

Optische Kurzstreckenverbindungen auf der Basis polymeroptischer Komponenten

An der Fakultät
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Dortmund
genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt
von
Björn Wittmann

12. März 2004

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1998 bis 2001 am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Fakultät für Elektrotechnik an der Universität Dortmund bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Neyer. Sie basiert auf Ergebnissen des Forschungsprojektes „OIIC“ (Optically Interconnected Integrated Circuits) der Europäischen Union und dem DFG Projekt „Temperaturstabile Multimode-Komponenten aus Polymeren für die optische Kurzstreckentechnik“. Für das Zustandekommen und die Finanzierung beider Projekte sei beiden Institutionen an dieser Stelle gedankt.

Herrn Professor Neyer danke ich für die interessante Themenstellung, die Betreuung und Begleitung der vorliegenden Arbeit durch zahlreiche Anregungen sowie die hervorragenden Arbeitsbedingungen am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund.

Herrn Dr. Matthias Jöhnck, Dipl.-Phys. Stefan Lehmacher, Dipl.-Phys. Markus Teepe, Dr. Guido Pompe, Dipl.-Ing. Dirk Siepe, Dipl.-Phys. Stefan Kopetz, Dipl.-Phys. Oliver Kaiser, Dipl.-Ing. Dirk Nüsse und Dipl.-Phys. Matthias Maluck danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung meiner Arbeit. Dipl.-Phys. Erik Rabe und Dipl.-Ing. Jörg Jankowski lieferten mit ihren Studien- und Diplomarbeiten wichtige Beiträge, die zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Frau Iris Spengler, Hans Georg Scholz, Werner Grunwald und allen Mitarbeitern des Lehrstuhls Hochfrequenztechnik danke ich für das fruchtbare Arbeitsklima und die gute Zusammenarbeit.

Den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt danke ich für die aktive Unterstützung in mechanischen Fragestellungen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vielmodige, optische Datenübertragung	3
2.1	Optische Verbindungen für Kurzstrecken	3
2.2	Optische Systeme zur Datenübertragung	9
2.2.1	Das Paroli Modul (Infineon)	9
2.2.2	Das Polo-Projekt	10
2.2.3	Das NEC-Interconnect-Modul mit Image-Faser	11
2.2.4	Weitere Projekte zur optischen Verbindungstechnik	13
3	Optically Interconnected ICs (OOIC)	15
3.1	Das EU-Projekt OIIC	15
3.1.1	Lichtsender in OIIC	16
3.1.2	Lichtempfänger in OIIC	18
4	Optische Kurzstreckenverbindung auf POF Basis	23
4.1	Entwicklungsziel	23
4.1.1	Das Dämpfungsspektrum der 120/125 μm POF:	25
4.1.2	Die 120/125 μm POF: Biegeradien	31
4.1.3	Die 120/125 μm POF: Stirnflächenpräparation	32
4.2	Realisierung	35
4.2.1	Die 120/125 μm POF Bändchenherstellung	36
4.2.2	Die Steckertechnologie: Lochplatten aus Plexiglas	36
4.2.3	Bauteilrealisierung	38
4.3	Charakterisierung	43
4.3.1	Temperaturstabilität	43
4.3.2	Verluste durch Versatz	44
4.3.3	Messung des Brechungsindex der POF	49
4.3.4	Bandbreiten und Übersprechen	51
4.4	Optisches Leistungsbudget im Demonstrator	52
4.4.1	Einkopplung in die POF	54
4.4.2	Auskopplung auf den Photodetektor	55
4.4.3	Vergleich mit der Spezifikation	56

5	Eine Basiskomponente für optische Kurzstreckenverbindungen: Der Sternkoppler	57
5.1	Herstellungstechnologien für Polymerwellenleiter	59
5.1.1	Photochemische Verfahren	59
5.1.2	Ablationsverfahren	61
5.1.3	Abformtechniken	62
5.2	Realisierung der Vorform	66
5.2.1	Prinzip der Vorformherstellung	66
5.2.2	Aufbringen der Lackschichten	67
5.2.3	Softbake und Post-Exposure-Bake	68
5.2.4	Belichtung des SU-8	69
5.2.5	Entwicklung	70
5.2.6	Metallisierung	71
5.2.7	Elektrochemische Abformung	71
5.3	Wellenleiterherstellung	71
5.3.1	Der Abformprozess	71
5.3.2	Verfüllen der Wellenleiter	73
5.3.3	Verarbeitete Materialien	73
5.4	Charakterisierung der Stempel	76
5.4.1	Messtechnik	76
5.4.2	Homogenität der Lackoberflächen	78
5.4.3	Kanalquerschnitte	79
5.4.4	Form der Verzweigerspitzen	80
5.4.5	Qualität der Grenzflächen	80
5.4.6	Seitenwände im SU-8	82
5.5	Wellenleiter-Dämpfungen	84
5.6	Charakterisierung der Koppler	85
5.6.1	Teilungsverluste	86
5.6.2	Dämpfungsmessungen an 8x8 Kopplern	86
5.7	Bewertung	87
5.8	Realisierte Komponente	90
6	Herstellung und Charakterisierung von Sternkopplern mit Mischerstruktur	93
6.1	Sternkoppler mit Mischerstruktur	93
6.2	Herstellungstechnik	94
6.2.1	Herstellung des Nickel Prägeblechs	94
6.2.2	Heißprägen des PMMA Substrates	95
6.2.3	Realisierung der Mischer-Sternkoppler	96
6.3	Messungen	98
6.3.1	Vorbereitung und Messaufbau	98
6.3.2	Durchführung der Messung	98
6.3.3	Auswertung	99
6.4	Bewertung	100
7	Zusammenfassung und Ausblick	101

8 Anhang

105

Abkürzungsverzeichnis

AlGaAs	Aluminium Gallium Arsenid
BER	BitErrorRate
BK7	BorKronglas
BL	Bandbreitenlängenprodukt
CMOS	Complimental Metal Oxid Semiconductor
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
ESPRIT	European Science PRogramme on Information Technology
EU	Europäische Union
GI	Gradientenindex
HeNe	Helium Neon
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers, INC
HAN	Home Area Networks
InP	IndiumPhosphor
KOH	Kaliumhydroxid
LAN	Local Area Network
LIGA	Lithographie Galvanik Abformung
MA	Methylacrylat
MCM	Multi-Chip-Module
MT	Mechanical Transfer
NA	Numerische Apertur
n_{cl}	Brechungsindex des Fasermantels
n_{co}	Brechungsindex des Faserkerns
NRZ	Non Return to Zero
OIIC	Optical Interconnected Integrated Circuits
ORMOCER	Organically Modified Ceramics
OPB	Optical Pathway Block
PC	Polycarbonat
PD	Photodiode
PDMS	Polydimethylsyloxan
PEB	Post Exposure Bake
PFPMA	Pentafluorphenylmethacrylat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PMMA-POF	Polymethylmethacrylat
PMMA-GI-POF	Polymethylmethacrylat-Gradientenindex-Plastik Optische Faser
POF	Plastik Optische Faser
POLO	Parallel Optical Link Organization

POPCORN	Polymer Optical Passive COmponents Research Network
PF	Perfluoriniert
PF-GI-POF	Perfluorinierte Gradientenindex Plastik Optische Faser
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence
REM	Raster Elektronen Mikroskop
RIE	Reaktives Ionen Ätzen
RNF	Refractive NearField
SI	Stufenindex
SIGA	Silizium Galvanik Abformung
SI-POF	Stufenindex Plastik Optische Faser
ST	Segment Typ
TFE	Tetrafluorethylen
UV	Ultraviolett ($\lambda < 400$ nm)
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VDF	Vinylidenfluorid
VLSI	Very Large Scale Integration

1 Einleitung

Die schnelle Übermittlung von Information stellt eine wichtige Grundlage der heutigen Industriegesellschaft dar. Durch das Internet können Geschäfte über große Entfernungen abgewickelt werden, gesellschaftliche und politische Gruppen können mit Homepages weltweit über sich informieren. Durch die fortschreitende Technisierung des Alltags (z.B. Computer, Multimedia im Auto und Prozessor-gesteuerte Motoren) rückt die Übertragung großer Datenmengen über *kurze* Strecken in den Fokus der technischen Entwicklung [1, 2, 3, 4]. Für diesen Anwendungsbereich ($\ll 1$ km) ist die einmodige Glasfaser, etabliertes Medium in der Fernverkehrstechnik, weniger geeignet, da diese mit einer aufwendigen und somit teuren Verbindungstechnologie einhergeht [5]. Auch ist die geringe optische Dämpfung und damit große Reichweite auf kurzen Strecken nicht von entscheidender Bedeutung. Wichtiger ist auf kurzen Strecken, kostengünstige Netze realisieren zu können. Eine Alternative stellt die vielmodige optische Faser dar. Diese Faser existiert in einer Glas- und einer etwas kostengünstigeren Kunststoff-Variante [6]. Mit der vielmodigen Faser wird die Verbindungstechnik einfacher und damit kostengünstiger, da die Justagetoleranzen für die Faser größer werden. Durch die vergrößerten Toleranzen lassen sich als Komponenten-Material Kunststoffe einsetzen, die kostengünstig und mit Spritzgußtechnik formbar sind [7].

Für den Aufbau von vielmodigen, optischen Netzwerken werden passive Komponenten zur Verteilung der Information auf verschiedene Empfänger benötigt. Ein wichtiges Bauteil ist hierbei der optische Koppler. Mit diesem Bauteil kann die Information, die von einem Gerät gesendet wird, auf mehrere Empfänger verteilt werden. Diese Bauteile sollen kostengünstig verfügbar sein und wenig Zusatzdämpfung verursachen. In dieser Arbeit werden zwei Technologien zur Kopplerherstellung in Kunststoff untersucht.

Durch die Entwicklung von 2D Senderarrays mit hoher Packungsdichte (VCSEL; Vertical Cavity Surface Emitting Laser) kann eine größere Anzahl von Datenkanälen zur parallelen Datenübertragung genutzt werden. An der Entwicklung solcher Systeme wird seit einiger Zeit gearbeitet. Solche Systeme bestehen im wesentlichen aus drei Teilen: Lichtsender, optisches Übertragungsmedium und Lichtempfänger. Als Empfänger stehen Photodioden zur Verfügung, die auch in Arrays angeordnet werden können. Als Lichtführungsmedium stehen die oben erwähnte vielmodige Glas- und Kunststofffaser zur Verfügung. Die Glasfaser empfiehlt sich durch die geringe Dämpfung und hohe Bandbreite. Für die Kunststofffaser spricht die hohe Flexibilität und der große Faserkernradius. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kunststofffaser mit abnehmender Verbindungs-länge an Bedeutung gewinnt. In dieser Arbeit wird ein vielkanaliger, optischer Datenbus zur Kommunikation zwischen Prozessoren realisiert.

Im folgenden Kapitel 2 wird ein Literaturüberblick gegeben. Im Bereich der Kunststoffwellenleiter wird auf Herstellungsverfahren eingegangen und für Übertragungssysteme werden alternative Ansätze beschrieben. Kapitel 3 geht dann ausführlich auf das

EU-Projekt OIIC (Optical Interconnected Integrated Circuits) [8] ein, innerhalb dessen der optische Datenbus realisiert wird.

In Kapitel 4 wird gezeigt, dass mit Hilfe der Plastik Optischen Faser (POF) ein optischer Datenbus zur Verbindung von Prozessoren realisiert werden kann. Optisches Führungsmedium ist hier die 125/120 μm SI-POF (Stufenindex-Plastik-Optische-Faser). Zuerst wird die verwendete Faser charakterisiert und deren Dämpfungscharakteristik, sowie die Dämpfung in Abhängigkeit vom Faserbiegeradius und die Kopplungsdämpfung für verschiedene Stirnflächenpräparationen gemessen. Im nächsten Teil werden die Realisierung und die dafür notwendigen Komponenten beschrieben. Daran schließt sich die Charakterisierung des realisierten Bauteils an. Dazu werden die Temperaturstabilität des Bauteils festgestellt, Messungen und Berechnungen für axialen und lateralen Versatz sowie nur Berechnungen für den Winkelversatz durchgeführt, der Brechungsindex des Faserkerns gemessen und eine Bandbreitenmessung vorgestellt. Zum Schluß wird überprüft, ob der optische Datenbus die geforderten Spezifikationen erfüllt.

In Kapitel 5 und 6 werden kostengünstige Techniken entwickelt mit deren Hilfe Sternkoppler in Kunststoff hergestellt werden können. Einerseits werden Koppler mit Kaskadenstruktur beschrieben, deren Vorformen mit Dicklacktechnik (Schichtdicken $\gg 10 \mu\text{m}$) realisiert werden. In dieser Technik wird das in der Halbleitertechnik etablierte Lithographie-Verfahren verwendet. Anschließend wird Nickel galvanisch abgeschieden. Mit der so hergestellten Form können Wellenleiterstrukturen mit Heißprägen realisiert werden. Nach dem anschließenden Auffüllen mit einem optischen Kleber ist der Wellenleiterherstellungsprozess beendet. Die für optische Lichtführung wichtigen Parameter wie Rauheit der Wellenleitergrenzflächen werden gemessen und angegeben. Zum Schluss wird eine Dämpfungsmessung an einem realisierten Wellenleiter durchgeführt.

Schließlich wird in Kapitel 6 die Herstellung von Sternkopplern mit Mischerstruktur beschrieben. In dieser Technologie wird mit Hilfe von KOH-Ätzen in Silizium eine Vorform hergestellt, mit der in Kunststoff Koppler abgeformt werden können. Wesentlicher Bestandteil dieser Koppler ist der so genannte Mischerbereich, an den sich direkt alle Fasern, parallel nebeneinanderliegend, anschließen. Vorteil dieser Technik ist die einfache Struktur, die mit etablierter Ätztechnologie realisiert werden kann. Die Abformung und Verklebung der Koppler wird beschrieben und schließlich werden Messergebnisse an den realisierten Kopplern vorgestellt.

