

## ANFORDERUNGEN UND LÖSUNGEN ZUR HOCHPRÄZISEN OPTOELEKTRONISCHEN UND MIKROOPTISCHEN MONTAGE AUF BAUGRUPPENTRÄGERN

Dr. Henning Schröder, Fraunhofer IZM, Berlin Dr. Thomas Bierhoff, Siemens IT Solutions and Services GmbH, Paderborn Daniel Craiovan, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl FAPS

# **C-LAB** Report

Vol. 9 (2010) No. 06

Cooperative Computing & Communication Laboratory

ISSN 1619-7879

C-LAB ist eine Kooperation der Universität Paderborn und der Siemens IT Solutions and Services GmbH www.c-lab.de info@c-lab.de



## **C-LAB Report**

#### Herausgegeben von Published by

#### Dr. Wolfgang Kern, Siemens IT Solutions and Services GmbH Prof. Dr. Franz-Josef Rammig, Universität Paderborn

Das C-LAB - Cooperative Computing & Communication Laboratory - leistet Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und gewährleistet deren Transfer an den Markt. Es wurde 1985 von den Partnern Nixdorf Computer AG (nun Siemens IT Solutions and Services GmbH) und der Universität Paderborn im Einvernehmen mit dem Land Nordrhein-Westfalen gegründet.

Die Vision, die dem C-LAB zugrunde liegt, geht davon aus, dass die gewaltigen Herausforderungen beim Übergang in die kommende Informationsgesellschaft nur durch globale Kooperation und in tiefer Verzahnung von Theorie und Praxis gelöst werden können. Im C-LAB arbeiten deshalb Mitarbeiter von Hochschule und Industrie unter einem Dach in einer gemeinsamen Organisation an gemeinsamen Projekten mit internationalen Partnern eng zusammen.

C-LAB - the Cooperative Computing & Cooperation Laboratory - works in the area of research and development and safeguards its transfer into the market. It was founded in 1985 by Nixdorf Computer AG (now Siemens IT Solutions and Services GmbH) and the University of Paderborn under the auspices of the State of North-Rhine Westphalia.

C-LAB's vision is based on the fundamental premise that the gargantuan challenges thrown up by the transition to a future information society can only be met through global cooperation and deep interworking of theory and practice. This is why, under one roof, staff from the university and from industry cooperate closely on joint projects within a common research and development organization together with international partners. In doing so, C-LAB concentrates on those innovative subject areas in which cooperation is expected to bear particular fruit for the partners and their general well-being.

#### **ISSN 1619-7879**

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

© Siemens IT Solutions and Services GmbH und Universität Paderborn 2010 Alle Rechte sind vorbehalten. Insbesondere ist die Übernahme in maschinenlesbare Form sowie das Speichern in Informationssystemen, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Siemens IT Solutions and Services GmbH und der Universität Paderborn gestattet.

All rights reserved.

In particular, the content of this document or extracts thereof are only permitted to be transferred into machinereadable form and stored in information systems when written consent has been obtained from Siemens IT Solutions and Services GmbH and the University of Paderbor



# Inhalt

Einleitung	4
Grundlagen	5
Grundbegriffe der optischen Datenübertragung	5
Aufbaukonzepte für optische Kopplungen	6
Anforderungen und Montagetoleranzen der optischen Kopplung	7
Passive oder Aktive Montage	.14
Hochpräzise e/o-Modul Assemblierung auf dem Board	.18
Aufbau der elektrooptischen Komponenten	.18
Mikrooptik-Justage im Modul zwischen VCSEL bzw. Photodiode und Wellenleiter	.24
Modulkonzepte	.24
VCSEL und Photodioden	.25
Konstruktion der Transceiver-Module	.25
Design und Herstellung von optischen Koppelelementen	.27
Entwurf und Simulation	.31
Strahlenoptische Simulationstechnik	.32
Entwurf- und Simulationswerzeuge	.33
Exemplarische Simulationsergebnisse und Validierung	.34
Praxisbeispiel Optischer Steckverbinder zwischen Board und Backplane	.38
Koppelkonzept – FlexTail	.38
Projektergebnisse	.38
Literaturverzeichnis	.42



# EINLEITUNG

Um den wachsenden Anforderungen bzgl. Übertragungsbandbreite, Kanaldichte und niedriger Leistungsaufnahme innerhalb von informationsverarbeitenden Systemen nachzukommen, werden zunehmend optische Verbindungstechniken eingesetzt. Der Trend wird durch integrierte und mittels planarer Strukturierungsverfahren hergestellte Wellenleiterlaminate bestimmt, die in den Leiterplattenverbund verpresst werden. Eine Vielzahl von Polymermaterialien wurde für diese Laminate entwickelt [1]. Die daraus entstehenden Wellenleiter sind stets multimodale Stufenindexwellenleiter mit Kerndimensionen im Bereich 30...70 µm. Neuerdings werden auch Laminate auf Dünnglasbasis entwickelt [2], [3], in denen durch Ionenaustausch Gradientenindexwellenleiter erzeugt werden. Für die optische Ankopplung der elektro-optischen Sender- und Empfängermodule stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Die direkte Ein- und Auskopplung, welche die Montage der VCSEL und Photodioden direkt vor die Stirnseite der Wellenleiter und somit ihre Einbettung in die Leiterplatte erfordert, dafür aber keine optische Umlenkung benötigt oder die Montage auf der Oberfläche der Leiterplatte, wodurch eine Umlenkung des Lichtes erforderlich wird. Darüber hinaus sind optische Koppelstellen innerhalb der elektro-optischen Module selbst als auch in den Steckverbindern zwischen Board und Backplane erforderlich. Die Anforderungen an die Präzision bei der Fertigung und Bestückung von elektro-optischen Baugruppenträgern sind deutlich höher, als durch herkömmliche Technologien realisierbar.



ABBILDUNG 1: DIE DREI OPTISCHEN UND ELEKTRO-OPTISCHEN SCHNITTSTELLEN IN EOCB

Für die Gestaltung der in Abbildung 1 dargestellten optischen Schnittstellen sind neue Ansätze notwendig, um eine optisch dämpfungsarme und zuverlässige Aufbau- und Verbindungstechnik sicher zu stellen. Hierfür sind sowohl neue Simulations- und Designwerkzeuge entwickelt worden als auch Neuerungen in der Gerätetechnik. Es werden grundlegende Herangehensweisen zum Design solcher Schnittstellen und Fertigungstechnik erläutert, wobei die Gliederung entsprechend der in Abbildung 1 gezeigten Teile erfolgt. (Teile 1,2,3 beziehen sich auf die jeweiligen Überschriften im folgenden Text der Tutorialunterlagen) Praxisbeispiele aus der industriellen Entwicklung der Firmen Siemens, Erni Electronic, IBM, Tyco Electronics und Variooptics werden darin vorgestellt.



## GRUNDLAGEN

#### GRUNDBEGRIFFE DER OPTISCHEN DATENÜBERTRAGUNG

Für optische Datenübertragung auf Leiterplattenebene werden elektrooptische Leiterplatten (EOCB) eingesetzt. Die EOCB als Basis einer elektrooptischen Flachbaugruppe verfügt, neben den verschiedenen Kupferlagen einer herkömmlichen Leiterplatte, über eine integrierte optische Lage. Dieser einlaminierte Lichtwellenleiter ist über Koppelstellen von außen optisch zugänglich und ermöglicht das Ein- und Auskoppeln des Lichtsignals. Um die spezifischen Anforderungen und Lösungen für optische Mikromontage zu verstehen werden im Folgenden zunächst die wichtigsten Grundbegriffe der optischen Datenübertragung erläutert.

#### LICHTFÜHRUNG UND TOTALREFLEXTION

Ein homogener Lichtwellenleiter besteht aus einem transparenten, optisch dichteren Kern sowie einem transparenten, optisch dünneren Mantel. Die optische Dichte wird dabei durch die Brechzahl des Materials definiert. Die Übertragung von Licht in homogenen lichtführenden Wellenleitern beruht auf der Physik der Totalreflexion. Dabei wird das Licht im Kernmaterial entlang des Wellenleiters geführt. In einem homogenen Kernmaterial breitet sich ein Lichtstrahl solange geradlinig aus, bis er auf eine Grenzfläche des Kerns auftrifft. Dann wird er in Abhängigkeit seines Einfallswinkels und des Brechzahlkontrastes des Materialüberganges teiloder totalreflektiert. Bei der Totalreflexion wird die gesamte einfallende Leistung entsprechend des Snellius Gesetzes in den Kern zurück reflektiert, wodurch der Lichtstrahl seine Ausbreitungsrichtung ändert, seine Leistung aber beibehält. Durch fortgesetzte Totalreflexion wird eine Lichtführung im Kern des Wellenleiters erreicht.

#### NUMERISCHE APERTUR

Der Akzeptanzwinkel ist der größtmögliche zulässige Einkopplungswinkel, um einen Lichtstrahl von außen in den Kernbereich des Lichtwellenleiters einzukoppeln. Dabei hängt der Akzeptanzwinkel lediglich von den Brechzahlen des Kerns  $n_1$  und des Mantels  $n_2$  ab und ist von den geometrischen Eigenschaften des Wellenleiters unabhängig. Die numerische Apertur ist ein Maß für die Fähigkeit eines optischen Elementes, Licht zu fokussieren und kennzeichnet den größtmöglichen Winkel bezogen auf die Lichtwellenleiterachse unter dem ein Lichtstrahl in den Wellenleiter eingekoppelt und anschließend geführt werden kann. Strahlen mit einem größeren Eintrittswinkel können nicht mehr geführt werden, so dass diese Strahlen als Einkoppelverluste verloren gehen. Die numerische Apertur  $A_N$  ist somit für die Lichtkopplung in einen Lichtwellenleiter von entscheidender Bedeutung.

#### Singlemode- und MuiltimodeWellenleiter mit Stufen- und Gradientenindex

Die in den Lichtwellenleiter eingekoppelten Lichtstrahlen (strahlenoptische Näherung) verlaufen prinzipiell in einer Zickzack-Bewegung, wobei abhängig von der Wellenlänge und den geometrischen Faserabmessungen eine gegenseitige Auslöschung (Interferenz) nur eine bestimmte Anzahl von Lichtstrahlen (Moden in der wellenoptischen Beschreibung) ausbreitungsfähig sind. Da diese Moden unterschiedliche Wegstrecken zurücklegen, kommen diese nicht zur gleichen Zeit am Ende des Wellenleiters an, so dass es zu einer Impulsverbreiterung am Ausgang kommt. Diese Laufzeitverzögerung wird als



"Modendispersion" bezeichnet und ist ein entscheidender Faktor für die übertragbare Bandreite. Abhängig von der Strahlausbreitung unterscheidet man zwischen Multimodewellenleitern mit Stufenprofil, Multimodewellenleitern mit Gradientenprofil und Monomodewellenleitern mit Stufenprofil.

Die Multimodefaser mit Stufenprofil besteht aus einem Kern von 50 bis zu 200 µm Durchmesser und einem Mantel von 100 bis 250 µm Durchmesser. Bei Stufenindexfasern wir der Strahl zwischen Kern und Mantel wegen eines scharfen Übergangs der Brechungsindizes hart reflektiert (Zickzack-Bewegung). Der Vorteil der Multimodefaser mit Stufenprofil liegt in den vergleichsweise niedrigen Herstellungskosten und den höheren Montagetoleranzen auf Grund des großen Kerndurchmessers. Nachteilig zeigt sich die begrenzte Bandbreite auf Grund der hohen Modendispersion.

Stellt man Fasern so her, dass die Brechzahl des Kerns nach außen hin abnimmt, werden die Lichtstrahlen zum Kern hin immer stärker reflektiert, so dass es zu einer weichen Reflektion kommt. Anstelle der Zickzack-Bewegung stellt sich eine wellenförmige Lichtausbreitung ein. Je weiter außen ein Strahl verläuft, umso schneller breitet er sich wegen des kleineren Brechungskoeffizienten aus. Auf Grund dieses Unterschieds der Ausbreitungsgeschwindigkeit gelingt es Laufzeitunterschiede auszugleichen und die Bandbreite von Multimode-Gradientenfasern um das 20- bis 50-fache zu vergrößern. Nachteilig zeigen sich jedoch auf Grund der reduzierten ausbreitungsfähigen Moden die höheren Einkopplungsverluste.

Monomodefasern besitzen einen sehr kleinen Durchmesser von etwa 3 bis 9 µm. Der Durchmesser des Faserkerns ist im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts so klein, dass nur noch eine Mode eingekoppelt und übertragen werden kann. Durch die Monomodeausbreitung fällt somit eine Impulsverbreiterung durch die Wellenlängendispersion völlig weg, so dass sehr hohe Bandbreiten übertragbar sind. Durch den kleinen Kerndurchmesser werden jedoch sehr hohe Forderungen an die Herstellungsverfahren und Montage- bzw. Verbindungstechnik gestellt.

