

Tagungsband

**BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen
Leiterplatten**

15./16. November 2001

Heinz Nixdorf Museumsforum · Paderborn

Tagungsband

Seminar

**BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen
Leiterplatten**

15./16. November 2001

Heinz Nixdorf Museumsforum · Paderborn



Herausgeber:

Andreas Himmler, Dr. Elmar Griesse
Siemens Business Services GmbH & Co. OHG
C-LAB
Fürstenallee 11
D-33102 Paderborn
himmler@ieee.org, Elmar.Griesse@ieee.org

Rainer Heinstein
VDI/VDE-Technologiezentrum
Informationstechnik GmbH
Rheinstr. 10 B
D-14513 Teltow
heinstein@vdivde-it.de

Redaktion:

Amir Wallrabenstein
C-LAB/Universität Paderborn
Fürstenallee 11
D-33102 Paderborn
amir@c-lab.de

ISBN 3-00-008796-6

Elektrisch-optische Leiterplatten

Als Folge der stürmischen Entwicklung auf den Gebieten der Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik steigen die Anforderungen in der Informationstechnik, Kommunikationstechnik und in der Sensorik hinsichtlich der zu übertragenden Bitraten, der Störsicherheit sowie der Integrationsdichte. Hier sind innovative Lösungsansätze gefragt. Optische Verbindungen über Fasern oder integrierte Wellenleiter bieten einen erfolgversprechenden Lösungsweg, da sie gegen elektromagnetische Felder unempfindlich sind und große Signalbandbreiten übertragen können. Im Weitverkehrsbereich und für lokale Netze zählen optische Übertragungsmedien zum Stand der Technik.

Die Kommunikation innerhalb von Geräten und Baugruppen stellt jedoch einen zunehmenden Engpass für hohe Datenraten dar. Vor allem in der Peripherie von ICs und in Modulen könnte die optische Übertragung von Signalen Abhilfe schaffen, jedoch gibt es hierfür z. Zt. noch keine wirtschaftlichen Lösungen. Vor diesem Hintergrund arbeiten im Rahmen verschiedener Förderungsprogramme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung eine Reihe von Unternehmen und Institute in den industriellen Einzel- und Verbundprojekten "Optische Verbindungssysteme" (OptoSys), "Modular optisch-elektronische Schaltungsträger" (MOES), "Industrielle Produktionstechnik für elektrisch-optische Baugruppen mit integriert optischen Kurzstreckenverbindungen" (OptiCon) sowie "Electrical/Optical Circuit Board" (EOCB), das von der VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (VDI/VDE-IT) als Projektträger betreut wird, zusammen.

Ziel der Projekte ist die Integration optischer Wellenleiterstrukturen in konventionelle Mehrlagen-Leiterplatten, die Untersuchung geeigneter Aufbau- und Verbindungstechniken zur Montage und Ankopplung optoelektronischer Komponenten sowie Verfahren zur industriellen Produktionstechnik für elektrisch-optische Baugruppen. Ebenso werden die benötigten Verfahren und Modelle erarbeitet, um Design- und Layout-Werkzeuge so zu erweitern, dass ein integrierter Entwurfsprozess für kombiniert elektrisch- optische Leiterplatten möglich wird. Zusätzlich werden auch Fragen zu Materialien behandelt.

Dieser Tagungsband basiert auf den Beiträgen der Fachkonferenz "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten". Er gibt einen Überblick über die bisher erreichten Ergebnisse und über weiteren, bis zur Marktreife der Technologie notwendigen Entwicklungsbedarf.

Andreas Himmler
Elmar Gries
Rainer Heinstei

Inhaltsverzeichnis

Optische Verbindungen in der Leiterplatte: Einsatzpotentiale und aktuelle Projekte

<i>W. Scheel:</i>	
Von der elektrischen zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik . . .	1
<i>E. Strake:</i>	
Electrical/Optical Circuit Board – EOCB	13
<i>E. Griese, J.-R. Kropp, J. Moisel, W. Süllau:</i>	
Projekte zur optischen Aufbau- und Vebindungstechnik im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts OptoSys	27
<i>M. Kowatsch, R. Schulz, E. Klusmann, W. Scheel, H. Schröder, J. Bauer, K. Gerdorn, G. Röhrs, H. Kühn, K. Pfeiffer, C. Modes, H. Park, J. Kostelnik:</i>	
Modularer Optisch-Elektrischer Schaltungsträger (MOES)	41
<i>P. Demmer:</i>	
Industrielle Produktionstechnik für Baugruppen mit integrierten optischen Kurzstreckenverbindungen – OptiCon –	49

Herstellung, Charakterisierung und Modellierung elektrisch-optischer Leiterplatten: Technologien und Konzepte

<i>H. Schröder, J. Bauer, F. Ebling:</i>	
Optische Multimode-Wellenleiter für Leiterplatten	55
<i>W. Süllau:</i>	
Aufbau und Herstellung hybrider elektrisch-optischer Leiterplatten	63
<i>Ch. Lehnberger, L. Oberender:</i>	
Aufbau und Herstellung hybrider elektrisch-optischer Leiterplatten – De- tails über den Herstellungsprozess von EOCBs	65
<i>H. Schröder, E. Strake:</i>	
Meßmethoden und Charakterisierung optischer Multimode-Verbindungen auf EOCB	71
<i>Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, E. Griese, G. Mrozynski:</i>	
Ansätze zur numerischen Simulation optischer Multimode-Verbindungen . .	79
<i>A. Himmler, E. Griese, G. Spickermann, H. Franke, W. Süllau, H. Schröder, E. Strake:</i>	
Komponenten, Koppelverfahren und Demonstratoren elektrisch-optischer Leiterplatten	89

Optische Verbindungstechnik: Anwendungsgebiete und weiterer F&E-Bedarf

E. Strake:

Elektrisch/Optische Leiterplatten – Erfordernisse und Anwendungspotentiale in Fahrzeugen 103

A. Himmeler:

Optische Verbindungstechnik in Computersystemen der nächsten Generation 111

R. Pusch:

Optische Verbindungstechnik in Systemen für die Telekommunikation . . . 133

J.-R. Kropp:

Schnelle elektro-optische Wandlerkomponenten und -module für optische Kurzstreckenverbindungen 141

P. Demmer:

Anforderungen an neue Materialien für optische Verbindungen in elektrisch-optischen Baugruppen 149

Abschlußdiskussion, Ausblick

E. Griesse:

Zukünftige Anforderungen an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik – Offene Fragen und Entwicklungsbedarf – 153

Von der elektrischen zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik

Wolfgang Scheel

Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration

G.-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Scheel@izm.fraunhofer.de

Zusammenfassung: Das technische Niveau elektronischer Baugruppen kennzeichnet mehr denn je die Qualität elektronischer Geräte sowie Anlagen und ist zugleich Indikator für die Marktfähigkeit vorgenannter Produkte. Aus diesem Grunde muß die Leiterplatte zwingend in ihrer Aufbau- und Verbindungstechnik jeweils der sich kontinuierlich verändernden Bauelementefunktionalität angepaßt werden. Da innerhalb der nächsten Dekade die zu übertragenden Datenmengen auf dem Boardniveau bis auf 10 Gbit/s und mehr ansteigen wird die Integration optischer Übertragungswege in die Leiterplatte zwingend. Im Rahmen des Beitrages wird der Weg von der elektrischen zur optischen Leiterplatte betrachtet.

1. Einleitung

1.1 Szenario der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik

Inzwischen ist es bereits zum geflügelten Wort geworden, das wir aus dem Jahrhundert des Elektrons in das Jahrhundert des Photons übergegangen sind. Dies zeigt sich in der stürmischen Entwicklung optischer Technologien basierend auf dem Laser bzw. Licht Emittierenden Dioden (LED's) zum Beispiel in der Medizin- und Meßtechnik sowie der Informations- und Kommunikationstechnik. Dass diese Entwicklung inzwischen nicht nur von einigen wenigen Fachleuten so gesehen wird, ist auch in der Deutschen Agenda „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ des BMBF dargelegt.

Neben den Entwicklungen im Bereich optoelektronischer Bauelemente und mikrooptischer Komponenten sind die optischen Verbindungen von zentraler Bedeutung. Die Berücksichtigung der gegenwärtigen Entwicklungstrends ist die notwendige Basis, um sich auf die direkt bevorstehenden Herausforderungen an Technologien und Systeme vorzubereiten und aktiv an deren Gestaltung teilzunehmen.

Optische Verbindungen im Weitverkehrsnetz (WAN – Wide Area Network) und Lokalen Netzen (LAN – Local Area Network) sind technisch durch Glasfaser- oder auch Polymerfasernetze gelöst. Bedingt durch den zunehmenden Datenverkehr für Multimediaapplikationen und das Internet werden diese Lösungen bereits jetzt beim Endverbraucher erforderlich. Betrachtet man die im Bild 1 gezeigte Übersicht zur Einführung optischer Verbindungen in Abhängigkeit von den möglichen Verbindungslängen, so wird klar, dass im Moment ein akuter Bedarf an optischen Verbindungen auf dem Backplane-, Board- und Modul-Level vorhanden ist /1, 2/.

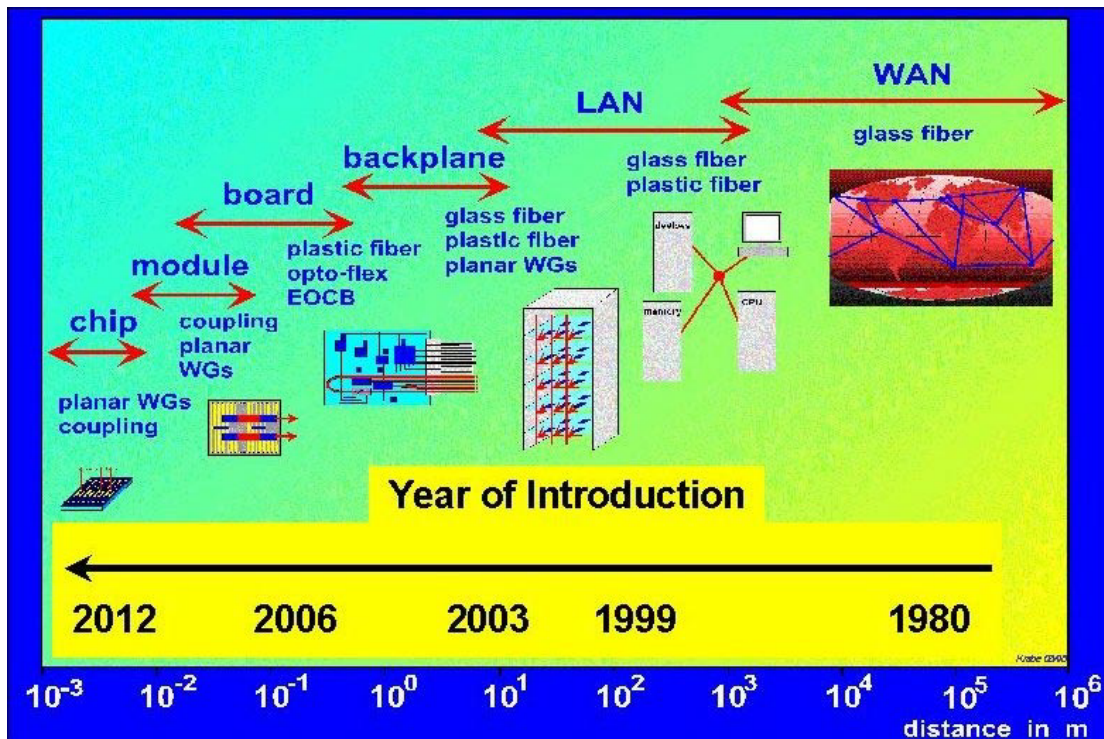


Bild 1: Szenario der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die optische Signalübertragung nicht in die Leiterplatte integriert.

1.2 Notwendigkeit optischer Aufbau- und Verbindungstechnik

Funktionalität, Komplexität und Gebrauchsfähigkeit elektronischer Geräte und Systeme werden durch den technologischen Fortschritt bei der Integration elektronischer Schaltkreisstrukturen auf dem Chipniveau bestimmt. Der derzeitige Entwicklungsstand der Halbleitertechnologie ist wie folgt zu charakterisieren:

- IC-Integrationsdichte $\geq 10^8$ Komponenten/Chip
- Anzahl der Anschlüsse (I/O) ≥ 1000
- Clock-Frequenz ≥ 1 GHz

Folgt man der dargestellten und sich weiter entwickelnden Funktionalität des Chipniveaus und des angepassten Packaging als Grundlage für den Aufbau elektronischer Geräte und Systeme, ist auch ableitbar, dass grundsätzlich neue bzw. modifizierte bisherige Lösungswege für die elektronische Aufbau- und Verbindungstechnik zu gehen sind.

Gleichzeitig sind als weitere treibenden Kräfte für eine sich stetig ändernde Aufbau- und Verbindungstechnik (Leiterplattenarchitektur) folgende Marktanforderungen an elektronische Produkte anzusehen:

- Miniaturisierung
- Leistungsfähigkeit
- Systemapplikation
- Systemkosten
- Höhere Zuverlässigkeit
- Nachhaltigkeit

Dementsprechend angepaßt erfolgte die Entwicklung der Aufbau- und Verbindungstechnik der elektrischen Leiterplatte bisher in den ersten vier grundsätzlichen Generationen (Bild 2).

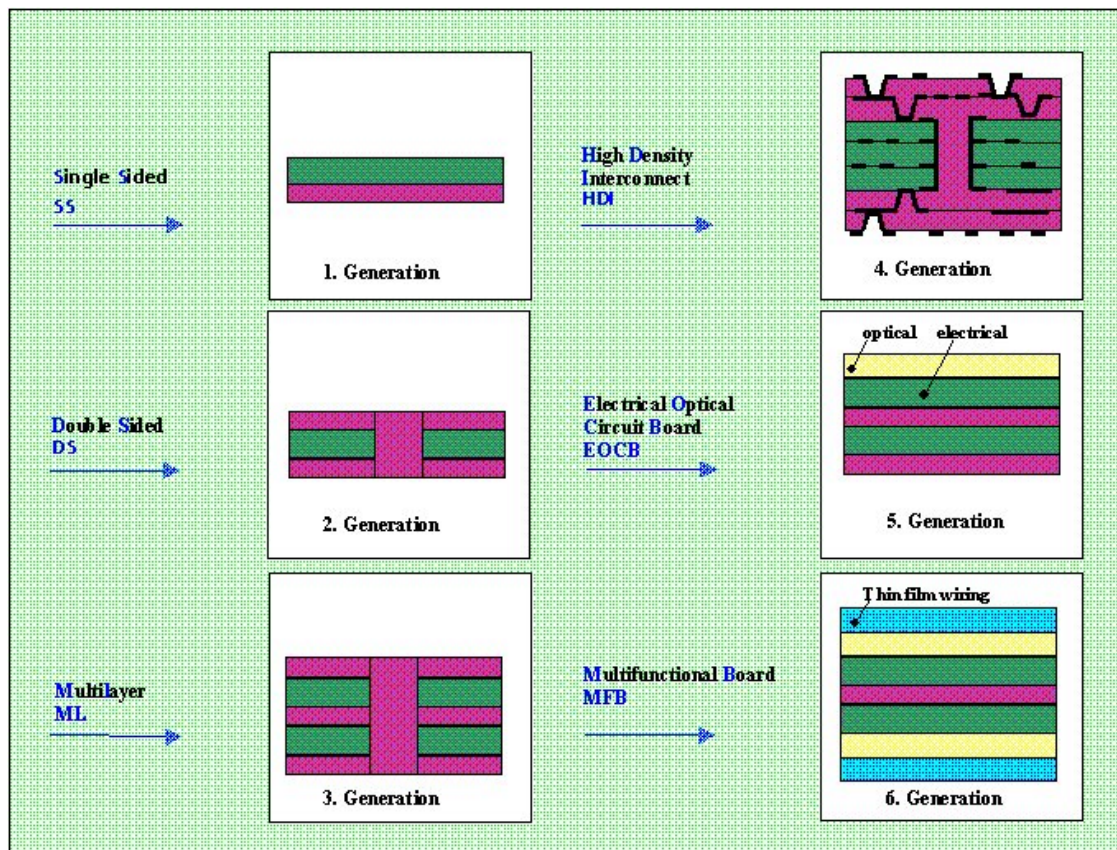


Bild 2: Generationen der Leiterplattenentwicklung

Danach stand am Anfang die einseitige (1. Generation), dieser folgten die doppelseitige (2. Generation) und Mehrlagenschaltung (3. Generation) bis zur heutigen High Density Interconnect (HDI)- Schaltung (4. Generation) mit Feinleitertechnik und Platz sparenden Mikrovia-Lagen.

Durch die kontinuierliche Verkleinerung der Funktionsstrukturen im Halbleiterbereich und den Einsatz neuer Halbleiterwerkstoffe sind Bauelemente mit immer höheren Taktraten verfügbar. Zwischenzeitlich sind Mikroprozessoren mit einer Taktfrequenz von 1,5 GHz Stand der Technik. Bis zum Jahre 2011 werden entsprechend der Tabelle 1 für Busse von Prozessoren für die Schnittstelle Bauelement – Flachbaugruppe Taktraten bis zu 3 GHz prognostiziert [3].

	Source	1997	1999	2002	2005	2008	2011
Performance of packaged Chips (MHz) Chip-to board-speed, high performance (reduced width, multiplexed bus)	ITRS 1998	750	1200	1600	2000	2500	3000
Performance of packaged Chips (MHz) Chip-to board-speed, peripheral buses	ITRS 1998	250	480	885	1035	1285	1540
Low Cost	ITRS 1998	66	75	100	100	125	125
Hand held	ITRS 1998	66	75	100	100	125	125
Cost performance	ITRS 1998	75/175	133/263	125/464	125/554	150/734	150/913
High performance	ITRS 1998	250	479	1037	1037	1287	1540
Harsh		66	75	100	100	125	125
Microprocessor and AsIC Test Equipment Requirements, High performance AsIC and MPU Off-chip NRZ data (MHz)	ITRS 1998	375	1200	1600	2000	2500	3000
Chip-to-board (off-chip) speed, high performance, (MHz) /Reduced-width, multiplexed bus)	NEMI Technology Roadmap 12/98		480	835		1285 (2009)	
Chip-to-board (off-chip) Peripheral buses (MHz)	NEMI Technology Roadmap 12/98		480	835		1285 (2009)	

Tabelle 1: Taktfrequenzen auf Flachbaugruppen mit ASICs und Prozessoren

Die Taktraten in Baugruppen, Geräten und Anlagen steigen somit in naher Zukunft allgemein über 1 GHz an und werden bei zunehmenden Busbreiten zu Datenraten bis 10 Gbit/s führen. Es ist jedoch bekannt, dass aus physikalischen und technologischen Gründen die Datenübertragung mit elektrischen Schaltungen auf ein Taktraten-Längenprodukt von 2,5 Gbit/s x 1m begrenzt ist. Datenraten größer 2,5 Gbit/s x 1m werden somit zum Flaschenhals elektronischer Übertragungssysteme.

Deshalb zeichnet sich schon heute ab, dass die optische Aufbau- und Verbindungstechnik auch unmittelbar in die Leiterplatte Einzug halten wird. In der nächsten Dekade steht dabei die integrierte Kombination von elektrischer und optischer Signal- bzw. Informationsverar-

beitung und –übertragung in flächenhafter oder räumlicher Struktur im Vordergrund der Leiterplattentechnologie.

Diese Leiterplatten werden als Elektro-Optische Leiterplatten (EOL) bezeichnet. Entsprechend der Entwicklung der Leiterplatte, gemäß Bild 2, werden diese als Leiterplatten der 5. Generation bezeichnet und unter dem Acronym EOCB (Electrical Optical Circuit Board) geführt.

Mit dieser 5. Leiterplattengeneration wird gleichzeitig ein sehr relevanter Schritt zur weiteren Systemintegration und Multifunktionalisierung der Leiterplatte getan. Entsprechend dem Wachstumsmarkt von Multimedia und Internet ist davon auszugehen, dass bis zum Jahre 2005 die Verfügbarkeit optischer Signalleitungen in elektrischen Leiterplatten gegeben sein muss. Eine Übersicht über das zu erwartende Marktvolumen optisch-elektrischer Leiterplatten von der Firma ElectronicCast ist in der Tabelle 2 dargestellt.

Region	1998		2003		2008		Mittlere jährliche Steigerungsrate %	
	Mio \$	%	Mio \$	%	Mio \$	%	1998-03	2003-08
Nord-amerika	4,77	79	90	72	1038	63	80	63
Europa	0,85	14	21,1	17	360	22	90	76
Japan/Pazifik	0,45	7	13,6	11	249	15	98	79
Weltweit	6,07	100	124,7	100	1647	100	83	68

Tabelle 2: Geschätztes regionales Marktvolumen für optische Backplanes und Motherboards

Die kommerzielle Anwendung elektro-optischer Leiterplatten wird deshalb innerhalb der nächsten 5 Jahre stattfinden. Insofern ist die Zukunft der Kommunikations- und Datennetze an Lichtwellenleiter und somit an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik gebunden. Entsprechend angestrengt wird in den Entwicklungslaboren auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette der Elektronik vom Chip bis zur Baugruppe/System gearbeitet. Die amerikanische Firma Prismark erwartet, dass im Jahre 2005 bereits 7,7% der Rückwandverdrahtung elektronischer Systeme (Backplane) optisch oder elektro-optisch sein wird. Nach applizierten Technologien wird eine Marktentwicklung gemäß Tabelle 3 erwartet /4/.

Technology	2000	2005
Glass Sheet	0.0	59.7
Plastic Sheet	0.5	14.1
Polymer on Film	0.0	7.9
Embedded Fibre	1.2	28.7
Embedded Polymer	0.5	44.0
Total	2.2	154.4

Tabelle 3: Backplane-Markt in Abhängigkeit der Technologien

1.3 Prinzipieller Aufbau einer optischen Übertragungsstrecke

Den prinzipiellen Aufbau einer optischen Punkt-zu-Punkt-Übertragung mittels Lichtwellenleiter ist im Bild 3 dargestellt [5].

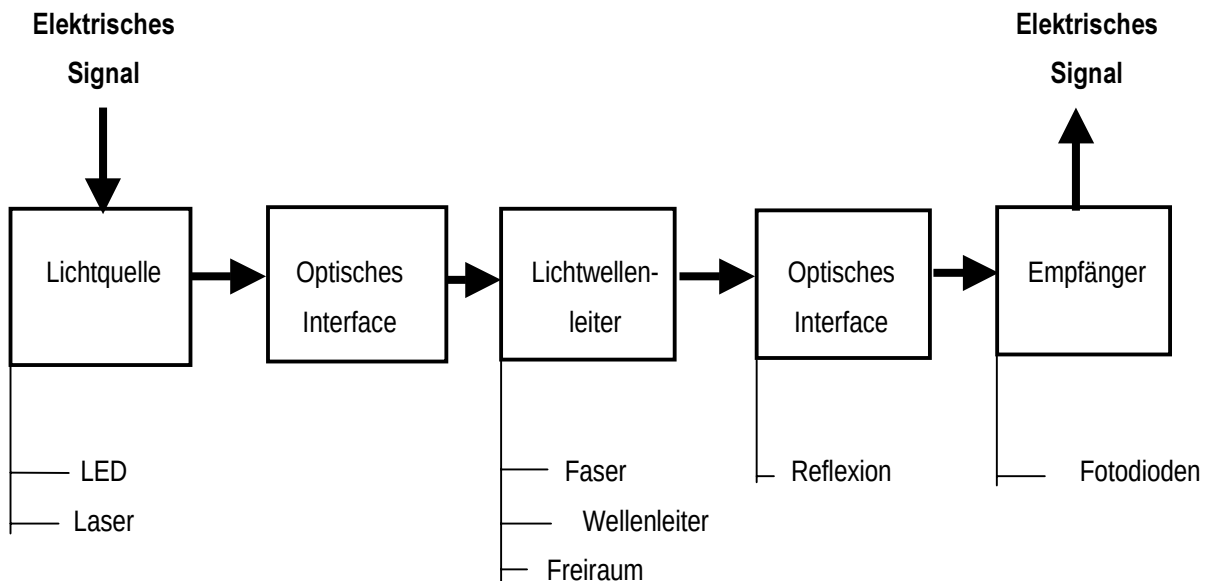


Bild 3: Prinzip einer optischen Übertragungsstrecke mit einem Lichtwellenleiter

Gemäß Bild 3 wandelt ein optischer Sender die elektrischen Signale in Lichtsignale um, die vom Lichtwellenleiter übertragen werden. Ein optischer Empfänger setzt die Lichtsignale wieder in die ursprünglichen elektrischen Signale zurück. Die Schlüsselemente dieser Punkt-zu-Punkt-Verbindung sind:

- Optischer Sender
- Lichtwellenleiter
- Optischer Empfänger

Als optische Sender kommen ausschließlich Lumineszenzdioden (LED) oder Laserdioden (LD) zur Anwendung. Für hohe Datenraten werden Laserdioden [6, 7] bevorzugt. Die Lichtweg (Lichtwellenleiter) kann mit Fasern, planaren Wellenleitern oder freistrahlend realisiert werden. Am Ende der Übertragung stehen optische Empfänger. Über entsprechende Koppelkonzepte wird das optische Interface zwischen den Schlüsselementen realisiert. Entsprechende wirtschaftliche Lösungen stehen hier noch aus.

1.4 Lichtwellenleiter

Die Hauptaufgabe des Lichtwellenleiters besteht in einer möglichst verlust- und verzerrungsfreien Übertragung der eingekoppelten Information. Im Lichtwellenleiter breitet sich das vom optischen Sender eingekoppelte Licht entweder durch Totalreflexion, Refraktion oder durch Wellenführung aus. Er besteht je nach Qualitätsmerkmal aus einer hochreinen oder modifizierten Glas- oder transparenten Kunststoff-Faser. Die Dämpfungswerte für Glasfasern betragen ca. 0,0005 dB/cm und für Kunststofffasern sind sie allgemein größer 0,1 dB/cm. Wichtige Größen und Merkmale von Lichtwellenleitern sind insbesondere der Kerndurchmesser bzw. -querschnitt, das Brechzahlprofil, die numerische Apertur, die Dämpfung infolge spektraler Absorption und Streuung sowie eine Pulsverbreiterung, die auf verschiedene Dispersionseffekte zurückzuführen ist [6].

Der Lichtwellenleiter in der Form einer Faser mit dem einfachsten Aufbau besteht aus einem konzentrischen optischen Kern mit einer höheren Brechzahl n_1 , der mit einem optischen Mantel kleinerer Brechzahl n_2 umgeben ist.

Können sich in einem Lichtwellenleiter eine Vielzahl von Eigenwellen (Moden) ausbreiten, spricht man von einem Multi-Moden-Lichtwellenleiter (MM). Im Gegensatz dazu spricht man von einem Single-Mode-Lichtwellenleiter (SM), wenn sich nur eine Mode ausbreiten kann. Letztere Wellenleiter haben einen Kerndurchmesser bis zu 10 μm . Beim Multimode - Wellenleiter reicht bis zu einem Millimeter.

MM-Lichtwellenleiter besitzen auf Grund der großen Kernabmessungen und damit verbundener geringer Toleranzanforderungen deutliche Applikations- und Kostenvorteile gegenüber SM-Wellenleitern in der optischen Verbindungstechnik. Heute können über Entfernungen im Bereich von 100m auch mit MM-Wellenleitern Übertragungen bis zu 10 Gbit/s realisiert werden. In Abhängigkeit der technischen Forderungen ist die jeweilige Wellenleitertechnologie zu favorisieren.

Für die kürzere optische Verbindungstechnik auf Leiterplattenebene wird der integrierte Wellenleiter auf Polymerbasis und für das Backplane mit dem längeren Übertragungsweg der integrierte Wellenleiter auf Glasbasis zu bevorzugen sein.

An beiden Realisierungstechnologien wird intensiv gearbeitet.

Mit der Anwendung von Dünnglas in organisch aufgebauten Leiterplatten wäre in vorteilhafter Weise auch die Temperatur-, Druckbeanspruchung des Wellenleiters während der Prozessierung unkritisch. Außerdem wird mit der Glasintegration der Unterschied im Ausdehnungskoeffizienten zu Silizium-Bauelementen derartig abgebaut, wodurch auch im Betriebseinsatz eine geringere thermisch-mechanische Beanspruchung der optischen Struktur gegeben ist. Dadurch ist auch eine Nacktchipmontage ohne Underfill möglich. Erste Versuche ergaben für die Kombination - Dünnglas (100 μm) mit FR4 – Beschichtung – einen mittleren Ausdehnungskoeffizienten von 4,5 ppm/K /10/.

1.5 Aufbaukonzepte elektro-optischer-Leiterplatten

Die charakteristische Aufgabe einer elektro-optischen Leiterplatte ist die elektrische und/oder optische Verbindung der aktiven und passiven Bauelemente einschließlich der Verbindungselemente (z. B. Steckverbinder) für die nächst höhere Verdrahtungsebene untereinander. Darüber hinaus ist sie zugleich Fügepartner beim Verbinden der Bauelementanschlüsse.

Die elektro-optische Leiterplatte realisiert die elektrischen Verbindungen zwischen den Bauelementen durch flächenhafte oder drahtförmige Leiter bzw. die optischen Verbindungen durch planare Wellenleiter, Fasern oder in Freistrahntechnik auf oder in einem organischen Substrat. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann zwischen fünf Aufbautechnologien

- Overlaytechnologie
- Inlaytechnologie
- Multiwire-Technologie
- Wellenleiter in Kupfer
- Kombinationen vorgenannter Technologien

für Elektro-optische Leiterplatten unterschieden werden /8/.

Erste Aufbauten von elektro-optischen Leiterplatten unter Inanspruchnahme der Inlaytechnologie sind im Rahmen von intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit mit den öffentlich geförderten Projekten EOCB, MOES, OptoSys und OptiCon entstanden und zeugen von dem hohen Stellenwert deutscher Forschungsarbeit den wir im internationalen Vergleich auf die-

sem Gebiet erreicht haben. Der Vergleich ist vor allem mit Amerika und dem asiatischen Raum zu führen.

Im Bild 4 ist die gewählte Aufbaustruktur schematisch und als Fertigungsdemonstrator gezeigt.

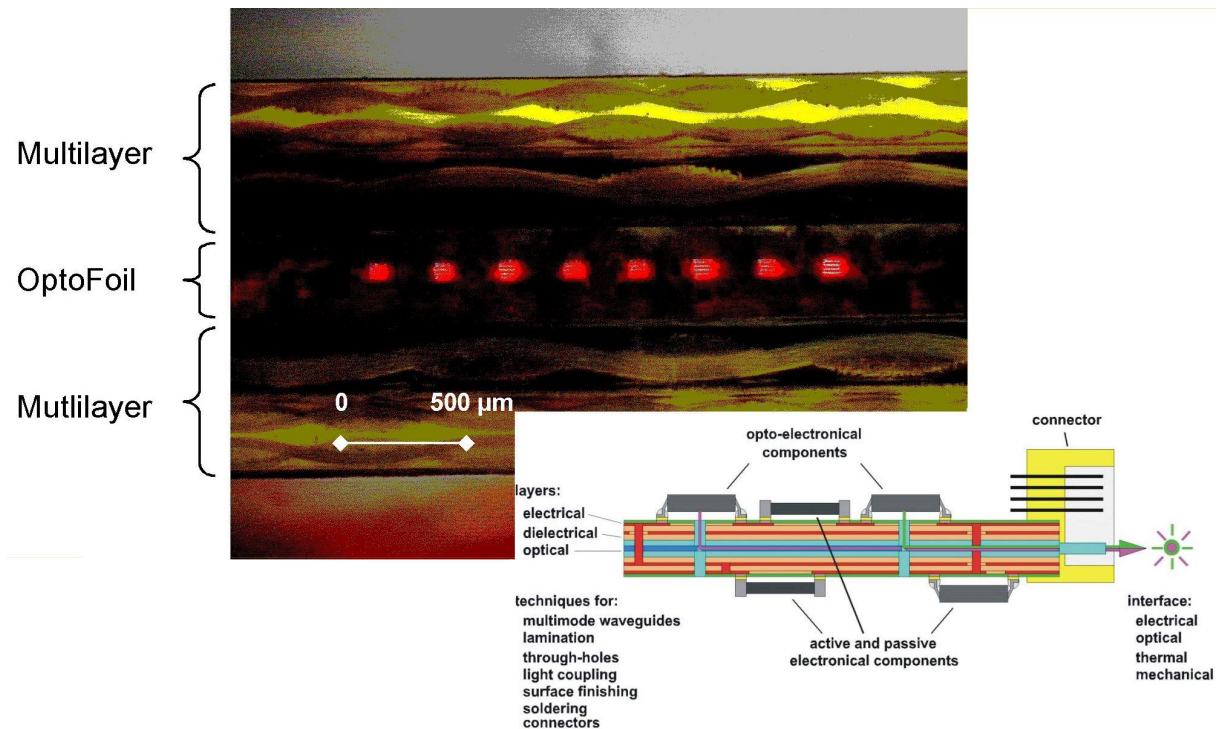


Bild 4: EOCB - Konzept

In Verbindung mit der Dick-Kupfer-Technologie auf Leiterplatten wird die Wellenleiter-in-Kupfer-Technologie, ein gemeinsamer Ansatz der TU Dresden, des Fraunhofer Institutes IZM Berlin und der Polytechnischen Hochschule Wroclaw, gemeinsam weiter verfolgt. Dabei werden die optischen Wellenleiter in vorgeätzte Kupferstrukturen eingebettet /9/.

Die Multiwire Technologie wird in gleicher Weise ausgeführt, wie sie bereits von der Kupferlackdrahttechnologie bekannt ist. Der Kupferdraht wird dabei durch eine Glas- oder Kunststofffaser ersetzt. Die Firma JuMa in Nürnberg betreibt die Technologieentwicklung.

Den gegenwärtigen Stand der Technik auf dem Gebiet der Herstellung und Integration planarer Wellenleiter einschätzend, sind die Technologievoraussetzungen für die optische Aufbau- und Verbindungstechnik verstanden. Für die Serienreife gilt es vor allem zeitnah die Material- und Prozeßseite weiter zu optimieren und fertigungsgerechte Kopplungskonzepte für alle Assemblierungsebenen zu entwickeln. Im besonderen gilt es ein durchgängiges Design für optische Verbindungen und den Entwurf elektro-optischer Leiterplatten zu ermöglichen.

Das Szenario der Integration der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik in die Leiterplatte bzw. elektronische Baugruppe wird in folgenden Schritten erfolgen:

- Sichere SMD-Verarbeitung (Bestücken, Fügen) optoelektronischer Bauelemente
- Einführung optischer Mehrfachverbindungen mit Vielfachsteckern
- Optische Backplanes
- Flachbaugruppen für elektrische und optische Verbindungen

Für erfolgreiche Anwendungen sind toleranzunempfindliche Lösungen zu entwickeln.

Nur so kann nach derzeitigem Stand der Technik eine zuverlässige Ankopplung der optoelektronischen Bauelemente (Sender, Empfänger) realisiert werden.

Die Schlüsselparameter für die weitere Entwicklung elektro-optischer Leiterplatten sind:

- Wellenleiter-Technologie
- Design und Simulation
- Montage optischer Bauelemente
- Optisches Interface – Bauelement zu Platine
- Optisches Interface – Platine zu Platine
- Packaging optischer Funktionsstrukturen

Die optische Aufbau- und Verbindungstechnik auf der Boardebene für die nächste Dekade muß sich an der erwarteten Entwicklung entsprechend Tabelle 4 vollziehen /5/.

Technology/Components	1998	2000	2004	2011
Board to Board – rates	0.1 – 1 Gb/s	1 Gb/s	1 – 10 Gb/s	10 – 100 Gb/s

Tabelle 4: Erwartete Entwicklung in der optischen Kommunikationstechnik auf der Boardebene

Wie bereits im Punkt 1.1 ausgeführt, ist mit der Integration der optischen Signalübertragung in die Leiterplatte ganzheitlich auch der optische Pfad zwischen Baugruppen und dem Motherboard oder über die Rückverdrahtungsebene (Backplane) zu realisieren. Während die Integration des optischen Pfades in das Motherboard vergleichbar zur einzelnen Baugruppe sein wird, spricht man bei der Integration optischer Pfade in die Backplane bereits von 3 Generationen.

1. Generation: Diskrete Faserverbindung
2. Generation: Flexibler Folienverbund mit optischen Fasern
3. Generation: Integrierte planare Wellenleiter

Von besonderem Interesse ist die 3. Generation, weil sie in ihren vorteilhaften Merkmalen mit der Baugruppe direkt vergleichbar ist.

Zwei unterschiedliche Technologieansätze werden in Europa verfolgt. Das ist zum einen die Integration planarer Wellenleiter der Firma Daimler Chrysler auf der Basis ausschließlich optischer Polymere, zum anderen die Integration planarer Wellenleiter mit Dünnglas als Träger von der Firma PPC /7/.

Während die 1. Variante bereits für Rechner in fliegenden Systemen freigegeben ist, will PPC seine Opto-board-Technologie bis 2003 zur Serienreife bringen.

1.6 Ausblick

Mit der optischen Signalübertragung sind die Leistungsgrenzen der elektrischen auf unabsehbare Zeit überwindbar. Damit wird es erstmals möglich sein, die sich kontinuierlich weiter erhöhende Datenrate mit veränderter Funktionalität der Bauelemente uneingeschränkt zu nutzen. Damit dieses sich so vollziehen kann, ist es nicht nur notwendig optische Pfade in die Leiterplatte zu integrieren und zwischen verschiedenen Baugruppen optisch kommunizieren zu können. Es muß darüber hinaus in naher Zukunft gelingen, mikrooptische Komponenten ebenfalls in der Leiterplatte verfügbar zu haben, um auch die Freistrahltechnik zur Informationsübertragung nutzen zu können. Ferner gilt es anzumerken, das die elektro-optische Leiterplatte die gesamte Wertschöpfungskette der elektronischen Baugruppenfertigung verändern wird. Es gilt sich darauf einzurichten.

Die Zukunft der Informations- und Kommunikationstechnologie ist an die optische Signalübertragung gebunden. Insofern ist das Thema des Beitrages keine Fragestellung, sondern ein Muß, der Übergang von der elektrischen zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik steht unmittelbar bevor.

2. Literatur

- [1] D. Krabe
Optical interconnects by Hot Embossing for Module and PCB-Technology –
The EOCB Approach
Proc.49th ECTC Conf. S.1164-66, San Diego Calif. 1999
- [2] W. Scheel, u.a.
Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppen-
fertigung (erscheint 2/02)
- [3] ZVEI
PRONOVA – Abschlußbericht
Innovative Prozesse und Bauweisen für die Elektronik und verwandte mikro-
technische Produkte
ZVEI Frankfurt/M. im November 1999
- [4] BPA
Optical Backplanes
A Global Market and Technology Review 2000 – 2005
BPA Consulting Ltd., UK
- [5] Rao R. Tummala
Fundamentals of Microsystem Packaging
McGraw-Hill New York 2000
- [6] E. Strake
Wellenleiter für optische Verbindungen
Tutorial 10, SMT, Nürnberg 24.-26.4.01
- [7] H. P. Straub
Die Optoboard – Technologie
PPC Electronic AG, 2001
- [8] M. Kowatsch
Optische Verbindungstechnik auf der Leiterplatte
Tutorial 10, SMT, Nürnberg 24.-26.4. 2001
- [9] K. Schmieder
Einfache Integrationstechniken für optische Wellenleiter auf Leiterplatten-
Niveau
Electronic Forum, Backnang 17.-19.5.01
- [10] ISOLA AG,
Düren,
Teil 2, Heft 4, S. 531 bis 541
- [11] E. Grieser
Leiterplatten der nächsten Generation: GHz-Bandbreiten durch optische Ver-
bindungstechnik
Zeitschrift Plus, Eugen G. Leuze Verlag Saulgau 2001,
Teil 2, Heft 4, S. 531 bis 541
- [12] IPC
The National Technology Roadmap for Electronic Interconnections 2000/2001
IPC, USA

.

Electrical / Optical Circuit Board – EOCB

Engelbert Strake
Robert Bosch GmbH
Entwicklung Fahrerinformationssysteme
CM-DI/ESA4
Robert-Bosch-Straße 200
D-31139 Hildesheim
Engelbert.Strake@de.bosch.com

Zusammenfassung: *Der Überblicksbeitrag stellt kurz zwei Anwendungsgebiete hybrid optisch/elektrischer Leiterplatten dar und geht dann auf die im Vorhaben erzielten Ergebnisse zu einlaminieren Multimode-Wellenleitern mit deren optischen Eigenschaften, die optoelektronischen Moduln und Demonstratoren ein.*

1 Einführung

In der Nachrichtentechnik hat sich für große Streckenlängen die optische Übertragungstechnik bewährt. Im LAN-Bereich werden ebenfalls optische Verfahren eingesetzt. Grundsätzlich sind die Vorteile der optischen Signalübertragung – große Bandbreiten bei gleichzeitig geringer Störempfindlichkeit – auch für den Bereich kleinerer Übertragungsstrecken interessant. Aktuelle Anwendungen sind zum Beispiel optische vernetzte Fahrzeug-Elektroniksysteme. Ein umfassender Einsatz der optischen Signalübertragungstechnik in der Baugruppenebene wird aber zur Zeit noch durch die hohen Kosten für Herstellung und Konfektionierung optischer Strukturen und optoelektronischer Komponenten verhindert.

Vor diesem Hintergrund wurde 1998 mit BMBF-Förderung im Programm "Mikrosystemtechnik" das Verbundprojekt "EOCB" (Electrical / Optical Circuit Board) begonnen, das die Integration optischer Multimode-Wellenleiter in Multilayer-Leiterplatten zum Ziel hatte und daneben die Erarbeitung eines Verfahrens zur Ankopplung optoelektronischer Komponenten beinhaltete. Die Laufzeit des Projektes erstreckte sich bis Ende Juni 2001. Die Arbeitsschwerpunkte lagen auf einem Low-Cost-Ansatz zur Integration optischer Multimode-Strukturen in konventionelle Leiterplatten und der Anpassung existierender Optoelektronik-Komponenten an die neuartige Koppelgeometrie integrierter optischer Strukturen in der Leiterplatte.

Im Verbundprojekt "EOCB" haben System-Anwender (Bosch, Siemens) mit mittelständischen Unternehmen der Leiterplattenindustrie (ILFA Feinstleiter GmbH, Andus Electronic GmbH) und Instituten (Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration und Uni Paderborn) zusammengearbeitet. Ebenso waren Optik- und Elektronik-AVT-Spezialisten (OECA GmbH, Mikropack GmbH) beteiligt. Die Aufgabenverteilung beschreibt Abb. 1.

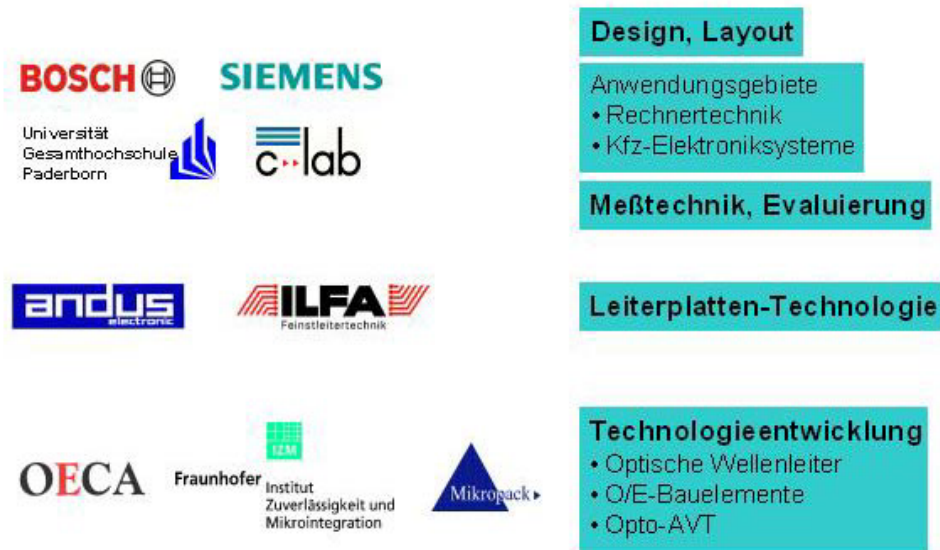


Abb. 1: Am Projekt EOCB beteiligte Partner und ihre Aufgaben im Verbundvorhaben.

2 Anwendungsgebiete

Die im Vorhaben beteiligten Großunternehmen Siemens und Bosch vertreten zwei der künftigen Anwendungsbereiche für optische Signalübertragung auf der Baugruppenebene.

Auf dem Gebiet der Hochleistungsrechnertechnik stellt der Einsatz der optischen Signalübertragung einen möglichen Ausweg aus dem Problem des Performance-Bottleneck dar, welches dadurch entsteht, dass die Übertragungskapazität herkömmlicher Verbindungen zwischen modernen Mikroelektronik-Bausteinen mit deren stetig wachsender Leistungsfähigkeit nicht mithalten kann. Ein schematisches Beispiel für eine auf einer hybriden (elektrischen und optischen) Signalübertragungstechnik beruhende Systemleiterplatte ist in Abb. 2 dargestellt.

Ein solches hybrides Board setzt für die Performance-bestimmenden Leitungen breitbandige optische Verbindungen sowie konventionelle elektrische Leitungen für die übrigen Verbindungen mit geringeren Anforderungen an Bandbreite und elektromagnetischer Störungsanfälligkeit.

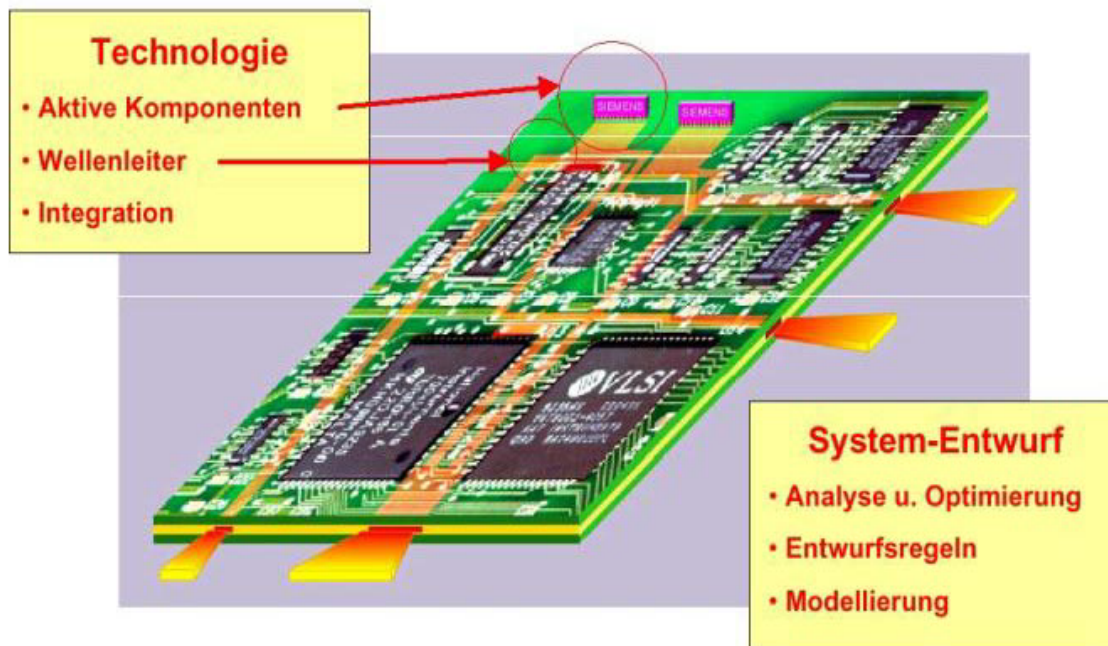


Abb. 2: Beispiel einer elektrisch / optischen Baugruppe eines künftigen Hochleistungs-Rechnersystems, in dem neben elektrischen auch optische Verbindungen für die breitbandige Kommunikation zwischen Prozessoren und Peripherie eingesetzt werden. Die damit zusammenhängenden Arbeitsgebiete im Projekt sind angegeben.

Ähnliche Überlegungen gelten auch auf dem Gebiet der Vernetzung verteilter Elektronik-Systeme im Fahrzeug. Zum einen werden auch hier immer leistungsfähigere Rechnersysteme eingesetzt, wobei allerdings allein aus Kostengründen im Vergleich zu den genannten Hochleistungsrechnern wesentlich kleinere Rechenleistungen ausreichen müssen. Zum anderen spielt hier aber auch die verteilte Anordnung der Teilsysteme eine wesentliche Rolle. In Abb. 3 ist die Vision einer modularen Vernetzung künftiger Fahrzeug-Elektroniksysteme mit einer strukturierten Verkabelung und vereinfachtem Kabelbaum schematisch dargestellt.

Die stark unterschiedlichen Anforderungen an die beteiligten Teilsysteme haben in der Vergangenheit zur Entwicklung einer Vielzahl von Bussen, Übertragungsstandards und Verkabelungsmethoden geführt. Künftige modulare Systeme könnten mit der Hilfe leistungsfähiger optischer Vernetzungsstandards helfen, Kabelbaum- und Systemkomplexität und auch Kosten zu reduzieren. Die dafür erforderlichen Mehrfach-Transceiver-Baugruppen könnten viele Vorteile elektrisch/optischer Leiterplatten ausnutzen und so zu kostengünstigen Lösungen führen.

Tomorrow: modular architecture with structured networking & cabling

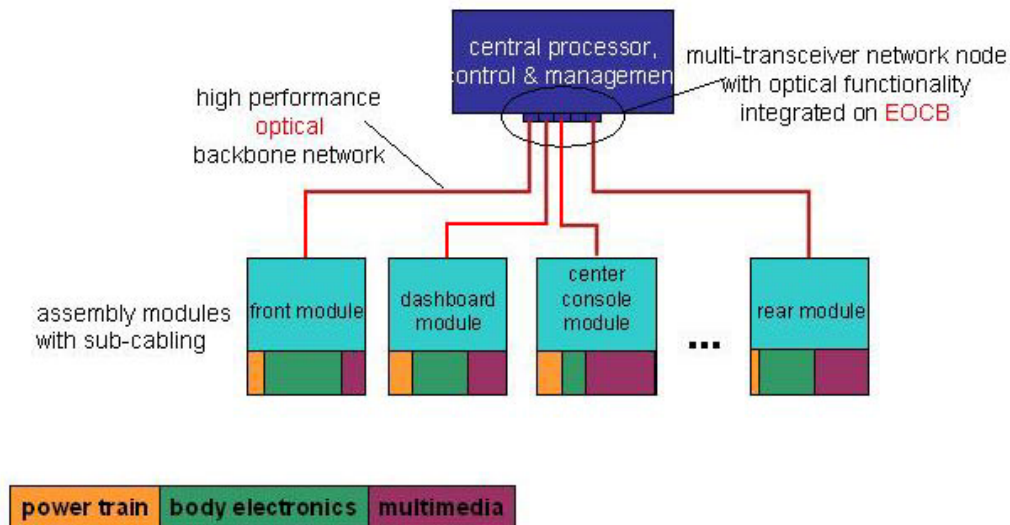


Abb. 3: Mögliche zukünftige Architektur eines verteilten Elektronik-Systems im Kraftfahrzeug mit leistungsfähigem optischen Backbone-Netzwerk und modulbezogener sekundärer Verkabelung.

3 Ausgewählte Projektergebnisse

Ausgehend von Kunststoffmaterialien hoher Wärmebeständigkeit wurden im Verbundprojekt Wellenleiterstrukturen mit Querschnitten der Größenordnung $(100\ \mu\text{m})^2$ durch Heißprägeverfahren hergestellt. Diese wurden anschließend als Innenlage in konventionelle Multilayer-Leiterplatten einlaminieren. Einen Überblick über das eingesetzte Herstellungsverfahren gibt Abb. 4.

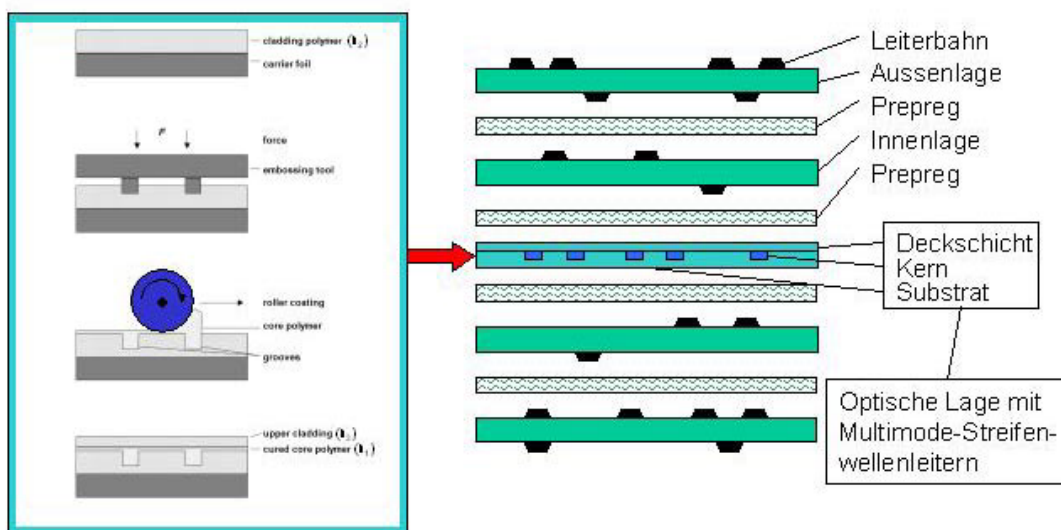


Abb. 4: Herstellungsverfahren für optische Multimode-Wellenleiter und Integration der optischen Lage in den Aufbau einer konventionellen Mehrlagen-Leiterplatte.

Ein Beispiel für Multimode-Wellenleiter, die auf diese Weise in konventionelle Leiterplatten integriert wurden, zeigt Abb. 5.

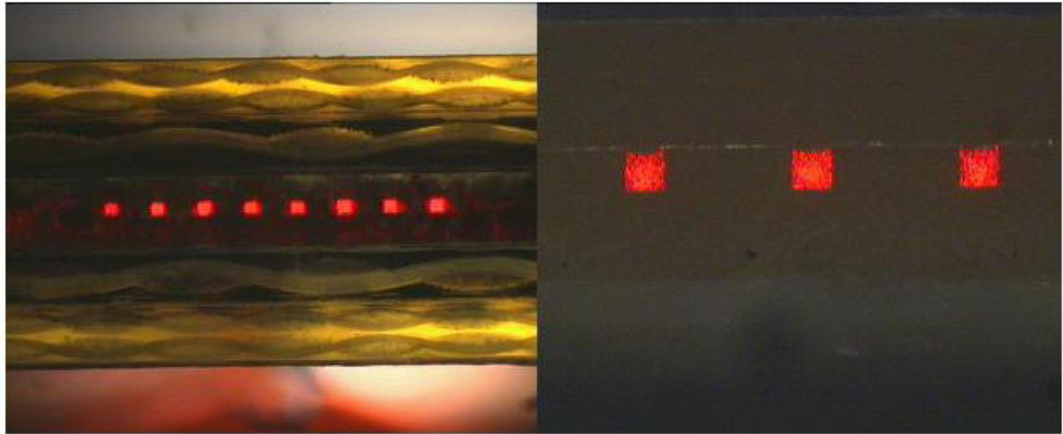


Abb. 5: Auskoppelseitige Stirnfläche eines Bandes aus Multimode-Wellenleitern, die als optische Lage in eine konventionelle Leiterplatte integriert sind. Die lichtführenden Wellenleiterkerne sind mit ihrer charakteristischen Querschnittsform deutlich zu erkennen.

Aufgrund der begrenzten thermischen Belastbarkeit der im Vorhaben zur Verfügung stehenden kommerziell verfügbaren Materialien (Materialentwicklung und -Optimierung waren aus Budgetgründen ausgeklammert) mussten hier Laminierungsparameter gewählt werden, die eine genügend feste Verbindung zwischen den verschiedenen Lagen der Leiterplatte bei gleichzeitiger Erhaltung der optischen Mikrostrukturen mit hoher Genauigkeit zuließen. Teilergebnisse hierzu zeigt Abb. 6.

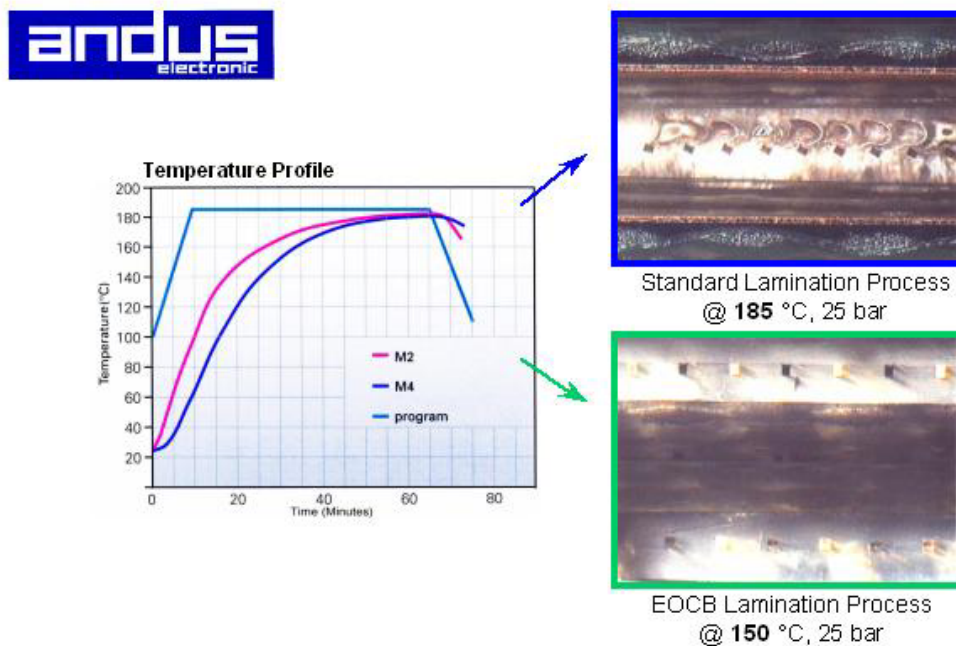


Abb. 6: Laminations-Prozessparameter und erreichte Struktureigenschaften eingebetteter optischer Multimode-Wellenleiter

Zur Überprüfung der eingesetzten Prozesstechnik und der damit erreichten geometrischen und optischen Eigenschaften dienten zahlreiche Untersuchungen an den optischen Wellenleiterstrukturen. Um die Einflüsse der Prozesskette untersuchen zu können, wurden optische Untersuchungen insbesondere an einlamierten Proben, also an Wellenleitern, die in Leiterplatten eingebettet waren, durchgeführt. Aufgrund der zur Wellenleiterherstellung eingesetzten Prägeverfahren und der gegebenen Materialeigenschaften war eine der zu beantworteten Fragen,

ob die in den Wellenleitern anzunehmende optische Streuung zu spürbaren Dämpfungen und zu einem merklichen Übersprechen zwischen benachbarten Wellenleitern führt. Ein an 6cm langen Wellenleiterproben gemessenes Dämpfungsspektrum ist in Abb. 7 dargestellt.

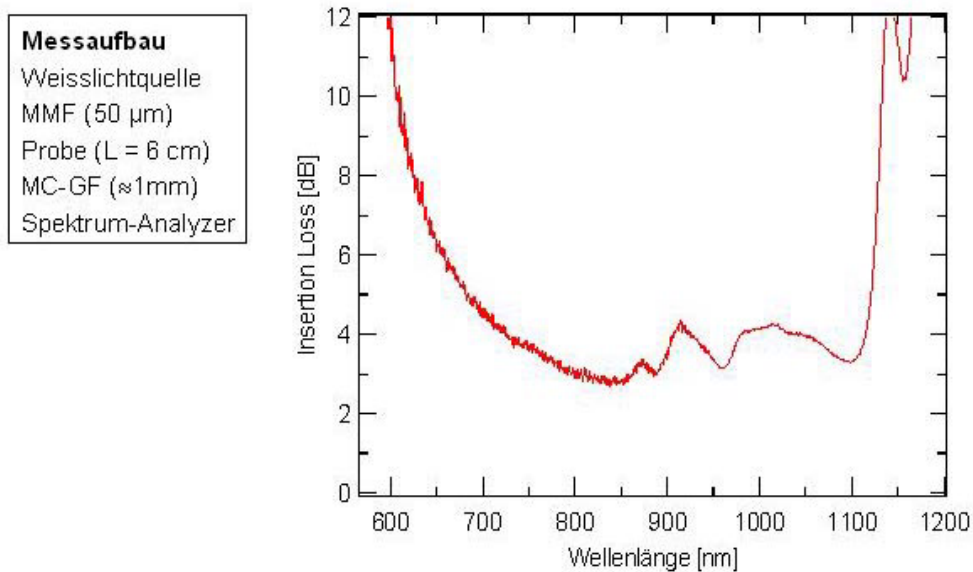


Abb. 7: Wellenlängenabhängige Dämpfung einer 6cm langen Wellenleiterprobe. Enthalten sind neben der eigentlichen Wellenleiterdämpfung auch die Koppelverluste an Eingangs- und Ausgangs-Stirnflächen.

Die charakteristische Form des Dämpfungsspektrums ist durch das verwendete Wellenleiter-Kernmaterial bestimmt und dem Absorptionsspektrum des Volumenmaterials sehr ähnlich. Die erkennbare Wellenleiterdämpfung besteht aus materialspezifischen absorptiven Anteilen und prozessbedingten Streuanteilen, die durch Streuung im Kernvolumen und an den Kernwänden verursacht werden. Zur Entscheidung, welche Anteile überwiegen, wurden Messungen des Übersprechverhaltens und rechnerische Untersuchungen mit Hilfe von Verfahren zur mathematischen Analyse optischer Streuprozesse durchgeführt. Abb. 8 zeigt das Übersprechverhalten in einem Band paralleler Multimode-Wellenleiter. Zur messtechnischen Erfassung des optischen Übersprechens wurde ein einzelner Wellenleiter aus einer Wellenleitergruppe angeregt und auf der Ausgangsseite die Leistungsverteilung im gesamten Wellenleiterband registriert. Es zeigt sich eine Übersprechdämpfung von etwa 30 dB bei direkten Wellenleiternachbarn mit deutlichem Abklingverhalten bei weiter zunehmendem lateralen Abstand (rote Kurve im Diagramm). Bei lateral dejustierter Einkopplung nimmt das registrierte Übersprechen deutlich zu, wie aus der blau eingezeichneten Kurve zu sehen ist. Hieraus kann geschlossen werden, dass ein streulichbedingtes Übersprechen nur in sehr geringem Umfang auftritt.

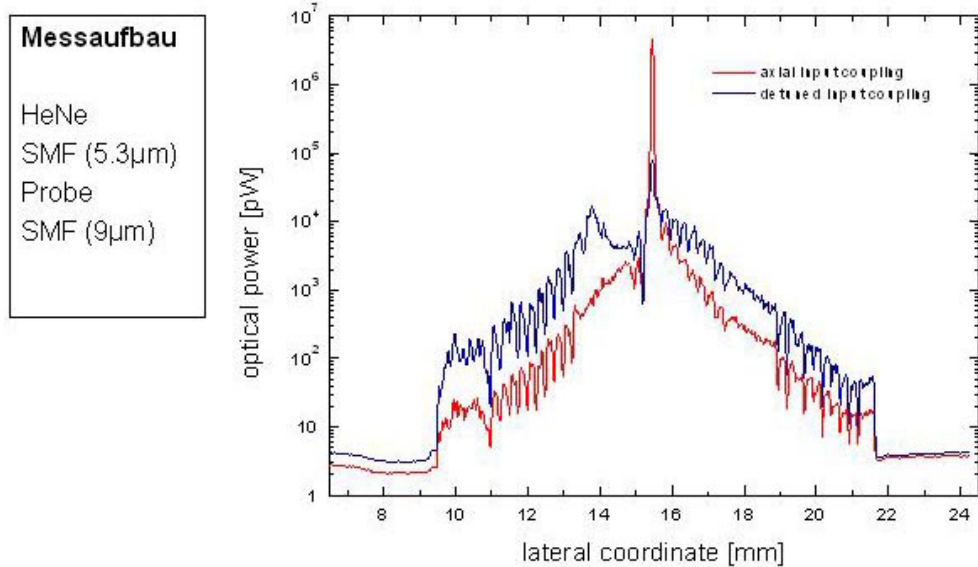


Abb. 8: Ausgangsseitige Leistungsverteilung eines parallel verlaufenden Multimode-Wellenleiterbandes bei Anregung eines einzelnen Wellenleiters.

Zur weiteren Untersuchung der durch Streulicht hervorgerufenen Verluste wurden Berechnungen mit einem Ray-Tracing-Verfahren unternommen, welches Streuprozesse, die auf Wandrauhigkeiten beruhen, modellieren kann. Zur Erläuterung der Streuprozesse und ihrer Auswirkung auf die optische Wellenleiterdämpfung dient Abb. 9.

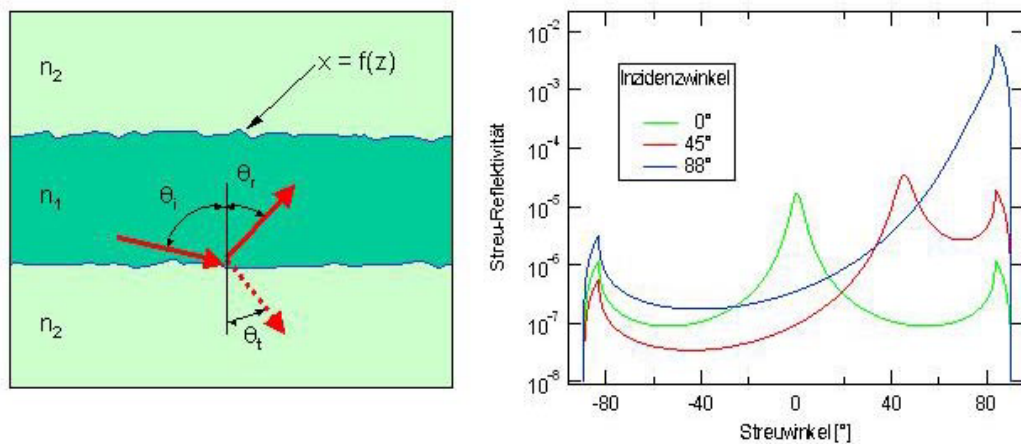


Abb. 9: Grundprozess bei der optischen Streuung an einer Wellenleiterwand (links) und winkelabhängige Intensitätsverteilung des erzeugten Streulichtes (rechts). Die drei gezeigten Kurven verdeutlichen den Einfluss des Einfallswinkels und des Streuwinkels.

Trifft ein geführter Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen Wellenleiterkern und Substrat, so wird er dort normalerweise total reflektiert und verläuft daher weiter im Kern. Sind die Wände rau, so können Abweichungen zwischen den im Idealfall gleichen Einfallswinkel- und Ausfallswinkeln auftreten. Es kommt zur Streuung und damit zur Veränderung des Ausbreitungswinkels. Verluste treten auf, wenn streubedingt die Totalreflexion verhindert wird.

Die Rauheitsstatistik, d.h. Rauhtiefe und Korrelationslänge, entscheiden über die Gestalt der in Abb. 9 rechts dargestellten Streulichtleistungsspektren. Unter Verwendung von Rauhtiefen und Korrelationslängen, die an einem Prägewerkzeug gemessen wurden, können Ab-

schätzungen für die zu erwartenden Streuverluste berechnet werden. Ein typisches Ergebnis ist in Abb. 10 dargestellt.

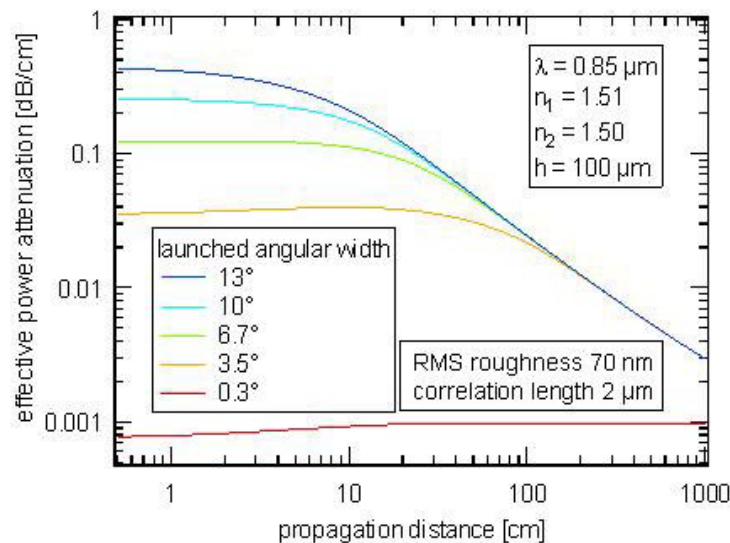


Abb. 10: Durch Wandrauhigkeiten bedingte Wellenleiterverluste als Funktion der zurückgelegten Propagationsstreckenlänge für verschiedene Winkelbreiten bei der Anregung.

Da die Streuprozesse ständig Leistung zwischen Strahlen mit verschiedenen Winkeln umverteilen und diese Strahlen unterschiedlich intensiv mit den Wänden wechselwirken, ergibt sich eine Gesamtdämpfung, die sich entlang des Wellenleiters verändert. Generell sind achsennahe (also fast achsenparallel verlaufende) Strahlen dämpfungsärmer als unter steilen Winkeln propagierende Strahlen. Bei anfangs breiter Winkelverteilung nimmt daher die Gesamtdämpfung entlang des Wellenleiters ab, da die am meisten verlustbehafteten Teilstrahlen mit steilen Strahlenwinkeln mit höherer Wahrscheinlichkeit den Wellenleiterkern verlassen. Übrig bleiben die weniger stark gedämpften flacher propagierenden Strahlen. Wird am Anfang ein sehr schmaler Winkelbereich ausgeleuchtet, so kann die Dämpfung aber auch anwachsen, wenn durch Streuvorgänge Teilstrahlen mit steileren Winkeln und daher größeren Verlusten entstehen.