Einzelerggebnisse dieser Arbeit werden in mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen dokumentiert [9]-[21].

2 Technologien für die vielmodige, optische Datenübertragung

In diesem Kapitel werden Technologien und Systeme für die vielmodige optische Datenübertragung vorgestellt. Im ersten Teil liegt der Schwerpunkt auf der Herstellungstechnologie von Wellenleitern, im zweiten Teil folgen ganze Systeme, das heißt Sender, Empfänger und Lichtleiter.

2.1 Optische Verbindungen für Kurzstrecken

Für die verschiedenen Verbindungslängen, im Bereich $\ll 1$ km, kann folgende Einteilung vorgenommen werden:

- Rack-to-rack (Verbindung zwischen Computern, Servern etc.)
- Board-to-board (z.B. Backplane)
- Multi-chip-Module (MCM)-to-MCM oder Intraboard
- Chip-to-Chip in einem einzelnen MCM
- Intra- oder on-chip

Diese Einteilung ist nicht immer eindeutig, wie im Falle der Intraboard und Chip-to-Chip Verbindungen, stellt aber eine hilfreiche Strukturierung dar. Im folgenden wird der Stand der Technik auf den verschiedenen Verbindungsebenen beschrieben.

Rack-to-Rack Verbindungen

Auf dieser Verbindungsebene wird der Datenaustausch zwischen Rechnersystemen oder Servern und Clients organisiert. Dieses breite Feld reicht von Intercomputer Verbindungen über die Großanlagensteuerung bis zur Vernetzung von elektrischen Geräten in einem Haus [1, 2, 3, 4]. Die heute in Local Area Networks verbreitete Übertragungsbandbreite pro Faser liegt bei 1 Gbit/s. Durch die Entwicklung neuer Komponenten (Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL), Glasfaser und/oder Plastik Optische vielmodige

Fasern) ist jetzt eine Erhöhung auf 10 Gbit/s möglich.

Besonders die VCSELtechnik stellt einen großen Fortschritt in der Datenübertragung dar. Neben preissenkenden technologischen Vorteilen (on chip Testing, hohe Modulationsgeschwindigkeiten bei niedrigem Bias, Spannungen kompatibel zur VLSI - Very Large Scale Integration - Technik und Temperaturunabhängigkeit) erleichtert der runde Strahlquerschnitt die Kopplung und Fokussierung [22]. Da bei den VCSELn die Abstrahlung senkrecht zur Halbleiteroberfläche erfolgt, ist mit ihnen auch die Realisierung von 2D-Laserfeldern möglich. Dadurch ist eine Vervielfachung der Übertragungsleistung gegeben. Bei der Parallelisierung muss allerdings die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in den Fasern berücksichtigt werden. Diese Differenz (engl.: skew) stellt einen limitierenden Faktor dar und begrenzt die praktisch realisierbare Übertragungslänge auf einige 100 m. Heutige Standardübertragungssysteme arbeiten mit 2,5 Gbit/s pro Kanal und erreichen mit 12 Kanälen eine Systemleistung von 30 Gbit/s [23]. Seit kurzem sind auch zweidimensionale Übertragungssysteme kommerziell erhältlich. Das sind Systeme deren Kanalein- und Kanalausgänge in zweidimensionalen Arrays angeordnet sind.

Die Wahl des richtigen Übertragungsmediums ist von großer Bedeutung für die Leistung des Systems. Auf den zur Zeit verbreiteten Fasern lassen sich Bandbreiten von 10 Gbit/s nicht erreichen. Durch Verwenden von Modulations- und/oder Multiplexing-techniken (z.B. Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM) lässt sich dieses Ziel aber mit einem geringen technischen Aufwand und ohne Austauschen der Fasern erreichen. Im Gigabit Ethernet Standard wird für den 850 nm-Wellenlängen Bereich, unter Verwendung von einer Faser mit einem $62,5 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser, eine maximale Übertragungslänge von 275 m bei einem Bandbreitenlängenprodukt von $200 \text{ Mhz} \cdot \text{km}$ definiert [24]. Durch Verringerung des Kerndurchmessers, der numerischen Apertur und einer erhöhten Herstellungsqualität ist aber auch schon eine max. Länge von 550 m bei einem Bandbreitenlängenprodukt von $500 \text{ Mhz} \cdot \text{km}$ demonstriert worden [25, 26].

Seit einiger Zeit wird auch die Plastik Optische Faser (POF) in der Datenkommunikation eingesetzt. POFs können mit weitaus größeren Kerndurchmessern (z.B. $120/125 \mu\text{m}$ statt $62/125 \mu\text{m}$) gefertigt werden als die Glasfaser und haben dadurch größere Justagetoleranzen. Damit können in Spritzgußtechnik hergestellte Komponenten benutzt werden, wodurch die Kosten weiter sinken. Neben der höheren Flexibilität sind die höheren Bandbreiten, das geringere Gewicht und der Wegfall der elektromagnetischen Interferenz (im Vergleich zur rein elektrischen Informationsübertragung) als Pluspunkte für die POF zu

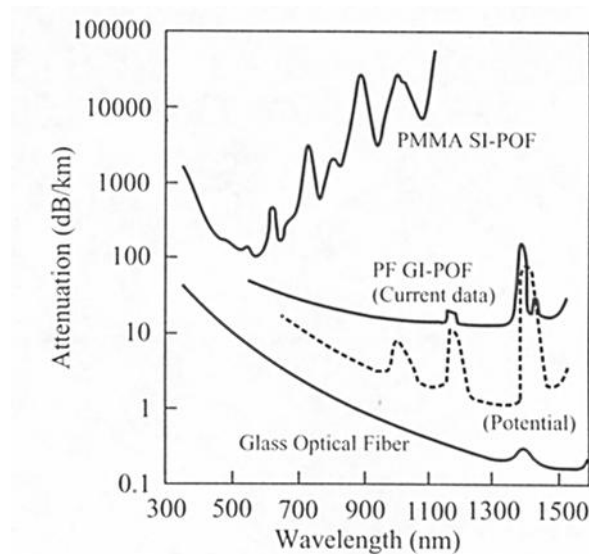


Abbildung 2.1: Dämpfungscharakteristika von POF, PF-POF und Glasfaser im Vergleich [27].

vermerken. Alle bedeutenden Hersteller der POF kommen heute aus Japan: Mitsubishi Rayon Co., Ltd., Asahi Kasei Co., Toray Industries, Inc. und Asahi Glas Company.

Ein großer Unterschied zur Glasfaser liegt in der spektralen Dämpfungscharakteristik der POF. Abbildung 2.1 zeigt im Vergleich die Charakteristiken von Stufenindex POF, perfluorinierte (PF) Gradientenindex (GI) POF und Glasfaser. Hier ist deutlich die geringere Dämpfung der Glasfaser im Vergleich zur POF erkennbar. Zum Beispiel liegt für die in der optischen Übertragungstechnik weit verbreiteten Wellenlänge um 850 nm die Glasfaser-Dämpfung bei 1 dB/km, während sie bei der SI-POF zu einigen 10000 dB/km gemessen wurde. Die hohen Dämpfungen der POF werden hauptsächlich durch Absorptionsresonanzen der CH-Bindungen verursacht. Ersetzt man die Wasserstoffatome durch wesentlich schwerere Fluoratome, kann diese Dämpfung stark reduziert werden. Die PF-GI-POF hat dann Dämpfungswerte um die 100 dB/km, welche durch ihr Gradientenindexprofil auch höhere Bandbreiten ermöglicht. Die von Asahi Glass angebotenen Faser Lucina™ hat ein Bandbreitenlängenprodukt von 200 Mhz*km bei einer Dämpfung von unter 50 dB/km im Wellenlängenbereich von 700 nm bis 1300 nm [28]. Interessant im Hinblick auf Bandbreiten ist die niedrige Materialdispersion der GI-POF, die unter der der PMMA-POF und sogar unterhalb der der Glasfaser liegt. Noch geringere Verluste von 10 dB/km sind nach [29] erreichbar.

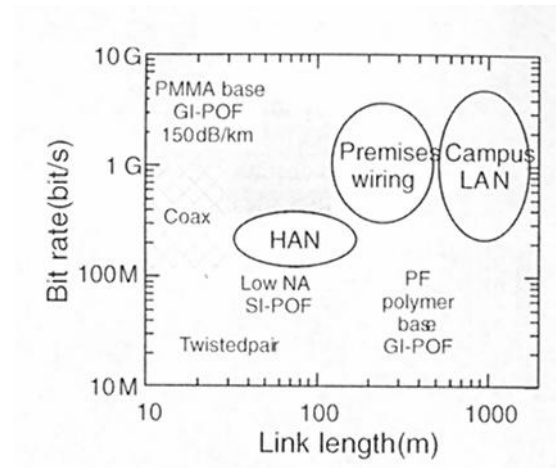


Abbildung 2.2: Einsatzfelder der POF [27].

Die PMMA(Polymethylmethacrylat)-POF ist für die gebräuchlichen Wellenlängen im Nahinfraroten nur auf Entfernungen von wenigen Metern einsetzbar. Abhilfe würde hier der Betrieb um 650 nm schaffen, da hier die Dämpfung unter 0,2 dB/m liegt. Allerdings nimmt die abgestrahlte Leistung der VCSEL unterhalb von 670 nm schnell ab.

Aus den beschriebenen Eigenschaften der POF ergeben sich folgende Anwendungsgebiete für die POF (siehe Abbildung 2.2): Die Stufenindex POF ist ein realistischer Ersatz für Twisted Pair und Coaxial Kabel (sog. Home area networks, HAN) und im digitalen Heimbereich (IEEE 1394: Firewire). Weiter benötigen Datenbusse für Multimedia oder Steuerungselektronik in Verkehrssystemen wie Autos, Zügen und Flugzeugen geringe Bandbreiten, profitieren aber stark von elektromagnetischer Verträglichkeit, geringer Größe und kleinerem Gewicht der POF [4, 30]. Für gehobene Ansprüche an die Datenrate empfiehlt sich ab 400 Mbit/s die PMMA-GI-POF. Allerdings werden dann 650 nm Transceiver benötigt. Werden die Weglängen größer, kann bis 300 m Distanz die PF-GI-POF eingesetzt werden. Allerdings dominiert hier wegen ihrer besseren Eigenschaften die Glasfaser, wie oben beschrieben wurde.

Was die Auskoppelseite der POF betrifft, so muss noch erwähnt werden, dass die große NA (numerische Apertur) auch Nachteile mit sich bringt: Der austretende Lichtspot ist groß und kann damit zu Übersprechen zwischen den Detektoren führen. Daher sollten diese entsprechend ausgelegt sein, um keine Lichtleistung zu verlieren und um das Modenrauschen zu minimieren, welches durch die erhöhte Diodenkapazität bedingt wird. Die Verwendung von zusätzlichen, optischen Komponenten (z.B. Linsen) ist deshalb weit verbreitet. Da in der POF der Lichtverlust höher ist, muss hier beim Systementwurf

berücksichtigt werden, dass auf der Detektorseite weniger Leistung zur Verfügung steht.

Board to Board

Die Verbindung zwischen Platinen innerhalb eines Rechners wird durch Backplanes ermöglicht. Im Folgenden werden kurz die technologischen Ansätze zum optischen Datenfluss in Rechnern beschrieben.

Durch Verwenden von Standardduplexkabeln, die direkt an die Platinen angesteckt werden können, wird in [31]-[33] die Datenübertragung realisiert. Allerdings ist die Verwendung von Kabeln keine optimale Lösung. Sie benötigen zusätzlichen Raum, müssen richtig gesteckt sein und verursachen zusätzliche Kosten.

Die Lichtführung in Form von Fasern ist ein weiterer vielversprechender Ansatz. Mehrere Projekte beschäftigten sich mit der Faserlichtführung, in denen die prinzipielle Machbarkeit demonstriert wird [34]-[39]. Allerdings erwiesen sich neben den Vorteilen, wie niedrige Dämpfung und hohe Bandbreite, auch Nachteile, wie aufwendiger Einbau, Schwierigkeiten beim Überwinden von Biegungen und das Fehlen einer funktionierenden Technik zur Massenfertigung.

Mit Hilfe von integrierten Wellenleitern scheinen diese Nachteile überwindbar. Auch hier konnten im Rahmen von mehreren Projekten große Fortschritte erzielt werden. In verschiedenen Projekten konnten Dämpfungen von 0,1 dB/cm bei 850 nm [40, 41, 42] bis zu 0,02 dB/cm bei 850 nm [43] gezeigt werden. Realisiert wurde ein passives Justagesystem [44] mehrkanalige Übertragung [41], Biegungen und sogar Kreuzungen [43]. In mehreren Projekten konnten hier Lösungsansätze gefunden werden [43].

Ein weiterer Ansatz ist die Freistrahloptik. Diese verspricht sehr hohe Datenraten (Tbit/s) und ist geometrisch geringeren Restriktionen unterworfen. Allerdings erweist sich hier die aufwendige Justage und instabile Übertragung als Nachteil [45, 46, 47], daher wird die Freistrahloptik in der Praxis kaum eingesetzt.

Eine Mischung aus Freistrahloptik und guided-wave Übertragung ist die so genannte Zig-zag Strahlführung. Das Licht wird in einem millimeterdicken, optisch transparenten Substrat geführt [48]. Hauptproblem in dieser Technologie ist die Packungsdichte von Sender/Empfänger. Bei einer Übertragungsentfernung von 10 cm muss der Abstand zwischen den einzelnen VCSELn schon 1 mm betragen.