## Bewertung der Fasertypen für die elektrooptische Leiterplatte hinsichtlich der Montage

Für den Aufbau elektrooptischer Leiterplatten werden vorwiegend Multimode-Stufenindexfasern verwendet. Ein Grund hierfür ist die relativ großen Montagetoleranz von ca. 10 bis 50  $\mu$ m für die Positionierung der Sender- und Empfängerbauelemente bezüglich des optischen Strahlengangs. Die nachteilige Modendispersion ist auf Grund der relativ kurzen Übertragungsstrecken (< 1 m) auf Leiterplattenebene nur von geringer Bedeutung, so dass bei typtischen Kerndurchmessern von ca. 50 bis 70  $\mu$ m eine verhältnismäßig große Koppelfläche zur Verfügung steht. Somit lässt sich durch Anlagenerweiterungen und Prozessmodifikationen das Montageproblem lösen.

## AUFBAUKONZEPTE FÜR OPTISCHE KOPPLUNGEN

Für die Übertragung von Licht bedarf es einer Ankopplung des Senders und des Empfängers an das zur Lichtübertragung genutzte Medium. Im Gegensatz zur elektrischen oder auch kabellosen Datenübertragung kommt dem Mechanismus zur Ein- bzw. Auskopplung des Lichtes in den Lichtwellenleiter eine besondere Bedeutung zu. Für eine dämpfungsarme Übertragung zeigt sich insbesondere die Koppelstelle als kritisch und bietet hohes Optimierungspotential. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Konzepte zur Lichtkopplung in eingebettete Lichtwellenleiter konzipiert und erforscht. Nachfolgend werden zunächst die verschiedenen Koppelkonzepte nach



ihrem Wirkprinzip klassifiziert dargestellt. Die Kopplung des Lichtes in den bzw. aus dem optischen Wellenleiter kann grundsätzlich in zwei Kategorien aufgeteilt werden: direkte und indirekte Stirnflächenkopplung. Für die Vielzahl der aktuell bestehenden Koppelkonzepte ist diese Klassifizierung jedoch nicht mehr ausreichend, so dass nachfolgend die Klassifizierung auf insgesamt vier wesentliche Merkmale, wie in Abbildung 2 dargestellt, erweitert wird. Grundsätzlich ist zwischen der direkten Lichtführung ohne Ablenkung und einer Umlenkung um mindestens 90° für die Lichtkopplung zu unterscheiden. Des Weiteren ist zwischen der direkten und der indirekten Kopplung zu differenzieren. Bei der direkten Kopplung wird das emittierte Licht des Senders direkt, d. h. ohne zusätzliche Optiken, in den Lichtwellenleiter geführt. Die indirekte Kopplung hingegen macht von Optiken wie Linsen oder Prismen gebrauch, um das Licht entweder zu fokussieren oder es umzulenken. Eine Kombination aus beidem ist ebenso mittels parabolischen Spiegeln möglich. Ferner können diese zusätzlichen optischen Komponenten entweder diskret oder integriert aufgebaut sein. Integrierte Kopplelemente werden durch Modifikation des Lichtwellenleiters selbst erzeugt.



#### ABBILDUNG 2: KLASSIFIZIERUNG DER KOPPELPRINZIPIEN

So kann beispielsweise mit einem im 45° geformten Lichtwellenleiterende Totalreflektion erreicht werden. Basierend auf dem Beugungseffekt kann des Weiteren ein Beugungsgitter im Lichtwellenleiter eingebracht werden, an dem das Licht so stark gebeugt wird, dass der Akzeptanzwinkel erreicht wird und sich das Licht im LWL ausbreitet. Diskret aufgebaute Koppelelemente sind zusätzliche Komponenten, wie z. B. Spiegel und Prismen. Ein weiteres Merkmal stellt die Platzierung des Bauelementes dar. Die Integration von Bauelementen in die Leiterplatte bekommt eine immer höhere Bedeutung. Daher ist des Weiteren zwischen der Montage von Bauelementen auf der Leiterplattenoberseite und der Integration der elektrooptischen Wandler in die Leiterplatte selbst, zu unterschieden.

#### ANFORDERUNGEN UND MONTAGETOLERANZEN DER OPTISCHEN KOPPLUNG

Die grundlegende Anforderung an den emittierenden Laserstrahl ist die gute Einkopplung des optischen Signals in den Lichtwellenleiter. Hierbei ist die Verlustleistung bei der Signalübertragung möglichst gering zu halten. Die Verlustleistung ist direkt von der Position der maximalen Lichtintensität in der Koppelebene abhängig. Abbildung 3 zeigt die sender- und empfängerseitigen Koppelfprofile für die Ein- bzw. Auskopplung des Lichts in eine quadratische 70 x 70  $\mu$ m Faser mittels integrierter 90°-Umlenkung. Für eine maximale Koppeldämpfung von 3 dB ist senderseitig ein Versatz von 20  $\mu$ m und empfängerseitig ein Versatz von bis zu 200  $\mu$ m zulässig. Weitere Einflussfaktoren auf eine gute Einkopplung werden im Folgenden anhand des Aufbaus eines gehäusten Senderbauelementes erläutert.



#### AUFBAU DES SENDERBAUELEMENTES

In der optischen Nachrichtentechnik kommen praktisch ausschließlich Halbleitersendedioden zum Einsatz. Die Hauptgründe hierfür sind im Wesentlichen die sehr kleine Bauform, die schnelle Schaltzeit bzw. gute Modulationseigenschaften im GHz-Bereich, Verfügbarkeit in nahezu beliebigen Wellenlängen, spektral eng begrenzte Lichtemission, kleiner Abstrahlwinkel, kleine abstrahlende Fläche, hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Vier verschiedene Typen von Halbleiterdioden bestimmen derzeit die Lichtwellenleiter geführte Datenübertragung: Lumineszenzdioden (LEDs), Resonant Cavity LEDs (RC-LEDs), Laserdioden (LD) und Vertical-Cavity-Surface-Emitting-Laser (VCSEL).



ABBILDUNG 3: Senderseitige und empfängerseitige Kopplung in Abhängigkeit der Bestückposition

LEDs sind für nahezu alle Wellenlängenbereiche verfügbar. Sie strahlen großflächig, sind einfach zu betreiben und preisgünstig. Aufgrund der großen Strahlfläche ist die Ausgangsleistung aber nur langsam modulierbar. RC\_LEDs besitzen zusätzlich über und unter der lichterzeugenden Schicht zwei Halbleiterspiegel. Durch diese spezielle Bauweise werden höhere Übertragungsgeschwindigkeiten und eine bessere Einkopplung gewährleistet. LDs in Form von Kantenemittern strahlen Licht gebündelt von der Seite ab. Nachteilig zeigt sich die notwendige Stromregelung auf Grund des benötigten Mindeststromes, welcher wiederum temperaturabhängig ist. VCSEL sind Oberflächen-Emitter und strahlen wie LEDs aus der oberen Fläche, jedoch gebündelt. Auf Grund des sehr kleinen Mindeststromes ist keine Leistungsregelung erforderlich. Abbildung 4 zeigt einen typischen Halbleiter VCSEL mit dessen Divergenz, einem charakteristischen Laserprofil und ein P/U/I-Diagramm.







Weitere charakteristische Merkmale werden beispielhaft anhand eines spezifisch aufgebauten VCSEL in einem einfachen Package mit und auch ohne Fokussierlinse aufgezeigt (Abbildung 5). Prinzipiell unterscheidet man zwischen hochpräzisen Bauelementen mit kleinen Toleranzketten und Bauelementen mit großen Toleranzen zwischen den optischen, elektrischen und mechanischen Komponenten. Je nach Aufbautyp werden unterschiedliche Anforderungen an die Montage gestellt und wird im späteren Abschnitt "Aktive oder passive Montage" diskutiert. Nachfolgend ist ein Low-Cost-Bauelement mit großen Fertigungstoleranzen beschrieben. Die grundlegenden nachfolgend beschrieben optischen Eigenschaften gelten für beide Bauteiltypen. Das Bauelement besitzt eine Unterschale (a) mit einer Öffnung (g) für den Lichtaustritt zur Leiterplatte hin gerichtet. Das Leadframe (b) stellt die elektrische Verbindung zur Leiterplatte dar. Das Blech (c) dient als Träger für ein strukturiertes Glassubmount (d) auf welchem der funktionale Halbleiter (f, VCSEL oder Fotodiode) in Flip Chip-Technologie montiert und verlötet ist. Der elektrische Kontakt zwischen Leadframe und Glassubmount wird mittels Drahtbonden (e) realisiert. Zur Fokussierung des Laserstrahls kann eine Kugellinse (g) in das optische Fenster des Gehäuses eingeklebt werden.



ABBILDUNG 5 PACKAGE VON SENDE- UND EMPFÄNGERBAUELEMENTE MIT UND OHNE FOKUSIERUNGSLINSE

Zur Erläuterung der Montagetoleranzen zusammen mit den wesentlichen Einflussfaktoren auf die Einkopplungsqualität werden im Folgenden anhand charakteristischer Merkmale des vorher beschriebenen VCSEL-Bauelementes gezeigt, wobei von einer Einkoppelfläche von 70 x 70  $\mu$ m in einem Abstand von 1,5 mm zwischen VCSEL und Koppelstelle ausgegangen wird. Für eine



optimale Einkopplung des Lichtstrahls muss das ausgestrahlte Licht eine geringe Divergenz bzw. einen kleinen Strahldurchmesser besitzen, so dass der gesamte Laserspot auf den Lichtwellenleiter trifft. Darüber hinaus sollte das Intensitätsprofil eine homogene gaußförmige Verteilung aufweisen, so dass bei Abweichung des Laserspots ein Großteil des Lichts dennoch in den Lichtwellenleiter eingekoppelt wird. Sowohl der angelegte Strom als auch Umgebungseinflüsse dürfen keine negativen Auswirkungen auf die Laserstrahlcharakteristik aufweisen. Dieser Idealfall ist jedoch bei realen Bauelementen, wie in Abbildung 6 zu sehen, nicht gegeben, so dass die entscheidenden Einflussfaktoren auf die Laserspotqualität bekannt sein müssen und bereits bei der Montage zu berücksichtigen sind.



#### ABBILDUNG 6: LASERPROFILE IN DER EINKOPPLUNGSEBENE

#### Bewertungskriterien für die Einkoppelqualität

Typische Einflussfaktoren auf die Qualität des Laserstrahls sind thermische Faktoren wie z. B. die Umgebungstemperatur und die Betriebsdauer des VCSEL. In beiden Fällen ist auf Grund des Temperaturanstiegs eine Abnahme der emittierten optischen Leistung zu erwarten. Geometrische Faktoren, wie z. B. der Arbeitsabstand, Strahldivergenz und Abstrahlwinkel bewirken ein Verschieben des Laserstrahls, so dass die Kopplung in den Lichtwellenleiter verhindert wird. Die elektrische Ansteuerung des VCSEL bewirkt eine Veränderung der Intensitätsverteilung, so dass das Intensitätsmaximum des Laserspots verschoben wird und die Einkopplung deutlich verschlechtert wird. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf Laserstrahlqualität und die Bewertungskriterien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

#### TABELLE 1: Einlfussfaktoren und Bewertungskriterien für die Einkoppelqualität

Einflussfaktoren	Bewertungskriterien	
Horizontale Position Vertikale Position Verkippung Ansteuerung durch Strom Linse Umgebungstemperatur Reflowprozess Einsatz- und Betriebsdauer	Emittierte Gesamtlichtleistung Form des Laserprofils Intensitätsverteilung des Laserprofils Maximale Intensität Lage des Intensitätsmaximums Maximale Intensität innerhalb einer Fläche entsprechend der Einkoppelfläche (Region of Interest) Lage der Region of Interest	



## EINFLUSS DER KUGELLINSE

Um den Durchmesser des Laserstrahls der Einkoppelfläche anzupassen wird eine Kugellinse zur Fokussierung des Lichtstrahls eingesetzt. Abbildung 7 verdeutlicht die Aufweitung des Laserspots bei Vergrößerung des Arbeitsabstandes, so dass nur ein Bruchteil der gesamten emittierten Lichtleistung in den Lichtwellenleiter eingekoppelt wird. Abbildung 7 zeigt die horizontale und vertikale Intensitätsverteilung mit und ohne Linse.



ABBILDUNG 7: HORIZONTALE UND VERTIKALE INTENSITÄTSVERTEILUNG MIT UND OHNE LINSE

Der Durchmesser der Laserspots mit Linse beträgt einen Durchmesser von ca. 100  $\mu$ m bei einer optischen Gesamtleistung von 3,16 mW. Der Laserspot ohne Linse beträgt hingegen einen Durchmess von ca. 300  $\mu$ m bei nahezu selbiger optischer Gesamtleistung. Somit sind die Dämpfungsverluste durch die Linse selber vernachlässigbar. Aber auf Grund des kleineren Spotdurchmesser kann die gesamte optische Lichtleistung bei richtiger Lage in den Lichtwellenleiter eingekoppelt werden. Die Intensitätsverteilung (Laserprofil) bleibt mit Linse und ohne annähernd gleich, das Profil wird lediglich gestaucht. Das heißt, aus einem ringförmigen Profil kann kein Gaußprofil erzeugt werden.