An der Größenordnung der berechneten Strahlungsverluste ist zu erkennen, dass die Streuung an den Wellenleiterwänden einen merklichen Beitrag zu den Gesamtverlusten beisteuert. Als weitere Beiträge müssen Streuungen an Inhomogenitäten im Kernvolumen und intrinsische Verluste hinzugerechnet werden.

Neben der Leiterplattentechnik spielte im Projekt die optische Aufbau- und Verbindungstechnik eine wichtige Rolle, mit der optoelektronische Komponenten an integrierte Wellenleiter angekoppelt wurden. Wesentlich war der Einsatz optischer Multimode-Strukturen großer Querschnitte, um die in der Leiterplattentechnologie und der Bestückungstechnik erreichbaren Toleranzen mit den Anforderungen an die geometrische Präzision in der optischen Signalübertragungstechnik zusammenzubringen. Einen Eindruck von den einzuhaltenden geometrischen Toleranzen soll Abb. 11 geben.

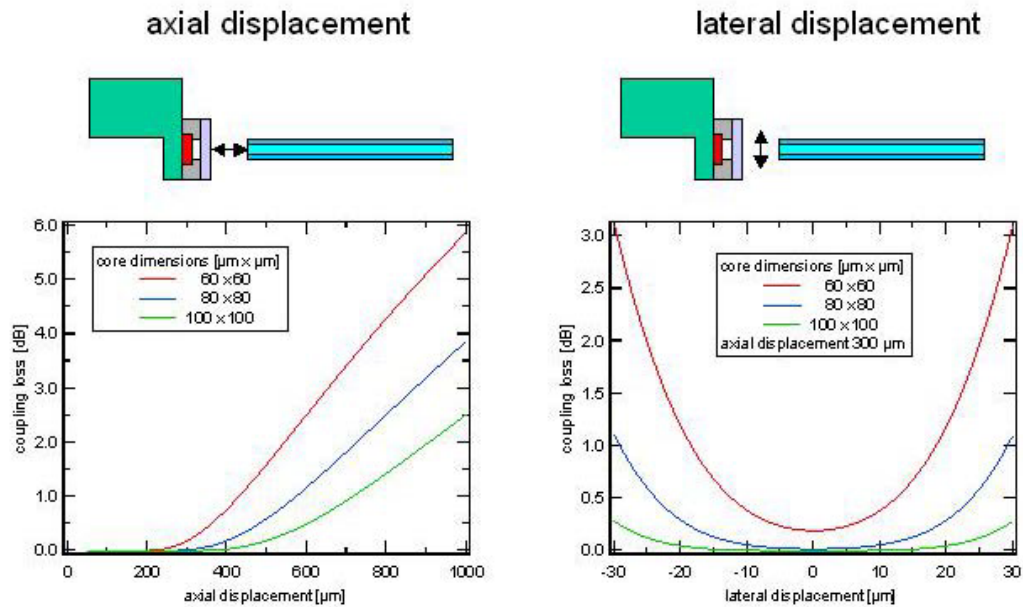


Abb. 11: Einkoppelverluste zwischen optischem Sender und Multimode-Streifenwellenleiter als Funktion des axialen (links) und des lateralen (rechts) Koppelversatzes. Die Kurven zeigen die Koppeltoleranzen für Wellenleiter mit unterschiedlichen Querschnittsabmessungen.

Wie rein geometrisch zu erwarten, zeigt sich, dass der axiale Koppelabstand so klein wie möglich gehalten werden muss, um gute Koppelwirkungsgrade und vor allem auch eine geringe Empfindlichkeit gegen zusätzliche laterale Dejustage zu bekommen. Als Koppelverfahren wurde deshalb die Direktkopplung ausgewählt, deren Prinzip in Abb. 12 dargestellt ist.

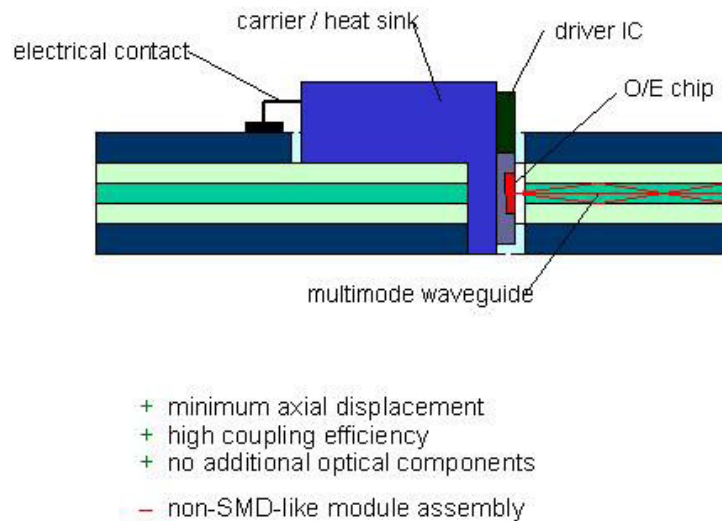


Abb. 12: Prinzip der optischen Direktkopplung, dargestellt am Beispiel der Senderankopplung. Das aktive Bauelement wird auf einem Träger vormontiert und mit geringem Koppelabstand direkt vor der Stirnfläche des anzukoppelnden Wellenleiters positioniert. Das Trägerbauteil kann gleichzeitig die Treiber elektronik aufnehmen, so daß kurze elektrische Signalverbindungen realisiert werden können.

Da optoelektronische Komponenten (Sender- und Empfängerbausteine) für die hier vorliegende besondere Koppelgeometrie noch nicht kommerziell verfügbar waren, wurden von den Projektpartnern Moduln speziell für die Montage auf hybriden elektrisch/optischen Leiterplatten und für die Ankopplung an Wellenleiter, die sich im Inneren der Leiterplatte befinden, aufgebaut. Auf dieser Basis entstanden Sender- und Empfängermoduln, mit denen neben dem

Funktionsnachweis der integrierten optischen Verbindungen auch erste Konzepte für eine angepaßte Aufbau- und Verbindungstechnik demonstriert werden konnten. Um den Integrationsvorteil zu zeigen, wurden hier jeweils Vierfach-Sender und –Empfänger verwendet.

Nachdem die ersten Demonstratoren mittels direkter Kopplung und aktiver Justage der optoelektronischen Bauteile erfolgreich aufgebaut waren, wurde ein Konzept für eine passive Justage entwickelt, das einen wesentlichen Beitrag zu einem kostengünstigen und serientauglichen Montageverfahren darstellt. Die grundlegende Idee dieses Verfahrens ist aus Abb. 13 zu erkennen.

Prinzip:

- Marken auf WL-Folie
- Bohrungen durch Markenposition
- Führungsstifte (MT) im Modul-Submount
- Tiefenanschlag

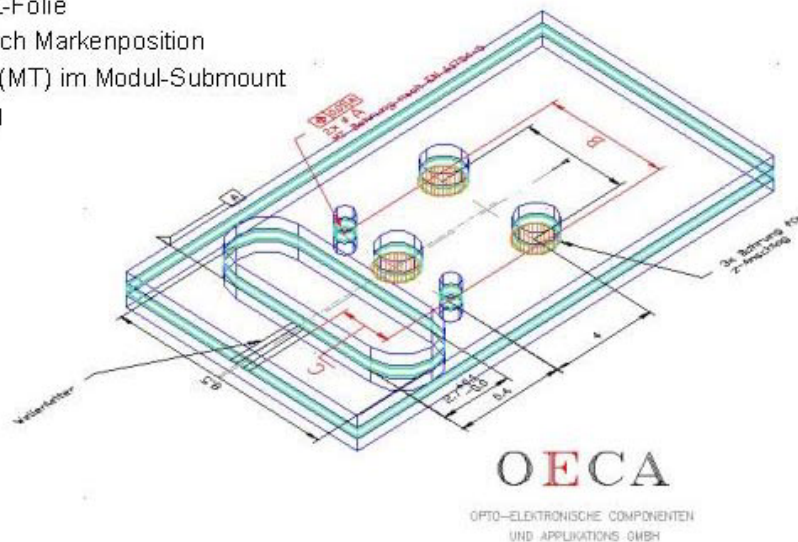


Abb. 13: Grundprinzip des im Vorhaben entwickelten passiven Justageverfahrens zwischen optoelektronischen Komponenten und in der Leiterplatte eingebetteten Multimode-Wellenleitern.

In der Abbildung ist ein Ausschnitt aus der Leiterplatte mit innenliegender Wellenleiterfolie zu erkennen. Der vorgesehene Koppelspalt ist als ovale Öffnung gezeichnet. In definierten Abständen zu den gewünschten Stirnflächenpositionen enthält die Optikfolie Präzisionsmarkierungen, deren Lage durch das Wellenleiter-Layout festgelegt ist. Mittels Freihaltungen in den äußeren Leiterplattenlagen können an den markierten Positionen Bohrungen eingebracht werden, die mit geringen Toleranzen die Stirnflächenpositionen festlegen. Daneben werden weitere Freihaltungen vorgesehen, durch die die Oberfläche der Optikfolie mechanisch zugänglich ist. Das vormontierte Optoelektronik-Modul wird nun über präzise Stifte an der Unterseite in die Führungsbohrungen eingesetzt. Das aktive Bauelement wird dabei in den Koppelspalt abgesenkt (vgl. Abb. 12) und mit kleinem Abstand vor den Wellenleiterstirnflächen positioniert. Der Tiefenanschlag geschieht über weitere Stifte, die durch die Freihaltungsöffnungen hindurch auf der Bezugsoberfläche der Optikfolie aufsetzen. Voraussetzung für das Funktionieren des Tiefenanschlages ist die Einhaltung eines präzisen und reproduzierbaren Abstandes zwischen Wellenleiterkern und Referenzfläche der Wellenleiter-Substratfolie. Ein Beispiel für die experimentelle Überprüfung dieses für das Justageverfahren kritischen Masses ist in Abb. 14 wiedergegeben.

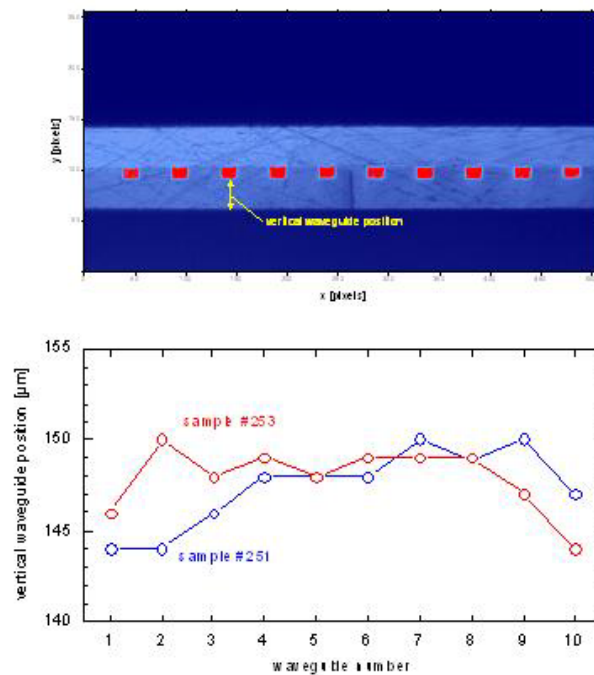


Abb. 14: Vertikale Wellenleiterposition relativ zur Folienreferenzfläche. Das untere Bild zeigt den gemessenen Abstand für eine Wellenleitergruppe bei zwei verschiedenen Proben. Das obere Bild verdeutlicht die Definition des beschriebenen Abstandes.

Die gemessenen vertikalen Wellenleiterpositionen zeigen eine gute Gleichmäßigkeit und Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Proben. Die vertikale Positionstoleranz liegt hier unterhalb $\pm 5 \mu\text{m}$. In der lateralen Dimension liegen die Abweichungen von den Sollpositionen eher noch niedriger, da praktisch nur die Schrumpfung der Wellenleiterfolie als Ungenauigkeit eingeht. Wie aus Abb. 11 abzulesen, sind damit die Voraussetzungen für eine geometrisch präzise Ausrichtung der aktiven Komponenten relativ zu den Wellenleiterstirnflächen gut erfüllt.

Die Wärmeformbeständigkeit der optischen Folien lässt Bearbeitungs-Prozesse mit Temperaturen bis etwa 170°C zu. Daher konnten Versuche zur SMD-Bestückung elektrisch-optischer Leiterplatten mit konventionellen Leitlebeprozessen durchgeführt werden. An derartigen Proben wurden wiederum die vertikalen Wellenleiterpositionen vermessen und mit Messungen an gleichartigen Proben, die jedoch keinen SMD-Prozess durchlaufen hatten, verglichen. Die gemessenen vertikalen Abstände zwischen Wellenleiterkernen und Referenzfläche bei einer SMD-bestückten Probe zeigt Abb. 15.

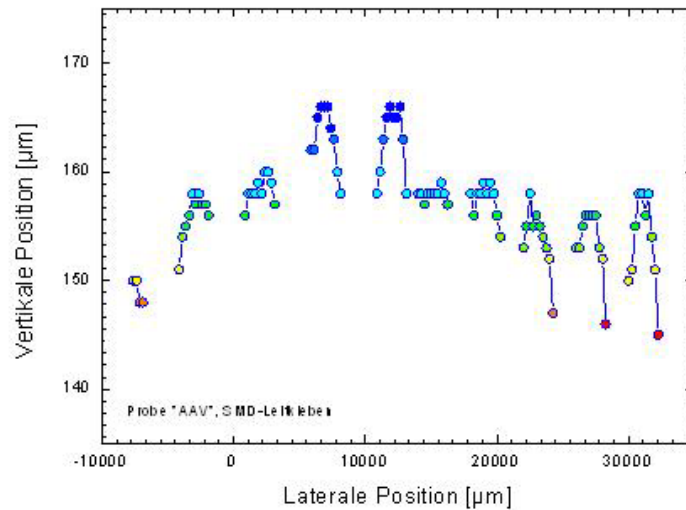


Abb. 15: Vertikale Wellenleiterposition der einlaminieren Wellenleiter einer SMD-bestückten Probe. Die Wellenleiter sind in mehreren Bändern über eine Breite von etwa 4 cm verteilt angeordnet.

Innerhalb der einzelne Wellenleiterbänder zeigen sich die bereits genannten Toleranzwerte. Über alle Bänder hinweg (mit einem lateralen Gesamtintervall von etwa 4 cm) ergibt sich naturgemäß eine größere Toleranz. Die aus Abb. 11 abzuleitenden Toleranzen werden aber immer noch klar eingehalten.

Unter Verwendung der beschriebenen Prozesse und Verfahren wurden jeweils mit Vierfach-Arraybausteinen Sender- und Empfängermoduln aufgebaut, die in den Abbildungen 16 und 17 dargestellt sind.



Abb. 16: Vierfach-Sendermodul auf EOCB-Basis. Die Lage der im Inneren der Leiterplatte liegenden Wellenleiter ist eingezeichnet. Das Modul verwendet die kommerzielle Vierfach VCSEL-Array-Komponente Mittel 4D467. Das für die Wellenleiterankopplung speziell entwickelte Modulträgerbauteil (Kühlkörper und vertikale Zusatzleiterplatte) ist deutlich zu erkennen.

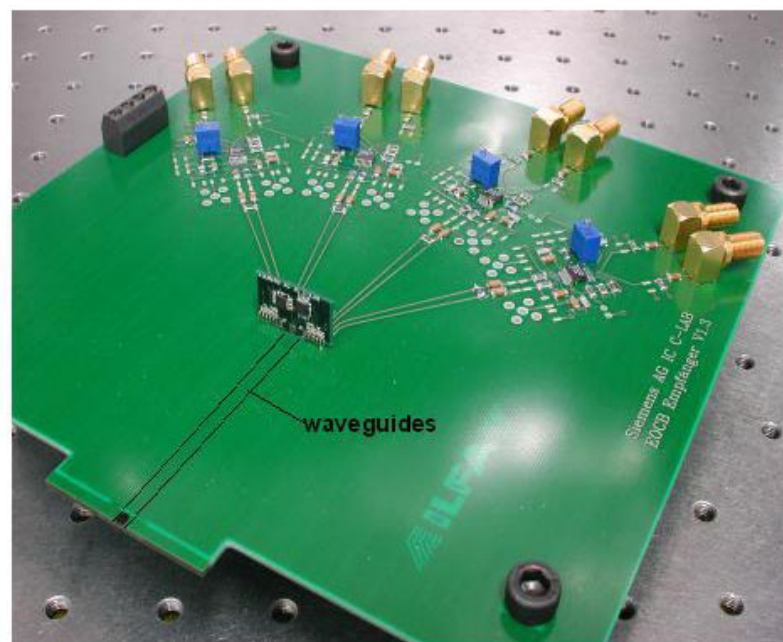


Abb. 17: Vierfach-Empfängermodul auf EOCB-Basis unter Verwendung einer kommerziellen PIN-Dioden-Array-Komponente (Mittel 4D468). Das Detektorarray ist auf der vertikal in der Koppelöffnung montierten Leiterplatte untergebracht.

4 Fazit

Im Verbundvorhaben "EOCB" wurden Multimode-Wellenleiterstrukturen durch Heißprägeverfahren hergestellt und als optische Folie in konventionelle Leiterplatten integriert. Geeignete optoelektronische Sender- und Empfängermoduln wurden auf der Basis kommerziell

verfügbarer Komponenten aufgebaut. Zur Ankopplung der optoelektronischen Komponenten wurde ein Direktkopplungsverfahren für sehr kleine axiale Koppelabstände entwickelt und eingesetzt. Mit diesem Verfahren lässt sich wegen der relativ großen geometrischen Toleranzen eine passive Justage der Komponenten relativ zu den Wellenleiterstirnflächen erreichen. Da keine weiteren optischen Bauteile benötigt werden, sind wichtige Voraussetzungen für ein in der Serienproduktion kostengünstiges Verfahren gegeben.

Noch offen ist allerdings die Frage der Standardisierung optoelektronischer Bauteile für die Ankopplung an integrierte Wellenleiterstrukturen in der Leiterplatte. Ebenso ist die Kompatibilität mit gängigen Aufbau- und Verbindungstechniken sowie mit geeigneten Bestückungsverfahren von großer Bedeutung. Hier sind künftig möglichst einheitliche Bauformen sowie Bauteil- und Leiterplattengeometrien festzulegen, die für eine Low-Cost-Fabrikation optisch-elektrischer Baugruppen benötigt werden.

Projekte zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts OptoSys

Elmar Griesse

Siemens SBS C-LAB, Fürstenallee 11, 33102 Paderborn

Elmar.Griesse@c-lab.de

Jörg-R. Kropp

Infineon Technologies AG, Wernerwerkdamm 16, 13629 Berlin

Joerg.Kropp@infineon.com

Jörg Moisel

DaimlerCrysler AG, Wilhelm-Runge-Str. 11, 89081 Ulm

Joerg.Moisel@daimlerchrysler.com

Walter Süllau

ILFA Feinsleitertechnik GmbH, Lohweg 3, 30559 Hannover

W.Suellau@ilfa.de

Zusammenfassung: *Im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts "Optische Verbindungssysteme" werden grundlegende Technologien für die Realisierung optischer Kurzstreckenverbindungen in Multimode-Technologie entwickelt. Die wesentlichen Entwicklungsschwerpunkte sind eine rein optische Backplane für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, elektrische Leiterplatten mit integrierten, massiv parallelen optischen Verbindungen für Computeranwendungen, VCSEL-basierte optische Sendemodule mit integrierten Treibern sowie Photoempfängermodule in GaAs-Technologie mit integrierten Verstärkern. Auch Konzepte zur passiv justierten Kopplung der elektrisch-optischen Wandler an planare Wellenleiter innerhalb von Leiterplatten und Backplanes sind Gegenstand der Entwicklungsarbeiten. Neben diesen technologisch orientierten Arbeiten werden auch erste Ansätze zur Erweiterung des konventionellen Entwurfsprozesses in der Mikroelektronik und zur Modellierung optischer Multimode-Wellenleiter und aktiver Komponenten entwickelt.*

1 Einleitung

Der technologisch und physikalisch bedingte Unterschied zwischen On-Chip- und Off-Chip-Datenraten vergrößert sich von Jahr zu Jahr. Ein allgemein anerkanntes Maß für die erzielbaren On-Chip-Datenraten bzw. Taktfrequenzen ist die Taktrate von Mikroprozessoren, welche derzeit bei kommerziell erhältlichen Prozessoren im Bereich von ca. 2 GHz liegt. In regelmäßig aktualisierten Trendberichten und Roadmaps werden für das Jahr 2011 sogar On-Chip-Taktfrequenzen von mehr als 10 GHz prognostiziert [8]. Neben der eingeschränkten Leistungsfähigkeit und der Störanfälligkeit gegenüber externen elektromagnetischen Feldern ist auch die erforderliche Volumenreduzierung ein wichtiger Grund, verbesserte und neue Verbindungstechniken zu entwickeln. Eine weitere Motivation ist die durch die Datenratenlimitierung begründete steigende Anzahl von Einzelverbindungen und Anschlüssen bei Komponenten und Steckern und die damit verbundene reduzierte Zuverlässigkeit der konventionellen elektrischen Verbindungstechnik.

Die OptoSys-Projektarbeiten setzen an dieser Stelle an und sollen Lösungsansätze für die oben genannten Engpässe und Probleme in der Aufbau- und Verbindungstechnik aufzeigen und erste

Prototypen bereitstellen. Die Anwendungsbereiche sind zum einen die *Luft- und Raumfahrt* und zum anderen die konventionelle *Computertechnik* bzw. der *Datakom-Bereich*.

2 OptoSys-Projekte zur optischen Aufbau- Verbindungstechnik

Im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes OptoSys wird in den nachfolgend aufgeführten einzelnen Industrieprojekten, welche intensiv miteinander kooperieren, an der Entwicklung von Technologien für die Realisierung optischer Kurzstreckenverbindungen gearbeitet. Universitäten und Forschungsinstitute sind jeweils durch Unteraufträge eingebunden und liefern die notwendigen Zuarbeiten aus dem Bereich der Grundlagenforschung und -entwicklung.

- **Optische Hochleistungsnetze für Prozessorcluster,**

DaimlerChrysler Forschungszentrum Ulm, Dr. Jörg Moisel

Unteraufträge:

- *Monolithische OEIC-Empfänger auf GaAs-Basis für optische Kurzstreckenverbindungen*, Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik, Dr. Michael Schlechtweg
- *Vertikallaserdioden (VCSELs) für optische On-Board-Verbindungen und Backplanes*, Universität Ulm, Abteilung Optoelektronik, Dr. Rainer Michalzik

- **Modulkomponenten für die optische On-Board- und Inter-Board-Übertragung,**

Infineon Technologies AG Berlin, Dr. Jörg-R. Kropp

Unteraufträge:

- *Monolithische OEIC-Empfänger auf GaAs-Basis für optische Kurzstreckenverbindungen*, Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik, Dr. Michael Schlechtweg
- *Vertikallaserdioden (VCSELs) für optische On-Board-Verbindungen und Backplanes*, Universität Ulm, Abteilung Optoelektronik, Dr. Rainer Michalzik

- **Massiv parallele optische On-Board- und Intrasystemverbindungen für Hochleistungscomputer,** Siemens SBS C-LAB Paderborn, Dr. Elmar Griese

Unteraufträge:

- *Optische Layer in Polymerwellenleitertechnik für die Integration in elektrische Leiterplatten*, Universität Dortmund, AG Mikrostrukturtechnik, Prof. Dr. Andreas Neyer
- *Modellierung von optischen On-Board-Verbindungen für Systemsimulationen*, Universität Paderborn, FG Theoretische Elektrotechnik, Prof. Dr.-Ing. Gerd Mroczynski

- **Integration massiv paralleler optischer Wellenleiter in konventionelle Multilayer-Platinen,** ILFA Feinstleitertechnik GmbH Hannover, Dipl.-Ing. Walter Süllau

3 Ziele der Projekte

Leiterplatten und Backplanes zählen derzeit und auch in der Zukunft zu den wichtigsten Komponenten mikroelektronischer Systeme. In Abhängigkeit der Systemanwendung *Luft- und Raumfahrt* sowie *Computertechnik* und daraus der resultierenden unterschiedlichen Anforderungen werden verschiedene Lösungsansätze innerhalb der Projekte verfolgt.

An die Aufbau- und Verbindungstechnik im Bereich der Luft- und Raumfahrt werden völlig andere — in der Regel wesentlich höhere — Anforderungen gestellt als im Bereich der üblichen Computertechnik. Die Zuverlässigkeit elektronischer Bordsysteme (z. B. Bordcomputer)

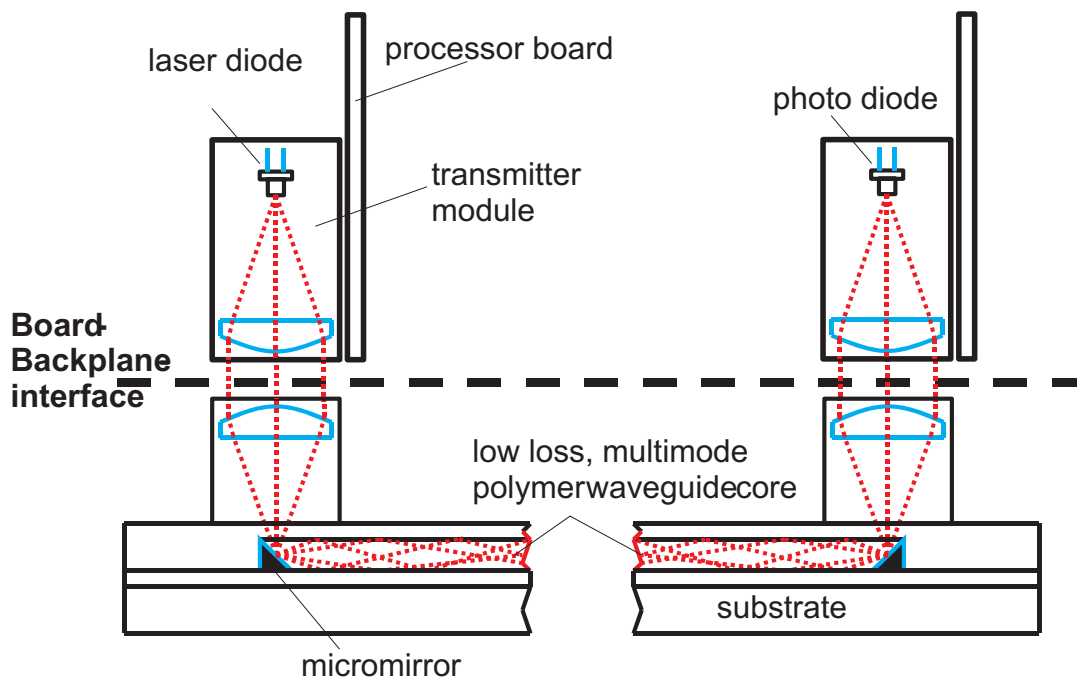


Bild 1: Prinzip der optischen Backplane für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt

hängt entscheidend von der Zuverlässigkeit der Aufbau- und Verbindungstechnik ab. Aufgrund der notwendigen Modularität der gesamten Navigations- und Steuerelektronik eines Flugzeugs sind sehr viele Steckverbindungen mit derzeit einigen 1000 einzelnen Steckkontakten erforderlich. Dabei stellt jeder Steckkontakt hinsichtlich der Zuverlässigkeit ein potentiell Risiko dar. Dieses ist durch die im Flugbetrieb unvermeidbaren, sehr hohen mechanischen Belastungen begründet.

Durch den Einsatz der optischen Datenübertragung lassen sich viele parallele elektrische Leitungen und Stecker in Bordcomputern durch wenige serielle optische Verbindungen ersetzen, wodurch die Zuverlässigkeit erhöht werden kann. Eine notwendige wesentliche Komponente ist damit eine optische Backplane (Bild 1) mit entsprechenden Erweiterungen, um Board-zu-Bord-, On-Board- und auch Rack-zu-Rack-Verbindungen realisieren zu können. Unter Zuverlässigkeits- und Kostengesichtspunkten können an dieser Stelle nur Multimode-Wellenleiter zum Einsatz kommen. Neben den Wellenleitern selbst sind auch entsprechende Koppelkonzepte erforderlich, die zum einen die erforderliche Robustheit garantieren und zum anderen auch hinsichtlich der Herstellungs- und Montagetoleranzen geeignet sind.

Die Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik im Bereich der konventionellen Mikroelektronik bzw. Computertechnik unterscheiden sich deutlich von den zuvor genannten. Ein wesentlicher Grund ist durch die deutlich entspannteren Umgebungsbedingungen gegeben. Der kontinuierliche Anstieg des Leitungsbedarfs heutiger Computersysteme bei gleichzeitig stagnierenden oder gar reduzierten Kosten verlangt aber auch hier nach neuen, leistungsfähigen und robusten Aufbau- und Verbindungstechniken, mit denen die physikalisch bedingten Engpässe der elektrischen Aufbau- und Verbindungstechnik umgangen werden können. Der Leiterplatte als wichtigstem Schaltungsträger für mikroelektronische Komponenten und Systeme kommt dabei eine ganz besondere Bedeutung zu. An Verbindungen in Computern werden nicht nur Anforderungen an die Datenraten gestellt, auch das korrekte zeitliche Verhalten der übertragenen Signale ist von großer Wichtigkeit. Dieses ist der signifikante Unterschied zu optischen Übertragungsstrecken im Bereich der Telekommunikation, die für serielle und hochbi-

4.1 Optische Backplane

Schlüsselkomponenten für eine optische Backplane sind Multimode-Wellenleiter mit hinreichend niedriger Dämpfung. Die Herstellung der Wellenleiter basiert auf einem *Direktschreibverfahren*, welches auf nahezu beliebigen Substraten (z. B. Aluminium, FR4) anwendbar ist [14, 15, 16]. Der Prozess erlaubt derzeit Querschnittsabmessungen der Wellenleiter von ca. $250 \times 200 \mu\text{m}^2$, aber auch kleinere Querschnitte sind prinzipiell realisierbar. Zur Kopplung der Wellenleiter an die aktiven Komponenten (siehe Bild 1) sind 45° -Spiegel in die Wellenleiter integriert. Die maximal strukturierbare Fläche beträgt zur Zeit ca. $1.000 \times 300 \text{ mm}^2$. Die mittlere Dämpfung, durch Cut-Back-Messungen ermittelt, beträgt 0,03 dB/cm. Neben geraden Wellenleitern sind auch Krümmungen sowie Verzweigungen und Sternkoppler realisierbar. Die in Bild 1 dargestellte Kopplung zu den Baugruppen wird über kombinierte Sende-/Empfangsmodule (Bild 3) realisiert. Durch die mittels Kugellinsen erreichte Strahlaufweitung in der Koppellebene zwischen Backplane und Baugruppe erhält man die geforderte Toleranz gegenüber Justierfehlern. Über 100 cm lange Wellenleiter konnten 2,5 GBit/s übertragen werden [11]. Weitere experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass bis zu einer Datenrate von 10 GBit/s die Modendispersion keine signifikanten Auswirkungen haben wird.

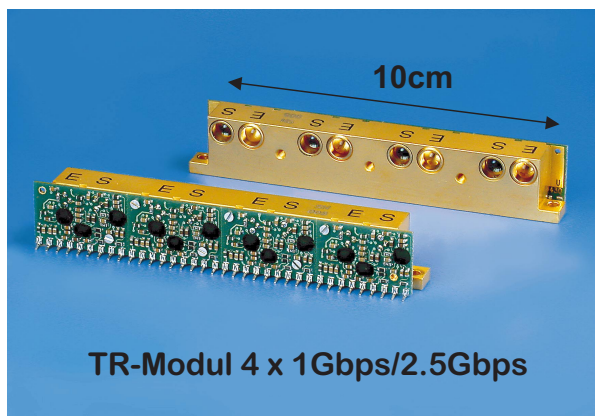


Bild 3: Optisches TR-Modul

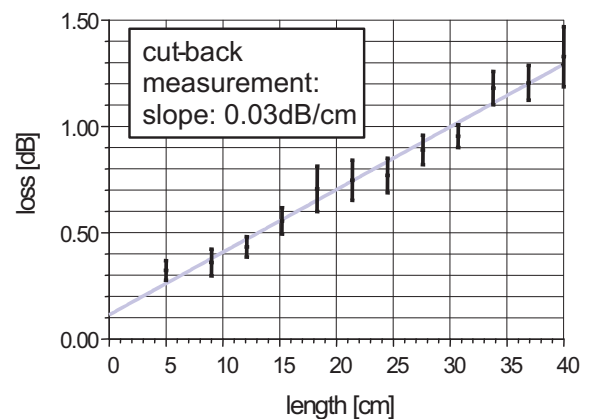


Bild 4: Dämpfung der durch *Direktschreiben* hergestellten Multimode-Wellenleiter

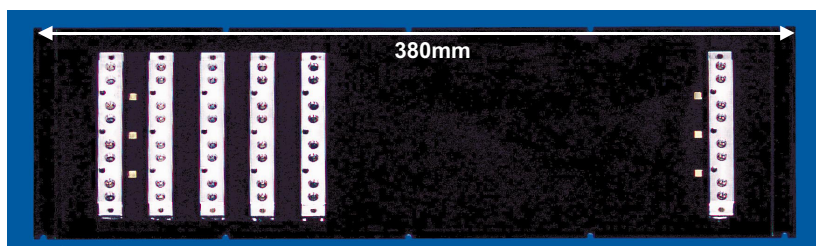


Bild 5: Optische Backplane mit Sende- und Empfangsmodulen

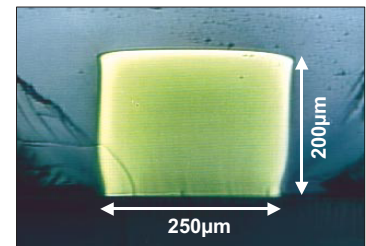


Bild 6: Querschnitt eines durch *Direktschreiben* hergestellten Multimode-Wellenleiters

4.2 Elektrische Leiterplatten mit integrierten optische Verbindungen

Um elektrisch-optische Leiterplatten in Produkten einsetzen zu können, müssen die folgenden, bereits in Bild 2 angegebenen Technologien und Komponenten verfügbar sein:

- Herstellung und Integration optischer Lagen in konventionelle Leiterplatten,

- Optische Sende- und Empfangsmodule sowie Koppelkonzepte für deren automatische Bestückung,
- Simulationsmodelle für Wellenleiter und aktive Komponenten.

Die wesentlichen Ergebnisse zu diesen Themenfeldern sind nachfolgend beschrieben.

4.2.1 Herstellung elektrisch-optischer Leiterplatten

Die Übertragungseigenschaften optischer Multimode-Wellenleiter hängt nicht nur von den optischen Eigenschaften der verwendeten Materialien ab, sondern ganz wesentlich von der Oberflächenqualität der Wellenleiter, welche von dem verwendeten Herstellungsprozess abhängig ist. Um den für Leiterplatten essentiellen Herstellungsbedingungen *niedrige Kosten* und *Temperaturfestigkeit* zu genügen, kann der in Kapitel 4.1 dargestellte Wellenleiterherstellungsprozess nicht für optische Wellenleiter verwendet werden, die in elektrische Leiterplatten integriert werden sollen.

Den genannten Randbedingungen kommt der Heißprägeprozess [3, 9, 10] sehr nahe, der für hohe Stückzahlen bei gleichzeitig hoher Genauigkeit und guter optischer Qualität der geprägten Strukturen geeignet ist. Um den hohen Temperaturanforderungen während des Leiterplattenlaminierungsprozesses zu genügen, müssen temperaturfeste Polymere (z. B. COC, Polycarbonat) verwendet werden. Die Ein- und Auskopplung an den jeweiligen Wellenleiterenden wird über Mikrospiegel erzielt, welche Teil des Wellenleiters sind (Bild 7) und im Heißprägeprozess gefertigt werden. Das Heißprägewerkzeug besitzt dazu 45°-Schrägen an den Enden des Wellenleiters. Nach dem Prägeprozess wird dann durch ein Versilbern oder Vergolden die Spiegelfläche hergestellt [6]. Die Wellenleiter besitzen einen trapezförmigen Querschnitt (Bild 9), wodurch die Entformung nach dem Prägeprozess erleichtert wird. Mit diesem Herstellungsverfahren lassen sich hinreichend geringe Dämpfungen erzielen.

Die in Bild 8 angegebenen Dämpfungswerte wurden an einer 8,7 cm langen optischen Lage gemessen, deren Wellenleiter an einer Seite mit Spiegeln versehen sind. Die eigentliche Dämpfung der Wellenleiter beträgt ca. 0,15 dB/cm und lässt sich durch eine weitere Verbesserung des Heißprägeprozesses verringern. Diese Dämpfung wird im wesentlichen durch die Rauheit der Wellenleiteroberflächen verursacht, deren mittlere Rautiefe bei 30 bis 50 nm liegt. Die Strahlumlenkung durch die integrierten Mikrospiegel führen zu einer zusätzlichen Dämpfung von ca. 1 dB.



Bild 7: Durch Heißprägen hergestellte Wellenleitergräben mit 45°-Schrägen

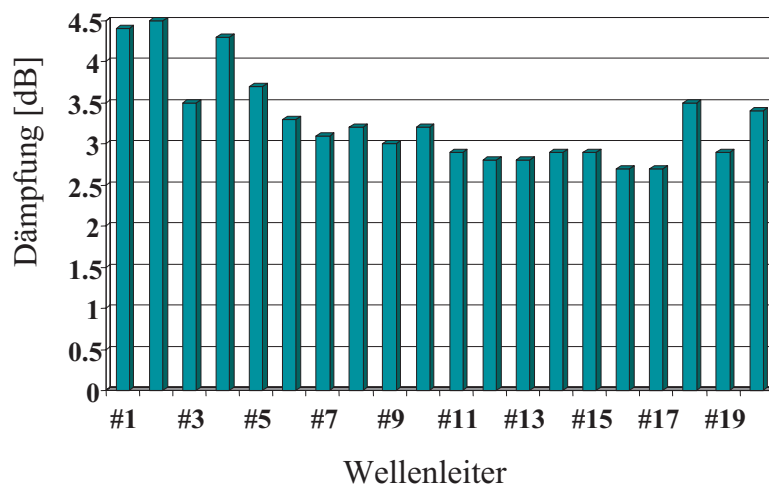


Bild 8: Dämpfung massiv paralleler optischer Multimode-Wellenleiter der Länge 8,7 cm mit integrierten Mikrospiegeln ($\lambda = 850$ nm)

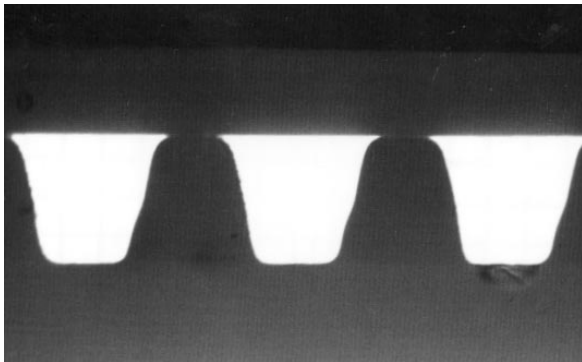


Bild 9: Querschnitt einer optischen Lage mit illuminierten Multimode-Wellenleitern

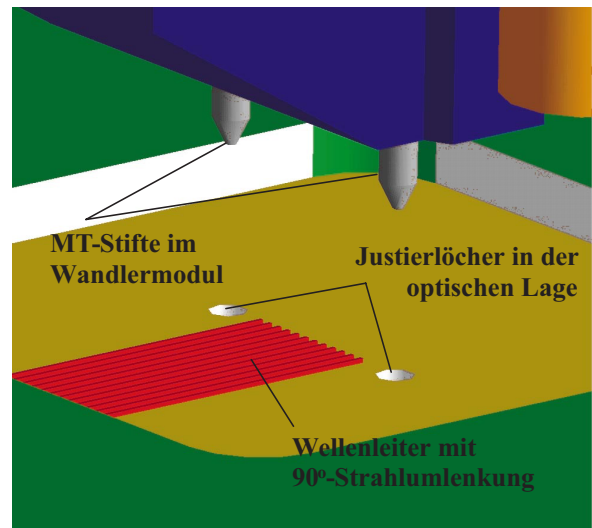


Bild 10: Selbstjustierende Kopplung der Wandlerrmodule an die integrierten optischen Wellenleiter

Die Integration der optischen Lagen in elektrische Leiterplatten kann aufgrund der Temperaturfestigkeit der Materialien ohne eine signifikante Modifikation des Standardlaminierungsprozesses erfolgen. Jedoch muss durch ein speziell dafür entwickeltes Registrierungssystem sichergestellt werden, dass die laterale Position der optischen Lage relativ zu den elektrischen Lagen den Vorgaben entsprechend genau genug ist. Durch die thermische Belastung erhöht sich zwar die Dämpfung der Wellenleiter um ca. 0,05 dB/cm, jedoch ist die gesamte Dämpfung noch ausreichend niedrig, um typische Verbindungslängen auf elektrischen Leiterplatten realisieren zu können.

Die auf der 90°-Strahlumlenkung basierende Ankopplung der optischen Sende- und Empfangs-

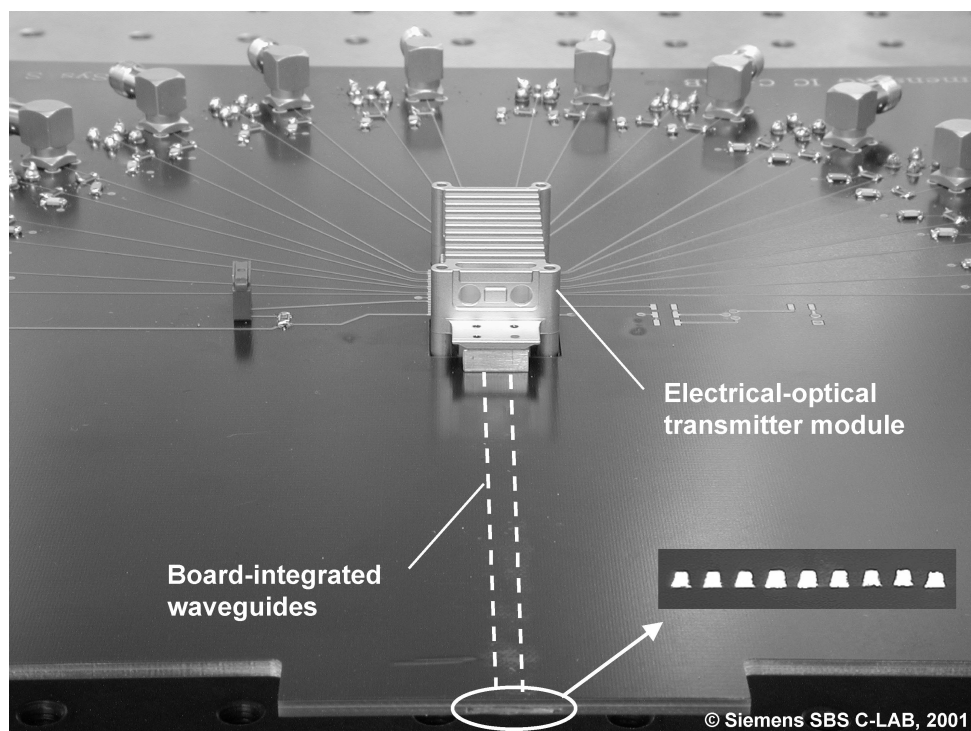


Bild 11: Elektrisch-optische Leiterplatte mit optischem Sendemodul

module benötigt eine Justiervorrichtung, welche zum einen den recht engen Toleranzgrenzen der optischen Ankopplung genügt und die zum anderen die automatische Bestückung der Sende- und Empfangsmodule gewährleistet. Gelöst wurde dieses Problem durch die Entwicklung eines selbstjustierenden Koppelmechanismus [6], welcher auf dem MT-Standard basiert (Bild 10). Die optische Lage ist mit entsprechenden Löchern versehen, in die die am Ende konisch zulaufenden Stifte des Wandlermoduls greifen. Diese Löcher können durch Präzisionsbohren gefertigt werden, wobei im Heißprägeprozess implementierte Positionsmarken zur genauen Positionierung der Löcher genutzt werden können.

4.2.2 Optische Sende- und Empfangsmodule

Die entwickelten optischen Sende- und Empfangsmodule basieren auf PAROLI-Modulen, mit denen faseroptische Links aufgebaut werden [17]. Die optische Schnittstelle wurde neu entwickelt, um eine elektrische und optische Kontaktierung bzw. Kopplung auf elektrisch-optischen Leiterplatten zu ermöglichen (Bild 12 und 13). Das Koppellement enthält Stufenindex-Fasern mit einem Kerndurchmesser von $90\text{ }\mu\text{m}$. Dieses Koppellement taucht in die Öffnung der oberhalb der optischen Lage befindlichen elektrischen Lagen ein um einen direkten Kontakt zur optischen Lage zu erhalten. Toleranzen in der Dicke der oberen elektrischen Lagen können durch die Federeigenschaften der elektrischen Kontakte und einen kalkulierten Luftspalt zwischen Koppellement und optischer Lage ausgeglichen werden, wobei der Luftspalt durch ein an den Brechungsindex der optischen Lage (Cladding) angepasste transparente Vergussmasse oder einen entsprechenden optischen Kleber aufgefüllt wird.

Die elektrisch-optische Wandlung im Sendemodul basiert auf vertikal-emittierenden Laserdioden (VCSEL), die für eine Emissionwellenlänge von 850 nm ausgelegt sind. Darüber hinaus enthalten die Module auch die entsprechenden Treiber für die Laserdioden. Jeder optische Ausgang des Sendemoduls stellt eine optische Leistung von $-3,4\text{ dBm}$ zur Verfügung, wobei die hohe Gleichförmigkeit aller Kanäle durch eine maximale Abweichung von $\pm 0,5\text{ dBm}$ dokumentiert ist.

Das Empfangsmodul enthält für die optisch-elektrische Wandlung entsprechende Photodioden mit den notwendigen Verstärkern. Sende- und Empfangsmodule stellen jeweils 12 Kanäle mit einer maximalen Datenrate von $12,5\text{ GBit/s}$ pro Kanal bereit. Die Empfindlichkeit der Empfangskomponenten beträgt $-20,4\text{ dBm}$ bei einer Bitfehlerrate (BER) von 10^{-12} . Die

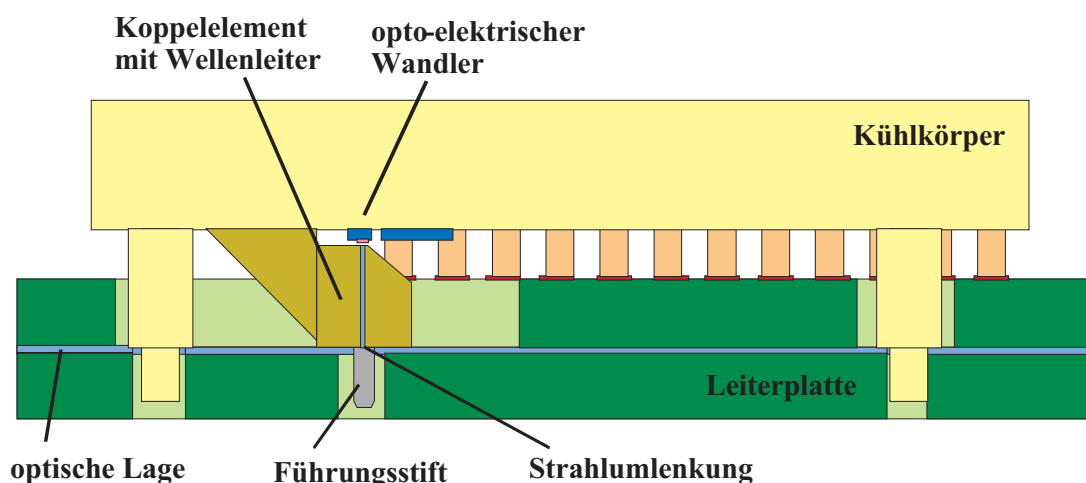


Bild 12: Konzept eines Wandlermoduls mit MT-Stiften für die selbstjustierende Positionierung auf elektrisch-optischen Leiterplatten

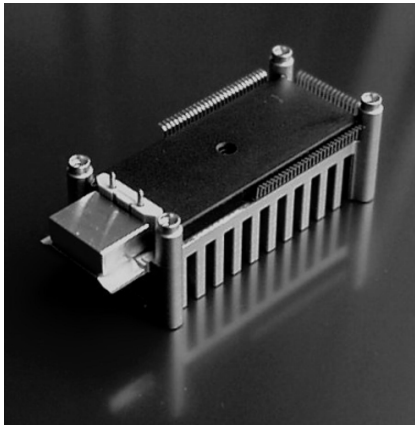


Bild 13: Optisches Sendemodul mit Koppellement und MT-Positionierstiften

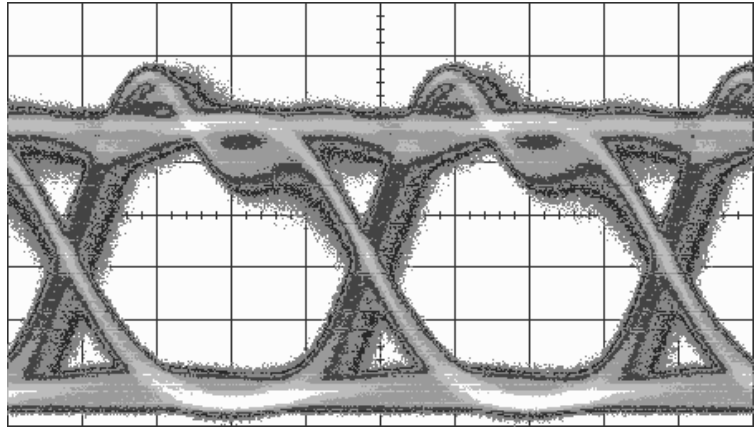


Bild 14: Augendiagramm eines Kanals des optischen Sendemoduls bei einer Datenrate von 2,5 GBit/s (PRBS $2^{31} - 1$)

Gleichförmigkeit aller Kanäle ist gut und wird ebenfalls durch eine maximale Abweichung von $\pm 0,5$ dBm beschrieben. Die guten Übertragungseigenschaften der Module werden durch das in Bild 14 angegebene Augendiagramm dokumentiert.

4.2.3 Simulation und Entwurf elektrisch-optischer Leiterplatten

Die tiefe Integration optischer Verbindungen in elektronische Systeme erfordert eine sehr genaue Vorhersage des Signalverhaltens unter zeitlichen Gesichtspunkten. Diese Eigenschaften fasst man im allgemeinen unter dem Begriff *Signalintegrität* zusammen.

Neben Simulationsmodellen für die aktiven und passiven Komponenten sind Algorithmen für die Charakterisierung von Wellenleitern und für Zeitbereichssimulationen erforderlich.

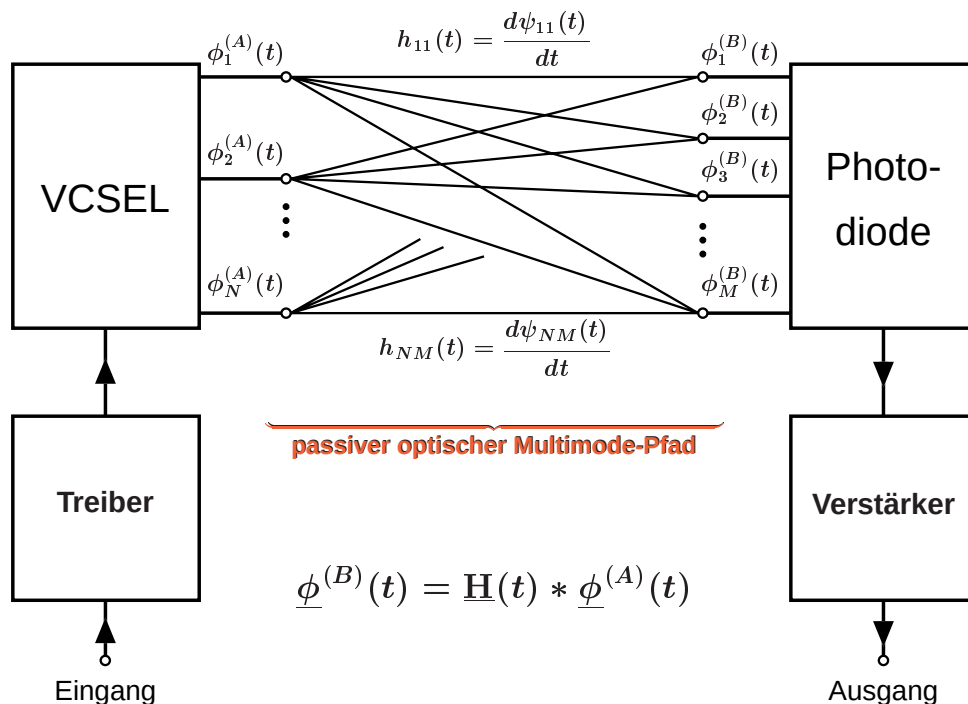


Bild 15: Simulationsmodell für Zeitbereichsanalysen einer elektrisch-optischen Übertragungsstrecke mit Mehrortdarstellung des Multimode-Wellenleiters

Aufgrund der Tatsache, dass die Wellenleiter der optischen Verbindungstechnik Multimode-Wellenleiter sind, kann die Modellierung nur auf der geometrischen Optik basieren, so dass die Lichtausbreitung durch die Verfolgung diskreter Strahlen nachgebildet werden muss. Dementsprechend müssen auch die aktiven Komponenten, die Laser- und Photodioden entsprechend modelliert werden. Mit dem in Bild 15 angegebenen Simulationsmodell für Zeitbereichsanalysen werden die aktiven Komponenten (VCSEL, Photodiode) und auch der passive optische Multimode-Pfad durch Mehrere dargestellt, wobei die Impulsantworten $h_{nm}(t)$ in ihrer Gesamtheit das Übertragungsverhalten des passiven Wellenleiters beschreiben. Die Berechnung der Funktionen $h_{nm}(t)$ ist identisch mit der bereits genannten Charakterisierung der Wellenleiter und basiert auf einem Ray-Tracing-Verfahren, welches die herstellungsbedingten Rauheiten der Wellenleiterwandungen berücksichtigt. Dabei werden nicht die Impulsantworten selbst, sondern die Sprungantworten berechnet, aus denen sich durch die zeitliche Differentiation dann die Impulsantworten ergeben [7].

Die Rauheit der Wellenleiterwände wird statistisch beschrieben und kann dann durch drei Parameter, die Korrelationslängen D_1 und D_2 in zwei orthogonalen Richtungen sowie die Varianz B der Rautiefe, charakterisiert werden [1, 3, 18]. Die Validierung des entwickelten Verfahrens wurde an einem Schichtwellenleiter durchgeführt, dessen Übertragungsverhalten mit Hilfe der *Coupled Power Theory* wellenoptisch berechnet werden kann [12].

Bei den in Bild 16 und 17 dargestellten Simulationsergebnissen handelt es sich um die normierte, gesamte optische Leistung am Ende eines 10 cm langen symmetrischen Schichtwellenleiters ($n_{\text{Kern}} = 1,51$; $n_{\text{Cladding}} = 1,5$; $d = 100 \mu\text{m}$), an dessen Anfang der TE_{20} -Mode angeregt wurde. Es ist deutlich zu sehen, dass die Rauheit eine Modenkopplung bewirkt, wodurch andere ausbreitungsfähige Moden des Wellenleiters angeregt werden. Ebenfalls bewirkt die Kopplung zu den Strahlungsmoden zusätzliche Verluste. Die Übereinstimmung der mit unterschiedlichen Verfahren berechneten Kurven ist sehr gut und dokumentiert die Richtigkeit der entwickelten Modelle und Algorithmen.

Bild 18 zeigt mit dem Ray-Tracing-Verfahren berechnete Sprungantworten. Dabei handelt es sich um die normierte optische Leistung am Ende eines 10 cm langen Schichtwellenleiters ($n_{\text{Kern}} = 1,56$, $n_{\text{Cladding}} = 1,49$, $d = 100 \mu\text{m}$), die zeitaufgelöst aufsummiert wurde. Die

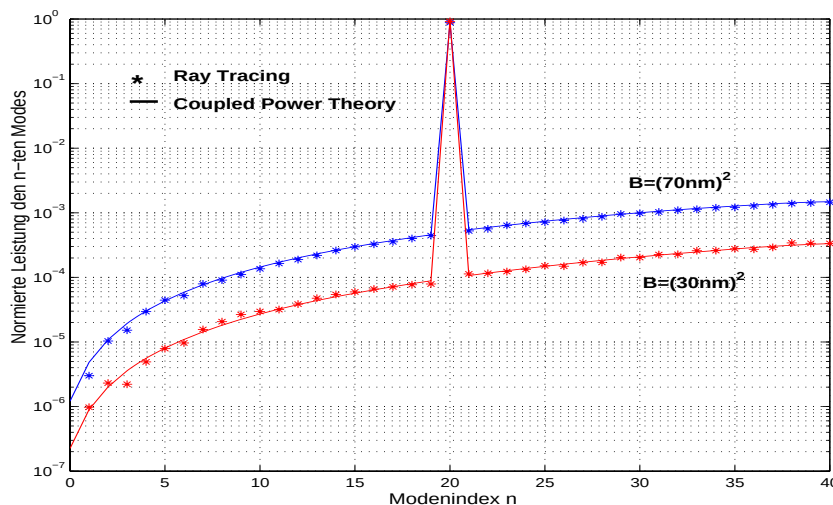


Bild 16: Normierte Leistung der geführten Moden eines symmetrischen Schichtwellenleiters mit rauen Grenzflächen mit der Varianz B als Parameter ($D = D_z = 2 \mu\text{m}$)

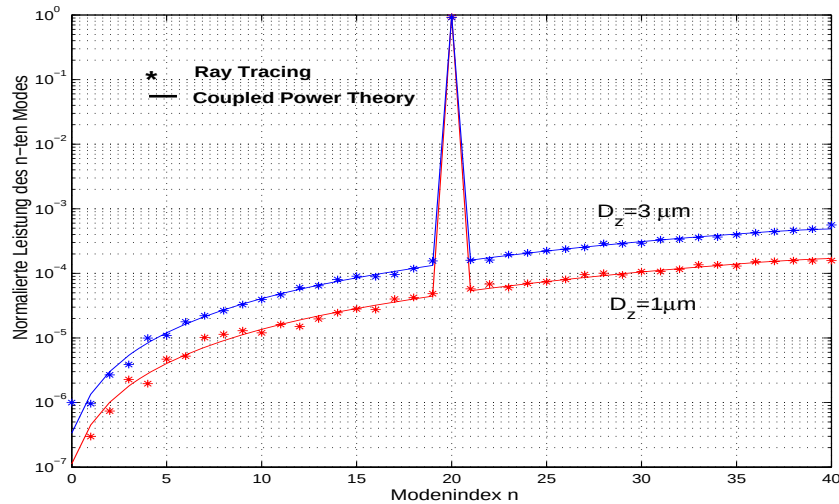


Bild 17: Normierte Leistung der geführten Moden eines symmetrischen Schichtwellenleiters mit rauen Grenzflächen mit der Korrelationslänge D als Parameter ($B = (30 \text{ nm})^2$)

Rauheit der Wellenleiterwände wird durch die Korrelationslänge $D = 1,0 \mu\text{m}$ und die Varianz $B = (30 \text{ nm})^2$ beschrieben. Zur Anregung wurde jeweils 1 Mode am Anfang des 108 Moden führenden Wellenleiters sprungförmig angeregt. Der unterschiedliche Verlauf der Kurven in Bild 18 bestätigt die Annahme, dass die durch die Rauheit hervorgerufene Dämpfung mit der Ordnung der Moden zunimmt. Der Grund für dieses grundsätzliche Verhalten liegt darin, dass die Feldstärken der Moden mit höherer Ordnung in den Randbereichen des Wellenleiters zunehmen, was zu einer entsprechenden Interaktion mit der rauen Wellenleiterwand und dadurch zu einer erhöhten Dämpfung führt. Die in allen Sprungantworten enthaltene Diskontinuität wird durch die Leistung des angeregten Moden selbst hervorgerufen und der zugehörige Zeitpunkt

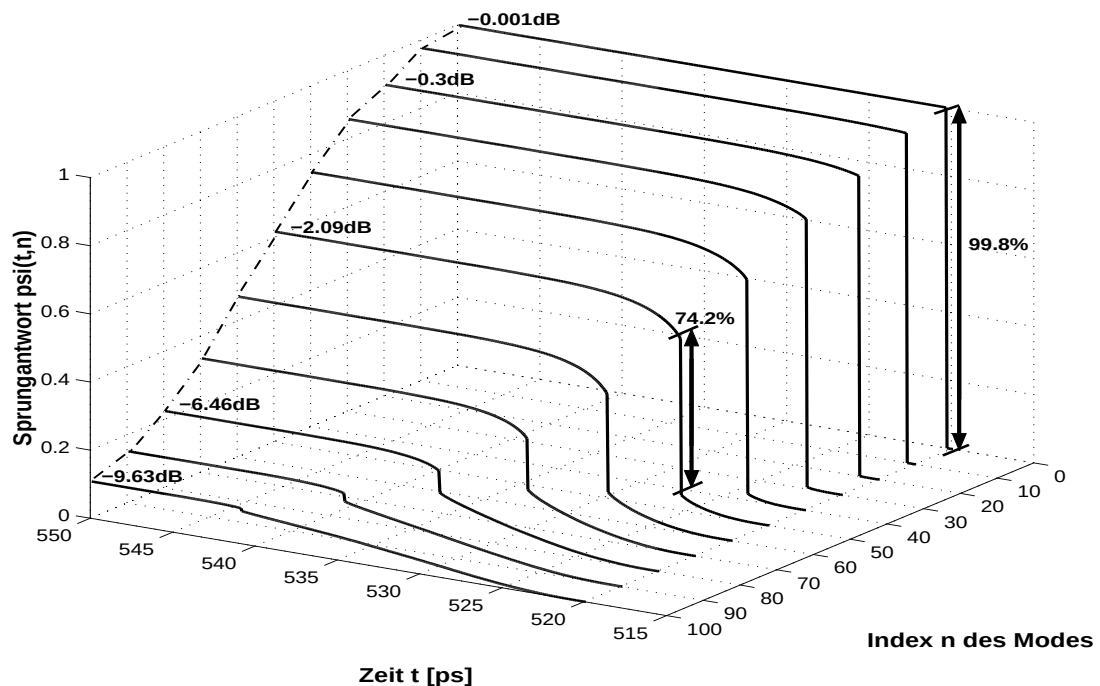


Bild 18: Sprungantworten verschiedener Moden eines dielektrischen Schichtwellenleiters mit rauen Wandungen ($n_{\text{Kern}} = 1,56$, $n_{\text{Cladding}} = 1,49$, $l = 10 \text{ cm}$, $D = 1,0 \mu\text{m}$, $B = (30 \text{ nm})^2$)

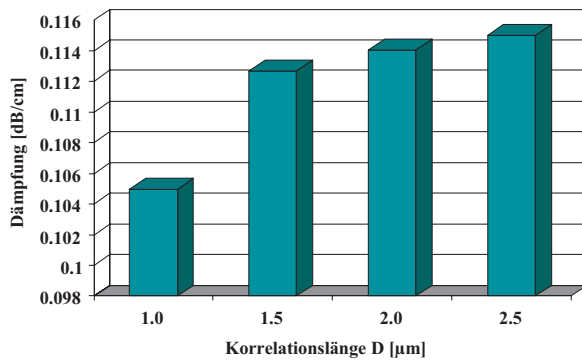


Bild 19: Dämpfung eines quadratischen Multimode-Wellenleiters mit rauen Oberflächen in Abhängigkeit der Korrelationslänge D ($B = (50 \text{ nm})^2$)

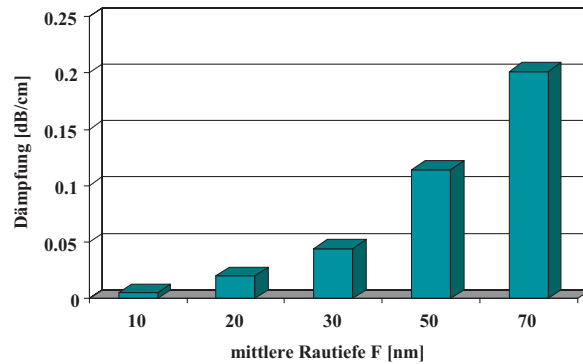


Bild 20: Dämpfung eines quadratischen Multimode-Wellenleiters mit rauen Oberflächen in Abhängigkeit der mittleren Rautiefe F ($D = 2,0 \mu\text{m}$, $B = F^2$)

entspricht exakt der Modenlaufzeit des ungestörten Wellenleiters. Der ansteigende Anteil vor der Diskontinuität wird durch die durch Modenkopplung bewirkte Anregung von Moden niedrigerer Ordnung hervorgerufen, wobei der ansteigende Anteil nach der Diskontinuität durch die Anregung von Moden höherer Ordnung bewirkt wird.

Die Diagramme in den Bildern 19 und 20 zeigen den Einfluss der die Rauheit beschreibenden Parameter D und B auf die Wellenleiterdämpfung. Es handelt sich dabei um einen Wellenleiter mit quadratischem Querschnitt der Kantenlänge $100 \mu\text{m}$. Die Brechungsindizes sind gegeben durch $n_{\text{Kern}} = 1,56$ und $n_{\text{Cladding}} = 1,49$ und entsprechen damit den Brechungsindizes der hergestellten und in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Wellenleitern. Zusätzlich zu den berechneten Dämpfungswerten ist noch die Materialdämpfung von ca. $0,06 \text{ dB/cm}$ zu berücksichtigen. Die Diagramme zeigen zwei wichtige Effekte. Zum einen nimmt der Einfluss der Korrelationslänge auf die Rauheit ab, sobald diese deutlich größer als die optische Wellenlänge ist (Bild 20). Weiterhin steigt die Dämpfung überproportional mit wachsender Rautiefe (Bild 20). Die Kenntnis dieser Abhängigkeiten ist sehr wichtig, um den Herstellungsprozess hinsichtlich der Minimierung der Dämpfung optimieren zu können.

Ein Vergleich der berechneten Werte mit gemessenen Dämpfungswerten zeigt gute Übereinstimmung. Die Rauheit der in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Wellenleiter lässt sich näherungsweise durch die Parameter $D = 2,0 \mu\text{m}$ und $B = (50 \text{ nm})^2$ beschreiben. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Materialdämpfung von $0,06 \text{ dB/cm}$ erhält man einen berechneten Wert von ca. $0,16 \text{ dB/cm}$. Der gemessene Wert lag bei $0,15 \text{ dB/cm}$.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Entwicklungsschwerpunkte der genannten OptoSys-Projekte sind zum einen eine optische Backplane sowie die elektrisch-optische Leiterplatte mit den notwendigen optischen Send- und Empfangsmodulen sowie erste Modellierungsverfahren und Simulationsalgorithmen für die Unterstützung des Entwurfs optischer Kurzstreckenverbindungen. Es konnten erste Prototypen sowohl der optischen Backplane als auch von elektrisch-optischen Leiterplatten entwickelt werden. Darüber hinaus wurde ein Koppelkonzept entwickelt, welches die hohen Genauigkeitsanforderungen der optischen Verbindungstechnik und auch die Forderung einer automatischen Bestückung der optischen Send- und Empfangsmodule erfüllen kann. Die Ergebnisse zur Modellierung und Simulation optischer Multimode-Verbindungen konnten ansatzweise validiert werden bilden eine gute Basis für weitere notwendige Arbeiten, um den Entwurfsprozess für

elektrisch-optische Leiterplatten für den industriellen Einsatz zu erweitern.

Mit den bislang erzielten Ergebnissen liegen Technologien und Prozesse vor, die die Herstellung von Prototypen ermöglichen. Ein industrieller Einsatz der Technologie, der eine entsprechende Produktionstechnik für die Serienfertigung erfordert, ist mit den Ergebnissen noch nicht verfügbar. Dieses gilt sowohl für die Herstellungsprozesse als auch für die entwurfsunterstützenden Modellierungsverfahren und Simulationsalgorithmen.

Es existieren aber noch weitere Probleme bzw. noch nicht gelöste Aufgaben im Bereich der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik. Eine offene Fragestellung ist die echte Mehrlagigkeit optischer Backplanes und optischer Lagen in elektrisch-optischen Leiterplatten, welche eine Lösung für den *optischen Durchsteiger* erfordert. Aufgrund der hohen thermischen Belastung der optischen Lagen in elektrisch-optischen Leiterplatten muss auch an der Weiter- oder Neuentwicklung von temperaturfesten Materialien mit hinreichend guten optischen Eigenschaften gearbeitet werden. Weiterhin müssen Lösungen erarbeitet werden, um optischen Wellenleiterschaltungen in Backplanes und Leiterplatten mit der notwendigen Größe herstellen zu können. Auch im Bereich der optischen Sende- und Empfangsmodule sind weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich, um den steigenden Bedarf an Bandbreite (10 GBit/s) zu decken. Auch kann man sich Sende- und Empfangsmodule für den Einsatz von CWDM-Verfahren vorstellen. Ein technologische Herausforderung ist schließlich die Entwicklung einer optischen Schnittstelle, die die Herstellung mikroelektronischer Komponenten mit elektrischen und optischen Ein- und Ausgängen ermöglicht.

Literatur

- [1] Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, E. Griesse, G. Mrozynski: Ray Tracing Technique and its Verification for the Analysis of Highly Multimode Optical Waveguides with Rough Surfaces. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 5, Part 1, S. 3307–3310, September 2001.
- [2] E. Griesse: Reducing EMC Problems through an Electrical/Optical Interconnection Technology. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 41, No. 4, Part 2, S. 502–509, November 1999.
- [3] E. Griesse, D. Krabe, E. Strake: Electrical-Optical Printed Circuit Boards: Technology – Design – Modeling. H. Grabinski (Ed.): *Interconnects in VLSI Design*, S. 221–236. Kluwer Publisher, Boston (USA), 2000.
- [4] E. Griesse: An Optical Interconnection Technology for Multilayer Printed Circuit Boards. *Proceedings of the 13th IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2000)*, S. 230–231. Rio Grande/Puerto Rico (USA), November 2000, (Invited).
- [5] E. Griesse: A High-Performance Hybrid Electrical-Optical Interconnection Technology for High-Speed Electronic Systems. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B: Advanced Packaging*, Vol. 24, No. 3, S. 375–383, August 2001.
- [6] E. Griesse, J. Schrage, J. Gerling, G. Mrozynski: Time Domain Simulation of Optical Multimode Chip-to-Chip Interconnects. *Proceedings of SPIE Vol. 4455*, 2001.
- [7] E. Griesse, A. Himmler, K. Klimke, A. Koske, J.R. Kropp, S. Lehmacher, A. Neyer, W. Süllau: Self-Aligned Coupling of Optical Transmitter and Receiver Modules to Board-Integrated Optical Multimode Waveguides. *Proceedings of SPIE Vol. 4455*, 2001.
- [8] Semiconductor Industry Association: *International Technology Roadmap for Semiconductors, 1999 Edition and 2000 Update*, San Jose/CA (USA), 2000.

