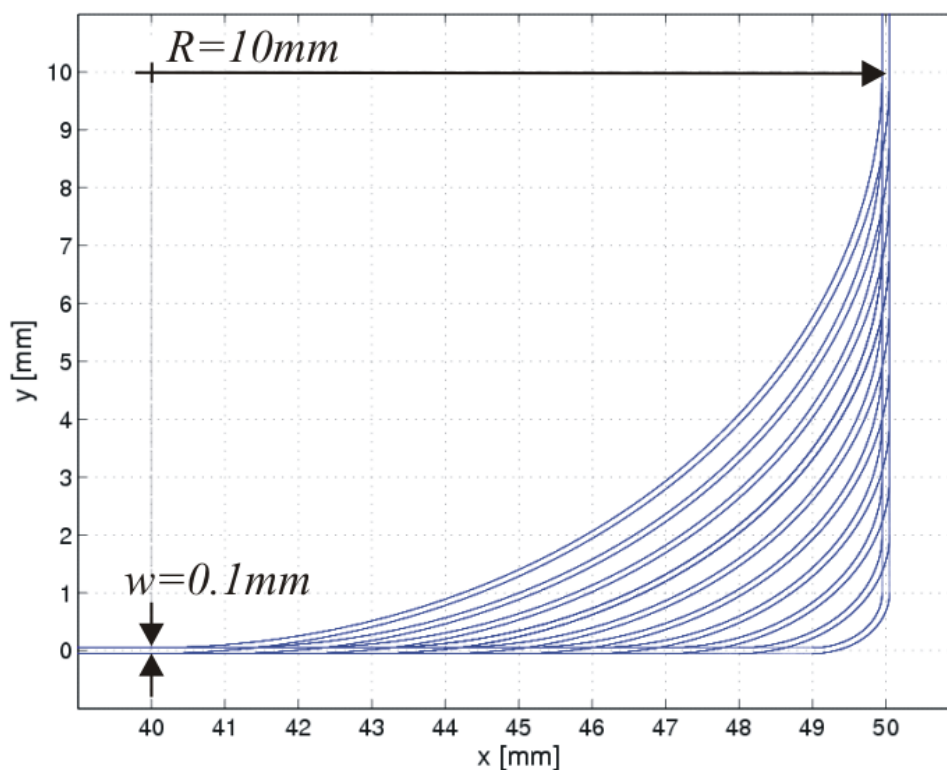
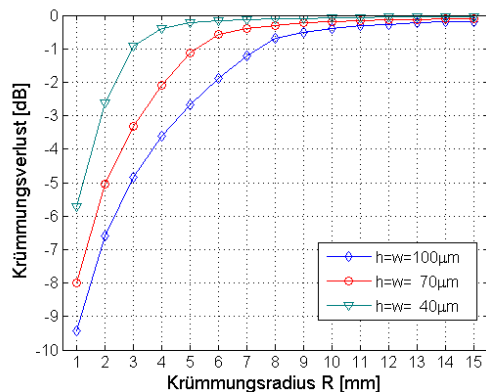
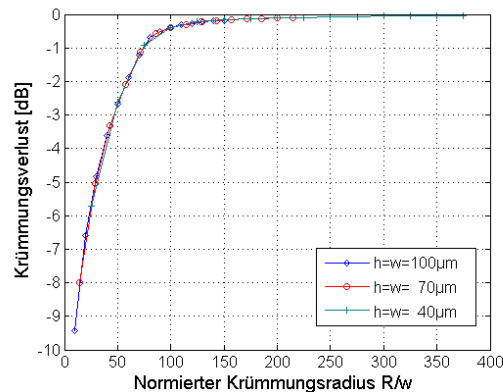


Bild 8: Layout einer optischen Lage mit zehn gekrümmten Wellenleiterkernen bei einer Kernstrukturbreite von $w=100\mu\text{m}$ und variierenden Krümmungsradien R

Um hier eine quantitative Aussage treffen zu können, wurden die Krümmungsverluste der in Bild 8 dargestellten Wellenleiterkrümmungen mit Radien von 1 bis 10mm für drei unterschiedliche Kernstrukturbreiten w von $40\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$ simuliert. Ergänzt wurden die Simulationsreihen durch fünf weitere Simulationen für die Krümmungsradien von $R=11\text{mm}$ bis $R=15\text{mm}$. Die numerische Apertur der Wellenleiter von 0.25 wird dabei homogen ausgeleuchtet. Die simulierten Krümmungsverluste der drei Wellenleiter sind in Bild 9a über den Krümmungsradius aufgetragen.