Direkte optische Kommunikation von Board zu Board hat den Vorteil, dass auch hier die optische Kontaktierung zur Backplane wegfällt. Wie bei Freistrahloptik gibt es aber ein Justage- und Stabilitätsproblem [49].

Intraboard Verbindungen, Interchip und Intrachip

Eine nächste Verbindungsebene, unterhalb der Board zu Board Kommunikation, ist der Datentransfer innerhalb der Platine. Auch hier betragen die Verbindungslängen teilweise einige Meter und optische Datenübertragung könnte hier Abhilfe schaffen. Aus der Diskussion über die Backplane Verbindungen folgt als optimale Lösung der Wellenleiteransatz. Die zu findende Lösung soll in den Herstellungsprozess von Platinen mit möglichst geringem Aufwand integriert werden können. Als Substratmaterial werden auch hier Polymere untersucht. Folgende Anforderungen müssen von den Wellenleitern ohne Verschlechterung der optischen Eigenschaften erfüllt werden. Sie müssen

- Hohen Drücken (Lamination) und
- Hohen Temperaturen (Lamination, Bleifreies Löten, bis zu 200°C für 20 s) widerstehen,
- Passive Selbstjustage der Optoelektronik (keine neuen Maschinen!) ermöglichen,
- Wellenleiterdämpfungen um 0,1 dB/cm; max 5 dB auf 50 cm Länge erreichen

Zum Erreichen dieser Ziele sollte der Wellenleiter als Platinenkern integriert werden. Als Wellenlänge wird auch hier 850 nm bevorzugt, da dafür die Technologie vorhanden ist und zu akzeptablen Verlusten führt. Allerdings haben die 850 nm Bauteile für die immer geringer werdenden Spannungen in der Platinentechnik eine zu hohe Leistungsaufnahme, die Verwendung von 1,3 μm oder 1,55 μm wäre wünschenswert. [50, 1, 51].

Für die Ebenen von Intraboard, Interchip oder Intrachip wurde ebenfalls mit den verschiedenen Techniken wie Freistrahloptik [52]-[56], fasergeführte oder Wellenleiter-Optik experimentiert. Die Freistrahloptik erwies sich auch hier als nur für Laborexperimente geeignet. Durch die Verwendung von Imagefasern können gute Resultate erzielt werden [57]-[63]. Allerdings sind diese Fasern relativ dick und verursachen damit große Bieegeradien oder Bauhöhen.



Abbildung 2.3: Das Paroli Modul von Infineon (Länge des Bauteils: 5 cm).

2.2 Optische Systeme zur Datenübertragung

Die 90er Jahre können als das Pionierjahrzehnt für die Entwicklung von Systemen zur Kurzstrecken-Datenübertragung betrachtet werden. Durch die Entwicklung von 2D optoelektronischen Sende- (VCSEL) und Empfangseinheiten wurde es möglich parallele, optische Übertragungsstrecken zu realisieren. Zu dieser Zeit wurden optoelektronische Sendeeinheiten realisiert, die in 2D Rastern angeordnet werden können. Einen großen Stolperstein stellt hierbei die komplizierte und für Resonanzen anfällige Steuerelektronik dar. Außerdem sind die hohe Parallelisierung und Minituarisierung zu überwindende Probleme. Im Folgenden wird auf die optischen Charakteristiken der Systeme eingegangen. Ferner sollen drei Systeme vorgestellt werden, die Meilensteine der optischen Datenübertragung darstellen. Abschließend wird eine Liste mit Kenndaten weiterer Projekte präsentiert.

2.2.1 Das Paroli Modul (Infineon)

Im Rahmen des ESPRIT III Projekts der EU ist von Infineon Mitte der 90er Jahre eine parallele optische Verbindung realisiert worden [89, 90]. Mit Hilfe von VCSEL- und Photodioden(PD)-arrays werden die Daten über 12 Kanäle ausgetauscht. Zur optischen Führung des Lichtes wird ein Glasfaserbändchen mit einem $62,5 \mu\text{m}$ Kern verwendet. Die Stecktechnologie am Anfang und Ende des Bändchens beruht auf Mechanical Transfer(MT)-Technologie.

Abbildung 2.3 zeigt das Paroli Modul. Der schwarze Teil des Moduls stellt die Buchse für den Stecker des Faserbändchens dar. Der goldene Teil ist der Kühlkörper der Optoelek-

tronik. Als Sender werden auf GaAs basierende VCSEL benutzt, die bei 850 nm emittieren. Der Vorteil der VCSEL liegt in der geringen Größe sowie im niedrigen Schwellstrom (< 1 mA), der eine geringe Wärmeentwicklung garantiert. An der VCSEL-Oberfläche sind die Laserdioden eindimensional mit einem Abstand (Pitch) von $250 \mu\text{m}$ angeordnet. Die Fassung mit den Faserbündchen (die Fasern haben ebenfalls einen Abstand von $250 \mu\text{m}$) und den VCSEL werden separat auf einem Silizium-Substrat aufgebracht. Da die VCSEL nur mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ hergestellt werden, ist eine optische Brücke nötig. In dieser werden kurze Faserstücke vor den einzelnen VCSELn und zur anderen Seite in einem konstanten Raster von $250 \mu\text{m}$ positioniert.

Der Empfänger ist im Prinzip wie das Sendermodul aufgebaut. Anstelle der VCSEL werden Photodioden (PD) und die dafür nötigen elektrischen Verstärker verwendet. Die Photodiode liegt horizontal auf einem Silizium-Substrat und das ankommende Licht wird über einen Reflektor auf die PD umgelenkt. Die Betriebsspannung des Empfängers liegt bei 5 V und die benötigte Leistung beträgt 75 mW pro Kanal. Die von Sender und Empfänger benötigten Leistungen ergeben eine Gesamtleistung von 110 mW/Kanal. Laut Hersteller sollen mit dieser Verbindungstechnik Distanzen von bis zu 300 m (1 Gb/s) überbrückt werden können. Das Übersprechen betrug optisch -24 dB und elektrisch -48 dB. Die übertragene Leistung der Kanäle schwankte um 1 dB (Uniformität). Die geometrischen Abmessungen der Sende- und Empfangsmodule betragen 10 mm (Länge)* 5 mm (Breite)* 4 mm (Höhe).

2.2.2 Das Polo-Projekt

Das Parallel-Optical-Link-Organization(POLO)-Projekt wird von einem Konsortium, bestehend aus Agilent, AMP, Du Pont, SDL und der Universität von Süd-Kalifornien, betrieben [91, 92]. Das IC gesteuerte POLO-Modul arbeitet bei einer Wellenlänge von 980 nm. Die VCSEL liegen horizontal unter den 12 Wellenleitern und werden über einen Spiegel in die Wellenleiter eingekoppelt. Auf der VCSEL-Seite sind die Wellenleiter in einem $500 \mu\text{m}$ Raster und auf der Faserseite in einem Raster von $250 \mu\text{m}$ angeordnet. Somit kann auf der VCSEL-Seite optimal eingekoppelt werden. Im Empfängermodul sitzt statt des VCSEL eine PIN-Photodiode, über dem der Polyguide mit einem Raster von $360 \mu\text{m}$ positioniert ist. Das Sendemodul wird mit 3,3 V betrieben und das Empfängermodul mit 3 V. Die Einzelteile des POLO-Moduls (VCSEL, Detektor, MT-Stecker) sitzen auf einem Keramikuntergrund, der über 122 Pins die elektrische Verbindung mit den Chips herstellt. Über die multimodige GI-Glasfaser kann bei einer Bitfehlerrate von $\text{BER} < 10^{-12}$ und einer Bandbreite von 622 Mb/s eine Entfernung von bis zu 400 m zurückgelegt werden. Die Breite des POLO-Moduls beträgt 4 cm.

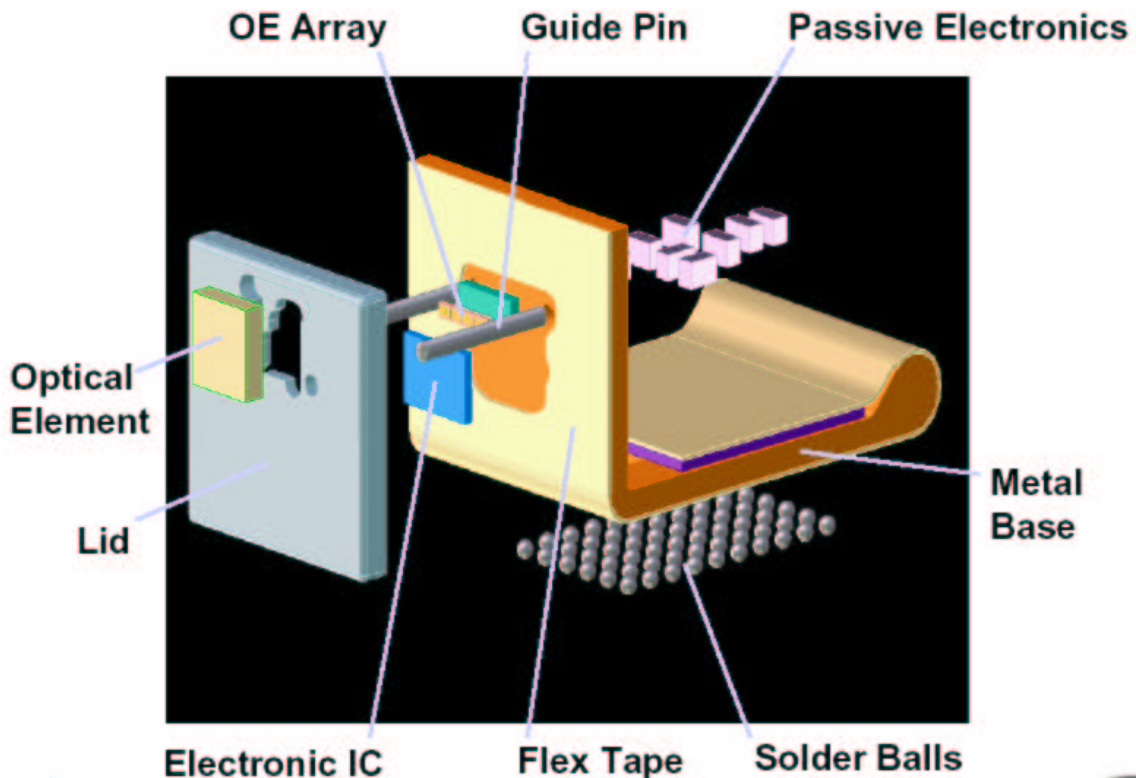


Abbildung 2.4: Das PONI Module (Hewlett Packard) des POLO Projekts

In der Weiterentwicklung des POLO Projektes wird ohne den Polyguide™ Wellenleiter gearbeitet [93, 94] und die Wellenlänge wird auf 850 nm geändert. Abbildung 2.4 zeigt das PONI Module, das Herzstück des POLO 2 Projektes in seinen Einzelteilen. Deutlich zu sehen ist die optisch aktive Einheit zwischen den MT-Pins (In der Abbildung 2.4 Guide Pin genannt). Durch diese Veränderung ist es jetzt auch möglich, 2D optische Verbindungen mit dem Modul anzusteuern.

2.2.3 Das NEC-Interconnect-Modul mit Image-Faser

Von der Firma NEC wurde ein neues Verfahren zur Datenübertragung vorgestellt [60]. Statt ein zweidimensionales Faser-Array zu entwickeln, entschied man sich für die Image-Faser, die üblicherweise zur Bildübertragung eingesetzt wird. Einkoppelt wird Licht aus einem upside-down gebondeten 6*6 VCSEL-Array, das bei 980 nm arbeitet. Die Image-Faser besteht aus 10000 super-thin Mikro-Glasfaserkernen ($n = 1,458$ bei 980 nm) mit einem Durchmesser von $3 - 4 \mu m$ sowie einer Schicht zwischen den Faserkernen von $5 \mu m$. Der Durchmesser des gesamten Faserkerns beträgt $460 \pm 25 \mu m$, und mit Mantel beträgt dieser $570 \pm 35 \mu m$. Realisiert werden 36 Kanäle (siehe 2.5).

Erreicht wurde eine Datenrate von 1 Gb/s; der minimale Biegeradius beträgt 10 mm

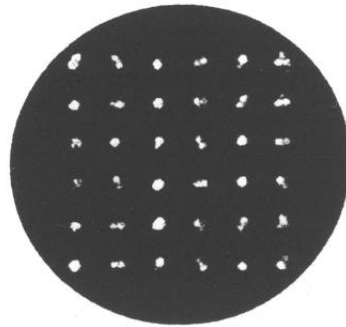


Abbildung 2.5: Endfläche der Imagefaser nach Datenübertragung

und die Dämpfung 10 dB/km. Die Faser kann in einer Länge von ungefähr 100 m gefertigt werden. Nachteil dieser Technologie ist der minimale Biegeradius von 10 mm zu beachten, der auf engstem Raum Einschränkungen mit sich bringt.

2.2.4 Weitere Projekte zur optischen Verbindungstechnik

In Tabelle 2.1 werden die Kennzahlen weiterer Projekte und Firmen, die sich mit optischer Datenübertragung beschäftigen, vorgestellt.