- [9] D. Krabe, W. Scheel: Optical Interconnects by Hot Embossing for Module and PCB Technology — The EOCB Approach —. *Proc. 49th Electronics Components & Technology Conf.*, pp. 1164–1166, San Diego/California, (USA), June 1999.
- [10] S. Lehmacher, A. Neyer: Integration of Polymer Optical Waveguides Into Printed Circuit Boards. *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 12, S. 1052–1053, June 2000.
- [11] B. Lunitz, J. Guttman, H.-P. Huber, J. Moisel, M. Rode: Experimental Demonstration of 2.5Gbps Transmission with 1m Polymer Optical Backplane. *Electronics Letters*, Vol. 37, Nr. 17, S. 1079, September 2001.
- [12] D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, Academic Press, San Diego/CA (USA), 1991.
- [13] F. Mederer, R. Jäger, H. J. Unold, R. Michalzik, K. J. Ebeling, S. Lehmacher, A. Neyer, E. Griese: 3-Gb/s Data Transmission With GaAs VCSELs Over PCB Integrated Polymer Waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, No. 9, S. 1032–1034, September 2001.
- [14] J. Moisel, R. Bogenberger, J. Guttman, H.-P. Huber, O. Krumpholz, K.-P. Kuhn, M. Rode: Optical Backplanes with Integrated Polymer Waveguides. *Optical Engineering*, Vol. 39, No. 3, S. 673–679, March 2000.
- [15] J. Moisel, J. Guttman, H.-P. Huber, O. Krumpholz, M. Rode: Optical Backplanes utilizing Multimode Polymer Waveguides. *Optics in Computing 2000, SPIE Vol. 4089*, S. 72–79. Bellington/Washington (USA), 2000.
- [16] J. Moisel: An Optical Backplane for Avionic Applications using Polymer Multimode Waveguides. *Proceedings of the 13th IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2000)*, S. 567–568. Rio Grande/Puerto Rico (USA), November 2000, (Invited).
- [17] I. Schmale, M. Heinemann, K. Drögemüller, D. Kuhl, J. Blank, M. Ehlert, T. Kraeker, J. Höhn, D. Klix, V. Plickert, L. Melchior, P. Hildebrandt, L. Leininger, E. Dröge, J.-R. Kropp, H.-D. Wolf, T. Wipiejewski, R. Johnson: High-Speed 12×2.5 Gbit/s Parallel Optical Links (PAROLI) for Increased Transmission Lengths. *Proceedings 26th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Vol. 3, pp. 231–232, Munich (Germany), September 2000.
- [18] A. Wallrabenstein, Th. Bierhoff, A. Himmler, E. Griese, G. Mrozynski: Modeling of Optical Interconnections for Data Transmission within High-Speed Electronic Systems. *H. Grabinski (Ed.): Interconnects in VLSI Design*, S. 181 – 194. Kluwer Publisher, Boston (USA), 2000.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten werden im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts „OptoSys“ durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 01 BP 801/01, 01 BP 802/02, 01 BP 803/03 und 01 BP 804/04 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Modularer Optisch-Elektrischer Schaltungsträger (MOES)

M. Kowatsch¹⁾, R. Schulz²⁾, E. Klusmann²⁾, W. Scheel³⁾, H. Schröder³⁾, J. Bauer³⁾,
K. Gerdorf⁴⁾, G. Röhrs⁵⁾, H. Kühn⁵⁾, K. Pfeiffer⁶⁾, C. Modes⁷⁾, H. Park⁸⁾, J. Kostelnik⁸⁾

¹⁾Alcatel SEL AG, Stuttgart; ²⁾Atotech Deutschland GmbH, Berlin; ³⁾FhG IZM, Berlin;
⁴⁾Harting KGaA, Espelkamp; ⁵⁾TU Dresden, Institut für Feinwerktechnik;
⁶⁾mrt GmbH, Berlin; ⁷⁾W.C. Heraeus GmbH & Co. KG, Hanau;
⁸⁾Würth Elektronik GmbH & Co. KG, Rot am See

Zusammenfassung: Als Herstellverfahren für planare optische Polymer-Wellenleiter im BMBF-Projekt MOES dient die Strukturierung durch die Fotolithographie. Dies ist die Standardtechnologie in der Leiterplattenherstellung und hat den Vorteil, dass die vorhandene Anlagentechnik auch zur Herstellung der optischen Lagen verwendet werden kann. Die mit dieser Technik realisierten Wellenleiter weisen einen Dämpfungswert von 0,35 dB/cm auf. Dies entspricht in etwa den Werten, die mit anderen Strukturierungserfahren wie z.B. Heißprägen erreicht wurden, das jedoch in der Größe auf kleinere Formate begrenzt ist.

1 Einleitung

Ausgehend von den steigenden Anforderungen an Übertragungsraten in der Informationstechnik und dem damit verbundenen zunehmenden Einsatz optischer Kommunikationstechniken stellt sich zukünftig die Aufgabe, optische Strukturen auch auf Leiterplattebene zu realisieren. Das BMBF-Projekt MOES hat es sich zur Aufgabe gemacht, Materialien und Prozesse für einen kombiniert optisch-elektrischen Schaltungsträger zu entwickeln. Ausgehend von der Verbesserung der HF-Eigenschaften durch Einsatz von Leiterplattenmaterialien wie Gigaver [1] sowie der Flexibilisierung durch Folienmaterialien, über die Entwicklung von leicht strukturierbaren optisch leitfähigen Polymeren, soll am Ende des Projekts ein kombinierter Schaltungsträger entstehen, der sowohl elektrische als auch optische Verbindungstechnik auf ein und demselben Schaltungsträger realisiert. Der Schwerpunkt im Projekt MOES liegt dabei auf der Materialseite.

Die folgenden Ausführungen befassen sich mit einem Teilprojekt aus MOES, nämlich der Herstellung einer optischen Verbindungslage für den Einsatz in einer Multilayer-Leiterplatte.

2 Optische Verbindungstechnik

Der im Projekt MOES verfolgte Ansatz zur Herstellung von optischen Verbindungen auf der Leiterplatte basiert auf der fotolithographischen Strukturierung von optisch-transparenten Polymeren. Die Fotolithographie wurde gewählt, weil sie das Standardverfahren für die Strukturerzeugung in der Leiterplattenindustrie darstellt. Dadurch ist die Herstellung von

optischen Strukturen mit den bereits vorhandenen Anlagen des Leiterplattenherstellers möglich, es müssen keine zusätzlichen Fertigungsinseln aufgebaut werden.

Die kommerziell zur Verfügung stehenden Resistmaterialien, die für die Strukturübertragung in der Leiterplatten- und Halbleiterindustrie eingesetzt werden, erfüllen jedoch nicht die gestellten Anforderungen, die an optische Strukturen gestellt werden. Für die optische Wellenleitung wird ein Material benötigt, das im geforderten Wellenlängenbereich hochtransparent ist, und bei dem der Brechungsindex in gewissen Grenzen modifiziert werden kann. Während bei den üblichen Resistmaterialien nach erfolgter Strukturübertragung in das Substrat die Aufgabenstellung des Resist erfüllt ist und das Polymer entfernt wird, verbleibt das Polymersystem für den optischen Wellenleiter auf dem Substrat und muss daher eine ausgezeichnete Langzeitstabilität unter veränderten thermischen, chemischen und mechanischen Einflussfaktoren besitzen.

Es wurden verschiedene Materialkombinationen auf der Basis multifunktionaler Epoxydverbindungen entwickelt, die sich nach üblichen lithographischen Verfahren verarbeiten lassen.

Das prinzipielle Verfahren zur Herstellung von planaren optischen Wellenleiterstrukturen ist in Bild 1 dargestellt.

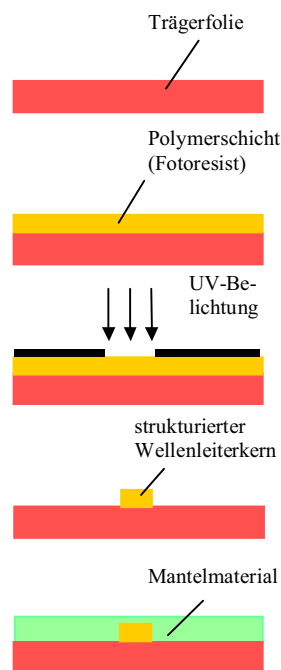


Bild 1: Herstellung von optischen Wellenleitern mittels Fotolithographie.

Auf einer optisch transparenten Trägerfolie wird durch Spincoating oder durch Rakeln ein fotoreaktives, vernetzbares Polymermaterial mit einer Dicke von ca. 60 µm aufgebracht. Anschließend wird der Wellenleiterkern durch UV-Belichtung über eine Maske hergestellt. Die UV-Belichtung führt nach einer thermischen Behandlung zu einer Vernetzung des Schichtmaterials, wodurch bei einem nachfolgendem Entwicklungsschritt nur die unbelichteten Schichtbereiche entfernt werden. Als Mantel für den optischen Wellenleiter dient ein weiteres, ebenfalls fotoreaktives, vernetzbares Material, das einen niedrigeren Brechungsindex als der Wellenleiterkern besitzen muss (Bedingung für die geführte Wellenausbreitung).

Im Prinzip können auch andere, nichtoptische Trägermaterialien verwendet werden, jedoch muss hierbei zwischen Träger und Wellenleiterkern eine Buffer-Schicht (Undercladding) aus dem Mantelmaterial vorher aufgebracht werden.

Bild 2 zeigt eine Modifizierungsvariante, mit der der Brechungsindex des Polymers im Bereich 1,583...1,593 (bei $\lambda = 632\text{ nm}$) eingestellt werden kann. Dadurch sind numerische Aperturen von bis zu 0,20 möglich.

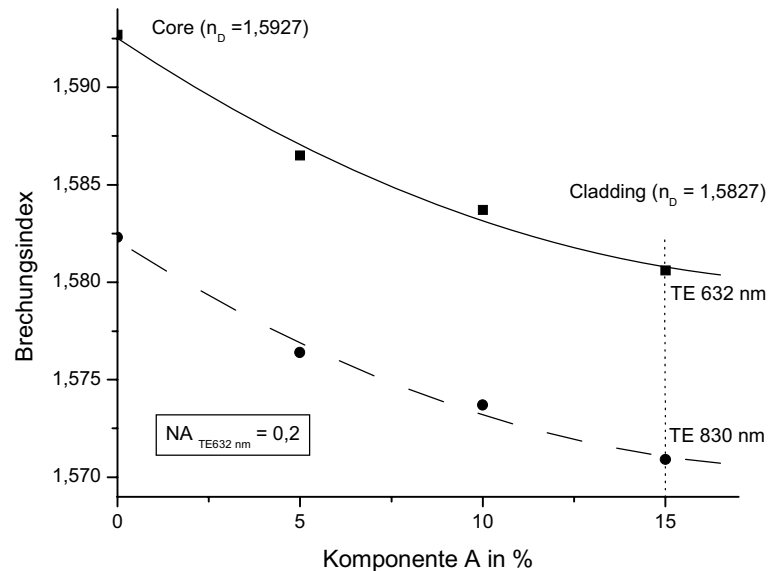


Bild 2: Abhängigkeit der Brechzahl von der gewählten Materialzusammensetzung

Die Schichtdicke des Kernmaterials liegt bei $60\text{ }\mu\text{m}$, die des Mantels bei ca. $120\text{ }\mu\text{m}$. Erste Strukturierungsversuche für den Wellenleiterkern erfolgten mit einer Testmaske durch UV-Kontaktbelichtung. Auf der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (siehe Bild 3) sieht man sehr gut die hohe Kantensteilheit mit der sich diese Wellenleiterkerne herstellen lassen.

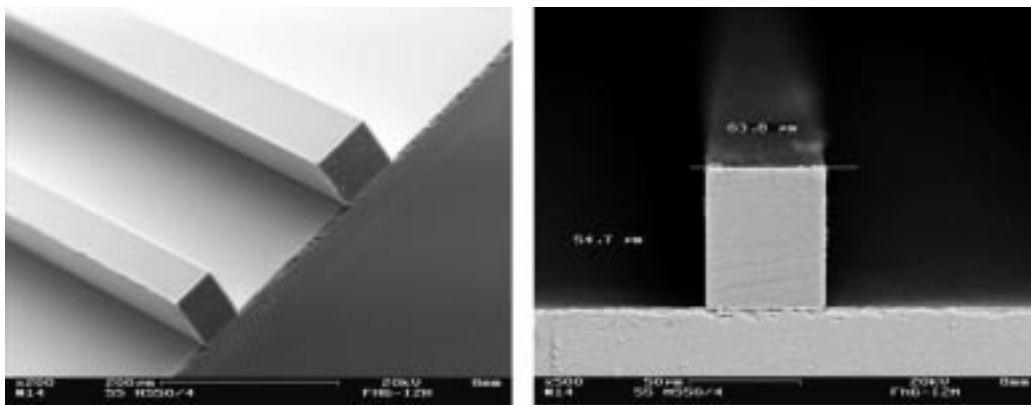


Bild 3: REM-Aufnahmen der fotolithographisch strukturierten Wellenleiterkerne

Untersucht wurde im Rahmen von MOES der Wellenlängenbereich 632 nm und 850 nm . Im Allgemeinen haben Polymere bei diesen Wellenlängen geringere Dämpfungswerte als bei den in der optischen Telekommunikation üblichen Wellenlängen 1300 nm und 1550 nm . Jedoch sind die Absolutwerte im Vergleich zu Glasfasern enorm hoch.

Erste Messungen an den polymeren optischen Wellenleiter-Teststrukturen ergaben einen Dämpfungswert von $0,35\text{ dB/cm}$ bei einer Wellenlänge von 850 nm . Der Dämpfungswert einer Glasfaser hingegen beträgt bei dieser Wellenlänge $0,00003\text{ dB/cm}$! Die an den

Polymerwellenleitern gemessenen Dämpfungswerte entsprechen in etwa den Werten, die auch an auf andere Weise (z.B. Heißprägen [4]) hergestellten Polymerwellenleitern bestimmt wurden.

Nach Herstellung der Wellenleiterkerne (Bild 3) wird das Mantelmaterial mit Hilfe einer Rakel über dieselben verteilt. Jetzt erst ist der optische Wellenleiterlage funktionsfähig. Bild 4 zeigt die Stirnfläche der fertigen Teststruktur.

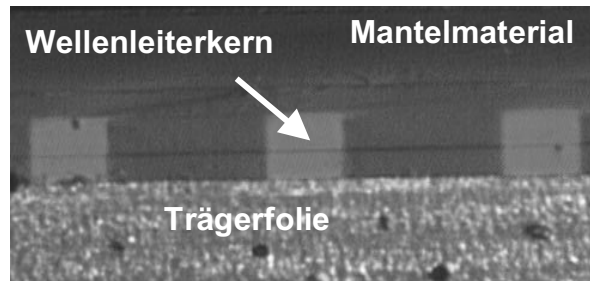


Bild 4: Stirnfläche der mit Fotolithographie hergestellten optischen Wellenleiter

Wird vor dem eigentlichen Kernmaterial eine Undercladding-Schicht aufgebracht, so können auch auf Standardleiterplattenmaterial Lichtwellenleiterstrukturen hergestellt werden. Bild 5 zeigt die Stirnfläche einer solchen Struktur, Bild 5a ohne Licht, Bild 5b mit eingekoppeltem Licht.

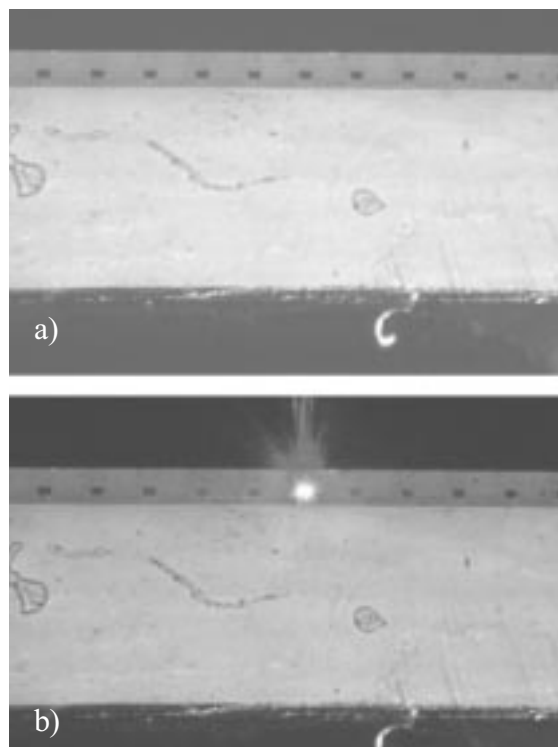


Bild 5: Lichtwellenleiter mit Undercladding auf Leiterplattenmaterial

Das Brechungsindexprofil der prozessierten Wellenleiter hängt jedoch nicht nur von den Materialeigenschaften ab, sondern wird auch von den Prozessparametern bestimmt. Um optimale Wellenleitung zu erreichen werden im Projekt MOES die technologischen Parameter untersucht und die entsprechenden Brechzahlprofile bestimmt.

In Bild 6 sind zwei Brechzahlprofile zu sehen, die mit der RNF-Methode (Refractive Near Field) aufgenommen wurden. Bild 6a zeigt eine relativ große Übergangszone des

Brechungsindex zwischen Kern- und Mantelmaterial. Diese ist in Bild 6b geringer, dafür zeigt sich ein erhöhter Brechungsindex auf der Oberseite des Kerns.

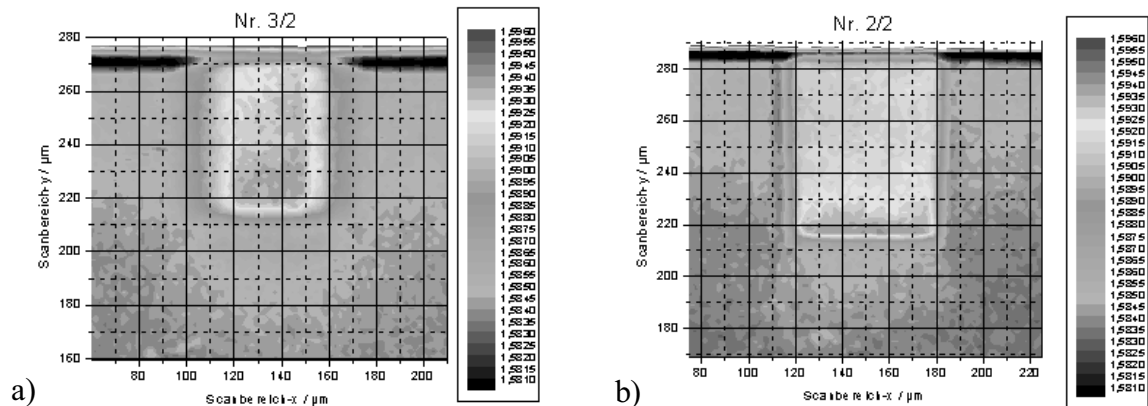


Bild 6: RNF-Profil über das Kern- und Mantelpolymer nach der Prozessierung mit verschiedenen Parametern.

Ziel von weiteren Untersuchungen ist es, einen möglichst scharfen Brechzahlübergang zwischen Wellenleiterkern und –mantel zu erreichen.

3 Inlay Technologie

Im Projekt MOES wird der Ansatz einer ‘Inlay-Technologie’ [2,3] verfolgt (siehe Bild 7). Das bedeutet, dass der optische Layer sich in der Mitte einer Multilayerleiterplatte befindet. Hieraus ergeben sich folgende weitere Anforderungen an das optische Polymermaterial:

- hohe Temperaturbeständigkeit, um der Temperaturbelastungen während des Standardlaminierprozesses bzw. nach der Bestückung der Leiterplatte dem Reflow-Lötprozess zu widerstehen
- hoher Dauertemperaturbereich bis 85 °C
- unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen wie Feuchte, Schadgase, Temperaturschwankungen, mechanischen Belastungen
- Integrierbarkeit in Starr- und Flexleiterplatten

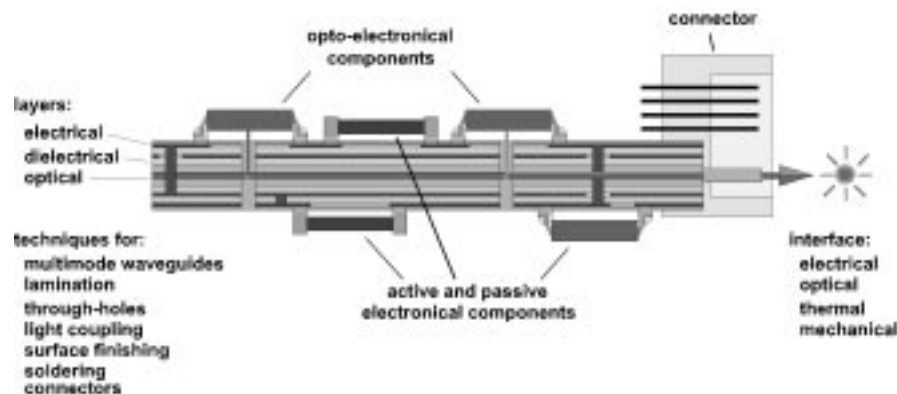


Bild 7: Beispiel für eine optisch-elektrische Leiterplatte mit innenliegendem optischen Layer (Inlay-Technologie), Quelle FhG IZM, Berlin

Für die Herstellung von „Inlay-Wellenleitern“ sind vor allem Druck und Temperatur bei der Verpressung zu berücksichtigen. Bei einer Standard-Verpressung eines Multilayers treten Temperaturen von über 160 °C und Drücke von mehr als 14 bar auf. Für das ausgewählte optische Polymer würde dies jedoch erhebliche Belastungen darstellen, die sogar zur Änderung der optischen Eigenschaften führen können. Aus diesem Grunde wird die Lamination mit Unterstützung von speziellen Klebern in einem Niedrigtemperaturprozess sowie erheblich niedrigerem Druck durchgeführt (Bild 8). Einem Reflowlötprozess sollte das Material jedoch standhalten, da es sich in der Mitte der Leiterplatte befindet und somit von der Leiterplatte selbst geschützt wird. Das optische Polymer ist bis zu einer Temperatur von 100°C dauertemperaturbeständig.

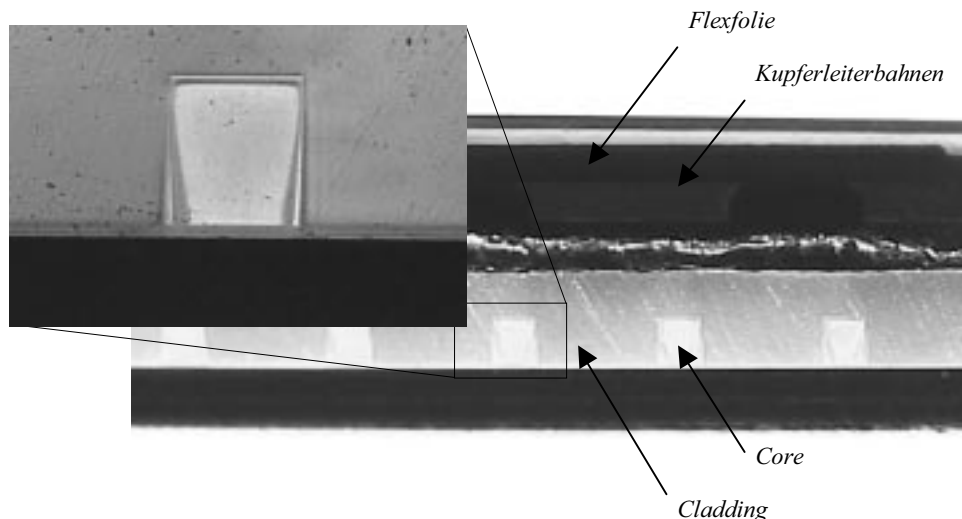


Bild 8: Laminierter Verbund eines optischen Schaltungsträgers mit einem elektrischen Schaltungsträger

4 Optischer Steckverbinder

Für die lösbare Verbindung zwischen zwei Glasfaserbündchen bzw. zwischen einem Faserbündchen und den optischen Wellenleiterstrukturen auf einer optischen Lage sind geeignete Steckverbinder erforderlich. Der Standardsteckverbinder für optische Faserbündchen ist der MT-Stecker (Multifiber Terminator) bzw. die MT-Ferrule. Die mechanischen Abmessungen dieser Ferrule sind in der Norm IEC-478-16 ausführlich beschrieben. Damit auch die polymeren Streifenwellenleiter mit einem Glasfaserbündchen verbunden werden können, müssen Anpassungen an der MT-Ferrule vorgenommen werden. Prototypen wurden mittels Mikrostereolithographie hergestellt, um Tests an den Verbindern durchführen zu können. Für eine Serienproduktion können diese Teile durch Präzisionsspritzguss, z.B. von Liquid Crystal Polymer-Materialien, in den erforderlichen Toleranzen hergestellt werden. In Bild 9 sind Prototypen eines derartigen Steckverbinders gezeigt.

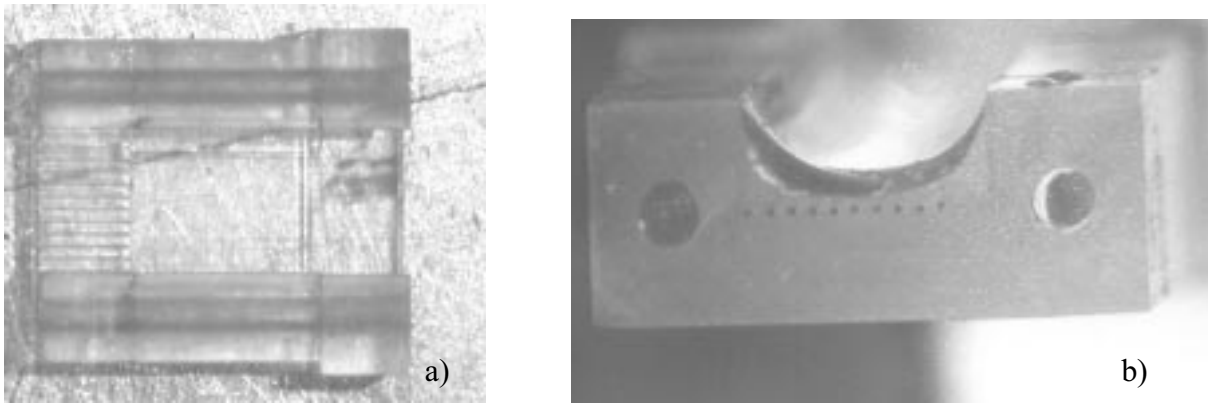


Bild 9: MT-Ferrule für optischen Wellenleiter, a) Aufsicht des MT-Prototyps, b) Steckgesicht des Prototyps mit eingelegten und mit optischem Kleber (Cladding) verklebten Wellenleitern

5 Schlussbemerkung

In diesem Aufsatz wurde nur der Teil des Projektes näher beschrieben, der sich mit der optischen Verbindungstechnik auf der Leiterplatte beschäftigt. Für Leser, die sich auch für die anderen Arbeiten in diesem Verbundprojekt interessieren, sei an dieser Stelle auf die Jahresberichte des Projektträgers [5] verwiesen.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes MOES, Förderkennzeichen 03N1038, Projektträger PTJ, Geschäftsbereich 'Neue Materialien und Chemische Technologien' NMT, Forschungszentrum Jülich GmbH.

6 Literatur

- [1] GIGAVER: Basismaterialien für Hochfrequenzanwendungen, Datenblatt, Fa. Isola
- [2] Krabe, Scheel; Optische Aufbau- und Verbindungstechnik für elektronische Baugruppen; Productronic Okt. 99
- [3] M. Kowatsch; Aufbaukonzepte für optisch-elektrische Schaltungsträger, VTE Heft 5/Okt. 2000
- [4] EOCB-Statusseminar, 27.1.2000, FhG-IZM, Berlin
- [5] MaTech - Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts, Jahresbericht 2000/2001, Programmschwerpunkt Informationstechnik, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen 03N1038, Materialien und Verfahren für die Aufbau- und Verbindungstechnik modularer optisch-elektrischer Schaltungsträger (MOES), sowie 'www.proceedings.materialsweek.org/proceed/mw2000_919.pdf'

Industrielle Produktionstechnik für Baugruppen mit integrierten optischen Kurzstreckenverbindungen — OptiCon —

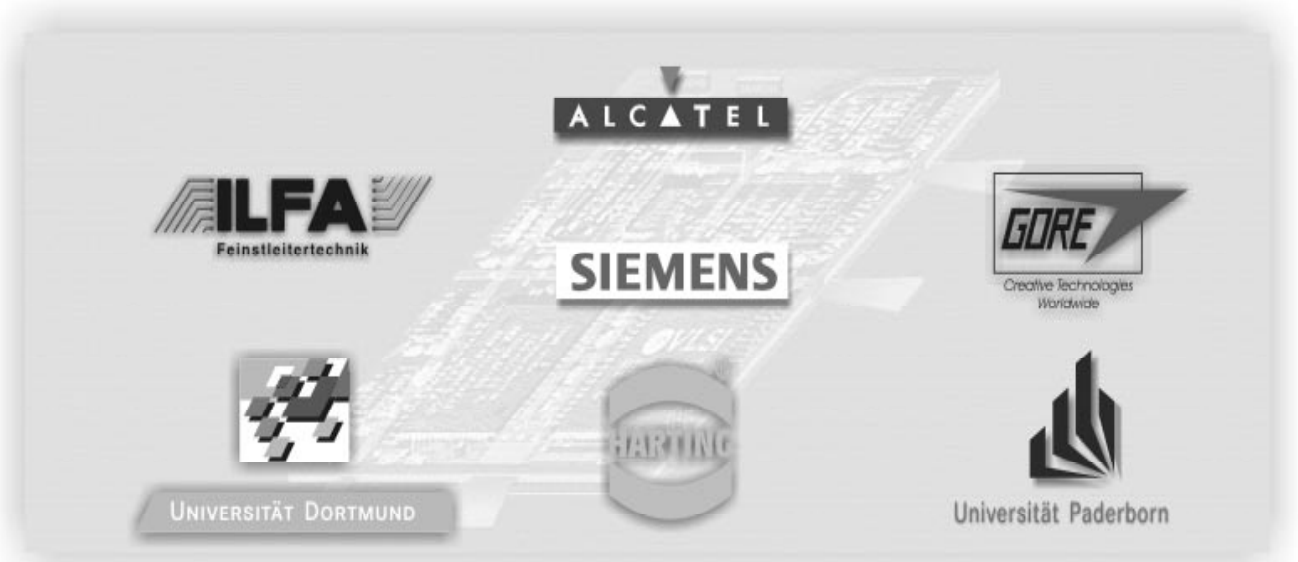
Peter Demmer
Siemens AG, CT D2P
Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München
peter.demmer@mchp.siemens.de

1. Zusammenfassung:

Das Ziel des Verbundprojekts **OptiCon** ist die Entwicklung kostengünstiger, industriell einsetzbarer Entwurfs- und Produktionsverfahren für die breite industrielle Anwendung der innovativen elektrisch-optischen AVT auf Leiterplatten bzw. Baugruppen. Aus Kostengründen steht dabei die Forderung nach Kompatibilität mit den existierenden konventionellen Entwurfs- und Fertigungsverfahren im Vordergrund.

Die im Projekt erarbeiteten Lösungen zielen zunächst auf Anwendungen mit hohem Bandbreitenbedarf ($> 2.5 \text{ Gbps / Leiter}$) im Bereich *Telekommunikation*, jedoch werden durch möglichst allgemeine Lösungsansätze auch andere Anwendungsbereiche adressiert. Sämtliche Arbeiten bauen auf die in den F&E-Projekten *OptoSys*, *EOCB* und *MOES* erarbeiteten Ergebnisse auf und überführen diese in industriell einsetzbare Lösungen. Die Arbeiten im Vorhaben decken die wesentlichen Teile *Entwurf* und *Fertigung* der gesamten Prozeßkette einer Produktentwicklung, welche von der Produktidee über Spezifikation, Entwurf, Prototyping und Test bis zur Fertigung reicht, ab.

2. Projektpartner:



Projektlaufzeit: 01. 2001 – 12.2003

3. Arbeitsschwerpunkte:

Zum einen konzentrieren sich die Projektarbeiten auf die Entwicklung industrieller Herstellungsverfahren für

- kostengünstige optischen Multimode-Wellenleiter und deren Integration in Baugruppen und
- kostengünstige Koppellemente mit geringen Toleranz- und Montageanforderungen für
 - optische Board-Board-Verbindungen,
 - optische Board-Faser- bzw. optische Faser-Board Verbindungen sowie
 - optische Bauelement-Board-Verbindungen.

Zum anderen werden im Vorhaben die für die industrielle Anwendung der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik erforderlichen

- Design- und Simulationswerkzeuge,
- Design-Regeln und
- standardisierten Meßverfahren entwickelt.

Ein weitere Schwerpunkt ist der Aufbau von Technologie-Funktionsmustern der Firmen Alcatel und Siemens :

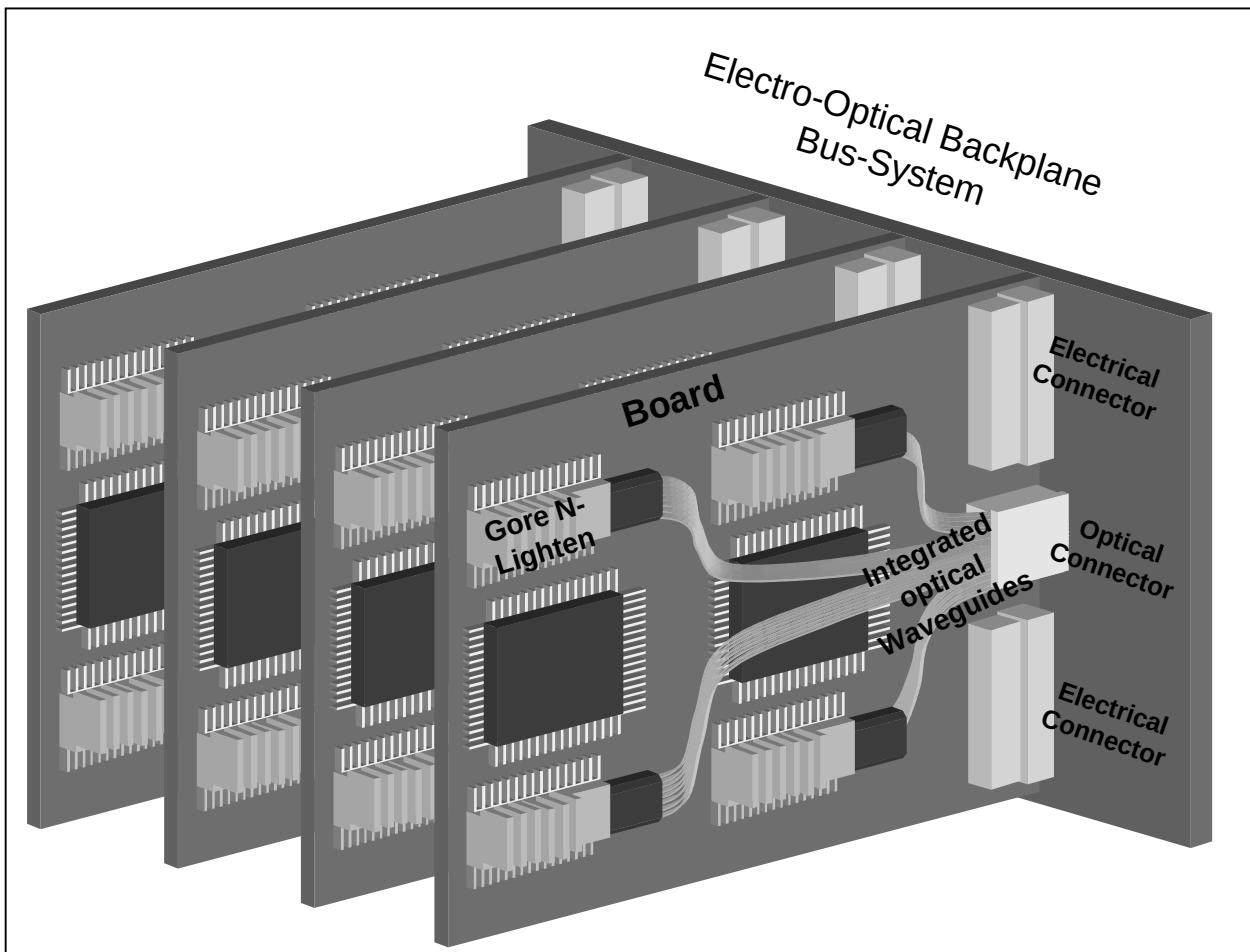


Bild1. Funktionsmuster der Fa. Siemens

4. Projektübersicht:

Teilprojekt 1: Leiterplattentechnologie

Teilprojekt 2: Optische Komponenten und Stecker

Teilprojekt 3: Layout, Design und messtechnische Validierung

Teilprojekt 4: Bewertung der Technologiemuster-Funktionsmuster

Teilprojekt 5: Standardisierung

Teilprojekt 6: Projektleitung und Ergebnistransfer

5. Teilprojekte:

5.1. Aufgaben TP 1 – Leiterplattentechnologie

- Festlegen der Anforderungen und Randbedingungen (Pflichtenheft)
- Übersicht/Charakterisierung/Auswahl von optischen Polymeren
- Alternative Aufbautechniken zur Herstellung optischer Lagen und technologische Bewertung von alternativen Aufbautechniken
- Weiterentwicklung des Heißprägeverfahrens für „große“ Formate
- Integration optischer Lagen in FR4-Multilayer
- Qualifikation von Leiterplatten mit integriert optischen Wellenleitern

5.2. Aufgaben TP 2 - Optische Komponenten und Stecker

- Definition der Steckverbinderanforderungen (Pflichtenheft)
- Datensammlung über existierende opt. Steckverbinder und Koppelkonzepte
- Kopplungskonzept und Integration in das Leiterplattenkonzept
 - Optische Steckverbindung Faser zu Wellenleiter**
 - Optische Steckverbindung Board zu Backplane**
 - Optische Steckverbindung Komponente zu Backplane**
 - Optische Steckverbindung Komponente zu Wellenleiter**
- Entwicklung, Konstruktion und Test der Steckverbinder
- Automatische Verarbeitbarkeit der optischen Sende- und Empfangskomponenten mit Standardverfahren
- Qualifikation

5.3. Aufgaben TP 3 - Layout, Design und messtechnische Validierung

- Anforderungen an das Layout (Pflichtenheft)
- Definition des Layouts für erste Ausbaustufe des Funktionsmusters
- Messtechnische Validierung von Entwurfsregeln (Design-Rules) anhand ausgewählter Teststrukturen
- Grundlegende theoretische und messtechnische Bearbeitung
- Untersuchung des grundsätzlichen Signalverhaltens optischer Interconnects
- Definition, Entwurf und Optimierung des Technologie-Funktionsmusters unter Berücksichtigung der für die optischen Wellenleiter spezifischen Entwurfsregeln
- Messtechnische Validierung von Simulationsmodellen und Simulationsalgorithmen

5.4. Aufgaben TP 4 - Bewertung der Technologie-Funktionsmuster

- Pflichtenheft zur Definition der optischen und elektrischen Leistungsdaten sowie der geforderten Toleranzbedingungen für die Gestaltung der Technologiemuster
- Erprobung der Fertigungsprozesse
- Aufbau des Demonstrators
- Elektro-optische Charakterisierung
- Zuverlässigkeitsuntersuchungen
- Untersuchung der Fehlermechanismen

5.5. Aufgaben TP 5 – Standardisierung

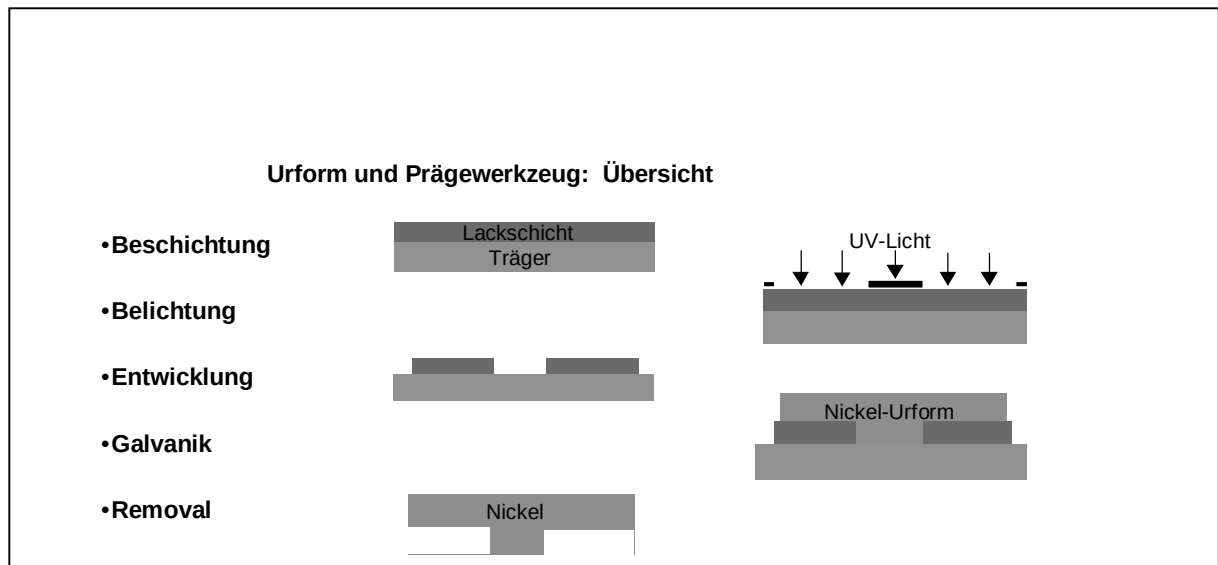
- Definition der zu normenden Felder
Leiterplatte
elektro-optische Komponenten
optische Koppelkonzepte
- Standardisierung von elektrischen bzw. optischen Parametern, Gehäusebauformen sowie der entsprechenden Schnittstellen
- Einbringung entsprechender Dokumente in internationale Normungsgremien z.B.
SC 86 C WG 4
e/o modules performance + pinning, outline dimension
the place for the mechanical dimensions of the POL modules

TC 86 Dynamic Modules
New modules with combined active and passive functions
here is room for a basic input of the project

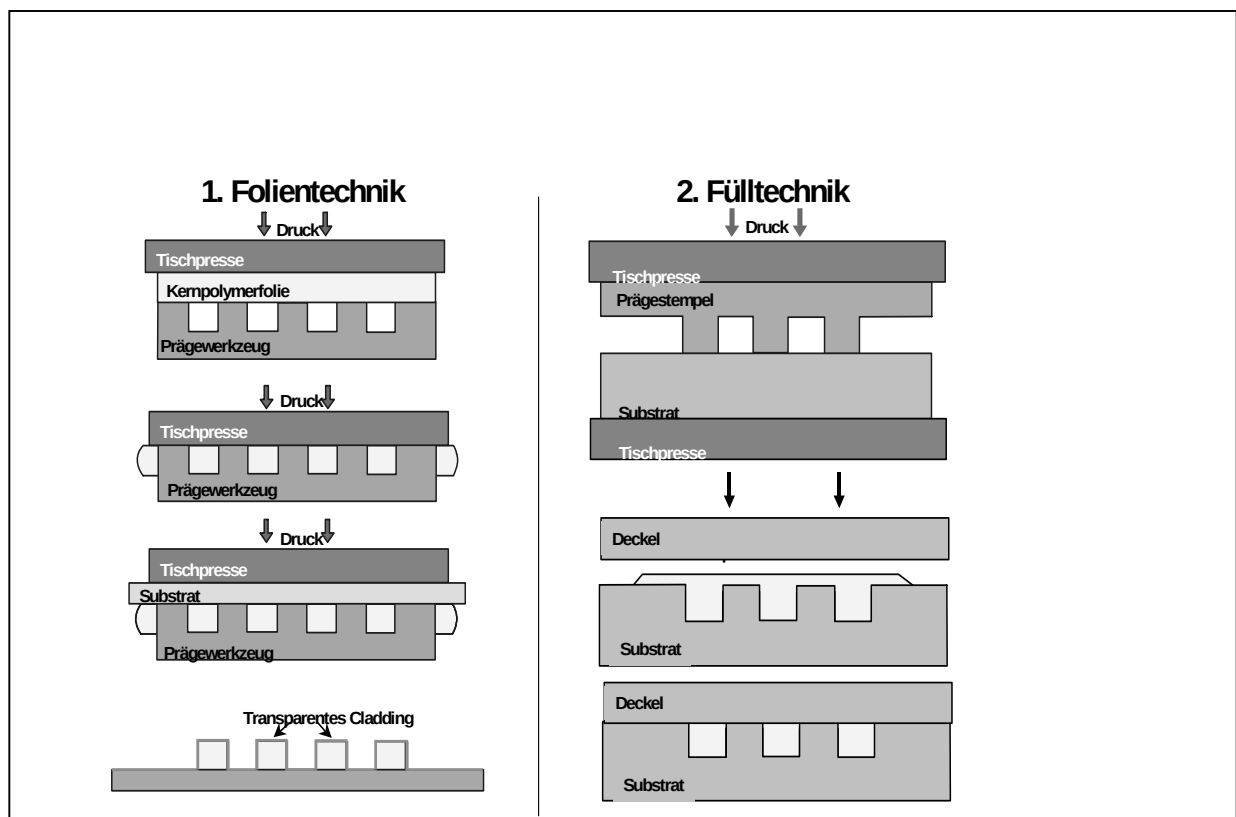
5.6. Aufgaben TP 6 – Projektleitung und Ergebnistransfer

6. Derzeitige Arbeiten

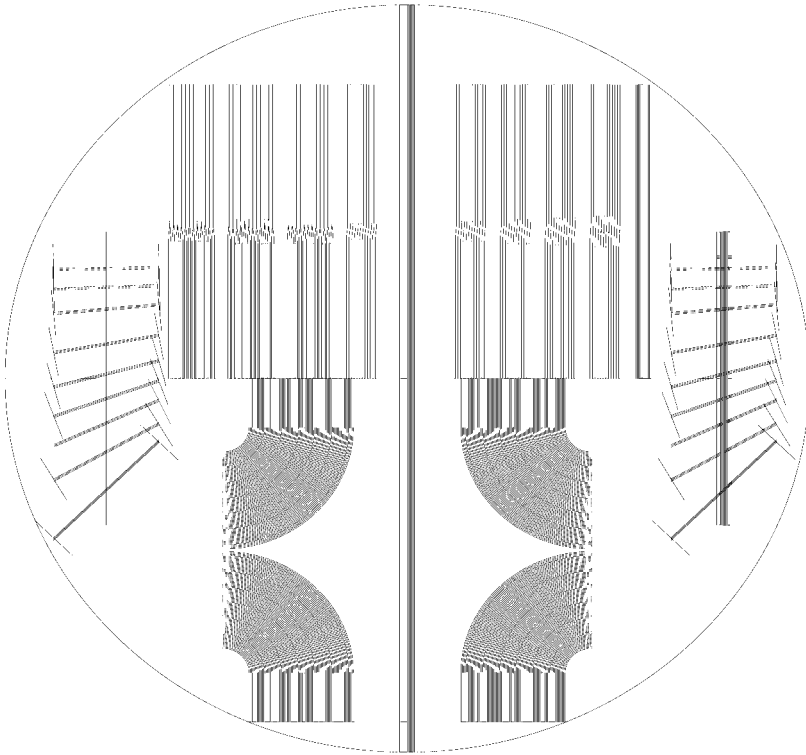
6.1. TP 1 - Leiterplattentechnologie - Herstellung Prägewerkzeug



6.2. TP 1 - Leiterplattentechnologie - Prägen von Wellenleitern



6.3. Aufgaben TP 3 - Layout, Design und messtechnische Validierung

**Testmustereigenschaften:**

- 6“-Wafer
- **Wellenleiterquerschnitt: $70\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$**
- Basis-Pitch: $250\mu\text{m}$

Implementierte Funktionen:

- Geradenstücke
- Symmetrische Splitter (S-Bögen und Y-Verzw.)
- S-Bögen (unterschiedl. Radien)
- Kreuzungen (verschiedene Winkel)
- 90° -Bögen (unterschiedl. Radien)

Optische Multimode-Wellenleiter für Leiterplatten

Henning Schröder, Jörg Bauer, Frank Ebling

Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration,
G.-Mayer-Allee 25, D-13355 Berlin, e-mail: henning.schroeder@izm.fraunhofer.de

Zusammenfassung: Planar strukturierbare Polymere sind ein geeignetes Material, um Multimodewellenleiter für elektrisch-optische Leiterplatten herzustellen. Ihre Auswahl wird durch ihre optischen Eigenschaften in Verbindung mit der Strukturierungstechnologie bestimmt. Eine Möglichkeit ist das im Detail vorgestellte Heißprägen. Es können optische Folien mit geraden und gebogenen Strukturen sowie Y-Verzweiger hergestellt werden. Die Wellenleiter sind form- und maßhaltig, sie haben eine optische Dämpfung unter 0,3 dB/cm, die Übersprechdämpfung beträgt mehr als -30 dB.

1 Einleitung

Um den durch die Prozessorentwicklung getriebenen Bedarf an höheren Bandbreiten auf elektronischen Baugruppen befriedigen zu können, müssen ab einem Bandbreite-Längenprodukt von etwa 2,5 Gbit/s x 1 m optische Verbindungstechniken eingesetzt werden, da Steigerungen auf elektrischem Weg mit stark erhöhtem technologischen und wirtschaftlichen Aufwand verbunden sind. Die herkömmlich dafür eingesetzte Aufbautechnik mittels Glas- oder Polymerfasern ist jedoch bei steigender Zahl von notwendigen Verbindungen ebenfalls zu unwirtschaftlich. Eine Alternative mit sehr hohem Potential bieten planare Wellenleiter, die in einem Standardleiterplattenprozess mit in den Schaltungsträger einlaminieren werden können. Im Rahmen des Verbundprojektes EOCB [1,2] wurden solche Wellenleiter erfolgreich entwickelt und charakterisiert. Die hergestellten Wellenleiterfolien werden als Inlay in die Leiterplatte einlaminieren. Bei der Inlay-Technologie wird die wellenleitende Schicht aus Kunststoff vorzugsweise in die Mitte der Leiterplatte mit positioniert. Das bedeutet allerdings, dass sie die Temperaturbelastung durch das Laminieren und der Montage (Löten, Klebstoffhärtung,..) standhalten muss. **Bild 1** veranschaulicht das EOCB-Konzept.

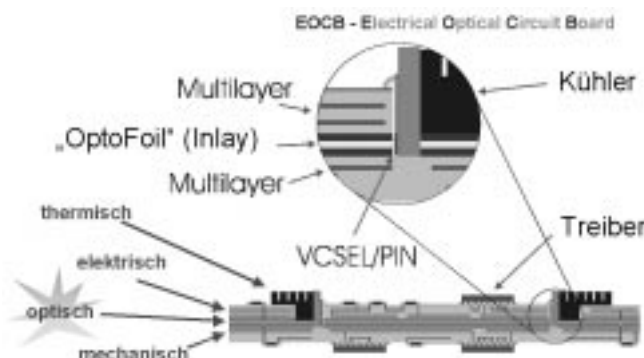


Bild 1: Konzept eines hybrid elektrisch-optisch aufgebauten Schaltungsträgers
(EOCB-Konzept, FhG IZM Berlin)

2 Optische Polymere

Tabelle 1: Vor- und Nachteile optischer Polymere

Vorteile	Nachteile
Einfache Prozessierbarkeit	Hohe optische Verluste
Einfache Einstellung von Brechungsindex und Kontrast	Geringe Thermostabilität
Geringe Wärmeleitung	Hohe Wasserabsorption

Polymere werden bereits seit Jahrzehnten in der Optik angewendet. Auch mit der Entwicklung von Mikrooptik bzw. Optoelektronik wurden international starke Anstrengungen unternommen, Polymere

mit hervorragenden optischen Eigenschaften zu entwickeln und für neuartige Anwendungen, wie z.B. planare optische Wellenleiter, einzusetzen. Polymere stehen dabei insbesondere im Wettbewerb mit anorganischen Materialien, wobei Stärken und Schwächen auf beide Materialklassen verteilt sind. Eine Zusammenstellung der Vor- und Nachteile von Polymeren als Material für planare optische Wellenleiter gibt die **Tabelle 1**.

Polymermaterialien werden nach den jeweiligen Anwendungen ausgewählt, so dass ihre vorteilhaften Eigenschaften zum Tragen kommen. Die Polymere, die für planare Wellenleiter in elektrisch-optischen Leiterplatten eingesetzt werden, zählen zu den *low-performance* Produkten, da hier Multimode-Strukturen zur reinen Wellenleitung realisiert werden müssen und die Kosten ein wesentliches Kriterium sind [3].

Für die erfolgreiche Entwicklung eines Produktes, das planare optische Wellenleiter enthält, ist eine geeignete Kombination Polymermaterialien/optimale Technologie auszuwählen bzw. zu entwickeln. Zielgrößen, die vorrangig vom Material bestimmt werden sind dabei: optische Basiseigenschaften (Brechungsindex, spezifischer optischer Verlust), Thermostabilität, Langzeitstabilität sowie die Verfügbarkeit in sehr stabiler Qualität. Andererseits hängen weitere Kenngrößen vom optimalen Zusammenspiel Material/Prozess ab: Strukturierbarkeit der Wellenleiter (Mechanismus und Qualität) sowie erzeugbare Größenordnungen (Feinheit der Strukturen und Gesamtgröße). Damit sind sowohl das Eigenschaftsprofil des Produktes als auch die Kosten direkt von der optimalen Auswahl der Material/Prozess-Kombination abhängig (**Bild 3**). Die Verwendung fluorierter Monomerbausteine ist für den Wellenlängenbereich um 850 nm nicht zwingend erforderlich, da eine Reihe von Polymeren hier hinreichende Transparenz zeigt. Dazu zählen auch spezielle Epoxydharze, mit denen bereits optische Dämpfungen im Wellenleiter von ca. 0.1 dB/cm erreicht wurden.

3 Technologien zur Wellenleiterstrukturierung

Aufgrund der technologisch bedingten Toleranzen in der Leiterplatte ist es notwendig, Multimode-Wellenleiter zu verwenden. Nur so kann nach derzeitigem Stand der Technik eine zuverlässige Ankopplung der opto-elektronischen Wandler realisiert werden. Zur Herstellung der Multimode-Wellenleiter eignen sich vor allem drei Technologien (**Bild 2**):

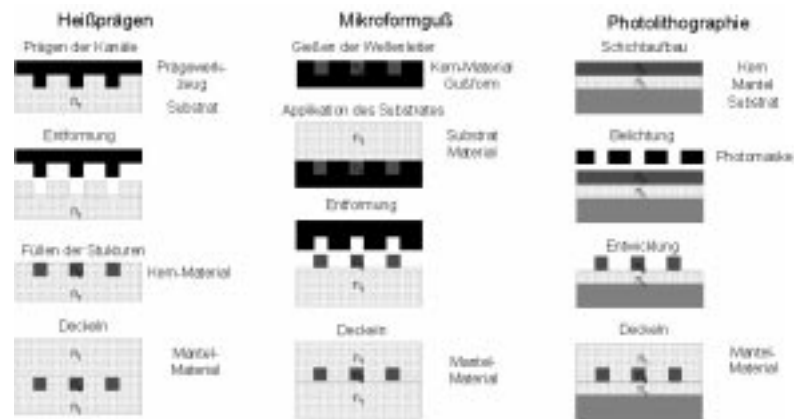


Bild 2: Prozessschemata der drei wichtigsten Technologien zur Herstellung planarer Wellenleiter

Zum einen können die lichtleitenden Polymere photolithographisch strukturiert und mit einem niedriger brechenden Mantelpolymer vergossen werden, zum anderen kann man Polymerfolien durch Heißprägen strukturieren und die Wellenleiter durch Füllen mit einem höher brechenden Kernpolymer und nachfolgendem Laminieren erzeugen. Der Mikroformguss ist eine dritte Möglichkeit, wodurch sich andere Materialklassen verwenden lassen.

4 Wellenleiterstrukturierung durch Heißprägen

4.1 Materialauswahl

Die Vorteile des Heißprägens liegen vor allem in der kostengünstigen Replikation von optischen Mikrostrukturen für die Massenproduktion. Die Qualität der Wellenleiter und ihre Laminierfähigkeit ist wesentlich von den Materialparametern des zu prägenden Polymers in Verbindung mit den Prozessparametern des Heißprägens abhängig.



Bild 3: Kriterien zur Auswahl der Polymermaterialien in Abhängigkeit von den Prozesseigenschaften

Wichtig ist eine hohe Glasübergangstemperatur, geringe Wasseraufnahme, geringe optische Materialdämpfung und Doppelbrechung, Lösungsmittelfreiheit und gute Entformbarkeit. Im Heißprägeprozess befindet sich das Polymermaterial des Untercladdings im entropieelastischen Zustand und umfließt das Werkzeug (**Bild 6**). Vor allem jedoch muss das gewählte Material in seinen optischen (Brechungsindex), mechanischen und chemischen Eigenschaften mit dem Kernmaterial kompatibel sein. Als günstig erweist sich ein Cycloolefincopolymer der Firma Ticona (Topas®).

4.2 Heißprägeprozess

4.2.1 Werkzeug

Einer der wesentlichen Vorteile planarer Wellenleiter liegt in der Möglichkeit, dass neben gebogenen Strukturen auch Splitter herstellbar sind (**Bild 4**). Die Oberflächenrauigkeit des Prägewerkzeugs wird in der gleichen Größenordnung auf die geprägten Oberflächen übertragen. Zur Minimierung von Streuverlusten an den Wellenleitergrenzflächen wird eine Rauigkeit von unter 10% der Lichtwellenlänge gefordert. Sehr gute Erfahrungen wurden mit Werkzeugen gemacht, die mit LIGA-Technologie hergestellt wurden. Es können damit Rauigkeiten von $R_a < 5 \text{ nm}$ erreicht werden. Bei einer Lichtwellenlänge von 850 nm entspricht dieser Wert den Anforderungen. Nach dem Strukturieren der geprägten Bodenfolie werden die Wellenleiterstrukturen mit einem höher brechenden Polymer gefüllt (**Bild 4**).



Bild 4: Realisierte Wellenleiter-Strukturen : gerade, gebogen, Y-Splitter
(LIGA-Werkzeug)

4.2.2 Vorbehandlung

Vor dem eigentlichen Prägevorgang muss die zu strukturierende Polymerfolie gereinigt und getempert werden. Die Reinigung erfolgt durch Abwischen mit einem Lösungsmittel, um eine fett- und staubfreie Oberfläche zu erhalten. Hierbei ist darauf zu achten, dass das Lösungsmittel mit dem Kunststoff verträglich ist, d.h. der Kunststoff keinerlei Lösungsverhalten zeigt. In den meisten Fällen kann Isopropanol zum Einsatz kommen.

Einen wichtigen Schritt bei der Vorbereitung der Folien stellt das Tempern dar. Bei diesem Vorgang wird der Folie Feuchtigkeit entzogen. Dies verhindert die Bildung von Blasen während des Prägevorganges, die durch Ausdampfen entstehen. Das Tempern findet, je nach Kunststoff, bei Temperaturen zwischen 70°C und 90°C über einen Zeitraum von mehreren Stunden statt.



Bild 5: Heißpräge HEX03, Jenoptik

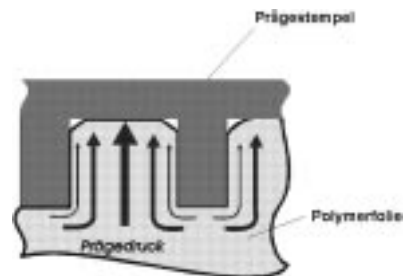


Bild 6: Fließverhalten des Polymers im Heißprägeprozess

4.2.3 Prägeprozess

Während des Prägevorganges mit der Heisspräge (**Bild 5**) wird die thermoplastische Folie bis in den entropieelastischen Bereich erwärmt und dann unter Druck umgeformt. Das Verhalten der Polymere ist in diesem Zustand mit dem hochviskoser Flüssigkeiten zu vergleichen. Unter Druck fließt das Polymer dann in die Werkzeugform (**Bild 6**). Die Abkühlung („Einfrieren“) der umgeformten Formteile erfolgt unter Formzwang. Der Ablauf eines Heißprägevorganges ist in **Bild 2** schematisch dargestellt. Das LIGA-Prägewerkzeug ist in einem Werkzeughalter in der oberen Heizplatte der Heißpräge befestigt (**Bild 7**).

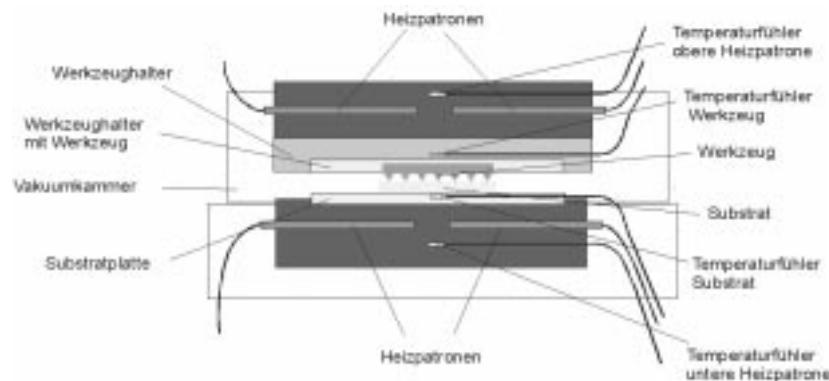


Bild 7: Prägekammer mit Temperaturfühlern

4.3 Einfüllen des Kernmaterials und Deckeln

Der Auftrag des Kernmaterials wird ähnlich der Rakeltechnik beim Siebdruck vorgenommen (**Bild 8**).

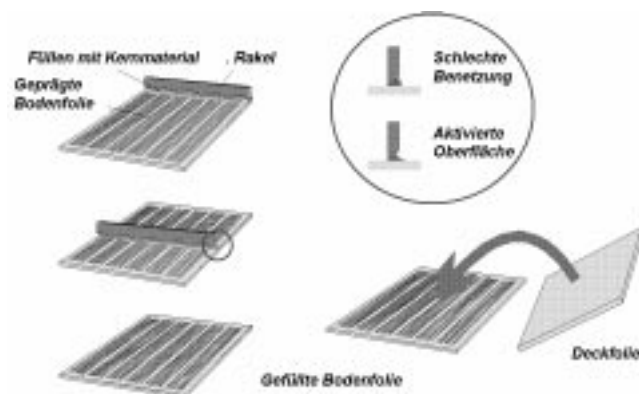


Bild 8: Füllen der geprägten Wellenleiterstrukturen mittels Rakeltechnologie und Deckeln. Durch Oberflächenaktivierung wird eine gute Benetzung des Kernmaterials erreicht

Das Kernmaterial muss dazu blasenfrei über die gesamte Breite der strukturierten Folie, senkrecht zu den Strukturen, aufgetragen werden. Dies geschieht mittels einer Spritze. Mit Hilfe eines Rakel wird das Kernmaterial nun in Strukturrichtung auf die Probe aufgebracht. Wichtig ist, dass die Rakelgeschwindigkeit an die Viskosität und das Benetzungsverhalten des Kernmaterials angepasst wird. Das Kernmaterial soll für eine gute Füllung der Gräben vor dem Rakel herfließen, d.h. es sollte keinesfalls zu einer Rollbewegung des Kernmaterials kommen. Dies bedeutet nicht nur eine niedrige Rakelgeschwindigkeit, sondern auch den Einsatz möglichst niedrigviskoser Kernmaterialien und eine gute Benetzbarkeit der

Oberfläche. In Abhängigkeit von den gewählten Materialien kann auch eine Aktivierung der Oberfläche durch Ozon oder Sauerstoffplasma notwendig sein, um eine gute Benetzung zu gewährleisten.

Nach dem Aushärten (UV oder thermisch) wird auf die strukturierte und mit Kernmaterial gefüllte Folie eine Deckfolie auflaminiert. Im Ergebnis umfangreicher Prozessoptimierungen können am FhG IZM Wellenleiter realisiert werden, die sowohl formbeständig als auch maßhaltig sind (**Bild 9a**).

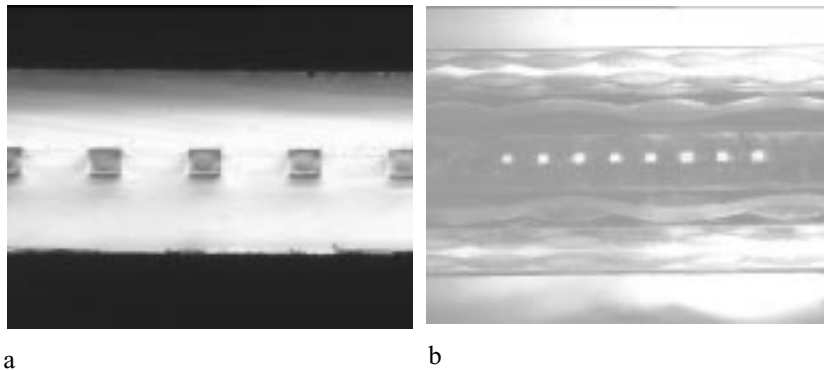


Bild 9: a) OptoFoil nach dem Deckeln, b) einlamierte optische Lage mit sichtbaren Wellenleiterstirnflächen nach der Lamination in einen Multilayer (FR4)

Die entstandene Wellenleiterfolie (OptoFoil) kann dann in einem Standardlaminationsprozess mit dem Basismaterial verpresst werden (**Bild 9b**). Die mit den verwendeten Materialien und in dieser Technologie hergestellten Wellenleiter haben eine sehr geringe optische Dämpfung von unter 0,3 dB/cm, so dass für Leiterplatten ausreichend lange Verbindungen bei guter Systemreserve realisiert werden können. In **Bild 10** ist die vollständige Technologiekette schematisch dargestellt.

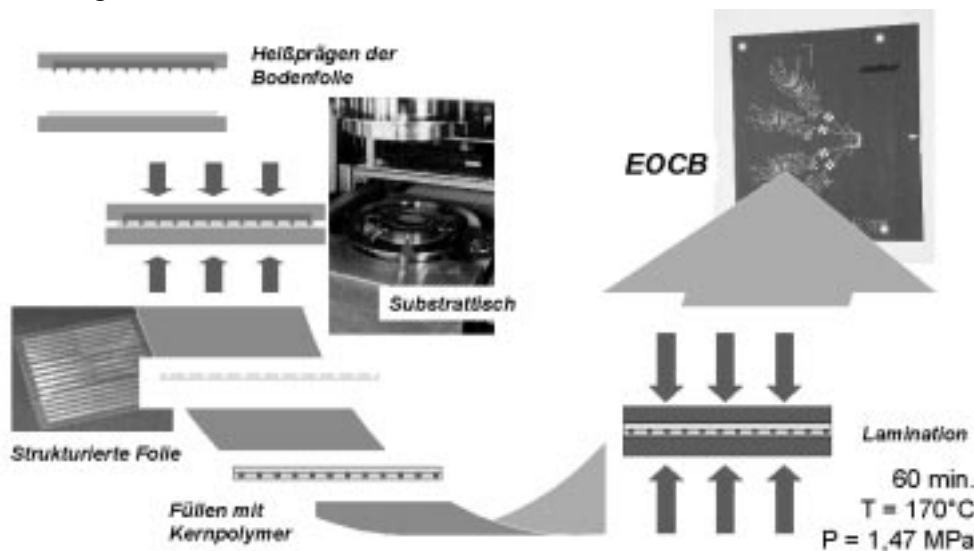


Bild 10: Prozess der EOCB-Herstellung: Heißprägen der OptoFoil, Füllen der Wellenleiterstrukturen PCB-Lamination

5 Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Technologie können Multimode-Wellenleiter für elektrisch-optische Leiterplatten (EOCB) hergestellt werden.

6 Literatur

- [1] BMBF Förderkennzeichen 16SV796/6 und 16SV797/7
- [2] D. Krabe, F. Ebling, N. Arndt-Staufenbiel, G. Lang, W. Scheel, Proc. 50th ECTC, May 21-24, 2000, Las Vegas, CA, USA
- [3] H. Schröder, J. Bauer, F. Ebling, W. Scheel; Polymer Optical Interconnects for PCB, Proc. Polytronic 2001, 21.-24.11.2001, Potsdam, Germany, pp. 337-343

Aufbau und Herstellung hybrider elektrisch-optischer Leiterplatten

W. Süllau
ILFA GmbH, Lohweg 3, D-30559 Hannover
wsuellau@ilfa.de

Der Beitrag lag zum Zeitpunkt der Drucklegung nicht vor.

Aufbau und Herstellung hybrider elektrisch-optischer Leiterplatten - Details über den Herstellungsprozess von EOCBs

Dr. Christoph Lehnberger, Lothar Oberender
Andus Electronic GmbH, Görlitzer Str. 52, D-10997 Berlin
ch.lehnberger@andus.de, l.oberender@andus.de

Zusammenfassung: *Das von ANDUS bearbeitete Teilprojekt im BMBF-Projekt "Electrical-Optical Circuit Board - EOCB" hatte zum Ziel, den Herstellungsprozess von Leiterplatten für die Integration von optischen Wellenleiter zu modifizieren. Unter Nutzung der verfügbaren Technologien für die Leiterplattenproduktion konnten Wellenleiter erfolgreich in den Materialverbund der Leiterplatte eingefügt werden, ohne die optische Funktionsfähigkeit der Wellenleiter zu beeinträchtigen.*

1 Einleitung

Konventionelle Leiterplatten sind Aufbauten aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien, die in einem mehrschichtigen Fertigungsprozess zusammengefügt werden. Die Entwicklung der Leiterplatte in der Vergangenheit war geprägt von der Zunahme der Komplexität des Aufbaus und der Struktur, um wachsenden Anforderungen an die Baugruppe gerecht zu werden.