#### EINFLUSS DES STROMS

Für die Leiterplattenbestückung und den späteren Betrieb der VCSEL ist ein Sendeverhalten erforderlich, bei dem die Lage des Gebiets mit maximaler Intensität unabhängig vom angelegten Strom ist. Eine konstante Lage des Intensitätsmaximums würde gewährleisten, dass sowohl bei kleinen als auch bei größeren Ansteuerströmen die eingekoppelte Leistung maximal bleibt. Im Fall einer Verschiebung kommt es in Abhängigkeit der VCSEL-Ansteuerung zu deutlichen Einkoppelverlusten bis hin zu Signalverzerrungen. Abbildung 8 zeigt die Bewertung des Intensitätsmaximums für verschiedene Ansteuerströme bei Bauelementen mit und ohne Linse. Das über das Strahlenprofil gelegte Quadrat mit den Abmessungen 70 x 70 µm beschreibt die Einkoppelstelle gemäß Abbildung 6. Die Quadrate sind für alle Bilder gleich groß, wobei unterschiedliche Bildskalierungen für VCSEL mit und ohne Linse verwendet wurden. Es lässt sich erkennen, dass die formulierte Forderung nach einer konstanten Lage des Gebiets



maximaler Intensität nur für VCSEL mit Linse erfüllt ist. Bei VCSEL ohne Linse wandert das Gebiet der maximal einkoppelbaren Lichtleistung mit zunehmendem Ansteuerstrom. Darüber hinaus ist eine Aufweitung des Laserstrahls mit zunehmendem Strom zu beobachten, was wiederum eine Einkoppelbarkeit des gesamten Profils verschlechtert.





Die Vergrößerung des Strahlendurchmessers wirkt sich um ca. 30 % zwischen minimaler und maximaler Ansteuerung. Aufgrund dieser Eigenschaft müssen bereits bei der Montage bzw. bereits beim Entwurf der elektrooptischen Baugruppe der Faserquerschnitt bzw. Einkoppelfläche und die Ansteuerart des späteren Betriebs berücksichtigt werden, da es sonst trotz idealer Montage im späteren Betrieb zu deutlichen Koppelverlusten kommen kann. Wird z. B. der Laserspot bei der aktiven Montage (Messung der Laserlage im Montageprozess) bei einer Ansteuerung von 2 mA vermessen, so wird die Lage der maximalen Intensität genau in der Mitte des Laserspots gemessen. Im späteren Betrieb bei 10 mA hat auf Grund des Ringprofils diese Lage nur eine geringe optische Lichtleistung. Prinzipiell wirkt sich die Laserprofiländerung durch die Ansteuerung des Stromes nicht so stark aus wie bei VCSEL ohne Linse, so dass der Einsatz von fokussierenden Elementen dringend empfohlen wird.

## EINFLUSS DES ARBEITSABSTANDES

Aufgrund der Divergenz des Laserstrahls kommt es zu einer Aufweitung des Laserprofils und zu einer Abschwächung der Lichtleistung pro mm<sup>2</sup> in der abbildenden Ebene. Abbildung 9 zeigt die Veränderung des Laserprofils in der Koppelebene (Darstellung durch Quadrat) in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes. Dies macht deutlich, dass beim Aufbaukonzept der Leiterplatte die vertikalen Abstände und die optischen Strahleigenschaften aufeinander abgestimmt sein müssen.







#### EINFLUSS DES KIPPWINKELS

Bei den Montageprozessen kann es beim Platzieren der optischen Bauelemente zu einer Verkippung kommen. Ursachen hierfür könnte, z. B. bei Verwendung von Lotpaste oder Klebstoffen, eine Verquetschung des Materials sein. Mit der Verkippung verschiebt sich der Laserspot in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Laserquelle und Einkoppelebene, so dass bei einer Verkippung von nur 3° (Arbeitsabstand: 1,5 mm) bereits eine Abnahme von 50 % der Lichtleitung eintritt. Diese Abnahme lässt sich nicht allein auf geometrische Überlegung zurückführen, da hierbei zusätzlich die Ausprägung des Laserprofils berücksichtigt werden muss. Abbildung 10 zeigt, dass bei einer Verkippung von 3° die Einkoppelfläche zwar noch deutlich innerhalb des Laserspots liegt, jedoch der Bereich der maximalen Lichtintensität bereits verlassen wurde. Der Kippwinkel stellt einen kritischen Faktor dar und muss bei der Montage und im Reflow- bzw. Klebeprozess beachtet bzw. verhindert werden.





#### Weitere Einflussfaktoren

Die Umgebungstemperatur hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Laserstrahlcharakteristik. Bereits bei einer Erwärmung der Umgebung auf 50° C für das beschriebene Bauelement fällt die Lichtleistung um 20 % ab. Eine Verschiebung des Ortes der maximalen Intensität ist jedoch nicht feststellbar.

Vernachlässigt werden kann der Einfluss der Betriebsdauer. Nach einem 60-minütigen Betrieb konnte keine nennenswerte Veränderung, welche den Montageprozess beeinflussen könnte beobachtet werden.

Eine Berücksichtigung der Reflowfähigkeit der Bauelemente ist notwendig. Es konnte ein deutlicher Rückgang der Sendeleistung der Bauelemente festgestellt werden, so dass bei der Wahl des Montageprozesses die Temperatureinflüsse zu klären sind und gegebenfalls die Prozesskette anzupassen ist.



#### Schlussfolgerung

Bauelemente ohne Linse sind nur bedingt geeignet, da die Aufweitung des Laserstrahls mit zunehmendem Abstand zu deutlichen Verlusten führt. Bei der Montage von Bauelementen mit Linse und geeigneter Stromsteuerung reduzieren sich die Einflüsse auf die drei wesentlichen geometrischen Größen: horizontale Position, vertikale Position und Verkippung (Abbildung 11).



#### ABBILDUNG 11: GEOMETRISCHE EINFLÜSSE AUF DIE EINKOPPELQUALITÄT

Geht man idealisiert von einem homogenen kreisförmigen Laserspot aus, so ist die optische Dämpfung vom Abstand zwischen dem Spotmittelpunkt und dem Koppelmittelpunkt als auch von der Verringerung der Lichtintensität durch die Divergenz abhängig. Bei der Auswahl eines Montageprozesses sind gemäß den Einflussgrößen und Kriterien aus Tabelle 1 die Auswirkung auf die Montage zu qualifizieren. Die optischen Charakteristika sind vor der Montage zu kennen und im Fertigungsprozess zu berücksichtigen.

#### PASSIVE ODER AKTIVE MONTAGE

Aus den vorausgegangenen Überlegungen ist ersichtlich, dass die Montage der elektrooptischen Bauteile auf Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern die Berücksichtigung der elektrischen und zugleich der optischen Eigenschaften im Fügeprozess erfordert. Die Koppelkurve in Abbildung 3 zeigt, dass eine Abweichung des Laserstrahls von nur 20  $\mu$ m bereits zu einem Verlust von 50 % der eingekoppelten Lichtleistung führt. Ein vertikaler Versatz von nur 200  $\mu$ m führt auf Grund der Divergenz des Laserstrahls in Abhängigkeit der Höhe zu einem Verlust der eingekoppelten Lichtleistung von bis zu 25 %. Bei einem Arbeitsabstand (VCSEL/Koppelstelle) von 1 mm bewirkt eine Verkippung des VCSEL von nur 1°, einen Versatz des Laserspots in der Koppelebene um 17  $\mu$ m, was wiederum zu einem Koppelverlust von nahezu 50 % führt.

Insbesondere liegt somit die Herausforderung in der Montage der Bauelemente unter Einhaltung der Positioniergenauigkeiten. Alle Fertigungsprozesse unterliegen Toleranzen und führen durch Verkettung der Toleranzen zu einer Gesamtabweichung, die jedoch geringer als die geforderte Abweichung sein darf. Je nach Montagekonzept können unterschiedliche Anforderungen an die Prozesskette gestellt werden. Der Aufbau elektrooptischer Baugruppen unterscheidet sich prinzipiell in zwei grundlegende Konzepte:

- Hochpräsize Komponenten mit passiver
- Montage Toleranzbehaftete Komponenten mit aktiver Montage.



Bei der aktiven Montage wird im Bestückprozess das Bauelement in Betrieb genommen, die optische Lage des Lasers vermessen und beim Platzieren so ausgeglichen, dass der Versatz zwischen Koppelstelle und Laserspot in der Koppelebene minimal wird. Die passive Montage hingegen zentriert das Bauelement bezüglich der elektrischen Anschlussstrukturen bzw. bezüglich geometrischer Merkmale, so wie in der Standard-SMT-Bestückung üblich ist. Während die aktive Montage höhere Fertigungstoleranzen beim Bauelement zulässt, werden bei der passiven Montage sehr hohe Anforderungen an die Fertigungstoleranzen des Bauelementes gesetzt. Horizontaler und vertikaler Versatz als auch die Verkippung der optischen Achse addieren sich aus einer Vielzahl von Größen des gesamten Aufbaus. Am Beispiel der integrierten Kopplung mit 90°-Umlenkung werden die zugrundeliegenden Toleranzketten mit Abbildung 12 näher erläutert.



ABBILDUNG 12: DARSTELLUNG DER TOLERANZKETTE BESTÜCKTER VCSEL BEZÜGLICH DER OPTISCHEN ACHSE

#### AKTIVE MONTAGE

Die aktive Montage setzt voraus, dass im Bestückprozess das Laserprofil vermessen wird und die Lage des Intensitätsmaximums im Arbeitsabstand bekannt ist. Somit wird in Abhängigkeit der Messgenauigkeit der Kamera die horizontale Lage des Laserspots mit sehr hoher Präzision erfasst (< 1  $\mu$ m). Aufgrund der Fertigungstoleranzen bei der Leiterplattenfertigung unterliegt auch die Position der Koppelstelle Toleranzen in horizontaler und vertikaler Lage bezüglich des elektrischen Layouts (a, f, e: Versatz der optischen Lage zur elektrische Lage). Daher sind präzise Marken erforderlich, um die Lage der Koppelstelle mit Genauigkeiten im Submikrometerbereich messen zu können. Bei der aktiven Montage ist die Abweichung des bestückten VCSEL in horizontaler Ebene davon abhängig, ob der Laserspot in der richtigen Ebene (Koppel- bzw. Lichtwellenleiterebene) vermessen wurde (Abbildung 13). Bei der aktiven Montage werden im Wesentlichen die Einbautoleranzen des VCSEL im Package (g, m, c und  $\beta$ ) ausgeglichen. Die Arbeitsabstandschwankungen, bedingt durch die Toleranzen des Verbindungsmediums, der Einbautiefe des Wellenleiters, und der Schichtdicke der elektrischen Lage bleiben dennoch als Unsicherheiten im System. Eine Schwankung der Höhe zwischen Koppelebene und Leadframeunterseite ist durchaus bis zu 200 µm gegeben, so dass unabhängig der horizontalen Lage des VCSEL im Package eine maximale Verkippung des Bauelementes von bis zu 5° erlaubt ist.





ABBILDUNG 13: DIFFERENZ ZWISCHEN KOPPELEBENE UND MESSEBENE

Die Verkippung setzt sich beim gehäusten Bauelement aus der Verkippung des VCSEL-Halbleiters im Package als auch aus der Verkippung des Packages, z. B. durch Verquetschung der Lotpaste, zusammen. Bei der aktiven Montage, mit relativ großen Fertigungstoleranzen zwischen den optischen und elektrischen Lagen kommt es beim Bestücken zu einem deutlichen Versatz zwischen dem Leadframe und dem Footprint. Dieser Versatz darf die Anforderungen für eine gute Lötstelle nicht verletzten und muss hinsichtlich der geforderten Normen überprüft werden. Nimmt man eine ideal ausgerichtete optische Achse an, also Laserspot ist genau mittig zur Einkoppelfläche mit  $\Lambda x = 0$  ausgerichtet, so lässt sich der Versatz zwischen Leadframe und Footprint mit

#### $b = T_m + T_\alpha + (f + e + d + c - g)\tan(\alpha + \beta)$ (Gl. 1)

beschreiben, wobei  $T_m$  die Toleranz zwischen optischer und elektrischer Lage im Bauelement ist und  $T_{\alpha}$  die Toleranz zwischen optischer und elektrischer Lage in der Leiterplatte beschreibt.

Beispiel: Mit  $T_m = 50 \ \mu m$ ,  $T_a = 50 \ \mu m$  und dem Arbeitsabstand  $h = \{f + \sigma + d + c - g\} = 1 \ mm$  ergibt somit mit einer Verkippung  $\alpha + \beta = 1^\circ$  für den Versatz  $b = 118 \ \mu m$ . Bei einer Verkippung von 3° erhält man für den Versatz bereits  $b = 152 \ \mu m$ .