Firma	Kanal zahl	Mb/s/ /Kanal	max. Länge/m	BER 10^{-x}	Leistung [mW/K]	Faser- typ	Licht quelle	λ [nm]
Siemens	12	2000	300	14	110	MM	LD	850
Fujitsu	6	622	400	15	275	SM	LD	1300
Hitachi	12	200	100	20	200	SM	LD	1300
NEC	6	400	-	9	800	SM/MM	LD	1300
NTT	5	2800	250	11	2100	MM	LD	1300
OKI	12	310	200	14	240	MM	LD	1310
Motorola	10	400	300	14	135	MM	VCSEL	860
OETC	32	500	100	15	400	MM	VCSEL	850
Polo	10	622	400	16	300	MM	VCSEL	980
Vixel	4	1250	300	12	-	MM	VCSEL	840
Optobahn	10	1000	300	12	350	SM/MM	LD	1310
Teralink	48	3200	300	12		MM	VCSEL	850
Xanoptik	36	3400	1100	-	160	MM	850	

MM: Vielmodig; SM: Einmodig; mW/K: mW/Kanal

Tabelle 2.1: Kennzahlen weiterer optischer Verbindungstechnologien.

3 Optically Interconnected ICs (OOIC)

Im Rahmen dieses EU Forschungsprojektes OIIC wurde ein System zur Demonstration von optischer Datenübertragung zwischen Prozessoren aufgebaut. Lichtsender, Lichtempfänger, die zugehörige Steuerelektronik und das optische Verbindungsstück mussten dafür neu entwickelt bzw modifiziert werden. Dieser sogenannte Systemdemonstrator wurde von der Universität Ulm (VCSEL), der ETH Zürich (Photodioden, driver und receiver), der Firma Marconi Caswell (Zusammenbau der Optoelektronik), dem Forschungsinstitut IMEC-ELIS (Gesamtmontage und Charakterisierung des Systemdemonstrators) und Framatome-FCI (optisches Steckersystem) aufgebaut. Auftrag der Universität Dortmund in diesem Projekt und Teil dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Lichtleiters zur Verbindung von Lichtempfänger und -sender. In diesem Kapitel sollen die optoelektronischen Bauteile in OIIC vorgestellt werden.

3.1 Das EU-Projekt OIIC

Eine Skizze des Projektziels von OIIC ist in Abbildung 3.1 zu sehen: Die Realisierung einer Platine, auf der drei Prozessoren optisch miteinander kommunizieren können. Die Farben verdeutlichen, dass auf jedem Prozessor ein Lichtsender und ein -empfänger vorhanden sind. Da beide Prozessoren auf einer Platine befestigt sind, müssen zwei 90° Biegungen realisiert werden, um eine Gesamtbauhöhe von 5 mm (inkl. Optoelektronik) zu erreichen. Kleine Biegeradien müssen daher mit den Lichtleitern realisierbar sein. Durch eine hohe Parallelität der Lichtführung soll eine Gesamtbandbreite von 10 GBit/s erreicht werden. Aufgabe der Universität Dortmund war die Realisierung der optischen Verbindung zwischen VCSEL- und PD-Arrays. Für dieses Ziel musste ein geeignetes Übertragungsmedium gefunden werden. Dieses Medium soll eine geringe Dämpfung auf der zu realisierenden Strecke und geringe optische Verluste bei einem kleinen Biegeradius besitzen. Für die Ankopplung an die VCSEL- und PD-Arrays müssen die optischen Kanäle in einem 250 μm 2D-Raster angeordnet werden und schließlich passiv vor der Optoelektronik justierbar sein. Dafür sind in den optoelektronischen Einheiten Löcher vorhanden, in die metallische Führungsstifte gesteckt werden können. Im Folgenden wird auf die VCSEL und Photodiodentechnologie eingegangen.

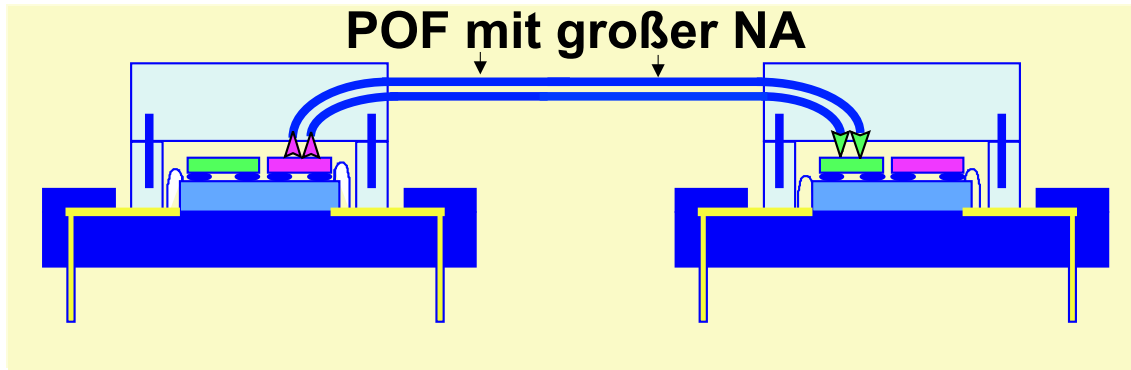


Abbildung 3.1: Zwei Prozessoren mit VCSEL und Photodioden sollen mit Hilfe eines Lichtleiters verbunden werden. Die optische Verbindung der Prozessoren ist nur in einer Richtung gezeichnet.

3.1.1 Lichtsender in OIIC

Für die Realisierung einer schnellen Datenübertragung wurde die VCSEL Technologie ausgewählt. Im Gegensatz zu anderen Halbleiterlasern emittieren diese nicht parallel, sondern senkrecht zur Festkörperoberfläche. Diese Laser besitzen zum einen hohe Ausgangsleistungen bei niedriger Leistungsaufnahme, zum anderen lassen sie sich in zweidimensionalen Rastern anordnen. Dadurch lässt sich eine hohe Parallelität erreichen und damit hohe Bandbreiten. Für OIIC sollten Lichtsender mit folgenden Eigenschaften entwickelt werden:

- Emission bei 980 nm
- 2D Raster mit $250 \mu\text{m}$
- 1 mW Ausgangsleistung
- 1,5 Gbit/s Modulationskapazität

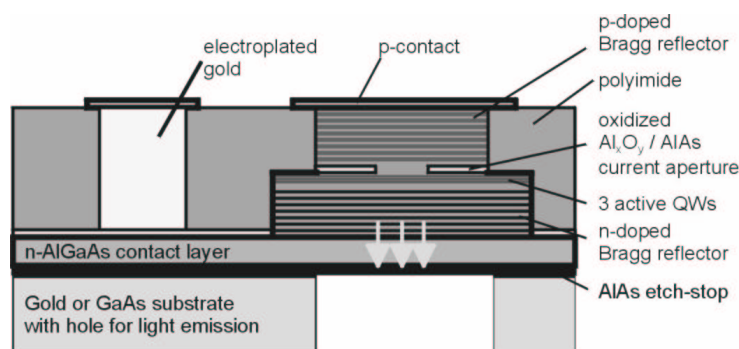


Abbildung 3.2: Aufbau der VCSEL. Gut zu erkennen ist die Resonatorstruktur rechts [Quelle: Uni-Ulm]

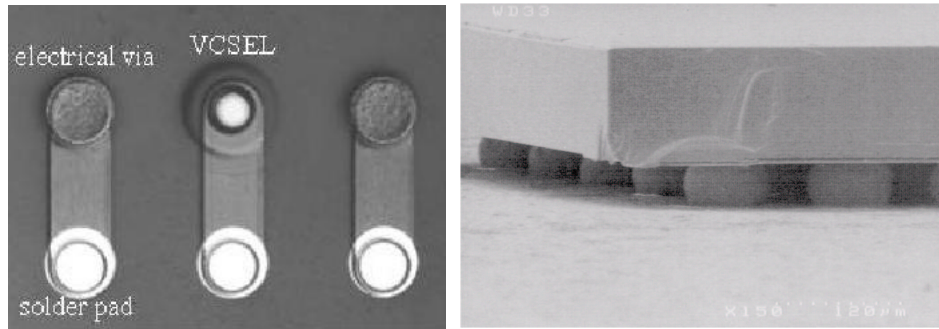


Abbildung 3.3: Links sind die Solder Pads mit kontaktiertem VCSEL zu sehen und rechts ein gebondeter VCSEL von der Seite [Quelle: Uni-Ulm]

Das verwendete Materialsystem ist Aluminium-Gallium-Arsenid (AlGaAs). In Abbildung 3.2 ist ein Querschnitt durch ein VCSEL zu sehen. Deutlich zu erkennen sind rechts die vielen dünnen Schichten, die den Resonatorbereich darstellen, in deren Mitte die Apertur liegt. Abbildung 3.3 zeigt die VCSEL mit Solder Pads. Die drei hellen, in einer Reihe liegenden runden Flecken sind die Solder Pads. Diese Solder Pads sind die Kontaktpunkte für das Flip-chip-bonden und für die elektrische Leitung. Durch Erhitzen werden die Solder Pads mit den sogenannten Solder Bumps verschmolzen, wobei eine Justage durchgeführt wird und die elektrische Kontaktierung realisiert wird. Ein Flip-Chip gebondeter VCSEL ist rechts in Abbildung 3.3 zu sehen. Die VCSEL sind mit den p-Kontakten direkt verbunden, die benachbarten Kontakte stellen die n-Kontakte dar.

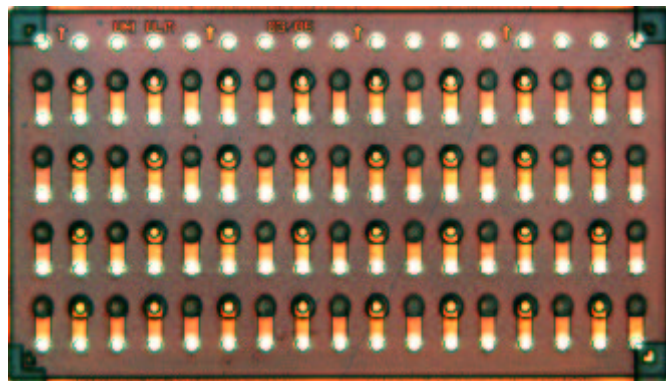


Abbildung 3.4: Ein 4x8 VCSEL Array [Quelle: Uni-Ulm].

Ein Sendeelement besteht aus 4x8 VCSELn (Abbildung 3.4). Nur jede zweite der länglichen Strukturen enthält ein VCSEL. Um eine optimale Leistungsfähigkeit zu erreichen soll der Durchmesser der aktiven Fläche der VCSEL nicht kleiner als $10 \mu\text{m}$ und nicht größer als $20 \mu\text{m}$ sein. Die für den Projektdemonstrator gefertigten VCSEL haben eine optimierte aktive Fläche von $13 \mu\text{m}$. In Abbildung 3.5 ist die Spannung/Strom und optische

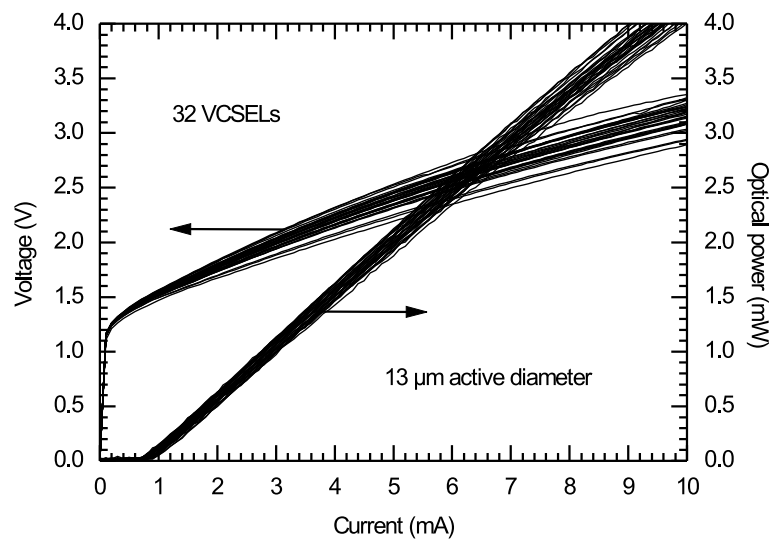


Abbildung 3.5: Leistung der VCSEL in Abhängigkeit von der Stromstärke [Quelle: Uni-Ulm]

Leistung/Strom Charakteristik der VCSEL dargestellt.

3.1.2 Lichtempfänger in OIIC

Zur Detektion des Lichtes wurden von der ETH Zürich Photodioden entwickelt. Diese sollten den POF-Charakteristika entsprechend entwickelt werden. Das heißt, die austretende Leistung sollte für die Detektoren detektierbar und die aktive Fläche sollte nicht zu klein sein.