Inzwischen hat die Leiterplatte bereits Aufgaben übernommen, die bislang bei den Bauelementen lagen, wie die Entflechtung von Fine-Pitch-Bauelementen mit flächigem Anschlussraster auf der Leiterplatte durch hochdichte Verdrahtung (HDI-Technologie) oder die Realisierung von geometrisch eng tolerierten Fertigungsmaßen für impedanzkontrollierte Schaltungsträger.

Der Trend zur Integration von passiven, aber auch von aktiven Bauelementen in Leiterplatten gewinnt in jüngster Zeit zunehmend an Bedeutung, obwohl die Technologien z. T. bereits bekannt sind. Dies spiegelt das Streben nach Miniaturisierung und Steigerung der Funktionsdichte elektronischer Baugruppen wider.

Durch die Integration von optischen Komponenten, wie hier den Wellenleitern, wird ein weiterer Teil an der Fertigung einer elektronischen Baugruppe auf den Leiterplattenproduzenten übertragen. Die Leiterplatte wird damit zunehmend selbst zu einem hochwertigen elektronischen Bauelement.

1.1 Fertigungsschritte, die die Integration der Wellenleiter tangieren

Die Herausforderung bei der Integration von Wellenleitern in Leiterplatten bestand in der Überprüfung, Modifizierung oder Weiterentwicklung der einzelnen Fertigungsprozesse, um die Kompatibilität mit dem neuen Werkstoff der Optofolie zu gewährleisten:

- Verbindung von Optofolie und Leiterplatten-Basismaterial durch Laminieren
- Mechanische Bearbeitung des Laminats durch Bohren und Fräsen
- Durchkontaktierung

- Verschiedene Abschlussbehandlungen:

Lötstopp-Abdeckung / Oberfläche / Bestücken und Löten

2 Fertigungsschritte

2.1 Vorbehandlung der Optofolie vor dem Laminieren

Das Mantelmaterial der Optofolie (COC, Topas[®]) ist ein hochwertiges Kohlenwasserstoff-Polymer, das weder Sauerstoff noch Stickstoff enthält, sondern als eine Art stark vernetztes Polyethylen beschrieben werden kann. Dadurch ist das Material sehr unpolar und es ergibt sich eine schlechte Haftfestigkeit zwischen dem unbehandelten Mantelmaterial der Optofolie und den Prepregs. Starke Delaminationen können auftreten.

Die Behandlung der Optofolien mit Plasma ist sehr effektiv, um eine ausreichende Haftfestigkeit sicherzustellen. Die Art des Hochvakuumplasmas spielt eine untergeordnete Rolle. Es konnte eine starke Verringerung der Grenzflächenspannung durch die chemische Veränderung der an sich sehr unpolaren Oberfläche nachgewiesen werden.

Alternativ kann die Optofolie mechanisch aufgeraut werden.

2.2 Pressparameter

EOCBs können nicht wie herkömmliche Multilayer laminiert werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich weder die Presszeit noch der Pressdruck negativ auf die optischen Eigenschaften der Wellenleiter auswirken. Die üblicherweise verwendete Presstemperatur ist jedoch zu hoch und muss für EOCBs unterhalb der Glasübergangstemperatur der thermoplastischen Optofolie gehalten werden.

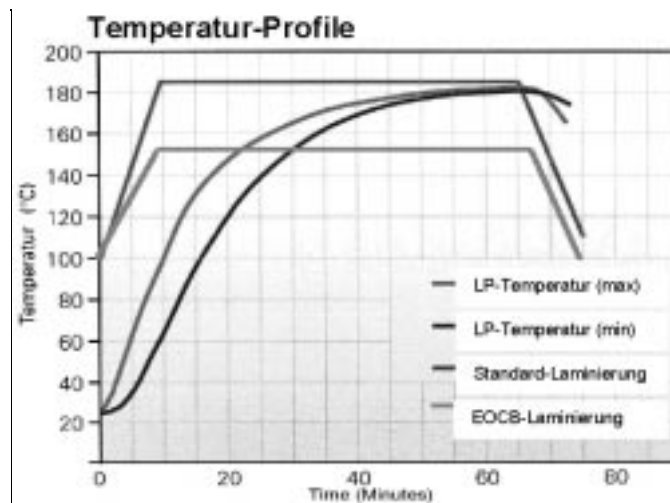


Bild 1: Temperaturprofil bei der Laminierung von EOCBs

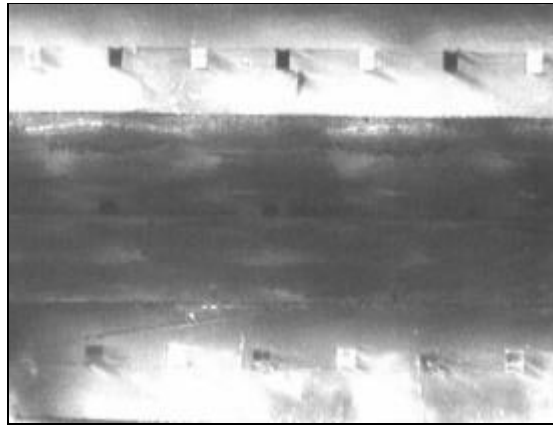


Bild 2: Funktionsfähige einlamierte Wellenleiter (EOCB-Temperaturprofil)

Wird die maximal zulässige Temperatur überschritten, verliert die Optofolie ihre mechanischen Eigenschaften und es kommt zu Verzug der Optofolie, Deformation der Wellenleiter und von Ausgasen begleiteter Zersetzung des Materials.

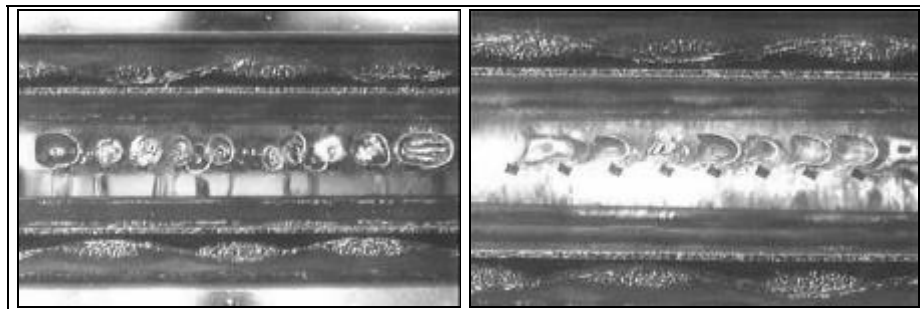


Bild 3: Fehlerbilder: Deformierte Wellenleiter, Ausgasen (Standard-Temperaturprofil)

2.3 Mechanische Bearbeitung

Eine herkömmliche Leiterplatte besteht im wesentlichen aus drei mechanisch sehr unterschiedlich zu bearbeitenden Materialien: Harz (Bild 4: breite Schichten), Glasgewebe (Bild4: weiße Kreise), Kupfer (Bild 4: schmale Schichten). Mit der Optofolie kommt eine vierte Komponente hinzu (Bild 4: dunkle Schicht in der Mitte).

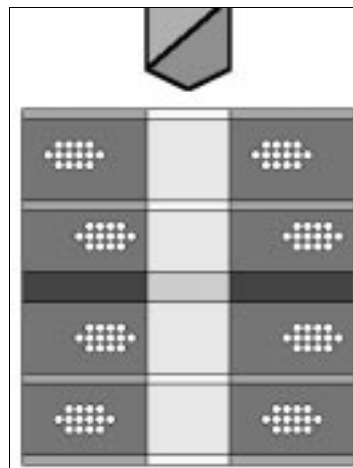


Bild 4: Komponenten eines EOCBs (siehe Text)

Die Drehzahl und der Vorschub beim Bohren des Verbundwerkstoffs „Leiterplatte“ stellen somit bereits einen Kompromiss dar, wobei die potentiellen Schwierigkeiten z. B. durch die anschließende „Desmear“-Behandlung von Harzrückständen beherrscht werden.

Komponente		Erweichen	Verschmieren	Bruch
Harz		⚡?	⚡?	-
Glas		-	-	⚡?
Kupfer		-	-	-
Optofolie		⚡?	⚡?	⚡?

Bild 5: Potentielle Schwierigkeiten bei der mechanischen Bearbeitung eines EOCBs

Die spröde und zugleich thermoplastische Optofolie in EOCBs kann im kalten Zustand leicht ausbrechen und zu einer Aushöhlung der Bohrung führen. Übersteigt die Temperatur beim Bohren jedoch den relativ scharfen Bereich der Glasübergangstemperatur, könnte es auch zu Verschmierungen kommen. Ferner können Späne in den Bohrungen zurückbleiben.

Standard-Bohrparameter (FR4) oder höhere Drehzahlen können zum Ausbruch der Optofolie und zu Spänen in der Bohrung führen. Die Folge sind fehlerhafte Durchkontaktierungen. Angepassten Bohrparameter führen zu glatten, sauberen Lochwandungen. Eine Verringerung der Drehzahl vermindert die Neigung zu Ausbruch und Spänen (Bild 6).

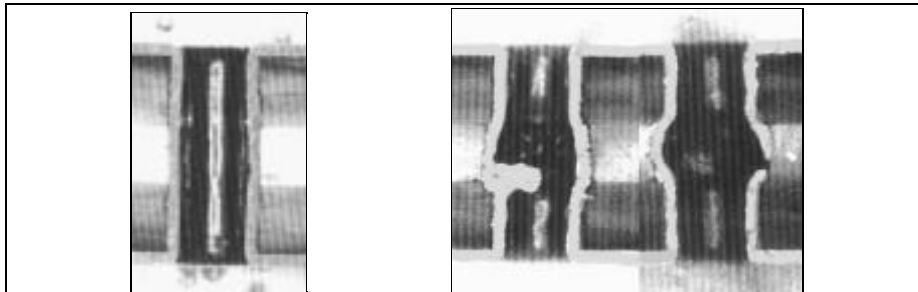


Bild 6: Fehlerfreie Bohrung durch angepasste Bohrparameter gegenüber Bohrungen mit Späne und Ausbruch

2.4 Vorbehandlung für eine zuverlässige Durchkontaktierung

Für die einwandfreie Durchkontaktierung muss die inerte, unpolare Lochwand-Oberfläche des Topas-Materials vorbehandelt werden. Nur eine Plasma-Behandlung (Hochvakuum-Plasma mit Sauerstoff) konnte die Aktivierung der Oberfläche für das chem. Kupfer-Verfahren bewirken.

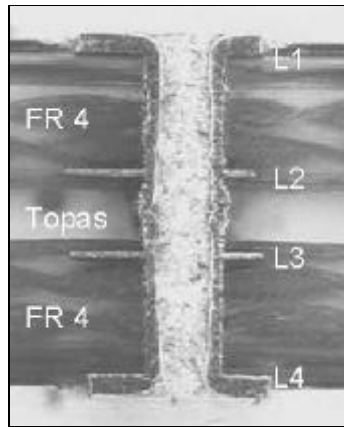


Bild 7: Fehlerfreie Durchkontaktierung

2.5 Abschlussbehandlungen

Die EOCBs sind auf die Verträglichkeit mit den darauffolgenden Verfahrensschritten - bis hin zum Bestücken und Löten - überprüft worden. Dabei ergaben sich folgende Punkte:

2.5.1 Lötstopplack

Die Aushärtungstemperaturen sind analog zu den Laminiertemperaturen zu begrenzen und die Aushärtezeiten entsprechend verlängern.

2.5.2 Oberfläche

Die heute noch übliche Heißverzinnung von Leiterplatten ist für EOCBs aus Temperaturgründen unzulässig. Alternativ stehen die chem. Zinn-Oberfläche oder chem. Nickel/Gold zur Verfügung.

2.5.3 Mechanische Endbearbeitung

Die elektrisch-optischen Koppelschnittstellen sind zu fräsen und ggf. zu glätten, es sind entsprechend tolerierte Vorrichtungen für die Justage der elektrisch-optischen Bauelemente zu fertigen.

2.5.4 Aufbau und Verbindungstechnik

Der Standard-Lötprozess ist aus Temperaturgründen unzulässig. Alternativ können in begrenzten Anwendungen SnBi-Lote mit niedrigen Schmelztemperaturen oder Leitleber verwendet werden.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Rahmen des BMBF-Projektes „Electrical-Optical Circuit Board - EOCB“, Förderkennzeichen 16SV798/8, durchgeführt.

Meßmethoden und Charakterisierung optischer Multimode-Verbindungen auf EOCB

Henning Schröder¹⁾, Engelbert Strake²⁾

¹⁾ Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration,

G.-Mayer-Allee 25, D-13355 Berlin, e-mail: henning.schroeder@izm.fraunhofer.de

²⁾ Robert Bosch GmbH, CM-DI/ESA4, Robert-Bosch-Str. 200, D-31139 Hildesheim,
e-mail: engelbert.strake@de.bosch.com

Zusammenfassung: Eine Möglichkeit zur Herstellung der Wellenleiter für elektrisch-optische Schaltungsträger (EOCB) ist das Heißprägen. Ein wesentlicher Teil der Arbeiten liegt in der Auswahl kommerziell verfügbarer Polymere und deren Charakterisierung als Ausgangsmaterial. Die Technologie wird im folgenden kurz beschrieben und die optische und nichtoptische Charakterisierung der geprägten Multimode-Wellenleiter dargestellt. Es wurden optische Folien mit geraden Strukturen in einem Abstand von 250 µm untersucht. Die Wellenleiter sind form- und maßhaltig, sie haben eine optische Dämpfung unter 0,3 dB/cm, die Übersprechdämpfung liegt bei mehr als 30 dB.

1 Einleitung

Um höhere Bandbreiten auf elektronischen Baugruppen übertragen zu können, müssen ab etwa 2,5 Gbit/s x 1 m optische Verbindungstechniken eingesetzt werden. Die herkömmlich dafür eingesetzte Aufbautechnik mittels Glas- oder Polymerfasern ist jedoch bei steigender Zahl von notwendigen Verbindungen zu unwirtschaftlich. Eine Alternative mit sehr hohem Potential bieten planar erzeugte Wellenleiter, die in einem Standardleiterplattenprozess mit in den Schaltungsträger einlaminieren werden. Im Rahmen des Verbundprojektes EOCB wurden solche Wellenleiter erfolgreich hergestellt und charakterisiert.

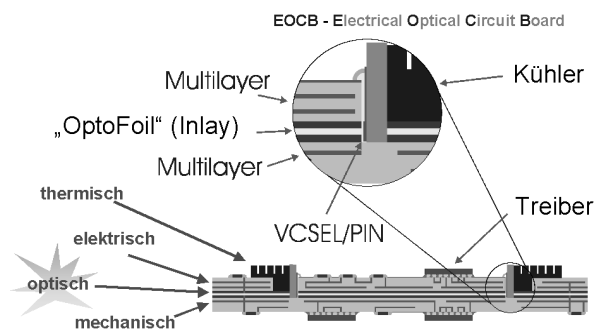


Bild 1: Konzept eines hybrid elektrisch-optisch aufgebauten Schaltungsträgers (EOCB-Konzept, FhG IZM Berlin)

Die solcherart hergestellten Wellenleiterfolien wurden später als Inlay in die Leiterplatte einlaminieren (**Bild 1**). Ziel ist es, Wellenleiter mit geringer optischer Dämpfung, geringem Übersprechen und guter Form- sowie Lagestabilität im Laminat herzustellen, so dass eine zuverlässig arbeitende optische Übertragungsstrecke realisiert werden kann.

2 Optische Wellenleitung in planaren Polymerwellenleitern

Polymermaterialien werden nach den jeweiligen Anwendungen ausgewählt, so daß ihre vorteilhaften Eigenschaften zum Tragen kommen. Die Polymere, die für planare Wellenleiter

in elektrisch-optischen Leiterplatten eingesetzt werden, zählen zu den *low-performance* Produkten, da hier Multimode-Strukturen zur reinen Wellenleitung realisiert werden müssen und die Kosten ein wesentliches Kriterium sind. Die optischen Zielgrößen des strukturierten Wellenleiters Brechungsindexprofil, optische Dämpfung und Übersprechdämpfung werden sowohl durch die Materialeigenschaften als auch durch die Prozesstechnik bestimmt.

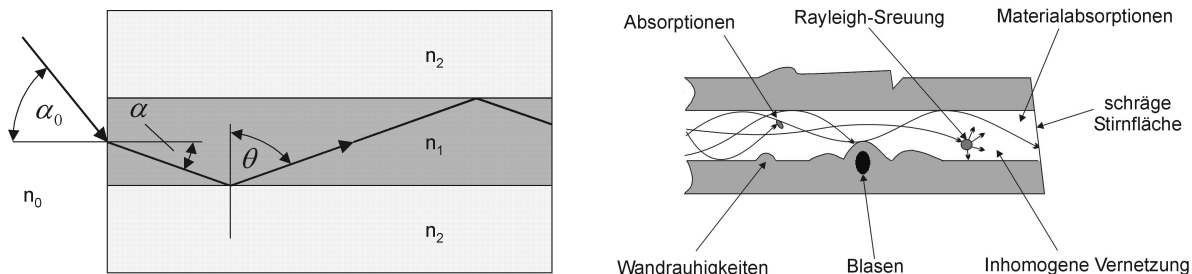


Bild 2: Schema des idealen (links) und des realen Polymerwellenleiters (rechts) mit den Beiträgen zur optischen Dämpfung

In **Bild 2** ist sowohl das Prinzip der Wellenleitung durch fortgesetzte Totalreflexion im idealen Wellenleiter (oben) als auch die Verhältnisse am realen Wellenleiter (unten) dargestellt. Der Akzeptanzwinkel α_0 ergibt sich aus der Differenz der Brechzahlen von Kern und Mantel aus der numerischen Apertur A_N entsprechend:

$$n_0 \sin(\alpha_0) \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \equiv A_N$$

Die Dämpfung eines realen Wellenleiters (Bild 2, rechts) wird neben der reinen Materialabsorption und enthaltenen Verunreinigungen (Absorption und Streuzentren) stark durch den Prozeß beeinflusst. Übersteigt etwa die Rauigkeit der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel etwa 1/10 der Wellenlänge, wird zunehmend Licht in den Mantel ausgekoppelt, da die Bedingungen für die Totalreflexion nicht mehr gegeben sind und die Wellenleiterdämpfung steigt.

3 Polymermaterialien und Technologieauswahl

Die zum Einsatz kommenden optischen Polymermaterialien werden nach den jeweiligen Anwendungsgebieten ausgewählt, so dass ihre vorteilhaften Eigenschaften zum Tragen kommen. Die Polymere, die für planar strukturierte Wellenleiter in elektrisch-optischen Leiterplatten eingesetzt werden, zählen zu den *Low-Performance*-Produkten, da hier Multimode-Strukturen zur reinen Wellenleitung realisiert werden können und die Kosten ein wesentliches Kriterium sind.

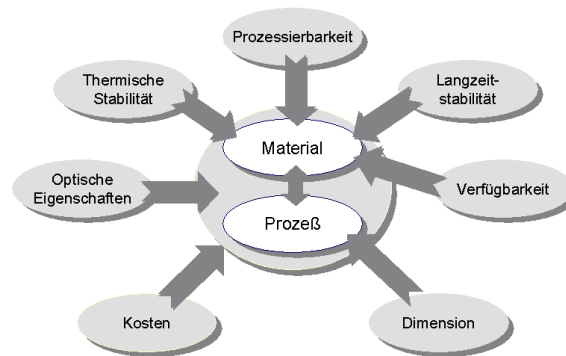


Bild 3: Kriterien zur Auswahl der Polymermaterialien in Abhängigkeit von den Prozesseigenschaften

Für die erfolgreiche Entwicklung eines Produktes, das planar erzeugte optische Wellenleiter enthält, ist stets eine geeignete Kombination aus Polymermaterialien und optimaler Technologie auszuwählen bzw. zu entwickeln. Zielgrößen, die vorrangig vom Material bestimmt werden, sind dabei: optische Basiseigenschaften (Brechungsindex, spezifischer optischer Verlust), Thermostabilität, Langzeitstabilität sowie die Verfügbarkeit in sehr stabiler Qualität. Andererseits hängen weitere Kenngrößen vom optimalen Zusammenspiel Material/Prozess ab: Strukturierbarkeit der Wellenleiter (Mechanismus und Qualität) sowie erzeugbare Größenordnungen (Feinheit der Strukturen und Gesamtgröße). Damit sind sowohl das Eigenschaftsprofil des Produktes als auch die Kosten direkt von der optimalen Auswahl der Material/Prozess-Kombination abhängig (**Bild 3**).

Aufgrund der technologisch bedingten Toleranzen in der Leiterplatte ist es notwendig, Multimode-Wellenleiter zu verwenden. Nur so kann nach derzeitigem Stand der Technik eine zuverlässige Ankopplung der optoelektronischen Wandler realisiert werden. Zur Herstellung der Multimode-Wellenleiter eignen sich vor allem drei Technologien: Zum einen können die lichtleitenden Polymere photolithographisch strukturiert und mit einem niedriger brechenden Mantelpolymer vergossen werden, zum anderen kann man Polymerfolien durch Heißprägen strukturieren und die Wellenleiter durch Füllen mit einem höher brechenden Kernpolymer und nachfolgendem Laminieren erzeugen. Der Mikroformguss stellt eine weitere Möglichkeit dar, wodurch sich andere Materialklassen verwenden lassen.

4 Wellenleiterstrukturierung durch Heißprägen

Vorteile dieser Technologie liegen vor allem in der kostengünstigen Replikation von optischen Mikrostrukturen für die Massenproduktion (**Bild 4**).

Die Qualität der Wellenleiter und ihre Laminierfähigkeit ist wesentlich von den Materialparametern des zu prägenden Polymers in Verbindung mit den Prozessparametern des Heißprägens abhängig. Wichtig ist eine hohe Glasübergangstemperatur, geringe Wasseraufnahme, geringe optische Materialdämpfung und Doppelbrechung, Lösungsmittelfreiheit und gute Entformbarkeit. Außerdem muss das gewählte Material in seinen optischen (Brechungsindex), mechanischen und chemischen Eigenschaften mit dem Kernmaterial kompatibel sein. Als günstig erweist sich ein Cycloolefincopolymer der Firma Ticona (Topas®).

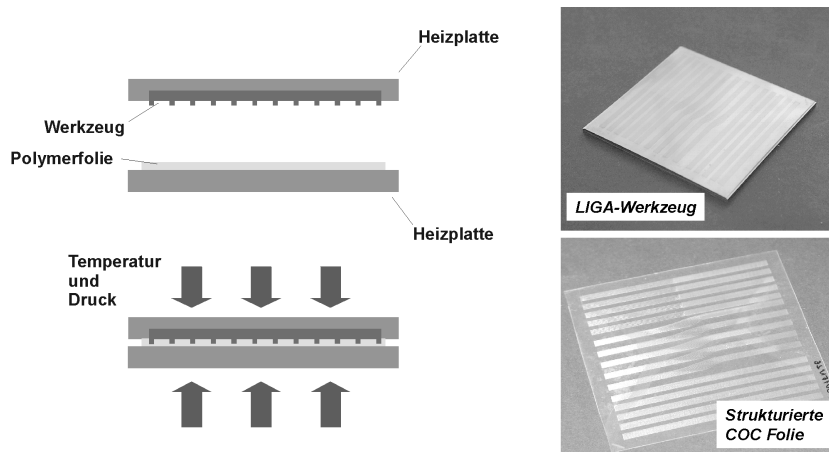


Bild 4: Prozeß des Heißprägens (links), LIGA-Werkzeug (rechts oben), geprägte Topas™ -Folie

Die Oberflächenrauigkeit des Prägewerkzeugs wird in der gleichen Größenordnung auf die geprägten Oberflächen übertragen. Zur Minimierung von Streuverlusten an den Wellenleitergrenzflächen wird eine Rauigkeit von unter 10% der Lichtwellenlänge gefordert. Sehr gute Erfahrungen wurden mit Werkzeugen gemacht, die mit LIGA-Technologie hergestellt wurden. Es können damit Rauigkeiten von $R_a < 5 \text{ nm}$ erreicht werden. Bei einer Lichtwellenlänge von ca. 850 nm entspricht dieser Wert den Anforderungen.

Nach dem Strukturieren der geprägten Bodenfolie werden die Wellenleiterstrukturen mit einem höher brechenden Polymer gefüllt. Dies kann mittels Rakelauftrag geschehen. Wichtig ist, dass die Gräben blasenfrei gefüllt sind und auf der oberen Fläche keine Rückstände verbleiben. Solche Rückstände würden ein verstärktes Übersprechen der in benachbarten Wellenleitern geführten Moden zur Folge haben. In Abhängigkeit von den gewählten Materialien kann auch eine Aktivierung der Oberfläche durch Ozon oder Sauerstoffplasma notwendig sein, um eine gute Benetzung zu gewährleisten. Nach dem Aushärten (UV oder thermisch) wird auf die strukturierte und mit Kernmaterial gefüllte Folie eine Deckfolie auflaminiert. Im Ergebnis einer guten Prozesstechnologie können Wellenleiter realisiert werden, die sowohl formbeständig als auch maßhaltig sind (**Bild 5**, links).

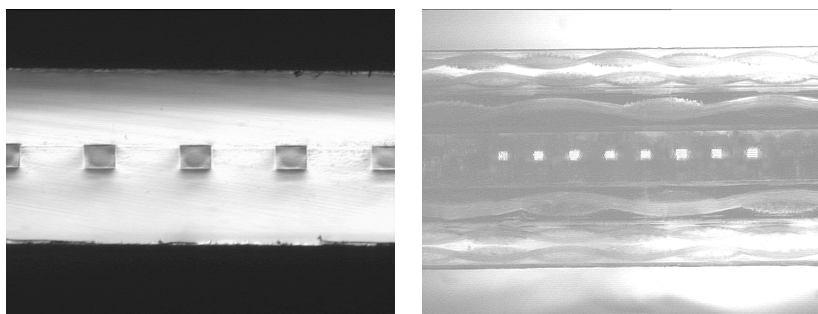


Bild 5: OptoFoil nach dem Deckeln (links) und einlamierte optische Lage mit sichtbaren Wellenleiterstirnflächen nach der Lamination in einen FR4-Multilayer (rechts)

Die entstandene Wellenleiterfolie ("OptoFoil") kann dann in einem Standardlaminationsprozess mit dem Basismaterial verpresst werden (**Bild 5**, rechts). Die mit den verwendeten Materialien und in dieser Technologie hergestellten Wellenleiter haben eine sehr geringe optische Dämpfung von unter 0,3 dB/cm, so dass für Leiterplatten ausreichend lange Verbindungen bei guter Systemreserve realisiert werden können.

5 Charakterisierung planar strukturierter Polymerwellenleiter

Die Dämpfungsverluste in optischen Verbindungsstrecken setzen sich aus verschiedenen Anteilen zusammen (**Bild 6**).

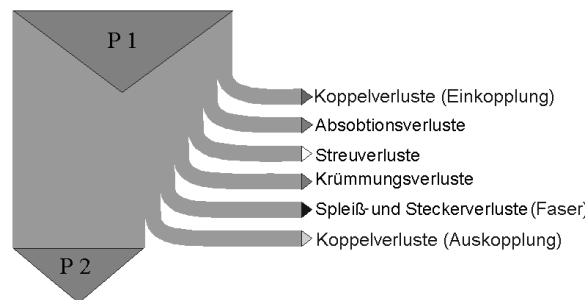


Bild 6: Dämpfungsverluste: P1 eingekoppelte Leistung, P2 ausgekoppelte Leistung

Bei der Charakterisierung der multimodalen optischen Wellenleiter, wie sie als Inlay in Leiterplatten eingesetzt werden können, kommt es im wesentlichen darauf an, die optische Dämpfung zu bestimmen. Diese Dämpfung setzt sich aus der reinen Materialdämpfung und den Streuverlusten in der Grenzschicht zwischen Kern- und Mantelmaterial zusammen (**Bild 7**).

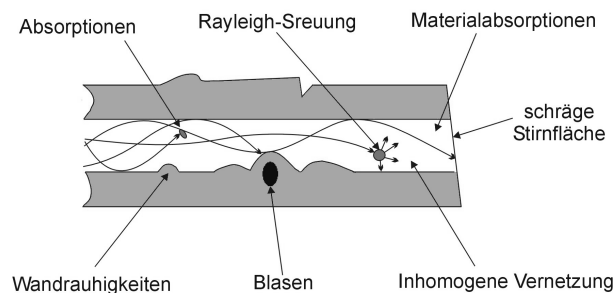


Bild 7: Verlustursachen in realen Polymerwellenleitern

Misst man die Dämpfung eines Wellenleiters in Abhängigkeit von der Wellenlänge (**Bild 8**), so ergibt sich ein Spektrum, dessen Charakteristik durch die chemischen Eigenschaften des Kernpolymers dominiert wird, jedoch auch von allen weiteren Faktoren beeinflusst wird. Bei der Wahl der Quelle muss daher deren spezifische Emissionswellenlänge mit dem „optischen Fenster“ des Polymers übereinstimmen.

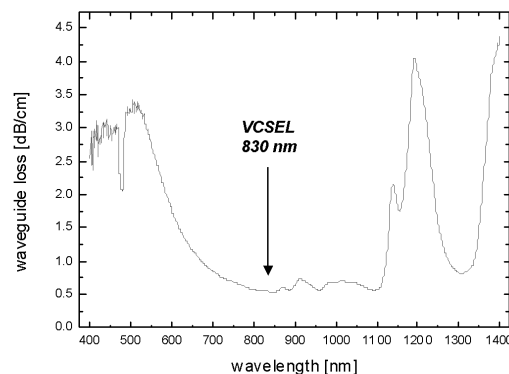


Bild 8: Wellenlängenabhängige Dämpfung eines heißgeprägten Wellenleiters. Die Dämpfung durchläuft beim verwendeten Kernmaterial im Wellenlängenbereich der verwendeten VCSEL ein Minimum

Neben der reinen Materialabsorption durch Schwingungsanregung in den Molekülen spielen Verunreinigungen des Kernmaterials als Streuzentren oder Absorptionspartikel eine wichtige Rolle. Hochreine Materialien und eine staubfreie Prozesstechnik sind daher unabdingbar für reproduzierbar gute Wellenleitung. Die Wandrauhigkeiten wirken ebenfalls als Streuzentren. Ihr Einfluss ist bei Einsatz von Polymeren mit geringer optischer Materialdämpfung dominant. Durch die im IZM Berlin etablierte Technologie des Heißprägens können Multimodewellenleiter mit einer optischen Dämpfung von unter 0,3 dB/cm zuverlässig realisiert werden. Messtechnisch wird diese Dämpfung mit der sogenannten Abschneidemethode bestimmt, wodurch die Einkoppelverluste an den Stirnflächen und somit die Einflüsse der Stirnflächenpräparation im Ergebnis minimiert werden (**Bild 9**).

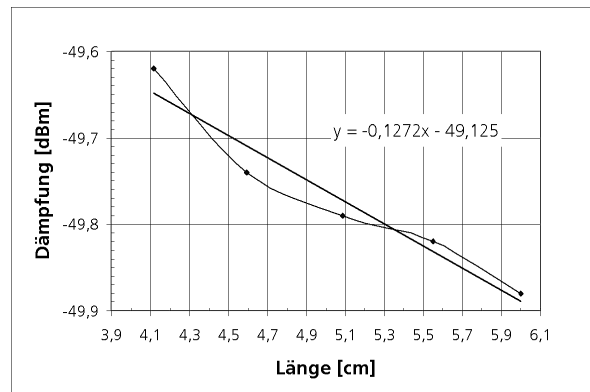


Bild 9: Bestimmung der Dämpfung nach der Abschneidemethode: $\alpha = 0,13$ dB/cm

Ein wesentlicher Vorteil der optischen Signalübertragung ist das geringe Übersprechen. Um dies tatsächlich zu gewährleisten, darf im Herstellungsprozess kein Kernmaterial zwischen den beiden Mantelfolien und den Wellenleitern verbleiben. Außerdem muss der Verbund zwischen strukturierter Mantelfolie und Deckfolie beziehungsweise Under- und Overcladding zuverlässig und die Brechzahldifferenz optimiert sein. In **Bild 10** sind die Ergebnisse für heißgeprägte Wellenleiter dargestellt. Der mittlere Wellenleiter wurde angeregt und auf der anderen Seite das entsprechende Ausgangssignal am angeregten und an den benachbarten Wellenleitern gemessen. Der Abstand zwischen den Wellenleitern beträgt 250 μm .

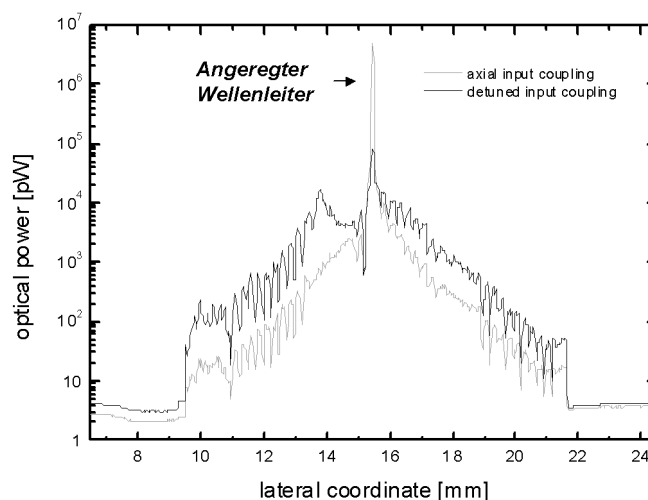


Bild 10: Übersprechen zwischen angeregtem und benachbartem Wellenleiter bei 633 nm ca. -30 dB

Die helle Kurve charakterisiert das Ausgangssignal bei genau axialer Anregung des Wellenleiters mit einer Singlemode-Faser und die dunkle Kurve bei gezielt dejustierter Anregung. In dem Fall wird ein deutlich stärkeres Übersprechen gemessen, wodurch die Notwendigkeit einer präzisen Aufbautechnik für die Laser- und Photodioden demonstriert wird.

6 Geometrische Charakterisierung

Neben der rein optischen Charakterisierung ist für die optische Aufbau- und Verbindungstechnik die Maßhaltigkeit der optischen Folien selbst und im Schaltungsträger wesentlich.

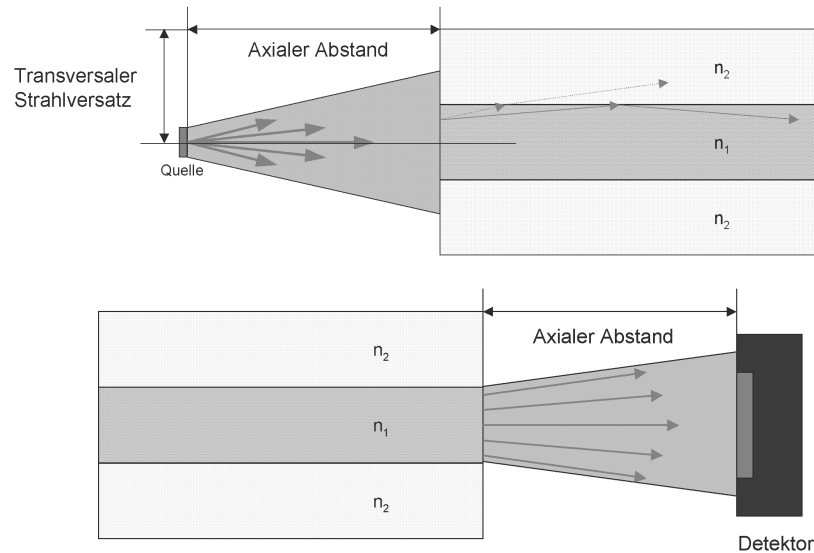


Bild 11: Schema der optischen Stirnflächeneinkopplung (oben) und Auskopplung (unten)

Möchte man für die Einkopplung beziehungsweise Auskopplung des Lichtes Laser- oder Photodiodenarrays verwenden, so müssen die Wellenleiter hinsichtlich ihres Abstandes untereinander und hinsichtlich ihrer Toleranzen vertikal zur Folienunterseite mit einer Genauigkeit besser als $\pm 5 \mu\text{m}$ positioniert sein. Dies ist notwendig, um den Toleranzen, die durch den Aufbau der Leiterplatte und die optische Ankopplung (axialer Abstand und lateraler Strahlversatz (**Bild 11**)) verursacht werden und zur Dämpfung der gesamten optischen Strecke beitragen, noch ausreichend Rechnung zu tragen. Dies kann bei den im IZM Berlin heißgeprägten Wellenleitern eingehalten werden (**Bild 12**).

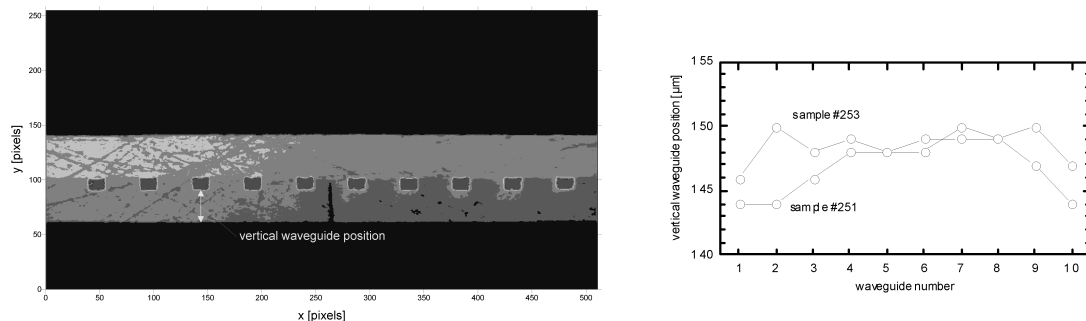


Bild 12: Abstandstoleranzen der Wellenleiterunterkante zur Bodenkante der Mantelfolie bei heißgeprägten Wellenleitern als Maß für die z-Komponente der Wellenleiterposition

7 Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Technologie können Multimode-Wellenleiter für elektrisch-optische Leiterplatten (EOCB) hergestellt werden. Sie haben eine optische Dämpfung von weniger als 0,3 dB/cm und eine Übersprehdämpfung von mehr als - 30 dB bei Wellenleiterabständen von 250 μm . Die Materialauswahl ermöglicht die Lamination in einen Schaltungsträger, ohne dass der Prozess umgestellt werden muss. Die Wellenhalter sind maßhaltig und haben eine Positionstoleranz in z-Richtung von $\pm 5 \mu\text{m}$.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Rahmen des Verbundprojektes "EOCB" durchgeführt und unter den Förderkennzeichen 16SV796/6 und 16SV797/7 vom BMBF gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Ansätze zur numerischen Simulation optischer Multimode-Verbindungen

Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein

Universität Paderborn C-LAB, Fürstenallee 11, D-33102 Paderborn, Germany

Thomas.Bierhoff@c-lab.de, Amir.Wallrabenstein@c-lab.de

A. Himmler, E. Griesse

Siemens SBS C-LAB, Fürstenallee 11, D-33102 Paderborn, Germany

Andreas.Himmler@c-lab.de, Elmar.Griesse@c-lab.de

G. Mrozynski

Universität Paderborn, Warburger Straße 100, D-33098 Paderborn, Germany

mrozynski@ieee.org

Zusammenfassung: *Ein Ansatz zur numerischen Analyse optischer Multimode-Wellenleiter auf der Basis eines hybriden Ray-Tracing-Verfahrens wird im folgenden vorgestellt. Neben einer anwenderfreundlichen Methode zur geometrischen Modellierung der Wellenleiterkernberandung werden die Modellierung mikrorauer Grenzschichten sowie deren Streueigenschaften beschrieben. Desweiteren wird die Integration lokaler Streuprozesse in die strahlenoptische Analyse mit Hilfe einer Monte-Carlo-Technik dargelegt. Neben der Verifikation des hybriden Ray-Tracing-Verfahrens an Hand einer planaren Wellenleiterstruktur wird der Einfluss der Rauigkeit auf die Wellenausbreitung in stark führenden Kanalwellenleitern dargestellt.*

1 Einleitung

Die numerische Analyse der Wellenausbreitung in optischen, hoch multimodalen Wellenleitern kann mit den für Monomode-Wellenleitern typischen wellenoptischen Analyseverfahren *Finite Element Method (FEM)* und *Beam Propagation Method (BPM)* nicht effizient berechnet werden. Eine strahlenoptische Analyse der Wellenausbreitung hingegen kann auf Grund der transversalen Abmessungen der Wellenleiter, die um ein Vielfaches größer sind als die optische Wellenlänge, angewendet werden. Durch die Verfolgung der Trajektorien lokaler ebener Wellen entlang des Wellenleiters erreicht man die Analyse der Wellenausbreitung in beliebig geformten Wellenleitern. Um dies auf Wellenleiter mit Stufenindexprofil anwenden zu können, muss die Wellenleiterkernberandung sowie deren Reflexions- und Transmissionsverhalten bekannt sein. Um den Einfluss von herstellungsbedingten Oberflächenrauigkeiten in die Analyse mit einzubeziehen, muss das Reflexionsverhalten um das Streuverhalten mikrorauer dielektrischer Grenzschichten erweitert werden. Dies wird durch ein nachfolgend vorgestelltes wellenoptisches Streulichtmodell erzielt. Auf Grund der kleinen Oberflächenstörungen, deren Abmessungen um ein Vielfaches kleiner sind als die optische Wellenlänge, kann keine direkte strahlenoptische Einbeziehung der Oberflächenrauigkeiten in das Ray-Tracing-Verfahren durch eine entsprechende geometrische Modellierung der Wellenleiterkernberandung durchgeführt werden. Um die Kombination aus strahlenoptischer Berechnung der Wellenausbreitung und wellenoptischer Modellierung des Reflexions- und Streuverhaltens hervorzuheben, wird das entwickelte Verfahren als hybrides Ray-Tracing bezeichnet.

2 Modellierung der Wellenleiter

Die strahlenoptische Analyse der Wellenausbreitung in optischen Multimodewellenleitern mit Stufenindexprofil erfordert eine genaue geometrische Beschreibung der dielektrischen Grenzschichten des Wellenleiterkerns sowie deren physikalischer Eigenschaften. Beides zusammen bestimmt das lokale Reflexions- und Transmissionsverhalten einer auf die Grenzschicht einfallenden ebenen Welle. Die physikalischen Eigenschaften umfassen neben den abschnittsweise homogenen Brechungsindizes der verwendeten Wellenleitermaterialien auch die Beschreibung herstellungsbedingter Oberflächenrauigkeiten. Deren Einfluss auf die Wellenausbreitung lässt sich mit Hilfe eines wellenoptischen Streulichtmodells, das die optischen Streueigenschaften mikrorauer Oberflächen charakterisiert, beschreiben. Die Modellierung der Wellenleiter wird in zwei Teilschritten erzielt. In einem ersten Schritt wird die Geometrie der Wellenleiterkernberandung definiert, der dann in einem zweiten Schritt die physikalischen Eigenschaften zugeordnet werden.

2.1 Geometrische Modellierung der Wellenleiter

Das hier entwickelte geometrische Modellierungsverfahren [1] liefert eine analytische Beschreibung der Wellenleiterkernberandung unter Verwendung parametrischer Vektorfunktionen. Die Berechnung der Berandungsflächen beruht auf einer zuvor definierten Querschnittstrajektorie sowie einer Axialtrajektorie, die die longitudinale Ausrichtung des Wellenleiters beschreibt. Beide Trajektorien werden durch die Definition von Knotenpunkten, die als Stützstellen der jeweiligen Trajektorie dienen, bestimmt. Im Unterschied zur Axialtrajektorie müssen die Knotenpunkte der Querschnittstrajektorie naturgemäß in einer Ebene liegen und zu einer geschlossenen Trajektorie führen. Die Axialtrajektorie, die im gesamten Gültigkeitsbereich stetig differenzierbar sein muss, kann im einfachsten Fall eine durch zwei Knotenpunkte abgeschlossene Strecke darstellen und zur Modellierung longitudinal homogener Wellenleiter verwendet werden. Zur Modellierung longitudinal inhomogener Wellenleiter wird abschnittsweise die Axialtrajektorie durch parametrische Vektorfunktionen beschrieben, welche auf einer Interpolation mit kubischen Splines basieren. Diese Form der Beschreibung stellt sicher, dass die Axialtrajektorie stets stetig differenzierbar ist und erlaubt es, beliebig geformte Punkt-zu-Punkt Verbindungen mit einer geringen Anzahl von Vektorfunktionen zu modellieren. Die Abschnitte zwischen zwei benachbarten Knotenpunkten der Querschnittstrajektorie können sowohl durch spline -interpolierende parametrische Vektorfunktionen als auch durch parametrische Geradenfunktionen beschrieben werden.

Mit Hilfe der getrennt modellierten Axial- und Querschnittstrajektorie wird in einem nachfolgenden automatischen Berechnungsverfahren abschnittsweise die Berandung des Wellenleiterkerns bestimmt. Jede dieser Berandungsabschnitte wird dabei durch zwei Knotenpunkte der Axial- und Querschnittstrajektorie begrenzt und durch eine parametrische Vektorfunktion, die jede Position innerhalb des Abschnittes adressieren kann, analytisch beschrieben.

2.2 Modellierung mikrorauer Oberflächen

Aufgrund der im Vergleich zur optischen Wellenlänge großen transversalen Abmessungen des Wellenleiterkerns kann das Ersatzmodell "dielektrischer Halbraum" zur Charakterisierung mikrorauer Wellenleiterberandungen verwendet werden. Die Oberflächenrauigkeit lässt sich durch eine Deformationsfunktion f beschreiben, die die Abweichung zwischen der real verlaufenden Oberfläche $z = f(x, y)$ und der ungestörten Ebene $z = 0$ definiert, die die Bereiche mit unterschiedlichen Brechungsindizes trennt. Durch Bildung der Fouriertransformierten der

Deformationsfunktion erhält man das Raumspektrum der Oberflächenrauigkeit, das die Oberflächenstörung in Betrag und Phase beschreibt.

$$F(h, k) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j(hx+ky)} dx dy \quad (1)$$

Da die Oberflächenrauigkeit als stochastischer Prozess interpretiert werden kann und deren Verlauf im allgemeinen nicht als bekannt vorausgesetzt werden kann, wird eine statistische Beschreibungsform der Oberflächenstörungen verwendet. Statistische Beschreibungsformen, die im Scharmittel die Oberflächenstörung beschreiben, benötigen nur einen kleinen Parametersatz zur Charakterisierung der Störung und beschreiben eine Vielzahl verschiedener Oberflächenstörungen mit ähnlichen statistischen Eigenschaften. Sie stellen somit einen effizienten Zugang zur Beschreibung rauer Oberflächen dar, weisen aber gleichzeitig auch einen Informationsverlust auf. Als Beschreibungsform der Störungen wird die Autokorrelationsfunktion gewählt. Sie bestimmt im Scharmittel die Korrelationseigenschaften von Oberflächenrauigkeiten unterschiedlicher Materialproben und definiert sich aufgrund der angenommenen Ergodizität der Oberflächenstörungen durch nachfolgendes Faltungsintegral.

$$C(u, v) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{4L^2} \iint_{-L}^L f(x, y) f(x - u, y - v) dx dy \quad (2)$$

Durch Wahl einer geeigneten Funktion [2], hier eine exponentieller Ansatz, sowie von drei Parametern, die Rautiefenvarianz B^2 und zwei Korrelationslängen D_x, D_y , läßt sich das Korrelationsverhalten der Oberflächenrauigkeit modellieren.

$$C(u, v) = B^2 \exp \left(- \left| \frac{u}{D_x} \right| - \left| \frac{v}{D_y} \right| \right) \quad (3)$$

Einen Zusammenhang zwischen der statistischen und der deterministischen Beschreibungsform der Oberflächenstörung erhält man mittels des *Wiener Khintchine Theorems* [6], das den Zusammenhang zwischen der Autokorrelationsfunktion und dem Raumspektrum beschreibt.

$$\iint_{-\infty}^{\infty} C(u, v) e^{-j(hu+kv)} du dv = \langle |F(h, k)|^2 \rangle \quad (4)$$

Anhand von Gl. (4) ist zu erkennen, dass die Phaseninformation der Oberflächenrauigkeit durch die reduzierte statistische Beschreibungsform verloren geht.

Auf der Basis der räumlichen Modellierung der Oberflächenrauigkeiten müssen die optischen Eigenschaften dieser Oberflächen und ihre Auswirkungen auf das Reflexions- und Transmissionsverhalten einer polarisierten ebenen Welle bestimmt werden. Hierzu wurde das Reflexions- und Transmissionsverhalten einer polarisierten ebenen Welle am dielektrischen Halbraum ohne Oberflächenstörung um das Streuverhalten mikrorauer Störungen erweitert. Der reflektierten und transmittierten ebenen Fresnel-Welle werden jeweils von einem kontinuierlichen Spektrum ebener Streuwellen überlagert [3], wobei die Fresnel-Wellen um die in Streuung befindliche Leistung gedämpft sind. Zur Berechnung der Streuwellen wurde ein vektorielles Streulichtmodell [4] auf der Basis eines störungstheoretischen Ansatzes erster Ordnung entwickelt. Dieses Modell berechnet den elektrischen Feldstärkevektor einer im psk -Koordinatensystem dargestellten Streuwelle entsprechend Bild 1 mit Hilfe einer Streulichtmatrix und dem elektrischen

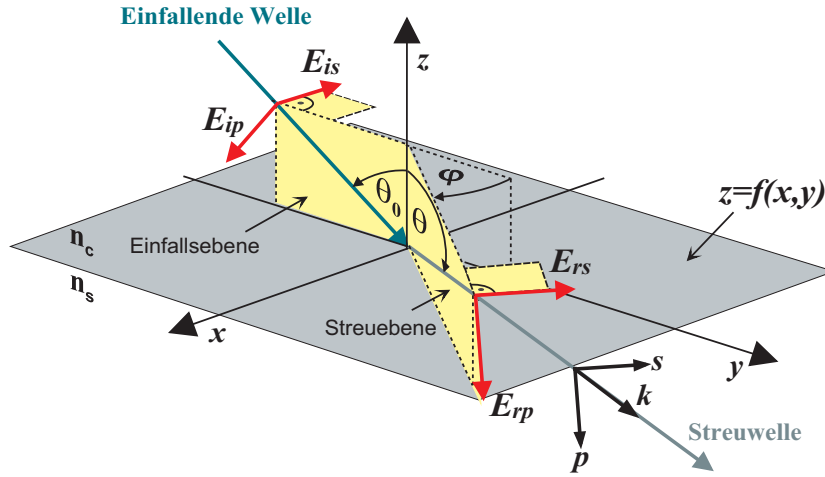


Bild 1: Elektrische Feldstärkevektor einer einfallenden und gestreuten ebenen Welle im lokalen psk -Koordinatensystem

Feldstärkevektor $\vec{E}_i$ der anregenden ebenen Welle.

$$\begin{pmatrix} E_{(r,t)s}(\theta, \varphi, \theta_0) \\ E_{(r,t)p}(\theta, \varphi, \theta_0) \end{pmatrix} = (n_c^2 - n_s^2) F(h, k) \underbrace{\begin{pmatrix} q_{ss}^{(r,t)}(\theta, \varphi, \theta_0) & q_{ps}^{(r,t)}(\theta, \varphi, \theta_0) \\ q_{sp}^{(r,t)}(\theta, \varphi, \theta_0) & q_{pp}^{(r,t)}(\theta, \varphi, \theta_0) \end{pmatrix}}_{= \mathbf{J}_r(\theta, \phi)} \begin{pmatrix} E_{is}(\theta_0) \\ E_{ip}(\theta_0) \end{pmatrix} \quad (5)$$

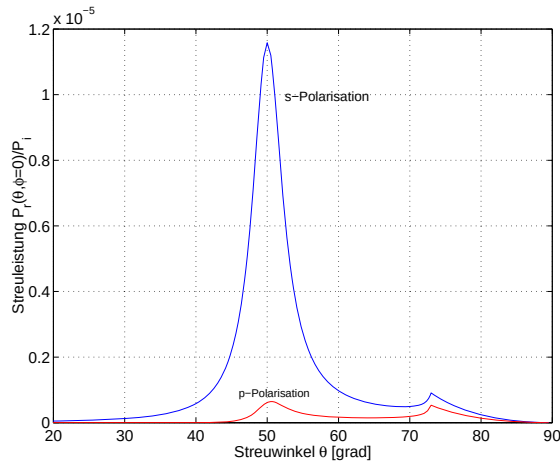
Unter der Voraussetzung eines bekannten Raumspektrums $F(h, k)$ lässt sich somit die Polarisationsart, der Betrag und die Phasenlage einer Streuwelle bestimmen. Da aber im allgemeinen das Raumspektrum nicht bekannt ist, erhält man aus Gl. (5) durch Vektornormierung nur die Polarisation der betrachteten Streuwelle. Wendet man Gl. (4) unter Verwendung eines Autokorrelationsmodells zur Beschreibung der Rauigkeit an und geht zu einer Leistungsbetrachtung über, so kann man die pro Raumwinkel reflektierte bzw. transmittierte Leistung aus Gl. (5) berechnen. Diese setzen sich aus einem Fresnelterm 0. Ordnung und einem Streuterm 1. Ordnung zusammen.

$$\frac{P_r(\theta_0)}{P_i} = a \underbrace{\frac{|\vec{r}_0 \vec{E}_i|^2}{|\vec{E}_i|^2}}_{= R_0(\theta_0)} + (n_c^2 - n_s^2) \underbrace{\iint_{-\infty}^{\infty} \frac{\Re(\beta_z)}{\beta_{zo}} \frac{|\mathbf{J}_r \vec{E}_i|^2}{|\vec{E}_i|^2} W(\beta_x, \beta_y - \beta_{yo}) d\beta_x d\beta_y}_{= R_d(\theta, \varphi, \theta_0)} \quad (6)$$

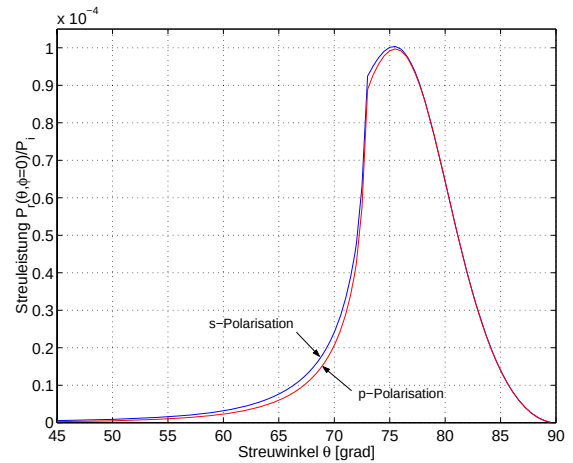
In dieser Gleichung stellen β_z und β_{zo} die Wellenzahlen der Streuwelle und der einfallenden Welle in Normalenrichtung der Oberfläche dar. Der Dämpfungsfaktor a dient der Energiekorrektur der reflektierten ebenen Fresnel-Welle und ist so gewählt, daß die gesamte reflektierte und transmittierte Leistung der Leistung der einfallenden Welle entspricht. Somit ist die Energieerhaltung eines lokalen Streuprozesses erfüllt.

Der Einfluss der Polarisation der anregenden ebenen Welle sowie der Korrelationslänge der Oberflächenrauigkeit auf das reflektierte Streuspektrum wird in den nachfolgenden Bildern dargestellt. Diese geben das Streuspektrum in zwei zueinander orthogonalen Ebenen $\varphi = 0$ (Einfallsebene) und $\theta = \theta_0$ wieder.

Für die Darstellung des Polarisationsinflusses sind jeweils zwei Streuleistungsprofile in der Einfallsebene bei Anregung durch eine orthogonal linear polarisierte ebene Welle im Bereich der Totalreflexion Bild 2(b) und außerhalb dieses Bereiches Bild 2(a) aufgeführt. Die Streuleistungsspektren weisen im Bereich der Totalreflexion $\theta_0 \in (\theta_c, \pi/2)$ nur eine schwache



(a) Streuleistungsprofil für $\theta_0 = 50^\circ$

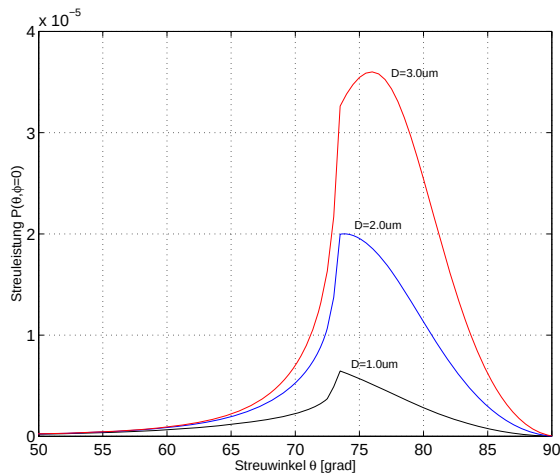


(b) Streuleistungsprofil für $\theta_0 = 80^\circ$

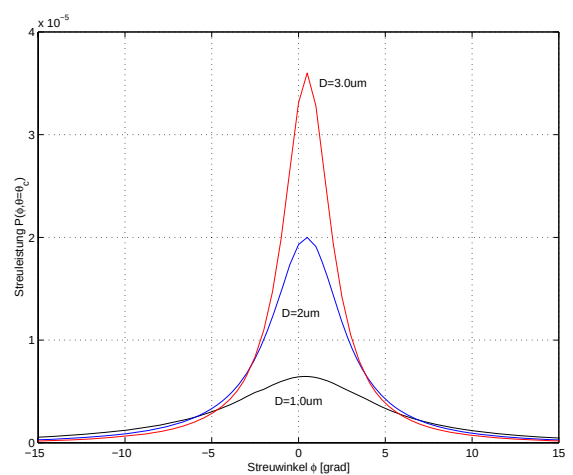
Bild 2: Streuleistungsprofile in der Einfallsebene $\varphi = 0$ bei linear orthogonal polarisierter Anregung ($n_c = 1.56$, $n_s = 1.49$, $\bar{\sigma} = 50\text{nm}$, $D_x = D_y = 2.0\mu\text{m}$)

Polarisationsabhängigkeit von der jeweiligen Polarisation der einfallenden ebenen Welle auf. Außerhalb des Bereiches der Totalreflexion treten erheblich stärkere Polarisationsabhängigkeiten auf, die jedoch auf die Wellenausbreitung einen untergeordneten Einfluß haben.

Die starke Abhängigkeit der Streuspektren von dem Oberflächenparameter Korrelationslänge wird in Bild 3 dargestellt.



(a) Streuleistungsprofil in der Ebene $\varphi = 0$ (Einfallsebene)



(b) Streuleistungsprofil in der Ebene $\theta = \theta_0$

Bild 3: Streuleistungsprofile bei unterschiedlichen Korrelationslängen der Oberflächenrauheiten ($n_c = 1.56$, $n_s = 1.49$, $\bar{\sigma} = 50\text{nm}$, $\theta_0 = 80^\circ$)

3 Hybrides Ray-Tracing-Verfahren

Durch Integration des in 2.2 vorgestellten wellenoptischen Streulichtmodells in das strahlenoptische Analyseverfahren erhält man ein hybrides Analyseverfahren zur Berechnung der Wellenausbreitung unter Berücksichtigung des Einflusses mikrorauer dielektrischer Grenzschichten. Als Anregung der hybriden Ray Tracing Analyse dienen eine oder mehrere ebene Wellen. Das nachfolgend beschriebene Verfahren wird für eine eingeprägte ebene Welle vorgestellt. Falls mehr als eine ebene Welle als Anregung dient, so wird das Verfahren für jede dieser Wellen einzeln durchgeführt und die Ergebnisse werden anschließend überlagert.

3.1 Monte-Carlo basierte Strahlverfolgung

Da durch die Streueigenschaften rauer Oberflächen die reflektierte Leistung auf ein kontinuierliches Spektrum ebener Wellen aufgeteilt wird und diese in einem erneuten lokalen Streuprozess ihre Leistung wiederum auf ein kontinuierliches Spektrum ebener Wellen aufteilen, steigt die Zahl der zu verfolgenden Strahlen drastisch an. Eine deterministische Strahlverfolgung ist somit aufgrund der hieraus resultierenden hohen Speichieranforderungen nicht mehr möglich. Anstelle einer deterministischen Strahlverfolgung wird eine statistische Strahlverfolgung unter Einbeziehen einer Monte-Carlo-Technik verwendet. Trifft ein Strahl auf eine raue Grenzschicht, so wird das resultierende Streuleistungsspektrum berechnet. Durch anschließende Festlegung einer eindeutigen Abbildungsvorschrift

$$k = S(\theta, \varphi) \quad (7)$$

wird eine eindimensionale parametrische Darstellung des Streuleistungsspektrums $R_d = R_d(k)$ erzielt. Anschließende Integration über das Streuleistungsspektrum entlang des Parameters k führt zu der für die statistische Strahlverfolgung benötigten Wahrscheinlichkeitsfunktion $W(k)$.

$$W(k) = \int_0^k R_d(k') dk' \quad (8)$$

Die Ausbreitungsrichtung der zu verfolgenden Streuwelle wird durch Ziehen einer Zufallszahl r festgelegt. Der Gültigkeitsbereich der Zufallszahl liegt zwischen null und der Summe aus dem Endwert der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und dem energiekorregierten Fresnelleistungskoeffizienten in Reflexion.

$$r \in [0, W(\max[k]) + aR_0(\theta_0)] \quad (9)$$

Liegt die Zufallszahl im Bereich $r \leq W(\max[k])$, liegt eine Streuwelle vor, deren Ausbreitungsrichtung durch das Streuwinkelpaar (θ, φ) festgelegt ist. Dieses Streuwinkelpaar erhält man durch Auswerten der Umkehrfunktion der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $W(k)$ sowie der Abbildungsvorschrift $S(k)$.

$$\begin{aligned} r = W(k) &\rightarrow W^{-1}(k) = k \\ &\rightarrow S^{-1}(k) = (\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

Wird eine Zufallszahl gezogen, die größer ist als der Endwert der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, so liegt eine ideal reflektierte Fresnelwelle vor, deren Ausbreitungsrichtung durch den Reflexionswinkel $\theta = \theta_0$ festgelegt ist. Die Leistung der reflektierten Fresnelwelle sowie aller auftretenden Streuwellen ist stets gleich der Leistung der einfallenden Welle reduziert um die in

Transmission abgestrahlte Leistung. Die Nachbildung der auftretenden lokalen Streuprozesse innerhalb des Wellenleiters wird durch wiederholte Verfolgung des eingepprägten Strahls entlang seiner durch statistische Prozesse festgelegten Trajektorie innerhalb des Wellenleiterkerns erreicht. Bild 4 verdeutlicht dieses Vorgehen. Jeder der M eingepprägten Strahlen breitet sich entlang einer bestimmten Strahltrajektorie aus, die überlagert in Summe den Einfluss des Streuverhaltens auf die Wellenausbreitung beschreibt. Um die Energieerhaltung zu gewährleisten, muss jeder detektierte Strahl auf die Anzahl M der eingepprägten Strahlen normiert werden.

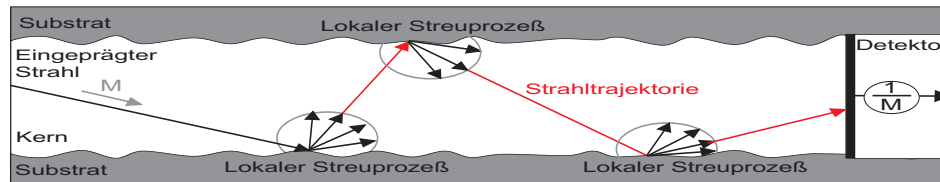


Bild 4: Statistische Strahlverfolgung in einer planaren Wellenleiterstruktur

4 Verifikation an Hand planarer Wellenleiterstrukturen

Zur Verifikation des hybriden Ray-Tracing-Verfahrens wurde die Wellenausbreitung in einer planaren Wellenleiteranordnung mit unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten berechnet und mit Ergebnissen des wellenoptischen Analyseverfahrens der Coupled-Power-Theorie (CPT) [6] verglichen. Die CPT berechnet die Modenkopplung in Wellenleitern mit Oberflächenrauigkeiten und setzt die Kenntnis der transversalen Feldverteilung der einzelnen ausbreitungsfähigen Moden sowie der Strahlungsmoden voraus. Da die Feldverteilungen der Moden im allgemeinen nicht bekannt sind und auch im Fall von hoch multimodalen Wellenleitern mit beliebigen Querschnitten nicht berechnet werden können, ist dieses Verfahren nur für einfache Wellenleiterstrukturen einsetzbar. Eine weitere Einschränkung dieses Verfahrens ist die Forderung nach einem annähernd konstanten Feldverlauf der Moden innerhalb der Oberflächenstörung. Dies schränkt die Anwendbarkeit weiterhin auf schwach führende Wellenleiter ein. Als zu analysierende Wellenleiterstruktur wurde ein schwach führender symmetrischer planarer Wellenleiter verwendet, dessen Modenfeldverläufe allgemein [6] bekannt sind. Die Oberflächenrauigkeiten wurden in beiden Verfahren mit Hilfe eines gaußförmigen Autokorrelationsmodells beschrieben. Der Kerndurchmesser des Wellenleiters betrug $h = 100\mu m$. Bei einer numerischen

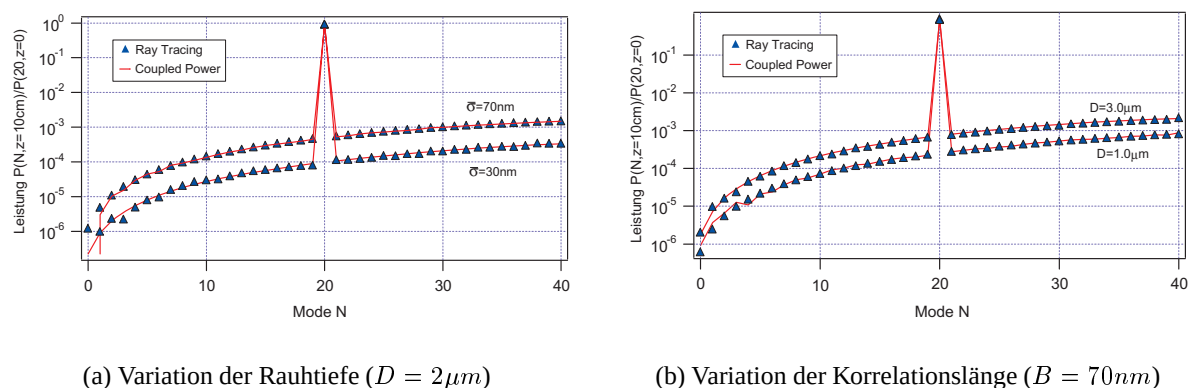


Bild 5: Normierte Modenleistungsverteilung eines planaren Wellenleiters bei Anregung des TE_{20} -Modens berechnet mit Hilfe der Coupled-Power-Theorie sowie dem vorgestellten hybriden Ray-Tracing-Verfahren ($n_c = 1.51$, $n_s = 1.5$)

Apertur von 0.17 und einer optischen Wellenlänge von $\lambda = 0.85\mu m$ weist der Wellenleiter 41 geführte Moden auf. Angeregt wurde der Wellenleiter mit dem TE -Mode $N = 20$. Die Modenverteilung nach einer Propagationsstrecke von $z = 10cm$ wurde für unterschiedliche Rauigkeitsparameter berechnet und in Bild 5 dargestellt. Die Ergebnisse beider Verfahren zeigen eine exzellente Übereinstimmung auf.

5 Analyse gerader Kanalwellenleiter

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeiten auf das stationäre Übertragungsverhalten eines rechteckförmigen, longitudinal homogenen Wellenleiters wird im weiteren untersucht. Neben der Dämpfung, ohne Berücksichtigung intrinsischer Verluste, wird die Zusammensetzung der detektierten Leistung nach einer definierten Propagationsstrecke untersucht. Als Anregung dient ein diskretes Spektrum ebener Wellen, das die numerische Apertur des Wellenleiters homogen ausleuchtet. Die transversalen Abmessungen des zu untersuchenden Wellenleiters betragen $100 \times 100\mu m^2$. Die numerische Apertur des stark führenden Wellenleiters beträgt 0.46. Als Oberflächenstörung wurde eine homogene, isotrope Rauigkeit, beschrieben durch ein exponentielles Autokorrelationsmodell mit einer Standardabweichung der Rautiefe von $B = 50nm$, verwendet. Bild 6(a) stellt die Wellenleiterdämpfung dar, die sich auf Grund transmittiver Streuverluste, hervorgerufen durch Oberflächenrauigkeiten, ergibt. In ihr ist nicht die Materialdämpfung berücksichtigt. Aus den Ergebnissen der Ray-Tracing Analyse können somit unter Verwendung

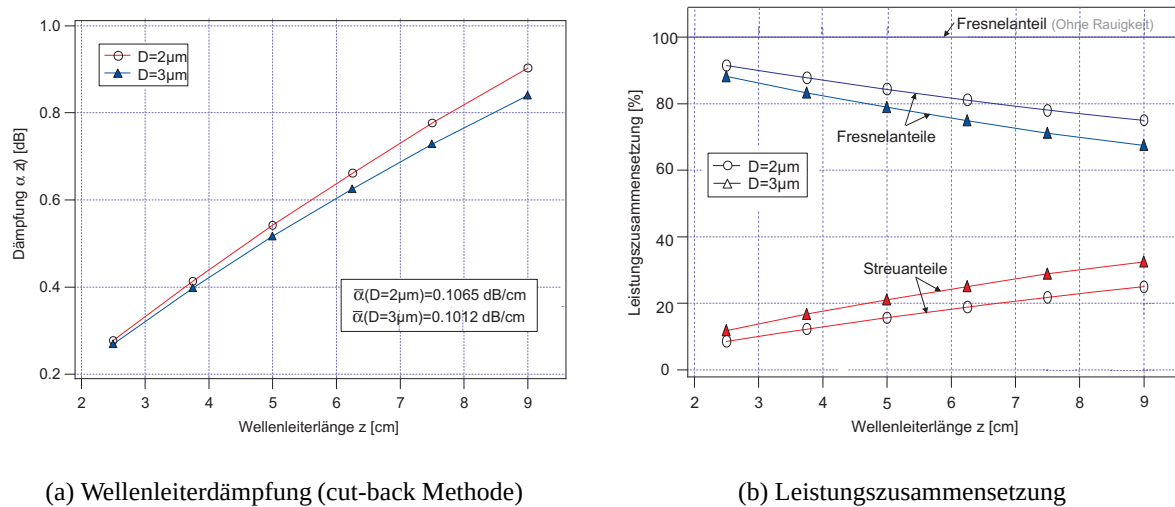


Bild 6: Wellenleiterdämpfung und Leistungszusammensetzung der detektierten Leistung bei Variation der Korrelationslänge

der *cut-back*-Methode die gemittelten Dämpfung $\bar{\alpha}(D = 2\mu m) = 0.1065 \text{ dB/cm}$ und $\bar{\alpha}(D = 3\mu m) = 0.1012 \text{ dB/cm}$ berechnet werden. Hierbei zeigt sich, dass die Korrelationslänge keinen signifikanten Einfluss auf das Dämpfungsverhalten longitudinal homogener Wellenleiter hat. Die Leistungszusammensetzung der nach einer definierten Propagationsstrecke detektierten Leistung kann man in eine Streuleistung, transportiert durch Streuwellen, und eine Fresnelleistung, transportiert durch die Fresnelwellen, aufteilen. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Wellenausbreitung lässt sich dann an Hand des Streuleistungsanteils quantifizieren. Entsprechend Bild 6(b) zeigt sich dabei, dass der Einfluss der Oberflächenrauigkeit mit zunehmender Propagationsstrecke ansteigt, was sich durch einen ansteigenden Streuanteil und einen abnehmenden Fresnelanteil zeigt.