Der Versatz zwischen Leadframe und Footprints führt bei Verwendung von Lotpaste auf Grund des Einschwimmeffekts zur Selbstzentrierung, so dass die optische Kopplung wieder verloren geht. Daher ist das bestückte Bauelement bei der aktiven Montage nach der Positionierung in seiner Lage zu fixieren.

#### **PASSIVE MONTAGE**

Bei der passiven Montage wird das optische Bauelement nicht in Betrieb genommen. Die Zentrierung erfolgt bezüglich geometrischer Größen, z. B. bezüglich der elektrischen Anschlussstrukturen. Wird somit eine ideale Bestückung des Bauelementes bezüglich der elektrischen Lage angenommen mit b = 0, so ergibt sich für den Versatz der optischen Achse in der Koppelebene

#### $\Delta x = T_m + T_\alpha + (f + e + d + c - g) \tan(\alpha + \beta).$ (Gl. 2)

Die geforderte maximale Abweichung der optischen Achse von  $\Delta x = 20 \ \mu m$  ist somit nur mit hochpräzisen Bauelementen möglich. Gehäuste Bauelemente mit Toleranzen für die Lage des VCSEL bezüglich des Leadframes kleiner als z. B. 5  $\mu m$  herzustellen erfordert komplexe



Fertigungsschritte, welche die Bauelementkosten massiv ansteigen lässt. Daher ist für die passive Bestückung ein vielversprechender Ansatz die Verarbeitung von Flip-Chips. Die Abweichung der optischen Lage zur elektrischen Lage am Flip-Chip liegt im Nanometerbereich, so dass  $T_m = 0$  angenommen werden kann. Mit der Verwendung von Flip-Chips reduziert sich auch der Arbeitsabstand zwischen VCSEL und Einkoppelebene, so dass sich die Verkippung nicht mehr so stark auf den horizontalen Versatz auswirkt. Bei einer Verkippung von 1° mit einem Arbeitsabstand von 500 µm erhält man für den horizontalen Versatz  $\Delta x = 9$  µm, bei 2° Verkippung bereits  $\Delta x = 17$  µm. Daher ist der Flip-Chip-Montageprozess insbesondere hinsichtlich der Verkippung der Bauelemente zu qualifizieren. Mögliche Ursachen für die Verkippung bei der Flip-Chip-Verarbeitung sind z. B.

Balldurchmessunterschiede Underfillmenge/Auftragssdicke Substratverwölbung

Bei den vorangegangen Überlegung blieb die Toleranz  $T_a$  unberücksichtigt. Geht man von prozessbedingten Verkippungen bei der Flip-Chip-Montage aus, so ist eine Toleranz für die optische Lage bzgl. der elektrischen Lage nur im Submikrometerbereich erlaubt. Dies lässt sich jedoch nur mit Substraten, wie z. B. Dünnglas erreichen.

#### Schlussfolgerung

Sowohl die passive als auch die aktive Montage haben ihre Berechtigung. Die aktive Montage gleicht die Fertigungstoleranzen des Bauelementes aus und erlaubt eine kostengünstige Fertigung der Bauelemente selber. Die Montage ist mit Standardbestückanlagen, welche eine hohe Positioniergenauigkeit besitzen, möglich. Der Montageprozess muss allerdings die Inbetriebnahme und Vermessung des Lasers ermöglichen. Die passive Montage setzt hochpräzise Bauelemente und Substrate voraus. Eine Messung der optischen Lage ist nicht notwendig, setzt aber den Einsatz von Anlagen, geeignet für die hoch präzise Flip-Chip-Fertigung, voraus. Bei beiden Montagekonzepten ist eine prozesssichere Verarbeitung notwendig, so dass es zur keiner Verkippung des Bauelementes beim Platzieren oder Verrutschen des Bauelementes in nachfolgenden Prozessschritten kommt.



# HOCHPRÄZISE E/O-MODUL ASSEMBLIERUNG AUF DEM BOARD

Die elektrooptische Leiterplatte stellt eine hybride Technologie aus elektrischen und optischen Komponenten dar. Während die Standardprozesse der elektrischen Aufbauund Verbindungstechnik (SMT) mit einem hohen Automatisierungsgrad bereits am Markt verfügbar sind, steht die optische AVT noch vor großen Herausforderungen. Ein Grund hierfür ist die in den Grundlagen zuvor beschriebene deutlich höhere Anforderung an die Montagegenauigkeit der optischen Komponenten (VCSEL/Koppelstelle) zueinander. Die elektrooptische Baugruppe wird sich aber nur dann am Markt etablieren können, wenn eine hybride Aufbau- und Verbindungstechnik verfügbar ist. Das heißt, die Montage von elektrischen und optischen Bauelementen in einer durchgängigen seriellen Prozesskette. Um die notwendige Positioniergenauigkeit der Bauelemente für die optische Kopplung zu realisieren, kann entweder das Bauelement mit hohem Kostenaufwand sehr präzise gefertigt werden, um z. B. mit mechanischer Zentrierung die Genauigkeit zu erreichen. Diese Art der Montage erlaubt weitestgehend eine passive Montage und wird im Teil 2 dieses Tutorials vorgestellt. Nachfolgender Beitrag beschreibt die Möglichkeit kostengünstige Bauelemente mit hohen Fertigungstoleranzen zwischen den optischen und elektrischen Strukturen mit dem Standard-SMT-Fertigungsprozess in einer durchgängigen Prozesskette zu bestücken. Die Grundlage dieser Montagetechnologie stellt die Messung des optischen Strahlengangs im Bestückprozess dar. Die Sollbestückposition, also die Lage der Einkoppelstelle wird über hochpräzise Positionsmarken beschrieben (Aktive Montage).

#### AUFBAU DER ELEKTROOPTISCHEN KOMPONENTEN

Um die Montage der elektrooptischen Sender und Empfänger nahe dem SMT-Prozess zu realisieren, sollen diese wie die elektrischen Bauelemente mit einem Standard-Bestückautomaten auf der Oberseite der Leiterplatte platziert werden. Der elektrische Kontakt wird über das Leadframe hergestellt. Das Licht wird von der Oberseite in die Leiterplatte abgestrahlt und mittels Totalreflektion an einem Spiegelelement um 90° in den Lichtwellenleiter umgelenkt. Die Herausforderung liegt darin, die Bauelemente so zu platzieren, dass eine maximale Einkopplung des Lichtes erfolgt (Abbildung 14).



Abbildung 14: Schematischer aufbau einer elektrooptischen Leiterplatte mit oberflächenmontierten Sende- und empfägnerbauelemente



Die elektrooptische Leiterplatte, die verschiedene Kupferlagen verfügt, muss zusätzlich eine integrierte optische Lage aufweisen, welche über Koppelstellen von außen optisch zugänglich sein, um so das Ein- und Auskoppeln des Lichtsignals mittels Totalreflektion an den Spiegelflächen zu ermöglichen. Die Lage der Ein- und Auskoppelstellen muss über hochpräzise Passmarken messbar sein, da die Erkennung der Spiegelfläche mit der Leiterplattenkamera nicht möglich ist. Abbildung 15 zeigt eine elektrooptische Leiterplatte mit den Abmessungen 100 mm x 160 mm und einer Dicke von 2,4 mm. In einer Tiefe von ca. 500  $\mu$ m unterhalb der Leiterplattenoberfläche ist der Lichtwellenleiter eingebettet. Der Wellenleiterstrang besteht aus PMMA (Polymethylmethacrylat) und hat bei einem quadratischen Querschnitt von 70  $\mu$ m x 70  $\mu$ m eine Länge von 104 mm. Die Dämpfung des Epoxidmaterials ist für eine Lichtwellenlänge von 850 nm optimiert und weist bei genannter Wellenlänge eine maximale Dämpfung von 0,2 dB pro Zentimeter auf. Die Sende- und Empfängerbauelemente sind die im vorausgegangen Abschnitt beschriebenen gehäusten VCSEL Komponenten und sollen mittels Lotpaste zur Leiterplatte elektrisch verbunden werden.





Ein weiterer Demonstrator für eine elektrooptische Leiterplatte ist in Abbildung 16 gezeigt. Hierbei handelt es sich um eine elektrooptische Leiterplatte der Firma Vario-Optics mittels diskreter 90°-Umlenkung. Die präzisen Marken der Koppelstellen sind auf dem diskreten Spiegelelement realisiert.







Zu der bereits in den Grundlagen dargelegten Anforderung der erhöhten Montagegenauigkeit bezüglich der optischen Achse und der Fixierung des Bauelementes ist zusätzlich ein Schutz des optischen Strahlengangs notwendig. Im Folgenden wird eine durchgängige Prozesskette aufgezeigt, mit der diese Anforderungen erfüllt werden.

#### Erweiterte Prozesskette für die aktive Montage

Die erweiterte Prozesskette ist in Abbildung 17 sequentiell dargestellt. Die im Schablonendruckprozess mit Lotpaste bedruckte Leiterplatte wird nach dem Einfahren in den Bestückautomaten zunächst im Leiterplattentransportband fixiert. Die standardmäßig integrierte Leiterplattenkamera vermisst anschließend die Lage der globalen Passmarken. Mit Hilfe des kontaktlosen Jet-Systems werden Klebstoffdepots appliziert (a). Die Leiterplatte wird nach der Applikation des Fixierklebstoffs in den Arbeitsbereich 2 der Maschine transportiert (b). Dort werden nach der Leiterplattenfixierung erneut die die globalen Passmarken vermessen werden und anschließend die hochpräzisen lokalen Marken der optischen Lage. (c). Daraufhin beginnt die Bestückung der Senderkomponente durch das Greifen des Bauelements aus der Bauelementzuführung (d). Nach optischer Zentrierung des Bauelementes (e) wird anschließend die optische Lage des integrierten VCSEL an einem spezifischen Messplatz bestimmt (f) und anschließend bezüglich der optischen Achse platziert. Der zuvor applizierte Fixierklebstoff benetzt beim Absenken des Bauelements dessen Gehäuse, sodass bei Erreichen der definierten Bestückkraft die Anhärtung des Fixierklebstoffes durch einen UV-Impuls erfolgen kann (g). Nach dem Lösen des Bauelementes von dem Bestückkopf durch Abschalten des Ansaugvakuums verfährt die Baugruppe zurück in den Arbeitsbereich 1 (h).



ABBILDUNG 17: MODIFIZIERTE PROZESSKETTE FÜR DIE AKTIVE BESTÜCKUNG GEHÄUSTER VCSEL



Dort wird er Kapillarklebstoff appliziert (i), der durch Kapillarkräfte unter das Bauelement zieht. Der optische Strahlengang wird dabei jedoch nicht verschlossen. Die bestückte elektrooptische Leiterplatte wird abschließend dem Reflowprozess zugeführt. Dort erfolgen das Umschmelzen der Lotpaste sowie das Aushärten des applizierten Fixier- und Kapillarklebstoffs ohne dass es zum Selbstzentriereffekt kommt.

#### Realisierung der aktiven Montage mit einem Standardbestücker

Für die Realisierung der aktiven Montage ist ein Bestückautomat mit einer sehr hohen Bestückgenauigkeit bzw. Positioniergenauigkeit der Achsen notwendig. Darüber hinaus sind zusätzliche Hardware und Berechnungsalgorithmen in den Bestückprozess zu integrierten. Hierfür eignet sich ein Bestückautomat mit linearem Direktantrieb, wie z. B. der Bestückautomat Siplace HF. Klebstoffapplikation, UV-Licht und Laser-Charakterisierungsmessplatz sind in den Bestückautomaten zu integrieren. Im Allgemeinen ist eine solche Modifikation von Bestückautomaten nicht möglich. Daher ist dabei eine enge Zusammenarbeit mit dem Bestückautomatenhersteller notwendig, bzw. die Verwendung eines modular aufgebauten Systems mit Eingriffsmöglichkeit in die Steuersoftware vorausgesetzt. Ein zunehmender Trend ist die Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen. Zukünftig könnte es möglich werden mit wandlungsfähigen Bestückautomaten zusätzliche Prozesse in den Montageablauf individuell zu integrieren. Abbildung 18 zeigt einen modifizierten Bestückautomaten mit den zusätzlich eingebundenen Messsensoren und Aktoren für die aktive Montage.