9a Darstellung über Radius



9b Darstellung über normierten Radius

Bild 9: Krümmungsverluste planar-integrierter optischer Wellenleiter

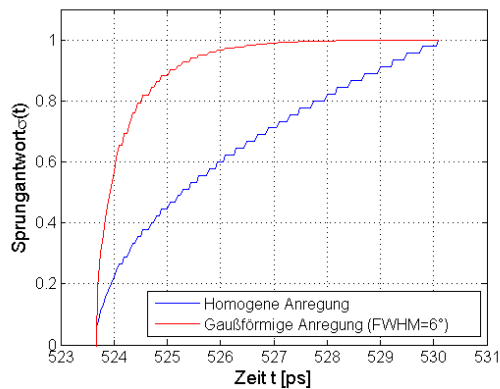
Erwartungsgemäß steigen die Krümmungsverluste für kleiner werdende Krümmungsradien an, wobei sich ein deutlicher Einfluss der Kernstrukturbreite w auf das Dämpfungsverhalten zeigt. Kleine Kernstrukturbreiten führen bei gleich bleibendem Krümmungsradius R zu kleineren Krümmungsverlusten. Dies motiviert eine weitere Darstellungsform der Krümmungsverluste, die in Bild 9b verwendet wurde. Normiert man den Krümmungsradius auf die Kernstrukturbreite des Wellenleiters, so erhält man deckungsgleiche Kurvenverläufe für die Krümmungsverluste. Dies ermöglicht die Extraktion einer Entwurfsregel bezüglich minimaler Krümmungsradien, wobei die Kernstrukturbreite als Technologieparameter zu verstehen ist. Die abgeleitete Entwurfsregel lautet hierbei, dass bei konstantem normiertem Krümmungsradius R/w die Krümmungsverluste konstant bleiben.

Beispiel 2: Bandbreitenlängenprodukt

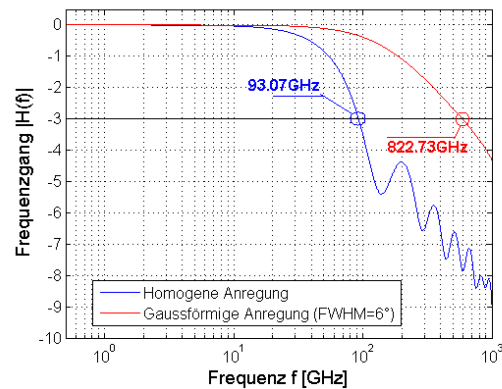
Aufgrund der großen transversalen Kernabmessungen planar-integrierter Wellenleiter und ihrer großen numerischen Apertur von mehr als 0.2, wird ihr maximal erreichbares Bandbreitenlängenprodukt wegen der Intermodendispersion limitiert [20]. Um auch hier eine quantitative Aussage bezüglich der Übertragungsbandbreite machen zu können, wurden die transienten Übertragungseigenschaften eines geraden Wellenleiters mit einer numerischen Apertur von 0.25 simuliert und die resultierenden Sprungantworten ausgewertet. Dabei wurden zwei unterschiedliche räumliche Emissionsspektren der optischen Quelle verwendet, die zum einen die numerische Apertur homogen und zum anderen Gauß-förmig mit einer Winkelbreite von 6° (FWHM¹) ausleuchten. Ersterer Fall entspricht einer Worst-case-Anregung hinsichtlich der Signalübertragung und dient der Vorhersage eines minimalen Bandbreitenlängenproduktes. Der zweite Fall bildet in guter Näherung die Anregung durch einen

¹ Full Width Half Maximum repräsentiert die Winkelbreite des Fernfeldes eines räumlichen Emissionsspektrums einer optischen Quelle, bei der die emittierte Leistung auf die Hälfte abgesunken ist.

Einmodenlaser nach und stellt somit eine realistische Vorhersage des Bandbreitenproduktes dar. Die beiden Sprungantworten wurden nach einer Wellenleiterlänge von 10cm durch optische Simulationen bestimmt und sind in Bild 10a dargestellt. Um aus diesen die Bandbreitenlängenprodukte extrahieren zu können, wurde sie nach der Zeit abgeleitet und die resultierenden Ergebnisse durch eine Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Die hierdurch erhaltenen Übertragungsfunktionen sind in Bild 10b dargestellt.



10a Sprungantworten



10b Frequenzgang

Bild 10: Ergebnisse der transienten Analyse der Übertragungseigenschaften

Durch Auswerten der 3dB-Grenzfrequenz können dann die erreichbaren Bandbreitenlängenprodukte für eine Wellenleiterlänge von 0.1m extrahiert werden.

In [16] wird bewiesen, dass das Bandbreitenlängenprodukt für unterschiedliche Wellenleiterlängen konstant ist, so dass durch eine Extrapolation die Bandbreite auch für einen Meter angegeben werden kann.