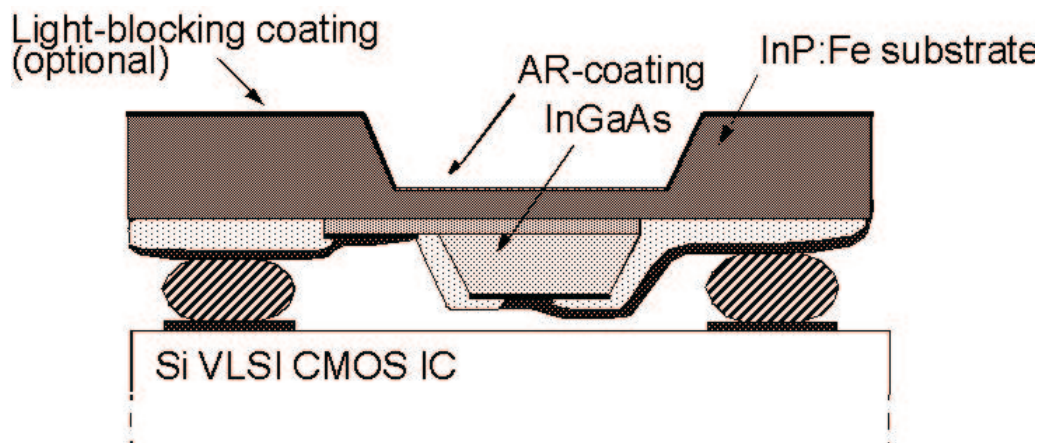


Abbildung 3.6: Querschnitt der realisierten PDs der ETH Zürich. Eingestrahlt wird von oben in die wannenförmige Öffnung. [Quelle: ETH Zürich]

Die ETH-Zürich wählte als Materialsystem InGaAs und IndiumPhosphor (InP) für

die Herstellung einer pin-Photodiode. In Abbildung 3.6 ist ein Querschnitt durch die Photodiode zu sehen. Die trichterförmige Vertiefung enthält die aktive Fläche. Um ein Übersprechen zu vermeiden, wurde eine reflektierende Schicht auf die Seitenwände aufgebracht. InP:Fe ist bei 980 nm durchlässig und benachbarte PDs würden sich gegenseitig stören. Die ganze Photodiode ist über die Solder bumps (rechts und links unten) befestigt und kontaktiert. Gut zu sehen sind die p- und n-Kontakte, die über die Solder-Bumps mit den leitenden Schichten verbunden sind. Für die Photodioden sind folgende Kenndaten gemessen worden:

- Durchmesser der lichtempfindlichen Fläche: 150 μm
- Oberflächenreflexion ($\lambda = 980 \text{ nm}$): 0,01
- Dunkelstrom: 50 nA
- Anstieg/Fallzeit (0,1-0,9 at 50 Ohm): 300 ps
- Max. detektierbare opt. Leistung: 0 dBm
- Gesamt Kapazität: 1,4 - 1,5 pF
- Übersprechen zwischen Detektoren: < 30 dB

Abbildung 3.7 zeigt eine REM-Aufnahme eines PD-Arrays, Abbildung 3.8 zeigt die Abstrahlcharakteristik und in Abbildung 3.9 ist der in OIIC realisierte Chip mit VCSEL und PD-Array zu sehen.

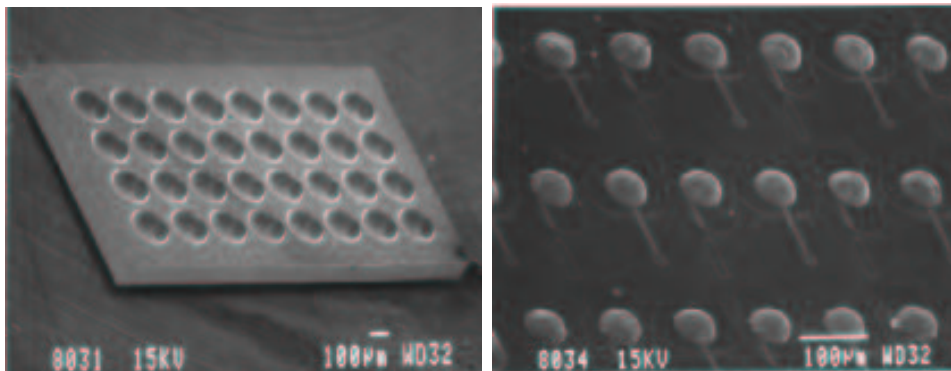


Abbildung 3.7: Links ist das PD-Array von unten und rechts von oben zu sehen [Quelle: ETH Zürich].

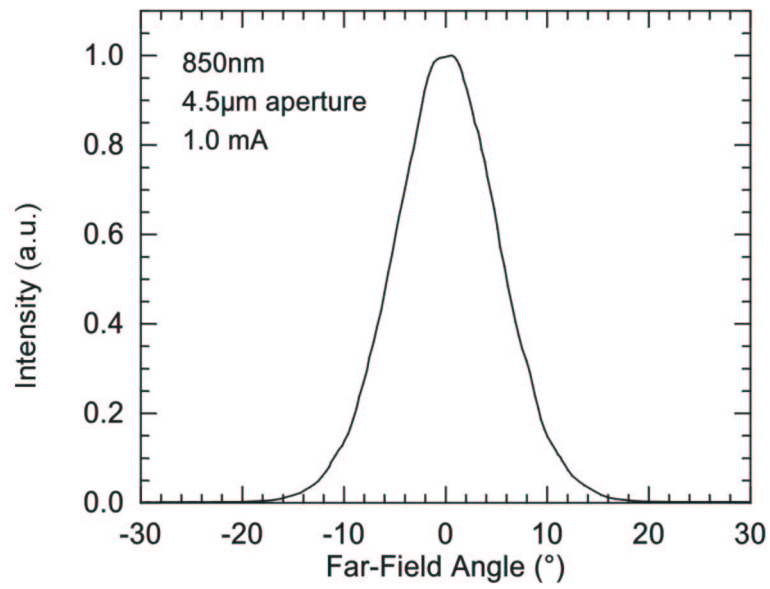


Abbildung 3.8: Abstrahlungscharakteristik der VCSEL [Quelle: Uni Ulm]

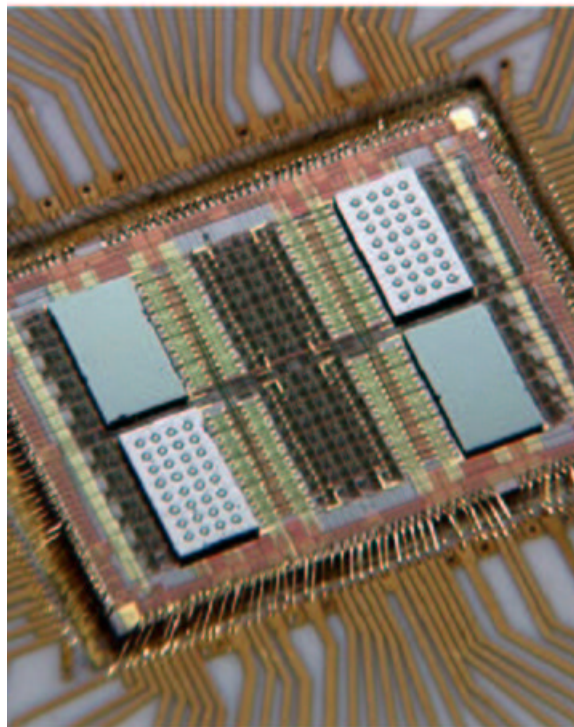


Abbildung 3.9: VCSEL und Photodetektor Feld für den Systemdemonstrator. Der rechteckige Block mit den 4x8 kreisförmigen Strukturen ist das PD-Feld und der dunkle glatte Block ist das VCSEL-Array. [Quelle: IMEC Ghent, Belgien]

4 Optische Kurzstreckenverbindung auf POF Basis

Das europäische Verbundprojekt OIIC wurde in Kapitel 3 vorgestellt. Ziel dieses Projektes ist die Realisierung optischer Datenübertragung zwischen Prozessoren. Die optischen Sende- und Empfangseinheiten wurden oben beschrieben und charakterisiert. In diesem Kapitel soll dem Leser die Aufgabenstellung verdeutlicht und deren Lösung dokumentiert werden.

4.1 Entwicklungsziel

Das optische Verbindungsstück soll die im Kapitel 3 beschriebenen VCSEL und Photodioden miteinander verbinden. Abbildung 4.1 zeigt die prinzipielle Aufgabenstellung: Zwei Prozessoren, auf denen direkt VCSEL-Arrays (Sender) und Photodioden-Arrays (Empfänger) befestigt sind, sollen optisch miteinander kommunizieren können. Da die Sender und Empfänger in zweidimensionalen Arrays angeordnet sind, soll das Verbindungsstück mehrkanalig sein. Aus der Platinentechnik folgt als weitere Anforderung, dass die Gesamtbauhöhe des Prozessors mit den optoelektronischen Bauelementen 5 mm nicht überschreiten soll. Daraus folgt eine maximale Bauhöhe von 3 mm für das optische Bauteil. Die Justage der Fasern vor den optoelektronischen Bauelementen soll passiv realisiert werden, da aktive Positionierung zu aufwendig ist.

Daraus ergibt sich die Aufgabe der vorliegenden Arbeit. Als lichtführendes Medium wird die Plastik Optische Faser (POF) gewählt. Erstens lässt sie sich stärker biegen als eine Glasfaser (Kapitel 4.1.2) und wegen der geringen Verbindunslänge erfüllen die optischen Dämpfungswerte die Projektanforderungen (Kapitel 4.1.1). Die Anordnung in einem 2D-Feld wird durch die Verwendung von 0,5 mm dicken PMMA Plättchen gelöst, in die mechanisch Löcher gebohrt sind (Kapitel 4.2.2). Mit Hilfe dieser Löcher werden die POFs in einem 250 μm -Raster angeordnet. Diese Herstellungstechnologie gewährleistet eine günstige Industriefertigung, die bei der Realisierung des optischen Verbindungsstückes berücksichtigt werden soll. Um eine leichtere Verarbeitung und einen besseren mechanischen Schutz der POFs zu gewährleisten, wird eine Technik zur Herstellung von Fa-

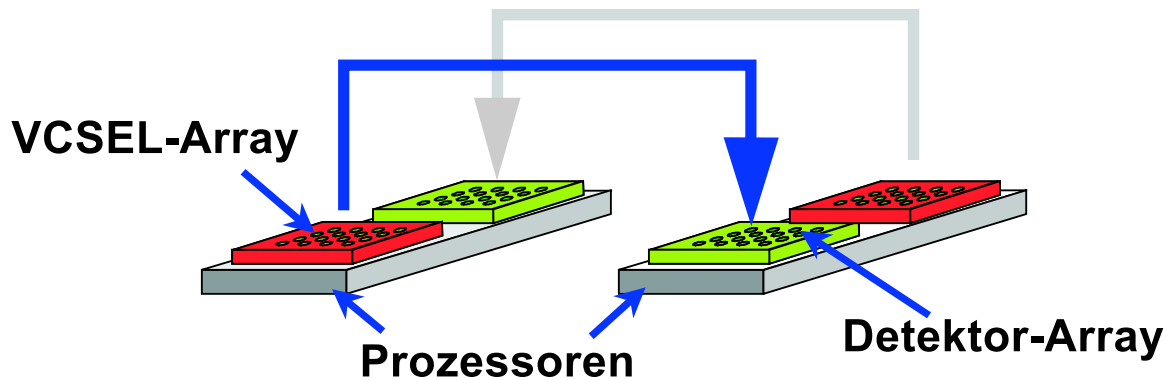


Abbildung 4.1: VCSEL und Photodioden sollen miteinander optisch kommunizieren können.

serbändchen entwickelt (Kapitel 4.2.1).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Ein- und Auskopplung des Lichtes in und aus der Faser. Hierfür werden einerseits mehrere Techniken zur Endflächenpräparation untersucht (Kapitel 4.1.3), deren qualitative Einstufung durch eine optische Dämpfungsmessung vorgenommen wird. Andererseits werden die Toleranzen der POF-Position in den Plättchen und die daraus resultierenden Verluste durch Messungen und Berechnungen bestimmt.

Nachdem die Fasern in den Lochplättchen verklebt und die Endflächen präpariert sind, muss das Verbindungsstück noch über den optoelektronischen Einheiten positioniert werden. Um dies möglichst einfach zu realisieren, sind in den Lochplättchen jeweils zwei große Löcher mit einem Durchmesser von $700 \mu\text{m}$ vorhanden. In diesen wird ein entsprechender Metallstift verklebt, der mit definierter Länge aus dem Plättchen heraussteht. Um die Verluste durch Versatz theoretisch vorherzusagen, werden Berechnungen zum axialen, lateralen und radialen Versatz durchgeführt (Kapitel 4.3.2). Mit diesen Ergebnissen lassen sich Dämpfungsmessungen einordnen.

Schließlich wird die praktische Realisierung des Bauteils beschrieben und eine Messung zu den Bandbreiten vorgestellt. Darüber hinaus werden zwei alternative Möglichkeiten zur Realisierung eines mehrkanaligen, passiven, optischen Verbindungsstückes vorgestellt.

Im Folgenden werden die Dämpfungsbeiträge, wie Absorption, Biegedämpfung, Stirnflächendämpfung und die Verluste durch Faserversatz analysiert. Danach folgt die technische Realisierung und anschließend die Charakterisierung des Bauteiles. Schließlich wird überprüft, ob das Bauteil die Dämpfungskriterien erfüllt.

4.1.1 Das Dämpfungsspektrum der 120/125 μm POF:

Die in dieser Arbeit verwendete Polymer Optische Faser (Fa Toray, Japan) hat einen Außendurchmesser von 125 μm und einen Kerndurchmesser von 120 μm . Dies erlaubt geringe Biegeradien, bringt jedoch aufgrund des dünnen Mantels eine hohe Empfindlichkeit der POF mit sich. Das Material ist im Kern PMMA und im Mantel eine Mischung aus 84 % Vinylidenfluorid (VDF) und 16 % Tetrafluorethylen (TFE)[95]. Der Glasübergang findet bei 100 °C statt ($T_g=100$ °C), was für die Benutzung in Computern wichtig ist, da Temperaturen von 80°C ausgehalten werden sollen. Der Brechungsindex im Kern lautet $n_K = 1,49$ und im Mantel $n_M = 1,41$. Mit

$$n_0 \cdot \sin(\theta) = \sqrt{n_{Kern}^2 - n_{Mantel}^2} \quad (4.1)$$

folgt dann – wenn man $n_0 = 1$ in Luft annimmt – für den vollen Abstrahlwinkel 57,6° und die numerische Apertur 0,48. Die POF zeichnet sich durch komplementäre Eigenschaften zur Glasfaser aus: Die POF ist flexibler bei Biegebelastung, aber empfindlicher bei Zugbelastung. Abbildung 4.2 zeigt die charakteristischen Daten der POF auf einen Blick und eine polierte Endfläche.