#### ABBILDUNG 18: MODIFIZIERTER BESTÜCKAUTOMAT FÜR DIE AKTIVE MONTAGE

Zweifelslos stellt der Messplatz zur Vermessung des Laserspots in der Koppelebene, im weiteren Feinmessplatz genannt, das Herzstück der aktiven Montage dar und wird nachfolgend beschrieben. Die wesentliche Funktion des Feinmessplatzes ist die Aktivierung des VCSEL und Messung der maximalen Intensität auf der Koppelfläche. Das System muss konstruktiv in den Bestückautomaten integrierbar sein und die Messsignale an die Steuersoftware des



Bestückautomaten übertragen können. Der Aufbau des Feinmessplatzes ist in Abbildung 19 dargestellt. Das Gehäuse dient als Komponententräger und bietet Schutz vor Streulicht, Verschmutzung und Staub, welche die Messung negativ beeinflussen können. Die Rückenplatte ist so auszulegen, dass die Befestigung an dem Maschinenkörper des Bestückautomaten möglich ist. Die integrierte Basisplatine erfüllt im Wesentlichen vier Aufgaben. Zum einen erfüllt sie das Powermanagement für den gesamten Feinmessplatz und dient als Kommunikationsschnittstelle zur übergeordneten Steuereinheit. Der Mikrocontroller steuert die CCD-Kamera und wertet das aufgenommene Bild des Laserspots aus. Das telezentrische Objektiv, welches eine verzerrungsfreie Darstellung ermöglicht, vergrößert die Abbildung um das 6-fache, so dass eine Auflösung auf dem CCD-Chip von 1  $\mu$ m x 1  $\mu$ m erreicht wird. Es ist eine Adapterplatine auf der Trägerplatte an der Oberseite des Feinmessplatzes anzubringen und eine abbildende Ebene, wie z. B. eine Mattscheibe zu integrieren. Alternativ kann die Kamera auch mittels eines vertikal verfahrbaren Motors bewegt werden, um die optimale Fokusebene einzustellen. Bei der Platzierung des Bauelementes ist eine sichere Inbetriebnahme des Bauelementes zu gewährleisten. Prinzipiell sind folgende Kontaktierungskonzepte möglich: Kontaktierung mit Federn bzw. Lamellen, Kontaktierung mit feinsten Prüfnadeln und die Direktkontaktierung. Die zwei erstgenannten Methoden bieten eine gute elektrische Verbindung, können jedoch auf Grund von geometrischen Bedingungen nicht realisiert werden. Ideal zeigt sich die Direktkontaktierung. Hierbei wird das Bauelement direkt auf die Footprints der Adapterplatine platziert und mit einer Mindestkraft an die Kontakte gepresst, so dass ein elektrischer Kontakt entsteht. Die Anpresskraft muss jedoch kleiner sein als eine erlaubte Maximalkraft, bei der die Anschlusspins des Bauelementes dauerhaft verformt werden. Im Bedarfsfall sind hierfür Versuche durchzuführen. Für das oben beschriebene TSSOP10-Package wurde mit einer Zugprüfmaschine die Elastizitätskurven der Anschlussbeinchen gemessen. Zur Ermittlung der Mindestkraft, bei der eine sichere elektrische Kontaktierung gewährleistet wird, wurde eine Andruckkraft-Strom-Messung durchgeführt. Hierbei wurde in Abhängigkeit von der Anpresskraft der durch das VCSEL fließende Strom gemessen. Für die Mindestandruckkraft ergab sich  $F_{min} = 1$  N und für die Maximalanpresskraft  $F_{max} = 5$  N. Somit entspricht die erlaubte Bestückkraft den üblichen Werten, die in der SMT-Fertigung eingesetzt werden.



#### ABBILDUNG 19: AUFBAU EINES MESSPLATZES FÜR DIE AKTIVE MONTAGE



Die Messergebnisse des Feinmessplatzes müssen als Versatz bzw. als Position der maximalen Lichtintensität im Maschinenkoordinatensystem transformiert werden. Der Greiferdrehpunkt ist im Maschinenkoordinatensystem aus der Maschineneigenen Kalibrierung bekannt. Daher ist das Offset des Laserspots bezüglich des Pipettendrehpunktes zu messen. Dies kann mit einer Zweipunktmessung erfolgen. Das zugrundeliegende Prinzip ist in Abbildung 20 dargestellt. Die linke Seite der Abbildung zeigt die geometrischen Zusammenhänge. Das Bauelement wird am Punkt P gegriffen. Nach Inbetriebnahme des Bauelementes tritt der Laserstrahl mit Neigung aus dem Austrittspunkt O heraus und bildet das Lasermaximum im Punkt A in der Bildebene ab. Zur Bestimmung der Lage des Intensitätsmaximums bezüglich des Pipettenangriffpunktes wird das Bauelement um den Punkt P um 180° gedreht und die Lage der abbildenden Lichtintensität erneut gemessen. Der halbe Vektor zwischen den zwei gemessenen Punkten stellt den Versatz zwischen Pipette und Laserintensitätsmaximum dar. Diese Werte müssen an die Steuersoftware übertragen werden und bei der Zielposition für die Bestückung berücksichtigt werden.

Bei der Rotation des Bauelementes könnte es zu einem Versatz bei der Kontaktierung kommen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kontaktierung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messung hat. Zum Nachweis wurde bei feststehender Achse das Bauelement durch Verfahren der z-Achse mehrfach kontaktiert und wieder dekontaktiert.



ABBILDUNG 20: MESSPRINZIP DER OPTISCHEN LAGE BEZÜGLICH DER PIPETTE IM DER KOPPELEBENE

Realisiert man ein Montagekonzept, so ist eine Qualifizierung des Prozesses notwendig. Für die Montage elektrooptischer Bauelemente wird eine maximale Dämpfung von 3 dB pro Koppelstelle gefordert. Die wesentlichen Verluste sind auf die Positionierungenauigkeit zurückzuführen. Nach der Bestückung des Bauelementes muss die eingekoppelte Lichtleistung der maximal einkoppelbaren Lichtleistung gegenübergestellt werden. Hierfür kann eine Qualifizierungsumgebung im Bestückautomaten aufgebaut werden. Nachfolgende Beschreibung stellt ein Prinzip der am Lehrstuhl FAPS realisierten Methode dar.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 21 dargestellt. Für die Untersuchung wurde eine elektrooptische Leiterplatte so vorbereitet, dass bei der Kontaktierung des Senderbauelementes im Bestückprozess, das Bauelement in Betrieb genommen wird und das VCSEL in die Leiterplatte strahlt (3). An der Empfängerseite wurde ein Lichtleistungssensor angebracht (2),



dessen Messwerte manuell registriert werden. Der Versuchsablauf ist folgendermaßen gegliedert. Zunächst wird ein Bauelement passiv bestückt, das heißt die Information des Feinmessplatzes wurde bei der Bestückung nicht berücksichtigt. Im zweiten Schritt wird das Einbeziehen der Messung des Feinmessplatzes berücksichtigt und das Bauelement bezüglich der optischen Lage bestückt. Nach der Registrierung der Messwerte an der Empfängerseite wurde die Position des Bauelementes mit Hilfe eines spezifisch programmierten Dialogfeldes (b) so lange nachkorrigiert, bis sich die maximale Lichtleistung einstellte. Die gemessene Lichtleistung kann zusammen mit dem Korrekturoffset aufgenommen werden.



ABBILDUNG 21: VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE QUALIFIZIERUNG DER AKTIVEN MONTAGE

# MIKROOPTIK-JUSTAGE IM MODUL ZWISCHEN VCSEL BZW. Photodiode und Wellenleiter

#### Modulkonzepte

Zwischen den Toleranzanforderungen der elektrischen Leiterplattentechnologie von 50...200  $\mu$ m und denen der optischen Verbindungstechnik von ca. +/- 5  $\mu$ m (Tabelle 1) klafft eine Fertigungsdifferenz von etwa einer Zehnerpotenz. Das bedeutet für die Herstellung einer elektrisch-optischen Leiterplatte mit den bisherigen Methoden der Leiterplattentechnologie zum Einen die Notwendigkeit einer Entkopplung der optischen Lagen von den elektrischen Lagen in der Herstellung und in der Aufbau- und Verbindungstechnik und zum Anderen mindestens einen zusätzlichen präzisen Arbeitsgang zur Ankopplung an die optischen Ebenen.



#### TABELLE 1: TOLERANZEN IM LEITERPLATTEN-

HERSTELLUNGSPROZESS<sup>1</sup>

	Toleranz über das Board	Wiederholgenauigkeit		
mechanische Toleranzen im Leiterplattenprozess				
Bohren	> ± 10 µm	± 50 μm		
Fräsen	> ± 50 µm	± 50 μm		
Laserschneiden	> ± 25 µm	± 25 μm		
Platzierung der elektro-optischen Module				
Elektrische Verbindungen	> ± 25µm	± 50µm		
mechanische Verbindungen	> ± 50µm	± 100µm		

Komplette Transceivermodule bestehen stets aus Lasertreiber- und Photodioden-Verstärker (TIA)-Schaltkreisen, die an die eingesetzten Laserarrays (VCSEL) und Photodiodenarrays angepasst sein müssen. Die für die optische Kopplung kritischen Schnittstellen sind der Übergang von den Lasern zum Wellenleiter und von den Wellenreitern zu den Fotodioden. In Abhängigkeit von den optischen Wegen lassen sich hier verschiedene Konzepte ableiten, die der Klassifizierung in Abbildung 2 entsprechen und weiter oben erläutert wurden. Dazu kommt die Entscheidung für die Aufbautechnik auf dem Board. Im folgenden Beispiel werden steckbare Modulkonzeptionen vorgestellt, bei denen die optische und die elektrische Schnittstelle getrennt sind und eine hochgenaue Komponentenmontage durch aktives Alignement auf Modulebene die Möglichkeit der passiven Montage auf dem Board eröffnet.

## VCSEL UND PHOTODIODEN

Vertikalemittierende Halbleiterlaser (VCSEL) mit einer Bandbreite von > 10 Gbps und entsprechende Photodioden stehen kommerziell zur Verfügung. Diese Arrays werden nicht in ein Gehäuse gebaut, sondern Flip-Chip auf einen Submount aus Silizium gelötet. Dieser hat die Aufgabe, den empfindlichen GaAs-Chip zu halten und die elektrischen Kontakte unter dem VCSEL-Chip nach außen zu führen, wo sie durch Drahtbonden an den Treiber-Chip angeschlossen werden. Die Laser können als substratseitig emittierende VCSEL ausgeführt werden.

Der konsequente Einsatz von Verfahren und Technologien der Waferprozessierung für den Aufbau und Burn-In der Laser ermöglicht es, die optischen Sender kostengünstig und mit hoher Qualität zur Verfügung zu stellen. Alle Prozesse auf dem Submount lassen sich auf größere Submountwafer skalieren, wodurch eine weitere Kostenreduktion möglich ist [2].

## KONSTRUKTION DER TRANSCEIVER-MODULE

Der innere Aufbau der steckbaren Module kann so gestaltet werden, dass ein mechanischer Toleranzausgleich zwischen beiden Schnittstellen möglich ist. Realisiert wird dieser Toleranzausgleich durch die Beweglichkeit der optischen Sub-Einheit über die im Modul befindliche Flex-Leiterplatte<sup>1</sup>. Diese mechanische Trennung ist ein wichtiges Prinzip, um den unterschiedlichen Präzisionsanforderungen gerecht zu werden.





ABBILDUNG 22: BEISPIEL EINES O/E MODULS VON PCB-SEITE (PROJEKT FUTUREOARD): ELEKTRISCHER STECKER; OPTISCHE SCHNITTSTELLE; KÜHLKÖRPER, 10 GBIT/S AUGENDIAGRAMM DES AUSGANGSSIGNALS EINES ELEKTRO-OPTISCHEN LINKS BESTEHEND AUS TREIBER-IC, VCSEL, PHOTODIODE UND VORVERSTÄRKER (TIA)

In der optischen Subeinheit können die arrayförmigen Bauelemente zentral und die Treiberbzw. TIA jeweils für ein Element rechts und links davon angeordnet werden. Die Montage-Plattform hierfür bildet ein Aluminium-Körper, auf den sowohl die IC-Dies, die Dioden-Arrays (jeweils montiert auf Submounts) als auch der elektrische Schaltungsträger aufgeklebt werden (Abbildung 23a). Das opto-mechanische Interface (Abbildung 23b), bestehend aus dem mechanischen Interface "MT-Steckverbinder" und dem optischen Interface "Linsen-Array" wird zu den optisch aktiven Flächen der Diodenarrays ausgerichtet und in seiner Lage fixiert. Auf Grund der geforderten Genauigkeiten und bestehenden Toleranzen ist hier aktive Justage notwendig.



ABBILDUNG 23: A) KONSTRUKTIONSANSICHT DER OPTISCHEN SUBEINHEIT: 1-ELEKTRISCHES MODUL-PCB; 2-TREIBER-IC BZW. TIA-IC; 3-DIODEN-ARRAY AUF SUBMOUNT; B) ANSICHT DER OPTO-MECHANISCHEN SUB-EINHEIT (1-ELEKTRISCHES MODUL-PCB; 2-TREIBER-IC BZW. TIA-IC; 3-MT-SCHNITTSTELLE; 4-LINSEN-ARRAY 2x12), c) FOTO



Das Modul ist mit einem optimierten Kühlkörper ausgestattet, um die entstehende Verlustleistung sicher abzuführen. Gleichzeitig kann das Modul damit auf der Trägerleiterplatte befestigt werden. Die Gesamtabmessungen des hier exemplarisch vorgestellten Moduls sind mit L = 57 mm, B = 25 mm und H = 21 mm sehr klein [3].