Die durchgeführten Simulationen zeigen deutlich zwei wesentliche Eigenschaften planar integrierter optischer Wellenleiter auf: Zum einen weisen sie eine Bandbreitenbegrenzung auf und zum anderen wird diese Bandbreitenbegrenzung neben einer Reihe weiterer Parameter auch stark von dem anregenden räumlichen Emissionsspektrum der Quelle beeinflusst. So schwanken die hier numerisch berechneten Bandbreitenlängenprodukte für die beiden verwendeten Emissionsspektren von 9.3 bis 82.2GHz·m. Dies verdeutlicht sehr eindringlich die Notwendigkeit des ganzheitlichen Simulationsansatzes, der auch die Eigenschaften der optischen Quellen zu berücksichtigen hat.

6 Zusammenfassung

In Analogie zur elektrischen Verbindungstechnik ist ein industrieller Einsatz optischer Verbindungstechniken auf Leiterplattenebene ohne den rechnergestützten Entwurf und die Simulation optischer Lagen zukünftig kaum denkbar. Ausgehend von der rechnergestützten Layouterstellung optischer Lagen und einer automatisierten Entwurfsprüfung über die optische Einzelsimulation und Bewertung kritischer optischer Verbindungen bis hin zur CAM-Datenerstellung für die Fertigung optischer Lagen wird ein durchgehender Entwurfsprozess benötigt, der durch eine Reihe von Entwurfs und Simulationenwerkzeugen flankiert werden muss. Entsprechend den hier

vorgestellten Arbeiten sind die grundlegenden Entwurfs, Modellierungs- und Simulationsverfahren vorhanden. Erste Implementierungen in entsprechende Werkzeuge liegen als Prototypen vor. Umfangreiche Arbeiten sind noch erforderlich hinsichtlich der Weiterentwicklung und Integration der Modellierungs- und Simulationsverfahren.

7 Literatur

- [1] L. Schares, J.A. Kash, F.E. Doany et al., *Terabus, Terabit/Second-Class Card-Level Optical Interconnect Technology*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.12, No.5, pp. 1032-1044, 2006.
- [2] J. Schrage, Th. Bierhoff, *Embedded Optical Waveguides for on-board interconnections*, Frontiers in Optics, 87th OSA Annual Meeting, Tucson, Arizona, USA, 2003.
- [3] H. Schröder, *NeGIT – New Generation Interconnection Technology*, Elektronik 14/2006 S.32-35.
- [4] T. Happel, M Franke, H. Nanai, J. Schrage, *Demonstration of optical interconnection- and assembly technique for fully-embedded optical PCB at data rates of 10GBps/ch*, Electronic System Integration Technology Conference, Dresden, 2006.
- [5] S. Hiramatsu, T. Mikawa, *Optical Design of Active Interposer for High-Speed Chip Level Optical Interconnects*, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.24, No.2, pp. 927-934, 2006.
- [6] J. Schrage, Y. Sönmez, T. Happel, et al., *WDM package enabling high-bandwidth optical intrasystem interconnects*, SPIE Photonics West 2006, San Jose, CA, USA (Invited Paper), 2006.
- [7] Cadence, www.cadence.com.
- [8] Zuken, www.zuken.com.
- [9] Mentor Graphics, www.mentor.com.
- [10] Th. Bierhoff, A. Himmler, G. Mroczynski, et al., *Ray Tracing and its Verification for the Analysis of Highly Multimode Optical Waveguides with Rough Surfaces*, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 37, No. 5, Part 1, pp. 3307-3310, 2001.
- [11] O. Stübbe, A. Wallrabenstein, Th. Bierhoff, et al., *Combined simulation of active and passive microoptical components*, Microoptics Conference (MOC), Tokio/Japan, 2005.
- [12] Th. Bierhoff, Y. Sönmez, J. Schrage, et al., *Fundamental limits of the bandwidth-length product of board-integrated optical multimode waveguides due to intermode dispersion*, Optics in Computing 2004, Engelberg, Schweiz, 2004.
- [13] M. Koshiya, *Optical Waveguide Theory by Finite Element Method*, KTK Scientific Publisher, 1. Auflage, 1992.
- [14] K. Kawano, T. Kitho, *Optical Waveguide Analysis – Solving Maxwell's Equations and the Schrödinger Equation*. Wiley, 1. Auflage 1992.
- [15] G. Lehner, *Elektromagnetische Feldtheorie*, Springer Verlag, 2. Auflage, 1994.

- [16] Th. Bierhoff, *Strahlenoptische Analyse der Wellenausbreitung und Modenkopplung in optisch hoch multimodalen Wellenleitern*, Shaker Verlag, 1. Auflage, 2006.
- [17] R. R. Shannon, *The Art and Science of Optical Design*, Cambridge University Press, 1997.
- [18] Lambda Research Cooperation, *Ray-Tracing Software TracePro*,
<http://www.lambdares.com>.
- [19] Zemax Development Cooperation, *Ray-Tracing Software Zemax*,
<http://www.zemax.com/>.
- [20] E. Voges, K. Petermann, *Optische Kommunikationstechnik*, Springer Verlag, 2002.