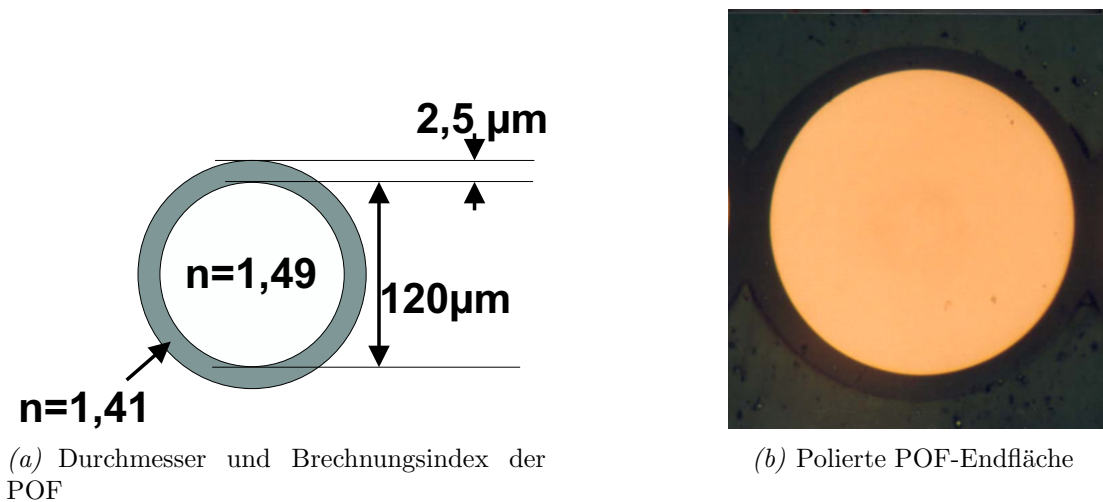


Abbildung 4.2: Die verwendete Polymer Optische Faser.

Für die späteren Messungen ist es wichtig, das Absorptionsspektrum der POF zu kennen. Aus diesem Grunde wurden mit Hilfe eines Weißlichtmessplatzes zwei Messungen durchgeführt: Eine an der verwendeten 120/125 μm POF und zum Vergleich ein Spektrum einer 980/1000 μm POF. Der Aufbau des benutzten Weißlichtmessplatzes wird in Abbildung 4.3 gezeigt. Auf der linken Seite ist die Halogenlampe, die weißes Licht emittiert, durch einen Kreis angedeutet. Das Licht wird in einen Monochromator eingestrahlt der das Spektrum von 500 nm bis 1000 nm in 5 nm Schritten abfährt.

$$\Delta\lambda_{min} = \frac{\lambda}{N \cdot m}$$

λ : Eingestrahlte Wellenlänge; N: Linienzahl (30000); m: Ordnung (hier eins)

Daraus folgt ein Auflösungsvermögen von 0,017 nm bei 500 nm und 0,033 nm bei 1000 nm. Der Wellenlängenabstand wurde aus praktischen Gründen zu 5 nm gewählt.

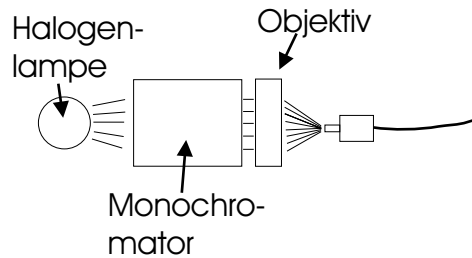


Abbildung 4.3: Skizzierter Aufbau des Weißlichtmessplatzes. Die Faser wird rechts zu einem Detektor weitergeführt

Nach dem Reflexionsgitter wird das Licht über zwei Spiegel auf den Ausgang gelenkt und über ein Objektiv (NA=0,35) in die Faser eingekoppelt. Um das Messsignal von Streulicht unterscheiden zu können, wird der Strahl noch durch einen Lichtzerhacker geschickt, der mit einem Lock-In Verstärker gekoppelt ist. Schließlich wird das Licht aus der Faser auf einen Silizium-Detektor ausgekoppelt. Gemessen wird im „Cut-Back“-Verfahren bei dem die Messung an der stetig verkürzten Faser wiederholt wird. Durch Differenzbildung zwischen zwei Messungen wird das Spektrum des Detektors und der Weißlichtlampe nicht im Ergebnis sichtbar. Die mit dieser Anordnung an einer 980/1000 μm POF und einer 120/125 μm POF gemessenen Spektren zeigt Abbildung 4.4.

Dämpfungsmaxima			Dämpfungsminima		
λ [nm]	1 mm POF	120/125 μm POF	λ [nm]	1 mm POF	120/125 μm POF
550	0,2 dB/m	0,7 dB/m	570	0,1 dB/m	-
630	0,5 dB/m	0,7 dB/m	655	0,2 dB/m	0,6 dB/m
740	3,5 dB/m	3,8 dB/m	780	0,7 dB/m	1,0 dB/m
905	35 dB/m	25 dB/m	950	3,7 dB/m	3,8 dB/m

Tabelle 4.1: Dämpfungsmaxima und -minima der untersuchten POFs

Die Dämpfungsmessung an der 1 mm POF lässt sich mit Messungen anderer Gruppen vergleichen und stellt somit eine Art Referenzmessung dar. Sie ist bis auf geringe Abweichungen identisch mit der des PMMA Bulkspektrums. Die Dämpfungsmaxima und -minima sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Deutlich erkennbar ist eine geringe Zunahme der Dämpfung bei der dünnen POF, was aus der höheren Anzahl von Reflexionen und

den damit verbundenen Verlusten folgt. Eine Ausnahme stellt die Dämpfung bei 905 nm dar. Hier beträgt der Unterschied 10 dB/m. Dieser Unterschied liegt in der hohen Dämpfung der Faser bei dieser Wellenlänge begründet. Die hohe Dämpfung bei geringem Faserdurchmesser (geringe Leistungseinkopplung) lässt nur Messungen an kurzen Faserstücken zu, dadurch sind die Mantelmoden noch nicht vollständig aus der Faser herausgebrochen und die gemessene Leistung an der Faser ist höher als die ausschließlich im Kern geführte.

Mit Hilfe des in Abbildung 4.4 dargestellten Spektrums lässt sich nun leicht erkennen, wo die Maxima und Minima der Dämpfung liegen, dadurch sind die zur Übertragung geeigneten Frequenzen leicht zu finden. Offensichtlich ist, dass die in OIIC verwendeten Wellenlängen für die optische Datenübertragung mit der POF nicht optimal sind, da sie nicht bei einem Minimum liegen. Allerdings werden in OIIC die Wellenlängen durch die VCSELs und PDs vorgegeben, die nicht für alle Wellenlängen realisierbar sind. VCSEL mit Emissions-Wellenlängen bei 570 nm und 650 nm lassen sich zur Zeit nicht realisieren. Da die Übertragungsstrecke kurz sind, lässt sich aber auch mit 850 nm und 980 nm optische Datenkommunikation realisieren.

Vergleich von Theorie und Messung der POF Dämpfung

In der POF gibt es drei Mechanismen, die hauptsächlich zum Verlust an optischer Leistung führen: Streuung durch Kern-Mantel Inhomogenitäten und Rayleighstreuung sowie Absorption durch elektronische Übergänge und durch Schwingungen der Atombindungen.

Materialbedingt	Absorption	Obertöne der C-H-Schwingungen elektronische Übergänge
	Molekülstreuung	Rayleigh-Streuung ($\propto \lambda^{-4}$)
Strukturbedingt	Absorption	Übergangsmetalle
		Organische Verunreinigungen, OH Gruppen
	Streuung	Staub und mikrokospische Hohlräume
		Unregelmäßigkeiten an der Kern/Mantel Grenze
		Mikrokrümmungen der POF
	Schwankungen des Kerndurchmessers	

Tabelle 4.2: Dämpfungsursachen der PMMA-POF.

Die elektronischen Übergänge werden hier nicht berücksichtigt, da sie durch kurzwellige sichtbare und UV-Strahlung verursacht werden. Tabelle 4.2 zeigt die verschiedenen Dämpfungsursachen der POF. Hier soll die Absorption durch Schwingungen betrachtet werden, die im nahinfraroten und langwelligen, sichtbaren Spektrum dominiert. Diese ist auf Ober-

und Kombinationstöne der Fundamentalschwingung von Atombindungen zurückzuführen. Als Obertöne werden Schwingungsübergänge vom Schwingungsniveau $n = 0$ zu einem Niveau $n > 1$ bezeichnet. Hierbei ist die Fundamentalfrequenz der Übergang von $n = 0$ zu $n = 1$ ($0 \rightarrow 1$), der Übergang von $n = 0$ nach $n = 2$ ($0 \rightarrow 2$) wird als erster Oberton bezeichnet. Ist die Energie groß genug, um mehrere Übergänge auszulösen spricht man von Kombinationstönen, z. B. von $0 \rightarrow 1$ und $0 \rightarrow 2$.

Mathematisch ist die Fundamentalfrequenz ν_0 eines biatomaren Moleküls durch die Masse der beteiligten Atome A und B gegeben:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (4.2)$$

k: Kraftkonstante der Bindung; μ : reduzierte Masse; c: Lichtgeschwindigkeit

Die reduzierte Masse folgt aus den molaren Massen M der Moleküle A und B nach:

$$\mu = \frac{M_A \cdot M_B}{M_A + M_B} \quad (4.3)$$

Mit zunehmenden Molekülmassen vermindert sich die Fundamentalfrequenz, die Wellenlänge wird größer und die Anregungsenergie nimmt zu. In [100] ist die Berechnung der Frequenzen und der Intensitäten beschrieben. Für die Frequenzen einer realen, anharmonischen Schwingung folgt demnach:

$$\frac{\nu_n}{\nu_0} = \frac{n \cdot [1 - x \cdot (n + 1)]}{1 - 2x} \quad (4.4)$$

n: Schwingungsquantenzahl; ν_0 : Fundamentalfrequenz

Betrachtet man einen harmonischen Oszillator, d.h. $x = 0$, so ist die Frequenz des ersten Obertones genau doppelt so groß wie die Fundamentalfrequenz. Um die Frequenz eines Obertones exakt berechnen zu können, muss zuerst die Anharmonizitätskonstante durch Messen von mindestens zwei Frequenzen (z.B. Fundamentalfrequenz und des ersten Obertones) bestimmt werden. Neben der Frequenz ist die Intensität eines Überganges von Bedeutung. Die Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Materie, die zum Übergang zwischen Schwingungsniveaus führt, geht mit einer Änderung des Dipolmoments einher. Die quantitative Bestimmung dieser Änderung bei Molekülen ist wegen der Komplexität von solchen Vorgängen nicht möglich. Durch Hilfe von Näherungsverfahren gelangt man jedoch zu einem Ausdruck, der das Verhältnis der im Verlauf der jeweiligen Schwingung absorbierten Energie E_n zur Energie des Fundamentalüberganges beschreibt:

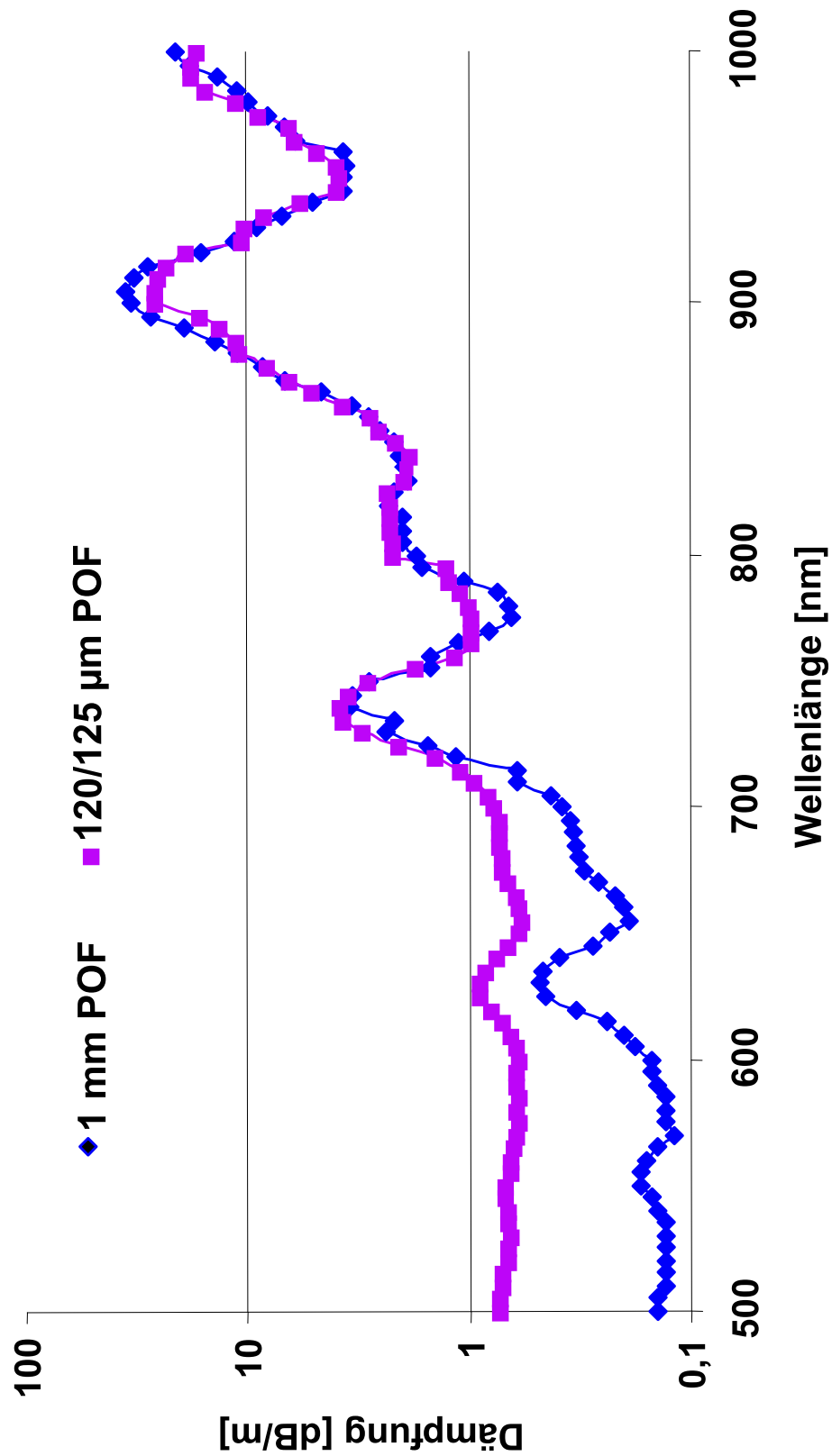


Abbildung 4.4: Absorptionsspektrum der 1 mm und 120/125 μm POF. Die Fehler der Messungen liegen unter 1 % des Messwertes.