Bei Modulen der oben beschriebenen Art sind optische Koppelelemente notwendig, die die Einkopplung des Lichtes in die Leiterplatte und die Umlenkung in die horizontale Wellenleiterebene im Laminat ermöglichen. Solche Umlenkelemente sind zusätzliche passive Bauelemente, die optisch hochgenau gefertigt und assembliert werden müssen. Somit sind sie eine Quelle für zusätzliche optische Koppelverluste mit entsprechend hohen Anforderungen an die Präzision von Herstellung und Montage.

#### DESIGN UND HERSTELLUNG VON OPTISCHEN KOPPELELEMENTEN

Im Folgenden wird ein Beispiel demonstriert, bei dem das Koppelelement aus Glas gefertigt ist und mit Hilfe von Aufnahmen in der Leiterplatte justiert wird. Die Lösung besteht im Kern aus einem 45°-Spiegel und konvexen Linsenarrays an den Stirnflächen (Abbildung 24). Das Design dieses Koppelelements wurde auf Grundlage von Simulationen mit dem optischen Simulationsprogramm Zemax entworfen.

Der Brechungsindex des optischen Vergusses muss so gering wie möglich sein, damit für die Krümmung und Kalottenhöhe der Linsen Herstellungsprozesse zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist die Verwendung eines hochbrechendes Glases mit Brechzahl n = 1,82 notwendig. Auf Basis der Simulationen wurde ein 2-teiliges Koppelelement entworfen, das in einem Fixierrahmen gehalten wird. Dieser Fixierrahmen schafft wiederum die Möglichkeit, ein MT-Ferrulen-Standardinterface zu gestalten.

Die Montage im Fixierrahmen wird durch die 4 äußeren Fixierkalotten auf dem Glas vereinfacht. Vor dem Justageprozess muss die 45° Schräge verspiegelt werden. Das Koppelelement wurde so optimiert, dass es an allen Koppelstellen des Gesamtsystems einsetzbar ist. Das im Fixierrahmen gehaltene Koppelelement wird in eine Freistellung der Leiterplatte auf die Welelnleiterfolie (hier aus Dünnglas) aufgesetzt und justiert.





Abbildung 24: Designdarstellung und Fotos eines zweiteiligen Koppelelementes im montierten und justierten Zustand

In ähnlicher Weise sind Module konstruiert, die in Entwicklungsarbeiten von IBM Research entwickelt worden, so dass passives Alignment möglich ist (Abbildung 25).



Abbildung 25: 120 Gbit/s Transceiver passively aligned to e polymer optical waveguide EOCB using MT optical connector (Mit freundlicher Genehmigung von B. Offreins, IBM Research)



Im Gegensatz zu der in Abbildung 24 gezeigten Variante ist hier keine optische Umlenkung notwendig, das von den oberflächenemittierenden Lasern gesendete Licht wird direkt horizontal in die Wellenleiter eingekoppelt. Das reduziert optische Koppelverluste und ein zusätzliches optisches Koppelelement. Andererseits kann hier nicht mehr von oben gesteckt werden und im Modul selbst müssen die hochbitratigen Signalleitung aus der Ebene geführt und umgelenkt werden.

Bei einen weiterer Ansatz zur Konstruktion hochgenauer Module verzichtet auf den Einsatz von diskreten Koppelelementen und integriert die optische Umlenkung direkt am Modul. Hier eigenen sich insbesondere Module, die auf Basis von Dünnglassubstraten mit integrierten optischen Wellenleitern gefertigt sind und auch auf EOCB mit in Glas integrierten optischen Wellenleitern assembliert werden können. Solche Module sind insbesondere im Hinblick auf das HF-Design sehr vorteilhaft und eine sehr präzise optische Integration führt zu hoher Koppeleffizienz.



ABBILDUNG 26: GLASSPACK-TRANSCEIVERMODUL MIT 4x10 GBIT/S TX UND RX

Der Interposer ist mit einem vierkanaliegen VCSEL und PIN Array sowie zwei Treiberkomponenten bestückt und auf einem Testboard aufgebracht. Die optische Ankopplung von VCSEL und PIN Array zu einem Faserarray erfolgt über ein Wellenleiterelement mit 45° Umlenkspiegel, welches unter dem Interposer positioniert ist. So kann das emittierte optische Signal des VCSELs durch den Interposer strahlen und durch den Umlenkspiegel in den Wellenleiter koppeln.





ABBILDUNG 27: PRINZIPSKIZZE DES MODULAUFBAUS UND KOMPONENTEN DES OPTISCHEN PFADES

Damit ist ein effektives und hochintegriertes optisches Koppelungsprinzip umgesetzt worden. Das Transceiver-Module wandelt elektrische Signale in optische und koppelt diese effektiv in eine Faser ein oder empfängt das optische Signal aus einer Faser kommend und wandelt es in ein elektrisches Signal zurück. Transceiver-Module dieser Art sind ebenso für die Anwendung auf optischen Leiterplatten mit Dünnglaswellenleiterkern prädestiniert. Für diesen optischen System-in-Package (SiP) Ansatz sind Technologien wie Ionenaustausch, Dünnfilmprozesse, TC-Bonden und optisches Butt-Coupling kombiniert worden. Glas ist ein ausgezeichnetes elektrisches Substratmaterial wegen seines Silizium an angepassten Wärmeausdehnungkoeffizienten, der hohen thermischen Belastbarkeit, einer ausgezeichneten Dielektrizität.



## ENTWURF UND SIMULATION

Der industrielle Einsatz optischer Verbindungstechniken auf Baugruppenebene erfordert neben verlässlichen Herstellungs- und Montagetechnologien auch Entwurfs- und Simulationswerkzeuge, die einen durchgehenden Entwurfsprozess einer optischen Lage mit integrierten optisch multimodalen Wellenleitern unterstützen. Diese müssen eine hinreichend genaue Vorhersage der stationären Überragungseigenschaften (z. B. Dämpfung, Nahfeld- und Fernfeldverteilung) als auch der transienten Überragungseigenschaften (z. B. Risetime, Signaldispersion, Laufzeit) optischer Wellenleiter ermöglichen, um die zu erwartende Signalintegrität entlang des Wellenleiters während des Entwurfsprozesses bewerten zu können. Die gewünschte Lichtausbreitung entlang des Wellenleiters konzentriert sich dabei stets auf dessen Kernbereich, der den Lichtfluß aufgrund des Brechzahlkontrastes zwischen dem Kernmaterial mit der Brechzahl <sup>11</sup> und dem Material der Mantellage mit der Brechzahl <sup>12</sup> führt. Ein Maß für die Führungsstärke des optischen Wellenleiters stellt die numerische Apertur dar.

## $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = sin\vartheta_a$

Diese definiert den Akzeptanzwinkel  $\vartheta_{a}$  des Wellenleiters, unter dem ein Lichtstrahl noch auf die Stirnfläche eines Wellenleiters auftreffen darf, um im Wellenleiterkern aufgrund der Totalreflexion geführt zu werden. Lichtstrahlen, die einen Einfallswinkel zum Lot der Stirnfläche aufweisen, der größer ist als der Akzeptanzwinkel, liegen außerhalb der Lichtführung des Wellenleiters und werden nach kurzer Propagation ins Mantelmaterial abgestrahlt.



Abbildung 27: Drei spekular verfolgte Strahlengänge (rot) entlang einer Wellenleiterkern-topologie (Blau) sowie mehrerer platzierter Empfängermodelle (Grün)



#### STRAHLENOPTISCHE SIMULATIONSTECHNIK

Aufgrund der großen transversalen Kernabmessungen (typ.  $w=h=50\mu m$ ) der Wellenleiter, die ein Vielfaches der optischen Wellenlänge (typ.  $\lambda=0.85\mu m$ ) des Lichtes übersteigen, können rechenzeiteffiziente und bezüglich der Wellenleitergeometrie flexible strahlenoptische Simulationstechniken zum Einsatz kommen [4], um den geführten Lichtfluß von einem optischen Quellenmodell ausgehend entlang des optischen Wellenleiterkerns hin zu einem optischen Empfängermodell zu berechnen. Bei kleiner werdenden transversalen Kernabmessungen gelten die für die strahlenoptische Analyse notwendige Annahmen  $w,\hbar \gg \lambda$  nur noch begrenzt, so dass komplexe rechenintensive wellenoptische Verfahren zur Simulation angewendet werden müssen. Allerdings konnte in strahlenoptischen und wellenoptischen Vergleichsrechnungen eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse für Wellenleiter mit transversalen Kernabmessungen von  $w=h=15\mu m$  aufgezeigt werden.

In der strahlenoptischen Simulation wird das räumliche Emissionspektrum der optischen Quelle durch eine Vielzahl (10<sup>3</sup>,...,10<sup>6</sup>) von elektromagnetischen ebenen Wellen modelliert, die das elektromagnetische Leistungsemissionspektrum auf der optischen Ausgangsseite der Quelle nachbilden. Ausgehend von diesen Wellen wird ihr Leistungsfluss mit Hilfe verschiedener wellenoptischer Modelle (Goos-Haenchen, Tunnelverluste, Fresnel Reflexion, Streumodell, etc.) entlang zu bestimmender Strahlengänge berechnet. Diese wiederum definieren sich im homogenen Kernmaterial durch gradlinige Abschnitte, die an den Schnittpunkten mit der glatten Kernhülle des Wellenleiters entsprechend des Snelliusschen Reflexionsgesetztes im Bereich der Lichtführung totalreflektiert werden. Für den Fall einer Teilreflexion außerhalb der Lichtführung treten neben der spekular reflektierten Welle auch eine spekular gebrochene Welle auf, die ein Teil der einfallenden Leistung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel in das Mantelmaterial abstrahlt und somit den gewünschten Leistungsfluß im Wellenleiterkern dämpft. Da nur der geführte Leistungsfluß im Kernmaterial für die Signalübertragung von Interesse ist und nur in den seltensten Fällen eine gebrochene Welle in einen benachbarten Wellenleiter in Führung einkoppelt, kann in der Simulation auf die Verfolgung dieser Strahlen verzichtet werden. Ebenfalls treten durch nanorauhe Kerngrenzflächen mit typischen Rauhtiefen im Nanometerbereich (R<sub>q</sub>=10nm,...,70nm) lokale Streuprozesse auf, die eine Vielzahl von reflektiv und refraktiv gestreuten Wellen hervorrufen. Refraktiv ins Mantelmaterial gestreute Wellen im Bereich der Totalreflexion führen zu schwachen Leistungsverlusten, können aber bei größeren Wellenleiterlängen (>10cm) signifikant den optischen Leistungsfluß im Kern reduzieren. Zudem führen reflektiv ins Kernmaterial gestreute Wellen aufgrund veränderter Strahlengänge zu einer Veränderung des transienten Übertragungsverhaltens (Veränderung der Signaldispersion und Anstiegszeit). Da Materialien stets verlustbehaftet sind muss zudem der optische Leistungsfluß innerhalb des Kernmaterials zusätzlich gedämpft werden. Dies wird erreicht, indem die reellen Brechzahlen der Materialien durch einen Imaginärteil ergänzt werden,

$$\underline{n}_{t} = n_{t} - j \frac{\alpha_{t} \lambda}{4\pi} \quad mit \; \alpha_{t} \dots D \mathbf{a} mpfungs below 
$$\frac{neper}{\mu m}$$$$

der ihre Verlustbeschaffenheit aufgrund von Materialdämpfungen beschreibt. Durch Überlagerung der verfolgten ebenen Wellen in der Fläche eines Empfängers können die stationären und transienten Übertragungseigenschaften ausgewertet werden.



#### **ENTWURF- UND SIMULATIONSWERZEUGE**

Eine wesentliche Herausforderung für den Entwurf sowie die strahlenoptische Simulation ist die geometrische Modellierung der Wellenleiterkernhüllen [5]. Neben annähernd beliebigen Kernquerschnittskonturen (Rechteckig, Trapezförmig,...) müssen auch komplexe Wellenleiterverläufe (Krümmungen, Verzweigungen, Kreuzungen, ... ) zulässig sein, um ein möglichst breites Anwendungsfeld dieser Wellenleitertechnologie simulieren zu können. In Abbildung 28 ist beispielhaft eine komplexe Wellenleitertopologie mit 32 zum Teil gekrümmten Oberflächen aufgezeigt. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass eine manuelle Formung, Positionierung und Ausrichtung einzelner Kernhüllflächen zur Assemblierung der Kernhülle einen nicht akzeptablen Aufwand erforderlich machen würde, der zudem bei jeder Änderung des Wellenleiterverlaufes neu durchlaufen werden müsste. Dieses Beispiel zeigt deutlich die Notwenigkeit von angepassten Entwurfswerkzeugen mit automatischen Entwurfsmechanismen auf. Da es für diese Wellenleitertechnologie bis heute noch keine kommerziell verfügbaren Entwurfsumgebungen gibt, wurde im Rahmen mehrerer F&E-Projekte bei Siemens C-LAB ein Softwareprototyp entwickelt, mit dem der Entwurf, die Simulation und die CAM-Datenaufbereitung über die Gerber RS-274X Schnittstelle ermöglicht wird. Diese hierzu entwickelte integrierte Entwurfsumgebung (IDE) ist in Abbildung 28 dargestellt.