6 Zusammenfassung

Es wurde ein hybrides Ray-Tracing-Verfahren zur numerischen Analyse von optischen Multimodewellenleitern vorgestellt. Das Verfahren stellt neben einer anwenderfreundlichen geometrischen Modellierung der Wellenleiterkernberandungen auch ein wellenoptisches Verfahren zur Modellierung der Streueigenschaften bei mikrorauen Berandungen bereit, in dem die Rauigkeit durch ein Autokorrelationsmodell beschrieben wird. Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Technik wurde das wellenoptische Modell zur Beschreibung lokaler Streuprozesse an rauen Berandungen in die Strahlverfolgung eingebunden. Die hieraus resultierende statistische Strahlverfolgung zur polarisationsabhängig Berechnung der Lichtausbreitung wurde anhand planarer Wellenleiterstrukturen mit Hilfe des wellenoptischen Analyseverfahrens der Coupled-Power-Theorie für unterschiedliche Rauigkeiten verifiziert. Die anschließende Anwendung des Verfahrens auf longitudinal homogene Kanalwellenleiter zeigte den Einfluss der Rauigkeit auf die Wellenausbreitung in Form zunehmender Dämpfungswerte sowie einen zunehmenden Streuanteil der detektierten Leistung für zunehmende Propagationsstrecken auf.

Literatur

- [1] Th. Bierhoff, A. Himmler, E. Gries, G. Mrozynski: Modeling of board integrated step index waveguides for advanced ray tracing analysis. *Proc. of the 6th Workshop Optics in Computing Technology (former Workshop Optik in der Rechentechnik (ORT01))*, pp. 37-43 Paderborn, Germany, April 2001.
- [2] F. Ladouceur, J.D Love, T.J. Senden: Measurement of Surface Roughness in Buried Channel Waveguides. *Electronic Letters*, Vol.28, pp. 1321-1322, July 1992.
- [3] Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, G. Mrozynski, A. Himmler, E. Gries: An approach to model wave propagation in highly multimode optical waveguides with rough surfaces. *Proc. of the 10th International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET99)*, pp. 515-520, Magdeburg (Germany), September 1999.
- [4] Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, G. Mrozynski, A. Himmler, E. Gries: Ray tracing technique and its verification for the analysis of highly multimode optical waveguides with rough surfaces. *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.37, No.5, pp. 3307-3310, September 2001.
- [5] T. Bierhoff, E. Gries, G. Mrozynski: An efficient Monte Carlo based ray tracing technique for the characterization of highly multimode dielectric waveguides with rough surfaces. *Proc. of the 30th European Microwave Conference (EuMC2000)*, pp. 379-382 Paris (France), October 2000.
- [6] D. Marcuse: *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. Academic Press, New York, USA, 1991.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Rahmen der Projekte *EOCB* und *OptoSys* durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 16 SV 802/6, 16 SV 803/7 und 01 BP 801/01 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Komponenten, Koppelverfahren und Demonstratoren elektrisch-optischer Leiterplatten

A. Himmler, E. Gries

Siemens SBS C-LAB, Fürstenallee 11, D-33102 Paderborn

Andreas.Himmler@c-lab.de, Elmar.Gries@c-lab.de

G. Spickermann, H. Franke,

OECA GmbH, Handwerkerstraße 13, D-15366 Dahlewitz-Hoppegarten

oea.info@t-online.de

W. Süllau

ILFA GmbH, Lohweg 3, D-30559 Hannover

wsuellau@ilfa.de

H. Schröder

Fraunhofer Institute IZM, PCB Packaging, Gustav-Meyer-Allee 25, D-13355 Berlin

schroeder@izm.fhg.de

E. Strake

Robert Bosch GmbH, FV/SLD-Hi, Robert-Bosch-Str. 200, D-31139 Hildesheim

engelbert.strake@de.bosch.com

Zusammenfassung: Die Erweiterung konventioneller elektrischer Leiterplatten um integrierte optische Verbindungen ist ein erfolversprechender Ansatz, um die aus der elektrischen Verbindungstechnik auf Leiterplattebene resultierenden Probleme zu lösen. In diesem Beitrag werden solche hybriden elektrisch-optischen Leiterplatten und die erforderlichen Sende- und Empfangskomponenten vorgestellt. Die Anforderungen ihrer Kopplung an die optischen Wellenleiter werden zusammen mit Koppelkonzepten diskutiert. Als Sende- und Empfangskomponenten werden hier vierkanalige Module verwendet, die Laser- bzw. Fotodiodenzeilen auf Lead-Frames enthalten. Die Kopplung dieser Module an die Wellenleiter erfolgt mittels Stirnflächenkopplung.

1 Einleitung

Der Leistungsumfang und die Verarbeitungsgeschwindigkeit mikroelektronischer Schaltungen ist in der Vergangenheit deutlich stärker gewachsen als die Bandbreite der elektrischen Verbindungen zwischen ihnen. Deutlich wird dieses an der Entwicklung der Taktfrequenzen von Mikroprozessoren — diese werden im Allgemeinen als Maß für deren Leistungsfähigkeit angegeben — im Vergleich zu den Taktfrequenzen auf den Adress- und Datenbussen zwischen den Mikroprozessoren und dem Speicher.

Für die nächsten 10 bis 15 Jahren wird erwartet, dass die Weiterentwicklung der Mikroelektronik nicht durch fundamentale physikalische Effekte begrenzt wird [1]. Daher wird die Bandbreite von Chip zu Chip-Verbindungen einen weiterhin ansteigenden Einfluss auf die erreichbare

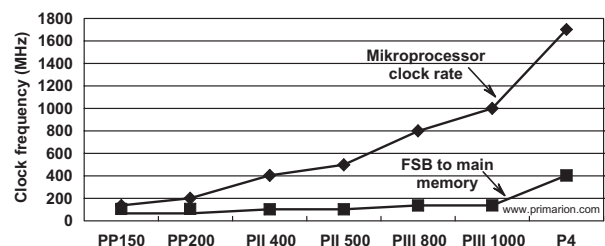


Bild 1: Entwicklung der Prozessortaktfrequenzen und den Taktfrequenzen auf Bussen innerhalb von Computern (Quelle: www.primarion.com)

Leistungsfähigkeit elektronischer Systeme haben. In der International Technology Roadmap der Semiconductor Industry Association [1] werden für das Jahr 2010 Taktfrequenzen von 10 GHz für Mikroprozessoren erwartet. Vor kurzem hat INTEL gezeigt, dass diese Taktfrequenzen mit Siliziumtechnologie erreicht werden können. Es wurde demonstriert, dass Silizium-Transistoren mit Gate-Längen im Bereich von 20 nm bis 30 nm herstellbar sind, die bei Frequenzen bis zu 20 GHz arbeiten.

Die Leistungsfähigkeit elektrischer Verbindungen wird durch die ihnen zugrunde liegenden physikalischen Effekte begrenzt, die begrenzte Bandbreite-Länge-Produkte und die Empfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen verursachen. Für Verbindungen innerhalb elektronischer Systeme und zwischen Teilsystemen wurden deshalb faseroptische Verbindungen kurzer Reichweite entwickelt, die erfolgreich am Markt eingeführt sind. Beispiele hierfür sind parallele faseroptische Module, die von mehreren Firmen angeboten werden (z. B. Agilent, Emcore, Gore, Infineon, Optobahn, Picolight, Zarlink). Diese haben bis zu 12 Kanäle mit Datenraten von 2,5 Gbit/s je Kanal. Derzeit befinden sich Module mit Datenraten von 10 Gbit/s in der Entwicklung.

Um die Vorteile optischer Verbindungen auch auf Leiterplattebene zu nutzen, wurde eine Reihe von Konzepten entwickelt. Für diese werden entweder optische Fasern [2, 3, 4, 5, 6] oder Kanalwellenleiter aus Polymeren [7, 8, 9] verwendet. Der Nachteil der faserbasierten Lösungen ist ihre geringe Verbindungsflexibilität. Mit ihnen sind beispielsweise 1 auf n Verzweiger nur mit großem Aufwand herstellbar, Glasfasern erfordern große Biegeradien und damit viel Platz auf den Leiterplatten, und jede Faser muss einzeln verlegt werden. Letzteres erfordert aufwendige Herstellungsprozesse. Zur Vermeidung dieser Probleme wurden Konzepte auf der Basis polymerer Kanalwellenleiter entwickelt, die auf planaren Substraten herstellbar sind [7, 8, 9]. Der Nachteil dieser Lösungen ist, dass sie nicht in Standard-Leiterplatten integriert werden können, da sie die Temperaturen während der Leiterplattenherstellung und des Lötprozesses nicht überstehen. Somit sind sie nicht kompatibel mit dem gegenwärtigen Herstellungsprozess für Leiterplatten. Derartige Kanalwellenleiter sind gedacht für die Anwendung in Rückwänden.

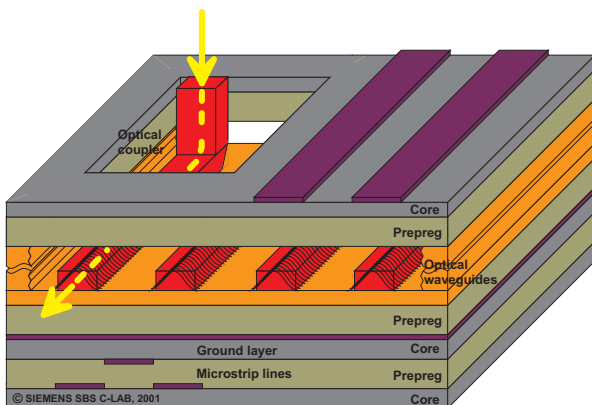


Bild 2: Konzept einer elektrisch-optischen Leiterplatte

Bei der Einführung einer optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplattebene ist zu berücksichtigen, dass diese nur dann technisch und wirtschaftlich anwendbar ist, wenn mehrere technologische und funktionale Voraussetzungen erfüllt sind. Die wichtigste ist die Kompatibilität mit der derzeitigen, weitestgehend standardisierten Leiterplattentechnologie. Denn optische Verbindungen auf Leiterplattebene können nur als Weiterentwicklung der gegenwärtigen Technologie eingeführt werden, weil aus verschiedenen Gründen weiterhin eine elektrische

Verbindungstechnik auf Leiterplattebene erforderlich sein wird. Beispielsweise muss nicht jede Verbindung auf Leiterplatten für hohe Bandbreiten ausgelegt sein, und für die Energieversorgung der Mikroelektronikkomponenten sind elektrische Verbindungen erforderlich.

Eine optische Aufbau- und Verbindungstechnik, mit der die Kompatibilität zur existierenden Leiterplattentechnologie gewahrt wird, ist durch die Integration optischer Wellenleiter in konventionelle Leiterplatten möglich [10]. Dabei ist zu beachten, dass zur erfolgreichen Anwendung einer solchen hybriden elektrisch-optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auch Erwei-

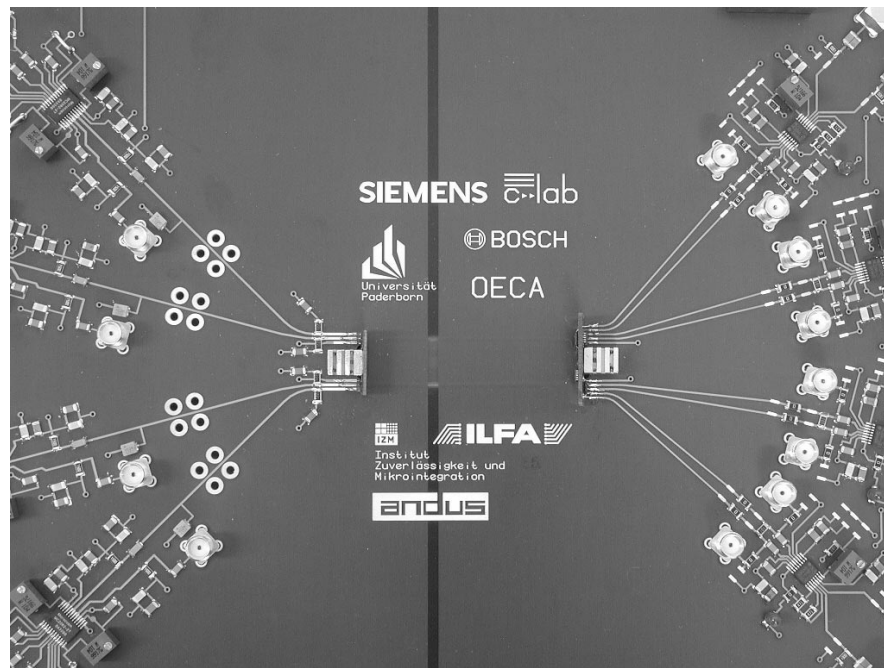


Bild 3: Demonstrator mit vierkanaliger, paralleler, elektrisch-optischer Übertragungsstrecke

terungen des gegenwärtigen Designprozesses elektronischer Systeme erforderlich [11, 12, 13] sind.

Für die technologische Kompatibilität der hybriden elektrisch-optischen Technologie mit der elektrischen Aufbau- und Verbindungstechnik sind Materialien und Fertigungstoleranzen für die optischen Wellenleiter erforderlich, die kompatibel mit üblichen Leiterplattenmaterialien und Montageprozessen sind. Zusätzlich muss auch der Bestückungsprozess für die hybriden Leiterplatten die Anwendung automatischer Pick-and-Place-Bestückung ermöglichen. Das erfordert zwingend eine passive Justage der optischen Sender und Empfänger auf den hybriden Leiterplatten. Hieraus folgt, dass die Querschnittsabmessungen der optischen Wellenleiter in der Größenordnung der Abmessungen elektrischer Verbindungen auf Leiterplatten sein müssen. Somit können die Kompatibilitätsanforderungen nur mit vielmodigen optischen Wellenleitern erfüllt werden.

In diesem Artikel werden die in dem Förderprojekt Electrical/Optical Circuit Board (EOCB) entwickelten Demonstratoren einer hybriden elektrisch-optischen Leiterplattentechnologie vorgestellt. In den hybriden Leiterplatten der Demonstratoren befindet sich eine optische Lage mit vierkanaligen optischen Übertragungsstrecken, deren Wellenleiter Querschnitte von $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ haben. Als Sende- und Empfangskomponenten werden im Projekt entwickelte vierkanalige Module verwendet, die Laser- bzw. Fotodiodenzeilen auf Lead-Frames enthalten. Zur Kopplung der Module an die Wellenleiter innerhalb der Leiterplatten wird die Stirnflächenkopplung angewendet, deren Toleranzanforderungen zusammen mit einem alternativen Koppelverfahren in Abschnitt 2 diskutiert werden. In dem darauf folgenden Abschnitt 3 werden die Demonstratoren vorgestellt.

2 Koppelverfahren

Die Realisierung der optischen Kopplung von Sende- und Empfangselementen (VCSEL bzw. Photodioden) an die optischen Wellenleiter innerhalb elektrisch-optischer Leiterplatten ist eine

wesentliche Aufgabe bei der Entwicklung hybrider elektrisch-optischer Übertragungsstrecken für Leiterplatten. Denn der für Aufbau und Montage der elektrisch-optischen Wandler erforderliche produktionstechnische Aufwand ist mitentscheidend für die wirtschaftliche Anwendbarkeit hybrider Leiterplatten. Im Folgenden werden die Anforderungen diskutiert und zwei Koppelkonzepte vorgestellt. Die im EOCB-Projekte umgesetzte Lösung wird in Abschnitt 3.1 zusammen mit den Demonstratoren des Projektes vorgestellt.

2.1 Technische und wirtschaftliche Anforderungen

Aus produktionstechnischer und damit wirtschaftlicher Sicht müssen bei der Montage elektrisch-optischer Wandler auf hybriden Leiterplatten zwei Anforderungen zwingend erfüllt werden: Die Wandler dürfen nur mittels passiver Justage zu den Wellenleitern ausgerichtet werden, und die Montage muss mit Automaten innerhalb der üblichen Leiterplattenbestückung erfolgen.

Die zur automatisierten Montage der Wandler verfügbare Genauigkeit muss sich an den bei der Leiterplattenbestückung üblichen Toleranzen orientieren. Nur dann können sie kostengünstig im Standard-Bestückungsprozess für Leiterplatten mit üblichen oder mit nur geringfügig modifizierten Automaten verarbeitet werden.

Derzeitige Automaten zur Leiterplattenbestückung positionieren Bauelemente bereits mit Toleranzen von $\pm 30 \mu\text{m}$ bei 3σ ($\pm 40 \mu\text{m}$ bei 4σ). Die Anwendbarkeit derartiger Bestückungsautomaten, oder zukünftiger Automaten, mit denen geringere Toleranzen möglich sein werden, kann durch mechanische Einrast- bzw. Fangstrukturen auf den hybriden Leiterplatten unterstützt werden. Die Aufgabe solcher mechanischer Strukturen ist die Feinpositionierung von Wandlern bei ihrem Absetzen auf der Leiterplatte durch den Bestückungsautomaten.

Aus wirtschaftlichen Gründen folgt auch, dass die Kopplung keine Strahlformung durch mikrooptische Komponenten erfordern darf. Denn deren Herstellung und Montage mit der erforderlichen Präzision ist zu aufwendig und damit zu kostenintensiv für eine Leiterplattentechnologie.

Zur produktionstechnisch sinnvollen Umsetzung dieser Anforderungen sind Sende- und Empfangsmodule erforderlich, die Gehäuse ähnlich denen mikroelektronischer Schaltungen haben. Der Unterschied zwischen ihnen ist die zusätzliche optische Schnittstelle der Sende- und Empfangsmodule. Innerhalb der Module befinden sich die elektrisch-optischen Wandler (VCSEL, Photodioden) und deren Treiber- bzw. Empfangselektronik. Die Gehäuse haben die üblichen Aufgaben des Schutzes der Halbleiterbauelemente und ihrer Verarbeitbarkeit bei der Leiterplattenbestückung zu erfüllen. Zusätzlich kann für Koppelaufgaben ausgenutzt werden, dass die Herstellung der Module mit höherer mechanischer Genauigkeit erfolgen kann, als ihre Montage auf Leiterplatten.

2.2 Koppelkonzepte

Für die Ein- und Auskopplung von Licht in vielmodige Wellenleiter innerhalb von Leiterplatten kann die Direktkopplung oder die Kopplung mit Strahlumlenkung bzw. indirekte Kopplung (Bild 4) angewendet werden [14, 15]. Ihre Eigenschaften werden im wesentlichen dadurch bestimmt, dass sich die aktiven Elemente bei der Direktkopplung innerhalb der Leiterplatte befinden und bei der indirekten Kopplung auf der Leiterplatte.

Bei der Direktkopplung (Bild 4(a)) werden die aktiven Elemente auf einen Träger aufgebracht, der in die Leiterplatte eintaucht und an einem auf der Leiterplattenoberfläche montierten und dort elektrisch kontaktierten Träger befestigt ist. Die Treiber bzw. Verstärker der aktiven Elemente können sich auf einem der beiden Träger befinden.

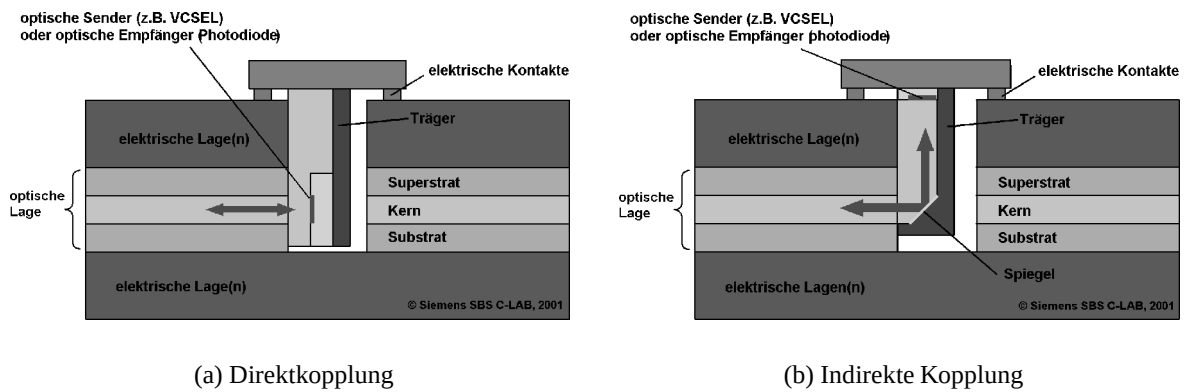


Bild 4: Konzepte zur Ein- und Auskopplung von Licht in optische Kanalwellenleiter innerhalb elektrisch-optischer Leiterplatten

Bei der Kopplung mit Strahlumlenkung (Bild 4(b)) befinden sich die aktiven Elemente zusammen mit ihren Treibern bzw. Verstärkern in einem Gehäuse auf der Leiterplattenoberfläche. Mit einem Spiegel vor den Wellenleitern innerhalb der Leiterplatte erfolgt die Strahlumlenkung von der Wellenleiterachse auf die dazu senkrechte Strahlrichtung der aktiven Elemente. Der Spiegel kann über einen Träger am Gehäuse befestigt (Bild 4(b)) oder Teil des Wellenleiters sein [14]. Für die bis zu mehrere Millimeter lange optische Strecke zwischen den Spiegeln und den aktiven Elementen ist zumindest auf der Empfangsseite ein Wellenleiter erforderlich. Denn durch die große numerische Apertur (NA) der in die Leiterplatte integrierten Wellenleiter ist die Strahlaufweitung zu groß für eine Freistrahlstrecke.

Ein Vorteil der indirekten Kopplung ist die gemeinsame Montage der aktiven Elemente und ihrer Elektronik in einem auf Leiterplatten montierbaren Gehäuse. Bei der in [14] beschriebenen indirekten Kopplung sind die Wellenleiter zwischen den aktiven Elementen und den Spiegeln Teil des Gehäuses. Dadurch können die aktiven Elemente bei der Gehäusemontage mit größerer Genauigkeit zu den Wellenleitern ausgerichtet werden als bei der Leiterplattenbestückung.

Der optische Aufbau von Sende- und Empfangsmodulen ist bei der Direktkopplung einfacher als bei der indirekten Kopplung, weil keine Strahlumlenkung, kein Wellenleiter zwischen aktiven Elementen und Spiegeln und nur eine Koppelstelle erforderlich ist. Dagegen ist der elektrische Aufbau zur elektrischen Kontaktierung der aktiven Elemente aufwendiger, und die Geometrie des Moduls weicht stark von den üblichen Geometrien oberflächenmontierter mikroelektronischer Bauelemente ab.

2.3 Montagetoleranzen bei der Direktkopplung

Bei der Montage der Sende- und Empfangselemente muss sowohl die optische Kopplung an die Wellenleiter innerhalb der Leiterplatte als auch ihre elektrische Kontaktierung an Leiterbahnen auf der Leiterplattenoberfläche gewährleistet sein. Da die optische Kopplung die größere Genauigkeit als die elektrische Kontaktierung erfordert, werden durch sie die Toleranzanforderungen festgelegt.

Die bei der Einkopplung einzuhaltenden Montagetoleranzen (Bild 6) werden durch die Kernabmessungen der Wellenleiter, deren numerischer Apertur, dem Divergenzwinkel des vom Laser emittierten Lichts und dem Durchmesser seiner aktiven Fläche festgelegt. Bei der Auskopplung ist die Größe der Photodiode zusammen mit den Wellenleitereigenschaften (NA, Querschnitt) entscheidend.

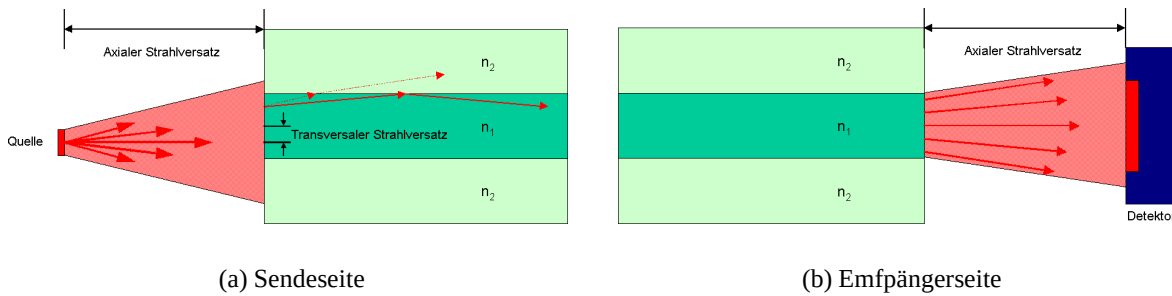


Bild 5: Montagetoleranzen auf Sende- und Empfängerseite bei der Direktkopplung

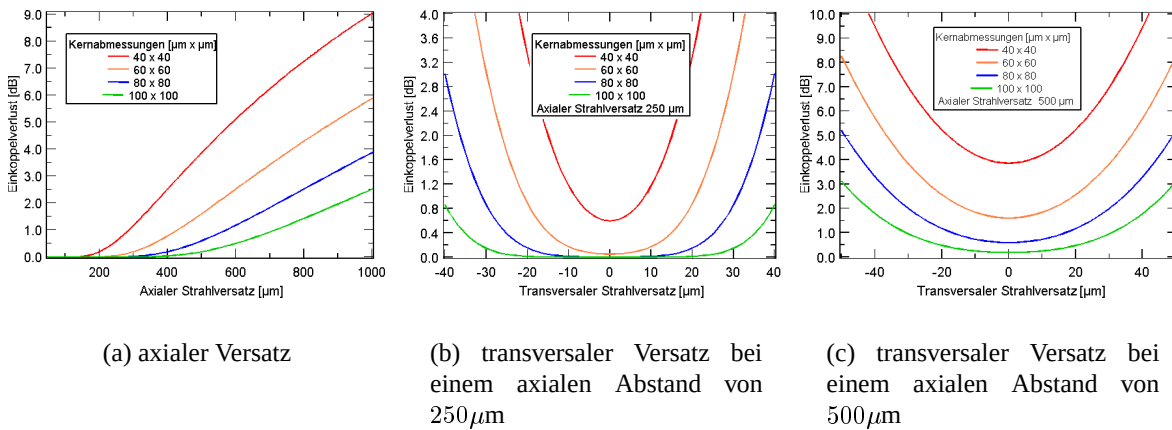


Bild 6: Einkoppelverluste in Abhängigkeit axialer und transversaler Montagetoleranzen bei der Direktkopplung für unterschiedliche Wellenleiterquerschnitte (Brechungsindizes: $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1$)

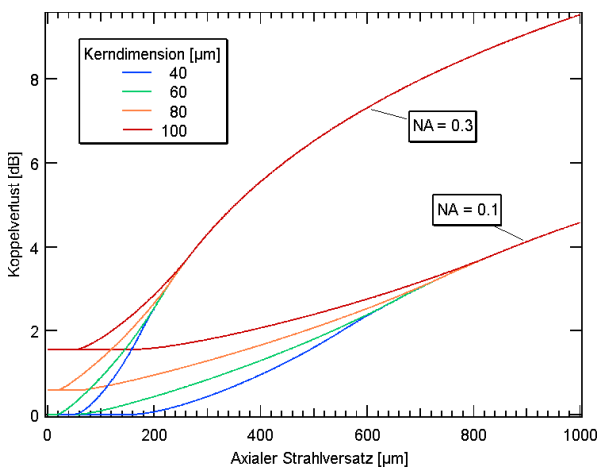
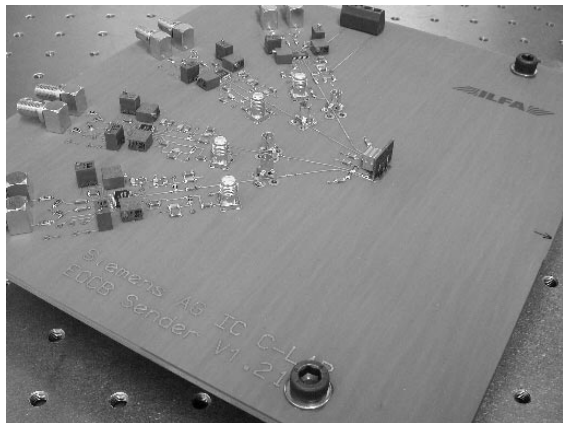


Bild 7: Auskoppelverluste in Abhängigkeit der axialen Montagetoleranzen bei Direktkopplung für unterschiedliche Wellenleiterquerschnitte und numerische Aperturen der Wellenleiter für eine Empfängerfläche von $70 \times 70 \mu\text{m}^2$

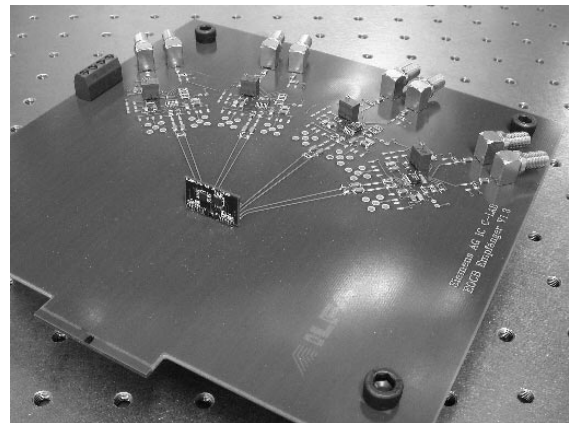
Derzeit werden Wellenleiter für Leiterplatten mit Kernabmessungen im Bereich von $70 \times 70 \mu\text{m}^2$ bis $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ mit einer NA von ca. 0,30 verwendet. Übliche VCSEL haben eine Strahldivergenz des Gesamtstrahls von 15° , und der Durchmesser ihrer aktiven Fläche ist kleiner als $15 \mu\text{m}$. Diese Parameter alleine zeigen bereits, dass die Toleranzanforderungen bei der Einkopplung gering sind.

Eine numerische Analyse der Einkoppelverluste in Abhängigkeit des axialen Versatzes zeigt Bild 6(a). Bei einem Wellenleiterquerschnitt von $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ wird der 3dB-Punkt erst bei einem axialen Versatz von ca. $850 \mu\text{m}$ erreicht. Die mit dem axialen Abstand abnehmenden transversalen Toleranzen zeigen die Bilder 6(b) und 6(c) am Beispiel der axialen Abstände $250 \mu\text{m}$ und $500 \mu\text{m}$.

Bedingt durch die Größe der Wellenleiterquerschnitte und ihrer grossen NA sind bei der Auskopplung (Bild 5(b)) deutlich kleinere Toleranzen einzuhalten. Da die Verwendung mikrooptischer Elemente ausgeschlossen ist, muss die aktive Diodenfläche größer sein als der Wellenlei-



(a) Sende- und Empfangsbaugruppen



(b) Sende- und Empfangsbaugruppen

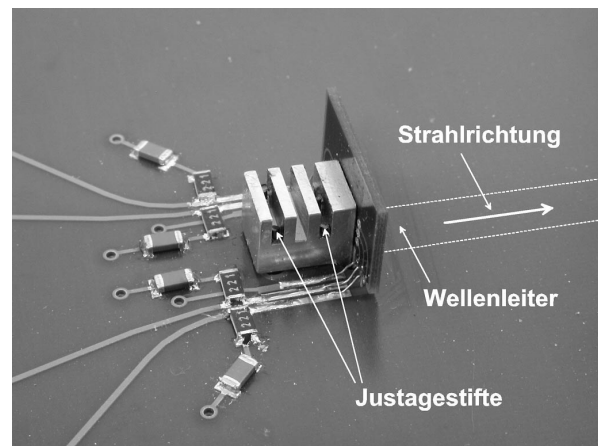
Bild 8: Vierkanal-Sende- und Empfangsbaugruppen

terquerschnitt, um eine gute Koppelleffizienz zu erhalten und modenselektive Verluste und damit Modenrauschen zu minimieren. Gleichzeitig muss die aktive Fläche der Diode möglichst klein sein, da ihre Grenzfrequenz mit der Größe abnimmt. Um die aktive Fläche klein zu halten, müssen die Dioden mit geringen Toleranzen zum Wellenleiter montiert werden. Den starken Einfluss der numerischen Apertur auf die Auskoppelleffizienz zeigt Bild 7. Der Vergleich mit Bild 6(a) zeigt die stärkere Abhängigkeit der Auskopplung gegen Dejustierung als die der Einkopplung. Bei einem Wellenleiterquerschnitt von $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ wird der 3dB-Punkt bereits bei einem axialen Versatz von etwa $220 \mu\text{m}$ erreicht, im Vergleich zu $850 \mu\text{m}$ bei der Einkopplung.

3 Demonstratoren

Mit der im EOCB-Projekt entwickelten hybriden elektrisch-optischen Leiterplattentechnologie wurden im Projekt mehrere Demonstratoren aufgebaut. Zunächst wurden, um die Eigenschaften der Sende- und Empfangsseite der elektrisch-optischen Strecken getrennt untersuchen zu können, Baugruppen aufgebaut, die nur den Sende- oder nur den Empfangsteil elektrisch-optischer Übertragungsstrecken enthalten (Bild 8). Jede dieser Baugruppen enthält vier parallele optische Kanäle. Nach erfolgreichem Test dieser Baugruppen wurde eine Baugruppe mit einer vollständigen elektrisch-optischen Strecke aufgebaut, die ebenfalls vier parallele optische Kanäle enthält.

Sende- und Empfangsmodule, die auf die hybride elektrisch-optische Leiterplattentechnologie angepasst sind, waren kommerziell nicht erhältlich. Deshalb wurden für die Demonstratoren des Projektes Sende- und Empfangsmodule mit vier Kanälen entwickelt. Da der Schwerpunkt des Projektes die Entwicklung der hybriden Leiterplattentechnologie war, nicht aber die Ent-

**Bild 9:** Sendemodul montiert auf eine elektrisch-optische Leiterplatte

wicklung der optoelektronischen Module, waren diese mit möglichst geringem Aufwand herzustellen. Die Module wurden deshalb auf der Basis verfügbarer Komponenten aufgebaut, deren Eigenschaften für diese Anwendung nicht optimiert werden konnten.

Als Lasertreiber und Verstärker wurden kommerziell erhältliche Schaltungen in Standard-Gehäusen der Firma Mindspeed verwendet, die für Datenraten bis 1,25 Gbit/s ausgelegt sind. Die verwendeten VCSEL- und PIN-Dioden-Zeilen wurden von einem Partner des EOCB-Projektes bereitgestellt.

Für Demonstratoren des EOCB-Projektes wurde die Direktkopplung angewendet (s. Abschnitt 2.2), weil der optische Aufbau direktkoppelnder Sende- und Empfangsmodule weniger aufwendig ist, als der von Module mit Strahlumlenkung.

Trotz des minimierten Aufwandes für die Modulentwicklung konnten nach erfolgreichem Test aktiv gekoppelter Module auch Tests mit passiv justierten Module durchgeführt werden. Das Justagekonzept hierfür wurde im Projekt entwickelt.

3.1 Vierkanal-Sende- und Empfangsmodule

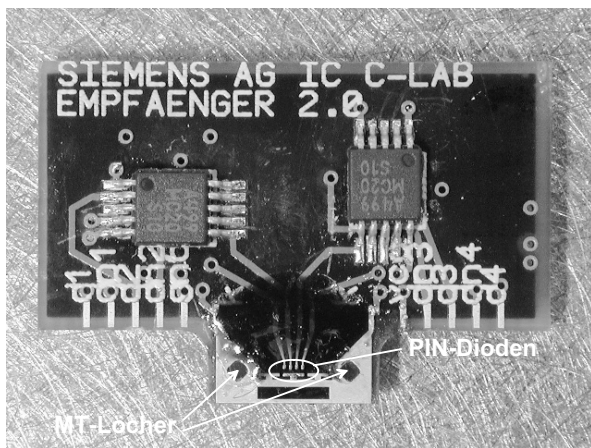


Bild 10: Träger mit Vierkanal-PIN-Dioden-Zeile und Vorverstärkern vor der Montage auf die elektrisch-optische Leiterplatte

Für die Sende- und Empfangsmodule wurden auf Lead-Frames montierte GaAs-VCSEL-Zeilen und Si-PIN-Diodenzeilen auf kleine Leiterplatten montiert. Diese dienen als Träger, die teilweise in eine Öffnung der elektrisch-optischen Leiterplatte eintauchen (Bild 4(a) und 10) und dort mit indexangepasstem optischem Kleber fixiert werden. Die Strahlrichtung der aktiven Komponenten ist senkrecht zur Trägersoberfläche. Die Justierung der Lead-Frames auf den Trägern erfolgt über MT-Löcher, die sich in den Lead-Frames und den Trägern befinden.

Bei den Sendemodulen wird der Träger ausschließlich für die Montage der VCSEL verwendet. Deren Treiber befinden sich auf der elektrisch-optischen Leiterplatte und sind für jeden der vier Kanäle getrennt aufgebaut. Auf den Trägern der Empfangsmodule (Bild 10) befinden sich zusätzlich vier Vorverstärker, um die elektrischen Verbindungslängen zwischen ihnen und den Dioden klein zu halten. Nach den Vorverstärkern folgen begrenzende Verstärker auf den elektrisch-optischen Leiterplatten.

Beiden Modultypen gemeinsam ist ein auf die Rückseite des Trägers geklebter Kühlkörper, der zur Wärmeabfuhr und zur Fixierung des Moduls auf der Leiterplattenoberfläche verwendet wird.

Ausgehend von diesen aktiv gekoppelten Module wurde ein passives Koppelkonzept entwickelt und erfolgreich getestet. Die Ausrichtung der Module zu den Wellenleiterstirnflächen in einer Aussparung der Leiterplatte erfolgt dabei durch zwei Arten von Löchern in der Leiterplatte (Bild 11) und entsprechenden Stiften in den Kulkörpern. Die vertikale Ausrichtung (senkrecht zur Leiterplattenoberfläche) und evt. erforderliche Winkelleinstellungen werden durch drei Sacklöcher mit 1,5mm Durchmesser kontrolliert, die auf der optischen Lage als Referenzebene enden. Die transversale Ausrichtung (senkrecht zur Leiterplattenoberfläche und zur Wellenleiterachse) und der axiale Abstand der Module von der Wellenleiterstirnfläche werden mit zwei

MT-Bohrungen ohne Tiefenanschlag in der Leiterplatte kontrolliert. In diese MT-Löcher werden im Kühlkörper der Module befestigte MT-Stifte gesteckt. Drei weitere im Kühlkörper befestigte Stifte fassen in die Sacklöcher. Zur Vermeidung mechanischer Überbestimmtheit ist der Durchmesser dieser drei Stifte kleiner als 1,5 mm. Im Kühlkörper des in Bild 9 gezeigten Moduls sind die Justierungsstifte zu erkennen. Die Ausrichtung der VCSEL- bzw. PIN-Dioden-Zeilen relativ zu diesen fünf Justierungsstiften erfolgt mit zwei weiteren MT-Stiften über die MT-Löcher in den Lead-Frames (Bild 10) und entsprechenden Bohrungen im Kühlkörper.

Das Prinzip der passiven Justierung dieser Module beruht zum einen auf dem aus der Wellenleiterherstellung bekannten Abstand der Wellenleiterachsen von der Oberfläche der optischen Lage. Dadurch kann die vertikale Ausrichtung der Module über die Länge der drei Stifte kontrolliert werden, deren Durchmesser kleiner als 1,5 mm ist. Zum anderen beruht die passive Justierung auf den MT-Löchern in der Leiterplatte, die bei der Herstellung der Koppelöffnung mit großer Präzision relativ zu den Wellenleitern gebohrt werden können.

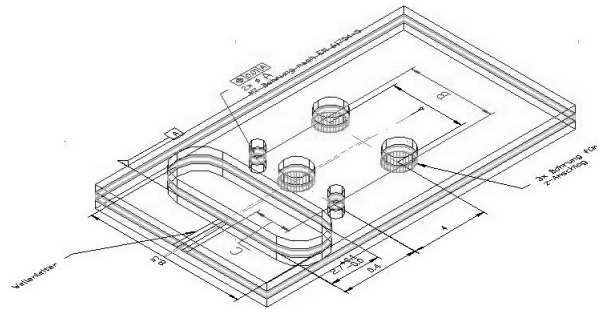


Bild 11: Geometrie der Modulaufbau zur passive Justierung von Send- und Empfangsmodulen auf elektrisch-optischen Leiterplatten im EOCB-Projekt

3.2 Sendebaugruppe

Bild 8(a) zeigt eine der aufgebauten Sendebaugruppen. Die Länge der optischen Wellenleiter vom Sendemodul bis zur Baugruppenkante beträgt etwa 6 cm. Zur messtechnischen Untersuchung der Eigenschaften wurden die optischen Ausgangssignale an der Baugruppenkante mit einer großflächigen MSM-Diode detektiert und dann um 40 dB verstärkt (obere Grenzfrequenz des Verstärkers 1,6 GHz). Die MSM-Diode hat einen Durchmesser von $300\ \mu\text{m}$ und eine obere Grenzfrequenz von 2 GHz; sie ist ohne Gehäuse auf einem SMA-Verbinder aufgebaut. Zusätzlich zum optischen Verhalten wurde das elektrische Verhalten der Baugruppen an Hand des Monitorsignals des VCSEL-Treibers und des Ansteuersignals des Lasers beurteilt.

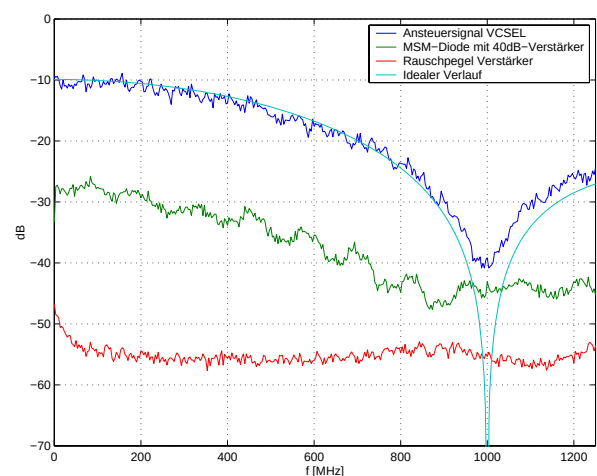


Bild 12: Frequenzanteile des Treibersignals eines Lasers und des um 40 dB verstärkten optischen Ausgangssignals bei einer pseudozufälligen Bitfolge der Länge $2^{23} - 1$ als Eingangssignal und einer Datenrate von 1 Gbit/s

Bild 12 zeigt die Frequenzanteile des Laserstroms¹, und des um 40 dB verstärkten optischen Ausgangssignals, für eine Datenrate von 1 Gbit/s und eine Pseudozufallsfolge der Länge $2^{23} - 1$ Bit. Der Laserstrom wurde mit einer hochohmigen Prüfspitze (Tektronix P6217) auf der Mikrostreifenleitung vom Lasertreiber zum Sendemodul gemessen.

¹Die Frequenzanteile des Monitorsignals des Lasertreibers sind identisch mit denen des Laserstroms und sind deshalb in Bild 12 nicht dargestellt.

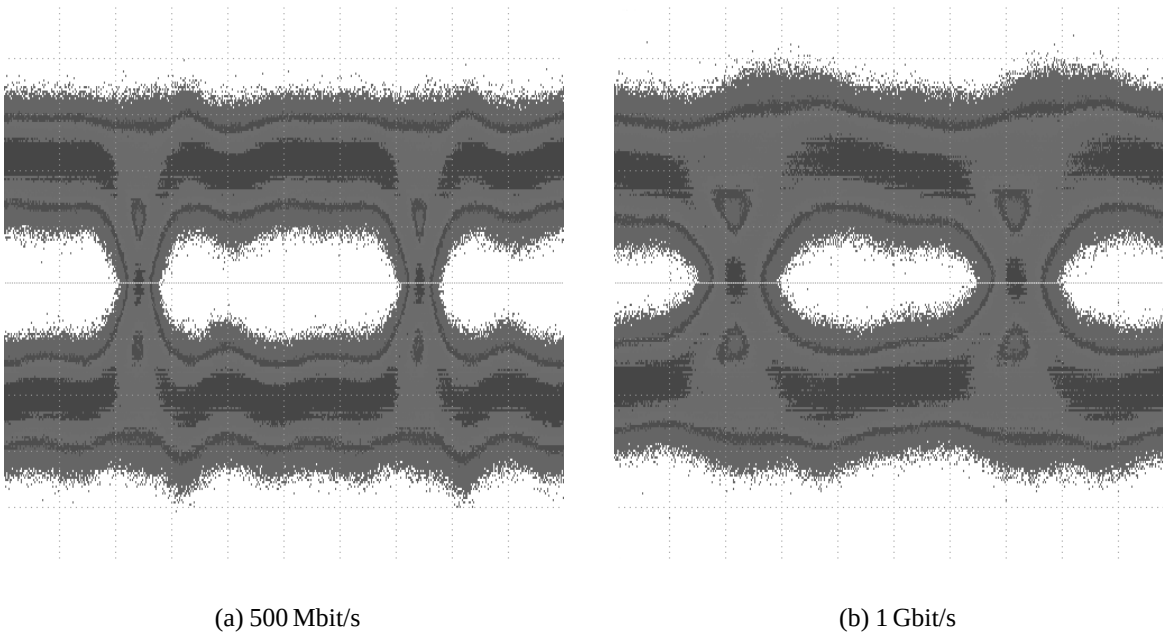


Bild 13: Augendiagramme des optischen Ausgangssignals der Sendebaugruppe bei einer pseudozufälligen Bitfolge der Länge $2^9 - 1$

Die Kurven in Bild 12 zeigen die unterschiedlichen Eigenschaften der elektrischen Steuersignale der VCSEL und der optischen Ausgangssignale an der Baugruppenkante. Während der Frequenzverlauf des Laserstroms dem geforderten Verlauf entspricht, zeigt der Verlauf des optischen Ausgangssignals deutliche Abweichungen davon.

Trotz der Abweichungen können mit den Sendebaugruppen Datenraten bis knapp über ein 1 Gbit/s übertragen werden. Die gemessenen optischen Ausgangssignale der Baugruppe sind jedoch stark verrauscht, so dass die Augendiagramme (Bild 13) nur wenig geöffnet sind. Die Augendiagramme zeigen sowohl Jitter als auch Amplitudenrauschen. Werden die Rauschteile des Ausgangssignals durch Mittelung eliminiert, so zeigt sich, daß die systematischen Einflüsse durch die übertragenen Bitfolgen deutlich geringer sind, als die zufälligen Störungen.

Zur Verzerrung des Frequenzverlaufes der optischen Ausgangssignale und ihrem Rauschen tragen in unterschiedlichem Maß die elektrischen Eigenschaften der Sendemodule, die Eigenschaften der Laser und die Wellenleitereigenschaften bei. Eine Rauschquelle ist der elektrische Aufbau der Sendemodule zusammen mit den Lasereigenschaften. Da für das Projekt nur einige wenige VCSEL-Zeilen zur Verfügung standen, deren Eigenschaften sich voneinander unterschieden, konnte der Modulaufbau nicht optimiert werden. Der Rauschbeitrag durch die Laser konnte ebenfalls, bedingt durch die geringe Anzahl verfügbarer VCSEL-Zeilen, nicht untersucht werden. Die Verzerrung des Frequenzverlaufes hat die gleichen Ursachen.

Nach erfolgreichem Test einer Sendebaugruppe mit aktiv gekoppeltem Sendemodul wurde eine zweite Baugruppe aufgebaut, deren Sendemodul mit der oben beschriebenen passiven Justierung montiert wurde. Die Laser dieses Sendemoduls hatten Ausgangsleistungen von $500 \mu\text{W}$ (-3 dBm). Im statischen Betrieb betrug die maximale optische Ausgangsleistung an der Baugruppenkante je nach Kanal zwischen $75 \mu\text{W}$ und $60 \mu\text{W}$ ($-11,2 \text{ dBm}$ bzw. $-12,2 \text{ dBm}$). Die elektrischen und optischen Eigenschaften passiv und aktiv gekoppelter Baugruppen zeigen keine wesentlichen Unterschiede.

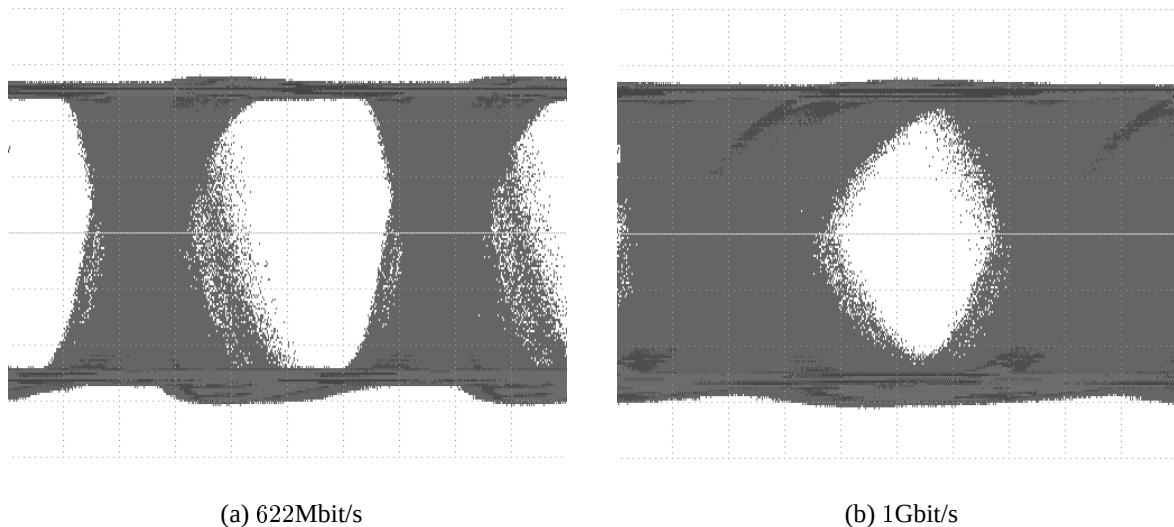


Bild 14: Augendiagramme des elektrischen Ausgangssignals einer Empfangsbaugruppe bei einer pseudozufälligen Bitfolge der Länge $2^9 - 1$, die die Speichereffekte der Photodioden zeigen

3.3 Empfangsbaugruppe

Bild 8(b) zeigt eine der aufgebauten Empfangsbaugruppen. Um sie zu testen, wurden mit einer Stufenindexfaser (Kerndurchmesser $50\text{ }\mu\text{m}$, $\text{NA} = 0,2$) optische Signale in die Polymerwellenleiter eingekoppelt. Die Eigenschaften der elektrischen Ausgangssignale (Anstiegszeit, Abfallzeit, Amplitudenrauschen) der Baugruppen sind bei weitem ausreichend für Datenraten bis $1,25\text{ Gbit/s}$.

Werden als Testsignale Pseudozufallsfolgen verwendet, so zeigen die elektrischen Ausgangssignale einen vom Bitmuster abhängigen Jitter (Bild 14), der mit der Bitrate und der Länge der Pseudozufallsfolgen und damit der Anzahl der gleichartigen aufeinanderfolgenden Bits zunimmt.

Die Ursache dieses Jitters ist der Durchmesser von $70\text{ }\mu\text{m}$ der verwendeten Photodioden und ihr Abstand von den Wellenleiterstirnflächen, der immer größer als Null ist. Dadurch ist der auf die Photodioden fallende Ausgangsstrahl der Polymerwellenleiter immer größer als der Diodendurchmesser. Da Licht, das außerhalb der aktiven Diodenfläche auftrifft, langsame Ladungsträger erzeugt, entsteht so ein vom Bitmuster abhängiger Jitter.

Der beobachtete Jitter könnte durch größere Dioden, u. U. in Kombination mit einem geringeren axialem Abstand zwischen den Dioden und den Wellenleiterstirnflächen, beseitigt werden. Eine andere Lösungsmöglichkeit ist ein Schutz der Dioden gegen Überstrahlen.

3.4 Baugruppe mit vollständiger elektrisch-optischer Übertragungsstrecke

Nachdem die Funktionsfähigkeit der Sende- und Empfangsbaugruppen erfolgreich getestet worden war, wurde im EOCB-Projekt eine Baugruppe mit vollständiger elektrisch-optischer Übertragungsstrecke (Kombibaugruppe, Bild 3) aufgebaut und ebenfalls erfolgreich getestet. Die optische Verbindung dieses Demonstrators ist 5 cm lang und besteht aus vier parallelen Kanälen. Sowohl das Sendemodul als auch das Empfangsmodul auf diesem Demonstrator ist entsprechend dem oben beschriebenen passiven Justierungskonzept aufgebaut.

Die mit diesem Demonstrator erreichbaren Datenraten werden durch die oben bei den Sende-

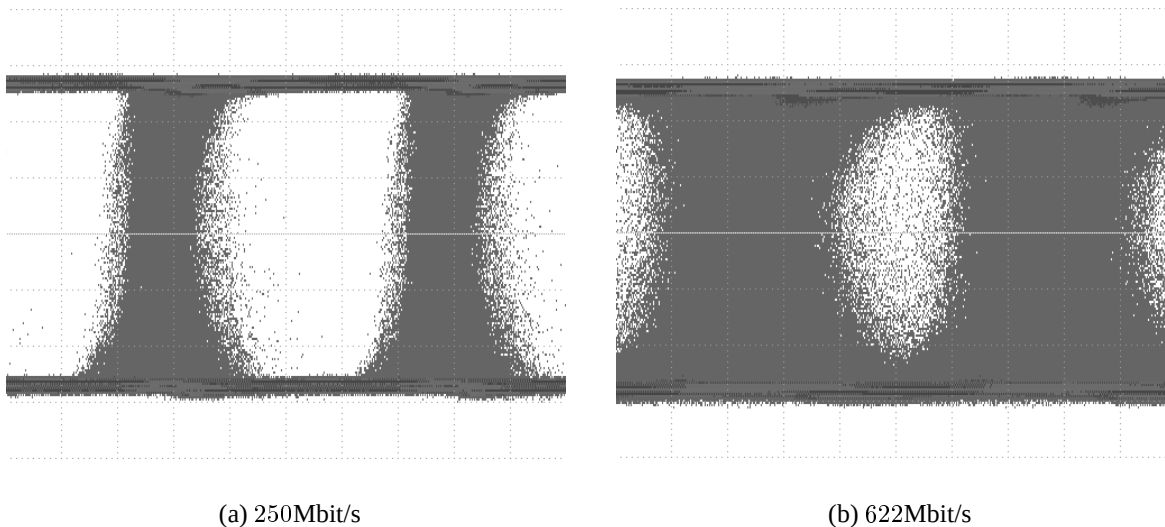


Bild 15: Augendiagramme des elektrischen Ausgangssignals des EOCB-Demonstrators mit vollständiger elektrisch-optischer Übertragungsstrecke bei pseudozufälligen Bitfolgen der Längen $2^9 - 1$

und Empfangsbaugruppen bereits beschriebenen Effekte begrenzt, die im wesentlichen auf die im Projekt nur eingeschränkt mögliche Moduleentwicklung zurückzuführen sind.

Bild 15 zeigt die Augendiagramme des elektrischen Ausgangssignals der Kombibaugruppe für 250 Mbit/s und 622 Mbit/s. Der bereits bei der Empfangsbaugruppe festgestellte Jitter ist bei der Kombibaugruppe stärker, da das auf die PIN-Dioden des Empfangsmoduls fallende Licht stärker verrauscht und schwächer ist, als das zum Test der Empfangsbaugruppen verwendete optische Signal. Zusätzlich wird auf der Empfangsseite Amplitudenrauschen in Jitter konvertiert.

4 Zusammenfassung

Mit einer optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplatten lassen sich die erkennbaren Leistungsgrenzen der elektrischen Verbindungstechnik wirksam umgehen. In diesem Beitrag wurden Demonstratoren einer hybriden elektrisch-optischen Leiterplattentechnologie vorgestellt, mit der eine größtmögliche Kompatibilität zur existierenden Standard-Leiterplattentechnologie auf FR4-Basis erreicht werden kann.

Die vorgestellten elektrisch-optischen Leiterplatten enthalten, analog zu den üblichen elektrischen Leiterplattenlagen, optische Lagen mit Multimode-Wellenleitern, die durch Heißprägen eines Polymers hergestellt wurden. Die Kopplung optischer Sende- und Empfangsmodule an die leiterplattenintegrierten Wellenleiter wurde an Hand der Direktkopplung und der Kopplung mit Strahlumlenkung diskutiert. Die Eigenschaften der Direktkopplung wurden mit hierfür entwickelten Modulen untersucht, die vierkanalige Laser- bzw. Fotodiodenzeilen enthalten. Mit diesen Modulen, die bei der Montage keine aktive Justierung erfordern, wurden drei Demonstratortypen aufgebaut: Zwei Demonstratortypen enthalten jeweils nur ein Sende- bzw. Empfangsmodul, um deren Eigenschaften getrennt voneinander untersuchen zu können; der dritte Demonstratortyp enthält vollständige elektrisch-optische Übertragungsstrecken.

Es wurde gezeigt, dass senderseitig die maximal erreichbaren Datenraten nur durch die verwendeten Laser und deren Treiberschaltung — entsprechend deren Spezifikation — begrenzt sind. Empfängerseitig wirkt die Größe der verfügbaren Fotodioden begrenzend, in denen durch

Überstrahlen langsame Ladungsträger erzeugt werden. Mit dem dritten Demonstratortyp wurde der erfolgreiche Aufbau hybrider elektrisch-optischer Übertragungsstrecken demonstriert.

Literatur

- [1] Semiconductor Industry Association, San Jose, CA, USA, *International Technology Roadmap for Semiconductors, 1999 Edition and 2000 Update*, 2000 and 2001.
- [2] R. A. Nordin, W. R. Holland, and M. A. Shahid, "Advanced optical interconnection technology in switching equipment," *J. Lightwave Technol.* **13**, pp. 987–994, June 1995.
- [3] Q. Tan and J. Vandewege, "2.5Gb/s/mm optical fiber interconnections," in *Proc. 22nd Eur. Conf. on Opt. Comm.*, pp. 2.55–2.58, (Oslo, Norway), 1996.
- [4] Y. S. Liu, J. Rowlette, Y. Liu, and A. Nahata, "High density optical interconnect for board and backplane applications using polymer waveguides and VCSEL array devices," in *Proc. of the 1998 11th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS. Part 2 (of 2)*, pp. 379–380, (Orlando, FL, USA), 1998.
- [5] B. Dhoedt, R. Baets, P. Van Daele, P. Heremans, J. Van Campenhout, J. Hall, R. Michalzick, A. Schmid, H. Thienpont, R. Vounckx, A. Neyer, D. C. O'Brien, and J. Van Koetsem, "Optically interconnected integrated circuits to solve the CMOS interconnect bottleneck," in *Proc. of the 48th Electronic Components & Technology Conference*, pp. 992–998, (Seattle, WA, USA), 1998.
- [6] M. Hibbs-Brenner, J. Lehman, Y. Liu, K. Johnson, R. Morgan, E. Strzelecka, and R. Skogman, "Packaging of VCSEL arrays for cost-effective interconnects at less than 10 meters," in *Proc. of the 49th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 747–752, (San Diego, CA, USA), 1999.
- [7] Y. S. Liu, R. J. Wojnarowski, W. A. Hennessy, J. P. Bristow, Y. Liu, A. Peczalski, J. Rowlette, A. Plotts, J. Stack, M. Kadar-Kallen, J. Yardley, L. Eldada, R. M. Osgood, R. Scarmozzino, S. H. Lee, V. Osgus, and S. Patra, "Polymer optical interconnect technology (POINT) — optoelectronic packaging and interconnect for board and backplane applications," in *Proc. of the IEEE 46th Electronic Components and Technology Conference (ECTC'96)*, pp. 308–315, 1996.
- [8] R. T. Chen, L. Wu, F. Li, S. Tang, M. Dubinovski, J. Qi, C. L. Schow, J. C. Campbell, R. Wickman, B. Picor, M. Hibbs-Brenner, J. Bristow, Y. S. Liu, S. Rattan, and C. Nodding, "Si CMOS process compatible guided wave multi-Gbit/sec optical clock signal distribution system for Cray T-90 supercomputer," in *Proc. 1997 Massively Parallel Processing using Optical Interconnections MPPOI*, pp. 10–24, Montreal, Canada, June 1997.
- [9] O. Krumpholz, R. Bogenberger, J. Guttman, P. Huber, J. Moisel, and M. Rode, "Optical backplane in planar technology," in *Optoelectronic Interconnects VII; Photonics Packaging and Integration II*, M. R. Feldman, R. L. Q. Li, W. B. Matkin, and S. Tang, eds., *Proc. SPIE* **3952**, pp. 59–65, 2000.
- [10] E. Griesse and A. Himmler, "Optical interconnections on high speed digital printed circuit boards," in *Proceedings in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, p. 697, July 1997.
- [11] E. Griesse, "Reducing EMC problems through an electrical/optical interconnection technology," *IEEE Trans. EMC* **41**, pp. 502–509, 1999.
- [12] E. Griesse, D. Krabe, and E. Strake, "Electrical-optical printed circuit boards: Technology — design — modeling," in *Interconnects in VLSI Design*, H. Grabinski, ed., pp. 221–236, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.
- [13] E. Griesse, J. Gerling, Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, J. Schrage, and G. Mroczynski, "Modellierung und Simulation optischer Multimode-Verbindungen auf Leiterplatten," in *Kleinheubacher Berichte (im Druck)*, vol. 46, 2002.

- [14] E. Griesse, A. Himmler, K. Klimke, A. Koske, J.-R. Kropp, S. Lehmacher, A. Neyer, and W. Süllau, "Self-aligned coupling of optical transmitter and receiver modules to board-integrated optical multimode waveguides," in *Proc. Micro and Nanooptics for Optical Interconnection and Information Processing, Proc. SPIE Vol. 4455*, pp. 243–250, 2001.
- [15] A. Himmler, S. Bargiel, F. Ebling, H. Franke, E. Griesse, C. Lehnberger, L. Oberender, A. Koske, G. Mroczynski, H. Schröder, G. Spickermann, D. Steck, E. Strake, and W. Süllau, "Electrical-optical circuit boards with four channel butt-coupled optical transmitter and receiver modules," in *Proc. Micro and Nanooptics for Optical Interconnection and Information Processing, Proc. SPIE Vol. 4455*, pp. 221–230, 2001.
- [16] R. Chau, "30nm and 20nm physical gate length CMOS transistors," in *Proc. 2001 Silicon Nanoelectronics Workshop*, (Kyoto, Japan), June 2001.
- [17] A. Himmler, "Optische Verbindungstechnik in Computersystemen der nächsten Generation," in *Tagungsband zum Seminar BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten*, A. Himmler, E. Griesse, R. Heinsteins, ed., pp. 111–132, (Paderborn, Deutschland), November 2001.
- [18] Semiconductor Industry Association, San Jose, CA, USA, *International Technology Roadmap for Semiconductors, 1997 Edition and 1998 Update*, 1998 and 1999.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes *EOCB* durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 16 SV 802/6, 16 SV 938/3, 16 SV 799/9 und 16 SV 796/6 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Elektrisch / Optische Leiterplatten – Erfordernisse und Anwendungspotentiale in Fahrzeugen

Engelbert Strake
Robert Bosch GmbH
Entwicklung Fahrerinformationssysteme
CM-DI/ESA4
Robert-Bosch-Straße 200
D-31139 Hildesheim
Engelbert.Strake@de.bosch.com

Zusammenfassung: *Der Beitrag erläutert Konzepte und Aufbautechnik für neuartige elektrisch/optische Leiterplatten, die in ihrem Lagenaufbau optische Wellenleiterstrukturen in integrierter Form enthalten. Am Anwendungsbeispiel optischer Transceiver für Fahrzeug-Multimedia-Netze wird das Potential integrierter optischer Kurzstreckenverbindungen dargestellt.*

1 Einleitung

In der Weitverkehr-Kommunikationstechnik haben sich optische Fasern als Übertragungsmedien längst durchgesetzt, für lokale Netze zählen optische Übertragungsverfahren zum Stand der Technik, und auch zur Vernetzung moderner Kfz-Elektronik-Baugruppen werden optische Kunststoff-Fasern bereits in der Serie eingesetzt. Für die schnelle und störungsfeste optische Kommunikation innerhalb von Geräten und Baugruppen bleiben jedoch noch Probleme zu lösen. Vor allem in der Peripherie von ICs und Modulen gibt es noch keine wirtschaftlichen Lösungen für eine optische Signalübertragung. Dies gilt insbesondere, wenn auf der optischen Ebene zusätzliche Funktionalität gefordert wird

2 Bussysteme im Kraftfahrzeug

Moderne Kraftfahrzeuge verfügen über zahlreiche elektronische Komponenten und Systeme. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Einbauorte stellen sie ein dezentrales Elektroniksystem dar, dessen Leistungsfähigkeit in besonderem Maße von der Vernetzung seiner Subsysteme geprägt wird. Man kann die elektronischen Systeme eines Fahrzeugs in drei Kategorien einteilen, die in **Abb. 1** dargestellt sind.

Aufgrund der Verschiedenheit der Anforderungen, insbesondere unter Sicherheitsaspekten, arbeiten die Teilnetzwerke heutiger Fahrzeuge weitgehend voneinander unabhängig. Der Triebstrang umfasst alle Systeme, die zur Steuerung und Regelung von Motor, Getriebe und Fahrwerk dienen, wie etwa Steuergeräte für Motormanagement oder Anti-Blockier-System. Fahrzeugbeleuchtung und elektronische Komfortausstattung wie Klimaanlage oder elektrische Sitzverstellung gehören zum Karosseriestrang.

In letzter Zeit kommen Geräte einer weiteren Kategorie hinzu, die dem Multimedia-Bereich zuzuordnen sind. Dies sind zum Beispiel Systeme zur Fahrerinformation mit Telekommunikations- und Telematikdiensten und Audio bzw. Videodarstellung. Die zunehmende Bedeutung dieser Geräte- und Dienstekategorie führt zusammen mit der Vernetzung zur Notwendigkeit moderner breitbandiger Bussysteme.

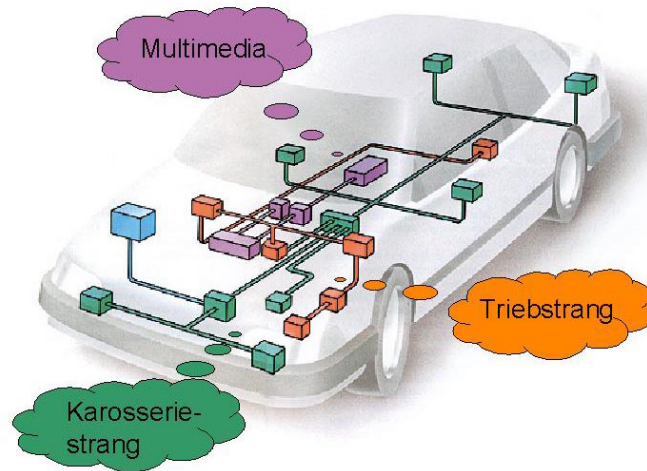


Abb. 1: Vernetzung elektronischer Systeme im Kraftfahrzeug.

Je nach ihrer Funktion transportieren die Bussysteme Nachrichten mit unterschiedlichen Datentypen und -raten. Während im Triebstrang und im Karosseriebus im wesentlichen asynchrone Steuerdaten mit kurzen Botschaftslängen und Bitraten bis zu einem Mbit/s anfallen, sind im Bereich der Multimedia-Vernetzung typischerweise isochrone Datenströme zu transportieren, die Datenpakete in einem regelmäßigen Rhythmus enthalten und daher definierte Bandbreiten belegen. Typische Beispiele sind Audio- und Videodatenströme mit bis zu etwa 120 Mbit/s, bei denen Unregelmäßigkeiten im zeitlichen Ablauf erhebliche Störungen darstellen.

Bei den für Multimediadienste erforderlichen Bitraten treten in elektrischen Signalübertragungssystemen zunehmend Probleme mit hochfrequenten und elektrostatischen Störungen auf, ferner auch Probleme durch Brummschleifen oder galvanische Verkopplungen. Zudem verursacht die Verkabelung, bedingt durch die erforderlichen Abschirmungen, zusätzliche Kosten. Ebenso spielen Gewichtsaspekte eine Rolle. Aus diesen Gründen bietet sich für die Vernetzung hochratiger Subsysteme in Fahrzeugen die optische Signalübertragungstechnik an.

Optische Bussysteme werden schon seit einigen Jahren in Serienfahrzeugen eingesetzt. Die zeitliche Entwicklung einiger bekannter Vernetzungsstandards ist in **Abb. 2** dargestellt. Als optische Punkt-zu-Punkt-Verbindung wurde 1989 von Sony und Philips S/PDIF eingeführt, stellte aber noch keinen Vernetzungsstandard im engeren Sinne dar. Mit dem nachfolgenden A-LAN-Standard konnten erstmals Consumer-Electronics-Geräte miteinander zu einem Netzwerk verbunden werden. Auf dieser Basis entstand 1995 der D²B-optical-Standard, der als erster optischer Bus zur Vernetzung multimedialer Geräte in Serienfahrzeugen eingesetzt wird.