$$\frac{E_n}{E_1} = \frac{f(K_1)}{f(K_n)} \quad (4.5)$$

mit

$$f(K)_n = \frac{1}{n \cdot (K - 2n - 1)} \cdot \binom{K - 2}{n} \quad (4.6)$$

$K = \frac{1}{x}$; Der Klammerausdruck links ist ein Binomialkoeffizient

In Tabelle 4.3 sind die Wellenlängen und Intensitäten für die Absorptionsschwingungen dargestellt.

n	λ_n [nm]	$\frac{E_n}{E_1}$	rel. Dämpf	1 mm POF	120/125 μm POF
1	3390	1	–	–	–
2	1729	$7,7 \cdot 10^{-2}$	–	–	–
3	1176	$6,8 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
4	901	$7,2 \cdot 10^{-4}$	0 dB	0 dB	0 dB
5	736	$9,1 \cdot 10^{-5}$	8,9 dB	11,8 dB	8,4 dB
6	627	$1,4 \cdot 10^{-5}$	17,1 dB	18,4 dB	14,5 dB
7	549	$2,3 \cdot 10^{-6}$	25,0 dB	22,9 dB	15,6 dB

Tabelle 4.3: Frequenzen und Intensitäten der Absorptionsschwingungen im Vergleich mit den Messungen an der 1 mm und der 120/125 μm POF)

In der zweiten Spalte sind die nach Formel 4.4 berechneten Wellenlänge ($x_{CH} = 0,019$) der Absorptionsmaxima angegeben. Die zweite Spalte gibt die relativen Intensitäten nach Formel 4.5 und 4.6 an. In der vierten Spalte werden mit Hilfe der relativen Intensitäten Dämpfungen berechnet. Im Vergleich dazu sind die an der 1 mm und der 120/125 μm POF gemessenen Werte dargestellt.

Die gemessenen Werte liegen alle etwas über oder unter den theoretische Vorsagen. Dies liegt daran, dass die Messwerte auf die Dämpfung bei 901 nm bezogen werden. Dieser liegt im hohen Dämpfungsbereich wodurch die zur Vermessung benutzbare Faser nur kurz ist (unter 2 m). Auf diesen kurzen Längen wird ein großer Teil des Lichtes herausgebrochen.

Daraus folgt für das Bauelement:

Aus der durchgeführten Dämpfungsmessung können nun die Dämpfungen für die interessanten Wellenlängen abgelesen werden. Die in der optischen Übertragungstechnik etablierten Wellenlängen liegen bei 850 nm und 980 nm. Zusätzlich wird die Dämpfung bei 650 nm gemessen, da dort ein Minimum der POF liegt.

Die in dieser Arbeit benutzten Laserquellen weichen von diesen Werten etwas ab und liegen bei 660 nm, 870 nm und 980 nm. Für 650 nm/660 nm ist die Differenz in den Dämpfungswerten gering, aber bei 850 nm/870 nm ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen (siehe Spektrum). In Tabelle 4.4 werden die gemessenen Dämpfungswerte für 650 nm und 850 nm mit angegeben. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden nur noch die Werte für 660 nm, 870 nm und 980 nm genannt, da in dieser Arbeit mit diesen Wellenlängen gemessen wird.

Wellenlänge [nm]	650	660	850	870	980
Dämpfung [dB/m]	0,6	0,6	2,5	6,3	11,0

Tabelle 4.4: Dämpfungswerte bei den charakteristischen Wellenlängen 650 nm, 850 nm und 980 nm und bei den im Projekt verwendeten 660 nm und 870 nm.

4.1.2 Die 120/125 μm POF: Biegeradien

Für die Realisierung der optischen Datenverbindung ist es von entscheidender Bedeutung, die optischen Biegeverluste bei verschiedenen Radien zu kennen. Der Grund ist in Abbildung 4.14 (S. 60) zu sehen: Um die Bauhöhe des Fasersteckers gering zu halten, muss die Faser um einen möglichst kleinen Radius biegebar sein.

In der Messung wird ein definierter Biegeradius durch Benutzung von Stahlbohrern eingestellt, deren exakte Radien mit einer Präzisions-Schieblehre bestimmt werden. Abbildung 4.5 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Deutlich erkennbar ist die geringe Biegeradien-Dämpfung bei 2 mm Biegeradius: Hier liegt die Zusatzdämpfung durch die Biegung unter 0,3 dB. Für den OPB (Optical Pathway Block) heißt das, dass die Faser mit diesem Radius von 2 mm um 90° gebogen wird.

In der Literatur sind Messungen an einer Faser mit 120/125 μm Durchmesser nicht zu finden. Das liegt zum einen daran, dass die weiter verbreitete Glasfaser (62/125 μm) die hier realisierten Biegeradien von unter 4 mm nicht realisieren kann und zum anderen, dass die dünne POF nur kurzzeitig erhältlich war und keinen großen Abnehmerkreis gefunden hat.

Wenn man allerdings die Angaben für Biegeradien für 1 mm POFs betrachtet, lässt sich eine relativ große Schwankung feststellen. Zum Beispiel wurden für Fasern mit gleicher NA, gleichem Kernmaterial PMMA und gleichem Durchmesser (1 mm) von Mitsubishi 1 dB Biegeverlust bei 5 mm als Biegeradius [101], von Asahi bei 10 mm [102] und von Toray bei 3 mm [103] angegeben.

In der Literatur sind auch einige Beiträge zur Dämpfungsabhängigkeit der vielmodigen Faser vom Biegeradius zu finden [104, 105]. Diese sind aber nicht mit dem hier betrachteten

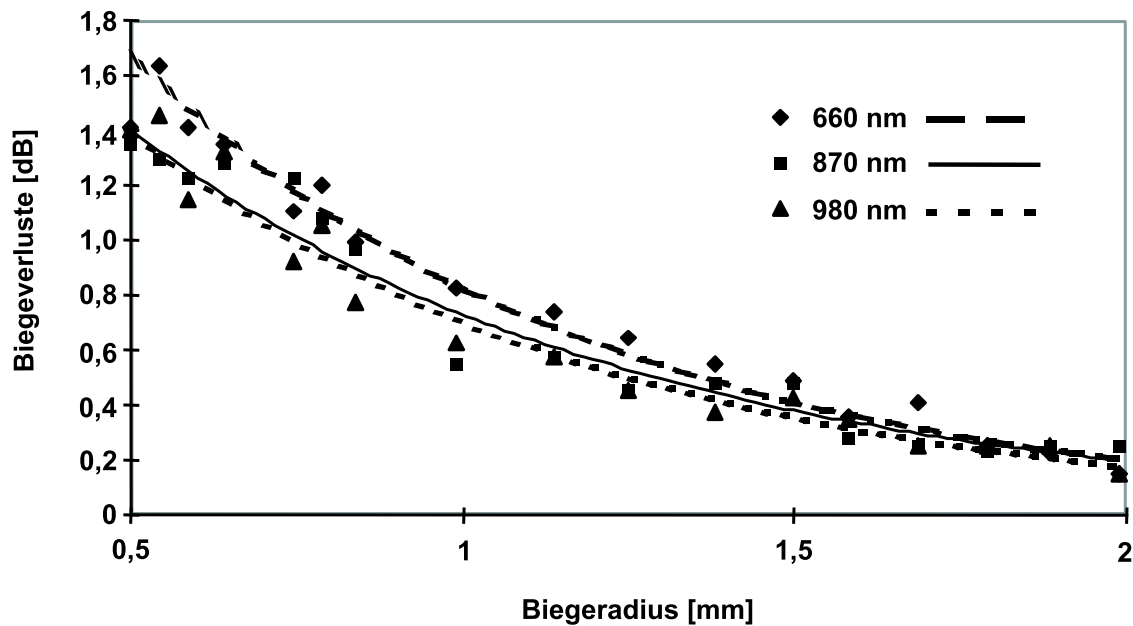


Abbildung 4.5: Biegeradien-Verluste bei 660 nm, 870 nm und 980 nm für eine 360° Biegung.

Fall vergleichbar.

Daraus folgt für das Bauteil:

Als Biegeradius werden 2 mm für die Faser eingestellt. Damit kommen zu den optischen Verlusten durch Absorption der POF zweimal 0,3 dB pro Faser an Verlusten hinzu.

Verlustart	Dämpfung bei		
	660 nm	870 nm	980 nm
Absorption [dB/20cm]	0,12	1,20	2,20
Biegeverluste [dB]	0,60	0,60	0,60
Gesamtverluste [dB]	0,72	1,80	2,80

Tabelle 4.5: Verlustbilanz der POF.

4.1.3 Die 120/125 μm POF: Stirnflächenpräparation

Um die optischen Verluste in einem Übertragungssystem gering zu halten, sind geringe Stirnflächenverluste notwendig. Niedrige Koppelverluste werden mit ebenen und glatten

Stirnflächen erreicht. Bei der Glasfaser gelingt das mit Hilfe eines „Fasercutters“ relativ unkompliziert. Die POF muss nach dem Schneiden mit einem Messer oder einer Schere nachbearbeitet werden, da diese die Faser mit einer Mischung aus Quetschen und Reißen trennen. In dieser Arbeit werden vier Techniken zur Herstellung einer glatten Faseroberfläche untersucht:

- Schneiden mit einem heißen Messer
- Schneiden mit anschließender Erhitzung auf einer heißen Platte
- Schneiden mit einer Wafersäge
- Polieren mit einer Poliermaschine

Die Ergebnisse werden nachfolgend kurz vorgestellt und mit den Ergebnissen aus [106] verglichen, die zeitgleich durchgeführt wurden. Leider sind dort [106] keine Bilder der Stirnflächen enthalten. Im Folgenden werden alle optischen Dämpfungsmessungen bei 660 nm durchgeführt.

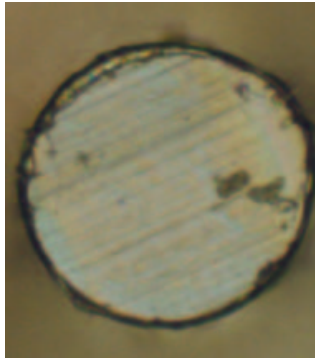
Schnitt mit einem heißen Messer:

In dieser Technik wird eine heiße Rasierklinge (ca 120 °C) benutzt, um die Faser zu schneiden. Um die Faserendfläche senkrecht zur Faserachse auszurichten, ist eine Halterung aus Messing entwickelt worden, die das erhitzte Messer mit der Heizpatrone und die Faserendfläche hält. Um die Faser zu halten, wird sie in einem Segment-Typ(ST)-Stecker fixiert und auf der Rückseite des Steckers mit Epoxykleber verklebt. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Kleber nicht durch Kapillareffekte zur Ferrule gezogen wird. Der Durchmesser der Bohrung für die Faser in der Ferrule beträgt 128 μm . Diese Technik wäre eine gute Lösung im Hinblick auf die spätere Massenproduktion. Die gemessene durchschnittliche Dämpfung pro Stirnfläche liegt bei $1,9 \pm 0,4$ dB. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.6(a) dargestellt.

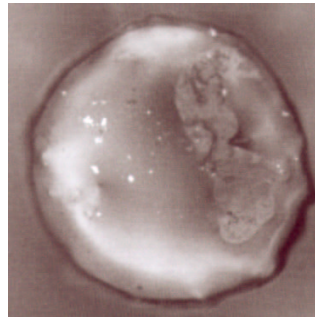
In [106] wird ein scharfes Messer auf 100°C erhitzt und damit die Faser durchtrennt. Die belgische Gruppe erreichte mit dieser Technik Dämpfungen von $0,9 \pm 0,75$ dB.

Schnitt mit anschließender Erhitzung auf einer heißen Platte:

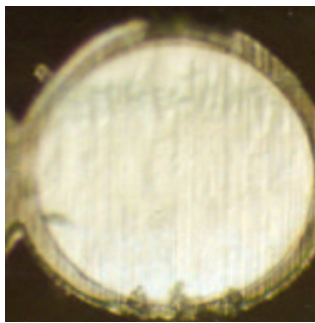
Auch hier wird die Faser zuerst mit einem scharfen Messer geschnitten und im zweiten Schritt durch einen kurzen Kontakt (0,5 s) mit einer heißen Platte (ca 120 °C) erhitzt. Wie beim Schnitt mit dem heißen Messer wird die Faser in einem Stecker fixiert und



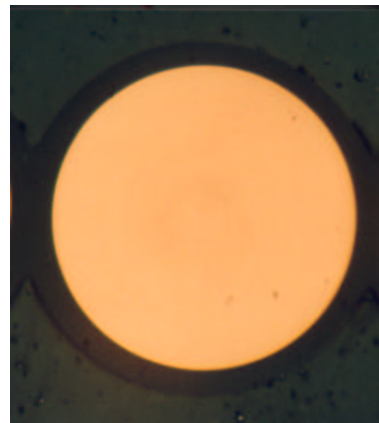
(a) Schnitt mit heißem Messer



(b) Schnitt mit Erhitzung



(c) Schnitt mit Wafersäge



(d) Polierte POF-Endfläche

Abbildung 4.6: Ergebnisse der verschiedenen Endflächen-Präparationstechniken

als Halterung die oben beschriebene Mechanik benutzt. Mit Hilfe dieser Technik werden Koppelverluste von $1,6 \pm 0,2$ dB erzielt. In Abbildung 4.6(b) ist ein Foto einer Stirnfläche zu sehen. In [106] werden mit gleicher Technik Dämpfungen von $0,45 \pm 0,3$ dB erreicht.