# Abbildung 28: Prototyp einer integrierten Entwurfsumgebung für Planar integrierte optische Wellenleiterverbindungen auf baugruppenebene

Der Entwurfsprozess innerhalb der Entwurfsumgebung sieht eine getrennte Modellierung des Wellenleiterverlaufs (Routing) und der geschlossenen Kernquerschnittskontur des Wellenleiters vor. Neben der hieraus resultierenden Vereinfachung des Entwurfes von 3-D zu 2-D Entwürfen ermöglicht dieses Vorgehen auch den einfachen Austausch von Querschnittskonturen bei



Beibehaltung des Wellenleiterverlaufs, um den Einfluss unterschiedlicher Kernquerschnitte zu analysieren. Die Software formt aus beiden Datensätzen durch eine automatisierte Extrusion die einzelnen Hüllflächen der Kernhülle, platziert sie automatisch und richtet sie so aus, dass eine geschlossene Kernhüllfläche entsteht. Um potentielle Verluste des optischen Leistungsflusses schon zu Beginn des Entwurfes zu minimieren, werden nur Wellenleiterverläufe zugelassen, die einen stetigen sowie stetig differenzierbaren Kurvenverlauf beschreiben und aus kaskadierten geradlinigen und kreisförmig gekrümmten Abschnitten bestehen. Letztere Einschränkung ermöglicht die speichereffiziente Beschreibung der einzelnen Hüllflächen mittels parametrisierter Vektorfunktionen und ermöglicht zudem eine analytische und somit rechenzeiteffiziente Schnittpunktberechnung zwischen Hüllfläche und Strahlengang. Da in der Praxis zumeist eckige Kernquerschnittskonturen anzutreffen sind, wird die Kontur des Kernquerschnitts durch ein geschlossenes, ebenes Polygon beschreiben, dessen Verlauf durch Festlegung einer endlichen Menge von Stützpunkten in der Entwurfsumgebung modelliert wird. In 29 ist ein trapezförmiger Kernquerschnitt für den rot eingezeichneten Wellenleiterverlauf modelliert worden. Neben der rein geometrischen Modellierung des Wellenleiters ermöglicht die integrierte Entwurfsumgebung auch seine physikalische Modellierung. Es können unterschiedliche Materialien für Kern und Mantellage verwendet werden, die sich durch ihren komplexe Brechzahlen beschreiben lassen. Zudem können selektiv unterschiedliche Brechzahlübergängen sowie Oberflächenrauigkeiten der Kernhüllfläche zugeordnet werden.

Neben der Wellenleitermodellierung können in der integrierten Entwurfsumgebung optische Quellen- sowie Empfängermodelle parametrisiert, platziert und gegenüber den Wellenleiter ausgerichtet werden. Hierbei dienen die Quellen und Empfänger nicht der Nachbildung der elektrooptischen Signalwandlung innerhalb von aktiven Transceivermodulen, sondern der Bereitstellung charakteristischer optischer Emissionsprofile (z. B. Einmodige Faser, VCSEL, LED) sowie funktionaler Auswerteeinheiten für die Simulation. Aus den Datensätzen des optischen Quellenmodells, der Empfängermodelle sowie der entworfenen Wellenleitertopologie können dann Simulationsprojekte zusammengestellt und simuliert werden. Der hierzu verwendete Optiksimulator stellt eine Eigenentwicklung auf Basis der zuvor beschriebenen Simulationstechnik dar. Er basiert auf einem semi-sequentiellen Ray Tracing Algorihmus zur Strahlengangberechnung und erlaubt diffuse Strahlverfolgung von dynamisch erzeugten Streustrahlen. Als Ergebnis der Simulation erhält man für jedes Empfängermodell eine Nahfeld- sowie Fernfeldverteilung und eine Sprungantwort sowie Transferfunktion. Grundlegende Untersuchungen bezüglich der Signalintegrität können dann in der Entwurfsumgebung auf Basis der Simulationsergebnisse durchgeführt werden.

#### Exemplarische Simulationsergebnisse und Validierung

Die Validierung der strahlenoptischen Simulationsergebnisse kann durch Vergleich mit messtechnischen Laborergebnissen oder aber mit numerischen Ergebnissen wellenoptischer Verfahren erfolgen. Der Vergleich mit numerischen Ergebnissen, die aus der exakten Lösung der elektromagnetischen Wellentheorie resultieren und somit keine Näherungslösung darstellen, weißt den Vorteil auf, das die Parameter für das Refenenzverfahren und dem zu validierenden Simulationsverfahren exakt gleich gewählt werden können. Bei Laborergebnissen müssen Parameterextraktionen durchgeführt sowie Fremdeinflüsse und Messfehler minimiert werden, so dass eine Validierung mit messtechnischen Ergebnissen weitaus schwieriger ist. Allerdings sollte hier der Nachteil der numerischen wellenoptischen Simulationsverfahren ebenfalls nicht



verschwiegen werden. Sie sind nur auf einfache geometrische Wellenleiterstrukturen (z.B. Schichtwellenleitermodell) anwendbar und benötigen einen enormen Rechenaufwand.

Um die strahlenoptische Simulation in Wellenleitern mit nanorauen Kerngrenzflächen zu validieren, wurden Vergleichsrechnungen mit Hilfe der wellenoptischen *Coupled Mode Theory* durchgeführt [4]. Hierbei wurden die Modenleistungsverteilung sowie das Dämpfungsverhalten bei Anregung des TE20 Modes in einen geradlinigen symmetrischer Schichtwellenleiter  $(NA=0.177, h=120\lambda, \lambda=0.85\mu m)$  mit nanorauen Kerngrenzflächen  $(Rq=50nm, D=2\mu m)$  für unterschiedliche Wellenleiterlängen mit beiden Verfahren berechnet. In Abbildung sind die Ergebnisse beider Verfahren dargestellt, die eine hervorragende Übereinstimmung aufweisen.



ABBILDUNG 30: MODENLEISTUNGSVERTEILUNG SOWIE DÄMPFUNGSVERHALTEN DES EINGEKOPPELTEN TE20 MODES

Insbesondere das Dämpfungsverhalten des TE20 Modes zeigt, wie stark die Verluste aufgrund von Oberflächenrauigkeiten im Nanometer-Bereich sind. Nach einer Wellenleiterlänge von 10cm stellen sich Verluste von 0.25dB ein. Vergleicht man dies mit typischen Materialdämpfungen von 0.05dB/cm, so verdeutlicht dies die Signifikanz von Oberflächenrauigkeiten.

Eine weitere Validierung des strahlenoptischen Simulationsverfahrens befasst sich mit der Simulation von Krümmungsverlusten in Schichtwellenleitern. Hierbei wird als wellenoptisches Vergleichsverfahren die *Quasi-Guide Mode* Theorie verwendet, mit der die Modenausbreitung in Schichtwellenleiterkrümmungen exakt nachgebildet werden kann. Ein geradliniger Vorlauf sowie ein geradliniger Nachlauf von je 50mm Länge werden der 90°-Wellenleiterkrümmung des Schichtwellenleiters angefügt, der einen Kerndurchmesser von 50µm und eine numerischer Apertur von NA=0.2 bzw. NA=0.3 aufweist. Der Vorlauf wird mit einem Gaußstrahl (Divergenzwinkel =5°) angeregt und das Verhältnis aus der optischen Leistung am Ende des Nachlaufs zur optischen Leistung vor Krümmungsbeginn über verschieden Krümmungsradien in Abbildung 29 dargestellt. Die blaue Kurve stellt das Ergebnis des strahlenoptischen Verfahrens dar und die grüne das Ergebnis des wellenoptischen Referenzverfahrens.





Abbildung 29: Krümmungsverluste im schichtwellenleiter mit  $h=50\mu M$  ( $N_1=1.56$ ,  $\lambda=0.85\mu M$ )

Es zeigt sich eine hervorragende Übereinstimmung der Krümmungsverluste beider Verfahren. Insbesondere für sehr kleine Radien (<5mm) erhält man sehr gute Übereinstimmungen, die speziell für die Entwicklung von optischen Steckverbindern von großem Interesse sind. Sehr schön zeigt sich auch hier, dass eine Vergrößerung der numerischen Apertur mit einer Verringerung der Krümmungsverluste einhergeht. Dies resultiert aus der stärkeren Lichtführung des Wellenleiters. Eine oftmals gestellte Frage zur Anwendbarkeit der strahlenoptischen Simulation bei kleinen Kernabmessungen beantwortet nachfolgende Abbildung 30. Hier wurde der Kerndurchmesser des Schichtwellenleiters von 50µm auf 15µm reduziert, wobei auch hier die Ergebnisse beider Verfahren weiterhin hervorragend übereinstimmen. Dies zeugt, dass die Strahlenoptik durchaus anwendbar ist für kleine Kernabmessungen bis zu 15µm.



Abbildung 30: Krümmungsverluste im schichtwellenleiter mit  $h=15\mu M$  ( $n_1=1.56$ ,  $\lambda=0.85\mu M$ )

Vergleicht man die Kurvenverläufe in Abbildung 29 und Abbildung 30, so stellt man fest, dass die Schichtwellenleiter mit kleiner Kernabmessung deutlich geringere Krümmungsverluste aufweisen. Wellenleiter mit kleiner werdenden Kerndurchmessern erlauben somit auch kleiner werdende Biegeradien. Allerdings bleibt hier zu beachten, dass damit auch eine Erhöhung der Einkoppelverluste zwischen optischer Quelle und Wellenleiter entstehen kann.

Neben der stationären Analyse des Übertragungsverhaltens erlaubt die integrierte Entwurfsumgebung auch eine transiente Analyse im Zeit- und im Frequenzbereich. Im Zeitbereich werden Sprungantworten verwendet, die sich entlang des Wellenleiters bei sprungförmiger Anregung der optischen Quelle ergeben. Aufgrund von intermodalen Dispersionen sowie Signaldämpfungen aufgrund von Wellenleiterverlusten verschleifen diese Sprungantworten mit zunehmender Wellenleiterlänge. Im Frequenzbereich werden Transferfunktionen zur



Charaktersierung des transienten Übertragungsverhaltens verwendet, die sich aus den Sprungantworten durch zeitlich Ableitung sowie Fourier Transformation berechnen lassen. Als Simulationsbeispiel sind Sprungantworten und korrespondierende Transferfunktion eines Kanalwellenleiters ( $h=w=70\mu m$ ) dargestellt, der aus einem 20mm langen geradlinigen Vorlauf, einer 90°-Wellenleiterkrümmung (R=10mm) sowie einen 10mm langen geradlinigen Nachlauf besteht. Der Wellenleiter zeigt somit eine Gesamtlänge von 45mm und eine numerische Apertur von NA=0.25 auf. Als Anregung wurde ein Quellenmodell (UMD-100) verwendet, dass den gesamte Führungsbereich des Wellenleiters homogen ausleuchtet. Sprungantwort sowie Transferfunktion sind als blaue Kurve in Abbildung 31 dargestellt. Man erkennt, dass die Sprungantwort aufgrund von Krümmungsverlusten nicht den Wert Eins erreicht. Dieser wird nur im Fall einer verlustfreien Übertragung erreicht. Zudem erkennt man die Verschleifung der Sprungantwort sehr schön, die zu einer endlichen Anstiegszeit (20/80) von  $t_r=1.65ps$  führt. Um den Einfluss des Kernquerschnitts sowie von Oberflächenrauigkeiten auf das transiente Übertragungsverhalten zu untersuchen, wurden der quadratische Wellenleiterkernquerschnitt durch einen trapezförmigen ersetzt, der eine mittlere Breite von w=70µm bei einer Flankenschräge von 22.5° aufweist. Die Kernhöhe wurde unverändert beibehalten. Der grüne Kurvenverlauf in Abbildung 31 zeigt die resultierende Sprungantwort und Transferfunktion, die sich deutlich von den blauen Kurven des quadratischen Kernquerschnitts unterscheiden.



ABBILDUNG 31: TRANSIENTE SPRUNGANTWORT UND KORRESPONDIERE TRANSFERFUNKTION

Die dritte rote Kurve in Abbildung 31 stellt die Sprungantwort sowie die Transferfunktion des ursprünglichen Wellenleiters dar, wobei dieser nun mir Oberflächenrauigkeiten (Rq=50nm,  $D=\lambda$ ) versehen wurde. Auch hier zeigt sich eine deutliche Abweichung von den beiden anderen Kurven.