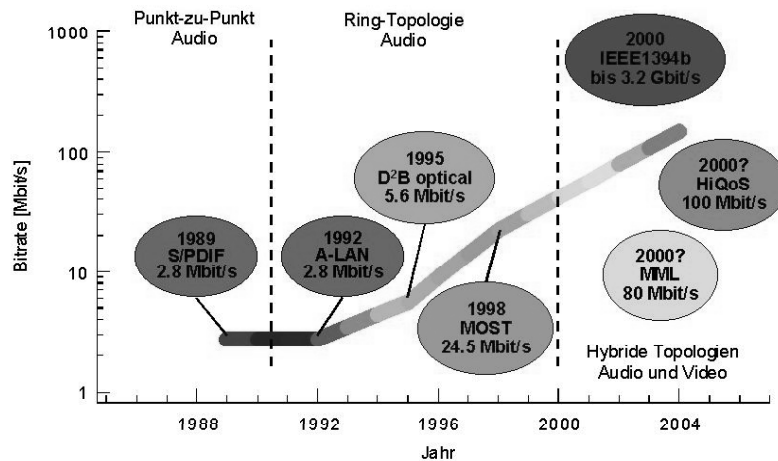


Abb. 2: Chronologische Entwicklung verfügbarer Multimedia-Vernetzungsstandards.

Im seit 1998 verfügbaren MOST-Standard, für den zur Zeit zahlreiche Entwicklungen auf dem Wege sind, lassen sich bereits deutlich höhere Bitraten transportieren. Allerdings ist schon erkennbar, dass für eine echte Multimedia-Vernetzung, die Videodienste einschließt, eine nochmals deutlich höhere Bandbreite erforderlich ist. Deshalb werden zur Zeit eine Reihe hochratiger Bussysteme als mögliche Nachfolgesysteme diskutiert. Charakteristisch ist hier, dass neben solchen Standards wie MML oder HiQoS, die aus dem Automotive-Bereich kommen, auch moderne Consumer-Electronics-getriebene Multimedia-Bus-Standards wie IEEE 1394 auftreten. Drei unterschiedliche Topologie-Beispiele sind in **Abb. 3** dargestellt.

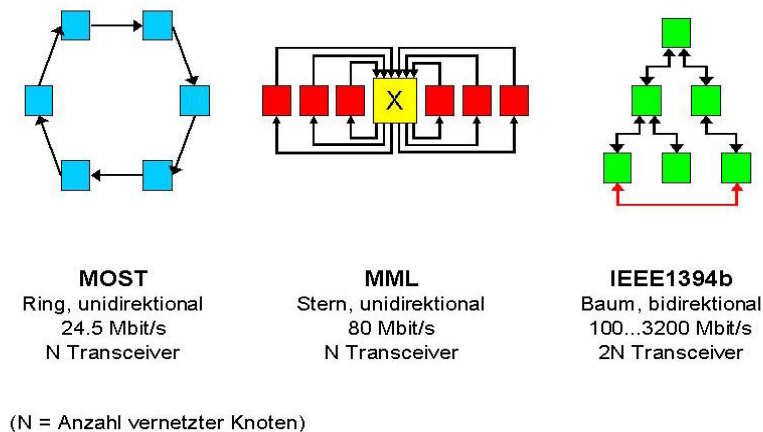


Abb. 3: Beispiele für unterschiedliche Topologien und realisierbare Bitraten. Zusätzlich ist die Anzahl der jeweils benötigten Transceiver angegeben.

Der MOST-Standard operiert mit einem unidirektionalen Ring, was den Vorteil der minimalen Transceiverzahl, aber den Nachteil einer maximalen Ausfallempfindlichkeit des Gesamtsystems mit sich bringt. Die Sterntopologie hat bezüglich der Ausfallsicherheit deutliche Vorteile, da der passiven Sternkopplerkomponente eine geringe Ausfallrate zugeschrieben wird. Aufgrund der Leistungsteilung am Stern ist aber die Zahl der anschließbaren Komponenten deutlich begrenzt. Beim IEEE1394b lassen sich allgemeine, baumartige Topologien realisieren, wobei die Knoten unterschiedlich viele Ports aufweisen. Die Knoten agieren jeweils als

Repeater, wobei alle Verbindungen zwischen den Knoten physikalisch als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisiert sind.

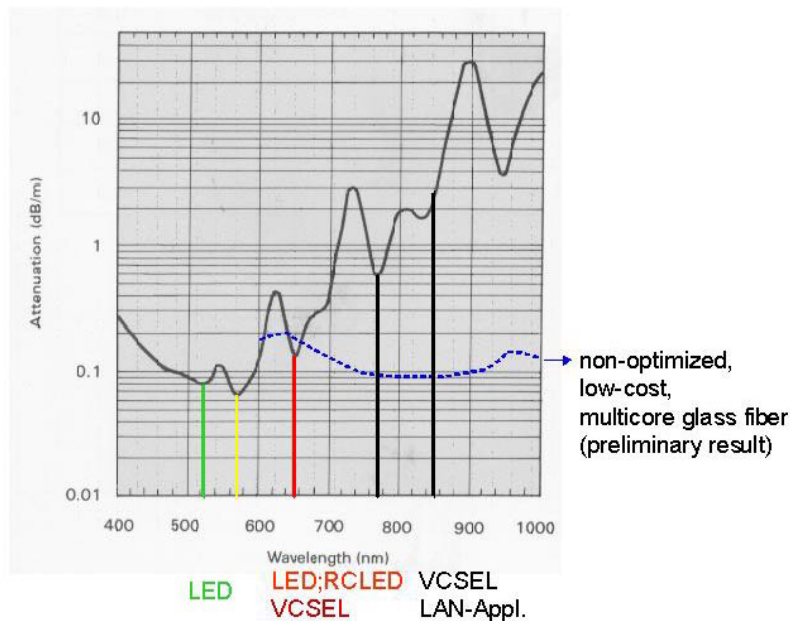


Abb. 4: Spektrales Dämpfungsverhalten der Standard-Plastikfaser und neuartiger amorpher Glasfasern. Die Wellenlängen verfügbarer optischer Quellen sind markiert.

Bei allen hier genannten optischen Bussystemen wird als Übertragungsmedium die 1-mm-Plastikfaser eingesetzt. Ihr Dämpfungsverhalten ist in **Abb. 4** dargestellt. Deutlich sind die Minima der Dämpfung zu erkennen, die die Auswahl geeigneter optoelektronischer Komponenten bestimmen. Wenn die für eine breitbandige Datenübertragung sehr interessanten kommerziell verfügbaren VCSELs mit Emissionswellenlängen bei 780 nm oder 850 nm verwendet werden sollen, setzt hier die Plastikfaser aufgrund ihrer hohen Dämpfung entscheidende Grenzen. Hier sind Alternativen wie neuartige amorphe Glasfasern mit vergleichsweise sehr flachem Dämpfungsverlauf (wie in Abb. 4 eingezeichnet) sehr interessant.

3 Einsatzpotential optischer Interconnects

Transceiver haben die Aufgabe, die im Netzwerk zu übertragenden Informationen in zwischen der elektrischen und der optischen Signalform zu wandeln, zu senden und zu empfangen. Jedes vernetzte Subsystem verfügt mindestens über einen Transceiver. Je nach Vernetzungsstandard können aber auch mehrere Transceiver in einer Gerätebaugruppe auftreten. Der Aufbau eines konventionellen Transceivers ist in **Abb. 5** schematisch dargestellt.

Die Gerätebauform gibt hier die Anordnung der optischen Schnittstelle fest vor. Daher werden hier die Wandler in das Steckergehäuse auf der Geräterückseite integriert. Damit ist eine Optimierung der elektrischen Signalführung nur durch eine Veränderung der Anordnung der elektronischen Komponenten möglich, wodurch die Optimierung des elektronischen Layouts Freiheitsgrade verliert. Die internen „Pigtails“ erlauben es zum Beispiel, die optoelektronischen Wandler so auf der Leiterplatte anzuordnen, wie es die Optimierung des elektrischen Layouts verlangt. Außerdem können Typen und Bauformen der Wandler unabhängig vom Design des Steckergehäuses festgelegt werden. Es sind damit klare Vorteile für das Design gegeben, die gerade unter EMV-Gesichtspunkten zu berücksichtigen sind. Auf der anderen Seite fallen neben den zusätzlichen Fasern weitere Komponenten wie Stecker und Adapter an.

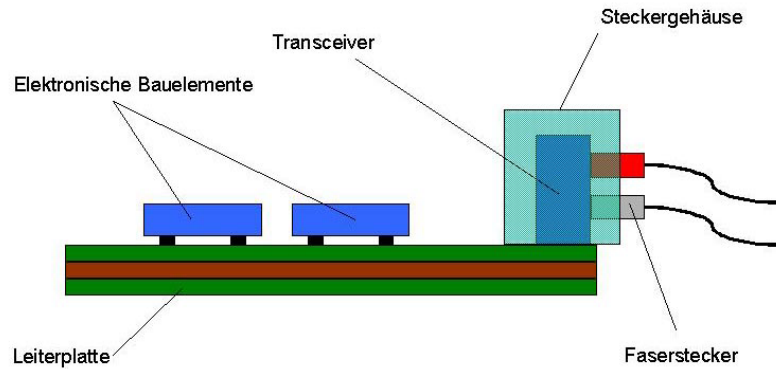


Abb. 5: Schematische Darstellung eines konventionellen Transceiver-Aufbaus. Die optoelektronischen Wandler befinden sich im Steckergehäuse.

Eine flexiblere Anordnung der optoelektronischen Wandler kann erreicht werden, wenn der Transceiver im Geräteinneren über kurze „Pigtail“-Fasern mit dem Steckergehäuse verbunden wird. Ein solcher Aufbau ist schematisch in **Abb. 6** dargestellt.

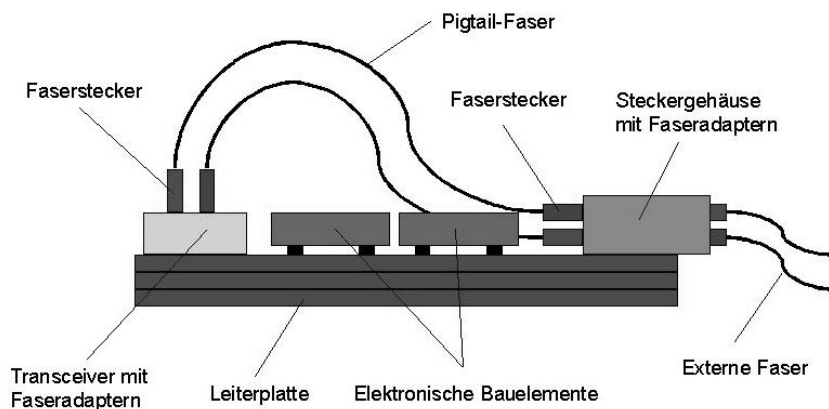


Abb. 6: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Transceiver-Baugruppe mit „Pigtail“-Fasern.

Diese verursachen zunächst eine zusätzliche Dämpfung, führen aber auch zu einer vermindernden Systemzuverlässigkeit aufgrund der größeren Komponentenanzahl und wegen der erhöhten Vibrationsanfälligkeit des Aufbaus. Die „Pigtail“-Fasern bringen außerdem einen wenig oder gar nicht automatisierbaren Montageschritt mit sich. Die genannten Design-Vorteile werden also mit Nachteilen bei den Systemeigenschaften, bei den Kosten und im Handling erkauft.

Diese Nachteile lassen sich – bis auf die zusätzliche Dämpfung – durch eine Integration der „Pigtail“-Verbindungen in den Träger vermeiden. Dadurch entsteht ein Aufbau mit einer hybrid elektrisch/optischen Leiterplatte, wie er schematisch in **Abb. 7** dargestellt ist.

Die „Pigtail“-Wellenleiter befinden sich hier in einem zusätzlichen Schichtensystem der Leiterplatte, welches optische Multimode-Streifenwellenleiterstrukturen enthält. Im Gegensatz zum „Pigtail“-Faser-Aufbau entfallen hier die zusätzlichen Komponenten für die Konfektionierung. Der Aufbau enthält keine vibrationsanfälligen Teile und ist kompatibel zu konventionellen Bestückungslinien. Allerdings werden hier optoelektronische Komponenten in nicht

standardisierter Bauform benötigt und auch für die externen Fasern sind spezielle Steckerbauformen erforderlich.

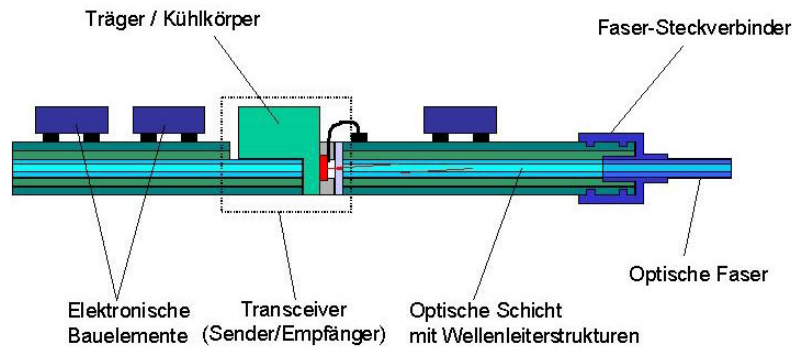


Abb. 7: Schematische Darstellung einer EOCB-Transceiver-Baugruppe mit hybrid elektrisch/optischer Leiterplatte. Sender- und Empfängerkomponenten sind in diesem Beispiel direkt an die optischen Wellenleiter in der Leiterplatte angekoppelt.

Um das Einsatzpotential Board-integrierter optischer Interconnects für Fahrzeugbus-Transceiver einschätzen zu können, sind die folgenden Eigenschaften hybrider elektrisch/optischer Leiterplatten wesentlich:

- Ein zusätzliches optisches Schichtensystem bedeutet zunächst einen Mehraufwand für Materialien und Handling bei der Leiterplatten-Herstellung. Dieser hängt von den erreichten Stückzahlen ab.
- Da die optoelektronischen Komponenten für den EOCB-Aufbau nicht in Standard-Bauformen vorliegen, muß man hier ebenfalls von Zusatzkosten ausgehen. Da jedoch die Genauigkeitsanforderungen etwa gegenüber Komponenten für Plastikfaser-Systeme grundsätzlich gleich sind, sollten zumindest bei größeren Stückzahlen auch sehr ähnliche Kostenlevel erreicht werden.
- Für die integrierten Wellenleiterstrukturen wird keine Konfektionierung (Stecker oder Adapter) benötigt. Die Erzeugung der Koppelöffnungen fällt zum Beispiel als Standard-Fräßprozeß bei der Leiterplatten-Herstellung an.
- Der Mehraufwand für die zusätzliche optische Ebene hängt nicht von ihrem Layout ab. Komplexere optische Strukturen verursachen also gegenüber einfachen Strukturen keinen Zusatzaufwand.
- Die Bestückung ist vollständig automatisierbar.

Diese Beobachtungen erlauben bereits, ein einfaches Kostenmodell für den jeweiligen Zusatzaufwand aufzustellen, der durch optoelektronische und optische Komponenten jeweils zu den Kosten der Leiterplatte hinzukommt. Die folgenden Diagramme zeigen den Kostenvergleich jeweils für die drei oben beschriebenen Aufbauvarianten (konventionelle „Stecker“-Variante, „Pigtail“-Faser-Variante sowie die „EOCB“-Varianten "a" mit 30% angenommenen Mehrkosten und "b" mit 10% angenommenen Mehrkosten).

In einem ersten Beispiel (**Abb. 8**) soll eine Mehrfach-Transceiver-Baugruppe, die auf dem IEEE1394b-Standard basiert, betrachtet werden. Die Kommunikation zwischen zwei Ports geschieht hier über ein Paar unidirektional betriebener optischer Fasern. Das Integrationspotential ist hier nur von der Anzahl der auf der Baugruppe realisierten Ports abhängig, da außer den „Pigtail“-Wellenleitern keine weiteren optischen Strukturen auftreten. Wegen des einge-

sparten Konfektionierungsaufwandes ergibt sich für eine „EOCB“-Lösung bei größeren Port-Anzahlen ein Kostenvorteil.

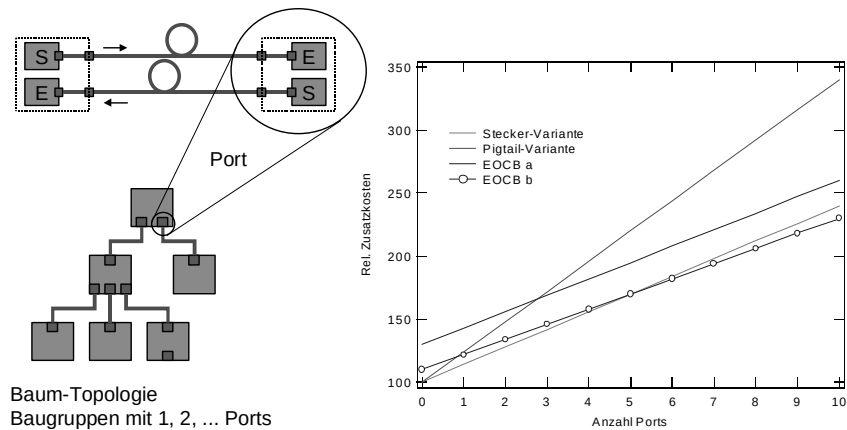


Abb. 8: Vergleich der relativen Zusatzkosten für eine Mehrfach-Transceiver-Baugruppe basierend auf dem IEEE1394b-Standard als Funktion der Portanzahl.

Als Prototyp (SONY, International POF Conference '99) ist eine Abwandlung des eben genannten Transceiver-Aufbaus bekannt, der durch die Verwendung asymmetrischer Y-Koppler das Faserpaar zwischen zwei Ports durch eine einzelne bidirektional betriebene Faser ersetzt. Hier kann die "EOCB"-Variante außer den "Pigtail"-Wellenleitern auch die Y-Koppler integrieren und zeigt bereits bei kleineren Portanzahlen Kostenvorteile, wie in **Abb. 9** dargestellt.

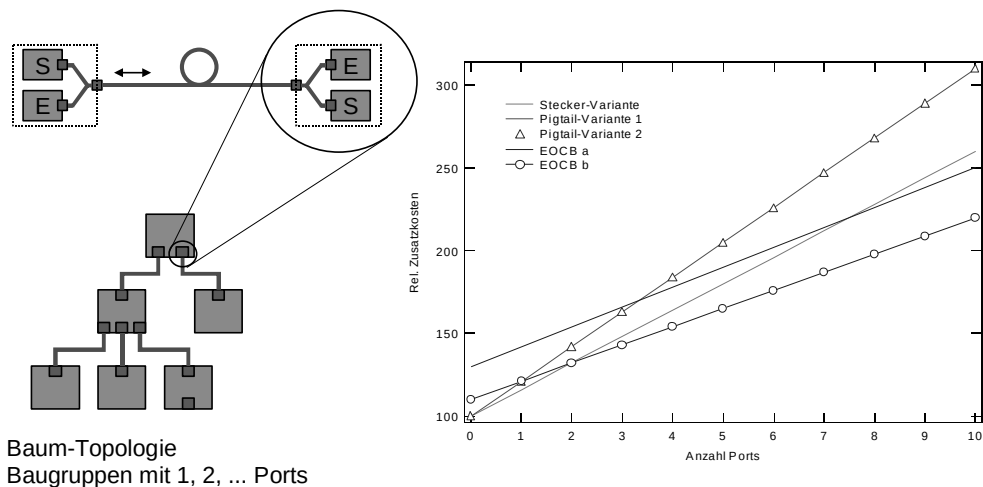


Abb. 9: Vergleich der relativen Zusatzkosten für eine modifizierte IEEE1394b-Transceiver-Baugruppe mit bidirektional betriebenen Fasern und Y-Kopplern.

Im letzten Beispiel soll eine Transceiver-Baugruppe betrachtet werden, die neben je einem Sender und Empfänger einen passiven optischen Sternkoppler mit unterschiedlich vielen Ports enthält. Solche Baugruppen können, wie oben beschrieben, in vernetzten Systemen nach dem MML-Standard auftreten. Da hier mit dem passiven Sternkoppler eine vergleichsweise komplexe Struktur integriert werden kann, ist erwartungsgemäß das Potential der EOCB-Aufbautechnik besser ausgenutzt als in den anderen Beispielen. Der Vergleich der relativen Zusatzkosten ist in **Abb. 10** dargestellt.

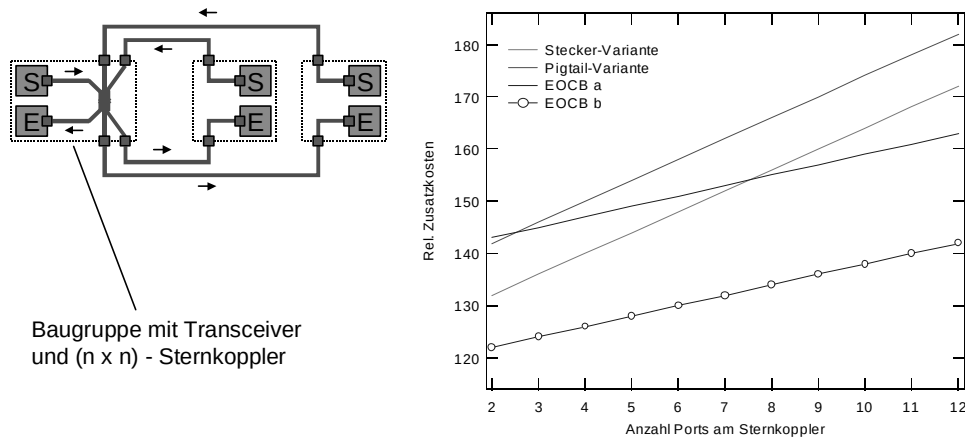


Abb. 10: Vergleich der relativen Zusatzkosten für eine Transceiver-Baugruppe mit passivem Sternkoppler.

4 Fazit

Zusammenfassend sei festgestellt, dass hybride elektrisch/optische Leiterplatten mit ihrer gegenüber konventionellen Leiterplatten zusätzlichen optischen Funktionsebene eine breitbandige und gleichzeitig störungsunanfällige Übertragungstechnik bereitstellen können, die die bekannten Vorteile der optischen Übertragungstechnik weiter in Richtung kleinerer Streckenlängen fortführen. Mehraufwand muss zunächst beim komplexeren Lagenaufbau der Leiterplatte geleistet werden, wobei aber auch wiederum Einspareffekte bis hin zum Wegfall ganzer Signallagen auftreten können.

Für Optoelektronik und Steckerschnittstelle sind zur Zeit insbesondere fahrzeugtaugliche kommerzielle Komponenten mit geeigneter Geometrie noch nicht verfügbar. In Zukunft sind hier neue Konzepte mit den Halbleiter-, Komponenten- und Packagingherstellern zu diskutieren und umzusetzen. Die derzeit erforderlichen Anpassungen stellen daher einen künftig zu vermeidenden Mehraufwand dar. Gegenüber einem diskreten Aufbau mit konfektionierten Faserkomponenten können aber schon Kosten eingespart werden, wobei der Kostenvorteil mit höherer optischer Komplexität zunimmt. Diese Komplexität wird in zukünftigen Fahrzeug-Kommunikationssystemen, die in immer mehr Bereiche des Fahrzeugs vordringen, weiter anwachsen. Zukünftig wird also das technische und wirtschaftliche Potential Board-integrierter Interconnects deutlich zunehmen.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes "EOCB" durchgeführt und unter dem Förderkennzeichen 16SV796/6 vom BMBF gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Optische Verbindungstechnik in Computersystemen der nächsten Generation

Andreas Himmler

Siemens SBS C-LAB, Fürstenallee 11, 33098 Paderborn

Andreas.Himmler@c-lab.de, himmler@ieee.org

Zusammenfassung: Es ist davon auszugehen, dass sich die bekannte Entwicklungsgeschwindigkeit der Mikroelektronik in den nächsten Jahren fortsetzen wird. Dadurch wird der existierende Abstand der Leistungsfähigkeit zwischen der Mikroelektronik und den elektrischen Verbindungen auf Leiterplatten weiter anwachsen. Die aus diesem Abstand für Computersysteme resultierenden Einschränkungen und Probleme können mit einer elektrisch-optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplattebene gelöst werden, die eine größtmögliche Kompatibilität mit der existierenden Leiterplattentechnik aufweist. In diesem Artikel werden die Anforderungen an diese neue Technik und praxisnahe Anwendungen für Computer diskutiert.

1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit eines Computersystems wird von der Leistungsfähigkeit der mikroelektronischen Komponenten, der Intrasystemverbindungen und der Systemarchitektur signifikant bestimmt. In der Regel wird jedoch die Prozessor-Taktrate als ein Maß für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems verstanden. In der Vergangenheit konnte eine kontinuierliche Steigerung der Taktfrequenzen von Mikroprozessoren beobachtet werden (Bild 1), die auch noch weiter anhält. Entsprechend der Technology Roadmap der Semiconductor Industry Association [1] wird von einer Fortsetzung dieser Entwicklung ausgegangen (Bild 1), da die Weiterentwicklung der Mikroelektronik in den nächsten 10 bis 15 Jahren nicht durch fundamentale physikalische Effekte begrenzt wird.

Die Leistungsfähigkeit der Mikroprozessoren der nächsten oder übernächsten Generation — diese werden On-Chip-Taktfrequenzen von mehreren GHz und 64 Bit-Architekturen haben — kann nur dann vollständig genutzt werden, wenn auch die Peripherie und die Kommunikationskanäle zwischen einzelnen Komponenten entsprechende Bandbreiten bereitstellen. Somit ist es zwingend erforderlich, Signale mit Bandbreiten im GHz-Bereich auf Leiterplatten- und Systemebene zu übertragen.

In den letzten Jahren ist ein Entwicklungsabstand zwischen den Prozessortaktfrequenzen und den Taktfrequenzen auf Bussen entstanden, weil die Leistungsfähigkeit der konventionellen elektrischen Verbindungstechnik durch die zugrunde liegenden physikalischen Eigenschaften begrenzt ist. Die größten Nachteile bzw. Probleme sind:

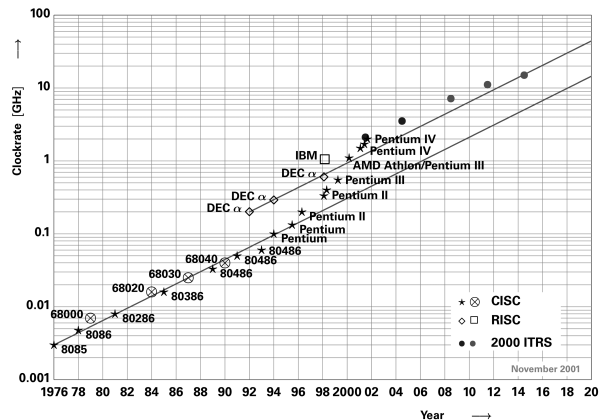


Bild 1: Entwicklung der Taktfrequenzen von Mikroprozessoren in der Vergangenheit und Vorhersage ihrer Weiterentwicklung gemäß der International Technology Roadmap der Semiconductor Industry Association [1]

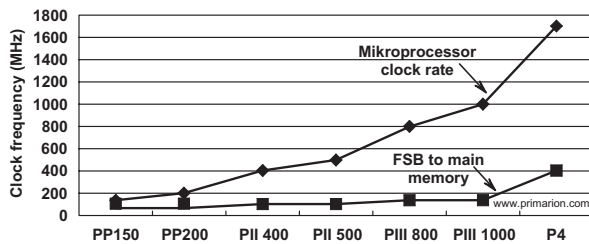


Bild 2: Entwicklung der Prozessortaktfrequenzen und den Taktfrequenzen auf Bussen innerhalb von Computern (Quelle: www.primarion.com)

- Das begrenzte Bandbreite-Länge-Produkt,
- die Aussendung von und die Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Strahlung,
- der hohe Aufwand zur Gewährleistung der Signalintegrität und
- die hohe Anzahl erforderlicher Einzelverbindungen (Pin-Count) bei Komponenten und Steckern, verursacht durch die begrenzte Datenrate der Einzelverbindungen.

Um diese Einschränkungen und Probleme zu lösen, wurden faseroptische Verbindungen kurzer Reichweite für Anwendungen innerhalb von Systemen und zwischen Teilsystemen entwickelt. Beispiele dieser Entwicklungen sind parallele faseroptische Module, die von mehreren Firmen angeboten werden (z. B. Agilent, Emcore, Gore, Infineon, Optobahn, Picolight, Zarlink). Diese parallelen faseroptischen Module haben bis zu 12 Kanäle mit Datenraten von typischerweise 2,5Gbit/s je Kanal. Derzeit sind Module mit Datenraten von 10Gbit/s in der Entwicklung.

Da Leiterplatten und Baugruppen heute zu den wichtigsten Komponenten elektronischer Systeme zählen und sie diese Funktion in der Zukunft behalten werden, sind innovative Konzepte und Technologien erforderlich, um die Leiterplatten der Zukunft mit den erforderlichen Leistungsmerkmalen auszustatten. Eine besondere Bedeutung wird dabei der optischen Verbindungstechnik auf Leiterplatten- bzw. Baugruppenebene zukommen, mit der die Begrenzungen der elektrischen Verbindungstechnik überwunden werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die elektrische Verbindungstechnik aus verschiedenen Gründen weiterhin erforderlich ist. Denn zum einen muss nicht jede Verbindung auf Leiterplatten für hohe Bandbreiten ausgelegt sein, so dass die elektrische Verbindungstechnik für viele On-Board-Signale weiterhin ausreichend ist. Zum anderen sind alle Prozesse für die Herstellung von Leiterplatten weitgehend standardisiert, so dass eine akzeptable und industriell einsetzbare Lösung ausschließlich auf der Basis der existierenden Leiterplattentechnologie aufgebaut werden kann. Eine neue Verbindungstechnik, die den zukünftigen Anforderungen hinsichtlich Bandbreite und Störfestigkeit genügt, kann somit nur aus einer konsequenten Weiterentwicklung der existierenden Technologie hervorgehen.

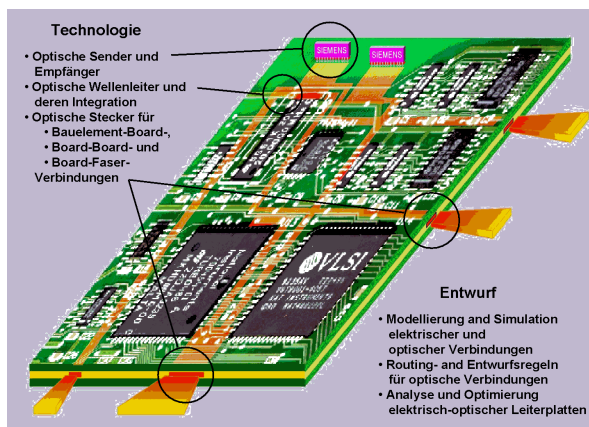


Bild 3: Baugruppe mit elektrischen und optischen Verbindungen

Ein vielversprechender Ansatz hierfür ist eine optische Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplattebene durch die Integration optischer Verbindungen in konventionelle elektrische Leiterplatten (Bild 3). Mit Hilfe dieses Lösungsansatzes können die Vorteile der elektrischen und der optischen Verbindungstechnik kombiniert und die Nachteile weitgehend vermieden

werden. Ein industrieller Einsatz dieser hybriden elektrisch-optischen Leiterplattentechnologie erfordert praktikable und robuste Herstellungs- und Entwurfsverfahren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass innerhalb der gesamten Produktentstehungskette der Entwurfsprozess die gleiche Wertigkeit besitzt wie die erforderlichen Fertigungsverfahren.

Nach einer Übersicht über elektrisch-optische Verbindungstechniken für informationsverarbeitende Systeme, werden im Folgenden die Anforderungen an eine elektrisch-optische Aufbau- und Verbindungstechnik — dieses betrifft die Technologie und den Entwurfsprozess — auf Leiterplattenebene diskutiert, mit der die größtmögliche Kompatibilität mit der existierenden Leiterplattentechnik erreicht werden kann. Anschließend werden an Hand der grundlegenden Architektur von Computern Beispiele für die Anwendung der elektrisch-optischen Verbindungstechnik diskutiert.

2 Optische Aufbau- und Verbindungstechnik für informationsverarbeitende Systeme: Übersicht

Die aus der absehbaren Weiterentwicklung der Mikroelektronik resultierenden weiteren Leistungssteigerungen informationsverarbeitender Systeme betreffen sowohl Universalrechner mit Von-Neumann-Architektur, die üblicherweise als Rechen- und Datenserver eingesetzt werden, als auch Systeme für spezielle Aufgaben. Beispiele für letztere sind die Echtzeit-Bildverarbeitung hoher Auflösung — für medizinische Zwecke und für synthetisches Aperturradar — und militärische Anwendungen, wie die automatische Zielerkennung. Ein weiteres Beispiel für Systeme mit anwendungsspezifischer Architektur sind Telekommunikationssysteme, wie z. B. Router und Switches.

Die wesentlichen Bestandteile dieser informationsverarbeitenden Systeme werden mehrere Universalprozessoren, ein Arbeitsspeicher großer Kapazität, bestehend aus Speicherbausteinen in Einzelgehäusen, und für spezielle Anwendungen auch anwendungsspezifische Halbleiterkomponenten (z.B. Signalprozessoren) sein. Zwischen diesen einzelnen Bestandteilen informationsverarbeitender Systeme sind Kommunikationskanäle erforderlich, deren Bandbreite der Leistungsfähigkeit der Halbleiterkomponenten gerecht wird, damit die Datenübertragung innerhalb der Systeme nicht die Leistungsfähigkeit der Systeme begrenzt. Um dieses zu erreichen, wird üblicherweise von Summendatenraten für die Kommunikationskanäle innerhalb von Systemen im Bereich von Terabit pro Sekunde ausgegangen.

Aus diesen absehbaren Entwicklungen folgt, dass die Anforderungen an die Verbindungstechnik innerhalb der Systeme weiterhin ansteigen werden. Jedoch muss der Anstieg der auf Intrasystemverbindungen erreichbaren Datenraten größer sein als in der Vergangenheit, um den in den letzten Jahren entstandenen Entwicklungsabstand zwischen den Prozessortaktfrequenzen und den Bustaktfrequenzen zu schließen (Bild 2).

Zusätzlich zu den Anforderungen an die Datenraten existieren auch Anforderungen an den zur Datenübertragung innerhalb von Systemen erforderlichen Leistungsbedarf. Beispielsweise ist es bei Telekommunikationssystemen bereits heute problematisch, die in den Systemen entstehende Abwärme aus den Systemen abzuführen. Die Abwärme resultiert aus der bei der elektrischen Signalübertragung entstehenden Verlustleistung, z. B. von Treiberschaltungen für die elektrischen Leitungen. Mit Zunahme der Taktfrequenzen auf den Leitungen wächst dieses Problem an, weil damit auch die durch den Skin-Effekt verursachten Verluste auf den elektrischen Leitungen ansteigen, wodurch aufwendigere Treiber erforderlich sind.

Die bei Anwendung der elektrischen Übertragungstechnik, bedingt durch die zugrundeliegen-

den physikalischen Prinzipien, vorhandenen Probleme existieren nicht bei der optischen Übertragungstechnik. Diese hat das Potenzial zu erheblich höheren Datenraten, und zusätzlich ist auch der Leistungsbedarf für die Informationsübertragung geringer [2]. Die optische Übertragungstechnik ist zudem unempfindlich gegen die Einstrahlung elektromagnetischer Störungen, und optische Übertragungsstrecken emittieren auch keine Störfelder.

2.1 Verbindungshierarchie

Optische Verbindungen für informationsverarbeitende Systeme können an Hand der Verbindungshierarchie in den Systemen klassifiziert werden [3]. Man kann unterscheiden zwischen Verbindungen zwischen

- Teilsystemen (Rack-to-rack, Cabinet-to-cabinet), Verbindungen über
- Rückwände (Board-to-board, backplane), Verbindungen auf
- Baugruppen-Ebene, auf
- Multi-Chip-Modulen und auf Chip-Ebene.

Für Verbindungen zwischen Teilsystemen sind derzeit die oben genannten parallelen faseroptischen Verbindungen verfügbar. Zusätzlich zu den schon genannten übertragungstechnischen Vorteilen der optischen Verbindungstechnik haben faseroptische Verbindungen gegenüber elektrischen kabelbasierten Verbindungen auch einen erheblich geringeren Platzbedarf, weil die Querschnittsabmessungen der Faserkabel deutlich kleiner sind, als die für die elektrische Übertragung verwendeten Koaxialkabel.

Um die Vorteile der optischen Übertragungstechnik auch innerhalb von Systemen nutzen zu können, wurde eine Reihe von Konzepten entwickelt. Für diese werden entweder optische Fasern (s. z.B. [3, 4, 5, 6, 7]) oder Kanalwellenleiter aus Polymeren (s. z.B. [8, 9, 10]) verwendet. Der Nachteil der faserbasierten Lösungen ist ihre geringe Verbindungsflexibilität. So sind mit ihnen beispielsweise 1 auf n Verzweiger nur mit großem Aufwand und damit kostenintensiv herstellbar, die mit den üblichen elektrischen Verbindungen einfach und nahezu ohne zusätzliche Kosten realisierbar sind. Zusätzlich erfordern Glasfasern große Biegeradien und damit viel Platz auf den Leiterplatten. Da im Herstellungsprozess auch jede Faser einzeln verlegt werden muss, sind hierfür aufwendige Prozesse erforderlich.

Zur Vermeidung dieser Probleme wurden Konzepte auf der Basis polymerer Kanalwellenleiter entwickelt, die auf planaren Substraten herstellbar sind [8, 9, 10]. Der Nachteil dieser Lösungen ist, dass sie nicht in Standard-Leiterplatten integriert werden können, da die Wellenleiter die Temperaturen während der Leiterplattenherstellung und des Lötprozesses nicht überstehen. Somit sind sie nicht kompatibel mit dem gegenwärtigen Herstellungsprozess für Leiterplatten. Derartige Kanalwellenleiter wurden vor allem für die Anwendung in Rückwänden entwickelt.

Die Entwicklung zeigt, dass die optische Verbindungstechnik zuerst für die langen Verbindungen innerhalb von Systemen angewendet wurde, weil für sie die Probleme der elektrischen Verbindungen zuerst nicht mehr lösbar waren. Dass ein Anstieg der Datenraten bei der elektrischen Übertragungstechnik mit einer Abnahme der maximal zulässigen Übertragungslänge verbunden ist, zeigen die immer kürzeren zulässigen Längen von Bussen deutlich, wie z.B. beim Rambus. Daraus resultieren Probleme für den Systementwurf, weil die räumliche Anordnung der Halbleiterkomponenten zueinander engen Randbedingungen unterliegt. Beispielsweise werden deshalb bei Computern mit mehreren Prozessoren im Allgemeinen jeweils zwei Prozessoren auf den beiden gegenüberliegenden Seiten von Leiterplatten angeordnet.

Den Schwerpunkt dieses Artikels bildet die optische Verbindungstechnik auf Baugruppenebene. Denn nach der erfolgreichen Einführung paralleler faseroptischer Verbindungen sind optische Verbindungen auf Baugruppenebene der nächste Entwicklungsschritt für die Anwendung optischer Übertragung innerhalb von Computern.

Für die nächstkürzeren Verbindungen in der Verbindungshierarchie, den Verbindungen auf Multi-Chip-Modulen und auf Chip-Ebene wird ebenfalls bereits seit einigen Jahren an einer Reihe von Lösungen gearbeitet, auf die hier jedoch nicht eingegangen wird.

2.2 Optische Verbindungen auf Baugruppenebene

Die konsequente Weiterentwicklung der optischen Verbindungstechnik für Verbindungen innerhalb von Systemen erfordert eine optische Aufbau- und Verbindungstechnik für die Leiterplatten- und Baugruppenebene.

Um die Vorteile der optischen Signalübertragung für Verbindungen hoher Bandbreite auf Leiterplattebene nutzen zu können, müssen mehrere technologische und funktionale Voraussetzungen berücksichtigt werden. Die wichtigste Voraussetzung ist die Kompatibilität mit der derzeitigen Leiterplattentechnologie [11]. Denn optische Verbindungen auf Leiterplattebene können nur als Weiterentwicklung der gegenwärtigen Technologie eingeführt werden. Zusätzlich sind Erweiterungen des gegenwärtigen Designprozesses elektronischer Systeme erforderlich [12, 13, 14].

Aus den funktionalen Anforderungen an eine solche optische Aufbau- und Verbindungstechnik folgt, dass mit ihr eine freie „optische Verdrahtung“, analog zur konventionellen elektrischen Verbindungstechnik möglich sein muss. Dieses erfordert die Beibehaltung der üblichen Freiheitsgrade für die Realisierung von Zwei- und Mehrpunktverbindungen und damit auch Verzweigerstrukturen für die optischen Wellenleiter (Splitter, Combiner). Da solche Strukturen aber mit faseroptischen Verbindungen nicht wirtschaftlich realisierbar sind, scheiden faserbasierte Lösungsansätze, wie z.B. „Fiber-in-board“ [4], aus.

Eine weitere Anforderung an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik folgt aus der Funktion der Leiterplatte als Schaltungsträger, der die Verbindungen zwischen den aktiven und passiven Bauelementen enthält. Da diese Funktion erhalten werden muss, können die optischen Verbindungen nur Teil der Leiterplatte sein. Zusätzlich können die Verbindungen nur innerhalb der Leiterplatte angeordnet werden, weil ihre Außenseite fast vollständig für die Montage von Komponenten benötigt wird. Bild 4 zeigt dieses anschaulich am Beispiel einer Computerleiterplatte, auf der Prozessoren montiert sind.



Bild 4: Beispiel für die Bauelementedichte auf einer Computerleiterplatte

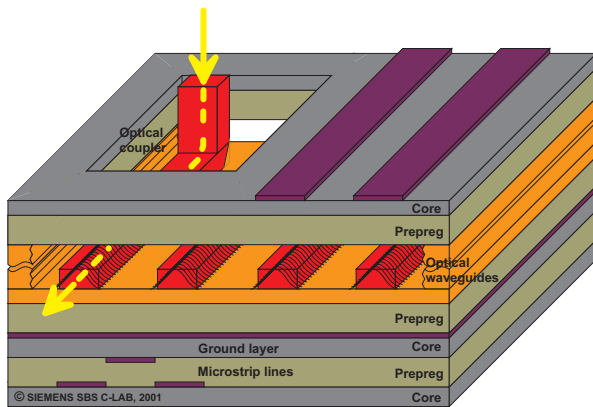
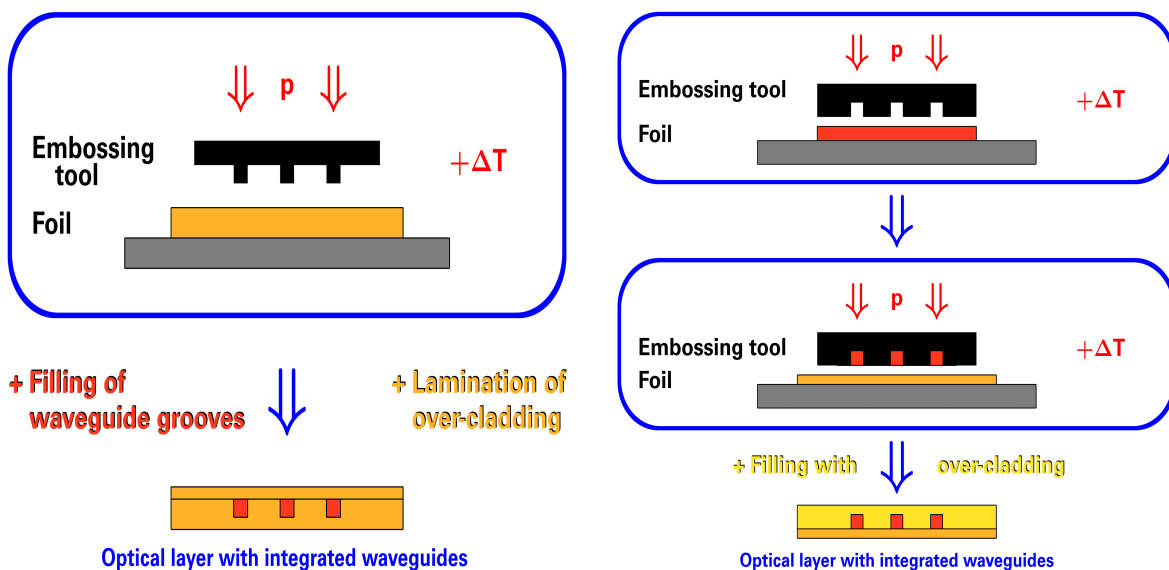


Bild 5: Konzept einer elektrisch-optischen Leiterplatte

gestellt werden können (Bild 6). Diese Technologie ermöglicht die benötigten Freiheitsgrade sowie die präzise Herstellung beliebiger Strukturen wie z. B. Leistungsteiler oder Sternkoppler. Eine Variante basiert auf der Strukturierung einer Polymerfolie [13]. Die resultierenden Wellenleitergräben werden dann mit flüssigem Kernmaterial gefüllt. Nach dem Aushärten (Curen) der Wellenleiterkerne wird dann das Overcladding durch das Auflaminieren einer weiteren Polymerfolie aufgebracht. Um die hohen Anforderungen an die Temperaturfestigkeit der optischen Lagen zu erfüllen, können Materialien wie z. B. COC [15] oder Polycarbonat [17] verwendet werden, die über eine entsprechend hohe Glasübergangstemperatur verfügen.

Für die Umsetzung dieser elektrisch-optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Baugruppenebene ist die Verfügbarkeit mehrerer Technologien und Komponenten erforderlich. Die wichtigsten sind

- optische Wellenleiter und Verfahren für ihre Integration in elektrische Leiterplatten,
- elektrisch-optische und optisch-elektrische Signalwandlerkomponenten für optische Sender und Empfänger sowie



(a) Prägen und Verfüllen von Gräben [13, 15]

(b) Prägen von Rippenwellenleitern [16, 17]

Bild 6: Verfahren zur Herstellung optischer Wellenleiter durch Heißprägen

- robuste Konzepte zur Realisierung optischer
 - Bauelement-Board-,
 - Board-Board- und
 - Board-Faser-Verbindungen.

Neben diesen Technologien und Komponenten müssen für die erfolgreiche Anwendung einer elektrisch-optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Baugruppenebene auch Voraussetzungen für den Entwurfsprozess elektrisch-optischer Leiterplatten erfüllt sein. Hierfür sind erforderlich:

- Simulationsmodelle und -algorithmen für Zeitbereichsanalysen von optischen Verbindungen,
- Routing- und Entwurfsregeln für optische Verbindungen und vollständige elektrisch-optische Leiterplatten,
- Verfahren für die Analyse und Optimierung elektrisch-optischer Leiterplatten bezüglich funktionaler, technologischer und wirtschaftlicher Randbedingungen.

Auf die Anforderungen an diese Technologien und Komponenten und auf die Anforderungen an den Entwurfsprozess wird in den beiden folgenden Abschnitten eingegangen.

3 Technologie

Die im vorangegangenen Abschnitt genannten notwendigen Technologien und Komponenten für eine hybride elektrisch-optische Aufbau- und Verbindungstechnik auf Baugruppenebene haben mehrere technologische und auch funktionale Randbedingungen zu erfüllen, die für einen industriellen Einsatz der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik unumgänglich sind. Die übergeordnete Anforderung ist die Gewährleistung der Kompatibilität zu der existierenden Leiterplattentechnologie. Dieses bedeutet, dass weder der Entwurfs- noch der Herstellungsprozess für Leiterplatten signifikant modifiziert werden darf. Insbesondere müssen die Prozesse für Entwurf und Herstellung des elektrischen Teils einer Leiterplatte nahezu unverändert bleiben. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass die unvermeidbaren Fertigungstoleranzen der optischen Wellenleiter in der Größenordnung der Fertigungstoleranzen der elektrischen Leitungen auf Leiterplatten liegen müssen.

3.1 Kompatibilität

Eine unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten unabdingbare Anforderung an die Technologie ist es, die automatische Bestückung elektrisch-optischer Leiterplatten zu gewährleisten. Diese sogenannte Pick-and-Place-Bestückung muss insbesondere für die zusätzlich erforderlichen elektrisch-optischen und optisch-elektrischen Wandlerkomponenten gelten. Denn eine aktive Justierung dieser Signalwandler kann aufgrund des hohen Aufwandes und der damit verbundenen hohen Kosten nicht akzeptiert werden. Somit ist die Sicherstellung der automatischen Oberflächenmontierbarkeit dieser Komponenten eine sehr wichtige und unbedingt zu erfüllende Anforderung. Realisierbar ist diese automatische Montage nur durch die Verfügbarkeit solcher Konzepte zur Kopplung der Wellenleiter an die optischen Sender und Empfänger, die robust und standardisiert sind und gleichzeitig niedrige Einfügedämpfungen gewährleisten.

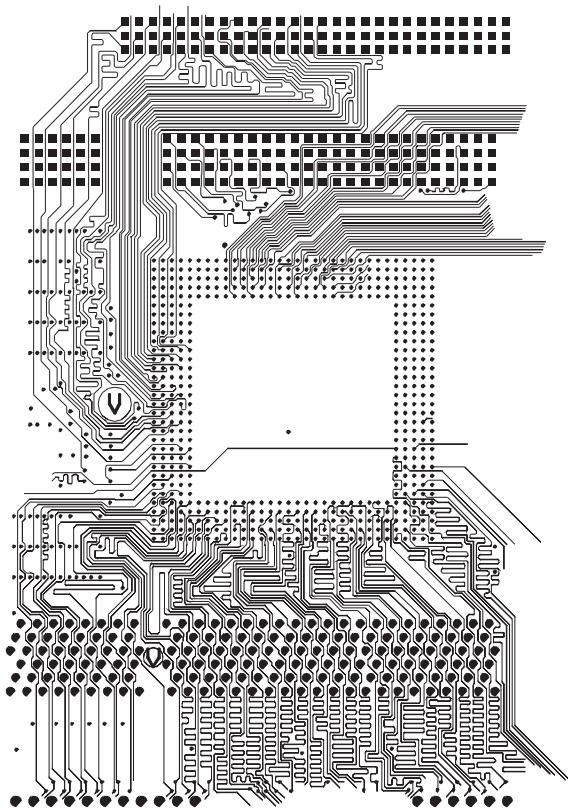


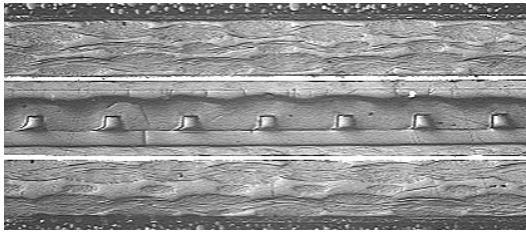
Bild 7: Beispiel einer Verdrahtung auf einer elektrischen Leiterplatte (Ausschnitt)

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Herstellungstoleranzen ist die Positioniergenauigkeit konventioneller Automaten zur Leiterplattenbestückung zu berücksichtigen, die bereits Toleranzen von $\pm 30 \mu\text{m}$ bei 3σ ($\pm 40 \mu\text{m}$ bei 4σ) erreichen. Daraus ist schnell ersichtlich, dass ausschließlich optische Verbindungen in Multimode-Technologie eine praktikable und akzeptable Lösung dieses Problems ermöglichen. Dabei sollten die Querschnittsabmessungen der optischen Multimode-Wellenleiter in der Größenordnung der Querschnittsabmessungen der elektrischen Leitungen auf Leiterplatten liegen. Daraus ergeben sich Querschnittsabmessungen der optischen Wellenleiter im Bereich von ca. $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$. Obwohl die Positioniergenauigkeit der Bestückungsautomaten im Vergleich zu den Querschnittsabmessungen der optischen Wellenleiter auf den ersten Blick als unzureichend erscheint, kann die geforderte passive Positionierung der Wandlerkomponenten durch mehrstufige mikromechanische Positionierhilfen erzielt werden, die gleichzeitig

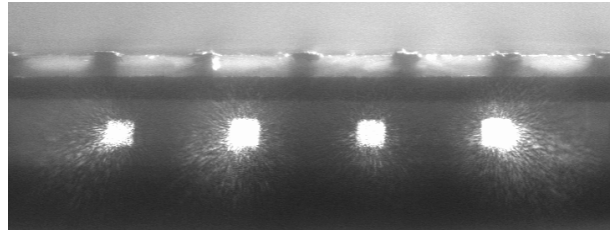
mit den optischen Wellenleitern hergestellt werden und deren Lage damit — entsprechend den Anforderungen an optische Verbindungen — hinreichend genau zu der Position der Wellenleiter ausgerichtet sind.

Neben diesen Technologie- und Kompatibilitätsanforderungen existieren einige funktionale Anforderungen an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik. Die erste Anforderung — eine freie und möglichst nicht limitierte bzw. nicht signifikant eingeschränkte optische Verdrahtung — ergibt sich direkt aus den scheinbar unlimitierten Möglichkeiten, die die elektrische Verbindungstechnik — ohne Berücksichtigung ihrer physikalischen und damit frequenzabhängigen Einschränkungen, wie z. B. Bandbreite, elektromagnetische Abstrahlung, Empfindlichkeit gegenüber externer elektromagnetischer Strahlung — bietet. Ein Beispiel dieser Freiheitsgrade zeigt der in Bild 7 dargestellte Layoutausschnitt einer elektrischen Lage einer komplexen Leiterplatte. Dort wurden mäanderförmige Leitungen verwendet, um die Laufzeit der verschiedenen Signale aufeinander abzustimmen bzw. anzugleichen. Nur mit der strengen Berücksichtigung dieser Forderung nach *freier Verdrahtung* kann ein hoher Integrationsgrad auf elektrisch-optischen Leiterplatten erreicht werden. Darüber hinaus ermöglicht eine freie Verdrahtung, mit der neben Punkt-zu-Punkt-Verbindungen — z. B. für Data-Links innerhalb von Systemen — auch beliebige Mehrpunkt-Verbindungsstrukturen realisiert werden können, eine universellere Nutzung dieser Technologie.

Dieses bedeutet jedoch, dass neben den optischen Wellenleitern auch andere passive Komponenten, wie beispielsweise Leistungsteiler mit einem durch das Layout definierbaren Teilungsverhältnis, integriert werden müssen. Dieses schließt die oben genannte Fiber-in-Board-Technologie [4] aus, bei der Multimode-Fasern in Leiterplatten einlaminieren werden. Durch den hohen Aufwand für die Ankopplung an die aktiven Komponenten und die durch den Ansatz



(a) Schliffbild einer Multilayer-Leiterplatte mit vier elektrischen Lagen und integrierten optischen Multimode-Wellenleitern



(b) Querschnitt einer Multilayer-Leiterplatte mit integrierten und durch VCSEL im CW-Betrieb angeregten optischen Multimode-Wellenleitern

Bild 8: Beispiele für die erfolgreiche Integration optischer Multimodewellenleiter in elektrische Multilayer-Leiterplatten

prinzipiell gegebene Einschränkung, dass die Verteilstrukturen nur außerhalb der Leiterplatten realisiert werden können, eignet sich dieser Ansatz nicht für einen industriellen Einsatz, der eine kostengünstige Fertigung auch für große Stückzahlen voraussetzt. Eine wesentlich bessere Lösung scheint die Realisierung einer separaten optischen Lage zu sein, die neben den Wellenleitern auch alle erforderlichen passiven optischen Komponenten enthält und die im Standardlaminierungsprozess in die Leiterplatte integriert werden kann.

Um mit der Leiterplattenfertigung weitgehend kompatibel zu sein, müssen die hohen thermischen und mechanischen Belastungen während der Laminierungsphase in Betracht gezogen werden. Beispielsweise herrscht bei der Verwendung von FR 4, dem Standardleiterplattenmaterial, für einen Zeitraum von ca. 60 Minuten bei einer Temperatur von etwa 170°C ein Druck von ca. 15 kp/cm². Ebenfalls ist der spätere Lötprozess zu berücksichtigen, in dem kurzzeitig Spitzentemperaturen von mehr als 230° (Reflow-Prozess) erreicht werden, wobei diese Temperaturen aufgrund der in den kommenden Jahren einzuführenden bleifreien Lote noch etwas ansteigen werden.

Letztendlich gibt es noch einige Anforderungen allgemeinerer Art, die bereits jetzt für konventionelle Leiterplatten gelten und auch weiterhin für elektrisch-optische Leiterplatten Gültigkeit besitzen müssen, um eine akzeptable Qualität und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Neben der eigentlich selbstverständlichen Verträglichkeit der Wellenleiternmaterialien mit den Leiterplattenmaterialien (z. B. FR 4 und Polyimid) sind hier die Anforderungen an die Lebensdauer sowie an die mechanischen, thermischen und klimatischen (Langzeit-)Eigenschaften zu nennen, die sich im wesentlichen aus dem späteren Einsatzgebiet der Leiterplatten ableiten. Darüber hinaus ist für eine problemlose Montage aller passiven und aktiven Komponenten auf die Planarität der Leiterplatte selbst, insbesondere aber im Bereich der Einbauplätze, zu achten, um nicht signifikant von den jetzt geltenden Toleranzen abzuweichen. Weiterhin sind noch die elektrischen Eigenschaften (z. B. Durchschlagsfestigkeit und Isolationswiderstand) der optischen Lagen zu erwähnen, die den jeweils gültigen Anforderungen gerecht werden müssen.

3.2 Optische Wellenleiter und ihre Integration in elektrische Leiterplatten

Eine Schlüsselkomponente für das in Abschnitt 2.2 skizzierte Heißprägeverfahren zur Wellenleiterherstellung ist das Prägewerkzeug, welches letztendlich über die erzielbaren Toleranzen sowie die Oberflächenqualität der Wellenleiter entscheidet. Eine mögliche Realisierungsvariante eines solchen Werkzeugs basiert auf der Herstellung einer Urform mittels der UV-Tiefenlithographie. Das eigentliche Werkzeug erhält man dann durch galvanisches Abformen

dieser Urform [15]. Durch die lithographische Strukturierung kann die zu Beginn genannte Forderung nach einer nahezu uneingeschränkten optischen Verdrahtung erfüllt werden. In Abhängigkeit der Herstellung des Prägewerkzeugs sowie des Prägeprozesses selbst, weisen die geprägten Wellenleiter Oberflächenrauigkeiten auf, die durch Streueffekte zu zusätzlichen Verlusten führen und darüber hinaus Crosstalk hervorrufen können. Experimentell konnten nach ersten Prägeversuchen Oberflächenrauigkeiten mit Rautiefen im Bereich von 50 bis 100 nm gemessen werden.

Nach der Herstellung der optischen Lage ist der letzte Schritt ihre Integration in die Leiterplatte (Bild 8), ohne den existierenden, weitgehend standardisierten Laminierungsprozess signifikant zu modifizieren. Untersuchungen an ersten Labormustern verliefen positiv und zeigten keine gravierenden Probleme auf [18, 19].

3.3 Elektrisch-optische und optisch-elektrische Signalwandlerkomponenten

Neben der Technologie zur Realisierung der Wellenleiter und zu ihrer Integration in die Leiterplatte sind die elektrisch-optischen Wandlermodule, die die Schnittstelle zwischen den optischen Wellenleitern und den mikroelektronischen Komponenten bilden, von entscheidender Bedeutung. Zur Realisierung dieser Komponenten werden zum einen kostengünstige *optische Sender* als auch kostengünstige und schnelle *optische Empfänger* benötigt. Die optischen Sendeelemente basieren auf vertikal emittierenden Laserdioden (VCSEL), die Licht mit einer Wellenlänge von ca. 850 nm emittieren. Dieser Wellenlängenbereich ist gerade deshalb interessant, weil die polymeren Materialien für die Wellenleiter in diesem Bereich ein lokales Dämpfungsminimum aufweisen. Die VCSEL-Technologie hat inzwischen einen akzeptablen Reifegrad erreicht und besitzt das Potenzial, auf der einen Seite sehr hohe Bandbreiten (10 GBit/s und mehr) [20] zu ermöglichen und auf der anderen Seite eine Low-Cost-Technologie zu werden.

Die optischen Empfänger, ausgeführt als OEICs (Opto-Electronic Integrated Circuits) basieren auf Photodioden mit integrierten Verstärkern. Bei der Dimensionierung der Photodiode ergibt sich ein Konflikt. Aus Sicht der Aufbautechnik und der automatischen Bestückbarkeit elektrisch-optischer Leiterplatten sollten die Querschnittsabmessungen der Wellenleiter möglichst groß sein. Dieses bedeutet, dass damit auch die Photodiode entsprechend groß sein muss, damit sich unter Berücksichtigung der numerischen Apertur des Wellenleiters und des Abstandes zwischen Wellenleiter und Photodiode keine Überstrahlung der Photodiode ergibt, bzw. damit diese ggf. vorhandene Überstrahlung in Abhängigkeit der zulässigen Toleranzen minimiert werden kann. Eine große Photodiode besitzt jedoch eine relativ große Kapazität, die wiederum die Bandbreite begrenzt. Dieses bedeutet, dass in Abhängigkeit der geforderten Bandbreite der Übertragungsstrecke die Querschnittsabmessungen der Wellenleiter zusammen mit dem Durchmesser der Photodiode reduziert werden müssen. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von mikrooptischen Komponenten (z. B. Mikrolinsen), die die aus dem Wellenleiter austretende optische Leistung vollständig auf den Photoempfänger projizieren. Die zuletzt genannte Möglichkeit führt jedoch, durch die erforderliche Justierung der mikrooptischen Komponenten und ihre Bauteilekosten, automatisch zu einer nicht-akzeptablen Kostensteigerung. Die Photodioden selbst können als PIN- oder MSM-Dioden ausgeführt sein, wobei sich MSM-Dioden aufgrund der bei identischer Größe deutlich geringeren Kapazität im Vergleich zu PIN-Dioden für den oberen Frequenzbereich anbieten.

Neben den erforderlichen aktiven Komponenten ist ein robustes und standardisiertes Konzept zur Ankopplung an die Wellenleiter eine äußerst wichtige Voraussetzung für den industriellen Einsatz der optischen Verbindungstechnik. Das Koppelkonzept muss durch entsprechende Justiervorrichtungen die automatische Bestückung elektrisch-optischer Leiterplatten mit den

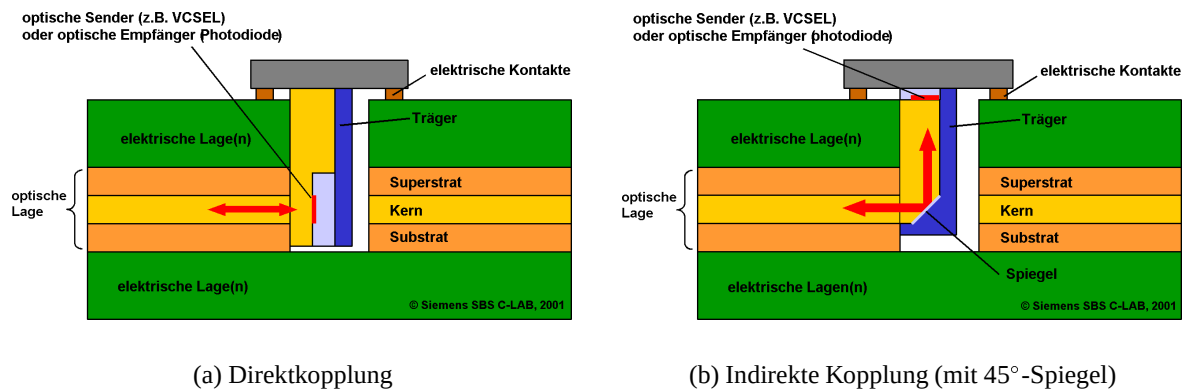


Bild 9: Konzepte zur Ein- und Auskopplung von Licht in optische Kanalwellenleiter innerhalb elektrisch-optischer Leiterplatten

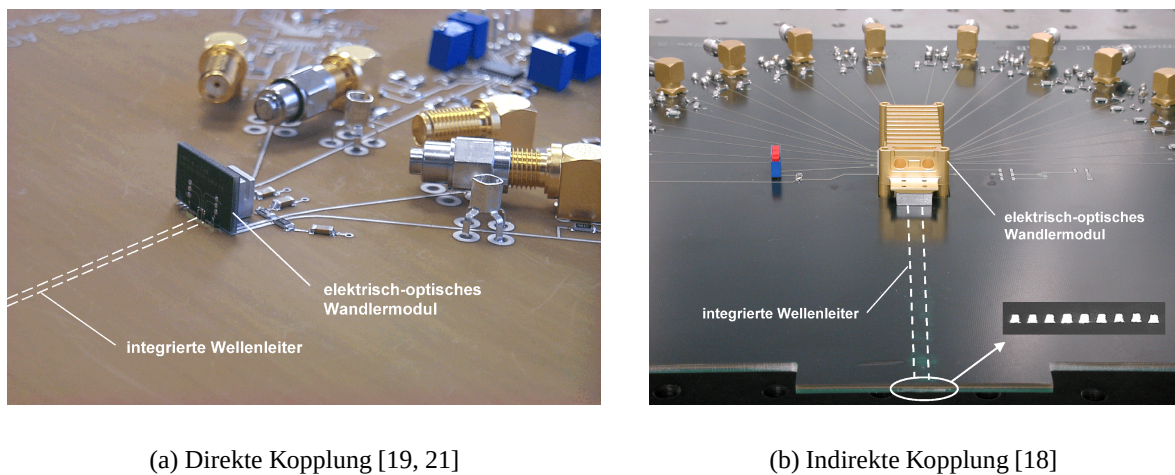


Bild 10: Laboraufbauten zum Test der Ankopplung von Wandlerkomponenten an board-integrierte Wellenleiter

Wandlermodulen sowie deren passive Ausrichtung relativ zu den Austrittsebenen der Wellenleiter innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen ermöglichen. Dabei ist die Positioniergenauigkeit konventioneller Leiterplattenbestückungsautomaten zugrunde zu legen. Der Forderung nach einer rein passiven Justierung der Wandlerkomponenten ist unbedingt nachzukommen, da eine aktive Justierung durch die entstehenden Montagekosten zu einer teuren und damit nicht akzeptablen Lösung führen würde. Grundsätzlich kann man zwei verschiedene Koppelmechanismen unterscheiden: Zum einen kann die Direkt- oder Stirnflächenkopplung, bei der sich die aktiven Wandlerkomponenten direkt vor den Stirnflächen der Wellenleiter befinden (Bild 9(a)), eingesetzt werden. Zum anderen bietet sich die indirekte Kopplung an, bei der die aktiven Wandlerkomponenten durch eine 90°-Strahlumlenkung an die Wellenleiter angekoppelt werden (Bild 9(b)).

Der in Bild 10(a) abgebildete Laboraufbau zeigt eine Leiterplatte mit integrierten optischen Wellenleitern und basiert auf der direkten Ankopplung. Diese Leiterplatte wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten EOCB-Projektes gemeinsam mit den Partnern¹ aufgebaut. Die eigentliche Wandlerkomponente besteht aus einer VCSEL-Zeile mit 4 Laserdioden, welche auf

¹EOCB-Projektpartner sind: Andus GmbH, FhG IZM Berlin, ILFA Feinstleiteteknik GmbH, Mikropack GmbH, OECA GmbH, Robert Bosch GmbH, Siemens AG, Universität Paderborn.

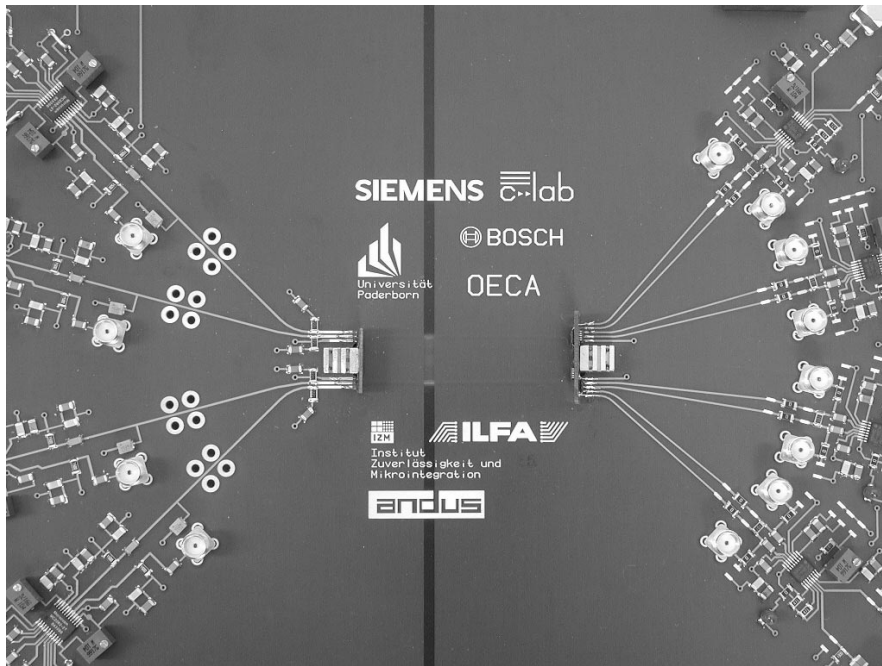


Bild 11: Demonstrator mit vierkanaliger, paralleler, elektrisch-optischen Übertragungsstrecke [21]

einem Träger befestigt ist und in die Leiterplatte eintaucht, so dass die Laserdioden direkt vor die Stirnflächen der Wellenleiter positioniert werden können. Bei den im Hintergrund des Bildes erkennbaren Komponenten und Steckverbindern handelt es sich um den diskreten Aufbau der VCSEL-Treiber. Für einen industriellen Einsatz der Technologie ist diese Ansteuerschaltung zusammen mit den Laserdioden in ein Gehäuse zu integrieren, so dass man ein kompaktes und miniaturisiertes Modul erhält. Gleiches gilt natürlich für die Empfängerseite. In diesem Projekt wurde auch ein Demonstrator mit vollständiger elektrisch-optischer Übertragungsstrecke aufgebaut (Bild 11).

Ein Laboraufbau einer elektrisch-optischen Leiterplatte mit einer indirekten Kopplung ist in Bild 10(b) dargestellt. Dieser Prototyp wurde zusammen mit den Projektpartnern im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektverbunds OptoSys² entwickelt und aufgebaut. Das Wandlerrmodul stellt 12 Kanäle mit einer Datenrate von 2.5 Gbit/s pro Kanal zur Verfügung. Beide Koppelkonzepte sind prinzipiell dazu geeignet, die Forderung nach Pick&Place-Bestückung der aktiven Wandlerkomponenten zu erfüllen [19, 21, 18].

4 Entwurfsprozess

Der Entwurf elektronischer Komponenten und Systeme basiert nahezu ausschließlich auf der Anwendung von computergestützten Entwurfs- und Simulationswerkzeugen. Darüber hinaus werden Erfahrungen in Form von Entwurfsregeln dazu verwendet, die Entwicklungszeiten und -kosten zu minimieren. Insbesondere für den Entwurf elektrischer Leiterplatten stehen eine Reihe sehr leistungsfähiger Werkzeuge zur Verfügung, ohne die ein wirtschaftlicher Entwurf komplexer Leiterplatten gar nicht mehr möglich wäre.

²In dem vom BMBF geförderten OptoSys-Projektverbund arbeiten die Unternehmen Siemens AG, Infineon Technologies AG, ILFA Feinstleiteteknik GmbH und DaimlerChrysler AG an der Entwicklung der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplattenebene zusammen. Im Unterauftrag sind die Universitäten in Paderborn, Dortmund und Ulm sowie das Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik in Freiburg eingebunden.

Der Entwurf elektrisch-optischer Leiterplatten hat sich aus Akzeptanz- und Effektivitätsgründen an dem etablierten Entwurfsprozess für konventionelle elektrische Leiterplatten zu orientieren. Das bedeutet, dass dieser Prozess nur in den relevanten Phasen modifiziert bzw. erweitert werden darf. Bild 12 zeigt diesen bereits erweiterten Prozess. Die wesentlichen Erweiterungen dieses Prozesses betreffen die Phasen *Plazierung/Leitungsführung* und *Validierung/Optimierung*. Neben dem Entwurf, der Analyse und Optimierung der elektrischen Komponenten und Verbindungen erstrecken sich in dem erweiterten Prozess diese Aktivitäten auch auf die optischen Komponenten und Verbindungen.

Dieses bedeutet, dass die Abfolge der Prozessschritte nicht modifiziert werden muss und dass auch keine neuen Prozessschritte hinzugefügt werden müssen. Die Erweiterung beschränkt sich damit auf die Bereitstellung und Anwendung von Entwurfsregeln, Simulationsmodellen und Simulationsalgorithmen für die optischen Komponenten und ihre Integration in die jeweiligen Prozessschritte. Im einzelnen ergibt sich die Notwendigkeit für

- Simulationsmodelle für optische (board-integrierte) Wellenleiter,
- Simulationsmodelle für optische Sender und Empfänger,
- Simulationsmodelle für optische Fasern und Stecker,
- Simulationsalgorithmen (im Zeitbereich) für optische Übertragungsstrecken,
- Entwurfsregeln für elektrisch-optische Verbindungen.

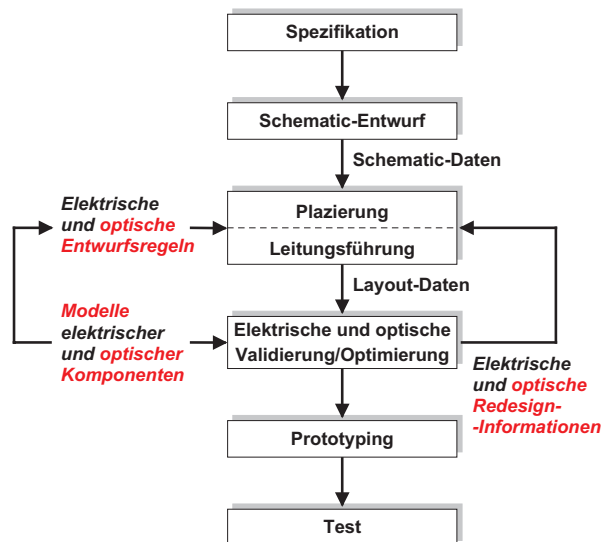


Bild 12: Erweiterter Leiterplattenentwurfsprozess für elektrisch-optische Leiterplatten

Um einen homogenen und in sich geschlossenen Prozess zu erhalten, müssen die neuen Modelle und Algorithmen in die existierende Entwurfs- und Simulationswerkzeuge für elektrische Komponenten und Systeme integriert werden. Dieses heißt, dass auch bei der Entwicklung der Modelle und der Algorithmen auf weitgehende Kompatibilität zu den bestehenden Modellen, Algorithmen und Werkzeugen zu achten ist.

Diese Forderung ist nicht trivial, da Zeitbereichsanalysen von optischen Übertragungsstrecken bislang selten erforderlich waren. Im Bereich der Telekommunikation, dem klassischen Anwendungsfeld für die optische Signalübertragung, ist z. B. das zeitliche Verhalten der Signale von untergeordnetem Interesse. Lediglich die Dispersion und die dadurch begrenzte

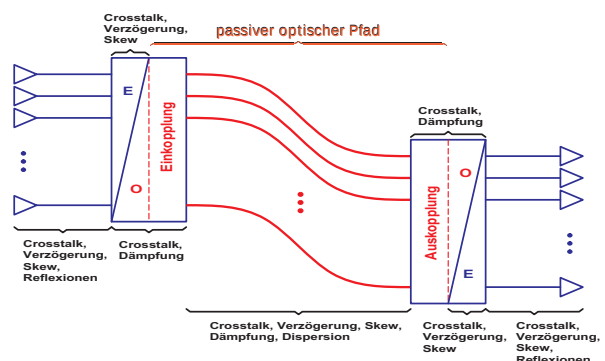


Bild 13: Effekte, die von Simulationsmodellen massiver paralleler elektrisch-optischer Verbindungen berücksichtigt werden müssen

Bandbreite sind von entscheidender Bedeutung. Optische Intrasystemverbindungen, insbesondere parallele Verbindungen, müssen jedoch im Allgemeinen auch den durch die Systemarchitektur und die mikroelektronischen Komponenten vorgegebenen zeitlichen Randbedingungen genügen. Dazu zählen neben den Verzögerungszeiten der Verbindungen auch die Verzögerungen der aktiven Komponenten und im Fall von parallelen Übertragungsstrecken auch Laufzeitunterschiede (Skew). Ebenso kann aufgrund der rauen Grenzschichten zwischen Mantel und Kern auch Crosstalk auftreten. Bild 13 zeigt die Struktur eines massiv-parallelen elektrisch-optischen Verbindungssystems sowie die zu berücksichtigenden physikalischen Effekte.

Aufgrund der transversalen Abmessungen der optischen Wellenleiter im Vergleich zur Laserwellenlänge und der durch die verwendbaren Materialien vorgegebenen numerischen Apertur, die im Bereich von 0,2 bis 0,4 liegt, handelt es sich bei optischen Verbindungen um höchst multimodale Wellenleiter, in denen weit mehr als 1000 Moden ausbreitungsfähig sind. In Verbindung mit der herstellungsbedingten Oberflächenrauigkeit [13] stellt die Modellierung der Wellenleiter und die Simulation der Signalausbreitung darin ein äußerst anspruchsvolles Problem dar, da aufgrund der hohen Modenanzahl und der Rauigkeit, deren Tiefe in Abhängigkeit der Herstellung ca. bei 10% der Laserwellenlänge liegt, etablierte wellenoptische Verfahren (z. B. BPM, FEM) nicht eingesetzt werden können. Der wesentliche Grund dafür ist die resultierende numerische Komplexität, die zu extrem langen und daher nicht akzeptierbaren Rechenzeiten führt. Weiterhin ist auch die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse einer derart komplexen numerischen Aufgabenstellung zweifelhaft.

Ein erfolgversprechender Ansatz ist das sogenannte 'Ray-Tracing', welches auf der geometrischen Optik basiert und immer dann angewendet werden darf, wenn die geometrischen Abmessungen der Wellenleiter wesentlich größer sind als die Wellenlänge des Lichts. Diese Voraussetzung ist im Fall von Onboard-Wellenleitern gegeben. Die Rauigkeit, deren Tiefe jedoch wesentlich geringer ist als die Wellenlänge des Lichts, kann mit dem klassischen Ray-Tracing nicht behandelt werden. Dieses Problem kann man lösen, indem man mittels der Maxwell'schen Theorie spezielle Reflexions- und Transmissionsrandbedingungen ermittelt, die aus der Analyse der Streuung einer ebenen Welle an einer rauen dielektrischen Grenzschicht abgeleitet werden können [22, 23, 24]. Dabei wird die Rauigkeit durch die Fouriertransformierte ihrer Autokorrelationsfunktion beschrieben, die sich in sehr guter Näherung durch eine abfallende Exponentialfunktion beschreiben lässt [13]. Diese Exponentialfunktion lässt sich wiederum durch lediglich drei Parameter, den Effektivwert der Rautiefe sowie die Korrelationslängen in zwei zueinander orthogonalen Richtungen, beschreiben. Mit Hilfe eines Monte-Carlo-Verfahrens kann dann die Rauigkeit auch in einem Ray-Tracing-Verfahren berücksichtigt werden [22, 23, 24]. Zeitbereichsanalysen können durch eine Mehrtor-Beschreibung optischer

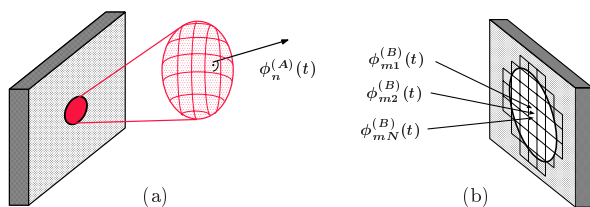


Bild 14: Ray-Tracing-Modellierung der Abstrahlcharakteristik von Laserdioden (a) und des optischen Eingangsverhaltens von Photodioden (b)

Multimode-Wellenleiter ermöglicht werden, wobei das Übertragungsverhalten des Mehrtors, die Impulsantworten der verschiedenen Übertragungswege, über die Sprungantworten mittels des Ray-Tracing-Verfahrens ermittelt wird [12]. Bei einer entsprechenden Approximation der Impulsantworten durch Exponentialfunktionen kann dann auf rekursive und damit schnelle Faltungsalgorithmen [14] zurückgegriffen werden.

Die Analyse des gesamten optischen Pfades erfordert neben den Modellen für die passiven Komponenten (Wellenleiter sowie der Ein- und Auskoppeloptiken) auch exakte, an die Ray-

Tracing-Methodik angepasste Simulationsmodelle für die aktiven Komponenten. Hinsichtlich der optischen Sender bedeutet dies, dass die Abstrahlcharakteristik der Laserdioden durch eine endliche Anzahl von diskreten Strahlen modelliert werden muss, wobei jeder Strahl durch seinen Anfangspunkt, seine Richtung und sein spezielles zeitliches Verhalten gekennzeichnet ist [25]. Dieses zeitliche Verhalten schließt neben der Verzögerung auch Einschwingvorgänge ein. Hinsichtlich der optischen Empfänger ist zu berücksichtigen, dass zum einen die Richtcharakteristik und zum anderen eine gegebenenfalls vorhandene ortsabhängige Sensitivität der Photodioden nachgebildet werden muss.

5 Anwendung optischer Verbindungstechnik in Computern

5.1 Architektur moderner Computer

Die Architektur heutiger Computer wird von dem Von-Neumann-Konzept bestimmt, das bereits dem ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) zugrunde lag³. Dieses Konzept spiegelt sich im wesentlichen in den fünf klassischen Komponenten eines Rechners wider: Steuereinheit, Rechenwerk, Hauptspeicher, sowie Ein- und Ausgabe (Bild 15). Auch in PC-Systemen findet man diese grundlegende Architektur in leicht modifizierter Ausprägung (Bild 16) wieder. Dabei sind Steuereinheit, Rechenwerk und Teile des Speichers in der CPU (Central Processing Unit) zusammengefasst. Der wesentliche Teil des Hauptspeichers befindet sich außerhalb der CPU in Form sogenannter Speicherbänke auf dem Mother- oder Systemboard. Darüber hinaus werden externe Speichermedien (FDD, HDD) durch das *Paging-Verfahren* für eine Erweiterung des Hauptspeichers genutzt.

Der Einsatz optischer Verbindungen innerhalb von Computern zum Zweck der Leistungssteigerung muss sich an den existierenden und auch weiterhin gültigen Architekturkonzepten orientieren. Neben der Bandbreite der Verbindungen — auch Datendurchsatz oder *Throughput* genannt — spielt gerade in der Rechnertechnik die Latenz, also die Antwortzeit (*Response Time*) eine bedeutende Rolle. Der Vorteil optischer Verbindungen liegt in der um Größenordnungen höheren Bandbreite und weniger in der Reduktion der Latenzen. Dieses wird in den folgenden Abschnitten noch näher erläutert.

Betrachtet man die grundlegende Architektur eines Computers (Bild 16), so ist leicht ersichtlich, dass die Anforderungen an die Ver-

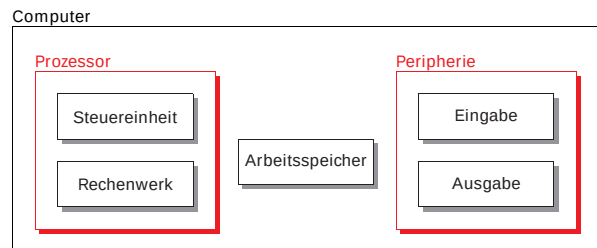


Bild 15: Aufbau eines Computers aus den fünf klassischen Komponenten

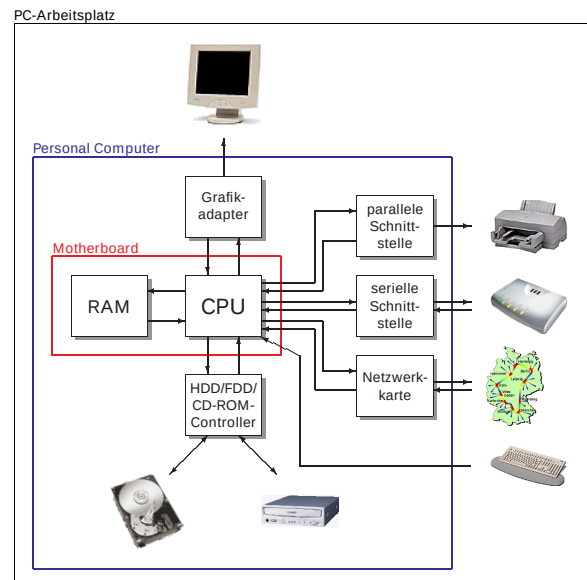


Bild 16: Grundaufbau eines Personal Computers (PC)

³Der ENIAC war der erste vollständig funktionsfähige rein elektronische Universalrechner. Er wurde von J. P. Eckert und J. W. Mauchly von 1943 bis 1946 an der Moore School of Engineering (University of Pennsylvania) entwickelt.

bindungen im Peripherie-Bereich, also die Verbindungen im Ein- und Ausgabebereich durch die externen, im Vergleich zur CPU *langsamen* Komponenten bestimmt werden. An die Bandbreite und auch an die Latenz dieser Verbindungen werden keine besonderen Anforderungen gestellt, so dass man hier kaum an die physikalischen Grenzen der konventionellen elektrischen Aufbau- und Verbindungstechnik stößt. Lediglich im Bereich der Grafikverarbeitung kann bei dem anhaltenden Trend zu höherer Auflösung (Anzahl der Bildpunkte, Farben und Bilder pro Sekunde) eine optische Verbindungstechnik mittelfristig sinnvoll sein, wodurch sich jedoch nicht die Rechenleistung erhöht, sondern lediglich die Qualität der Darstellung und damit die Nutzbarkeit verbessert wird.

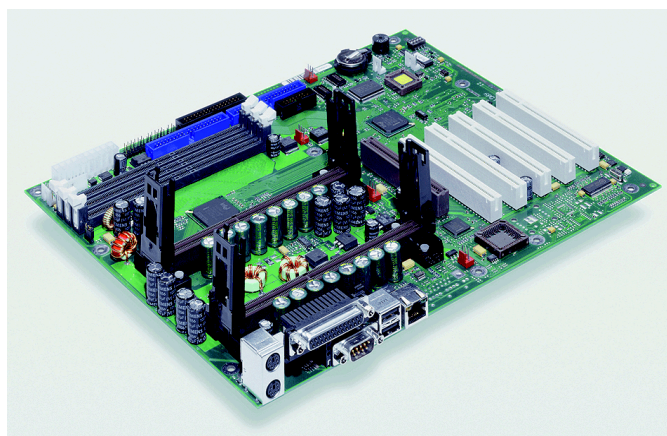
Ein Verbindungsnetzwerk, dessen Optimierung zu einer signifikanten Leistungssteigerung führen kann, ist die Verbindung des Speichers mit der CPU. Hierbei handelt es sich nicht um einfache elektrische Verbindungen, sondern vielmehr um ein *System*, dessen Architektur in den vergangenen Jahren immer wieder verbessert wurde. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer *Speicherhierarchie*, die im folgenden näher erläutert werden soll.

5.2 Das Konzept der Speicherhierarchie

Die Rechenleistung heutiger Computer hängt sehr stark von der Größe des Arbeitsspeichers und der Wartezeit für den Speicherzugriff (Zugriffszeit) ab. Dabei ergibt sich ein Konflikt zwischen den Speicherkosten und der Zugriffszeit. Die großen Speicherbänke innerhalb von Computern sind mit den sogenannten DRAMs (Dynamic Random Access Memory) ausgerüstet, in denen die Informationen kapazitiv gespeichert werden. Dieses bedeutet, dass der Speicherinhalt beim Lesen der Informationen zerstört wird und darum nach jedem Lesevorgang wieder zurückgeschrieben werden muss. Darüber hinaus muss aufgrund der Leckströme realer Kondensatoren der Inhalt dieser dynamischen Schreib-/Lesespeicher in regelmäßigen Abständen aufgefrischt werden (*Refresh*), sonst gehen die gespeicherten Informationen verloren. Dieser Refresh wird durch ein Auslesen des Speichers und ein sofortiges Zurückschreiben der gelesenen Informationen realisiert. Dieses bedeutet, dass auf den Speicherinhalt nur zu gewissen Zeiten innerhalb des kontinuierlich ablaufenden Refresh-Zyklus zugegriffen werden kann, wodurch sich eine große Zugriffszeit ergibt, die oberhalb der Zykluszeit liegt. Die Vorteile dieser Speicherkomponenten sind die niedrige Verlustleistung und insbesondere die hohe Speicherdichte, die einen kostengünstigen Aufbau möglich machen.



(a) High-End-Server



(b) Multiprozessor-Board

Bild 17: Beispiele moderner PCs

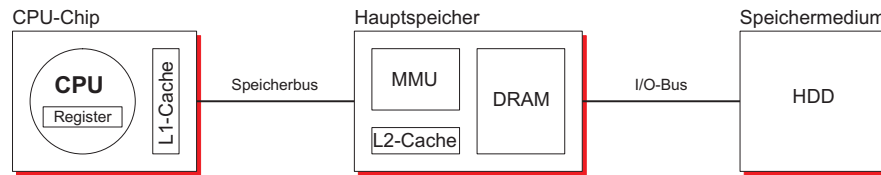


Bild 18: Die Ebenen einer typischen Speicherhierarchie

Speicher mit niedriger Zugriffszeit sind SRAMs (Static Random Access Memory), in denen die Informationen durch eine Art Flip-Flop-Verfahren gespeichert werden. Dieses wird durch mehrere zusätzliche Transistoren pro Speicherzelle erzielt. Ein zyklisches Auffrischen des Speichers entfällt damit ebenso wie das Zurückschreiben der Daten nach einem Auslesen des Speichers. Eine wesentlich niedrigere Zugriffszeit ist die direkte Folge. Diesen Vorteil erkaufte man sich aber durch einige gravierende Nachteile: Durch den stetigen Stromfluss für die Aufrechterhaltung des Speicherinhalts ergibt sich eine wesentliche höhere Verlustleistung und damit auch eine größere Erwärmung als bei DRAM-Komponenten. Darüber hinaus führt die aufwendige interne Schaltung von SRAMs zu einer geringeren Speicherdichte (als bei DRAMs) und auch zu höheren Kosten.

Die Lösung dieses grundsätzlichen Problems wird durch die Verwendung eines speziellen Hochgeschwindigkeitsspeichers (SRAM) angegangen, dem sogenannten *Cache*. Er hat die Funktion, die Verarbeitung von Speicheranweisungen durch die CPU zu beschleunigen. Die CPU kann auf die Anweisungen und Daten, die im Cache temporär zwischengespeichert sind, sehr viel schneller zugreifen (5 bis 10 mal schneller) als auf die Anweisungen im Hauptspeicher. Man unterscheidet zwischen einem primären Cache, auch Level-1-Cache (L1-Cache) genannt, und einem sekundären Cache, dem Level-2-Cache (L2-Cache). Inzwischen werden auch schon drei Cache-Ebenen verwendet. Der L1-Cache befindet sich im Allgemeinen auf dem CPU-Chip (Bild 18).

Die Erhöhung der Speicherbandbreite und die Verringerung der Zugriffszeit auf Speicherinhalte sind entscheidend für die gesamte Systemleistung [26]. Der Zugriff auf Speicherinhalte über einen oder mehrere Cache(s) basiert auf dem Prinzip der *Lokalität des Zugriffs*. Es besagt, dass auf die gerade genutzten Daten bald wieder zugegriffen wird. Bevorzugt man die Zugriffe auf solche Daten, so steigt die Leistung also an. Demnach sollte versucht werden, die zuletzt genutzten Daten im schnellsten Speicher zu halten. Dieser schnelle Speicherbereich, der Cache, befindet sich sehr nahe an der CPU und wird zur Speicherung der aktuellen Daten genutzt. Die langsameren Speicher sind in der Regel größer und weiter von der CPU entfernt. Diese Organisationsform, in der mit zunehmender Entfernung von der CPU die Speicher größer und langsamer werden, nennt man Speicherhierarchie (Bild 18).

Der L1-Cache ist dabei ein kleiner, schneller Speicher direkt in der Nähe der CPU (oder direkt in die CPU integriert), der die aktuellen Daten und Befehle enthält. Findet die CPU einen benötigten Eintrag nicht im Cache, so wird ein Cache-Fehlzugriff (*cache miss*) signalisiert und die Daten werden aus dem Hauptspeicher in den Cache geholt. Dieses bedeutet jedoch, dass die CPU warten muss, bis die Daten verfügbar sind. Sind die benötigten Daten auch im L2-Cache nicht enthalten, wird für die Aktualisierung der Speicherinhalte noch mehr Zeit benötigt. Die Aktualisierung des L2-Cache sowie die Verwaltung des gesamten Speichers wird oft durch eine sogenannte *Memory Managing Unit (MMU)* übernommen.

In der Regel brauchen nicht alle von einem Programm angesprochenen Objekte im Hauptspeicher vorhanden zu sein. Unterstützt das Betriebssystem eine sogenannte *virtuelle Speicherverwaltung (virtual memory)*, dann können auch Speicherinhalte auf der Festplatte abgelegt wer-

den. Der gesamte adressierbare Adressraum ist dann gewöhnlich in Blöcke fester Länge eingeteilt, die sogenannten *Seiten (pages)*. Greift die CPU auf einen Eintrag in einer Seite zu, der nicht im Cache oder im Hauptspeicher enthalten ist, wird ein *Seitenfehler (page fault)* signalisiert, und die ganze Seite wird von der Systemplatte in den Hauptspeicher übertragen. Dieser Vorgang kostet aufgrund der großen Zugriffszeiten der Systemplatte sehr viel Zeit und reduziert die Systemleistung erheblich.

Cache und Hauptspeicher stehen in gleicher Beziehung zueinander wie Hauptspeicher und Systemplatte. Aufgrund der bereits genannten großen Zugriffszeiten von Festplatten findet man auch hier den Einsatz eines Cache-Speichers, der in der Regel im Gehäuse der Festplatte untergebracht ist.

5.3 Optische Verbindungstechnik für Prozessor-Speicher-Verbindungen

Eine Steigerung der Systemleistung kann erreicht werden, wenn im Falle eines *cache miss* oder eines *page fault* der entsprechende Speicherinhalt schneller aus dem Hauptspeicher bzw. von der Systemplatte nachgeladen werden kann. Die Zugriffszeiten von Magnetplatten und die begrenzte Parallelität (gegeben durch die Anzahl der Schreib/Leseköpfe) begrenzen aber automatisch auch die Datenmenge, die von der Magnetplatte pro Zeiteinheit zur Verfügung gestellt werden kann. Die Realisierung der Magnetplatten-Verbindung, häufig als SCSI ausgeführt, durch optische Verbindungen wird demnach keine wesentliche Leistungssteigerung bewirken. Andere Gründe, z. B. die reduzierte Störanfälligkeit oder die deutlich größeren Verbindungslängen, können jedoch sehr wohl für eine optische Verbindung sprechen.

Die Erhöhung der Bandbreite des Speicherbusses, derzeit in PC-Systemen bei Verwendung der SDRAM- bzw. DDR-SDRAM-Technologie mit 100 bzw. 133 MHz getaktet, kann aber eine deutliche Leistungssteigerung bewirken, wenn unter Beibehaltung oder Verringerung der Latenzzeit gleichzeitig die Wortbreite erhöht wird. Eine andere Möglichkeit ist die Übertragung mehrerer Bits je Takt. Beispielsweise werden bei dem Double-Data-Rate-Verfahren zwei Bits je Takt übertragen. Für die Steigerung der Leistung ist es erforderlich, die Zeit für das Nachladen des Cache zu reduzieren. Die Zugriffszeit einer Speicherzelle im Hauptspeicher kann nicht verändert werden. Durch eine entsprechende Organisation des Speichers kann jedoch die Parallelität erhöht werden, was einer Vergrößerung der Wortbreite entspricht. Dadurch kann eine größere Datenmenge pro Zeiteinheit vom Hauptspeicher bereitgestellt werden. Wenn nun die Verbindung zwischen Cache und Hauptspeicher die erforderliche Datenmenge in kürzerer Zeit, d. h. in weniger Systemtaktzyklen übertragen kann, kann der Prozessor entsprechend früher die nächsten Operationen ausführen.

Die Erhöhung der Datenrate kann zwar auch durch eine Verbreiterung des existierenden Busses erreicht werden. Dieses bedeutet jedoch eine Kostensteigerung, und gleichzeitig steigt die Entwurfskomplexität mit der Zunahme der Busbreite drastisch an. Aufgrund der signifikant höheren Datenrate optischer Verbindungen kann dieses Problem durch den Einsatz optischer Verbindungen also wesentlich besser gelöst werden. Bei vollständiger Ausnutzung der realisierbaren Bandbreite kann durch Multiplexverfahren die Busbreite ggf. sogar reduziert werden.

Zusätzlich entfallen mit der Anwendung optischer Verbindungen auch die derzeit stark einschränkenden Entwurfsregeln für Prozessor-Speicher-Verbindungen. Diese schränken die maximale zulässigen Verbindungslängen und die Leitungsführung stark ein. Besonders deutlich werden die Limitierungen bei der Rambus-Technologie.

Da sich CPU und Hauptspeicher in der Regel auf derselben Leiterplatte befinden, kommt also der optischen Verbindungstechnik auf Leiterplatten eine besondere Bedeutung zu. Dabei ist

neben der Technologie zur Realisierung der hybriden Komponenten auch der Entwurfsprozess mit seinen Erweiterungen von gleicher Wichtigkeit.

5.4 Beispiel für das Ausnutzen spezifischer Vorteile optischer Verbindungen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde dargestellt, dass durch die Anwendung optischer Verbindungen in Rechnern mit der gegenwärtig üblichen Rechnerarchitektur Leistungssteigerungen durch höhere Bandbreiten auf Intrasystemverbindungen und gleichzeitig größere Entwurfsfreiheiten erreicht werden können. Zusätzliche Leistungssteigerungen und Entwurfsfreiheiten können dann erreicht werden, wenn spezifische Vorteile optischer Verbindungen gegenüber elektrischen Verbindungen durch optimierte Rechnerarchitekturen ausgenutzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die mögliche Reduzierung der Latenzzeiten der Prozessor-Speicher-Verbindungen.

Die Latenz des Speicherzugriffes moderner Computer ist entscheidend für ihre Leistungsfähigkeit. Deutlich wird dieses daran, dass Mikroprozessoren innerhalb einer Nanosekunde mehrere Befehle ausführen können, wogegen der Speicherzugriff vom Mikroprozessor auf den Hauptspeicher zwischen 100 und 200 Nanosekunden erfordert. Entscheidend hierfür ist, dass die Latenz und die Bandbreite elektrischer Verbindungen stark vom Fanout, der Leitungslänge und der Leitungsstruktur abhängig ist. Dadurch sind in Rechnern mehrere Hierarchieebenen von Controllern erforderlich, um die große Anzahl von Speicherbausteinen vom Prozessor ansteuern zu können.

Die Latenz und die Bandbreite optischer Verbindungen ist dagegen innerhalb weiter Grenzen — diese werden von Verbindungen innerhalb von Computern eingehalten — unabhängig von der Beschaffenheit, der Länge und dem Fanout der Leitungen. Mit direkten optischen Verbindungen zwischen dem Prozessor und den Speicherbausteinen ließe sich die geringst mögliche Latenz erreichen. Dieses ließe sich nur mit einer nicht realisierbaren großen Anzahl optischer Ein- und Ausgänge realisieren.

Eine Optimierung der sich widersprechenden Forderungen, die Hierarchieebenen und die Anzahl der optischen Ein- und Ausgänge zu minimieren, wird mit der in [27] vorgeschlagenen optischen Prozessor-Speicher-Verbindung erreicht.

Dazu wird die Anzahl der Hierarchieebenen des Speicherzugriffes auf eins reduziert. Auf dieser Hierarchieebene ist jeweils ein Speicher-Controller für eine kleine Gruppe von SDRAM-Speichern zuständig. Die Controller dieser Speicher-Bänke kommunizieren mit der CPU über optische Verbindungen. Um die Anzahl der optischen Verbindungen klein zu halten, werden mehrere Speicher-Bänke zu Gruppen zusammengefasst, die gemeinsame optische Verbindungen nutzen. Eine Anfrage vom Prozessor an den Speicher wird dabei als Broadcast an Gruppen von Speicherbänken geschickt, was durch den hohen Fanout optischer Verbindungen deutlich einfacher realisierbar ist, als bei elektrischen Verbindungen.

6 Zusammenfassung

Die übliche elektrische Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplatten für sehr schnelle und hochintegrierte mikroelektronische Komponenten, aus denen Computer aufgebaut sind, begrenzt die Leistungsfähigkeit von Computern und ist die Ursache starker Einschränkungen im Systementwurf. Diese Begrenzungen werden in der Zukunft zunehmend stärker wirken, da die Entwicklung der CMOS-Technologie, auf der die Computertechnik beruht, in den nächsten 10 bis 15 Jahren ihr bekanntes Entwicklungstempo beibehalten wird.

Durch Einführung einer optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplattebene können diese bekannten Probleme wirksam gelöst werden. Die dazu erforderlichen Technologien und Komponenten zur Realisierung — dieses sind die Herstellung optischer Wellenleiter und deren Integration in Leiterplatten — bezahlbare optische Sender und Empfänger mit den entsprechenden Koppelmodulen sowie Simulations- und Design-Werkzeugen, befinden sich derzeit in Entwicklungsstadien. Erste Produkte mit elektrisch-optischen Übertragungsstrecken sind auf Basis dieser Technologien in wenigen Jahren möglich. Damit lässt sich das erkennbare Leistungspotenzial der Halbleitertechnologie aus heutiger Sicht mindestens innerhalb der nächsten 10 bis 15 Jahre vollständig ausnutzen. Dieses ermöglicht signifikante Leistungssteigerungen elektrischer Kommunikations- und Informationsgeräte.

Die Anforderungen an die Technologie und den Entwurfsprozess für eine elektrisch-optische Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplattebene für Computer wurden in diesem Artikel genannt und erste Ergebnisse entsprechender Entwicklungsprojekte vorgestellt. An Hand der grundlegenden Architektur von Rechnersystemen wurden Beispiele für praxisrelevante optische Onboard-Verbindungen abgeleitet.

Literatur

- [1] Semiconductor Industry Association, San Jose, CA, USA, *International Technology Roadmap for Semiconductors, 1999 Edition and 2000 Update*, 2000 and 2001.
- [2] D. A. B. Miller, "Optics for low-energy communication inside digital processes: quantum detectors, sources, and modulators as efficient impedance converters," *Opt. Lett.* **14**, pp. 146–148, January 1989.
- [3] R. A. Nordin, W. R. Holland, and M. A. Shahid, "Advanced optical interconnection technology in switching equipment," *J. Lightwave Technol.* **13**, pp. 987–994, June 1995.
- [4] Q. Tan and J. Vandewege, "2.5Gb/s/mm optical fiber interconnections," in *Proc. 22nd Eur. Conf. on Opt. Comm.*, pp. 2.55–2.58, (Oslo, Norway), 1996.
- [5] Y. S. Liu, J. Rowlette, Y. Liu, and A. Nahata, "High density optical interconnect for board and backplane applications using polymer waveguides and VCSEL array devices," in *Proc. of the 1998 11th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS. Part 2 (of 2)*, pp. 379–380, (Orlando, FL, USA), 1998.
- [6] B. Dhoedt, R. Baets, P. Van Daele, P. Heremans, J. Van Campenhout, J. Hall, R. Michalzik, A. Schmid, H. Thienpont, R. Vounckx, A. Neyer, D. C. O'Brien, and J. Van Koetsem, "Optically interconnected integrated circuits to solve the CMOS interconnect bottleneck," in *Proc. of the 48th Electronic Components & Technology Conference*, pp. 992–998, (Seattle, WA, USA), 1998.
- [7] M. Hibbs-Brenner, J. Lehman, Y. Liu, K. Johnson, R. Morgan, E. Strzelecka, and R. Skogman, "Packaging of VCSEL arrays for cost-effective interconnects at less than 10 meters," in *Proc. of the 49th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 747–752, (San Diego, CA, USA), 1999.
- [8] Y. S. Liu, R. J. Wojnarowski, W. A. Hennessy, J. P. Bristow, Y. Liu, A. Peczalski, J. Rowlette, A. Plotts, J. Stack, M. Kadar-Kallen, J. Yardley, L. Eldada, R. M. Osgood, R. Scarmozzino, S. H. Lee, V. Osgus, and S. Patra, "Polymer optical interconnect technology (POINT) — optoelectronic packaging and interconnect for board and backplane applications," in *Proc. of the IEEE 46th Electronic Components and Technology Conference (ECTC'96)*, pp. 308–315, 1996.
- [9] R. T. Chen, L. Wu, F. Li, S. Tang, M. Dubinovski, J. Qi, C. L. Schow, J. C. Campbell, R. Wickman, B. Picor, M. Hibbs-Brenner, J. Bristow, Y. S. Liu, S. Rattan, and C. Nodding, "Si CMOS process compatible guided wave multi-Gbit/sec optical clock signal distribution system for Cray

- T-90 supercomputer,” in *Proc. 1997 Massively Parallel Processing using Optical Interconnections MPPOI*, pp. 10–24, Montreal, Canada, June 1997.
- [10] O. Krumpholz, R. Bogenberger, J. Guttman, P. Huber, J. Moisel, and M. Rode, “Optical backplane in planar technology,” in *Optoelectronic Interconnects VII; Photonics Packaging and Integration II*, M. R. Feldman, R. L. Q. Li, W. B. Matkin, and S. Tang, eds., *Proc. SPIE* **3952**, pp. 59–65, 2000.
 - [11] E. Grieser and A. Himmler, “Optical interconnections on high speed digital printed circuit boards,” in *Proceedings in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, p. 697, July 1997.
 - [12] E. Grieser, “Reducing EMC problems through an electrical/optical interconnection technology,” *IEEE Trans. EMC* **41**, pp. 502–509, 1999.
 - [13] E. Grieser, D. Krabe, and E. Strake, “Electrical-optical printed circuit boards: Technology — design — modeling,” in *Interconnects in VLSI Design*, H. Grabinski, ed., pp. 221–236, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.
 - [14] E. Grieser, J. Gerling, Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, J. Schrage, and G. Mrozynski, “Modellierung und Simulation optischer Multimode-Verbindungen auf Leiterplatten,” in *Kleinheubacher Berichte (im Druck)*, vol. 46, 2002.
 - [15] D. Krabe and W. Scheel, “Optical interconnects by hot embossing for module and pcb technology — The EOCB approach —,” in *Proc. 49th Electronics Components & Technology Conf.*, pp. 1164–1166, (San Diego, CA, USA), June 1999.
 - [16] S. Lehmacher and A. Neyer, “Integration of polymer optical waveguides into printed circuit boards,” *Electron. Lett.* **36**(12), pp. 1052–1053, 2000.
 - [17] S. Lehmacher, J. Jankowski, C. Vavitsas, and A. Neyer, “Integration von polymeren Multimode-Wellenleitern in konventionelle Multilayer-Platinen,” in *Tagungsband 4. Workshop „Optik in der Rechentechnik (ORT 1999)“*, pp. 31–33, (Jena, Deutschland), Oktober 1999.
 - [18] E. Grieser, A. Himmler, K. Klimke, A. Koske, J.-R. Kropp, S. Lehmacher, A. Neyer, and W. Söllau, “Self-aligned coupling of optical transmitter and receiver modules to board-integrated optical multimode waveguides,” in *Proc. Micro and Nanooptics for Optical Interconnection and Information Processing, Proc. SPIE Vol. 4455*, pp. 243–250, 2001.
 - [19] A. Himmler, S. Bargiel, F. Ebling, H. Franke, E. Grieser, C. Lehnberger, L. Oberender, A. Koske, G. Mrozynski, H. Schröder, G. Spickermann, D. Steck, E. Strake, and W. Söllau, “Electrical-optical circuit boards with four channel butt-coupled optical transmitter and receiver modules,” in *Proc. Micro and Nanooptics for Optical Interconnection and Information Processing, Proc. SPIE Vol. 4455*, pp. 221–230, 2001.
 - [20] F. Mederer, C. Jung, R. Jäger, M. Kicherer, R. Michalzik, P. Schnitzer, D. Wiedenmann, and K. J. Ebeling, “12.5 gbit/s data rate fiber transmission using single-mode selectively oxidized GaAs VCSELs at $\lambda = 850$ nm,” in *Proc. 12th IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 1999)*, Vol. 2, pp. 697–698, (San Francisco, CA, USA), November 1999.
 - [21] A. Himmler, E. Grieser, G. Spickermann, H. Franke, W. Söllau, H. Schröder, and E. Strake, “Komponenten, Koppelverfahren und Demonstratoren elektrisch-optischer Leiterplatten,” in *Tagungsband zum Seminar BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten*, A. Himmler, E. Grieser, R. Heinsteins, ed., pp. 89–102, (Paderborn, Deutschland), November 2001.
 - [22] Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, E. Grieser, and G. Mrozynski, “An approach to model wave propagation in highly multimodal optical waveguides with rough surfaces,” in *Proc. X. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering — (ISTET 1999)*, pp. 515–520, (Magdeburg, Germany), September 1999.
 - [23] E. Strake, Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, G. Mrozynski, A. Himmler, and E. Grieser, “Modellierung und Simulation von Multimode-Wellenleitern mit rauen Oberflächen — Zwei Ray-Tracing-

- Algorithmen zur Beschreibung optischer Streuprozesse,” in *VDI-Schriftenreihe Innovationen in der Mikrosystemtechnik*, VDI Verlag, (Berlin, Deutschland), Januar 2000.
- [24] Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, E. Griesse, and G. Mrozynski, “Ray tracing and its verification for analysis of highly multimode optical waveguides with rough surfaces,” *IEEE Transactions on Magnetism* **37**(5), pp. 3307–3310, 2001.
- [25] J. Schrage and E. Griesse, “Modellierung von Laser- und Photodioden für den Entwurf elektrisch-optischer Übertragungsstrecken,” in *VDI-Schriftenreihe Innovationen in der Mikrosystemtechnik*, VDI Verlag, (Berlin, Deutschland), Januar 2000.
- [26] J. L. Hennessy and D. A. Patterson, *Rechnerarchitekturen: Analyse, Entwurf, Implementierung, Bewertung*, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1994.
- [27] S. J. Fancey, J. Jahns, P. Lukowicz, and J. Grzyb, “Low-latency optoelectronic processor-memory interconnection demonstrator,” in *Proc. Micro and Nanooptics for Optical Interconnection and Information Processing, Proc. SPIE Vol. 4455*, pp. 143–150, 2001.
- [28] R. Chau, “30nm and 20nm physical gate length CMOS transistors,” in *Proc. 2001 Silicon Nanoelectronics Workshop*, (Kyoto, Japan), June 2001.
- [29] E. Griesse, “Elektrisch-optische Aufbau- und Verbindungstechnik für Computersysteme,” in *Proc. SMT/HYBRID/PACKAGING, Tutorial 10: Neue Aufbau- und Verbindungstechniken*, 2001.
- [30] E. Griesse, A. Himmler, and J. Schrage, “Time domain analysis of optical multimode interconnects,” in *Proc. PIERS 2000 Progress in Electromagnetics Research Symposium*, p. 731, (Cambridge, MA, USA), July 2000.
- [31] E. Griesse, A. Himmler, and J. Schrage, “An approach to model optical multimode interconnects for time domain simulation,” in *Proc. Optics in Computing 2000*, R. A. Lessard and T. Galstian, eds., *Proc. SPIE Vol. 4089*, pp. 958–968, 2000.
- [32] A. Himmler, E. Griesse, J. Schrage, Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, and G. Mrozynski, “Modeling of highly multimode optical interconnects for time domain analysis,” in *Digest 2000 LEOS Summer Topical Meetings, Electronic Enhanced Optics*, pp. 43–44, (Aventura, FL, USA), July 2000.
- [33] Semiconductor Industry Association, San Jose, CA, USA, *International Technology Roadmap for Semiconductors, 1997 Edition and 1998 Update*, 1998 and 1999.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten werden teilweise im Rahmen der Projekte „EOCB“ und „OptoSys“ durchgeführt und unter den Förderkennzeichen 01 BP 801/01 bzw. 16 SV 802/6 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Optische Verbindungstechnik in Systemen für die Telekommunikation

Reinhard Pusch

Alcatel SEL AG

Lorenzstraße 10, D-70435 Stuttgart, Germany

R.Pusch@alcatel.de

Zusammenfassung:

Durch den Anstieg der Übertragungsraten in den Systemen der Weitverkehrstechnik finden die Bitraten von bis zu 10Gb/s auch Einzug in die Crossconnect und IP-Router.

Das erfordert optische Übertragungstechnik nicht nur von Rack zu Rack, sondern auch auf dem Board und von Board zu Board. Das heißt, die zukünftigen Systeme werden die Bitrate von 10Gb/s pro Port direkt vom IC über eine integrierte Optische Leiterplatte auf eine optische Backplane und von da wieder auf eine optische Leiterplatte übertragen.

Dieser Vortrag zeigt die Anforderungen für solche Systeme auf und beschreibt mögliche Lösungsansätze.

1.Einleitung

Als vor ca. 20 Jahren die kommerzielle Einführung der optischen Lichtwellenleitertechnik begann, fand das hauptsächlich auf dem Gebiet der Weitverkehrstechnik auf Streckenlängen von >40km statt. Das Ziel ist möglichst viel Information über weite Strecken zu übertragen.

Die Übertragung fand zuerst im Zeitmultiplex-Verfahren statt (beginnend von 34Mb/s auf heute über 10Gb/s). D.h. es wurde immer nur „eine“ Wellenlänge pro Faser übertragen. Die Information wurde elektrisch moduliert und dann elektro-optisch gewandelt auf die Glasfaser gebracht.

Bei dem Wellenlängen Multiplexverfahren (seit Mitte der Neunziger Jahre im Einsatz) kann man die Übertragungsbandbreite pro Faser deutlich erhöhen. Hierbei werden im Zeitmultiplexverfahren modulierte einzelne Sender bei verschiedenen Wellenlängen betrieben und die Wellenlängen über optische Multiplexer auf eine Faser zusammengefasst, am Empfänger werden die Wellenlängen auf dem umgekehrten Weg wieder getrennt und verschiedenen Empfängern zugeführt. Zusammen mit dem Optischen Faserverstärker kann man mit dieser Technik heute kostengünstig sehr hohe Bitraten über weite Strecken übertragen wie z.B. 40 x 10Gb/s.

Diese Entwicklung in der Übertragungsrate bei der Weitverkehrstechnik hat einen starken Einfluss auf die Bitraten in den Schalt- und Verteilsystemen der Telekomindustrie (Crossconnect und Router).

Die hohen Bitraten müssen hier geschaltet und verteilt werden. Damit müssen auch hochbitratige Signale über kurze Strecken in den Systemracks verteilt werden.

Bei Bitraten bis ~622 MB/s fand das noch hauptsächlich mit elektrischen Zweidraht- oder Koaxialleitungen statt.

Bei Bitraten über 1 Gb/s und Übertragungslängen >20m ist die optische Übertragung heute schon kostengünstiger.

Damit zieht die optische Übertragungstechnik auch in die Systeme der Übertragungstechnik ein, und mit weiter steigender Bitrate >10Gb/s ergibt sich die Notwendigkeit nicht nur von Board zu Board sondern auf dem Board optisch zu übertragen.

2. Crossconnect / IP-Router – Heute -

Im Nachfolgenden werden die Anforderungen an die optischen Komponenten für optische Übertragung in Crossconnects und IP-Routern beschrieben.

Die Funktion der Crossconnects und IP-Router im Verteilen oder Zusammenfassen der ankommenden und abgehenden Datenkanäle.

Die Kernfunktion dieser Geräte liegt in einem zentralen Switch oder in mehreren verteilten Switches und den sogenannten I/Os (Eingangs und Ausgangsschnittstellen).

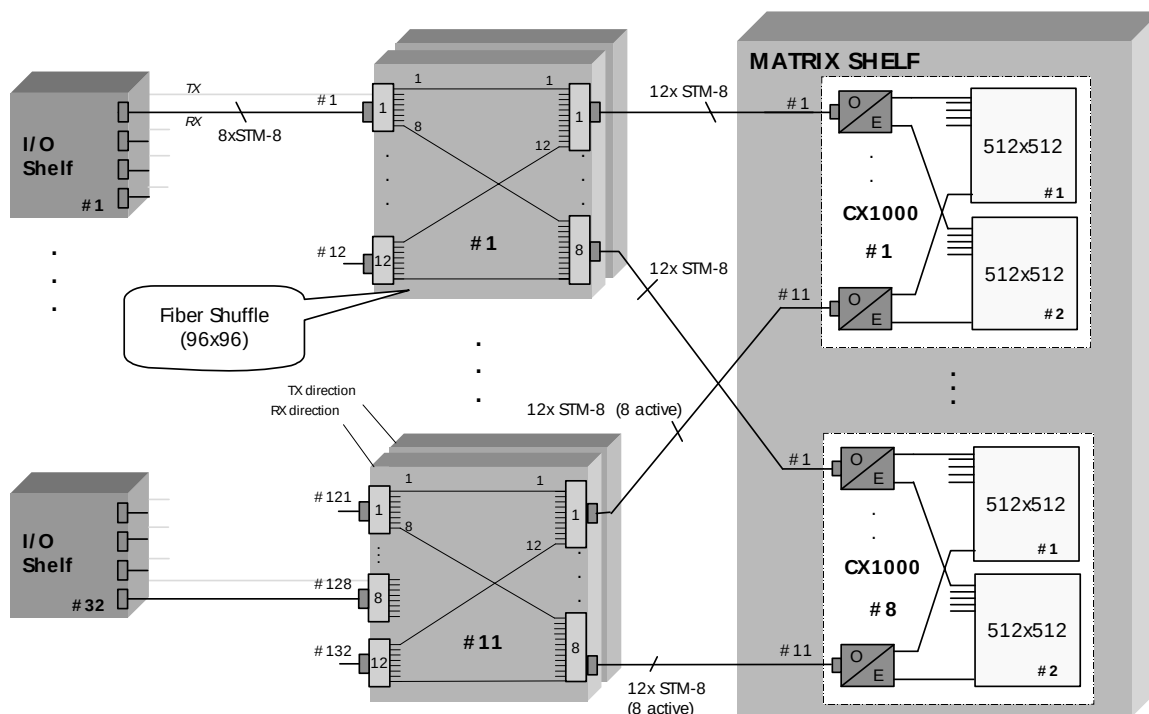


Bild 1: Beispiel für optische Verbindungstechnik im Crossconnect

Diese Funktionen müssen mit schnellen Übertragungskanälen untereinander verbunden sein :

- großer Switch viele optische Ports pro Leiterplatte (>100)
- dezentraler Switch wenige Ports pro Leiterplatte (~4), aber mehr Kommunikation untereinander

Heute liegt die geschaltete Datenrate bei 622Gb/s bzw. 1.25Gb/s. In den nächsten Jahren wird die Datenmenge auf 10Gb/s und mehr steigen.

Hier einige Beispiele für optische Signalübertragung in und zwischen den o.g. Systemen:

2.1 Rack to Rack (System zu System)

Hier handelt es sich um eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen „Systemteilen“ wie WDM System, ADM (Add Drop Multiplexer) und Crossconnect System.

- Bitrate pro Port 10Gb/s
- Übertragungslänge 20 ... 1000m

In diesen Systemen ergibt sich die Notwendigkeit der optischen Übertragungstechnik durch die sehr hohe Bitrate und die Übertragungstrecke von größer 20m.

Es werden in der Hauptsache serielle Module mit integrierter Elektronik und elektrischem MUX/DEMUX-Bausteinen zum Einsatz kommen, dadurch kann man die verschieden Informationen von 622Mb/s bündeln und raumsparend und relativ kostensparend übertragen. Bei den e/o Wandlern handelt es sich um relativ teure Distributed Feed Back (DFB) oder die kostengünstigeren Fabry Perot (FP) Laser bei einer Wellenlänge von 1310nm. Damit können Längen von > 1 km überwunden werden.

2.2 Board to Board (Verbindung innerhalb eines Crossconnects)

Hier geht es nicht nur um eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung, sondern auch noch um eine Verteilung der Einzelkanäle. D.h. eine parallel optische Übertragung mit passiver Umkonfiguration der Kanäle in einem bestimmten Schema (idealer Schuffle) ist erforderlich .

- Bitrate 1.25Gb/s
- Übertragungslänge 10 ... 300m

Dadurch werden folgende Funktionen/Komponenten benötigt:

- e/o und o/e Wandlung 12x1.25 Gb/s POL Module Sender und Empfänger
- optische Verbindung Multifiber Stecker (Backplane Stecker)
- Shuffle Funktion Flexfoil oder Faser Shuffle

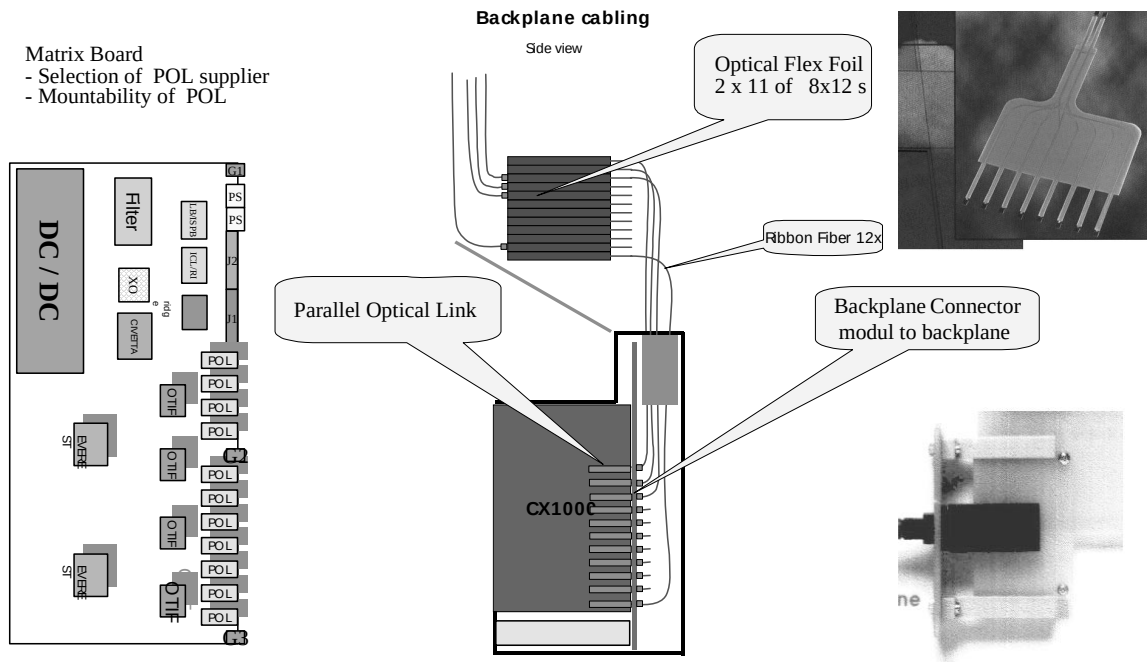


Bild 2: Beispiel für optische Übertragungsstrecke im Crossconnect

3. Zukünftige Systeme

Durch den Anstieg der Bitrate in den Weitverkehrsstrecken auf $n \times 10\text{Gb/s}$ und höher wird auch der Bedarf nach 10Gb/-Switches geweckt.

In ca. 3 Jahren wird die elektrische Switchmatrix entsprechende Ports mit 10Gb/s haben. Damit ist die technische Notwendigkeit gegeben, direkt von dem Matrixpunkt auf der Leiterplatte ausgehend optisch zu übertragen.

Daraus ergeben sich folgende optische Übertragungsstrecken für die Chip zu Chip Verbindung auf der Leiterplatte:

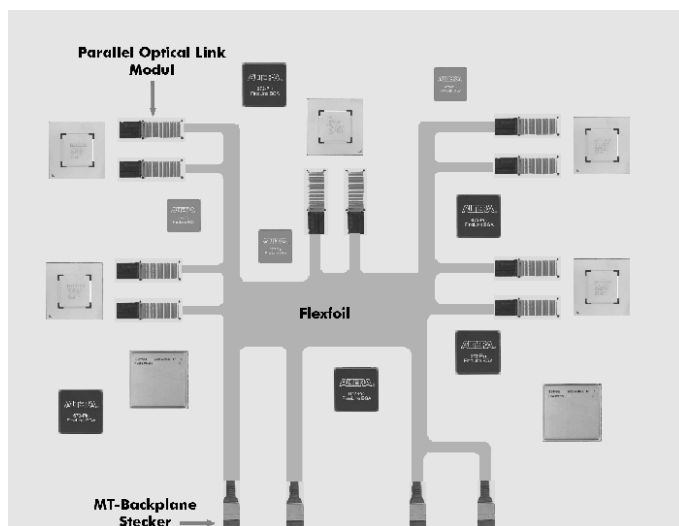


Bild 3: Beispiel für eine optische Übertragungsstrecke von IC zu IC

Vom IC über die Leiterplatte auf ein anderes IC, oder über einen Stecker auf die optische Backplane und von da wieder auf eine Leiterplatte und zu einem IC.

Für größere oder abgesetzte Systeme ergibt sich die Notwendigkeit der Rack zu Rack-Übertragung mittels Multimode-Kabel.

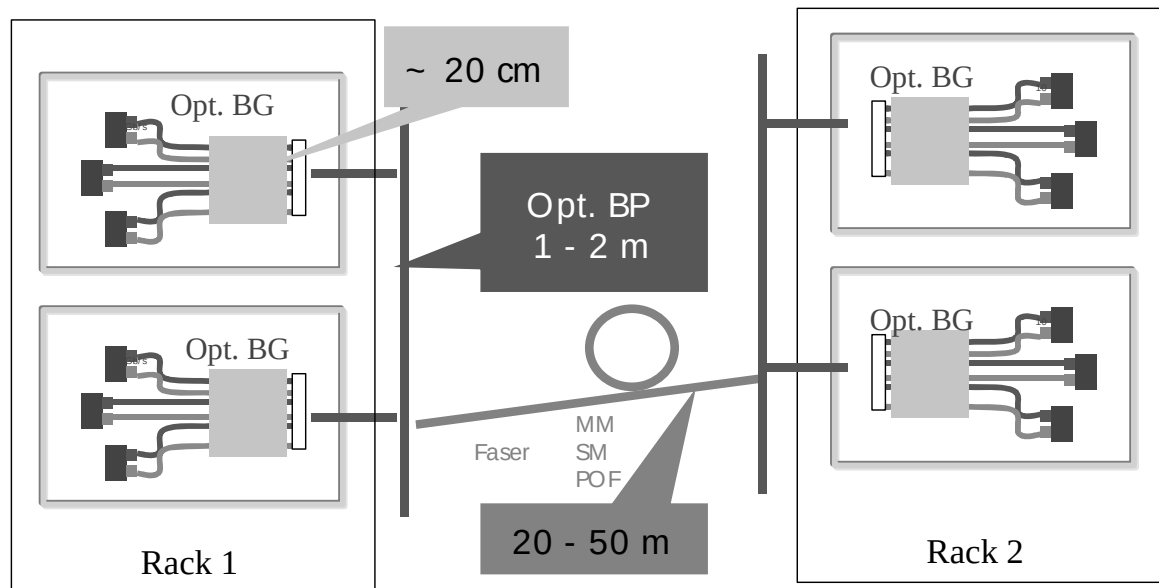


Bild 4: Anforderungen an optische Übertragungsstrecken

Anforderungen :

- Übertragungsbitrate von 10Gb/s per Port (> 100 Ports pro Leiterplatte möglich)
- Länge auf Leiterplatte $l > 30\text{cm}$
- Länge auf Backplane max. $l = 2\text{ m}$
- Länge von Rack zu Rack $l = 100\text{ m}$

Vorzugsweise sollte die e/o Wandlung gleich im/am Matrix IC stattfinden.

Die elektrischen und optischen Verbindungen sollten in einem Arbeitsgang möglichst automatisch erfolgen.

Um den Platzbedarf möglichst gering zu halten sind, wo immer sinnvoll möglich, mehrere Kanäle zu 10Gb/s zusammen zufassen.

3.1 Stand der Technik 2001/2002

Hier noch Überschriften?	Einzelwerte	Gesamtwerte
Pout Tx	- 1 dBm	
S Rx	-18 dBm	17 dB
Polymer WG, 10 – 20 cm 2 x	0.1 dB/cm	< 4 dB
Faser 20 ... 100 m 1 x	3 dB/km	< 0.3 dB
Opt. BP 100 – 200 cm	0.1 dB/cm	20 dB
Steckerdämpfung / Kanal 2 x	1.0 dB	2 dB

Koppeldämpfung 4 x	6.0 dB	24 dB
--------------------	--------	-------

Tabelle 1: Beispiel für Optisches Budget

Bei den **Polymerwellenleitern** handelt es sich um Labormuster der einschlägigen Institute und Industriekonsortien. Alternativen für die Polymerwellenleiter sind die zur Zeit schon verfügbaren optischen „Flexfoils“. Dies sind auf Kunststofffolie verlegte Glasfasern. Gravierender Nachteil ist die kostenaufwendige „Konfektionierung der MT-Stecker“. Die Flexfoil stellt zwar eine gute aber kostenintensive Übergangslösung dar, ist aber als dauerhafte Lösung für zukünftige integrierte Leiterplatten nicht zu verwenden.

Die Angaben für **Stecker** und **Koppeldämpfungen** sind Abschätzungen basierend auf dem heutigen Stand der Technik ohne Strahlaufweitung durch Linsen, vergleiche auch (1).

Die Werte für die **Sender und Empfänger** Bauteile beziehen sich auf „Best Case“ Angaben der Hersteller mit Produktionsstart Anfang 2002. Es ist davon aus zu gehen, dass ausreichen VCSELs bei 850nm auch für Bitraten von 10 Gb/s und mehr zur Verfügung stehen (3)

Ist Stand:

Aus der Tabelle zeigen sich eindeutig noch zwei Felder für Verbesserungen

- zu niedriges **Powerbudget** / **zu hohe Dämpfung** der Komponenten
- für die geforderte Bitrate und die Streckenlängen stellt die **Moden-Dispersion** der Wellenleiter (2) zusammen mit der Multimodefaser ebenfalls eine Begrenzung dar:

NA	$f_{\max} * l$	Bitrate * l
0,2	22 Ghz * m	44 Gb/s * m
0,4	5 Ghz * m	10 Gb/s * m

Tabelle 2: Abhängigkeit der Übertragungslänge von der Numerischen Apertur

D.h. bei einer NA von 0,4 ist die Übertragungslänge bei 10Gb/s auf ~ 1m beschränkt.

3.2 Lösungsansätze

a. Dispersion

Optimierung der Numerischen Apertur (NA) der Wellenleiter auf Werte < 0,2.

Darüber hinaus können bei gegebener NA des Wellenleiters (>0,2) die dann niedrigeren Bitraten durch den Ansatz der parallelen optischen Übertragung überwunden werden. Statt seriell 10Gb/s werden z.B. 4 x 2.5Gb/s oder 8 x 1.25Gb/s übertragen. Dies reduziert zwar die Übertragungsbandbreite pro Faser, erhöht aber den Aufwand an benötigter Elektronik.

Realisierung für 10 Gb/s (am IC, Transponder)

Technologie	Bitrate/Faser (Gb/s)	Faser/WG
1 * seriell	10	1
4+4 parallel	2,5	4 +4
12 * parallel	1,25	12
4*2,5 Gb/s WDM	2,5	1

Tabelle 3: Anforderungen für HF (10 Gb/s)

Interessant wird dieser Lösungsansatz einmal, wenn man eine Vielzahl von 10Gb/s Kanälen übertragen muss, und z.B. aus Platzersparnisgründen einen parallelen Ansatz wählen muss. Zum anderen bietet sich der parallele Ansatz besonders für den Bitratenbereich größer gleich 40Gb/s an, indem man 4 x 10Gb/s überträgt.

b. Powerbudget/Dämpfungswerte

Hohe Dämpfungsverluste der Wellenleiter können durch Erhöhung der Sendeleistung der Laserdioden (bis auf 20dBm) kompensiert werden. Dabei ist jedoch auf die Augensicherheit sowie auf die reduzierte Lebensdauer der Laserdioden zu achten.

Um eine Übertragung von Leiterplatte auf Backplane und dann wieder auf die Leiterplatte zu realisieren sind Dämpfungswerte im Wellenleiter von deutlich < 0.1 dB pro cm erforderlich.

Die Einkoppeldämpfung von 2 x 6dB und die Steckerdämpfung von 2 dB pro Stecker sind weitere Felder, wo Verbesserungsbedarf liegt.

4. Handlungsbedarf

Aus dem oben gesagten ergeben sich somit folgende Felder für Handlungsbedarf:

- IC mit integrierten optischen e/o und o/e Wandler für $\geq 10\text{Gb/s}$ z.B. VCSEL bei 850nm oder 1310nm
- Optisches Powerbudget von ca. 20 dB
- Optische Dämpfung der Wellenleiter bei < 0.05 dB/cm
- Einkoppeldämpfung (o/e-Bauelement in optischem Wellenleiter) bei < 3 dB
- Steckerdämpfung von 1,0 ... 1,5 dB
- Dispersionsbegrenzung > 4 m über Wellenleiter und zusätzlich > 50 m über Multimodefaser

5. Literatur

- | | |
|--------------|---|
| (1) J.Moisel | „Optische Backplanes für Bordrechner in Luft- und Raumfahrt“
Photonics 2001 – Die optische Übertragungs- und Verbindungstechnik
17. – 18.5.2001 (Fellbach, Germany) |
| (2) E.Griese | „Optical Interconnection Technology for Printed Circuit Board Application“ |

- (3) F.Mederer, C.Jung, R.Jäger, „12.5 Gbit/s Data Rate Fiber Transmission Using
M.Kicherer, R.Michalzik, P.Schnitzer, Single-Mode Selectivity Oxidized GaAs VCSELs
D.Wiedenmann, K.:J.Ebeling at 850 nm“
*Proceedings of 26th European Conference on
Optical Communication (ECOC 2000),*
Vol.3, pp. 289 – 290. München, Sept. 2000.

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten werden im Rahmen des Verbundprojektes
"Industrielle Produktionstechnik für Baugruppen mit integrierten optischen Kurzstreckenverbindungen
- OptiCon" durchgeführt und unter dem Förderkennzeichen 02PP2026 vom Bundesministerium für
Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei
dem Autor.

Schnelle elektro-optische Wandlerkomponenten und –module für optische Kurzstreckenverbindungen

Jörg-R. Kropp

Infineon Technologies, Communications, 13629 Berlin

Joerg.kropp@infineon.com

Zusammenfassung:

Da die elektrische Verbindungstechnik auch bei kurzen Entfernungen immer öfter an ihre Grenzen stößt, erobert sich die Optik neue Anwendungen. Für schnelle optische Kurzstreckenverbindungen werden überwiegend Halbleiterlaser eingesetzt. Besondere Vorteile bietet der Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL), mit dem auch kostengünstige Array-Module hergestellt werden können. Verschiedene Modulkonstruktionen ermöglichen die Realisierung von hohen Übertragungskapazitäten für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche bis zu optischen On-Board Verbindungen. Im Ausblick werden zukünftige Entwicklungsschwerpunkte diskutiert.

1 Anwendungsbereich der optischen Kurzstreckenverbindungen

In den letzten Jahren ist international das Kommunikationsvolumen durch das enorme Wachstum des Internets stark angestiegen. Diesem wurde durch den Ausbau der Übertragungsstrecken mit Lichtwellenleitern, der stetigen Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeiten sowie der Einführung der Wavelength-Division-Multiplex (WDM)-Technik erfolgreich begegnet.

Das auf diese Weise gestiegene Übertragungsvolumen muss in den Vermittlungsstellen bearbeitet und weitergeleitet werden. Hier kristallisiert sich immer stärker ein neuer „Flaschenhals“ heraus: Die elektrische Übertragungstechnik innerhalb der Netzknoten und Vermittlungsstellen. Es muss ein Übertragungsvolumen von mehreren 100 Gbit/s gesteuert werden, von dem man erwartet, dass es zukünftig weiter deutlich ansteigt. Man stößt mit der traditionellen rein elektrischen Technologie auch bei Kurzstreckenverbindungen an die Grenzen.

1.1 Anforderungen an die Kurzstreckenverbindungen

Es müssen innerhalb einer Vermittlungseinrichtung auf engstem Raum eine Vielzahl von Verbindungen mit Datenraten von mehreren Gbit/s zwischen IC's, Baugruppen oder Schaltschränken realisiert werden. Dabei muss die Signalqualität erhalten bleiben und es darf zu keinem Übersprechen von benachbarten Verbindungen kommen. Die entscheidenden Anforderungen sind daher

- hohe Übertragungsgeschwindigkeit (> 1Gbit/s pro Kanal)
- geringe Verlustleistung
- geringer Platzbedarf
- geringe Kosten.

Die Forderung der geringen Kosten entsteht durch die sehr hohe Verbindungszahl innerhalb eines Systems, wodurch die Gesamtkosten deutlich beeinflusst werden können.

Es können im wesentlichen drei Anwendungsbereiche unterschieden werden:

- Verbindungen zwischen Geräten in Innenräumen
- Rückwandverbindungen zwischen Baugruppen innerhalb der Gestellschränke
- Verbindungen zwischen Schaltungsteilen auf einer Baugruppe

Das gleiche Anforderungsprofil besteht auch für die Datenkommunikation innerhalb von großen Computersystemen, bei denen schon seit einigen Jahren optische Technologien erfolgreich in Computernetzen eingesetzt werden.

1.2 Der Lösungsansatz

Durch den Einsatz der optischen Übertragungstechnik können die Begrenzungen von Geschwindigkeit, Signaldämpfung und Übersprechen der elektrischen Übertragung umgangen werden. Im Gegensatz zur Weitverkehrsübertragung werden aber auf den kurzen Strecken Lichtwellenleiter mit vergleichsweise großen Durchmessern im Bereich von 50µm bis zu 1mm eingesetzt. Die Übertragung wird deutlich kostengünstiger, da geringere Toleranzanforderungen an die Verbindungstechnik gestellt werden. Weiterhin wird die parallele Übertragung von mehreren optischen Kanälen eingesetzt, wodurch die Übertragungskapazität weiter erhöht wird, bei gleichzeitiger Reduzierung von räumlichem Volumen sowie Kosten.

2 Optische Sende- und Empfangskomponenten

Die elektro- optischen Wandler bilden neben den Wellenleitern die wesentlichen Basis- komponenten für die optische Übertragung. Aufgrund der geringen Größe und der günstigen Herstellbarkeit werden hier Halbleiterbauelemente eingesetzt.

2.1 Optische Sendedioden

Zur Aussendung optischer Signale für die Übertragungstechnik eignen sich optische Halbleiterdioden besonders gut. Sie sind sehr klein, sehr schnell modulierbar und sie besitzen einen sehr guten elektro-optischen Wirkungsgrad.

Leuchtdioden (LEDs) sind in der Geschwindigkeit beschränkt auf etwa 300Mbit/s und besitzen als Lambert'sche Strahler eine ungünstige Abstrahlungscharakteristik für die Einkopplung in Lichtwellenleiter. Resonant Cavity (RC)- LEDs können durch einen integrierten Resonator in der Abstrahlungscharakteristik an die Anwendung angepasst werden. Dadurch sind deutlich höhere Koppeleffizienzen erreichbar. Aber auch diese Dioden sind nur für Datenraten unterhalb von 1Gbit/s einsetzbar. Es gibt eine Vielzahl von LED-Typen, die in dem Wellenlängenbereich von 650nm bis 1300nm für die Übertragung über verschiedene Lichtwellenleiter eingesetzt werden. Hervor zu heben sind hier die Polymer-Wellenleiter auf der Materialbasis PMMA (Polymethyl-Methacrylat), welche bei 570nm und 650nm ein Dämpfungsminimum von unter 50 dB/km besitzen. Diese werden zusammen mit LEDs mit einer Wellenlänge von 650nm für Kurzstreckenübertragungen über maximal 100m mit Datenraten von bis zu 155 Mbit/s eingesetzt.