# PRAXISBEISPIEL OPTISCHER STECKVERBINDER ZWISCHEN BOARD UND BACKPLANE

Die im nachfolgenden vorgestellten Lösungen sind das Ergebnis eines gemeinschaftlichen Entwicklungsprojektes der Firmen Tyco Electronics, vario optics AG und der Siemens AG SIS C-LAB [6]. Ziel des Projektes war die Demonstration einer durchgehend optischen Übertragung über 12 parallele, planar integrierte optische Wellenleiter von einem Board über die Backplane zu einem zweiten Board. Dabei sollten die beiden Boards auf der Backplane passiv steckbar sein und den Anforderungen elektrischer Steckverbinder mit lateralen Auffangtoleranzen von bis zu ±1mm und axialen Toleranzen von bis zu 2mm genügen. Darüber hinaus sollte die passive optische Kopplung zwischen aktiven optischen Modulen und den Wellenleitern sowie eine passive optische Kopplung zwischen optischen Multimode Fasern und den Wellenleitern ebenfalls demonstriert werden.



ABBILDUNG 32: ENTWURF EINES OPTISCHEN BOARD-BACKPLANE DEMONSTARTORS UND FLEXTAIL KOPPELKONZEPT

## KOPPELKONZEPT – FLEXTAIL

Diese aus optischer Sicht sehr groben Toleranzanforderungen, die an das zu entwickelnde optische Steckersystem gestellt werden, fordern ein neues robustes (hohe Anzahl von Steckzyklen), verlustarmes (Koppelverlust <0.5dB) sowie mechanisch flexibles Koppelkonzept. Letztere Eigenschaft ist notwendig, um die Forderung nach der axialen Toleranz heutiger Board-Backplane Steckverbinder erfüllen zu können. Das im Gemeinschaftsprojekt entwickelte innovative Koppelkonzept sieht mechanisch flexible Ausleger der optischen Lage vor (siehe Abbildung 32b), die die Wellenleiterkerne durch Aussparungen in der Leiterplatte hindurch aus der Ebene der optischen Lage zur Oberfläche der Leiterplatte führen können. Dadurch ergibt sich eine annähernd verlustfreie, durchgehend geführte optische Verbindung zwischen der optischen Lage im Inneren der Leiterplatte und der Oberfläche der Leiterplatte. Durch Terminierung der auch als FlexTails bezeichneten Ausleger mittels konventioneller optischer Steckverbinder, die aus der Faseroptik bekannt sind, können die gestellten Anforderungen an den Board-Backplane-Steckverbinder erfüllt werden.

## Projektergebnisse

Im Projekt wurden mechanisch flexible optische Lagen mit 12 parallel integrierten optischen Wellenleitern (NA=0.33, Kernabmessung  $50x50\mu m^2$ , Mittenabstand der Kerne 0.25mm) hergestellt, die auf beiden Seiten einen Ausläufer, den sogenannten FlexTail, aufweisen. Diese optischen Lagen wurden in die Leiterplatten eingebettet, wobei die FlexTails durch Aussparung



in der Leiterplatte auf die Oberfläche der Leiterplatte geführt werden können. In einem weiteren Schritt wurden die Enden der FlexTails mit halbseitig ausgefrästen MT-Steckverbindern entsprechend Abbildung 33 terminiert. Um die erforderlichen lateralen und axialen Positionsgenauigkeiten zwischen den stoßkoppelnden Wellenleiterkernen zweier Steckverbinder für einen geforderten maximalen Koppelverlust von 0.5dB bestimmen zu können, wurden Simulationsarbeiten zur Koppeleffizienz durchgeführt. Aus diesen Arbeiten konnte unter Annahme einer Stoßkopplung beider Wellenleiterkerne eine maximal erlaubte laterale Positionsabweichung von 3.9µm (true position) bestimmt werden. Für die axiale Abweichung von der Stoßkopplung der Wellenleiterkerne konnte unter Annahme einer perfekten lateralen Ausrichtung eine Distanz von 4.2µm bestimmt werden. Diese hohen Toleranzanforderungen stellen eine der größten Herausforderungen in der Terminierung der FlexTails mit den MT-Steckverbindern dar. Neben einer hohen Formgenauigkeit des optischen Lagenaufbaus müssen deren Wellenleiterkerne hoch präzise zu den MT-Löchern des Steckverbinders ausgerichtet werden. Hierzu wurde vom Projektpartner Tyco Electronics ein Werkzeug entwickelt, dass während der Verklebung des FlexTail diesen innerhalb der halb offenen MT-Ferrule mit entsprechender Genauigkeit ausrichtet.



Abbildung 33: FlexTail terminierung mit modifziertem MT-Steckverbinder, a.) Draufsicht ,B.) Frontsicht

Für den Aufbau eines optischen Steckverbinders für Board-Backplane-Lösungen wurde die in Abbildung 34a dargestellte kommerziell verfügbare LIGHTRAY<sup>T</sup> MPX Backplane Lösung der Firma Tyco Electronics verwendet. Hierzu wurden die MT-Steckverbinder der FlexTails mit Hilfe von Standardtechniken in MPX-Konnektoren eingesetzt. Die Backplane wurde für jeden Board-Backplane Steckverbinder um ein Front-Panel erweitert, um den MPX-Adapter aufnehmen zu können und dem FlexTail mit ausreichendem Biegeradius um 90° zu biegen. Auf der Board Seite wurde ein MPX-Gehäuse mittels *PressFit* Technik auf der Leiterplatte aufgebracht. Beide MPX-Konnektoren sind schwimmend in dem MPX-Gehäuse und dem MPX-Adapter gelagert. Ihre eingebetteten MT-Steckverbinder werden über eine Federspannung für eine Stoßkopplung nach außen gepresst.



ABBILDUNG 34: A) LIGHTRAY<sup>T</sup> MPX BACKPLANE LÖSUNG B) LIGHTRAY<sup>T</sup> MPX BACKPLANE LÖSUNG FÜR LEITERPLATTEN-INTEGRIERTE OPTISCHE WELLENLEITER



Mit diesem System wird die geforderte Ausrichtungsgenauigkeit der optischen Wellenleiterkerne in einem dreistufigen Ausrichtungsprozess bei der Board-Backplane Kopplung erreicht. Zunächst wird durch Führungsschienen des Frontpanels das Board zur Backplane ausgerichtet, so dass MPX-Gehäuse und MPX-Adapter mit einer lateralen Positionstoleranz von 2mm zueinander ausgerichtet sind. Dies entspricht der Auffangtoleranz beider Komponenten. Diese wiederum richten beim Einsteckvorgang ihre MPX-Konnektoren so aus, dass diese eine laterale Positionstoleranz von weniger als 0.3mm zueinander haben. Dies ist für die Ausrichtung von stoßkoppelnden MT-Ferrulen ausreichend, da ihre MT-Löchern einen Durchmesser von 0.7mm aufweisen. Mit Hilfe der MT-Ferrulen erreicht man dann eine laterale Ausrichtungsgenauigkeit der stoßkoppenden Wellenleiterkerne von 0.002mm. Aufgrund der Federspannung der MT-Ferrulen werden diese nach dem Steckvorgang gegeneinader gepresst, so dass keine axialer Abstand zwischen den stoßkoppelnden Wellenleiterkernen entsteht.

Der aufgebaute Systemdemonstrator ist in Abbildung 35 dargestellt und besteht aus zwei Boards und einer Backplane, die eine durchgehende optische Verbindung über 12 parallele optische Wellenleiter mit einer Übertragungsstrecke von 480mm realisiert.





Neben den Board-Backplane Koppelstellen wurden auf den Boards zusätzlich MPX-Koppelstellen zur Ankopplung von Fasern und aktiven optischen Transceivermodulen aufgebaut. Bei der Fasersteckverbindung wurde der MPO-Faserstecker eines Faserbündels mit Multimode-Stufenindex-Fasern (MM-SI Ø50, NA=0.2) disassembliert und die übrigbleibende MT-Ferrule auf die MT-Ferrule des MPX-Konnektors gesteckt.







Bei der Modul-Board-Kopplung wurde der MPX-Konnektor disassembliert und die MT-Ferrule des FlexTails auf die MPO kompatible Schnittstelle des aktiven optischen Transceivermoduls gesteckt. Beide Kopplungen sind rein passiv und werden allein durch die MT-Stifte/Löcher des MT-Steckverbinders erreicht. Zur statischen Charakterisierung wurden Einfügedämpfungen aller zwölf Wellenleiter vermessen. Dabei wurde mittels einer Multimode-Stufenindex-Faser (MM-SI Ø40, NA=0.22) und Index angepasstem Öl in die Wellenleiter des ersten Boards eingekoppelten und die optische Ausgangsleistung des Wellenleiters mittels einer weiteren Multimode Stufenindex Faser (MM-SI Ø200, NA=0.37) am zweiten Board aufgenommen. Die Einfügedämpfungen der Übertragungsstrecke mit einer Gesamtlänge von 480mm und zwei Board-Backplane Koppelstellen ist in Abbildung 37 dargestellt. Die erhöhte Einfügedämpfung der Wellenleiterkanäle #5 und #6 konnten durch Verunreinigungen im Kernmaterial des ersten Boards erklärt werden.



Abbildung 37: Einfügedämpfungen des Systemdemonstrator bestehend aus 2 Boards und einer backplane

Neben der statischen Charakterisierung wurden auch Augendiagramme (2.5Gbps,PRBS-23) für die gesamte optische Übertragungstrecke aufgenommen. Hierbei diente ein Faserbündel mit zwölf Multimode Stufenindex Fasern (MM-SI Ø50, NA=0.2) als Verbindung zwischen dem aktiven Transmittermodul und dem FlexTail des ersten Boards. Die MT-Ferrule des disassembliert MPX-Konnektors des zweiten Boards wurde direkt in das Receivermodul eingesteckt.



ABBILDUNG 38: EINFÜGEDÄMPFUNGEN DES SYSTEMDEMONSTRATOR BESTEHEND AUS 2 BOARDS UND EINER BACKPLANE

Bis auf den Wellenleiterkanal #6, der schon bei der stationären Charakterisierung durch hohe Einfügedämpfung von -13dB auffiel, konnten für alle anderen optischen Wellenleiterkanäle ein klares offenes Auge in der Messung nachgewiesen werden. Bemerkenswert ist insbesondere,



dass die Signalqualität über fünf passiv ausgerichtete Koppelstellen (Modul-Faser, Faser-Wellenleiter, 2x Board-Backplane, Wellenleiter-Modul) sowie einer gesamten Übertragungslänge von 480mm so gut ausfällt.

# LITERATURVERZEICHNIS

[1] H. Schröder; J. Bauer; F. Ebling; M. Franke; A. Beier; P. Demmer; W. Süllau; J. Kostelnik; R. Mödinger; K. Pfeiffer; U. Ostrzinski; E. Griese; "Temperaturstabile Wellenleiter und optische Kopplung für elektrooptische Leiterplatten"; *GMM/DVS-Tagung Elektronische Baugruppen. Aufbau- und Fertigungstechnik, 8. / 9. Februar 2006, Fellbach, Deutschland* 

[2] H. Schröder, N. Arndt-Staufenbiel, A. Beier, F. Ebling, M. Franke, E. Griese, S. Intemann, J. Kostelnik, T. Kühler, R. Mödinger, I. Roda, I. Schlosser: "Thin Glass Based Electrical-Optical Circuit Boards (EOCB) Using Ion-Exchange Technology for Graded Index Multimode Waveguides"; *Proc.* 58st Electronic Components and Technology Conference, Lake Buena Vista, Florida, USA (2008), pp. 268-257.

[3] H. Schröder, N. Arndt-Staufenbiel, A. Beier, F. Ebling, M. Franke, E. Griese, S. Intemann, J. Kostelnik, T. Kühler, R. Mödinger, I. Schlosser, U. Ostrzinski, K. Pfeiffer; "240 Gbit/s parallel optical transmission using double layer waveguides in thin glass sheets"; *2nd Int. Symp. on Photonic Packaging, IEEE-LEOS, Munich, 2008, Germany.* 

[4] Th. Bierhoff, A. Himmler, E. Griese, A.Wallrabenstein, G.Mrozynski; "Ray Tracing and its verification for the analysis of highly multimode optical waveguides with rough surfaces", *IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 37, No.5 pp3307-3310, 2001.* 

[5] Th. Bierhoff, J. Schrage; "Design and simulation of on-board optical interconnects", *IEEE Workshop on Interconnections within high speed digital systems, Santa Fee (USA), 2007.* 

[6] Th. Bierhoff, J. Duis, M. halter, F. Betschon, W. Rietveld, J. Schrage; "All optical pluggable boardbackplane interconnection system based on an MPX-FlexTail connector solution", IEEE Photonics Society, Proceedings of Winter Topicals, 2010, Mallorca (Spain).