Für die Übertragung auf vielmodigen Glas- Wellenleitern werden seit ca. 1983 LEDs mit einer Wellenlänge von 1300nm kommerziell eingesetzt. Die verwendeten Glas- Wellenleiter besitzen einen Kern mit einem sogenannten Gradientenindex- Profil, welches eine Bandbreite von 500MHzkm ermöglicht. Zusammen mit LEDs aus InGaAs kann eine Strecke bis 2 km mit einer Datenrate von 200Mbit/s überbrückt werden.

In der Weitverkehrstechnik werden bisher ausschließlich kantenemittierende Laserdioden (EELD – Edge Emitting Laser Diode) eingesetzt. Diese sind für die relevanten Wellenlängen

bis ca. 1650nm verfügbar und können bis 10 Gbit/s direkt moduliert werden. Für höhere Datenraten wird eine Kombination von LD und Modulator verwendet.

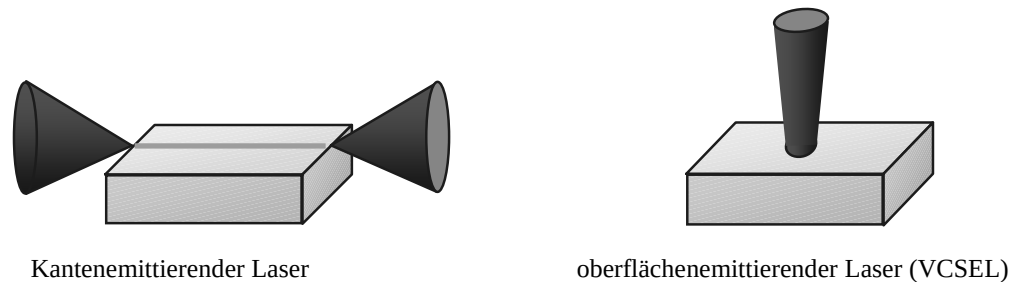


Abb 1: Basistypen von Halbleiterlasern

Für die optische Datenkommunikation bei einer Wellenlänge von 850nm werden seit einigen Jahren oberflächenemittierende Laserdioden (VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser) mit großem Erfolg eingesetzt. Diese Laser können auf einem Wafer ohne Vereinzelung und spezielles Handling hergestellt und geprüft werden. Daher ist die Fertigung deutlich kostengünstiger als bei den EELD. Weiterhin weisen die VCSEL eine Abstrahlcharakteristik mit einer schmalen Emissionskeule auf, wodurch eine einfachere optische Ankopplung an die Lichtwellenleiter ermöglicht wird.

Der VCSEL besteht aus zwei viellagigen Bragg- Spiegeln, in deren Mitte sich der aktive Bereich befindet. Der optische Resonator liegt also senkrecht zur Chipoberfläche und der Austritt der Strahlung erfolgt nach oben und unten. Die Form und Größe des emittierenden Bereiches wird durch die Oxidapertur bestimmt, welche sowohl den Strom als auch das Strahlungsfeld seitlich begrenzt. Es bestehen vielfältige Designmöglichkeiten, wodurch auch ein- und zweidimensionale Laser- Arrays relativ einfach hergestellt werden können [1,2]. Weiterhin bietet eine nicht hermetische Kapselung bei VCSEL einen ausreichenden Schutz vor Umgebungseinflüssen. Dieses kann für ein kostengünstiges Packaging genutzt werden, welches optimal auf die optischen Kurzstreckenverbindungen angepasst werden kann.

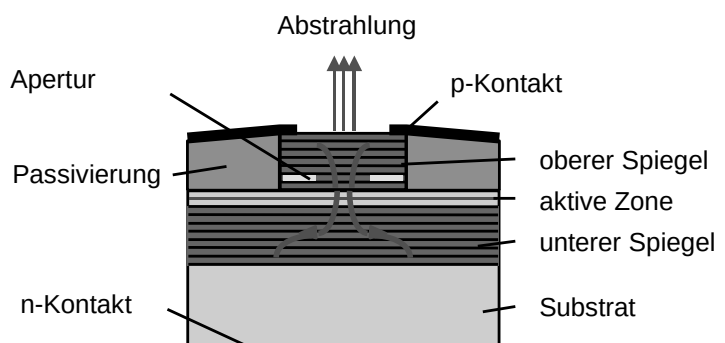


Abb.2: Aufbau eines VCSEL

2.2 Optische Empfangsdioden

Als optische Empfänger werden überwiegend PIN- Photodioden eingesetzt, welche je nach Spektralbereich auf Si, GaAs oder InP Substraten hergestellt werden. Um hohe Datenraten zu erreichen muß die Fläche der Dioden stark verkleinert werden. Eine Übertragung mit 2,5Gbit/s kann mit Durchmessern von $\leq 80\mu\text{m}$ erreicht werden. Für Empfängeranordnungen

bei kostengünstigen Kurzstreckenverbindungen werden aber größere Dioden angestrebt, um Lichtwellenleitern mit großen Kernquerschnitten besser ankoppeln zu können und den Justageaufwand zu verringern.

Eine Lösung bieten hier MSM (Metall-Semiconductor-Metall) Dioden, welche durch die geringe elektrische Kapazität auch größere Flächen zulassen. Im Rahmen des BMBF- geförderten Themenschwerpunktes Optosys wurden vom FhG-IAF MSM-Dioden auf GaAs bis zu einem Durchmesser von 300µm hergestellt, welche für die Übertragung mit 2,5Gbit/s geeignet sind [3]. Dieser Vorteil wird aber mit einer geringeren optischen Empfindlichkeit aufgrund der Abschattung durch die Metallkämme der Elektroden erkauft. Andererseits ist eine Integration der MSM- Dioden mit dem elektronischen Verstärker auf einem GaAs-Substrat relativ einfach möglich. Für die Kurzstreckenübertragung mit einer Wellenlänge von 850nm haben solche Komponenten schon Eingang in die Produkte gefunden.

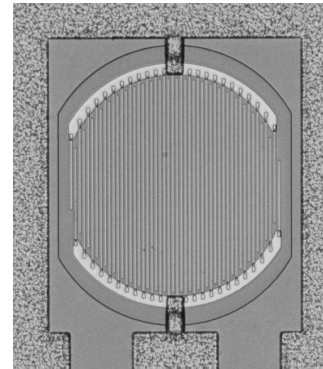


Abb.3: MSM-Diode mit 150µm Durchmesser (FhG-IAF, Freiburg)

3 Module für optische Kurzstreckenverbindungen

Bei dem Einsatz in Systemen werden Komponenten gewünscht, welche eine allgemein bekannte Schnittstelle besitzen. Daher haben sich in der Datenkommunikation für die optischen Komponenten sogenannte Industriestandards herausgebildet, nach denen sich verschiedene Hersteller richten. Diese besitzen in der Regel eine optische Steckbucht für LWL- Stecker als optische Schnittstelle, eine elektrische Schnittstelle für die Montage auf einer Baugruppe sowie genau festgelegte Außenmaße. Neben den optischen Bauelementen sind in Transceivern, welche einen Sende- und einen Empfangskanal besitzen, auch elektronische Funktionen enthalten: eine Treiberelektronik zur Ansteuerung des Sendediode und eine Verstärkerelektronik für das Photodiodensignal. Darüber hinaus können auch weitere Funktionen wie z.B. Kodierung/Dekodierung oder Multiplex/Demultiplex integriert sein. Der Transceiver besitzt dadurch eine digitale elektrische Schnittstelle, welche unabhängig von den Eigenschaften der optischen Bauelemente ist.

3.1 Module für Geräteverbindungen im Innenraum

Der überwiegende Teil der optischen Module wird für diese Kurzstreckenverbindungen im Innenraum z.B. zur Verschaltung großer Computer oder LANs eingesetzt. Die optischen Module werden an die Kante einer Baugruppe montiert. Bei der Montage der Baugruppe im Gestellschrank ragt die optische Steckbucht in eine Gehäuseöffnung, wodurch von außen die optische Verbindung mit Steckern erfolgen kann. Abb.4 zeigt ein Small-Form-Factor (SFF-) Transceiver, der einen Sende- und einen Empfangskanal besitzt, die mit optischen LC-Steckern verbunden werden. Diese Module sind für Datenraten von 100Mbit/s bis 2,5 Gbit/s erhältlich.

Für höhere Übertragungskapazitäten werden parallele optische Module eingesetzt. Hier sind Sender und Empfänger getrennt. Bis zu 12 optische Kanäle werden in einem optischen Band-Kabel (Ribbon) mit optischen Array-Steckern verbunden. Das Modul von etwa gleicher Größe wie die SFF-Transceiver kann bis zu 12x 2,5Gbit/s übertragen (siehe Abb.5). Durch den Einsatz der Array- Technik wird eine deutliche Volumenreduzierung erreicht bei gleichzeitiger Verringerung der Kosten. Für 12 einzelnen und unabhängige Datenkanäle, die



Abb.4: Small Formfactor Transceiver für Kurzstreckenverbindungen

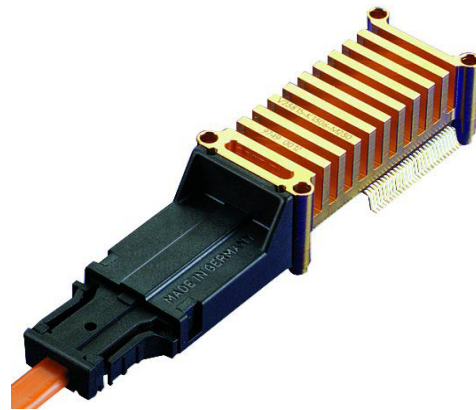


Abb.5: PAROLI- Modul für die Übertragung mit 12x 2,5Gbit/s

in einem Abstand von 250µm angeordnet sind, wird jeweils nur ein optischer Chip und ein elektronischer Chip im Modul eingesetzt. Dieses wird durch den Einsatz der VCSEL möglich, mit denen es gelingt, 12 unabhängige Laser auf einem Chip kostengünstig herzustellen.

3.2 Modultechnik für optische Rückwandverbindungen

In komplexen Systemen wie zum Beispiel große Vermittlungseinrichtungen für den Internet-Verkehr oder Super- Computern müssen Datenkapazitäten im Bereich von Tbit/s verarbeitet werden. Der Datentransfer zwischen den Baugruppen eines Gestellschranks kann nur noch optisch erfolgen. Dieses erfordert optische Verbindungen über die Rückwand eines Gestellschranks. Derzeit wird dieses mit Hilfe von speziellen optischen Stecksockeln realisiert, die zusammen mit den elektrischen Steckleisten in der Rückwand montiert sind. Die optischen Verbindungen werden mit optischen Ribbon- Kabeln über Array- Stecker erreicht. Die optischen Module sind auf der Rückseite der Baugruppe zusammen mit den elektrischen Steckerleisten montiert. Durch eine spezielle mechanische Vorführung werden die optischen Verbindungen bei der Einführung der Baugruppen in den Gestellschrank zentriert und es erfolgt automatisch die optische und elektrische Kontaktierung (siehe Abb.6).

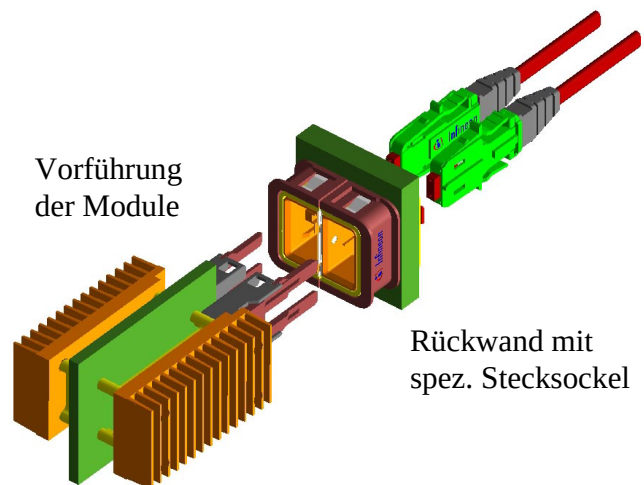


Abb.6: Modulanordnung für die optische Rückwand-Verbindung für 2x 12 optische Kanäle

Erste Wege zu einer Vereinfachung dieser recht aufwändigen Technik mit den optischen Einzelverbindungen an der Rückwand werden im Rahmen des Projektschwerpunktes Optosys bearbeitet [4]. Es wurden Rückwand- Leiterplatten mit einer Vielzahl von optischen Polymer-Wellenleitern auf der Oberfläche hergestellt, welche die Wellenleiter- Kabel ersetzen. Ein technologisch noch ungelöstes Problem besteht aber in der optischen Verbindung zwischen den Baugruppen und der Rückwand mit vielen eng benachbart liegenden optischen Kanälen.

Aufgrund der recht weiten mechanischen Toleranzen der Baugruppen und Gestellschränke ist es bisher nicht möglich, die optischen Kanäle in einem Raster von $250\mu\text{m}$ zu verbinden.

3.3 Module für On-Board Verbindungen

Die extrem hohen Übertragungskapazitäten benötigen neben einer hohen Datenrate pro Kanal auch eine hohe Zahl von parallelen Kanälen. Daher werden Wellenleiter mit Kerndurchmessern von etwa $100\mu\text{m}$ eingesetzt, die in einem Raster von $250\mu\text{m}$ auf der Baugruppe hergestellt werden. Zur Realisierung von optischen Verbindungen auf einer Baugruppe benötigt man nun eine effiziente Technologie zur optischen Ein- und Auskopplung. Bei der Bestückung der Baugruppe mit opto-elektrischen Modulen müssen neben den elektrischen Verbindungen auch die optischen Kanäle gleichzeitig angekoppelt werden. Dieses soll ohne zusätzliche Justageprozesse möglich sein. Um die Kosten in vertretbarem Rahmen zu halten, wird dabei versucht, die bekannte Herstellungstechnologie für Leiterplatten so weit wie möglich bei zu behalten.

In den Lagenaufbau der Leiterplatte wird als mittlere Schicht eine optischen Lage eingefügt. Diese optische Lage besteht aus einer Kunststoffolie, in welche die Wellenleiter durch Prägetechnik eingebracht wurden. An den Stellen der optischen Ein- und Auskopplung sind die Wellenleiter mit unter 45° angeordneten Spiegeln abgeschlossen. Dadurch ist eine optische Ankopplung senkrecht zur optischen Lage möglich. Die optische Koppelstelle ist durch eine Ausnehmung in den darüber liegenden Lagen von außen zugänglich (siehe Abb.7).

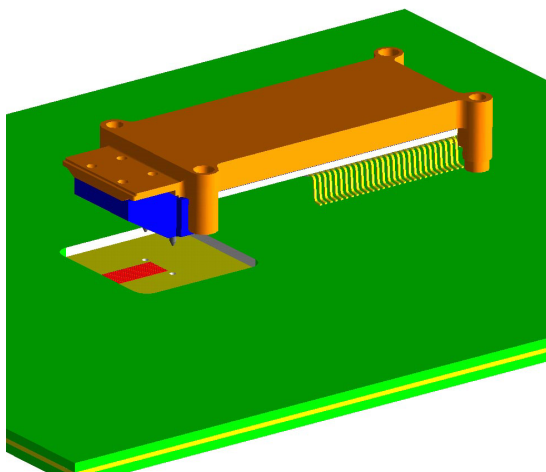


Abb.7: System Konzept zu der optischen Leiterplatte

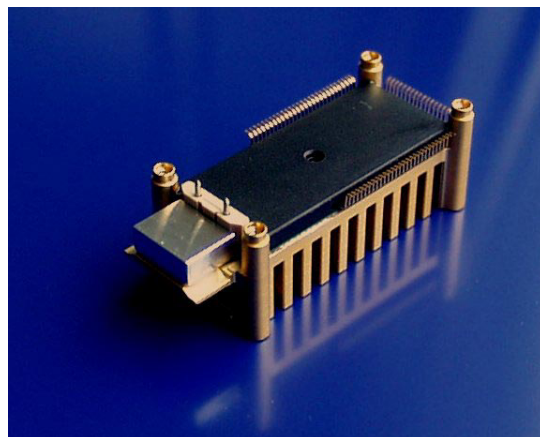


Abb.8: Paralleles opt. Modul für die Kopplung an die optische LP

Weiterhin enthält die optische Lage im Koppelbereich zwei Bohrungen als mechanische Referenz. Die optischen Module besitzen an der Unterseite ein spezielles optisches Koppellement mit kurzen Wellenleiterstummeln sowie zwei Führungsstiften. Bei dem Aufsetzen der Module auf die Leiterplatte rasten die Führungsstifte in die Bohrungen der Leiterplatte ein, wodurch die mechanische Ausrichtung der optischen Kanäle zueinander erfolgt. Durch diesen Vorgang ist die Position des Moduls und gleichzeitig die Lage der elektrischen Kontakte auf der Leiterplatte festgelegt. Die Größe und die Abstände der elektrischen Kontakte des Moduls sind derart dimensioniert, dass die Toleranzen (z.B. des Lagenaufbaus) der Leiterplatte aufgefangen werden können. Dadurch ist eine relativ preiswerte Herstellung der Leiterplatte möglich. Abb.8 zeigt ein paralleles optisches Modul mit 12 optischen Kanälen, welches für die Kopplung an eine optische Leiterplatte ausgelegt wurde [5].

4 Ausblick auf die zukünftige Verbindungstechnik

Den steigenden Übertragungsgeschwindigkeiten durch das wachsende Kommunikationsaufkommen kann in der Weitverkehrstechnik durch den Einsatz der optischen WDM-Technik begegnet werden. Derzeit ist aber immer noch unklar, wie das riesige Datenvolumen in den Vermittlungseinrichtungen und Computern in effektiver Weise bewältigt werden kann. Die hier beschriebenen Techniken für optische Kurzstreckenverbindungen bilden Ansätze für die Lösung, es sind aber weiterhin wichtige Fragen offen.

- Gestaltung der elektrischen Schnittstelle von optischen Modulen:

Es wird erwartet, dass - basierend auf die VCSEL- Technologie – in nicht allzu ferner Zeit Arraymodule mit 12x 10Gbit/s für optische Kurzstreckenverbindungen zur Verfügung stehen. Diese werden ein geringes Montagevolumen benötigen. Unklar ist, wie die Datenmenge von 12x 10Gbit/s mit der derzeitigen Leiterplattentechnologie an diese optischen Module elektrisch herangeführt werden kann. Wird das Modul auf einen Zwischenträger aus Keramik montiert, auf dem z.B. 1:4 bzw. 4:1 MUX und DEMUX Funktionen integriert sind, so müssen an diesen Zwischenträger 96 differenzielle Leitungen mit je 2,5Gbit/s auf engstem Raum angeschlossen werden.

- Optische Ankopplung der Baugruppen an die optische Rückwand:

Es konnten im Rahmen des Optosys Schwerpunktes schon ausreichend gute planare Wellenleiter mit Längen in der Größenordnung von einem Meter hergestellt werden. Ungelöst ist aber weiterhin die optische Ankopplung von vielen, engliegenden Wellenleitern oder optischen Modulen von den verschiedenen Baugruppen an eine optische Backplane. Ein wesentliches Hindernis sind hier die großen Toleranzen, welche in der derzeitigen Leiterplattenherstellung noch vorhanden sind.

- Großflächige Leiterplatten mit planaren optischen Wellenleitern und einer effizienten optischen Koppeltechnik:

Leiterplatten, welche wie bisher üblich mit Bauelementen ein- oder beidseitig bestückt werden, müssen (speziell bei bleifreier Löttechnik) hohe Temperaturen bis zu etwa 270°C aushalten. Integrierte optische Lagen in den Leiterplatten müssen diese Bedingungen ebenfalls aushalten, ohne die geforderten Eigenschaften zu verlieren. Der Einsatz von Polymeren für die optische Lage erfordert zum einen eine Materialverbesserung der bestehenden Ansätze und darüber hinaus auch die Entwicklung einer Fertigungstechnik für großflächige Wellenleiterstrukturen genügender Qualität. Bei der Herstellung der optischen Lage aus anderen Materialien, wie z.B. Gläsern, muss ebenfalls die Realisierung großflächiger Wellenleiterstrukturen erarbeitet werden. Darüber hinaus sind hierfür bisher noch keine Konzepte für eine effiziente und justagefreie optische Ein- und Auskopplung bekannt.

- Optische Hochfrequenzverbindungen auf der Leiterplatte

Bei der steigenden Verarbeitungsgeschwindigkeit und höheren Integration auf dem Chip wird man eines Tages dazu übergehen müssen, für die hochfrequenten Signalfade optische Ein- und Ausgänge direkt in das Chip-Package zu integrieren. Hierfür muss sowohl eine neuartige Package- Technologie als auch eine passende Baugruppenteknologie entwickelt werden. Zusätzlich wird mit steigenden Geschwindigkeiten die Problematik der Abführung von der Verlustleistung der Bauelemente immer kritischer. Daher muss auch diese Fragestellung mit hoher Priorität bei den neuen Konzepten Berücksichtigung finden.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Fragestellungen und Technologien ist deutlich zu erkennen, dass die Weiterentwicklung der opto-elektrischen Verbindungs- und Modultechnik zukünftig

nur dann erfolgreich sein wird, wenn sich Partner aus allen berührten Bereichen zu gemeinsamen Entwicklungen zusammen finden.

Literatur

- [1] T. Wipiejewski et al., „Performance and Reliability of Oxide Confined VCSEL's“, *Proc. of 49th ECTC*, S. 741- 746, San Diego (CA), June 1999.
- [2] L. Zei, S. Ebers, J.-R. Kropp, K. Petermann, „Noise Performance of Multimode VCSEL's“, *J. Lightwave Techn.*, Vol.19, No. 6, S. 884- 892, 2001
- [3] M. Lang, W. Brenner, W. Benz, M. Ludwig, V. Hurm, G. Kaufel, A. Leuther, J. Rosenzweig, M. Schlechweg, „Complete monolithic integrated 2,5Gbit/s optoelectronic receiver with large area MSM photodiode for 850nm wavelength“, *Electr. Lett.*, Vol .37, No.20, S. 1247-1249, Sept. 2001.
- [4] J. Moisel, R. Bogenberger, J. Guttman, H.-P. Huber, O. Krumpholz, K.-P. Kuhn, M. Rode, "Optical backplanes with integrated polymer waveguides", *Opt. Eng. Vol. 39, No.3*, S. 673 - 679, März 2000.
- [5] E. Griesse, A. Himmler, K. Klimke, A. Koske, J.-R. Kropp, S. Lehmacher, A. Neyer, W. Süllau, „Self-Aligned Coupling of Optical Transmitter and Receiver Modules to Board-Integrated Optical Multimode Waveguides“, *Proc. Micro and Nanooptics for Optical Interconnection and Information Processing, SPIE*, Vol. 4455, 2001.

Ein Teil der diesem Beitrag zu Grunde liegenden Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes „MoKom“ durchgeführt und unter dem Förderkennzeichen 01 BP 802/2 vom BMBF gefördert.

Anforderungen an neue Materialien für optische Verbindungen in elektrisch-optischen Baugruppen

Peter Demmer
Siemens AG, CT D2P
Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München
peter.demmer@mchp.siemens.de

1. Zusammenfassung:

Es sollen Materialien für Wellenleiter, Substrate und Ausgleichsschichten entwickelt werden, mit denen sich effizient und kostengünstig optische Lagen herstellen und in konventionelle Leiterplatten integrieren lassen. Die Anforderungen, die an die Materialien zu stellen sind, ergeben sich zum einen aus den notwendigen optischen Eigenschaften (z.B. geringe Dämpfung und Dispersion bei den relevanten Wellenlängen) als auch aus der unbedingt notwendigen Kompatibilität mit dem existierenden und beherrschten Leiterplattenentwicklungs- und -herstellungsprozeß. Weitere Anforderungen ergeben sich aus der geforderten Strukturierbarkeit für die Herstellung der Wellenleiter.

2. Anforderungen an die Materialien für die Herstellung optischer Lichtwellenleiter:

Die Herstellung optischer Lichtwellenleiter kann lithographisch oder durch Prägetechnik erfolgen. Hierfür müssen die Materialien folgende Anforderungen erfüllen:

2.1. Optische Eigenschaften

Ein optischer Lichtwellenleiter besteht grundsätzlich aus einem Kern und dem Cladding. Beide Materialien müssen bezüglich des Brechungsindex aufeinander abgestimmt werden: $n_{\text{Kern}} > n_{\text{Cladding}}$ wobei der Unterschied etwa 0,3% beträgt. Das reine Polymer sollte im Bereich von 630 und 850 nm transparent sein und eine Dämpfung von $< 0,05$ dB/cm aufweisen. Durch die Prozessierung zum Lichtwellenleiter sollte auf Grund von Struktur-Rauigkeiten ein Wert von 0,1 dB/cm nicht überschritten werden.

Bild 1 zeigt den Einfluß der Strukturierung auf die Dämpfung an einem Epoxy Material :

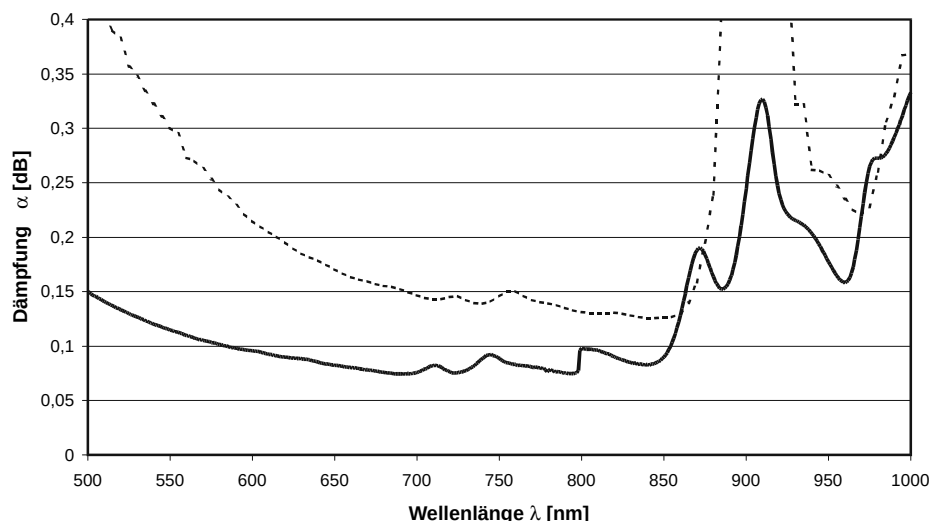


Bild1. Dämpfungsverhalten hochtransparentes Epoxy, Quelle Universität Dortmund MST

Die durchgezogene Kurve ist das reine Material, die gestrichelte Kurve der strukturierte Lichtwellenleiter. Bei λ 0 850 nm ist deutlich ein Dämpfungs-Minimum zu sehen.

2.2. Chemische Eigenschaften

Die Aufnahme von Wasser und Chemikalien sollte möglichst gering sein, d.h. das Material sollte eine hohe Hydrolyse und Chemikalienbeständigkeit aufweisen. Typische Anforderungen sind

Schadgas: 25 °C/75 % rH / 10 d; SO₂: 0.2 cm³/m³; H₂S: 0.01 cm³/m³; NO₂: 0.2 cm³/m³
Cl₂: 0.01 cm³/m³

Feuchte Wärmelagerung: 85 °C/85 % rH 1000 h

2.3. Thermische Stabilität

Fast alle optischen Polymere weisen eine Glasübergangstemperatur von < 200 °C auf, die Zersetzungstemperatur ist auch relativ niedrig. Werden die Lichtwellenleiter in eine Leiterplatte integriert –nehmen wir den einfachsten Fall – einen FR4 Multilayer, so dürfen Temperaturen von 180 °C und ein Druck von 15 bar über 45 Min. zu keiner Verformung der Lichtwellenleiter führen. Außerdem muß zwischen den verschiedenen Materialien eine gute Haftung vorliegen, damit es nicht zu Delaminierungen kommt. Angepaßte thermische Ausdehnungskoeffizienten wären von großem Vorteil.

Eine Leiterplatte mit integrierter optischen Lage muß folgende thermische Beanspruchungen überstehen:

Wärmebeständigkeitstest: 260 °C; 2 x 10 s

- * Wellenlöttest: 1 x dem Wellenlötbad aussetzen
- * max. Löttemperatur: 240 °C für 20 s
- * Zeit oberhalb 183 °C: 150 s
- * Lötverfahren: Zwangskonvektion und Dampfphase

* Hochtemperaturlagerung: 100 °C 1000 h

* Niedrigtemperaturlagerung: - 40 °C 1000 h

* Rascher Temperaturwechsel: -40 °C – 125 °C Haltezeit jeweils 30 Min. 100 x

Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften:

Durchbiegung: maximal 1 % (bezogen auf Länge)

Verwölbung: <= 0.5 % (bezogen auf Diagonale)

Vibration: f = 20 ... 2000 Hz; 20 g peak; 4 Min./Zykl.; 4 Zyklen in x, y und z

Schock: 1500 g; 0.5 ms; fünfmal in x, y und z-Richtung

3. Material-Übersicht.

Bild 2 zeigt eine (unvollständige) Übersicht über Polymere für die Herstellung von optischen Lichtwellenleitern.

Polymer	Tg	Td	Wasser	Chem	Folie	Proz
• Acrylate / Methacrylate	-	-	-	-	+	+
• Polycarbonate	-	0	0	0	+	+
• Benzocyclobuten (BCB)	+	0	+	0	-	0 (O2 empf.)
• Perfluorcyclobutan (PFCB)		0	+	0	-	+
• Epoxide	-	-	0	0	-	+
• Ormocere / Siloxane	+	0	0	0	-	0
• Polyimide	+	+	0	0	+	+
• Polycyanurate	+	0	0	0	-	+
• Polychinoline	+	+	0	0	+	-- (tox. LM)
•Cyclic Transparent Optical Polymer	-	0	+	+	+	
• Cycloolefin Copolymers COC	-	-	+	+	+	+
• Teflon AF (Du Pont)	0	+	+	+	+	
• CAB + Acrylat (Polyguide; Du Pont)						

Tg, Td: Glas- bzw. Zersetzungstemperatur Wasser: Wasseraufnahme Chem: Chemikalienstabilität
 Proz: Prozessierung

Bild2. Materialübersicht

4. Conclusio

Betrachtet man die Tabelle, so sieht man, daß das „ideale“ Material für die Herstellung von Lichtwellenleitern noch nicht vorhanden ist. Auch sind die notwendigen Kombinationen von Lichtwellenleiter und Cladding hinsichtlich des Brechungsindex – Unterschiedes nicht einfach zu realisieren. Ein möglicher Weg die signifikante Schwäche in der Temperaturstabilität und in den hohen Ausdehnungskoeffizienten zu überwinden ist die Entwicklung von optisch transparenten Duroplasten.

Zukünftige Anforderungen an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik

— Offene Fragen und Entwicklungsbedarf —

Elmar Griesse

Siemens SBS C-LAB, Fürstenallee 11, 33102 Paderborn

Elmar.Griesse@c-lab.de

Zusammenfassung: *In mehreren Projekten mit jeweils unterschiedlichen Zielsetzungen wurde bzw. wird intensiv an der Entwicklung der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplattebene gearbeitet. Trotz der unterschiedlichen Anwendungen zeigen die ersten Ergebnisse und Erfahrungen dieser Projekte nahezu geschlossen und einheitlich noch offene Fragen und den daraus resultierenden Handlungsbedarf auf. Dringender Entwicklungsbedarf besteht für die Bereitstellung geeigneter Materialien für optische Onboard-Verbindungen, standardisierte optische Schnittstellen bzw. Koppelkonzepte für elektrisch-optische Komponenten und Steckverbindungen, Simulations- und Entwurfswerkzeuge und Entwurfsregeln für optische Multimode-Verbindungen, Optimierung der Herstellungsprozesse für die Serientauglichkeit sowie für neue Architekturen, mit denen das gesamte Potential der optischen Verbindungstechnik innerhalb einer konventionellen elektrischen Umgebung ausgeschöpft werden kann. Eines der wichtigsten Ergebnisse ist jedoch die Tatsache, dass es keine generelle Lösung geben kann, die in allen Anwendungsbereichen genutzt werden kann. Dieses bedeutet, dass anwendungsspezifische Entwicklungen erforderlich sind, die auf unterschiedlichen, den jeweiligen Anforderungen Rechnung tragenden Entwurfs- und Herstellungsverfahren basieren.*

1 Einleitung

Der technologisch und physikalisch bedingte Engpass der konventionellen elektrischen Verbindungstechnik hat bereits vor wenigen Jahren zu ansteigenden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten geführt, deren Ergebnis neue Konzepte für optische Verbindungen auf System-, Leiterplatten- und Komponentenebene sind [3, 35, 37, 43, 45, 47].

Nach der Entwicklung und Markteinführung von kostengünstigen, parallelen faserbasierten optischen Links [38] für Verbindungen zwischen elektronischen Geräten konzentrieren sich nun die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf die Leiterplatte. Erste Ansätze beruhten auf der Integration von Fasern in die Leiterplatte [44] und demonstrierten damit grundsätzlich das große Potential der optischen Verbindungstechnik auf der Leiterplatte. Jedoch zeigte sich sehr schnell, dass dieses Prinzip für einen industriellen Einsatz nicht geeignet ist. Der gravierende Nachteil ist durch die Tatsache gegeben, dass sich mit diesem Ansatz grundsätzlich nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen aufbauen lassen, wodurch die Entwurfsfreiheitsgrade signifikant eingeschränkt werden. Aber auch der Aufbau derartiger Leiterplatten sowie der durch den Ansatz bedingte hohe Aufwand für die Ankopplung der Wellenleiter an die optischen Sende- und Empfangskomponenten verhindern unter Berücksichtigung der resultierenden hohen Montage- und Aufbaukosten einen industriellen Einsatz.

Das Prinzip einer Leiterplatte mit integrierter optischer Lage, welche beliebig komplexe Wellenleiterstrukturen enthält und damit auch beliebige Verbindungstopologien zulässt, wurde bereits im Jahre 1997 vorgestellt [7] und anschließend kontinuierlich weiterentwickelt [8]. An der Umsetzung wird in mehreren Projekten seit Anfang 1998 gearbeitet [41, 17, 22, 4]. Die wesentlichen Anforderungen aus dem technologischen Umfeld der Leiterplattenherstellung sind dabei:

- Kompatibilität mit den etablierten Entwurfs- und Herstellungsprozessen für konventionelle elektrische Leiterplatten,
- Kompatibilität mit den Fertigungs- und Montagetoleranzen in der Leiterplattenfertigung,
- Kompatibilität mit dem automatischen Bestückungsprozess von Leiterplatten bzw. Baugruppen.

Aus diesen technologischen Anforderungen, insbesondere den zuletzt genannten, folgt zunächst, dass die Querschnittsabmessungen der optischen Wellenleiter mit den Querschnittsabmessungen der elektrischen Signalleitungen vergleichbar sein müssen. Unter Berücksichtigung der optischen Wellenlänge von 850 nm handelt es sich damit um höchst-multimodale Wellenleiter. Die auftretende Modendispersion als im Allgemeinen begrenzende Größe für das Datenrate-Länge-Produkt einer Multimode-Verbindungen ist für das Anwendungsgebiet jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die Verbindungslängen kürzer als 2 m sein werden.

2 Anforderungen an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik auf Baugruppen

Die Anforderungen an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik auf Baugruppen lassen sich zum einen aus den anwendungsspezifischen Systemanforderungen und zum anderen aus den inzwischen vorliegenden ersten Erfahrungen der laufenden F&E-Projekte *OptoSys*, *MOES* und *OptiCon* [17, 22, 4] bzw. des ersten, erfolgreich abgeschlossenen F&E-Projekts *EOCB* [41] ableiten.

2.1 Anwendungsspezifische Anforderungen an die optische Aufbau- und Verbindungstechnik

2.1.1 Optische Verbindungstechnik in Kraftfahrzeugen

Der Einsatz der optischen Verbindungstechnik innerhalb von Kraftfahrzeugen wird sich zunächst auf die Kommunikationssysteme im KFZ konzentrieren. Dort können hybride, elektrisch-optische Leiterplatten mit ihrer zusätzlichen optischen Funktionsebene eine breitbandige und gleichzeitig störungsunanfällige Verbindungstechnik bereit stellen [42]. Zunächst muss jedoch ein nicht vernachlässigbarer Mehraufwand aufgrund der höheren Komplexität des Lagenaufbaus der Leiterplatte geleistet werden. Mittelfristig ist aber zu erwarten, dass dieser Mehraufwand durch Einspareffekte (z. B. durch den Wegfall ganzer Lagen) kompensiert werden kann [42].

Kommerzielle Komponenten für Optoelektronik und Steckerschnittstellen, welche für den Einsatz in Kraftfahrzeugen geeignet sind, sind derzeit noch nicht verfügbar. Daraus ergibt sich unmittelbar der Bedarf, neue Konzepte mit den Halbleiter-, Komponenten- und Packagingherstellern gemeinsam zu diskutieren und umzusetzen. Die Komplexität innerhalb zukünftiger

Fahrzeugkommunikations- und -informationssysteme wird weiter sehr stark anwachsen, wodurch das technische und auch das wirtschaftliche Potential der optischen Verbindungstechnik auf Baugruppenebene deutlich zunehmen wird. Dabei ist abzusehen, dass eine integrierte Lösung gegenüber einem diskreten Aufbau mit konfektionierten Faserkomponenten einen zunehmenden Kostenvorteil bewirkt, wodurch die Attraktivität bzgl. der Anwendung steigt.

Die optische Verbindungstechnik in Kraftfahrzeugen muss den nachfolgend angegebenen Anforderungen genügen [42]:

- Hochbitratige Kommunikation in verteilten und vernetzten Systemen muss kostengünstig unterstützt werden.
- Der hohe Bandbreitenbedarf innerhalb einer Baugruppe muss unterstützt werden.
- Die Funktionalität auf optischer Ebene benötigt Vielfach-Wellenleiter, passive Strukturen sowie ein komplexes Layout. Dafür sind Entwurfs- und Herstellungsprozesse erforderlich.
- Aktive Array-Bauelemente sowie standardisierte und kostengünstige (low-cost) Bauformen für aktive Bauelemente sind notwendig.

2.1.2 Optische Verbindungstechnik in Systemen für die Telekommunikation

Die Entwicklung der Übertragungsdatenraten in der Weitverkehrstechnik hat einen sehr starken Einfluss auf die Datenraten in den Schalt- und Verteilsystemen (z. B. Crossconnects, Router) der Kommunikationsnetze. Bei Verwendung von WDM-Verfahren (WDM = Wavelength Division Multiplex) kann ein Datenvolumen von 40×10 Gbit und mehr pro Sekunde über eine Glasfaser übertragen werden [34]. Diese hohen Bitraten müssen zwangsläufig in den Schalt- und Verteilsystemen verteilt und verarbeitet werden. Bei Bitraten über 1 Gbit/s und Übertragungslängen von mehr als 20 m ist die optische Übertragungstechnik schon heute kostengünstiger als eine vergleichbare elektrische Lösung. Damit zieht die optische Übertragungstechnik auch in die Systeme der Weitverkehrstechnik ein, und mit steigender Bitrate auf den Glasfasernetzen ergibt sich die Notwendigkeit nicht nur zwischen Baugruppen, sondern auch auf der Baugruppe optisch zu übertragen [34].

Die wesentlichen Anforderungen aus dem Bereich der Telekommunikation sind in [34] beschrieben. Unter Berücksichtigung der Systemanforderungen und Architekturen kann ein Handlungsbedarf abgeleitet werden, der dringend erforderlich ist, um die nachfolgend aufgelisteten Basistechnologien bereit zu stellen:

- ICs mit integrierten e/o- und o/e-Wandlern für Datenraten von mehr als 10 Gbit/s (VCSEL mit 850 nm oder 1310 nm Wellenlänge),
- optisches Powerbudget von ca. 20 dB,
- geringe optische Dämpfung der Wellenleiter ($< 0,05$ dB/cm),
- geringe Einkoppeldämpfung bzw. Auskoppeldämpfung beim Übergang der aktiven Komponente zum Wellenleiter (< 3 dB),
- geringe Steckerdämpfung (1,0 ... 1,5 dB),
- geringe Längenbegrenzungen durch die Modendispersion (> 4 m bei Board-integrierten Wellenleitern, > 50 m bei Fasern).

2.1.3 Optische Verbindungstechnik in Computersystemen

Im Gegensatz zu den Systemen der Telekommunikation, bei denen die größte Anforderung an die Aufbau- und Verbindungstechnik durch hohe Datenraten gegeben sind, muss die Verbindungstechnik in Computersystemen darüber hinaus geringe Latenzzeiten garantieren. Ein wichtiges, für die optische Verbindungstechnik geradezu prädestiniertes Verbindungssystem innerhalb eines Computers ist die Prozessor-Speicher-Verbindung, deren Eigenschaften hinsichtlich Datenrate und Latenzzeit die Leistungsfähigkeit des gesamten Rechnersystems entscheidend beeinflusst [13, 19, 6]. Aufgrund der notwendigen geometrischen Nähe von Prozessor und Hauptspeicher wird die Leiterplatte auch in der Zukunft eine der wichtigsten Komponenten von Computern sein, so dass die optische Verbindungstechnik auf Leiterplatten eine große Relevanz für dieses Anwendungsgebiet besitzt. Aber auch faserbasierte Verbindungen sowie Verbindungen über Backplanes sind für Multiprozessorsysteme und Server der gehobenen Leistungsklasse von großer Bedeutung.

Nachfolgend sind die wichtigsten Anforderungen für die optische Verbindungstechnik für Computeranwendungen zusammengefasst angegeben:

- Neben einer hohen Datenrate besitzt insbesondere eine geringe Latenzzeit der Verbindungen eine sehr hohe Priorität. Dieses bedeutet, dass die Signalwandlung nur eine äußerst geringe Latenzzeit beanspruchen darf.
- Um das gesamte Potential der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik zu nutzen bzw. zu erschließen, sind neue, an das Wirkprinzip der optischen Signalübertragung angepasste Architekturen erforderlich.
- Passive optische Steckverbinder sind erforderlich, z. B. um Board-Backplane-Board-Verbindungen realisieren zu können.
- Die relevanten mikroelektronischen Komponenten müssen mit integrierten optischen Ein- und Ausgängen versehen sein, die auf einem für die Computertechnik standardisierten und kostengünstig realisierbaren Koppelkonzept basieren.
- Um Verbindungen einsparen zu können, sind bidirektionale optische Verbindungen bzw. entsprechende Sende- und Empfangskomponenten erforderlich.
- Der Entwurf elektrisch-optischer Leiterplatten erfordert neue Entwurfswerkzeuge und Entwurfsregeln, welche in kommerziell erhältliche CAD-Software für den Entwurf elektrischer Leiterplatten integriert werden kann.
- Die zu erwartende Komplexitätszunahme im Bereich der Computertechnik erfordert mittelfristig die Verfügbarkeit der optischen Mehrlagigkeit.

2.2 Erfahrungen aus laufenden und abgeschlossenen F&E-Projekten zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik

2.2.1 EOCB: Electrical/Optical Circuit Board

Das erste, in der Bundesrepublik Deutschland gestartete Verbundprojekt zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik war das Projekt *”Electrical/Optical Circuit Board (EOCB)”*, welches im März 1998 gestartet und im Juni 2001 abgeschlossen wurde [41]. Gegenstand des Projekts war die grundlegende Untersuchung, ob und wie elektrische Leiterplatten um integrierte optische Wellenleiter erweitert werden können. Die Herstellung der Wellenleiter basierte in diesem

Projekt auf einem Heißprägeprozess [24]. Wesentliche Ergebnisse dieses Projekts sind die Herstellung optischer Lagen mit integrierten Wellenleitern [24, 25, 9, 39], die Entwicklung eines auf Stirnflächenkopplung basierenden Koppelkonzepts [18], Basisalgorithmen für die Simulation zweidimensionaler Multimode-Wellenleiter mit rauen Oberflächen [9, 2] sowie der Aufbau eines Demonstrators und dessen Charakterisierung und Bewertung [19, 40].

Während der Projektarbeiten wurde weiterer Handlungsbedarf identifiziert, der aufgrund der begrenzten Kapazitäten und Ressourcen im Rahmen des EOCB-Projekts jedoch nicht angegangen werden konnte:

- Für den Einsatz elektrisch-optischer Leiterplatten in Produkten ist dringend eine Optimierung der Materialien und Prozesse erforderlich.
- Zwischen der Leiterplatte und den aktiven elektro-optischen Komponenten sind standardisierte Schnittstellen sowie serientaugliche elektro-optische Standardkomponenten in Array- und Einzelausführung erforderlich.
- Für die Ankopplung der elektrisch-optischen und optisch-elektrischen Wandlerkomponenten an die Wellenleiter ist ein robustes, kostengünstiges und selbstjustierendes Koppelkonzept erforderlich.
- Aus Kostengründen sind keine bzw. möglichst wenig mikro-optische Komponenten einzusetzen.

2.2.2 MOES: Modularer Optisch-Elektrischer Schaltungsträger

Das Ziel des Projekts MOES, welches vom BMBF im Rahmen des MaTech-Programms gefördert wird, ist die Material- und Verfahrensentwicklung für die Aufbau- und Verbindungstechnik modularer, optisch-elektrischer Schaltungsträger [22]. Nur ein Teil des im Oktober 1998 gestarteten Projekts befasst sich mit der optischen Verbindungstechnik auf Leiterplattebene. Als Herstellungsverfahren für planare optische Polymer-Wellenleiter dient eine auf Fotolithographie basierende Strukturierung, da dieses eine Standardtechnologie innerhalb der Leiterplattenfertigung ist. Die im Projekt realisierten Wellenleiter weisen Dämpfungen von ca. 0,35 dB/cm auf. Neben der Entwicklung der Prozesstechnologie liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Materialentwicklung bzw. -optimierung [22].

Die Erfahrungen, die im Rahmen der Projektarbeiten gewonnen wurden, führen zu folgendem weiteren Handlungsbedarf:

- Die Verbesserung lithographischer Strukturierungsverfahren ist erforderlich, um die Dämpfung der Wellenleiter auf einen akzeptablen Wert zu reduzieren.
- Es sind neue Materialien zu entwickeln, bzw. existierende Materialien weiter zu entwickeln, um insbesondere den thermischen Anforderungen innerhalb des Leiterplattenherstellungsprozesses zu genügen.
- Eine Weiterentwicklung der gesamten Strukturierungstechnologie ist erforderlich, um mittelfristig Wellenleiterkreuzungen in einer optischen Lage realisieren zu können.
- Ein robustes Konzept für eine selbstjustierende Kopplung der aktiven Komponenten (optische Sender und Empfänger) an die Wellenleiter ist unbedingt erforderlich.

2.2.3 OptoSys: Optische Verbindungssysteme

Im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts "Optische Verbindungssysteme (OptoSys)" werden grundlegende Technologien für die Realisierung optischer Kurzstreckenverbindungen in Multimode-Technologie entwickelt [17]. Die wesentlichen Entwicklungsschwerpunkte der im April 1998 gestarteten Projekte sind eine rein optische Backplane für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt [28, 31, 32], elektrische Leiterplatten mit integrierten, massiv parallelen optischen Verbindungen für Computeranwendungen [8, 14, 27], VCSEL-basierte optische Sendemodule mit integrierten Treibern [38] sowie Photoempfängermodule in GaAs-Technologie mit integrierten Verstärkern [23]. Auch Konzepte zur passiv justierten Kopplung der elektrisch-optischen Wandler an planare Wellenleiter innerhalb von Leiterplatten und Backplanes sind Gegenstand der Entwicklungsarbeiten [16]. Neben diesen technologisch orientierten Arbeiten werden auch erste Ansätze zur Erweiterung des konventionellen Entwurfsprozesses in der Mikroelektronik und zur Modellierung optischer Multimode-Wellenleiter und aktiver Komponenten entwickelt [1, 10, 12, 15]. Bezüglich der grundlegenden Technologien für die Herstellung elektrisch-optischer Leiterplatten setzen die Arbeiten auf die Ergebnisse des Projekts *EOCB* [41] auf.

Auch im Rahmen der OptoSys-Projektarbeiten wurde weiterer dringender Handlungsbedarf identifiziert:

- Für den Einsatz elektrisch-optischer Leiterplatten in Produkten ist dringend die Entwicklung temperaturfester und — insbesondere hinsichtlich des thermischen Ausdehnungskoeffizienten — kompatibler Materialien erforderlich.
- Zur Ankopplung an die Wellenleiter sind standardisierte Koppelkonzepte erforderlich, die eine passiv-justierte und automatisierte Bestückung elektrisch-optischer Leiterplatten unterstützen.
- Mittelfristig ist die Erhöhung der Datenrate von derzeit 2,5 Gbit/s pro Kanal auf 10 Gbit/s pro Kanal erforderlich [26]. Dafür werden entsprechende kostengünstige (low-cost) Send- und Empfangskomponenten bzw. -module mit großflächigen Photoempfängern benötigt, um fokussierende und abbildende Mikrooptiken zu vermeiden. Ebenfalls kann die CWDM-Technologie¹ eingesetzt werden, woraus sich ein Entwicklungsbedarf für die entsprechenden Multiplex- und Demultiplexkomponenten für den Einsatz auf Leiterplatten und Backplanes ergibt.
- Eine Erhöhung der Funktionalität und Komplexität der optischen Ebene erfordert mittelfristig die optische Mehrlagigkeit. Demnach besteht dringender Bedarf zur Entwicklung des "optischen Durchsteigers". Darüber hinaus sind Wellenleiter-Kreuzungen mittelfristig erforderlich, um die erkennbare Systemkomplexität kostengünstig bewältigen zu können.
- Neben separaten optischen Send- und Empfangsmodulen ist insbesondere für Anwendungen im Bereich der Computertechnik die Integration der optischen Schnittstelle in die Standardkomponenten (ASIC, Memory, etc.) erforderlich. Die Verfügbarkeit des "optischen Pins" wird entscheidend sein für den industriellen Einsatz der optischen Verbindungstechnik in Produkten.

¹ Das CWDM-Verfahren (Coarse Wavelength Division Multiplex) ist ein Wellenlängen-Multiplexverfahren. Im Fall von Multimode-Übertragungsstrecken wird der gesamte Datenstrom auf vier Wellenlängen zwischen 780 nm und 860 nm aufgeteilt, wodurch auf jeder Wellenlänge 2,5 Gbit/s übertragen werden können. Bei dieser Technik, die eine Gesamtdatenrate von 10 Gbit/s ermöglicht, werden VCSEL als schmalbandige Emissionsquellen eingesetzt.

- Weiterhin sind passive optische Steckverbinder erforderlich, um Board-Backplane-Board-Verbindungen realisieren zu können. Hier werden an besondere Anforderungen an die Ankopplung gestellt, berücksichtigt man die beherrschbaren Toleranzen der Leiterplattentechnologie [26].
- Weiterer Handlungsbedarf besteht in der Entwicklung durchgängiger Simulations- und Entwurfswerkzeuge für Multimode-Verbindungen, die in die existierenden Entwurfs- und Simulationswerkzeuge für elektrische Komponenten und Systeme integriert werden können. Da sich das physikalische Verhalten optischer Verbindungen von dem Verhalten elektrischer Verbindungen gänzlich unterscheidet, sind für den Entwurf elektrisch-optischer Leiterplatten neue Entwurfsregel erforderlich, die nahezu ausschließlich anwendungsspezifisch sind.
- Neben den genannten Entwicklungsaufgaben besteht darüber hinaus ein großer Bedarf an Standardisierungsaktivitäten, um diese neue Technologie schnell, kostengünstig und verbreitet einsetzen zu können.

2.2.4 OptiCon: Industrielle Produktionstechnik für Baugruppen mit integrierten optischen Kurzstreckenverbindungen

Das Ziel des im Januar 2002 gestarteten Verbundprojekts OptiCon ist die Entwicklung kostengünstiger, industriell einsetzbarer Entwurfs- und Produktionsverfahren für die breite industrielle Anwendung der elektrisch-optischen Aufbau- und Verbindungstechnik auf Leiterplatten bzw. Baugruppen [4]. Aus Kosten- und Akzeptanzgründen steht dabei die Forderung nach Kompatibilität mit den existierenden konventionellen Entwurfs- und Fertigungsverfahren im Vordergrund. Die im Projekt erarbeiteten Lösungen zielen zunächst auf Anwendungen mit hohem Datenratenbedarf ($> 2,5 \text{ Gbit/s}$) im Bereich der Telekommunikation, jedoch werden durch möglichst allgemeine Lösungsansätze auch andere Anwendungsbereiche adressiert. Sämtliche Arbeiten bauen auf die in den F&E-Projekten EOCB [41], OptoSys [17] und MOES [22] erarbeiteten Ergebnisse auf und sollen diese in industriell einsetzbare Lösungen überführen. Die Arbeiten decken die wesentlichen Teile *Entwurf* und *Fertigung* der gesamten Prozesskette einer Produktentwicklung ab, welche von der Produktidee über Spezifikation, Entwurf, Prototyping und Test bis zur Fertigung reicht [4].

Die im Verlauf der Projektarbeiten gesammelten Erfahrungen zeigen deutlich den folgenden Handlungsbedarf auf:

- Umfangreiche Versuche im Rahmen des Projekts haben gezeigt, dass ein ideales Material für die Realisierung elektrisch-optischer Leiterplatten derzeit nicht vorhanden ist [5]. Aus diesem Grund sind durch entsprechende Materialentwicklungen temperaturstabile und prozessierbare Materialien bereitzustellen, die darüber hinaus die Herstellung optischer Lagen mit integrierten Wellenleitern mit hinreichend niedriger Dämpfung garantieren. Mit der Eigenschaft *Temperaturstabilität* ist neben der Stabilität — insbesondere der optischen Eigenschaften — gegenüber der thermischen Belastung während des Laminierungs- und Lötprozesses ein entsprechend geringer, an die anderen Leiterplattenmaterialien angepasster thermischer Ausdehnungskoeffizient zu verstehen. Eine Lösung zeichnet sich ggf. durch die Entwicklung transparenter Duroplaste mit hoher Glasübergangstemperatur² und niedrigem Ausdehnungskoeffizient ab [5].

² Mit dem Begriff Glasübergangstemperatur (T_G) wird diejenige Temperatur bezeichnet, bei der amorphe oder teilkristalline Polymere vom flüssigen in den festen Zustand übergehen. Dabei tritt eine schlagartige Änderung der physikalischen Kenngrößen, wie z. B. Härte und Elastizität ein. Unterhalb der spezifischen T_G ist ein Polymer glasartig und hart, beim Überschreiten der T_G geht es in einen weichen, amorphen Zustand über.

- Der Entwicklungsstand zur Herstellung von Wellenleitern zeigt deutlich auf, dass noch signifikanter Aufwand in die Bereitstellung stabiler Herstellungsprozesse, die zu reproduzierbaren Ergebnissen führen, investiert werden muss.
- Die Bereiche *Simulation*, *Entwurf* und *Entwurfsregeln* für die optische Verbindungstechnik müssen durch entsprechende Entwicklungsaktivitäten deutlich verstärkt werden. Gegenwärtig sind keine Simulations- und Entwurfswerkzeuge bekannt. Auch existieren keine Designvorgaben für passive Wellenleiterstrukturen (Verzweigungen, Bögen, etc.).
- Die optische Schnittstelle zwischen den optischen Sende- und Empfangskomponenten und den Wellenleitern muss derart weiterentwickelt werden, dass ein standardisierter *optischer Pin* bereitgestellt werden kann, um den nahezu jede mikroelektronische Komponente erweitert werden kann.

3 Zusammenfassung

Die Zusammenfassung aller Anforderungen führt zu dem folgenden Handlungsbedarf:

- Entwicklung von Materialien mit verbesserten Eigenschaften hinsichtlich Temperaturfestigkeit, Feuchtestabilität und thermischer Ausdehnung.
- Optimierung der Herstellungsprozesse, um serientaugliche Ergebnisse erzielen zu können, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Prozessentwicklung bzw. -optimierung in sehr enger Zusammenarbeit mit der Materialentwicklung durchgeführt werden muss.
- Entwicklung eines kostengünstigen, robusten, standardisierten Koppelkonzepts für parallele und einzelne Verbindungen, welches in mikroelektronische Komponenten integrierbar ist,
- Entwicklung von Komponenten zur Realisierung von Datenraten von 10 Gbit/s und höher,
- Entwicklung kostengünstiger Wandlerkomponenten mit niedriger Latenzzeit für Computeranwendungen, wobei durch die Integration der Wandlerelemente in mikroelektronische Komponenten (ASIC, Memory, etc.) die Gesamtlatenz weiter reduziert werden kann.
- Entwicklung von durchgängigen Simulations- und Entwurfswerkzeugen sowie Entwurfsregeln für optische Multimode-Verbindungen.
- Um das gesamte Potential der optischen Verbindungstechnik vollständig nutzen zu können, sind neue, entsprechend angepasste Systemarchitekturen zu entwickeln.
- Steigerung der optischen Funktionalität durch die Entwicklung bidirektionaler Verbindungskonzepte, optischer Mehrlagigkeit und die Entwicklung von Konzepten zur Realisierung von Wellenleiterkreuzungen innerhalb einer Lage.
- Entwicklung kostengünstiger, optischer Steckverbindersysteme mit niedriger Dämpfung für Board-Backplane-, Faser-Board- und Faser-Faser-Verbindungen.

Bei den zukünftigen Entwicklungsarbeiten ist zu berücksichtigen, dass es ausgehend von dem jetzigen Erfahrungs- und Wissensstand keine allumfassende Lösung geben kann, die in allen

Anwendungsbereichen genutzt werden kann. Dieses bedeutet, dass anwendungsspezifische Entwicklungen erforderlich sind, die auf unterschiedlichen, den jeweiligen Anforderungen Rechnung tragenden Entwurfs- und Herstellungsverfahren basieren und damit auch zu unterschiedlichen Lösungen führen können. Dieses bedeutet z. B., dass neben auf Wellenleitern basierenden Verbindungstechniken auch Freistrahübertragungsstrecken zu speziellen Lösungen führen können.

Literatur

- [1] Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, E. Griesse, G. Mrozynski: Ray Tracing Technique and its Verification for the Analysis of Highly Multimode Optical Waveguides with Rough Surfaces. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 5, Part 1, S. 3307–3310, September 2001.
- [2] Th. Bierhoff, A. Wallrabenstein, A. Himmler, E. Griesse, G. Mrozynski: Ansätze zur numerischen Simulation optischer Multimode-Verbindungen. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 79–87, Paderborn, November 2001.
- [3] R. T. Chen, L. Wu, F. Li, S. Tang, M. Dubinovsky, J. Qi, C. L. Schow, J. C. Campbell, R. Wickman, B. Picor, M. Hibbs-Brenner, J. Bristow, Y. S. Liu, S. Rattan, C. Noddings: Si CMOS Process Compatible Guided-wave Multi-GBit/sec Optical Clock Signal Distribution System for Cray T-90 Supercomputer. *Proc. 4th Int. Conference on Massively Parallel Processing Using Optical Interconnections (MPPOI '97)*, S. 10–24, Montreal (Canada), June 1997.
- [4] P. Demmer: Industrielle Produktionstechnik für Baugruppen mit integrierten optischen Kurzstreckenverbindungen — OptiCon. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 49–54, Paderborn, November 2001.
- [5] P. Demmer: Anforderungen an neu Materialien für optische Verbindungen in elektrisch-optischen Baugruppen. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 149–151, Paderborn, November 2001.
- [6] S. J. Fancey, J. Jahns, P. Lukowicz, J. Grzyb: Low Latency Optoelectronic Processor-Memory Interconnection Demonstrator. *M. R. Taghizadeh, H. Thienpont, G. E. Jabbour (Eds.): Micro- and Nano-optics for Optical Interconnection and Information Processing, Proceedings of SPIE Vol. 4455*, 2001.
- [7] E. Griesse, A. Himmler: Optical Interconnections on High Speed Digital Printed Circuit Boards. *Proceedings of PIERS 1997 Progress in Electromagnetics Research Symposium*, S. 697. Cambridge/MA (USA), 1997.
- [8] E. Griesse: Reducing EMC Problems through an Electrical/Optical Interconnection Technology. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 41, No. 4, Part 2, S. 502–509, November 1999.
- [9] E. Griesse, D. Krabe, E. Strake: Electrical-Optical Printed Circuit Boards: Technology – Design – Modeling. *H. Grabinski (Ed.): Interconnects in VLSI Design*, S. 221–236. Kluwer Publisher, Boston (USA), 2000.
- [10] E. Griesse, A. Himmler, J. Schrage: An Approach to Model Optical Multimode Interconnects for Time Domain Simulation. *Optics in Computing 2000, SPIE Vol. 4089*, S. 958–968. Bellington/Washington (USA), 2000.
- [11] E. Griesse: An Optical Interconnection Technology for Multilayer Printed Circuit Boards. *Proceedings of the 13th IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2000)*, S. 230–231. Rio Grande/Puerto Rico (USA), November 2000.
- [12] E. Griesse: Modeling of Optical Intra-Board Interconnects for Time Domain Simulation. *Proceedings (Supplement) of 14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, S. 147–154. Zurich (Switzerland), 2001.

- [13] E. Griese: Elektrisch-optische Aufbau- und Verbindungstechnik für Computersysteme. *Tutorial 10: Neue Aufbau- und Verbindungstechniken — Optik / HDI —, SMT/Hybrid/Packaging*, Nürnberg, 24.–26. April 2001.
- [14] E. Griese: A High-Performance Hybrid Electrical-Optical Interconnection Technology for High-Speed Electronic Systems. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 24, No. 3, S. 375–383, August 2001.
- [15] E. Griese, J. Schrage, J. Gerling, G. Mroczynski: Time Domain Simulation of Optical Multimode Chip-to-Chip Interconnects. *M. R. Taghizadeh, H. Thienpont, G. E. Jabbour (Eds.): Micro- and Nano-optics for Optical Interconnection and Information Processing, Proceedings of SPIE Vol. 4455*, S. 131–142, 2001.
- [16] E. Griese, A. Himmler, K. Klimke, A. Koske, J. R. Kropp, S. Lehmacher, A. Neyer, W. Süllau: Self-Aligned Coupling of Optical Transmitter and Receiver Modules to Board-Integrated Optical Multimode Waveguides. *M. R. Taghizadeh, H. Thienpont, G. E. Jabbour (Eds.): Micro- and Nano-optics for Optical Interconnection and Information Processing, Proceedings of SPIE Vol. 4455*, S. 234–250, 2001.
- [17] E. Griese, J.-R. Kropp, J. Moisel, W. Süllau: Projekte zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts OptoSys. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 27–40, Paderborn, November 2001.
- [18] A. Himmler, S. Bargiel, F. Ebling, H. Franke, E. Griese, C. Lehnberger, L. Oberender, G. Mroczynski, H. Schröder, G. Spickermann, D. Steck, E. Strake, W. Süllau: Electrical-Optical Circuit Boards with Four Channel Butt-Coupled Optical Transmitter and Receiver Modules. *M. R. Taghizadeh, H. Thienpont, G. E. Jabbour (Eds.): Micro- and Nano-optics for Optical Interconnection and Information Processing, Proceedings of SPIE Vol. 4455*, S. 221–230, 2001.
- [19] A. Himmler, E. Griese, G. Spickermann, H. Franke, W. Süllau, H. Schröder, E. Strake: Elektrisch-optische Leiterplatten: Komponenten, Koppelverfahren und Demonstratoren. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 89–102, Paderborn, November 2001.
- [20] A. Himmler: Optische Verbindungstechnik in Computersystemen der nächsten Generation. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 111–131, Paderborn, November 2001.
- [21] Semiconductor Industry Association: *International Technology Roadmap for Semiconductors, 1999 Edition and 2000 Update*, San Jose/CA (USA), 2000.
- [22] M. Kowatsch, R. Schulz, E. Klusmann, W. Scheel, H. Schröder, J. Bauer, K. Gerdorn, G. Röhrs, H. Kühn, K. Pfeiffer, C. Modes, H. Park, J. Kostelnik: Modularer Optisch-Elektrischer Schaltungsträger (MOES). *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 41–47, Paderborn, November 2001.
- [23] M. Lang, W. Brenner, W. Benz, M. Ludwig, V. Hurm, G. Kaufel, A. Leuther, J. Rosenzweig, M. Schlechtweg: Complete Monolithic Integrated 2.5 Gbit/s Optoelectronic Receiver with Large Area MSM Photodiode for 850 nm Wavelength. *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 20, S. 1247–1249, September 2001.
- [24] D. Krabe, W. Scheel: Optical Interconnects by Hot Embossing for Module and PCB Technology — The EOCB Approach —. *Proc. 49th Electronics Components & Technology Conf.*, S. 1164–1166, San Diego/California, (USA), June 1999.
- [25] D. Krabe, F. Ebling, N. Arndt-Staufenbiel, G. Lang, W. Scheel: New Technology for Electrical/Optical System on Module and Board Level: The EOCB Approach. *Proc. 50th Electronics Components & Technology Conference*, S. 970–974, Las Vegas/Nevada (USA), May 2000.

- [26] J.-R. Kropp: Schnelle elektro-optische Wandlerkomponenten und -module für optische Kurzstreckenverbindungen. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 141–148, Paderborn, November 2001.
- [27] S. Lehmacher, A. Neyer: Integration of Polymer Optical Waveguides into Printed Circuit Boards. *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 12, S. 1052–1053, June 2000.
- [28] B. Lunitz, J. Guttman, H.-P. Huber, J. Moisel, M. Rode: Experimental Demonstration of 2.5Gbps Transmission with 1m Polymer Optical Backplane. *Electronics Letters*, Vol. 37, Nr. 17, S. 1079, September 2001.
- [29] D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, Academic Press, San Diego/CA (USA), 1991.
- [30] F. Mederer, R. Jäger, H. J. Unold, R. Michalzik, K. J. Ebeling, S. Lehmacher, A. Neyer, E. Griesse: 3-Gb/s Data Transmission With GaAs VCSELs Over PCB Integrated Polymer Waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, No. 9, S. 1032–1034, September 2001.
- [31] J. Moisel, R. Bogenberger, J. Guttman, H.-P. Huber, O. Krumpholz, K.-P. Kuhn, M. Rode: Optical Backplanes with Integrated Polymer Waveguides. *Optical Engineering*, Vol. 39, No. 3, S. 673–679, March 2000.
- [32] J. Moisel, J. Guttman, H.-P. Huber, O. Krumpholz, M. Rode: Optical Backplanes utilizing Multimode Polymer Waveguides. *Optics in Computing 2000, SPIE Vol. 4089*, S. 72–79. Bellington/Washington (USA), 2000.
- [33] J. Moisel: An Optical Backplane for Avionic Applications using Polymer Multimode Waveguides. *Proceedings of 13th IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2000)*, S. 567–568. Rio Grande/Puerto Rico (USA), November 2000.
- [34] R. Pusch: Optische Verbindungstechnik in Systemen für die Telekommunikation. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 133–140, Paderborn, November 2001.
- [35] B. Robertson: Design of a Compact Alignment Tolerant Optical Interconnect for Photonic Backplane Applications. *Proc. 4th Int. Conference on Massively Parallel Processing Using Optical Interconnections (MPPOI '97)*, S. 68–77, Montreal (Canada), June 1997.
- [36] W. Scheel: Von der elektrischen zur optischen Aufbau- und Verbindungstechnik. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 1–11, Paderborn, November 2001.
- [37] P. Scheer, T. Collette, P. Churoux: Free-Space Optical Interconnections within SIMD Massively Parallel Computers. *Proc. 4th Int. Conference on Massively Parallel Processing Using Optical Interconnections (MPPOI '97)*, S. 167–177, Montreal (Canada), June 1997.
- [38] I. Schmale, M. Heinemann, K. Drögemüller, D. Kuhl, J. Blank, M. Ehlert, T. Kraeker, J. Höhn, D. Klix, V. Plickert, L. Melchior, P. Hildebrandt, L. Leininger, E. Dröge, J.-R. Kropp, H.-D. Wolf, T. Wipiejewski, R. Johnson: High-Speed 12×2.5 Gbit/s Parallel Optical Links (PAROLI) for Increased Transmission Lengths. *Proceedings of 26th European Conference on Optical Communication (ECOC 2000)*, Vol. 3, S. 231–232, Munich (Germany), September 2000.
- [39] H. Schröder, J. Bauer, F. Ebling: Optische Multimode-Wellenleiter für Leiterplatten. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 55–61, Paderborn, November 2001.
- [40] H. Schröder, E. Strake: Messmethoden und Charakterisierung optischer Multimode-Verbindungen auf EOCB. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 71–78, Paderborn, November 2001.

- [41] E. Strake: Electrical / Optical Circuit Board. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 13–26, Paderborn, November 2001.
- [42] E. Strake: Elektrisch / Optische Leiterplatten? Erfordernisse und Anwendungspotentiale in Fahrzeugen. *Tagungsband zum Seminar "BMBF-Projekte zu elektrisch-optischen Leiterplatten"*, S. 103–110, Paderborn, November 2001.
- [43] T. H. Szymanski, H. S. Hinton: Reconfigurable Intelligent Optical Backplane for Parallel Computing and Communications. *Applied Optics*, Vol. 35, S. 1253–1268, 1996.
- [44] Q. Tan, J. Vandewege: 2.5 Gbit/s/mm Optical Fiber Interconnections. *Proceedings of 22th European Conference on Optical Communication (ECOC) 1996*, S. 2.55–2.58, Oslo (Norway), September 1996.
- [45] H. Van Marck, J. Van Campenhout: Three-dimensional Optoelectronic Architectures for Massively Parallel Processing Systems. *Proc. 4th Int. Conference on Massively Parallel Processing Using Optical Interconnections (MPPOI '97)*, S. 178–182, Montreal (Canada), June 1997.
- [46] A. Wallrabenstein, Th. Bierhoff, A. Himmler, E. Griese, G. Mroczynski: Modeling of Optical Interconnections for Data Transmission within High-Speed Electronic Systems. *H. Grabinski (Ed.): Interconnects in VLSI Design*, S. 181–194. Kluwer Publisher, Boston (USA), 2000.
- [47] T. Yoshikawa, H. Matsuoka, T. Yokota, and J. Shimada: Parallel Optical Interconnection for Massively Parallel Processor RWC-1. *Proc. 4th Int. Conference on Massively Parallel Processing Using Optical Interconnections (MPPOI '97)*, S. 4–9, Montreal (Canada), June 1997.

ISBN 3-00-008796-6