Schnitt auf der Wafersäge:

Um eine glatte Stirnfläche zu erhalten, wird bei dieser Technik die Faser in einer V-Nut fixiert. Dies kann einerseits mit Hilfe eines Klebebandes („Tesa“-Film) oder durch Verkleben mit einem Kleber, der die Faser nicht angreift, erreicht werden. Die Faser wird dann senkrecht zur Schnittlinie ausgerichtet und auf einer konventionellen Wafersäge geschnitten. Die damit erzielten Verluste liegen bei $1,6 \pm 0,3$ dB. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.6(c) zu sehen. In [106] wird diese Technik nicht verwendet. Alternativ wird die Faser mit einem heißen Messer geschnitten und anschließend kurz poliert. Die erreichte mittlere Dämpfung liegt bei $0,45 \pm 0,65$ dB. Auffallend ist der große Fehler.

Polierte Stirnfläche:

Sehr gute Ergebnisse werden durch Polieren der Faser erreicht. Die Faser wird wieder in einem Stecker verklebt und im nächsten Schritt auf rotierenden Platten mit Schleifpapier verschiedener Körnung poliert. Die Korngröße auf dem Schleifpapier beträgt $2,9 \mu\text{m}$, $2,0 \mu\text{m}$ und $1,4 \mu\text{m}$. Zum Schluß wird mit einem flüssigen Poliermittel auf einem Samtuntergrund mit einer Körnergröße von $0,5 \mu\text{m}$ eine optische Oberfläche ($R_a = 100 \text{ nm}$) erreicht. Abbildung 4.6(d) zeigt eine polierte Stirnfläche mit Dämpfungswerten von $0,37 \pm 0,18 \text{ dB}$. Auch die belgische Gruppe hat mit dieser Technik die geringste Dämpfung von $0,4 \pm 0,3$ erreicht. Die zum Polieren benutzten Poliermittel hatten Korngrößen von $9, 3$ und $1 \mu\text{m}$. Insgesamt liegen die Werte der belgischen Gruppe unter den in dieser Arbeit erreichten Werten, allerdings mit relativ großen Schwankungen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Faserstirnflächen poliert.

Für das Bauteil folgt daraus:

Pro Stirnfläche entstehen mit der gefundenen Technik Kopplungsverluste von $0,37 \text{ dB}$. Für jeden Kanal des passiven Bauteils kommen so weitere $0,74 \text{ dB}$ hinzu.

Verlustart	Dämpfung bei		
	650 nm	850 nm	980 nm
Absorption	0,59 dB/m	2,5 dB/m	11,0 dB/m
Biegeverluste	0,6 dB	0,6 dB	0,6 dB
Kopplungsverl.	0,74 dB	0,74 dB	0,74 dB
Gesamtverluste (1 m)	1,93 dB	3,84 dB	12,34 dB

Tabelle 4.6: Verlustbilanz der POF.

Mit den Unterkapiteln zum Dämpfungsspektrum, Biegeradius und Endflächenpräparation sind alle optischen Verluste berücksichtigt, die durch die POF selber verursacht werden. Im nun Folgenden wird auf die praktische Realisierung eingegangen.

4.2 Realisierung

Nach den vorbereitenden Messungen an der POF wird nun die Herstellungstechnik betrachtet. Zum einen ist die Herstellung von Faserbändchen nötig, diese erleichtern die weitere Verarbeitung der $120/125 \mu\text{m}$ POF und schützen die Fasern vor mechanischer Belastung. Weiter müssen die Fasern in einem festen zweidimensionalen Raster angeordnet werden, um eine optimale Lichteinkopplung zu gewährleisten. Schließlich ist noch der Biegeradius einzustellen und das Ganze in einem festen Block einzuschließen. Nachfolgend wird das genaue Vorgehen beschrieben.

4.2.1 Die 120/125 μm POF Bändchenherstellung

Für die weitere Verarbeitung der POF ist es aus technologischen Gründen vorteilhaft, wenn die Fasern zu acht Stück in einem Bändchen zusammengefasst sind. Mit einem Material, das einen niedrigeren Brechungsindex hat als das Faserkernmaterial, wird das Licht auch bei beschädigtem Fasermantel mit gleicher NA geführt. Zusätzlich ist die Faser auch mechanisch geschützt.

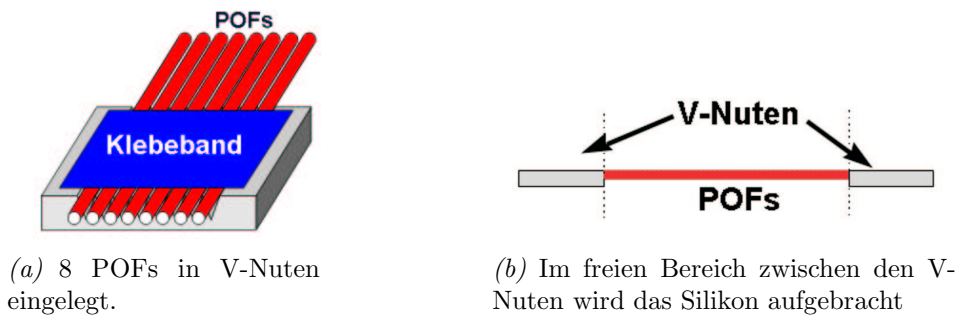


Abbildung 4.7: Herstellung der Faserbändchen.

Abbildung 4.7 zeigt die Bändchenherstellung. Um die Faser in einem gleichmäßigen Abstand zu fixieren werden die etwa 12 cm langen Fasern an beiden Enden in eine Folie mit V-Nuten (Abstand $250 \mu\text{m}$, V-Nuten mit SiGA-Verfahren in Kunststoff abgeformt) eingelegt und mit einem Klebeband gehalten. Die Stirnflächenpräparation erfolgt später. Somit ist ein Abstand von $250 \mu\text{m}$ eingestellt (Abbildung 4.7(a)). Zwischen den V-Nuten liegen die Fasern in einer Gießform, mit deren Hilfe die Fasern in einem Bändchen zusammengefasst werden. In diese Gießform ist eine V-Nut gefräst mit einem Querschnitt von $400 \mu\text{m} \times 1500 \mu\text{m}$. Die letzten 5 mm dieser Nut sind nur $300 \mu\text{m}$ tief, damit das (viskose) Silikon nicht herausfließen kann. Das Material, das dann aufgetragen werden kann und zum Schutz und Haltern der Fasern dient, ist Silikon mit einem Brechungsindex von 1,40. Auf beiden Seiten werden die Fasern von rund $100 \mu\text{m}$ Silikon bedeckt. Da der Kern der Faser einen Brechungsindex von 1,49 besitzt, ist auf diese Weise auch im Falle eines Defektes im Mantel der POF sogar die Führung des Lichtes gewährleistet.

4.2.2 Die Steckertechnologie: Lochplatten aus Plexiglas

Die Anordnung der Faserenden in einem zweidimensionalen Raster wird mit Hilfe von $0,5 \text{ mm}$ dicken PMMA Plättchen erreicht. Ein Foto eines solchen Plättchens ist in Abbildung 4.9 zu sehen. Die Löcher werden vom Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) mechanisch realisiert.

Die zwei großen Löcher sind für Metallstifte mit einem Durchmesser von $699 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$



Abbildung 4.8: Foto vom Querschnitt des hergestellten Bändchen (Faserdurchmesser: $125 \mu m$.)

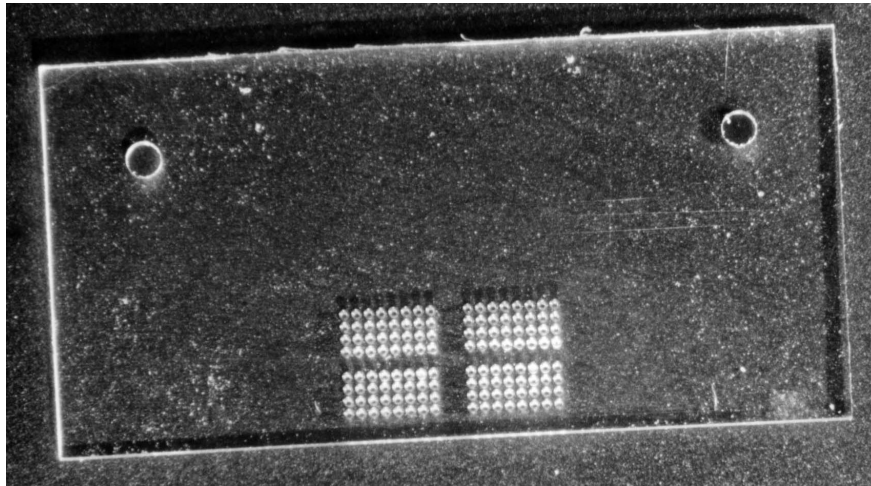


Abbildung 4.9: PMMA Plättchen mit 128 Löchern für die POFs und 2 großen Löchern für die Justagegestifte.

gebohrt. Die Löcher selbst haben einem Durchmesser von $701 \mu m + 5 - 0 \mu m$, um das Hineinstecken zu ermöglichen. Ein Konus ist in diesen Löchern nicht vorhanden. Die 128 Löcher für die Fasern sind in 4 Blöcken zu 32 angeordnet, entsprechend der VCSEL/PD Anordnung auf dem Chip. Abbildung 4.10 zeigt ein Bild von einem Block.

Der Durchmesser dieser Löcher beträgt $130 \pm 2 \mu m$. Um das Einführen der Fasern zu erleichtern besitzen die Löcher auf einer Seite einen 45° Konus. Alle Löcher – also auch die für die Justagegestifte – sind bezüglich einer virtuellen Linie gebohrt, die sich in der Mitte zwischen den 4 Blöcken und den beiden Justagelöchern befindet. Die Bemaßung mit der virtuellen Linie ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

Bei den Löchern für die Fasern wurde darauf geachtet, dass jedes Loch auf die virtuelle Linie bezogen wird, um eine Kumulierung des Fehlers zu vermeiden. Auch hier beträgt die Genauigkeit der lateralen Lage $\pm 2 \mu m$.

Mit einem optischen Messgerät (Firma Werth; Video Check IP 250), das auf Entfernungen von 10 cm mit einer Genauigkeit von $1 \mu m$ misst, werden die angestrebten Werte

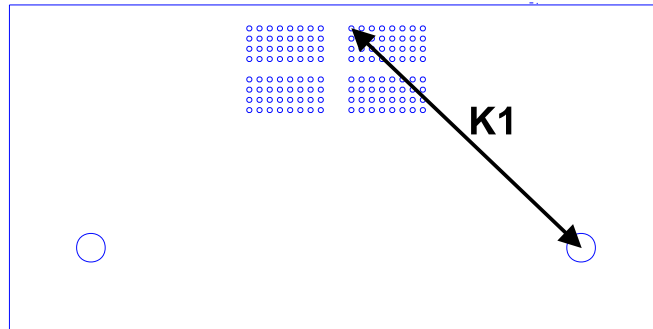


Abbildung 4.12: Skizze für K1 Wert.

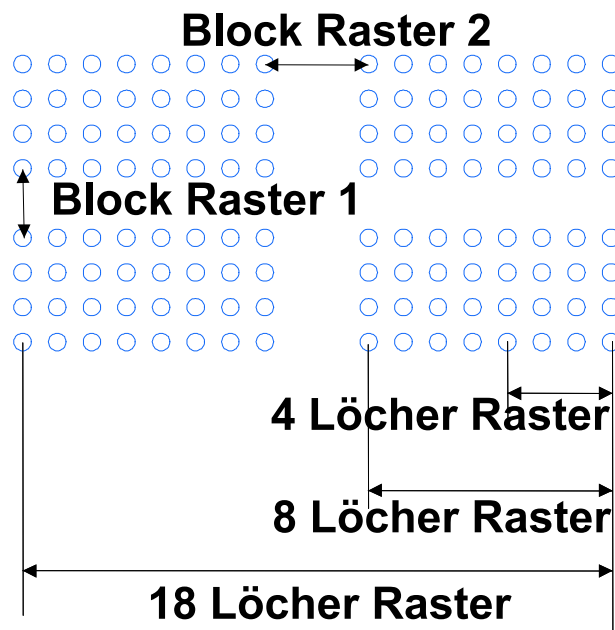


Abbildung 4.13: Skizze der gemessenen Werte.

Parameter	Gemessener Wert $[\mu m]$	Theoret. Wert $[\mu m]$
POF-Lochdurchmesser	131 ± 1	130 ± 2
Raster über 4 Löcher	750 ± 2	750 ± 2
Raster über 8 Löcher	1752 ± 2	1750 ± 5
Raster über 18 Löcher	4252 ± 2	4250 ± 10
K1	7781 ± 3	7780 ± 5
Block Pitch 1	500 ± 2	500 ± 2
Block Pitch 2	750 ± 2	750 ± 2
Durchmesser Justage Loch	$702+4-1$	$701+5-0$

Tabelle 4.7: Gemessene Toleranzen für die PMMA Plättchen.

In der Mitte sind deutlich die gebogenen Fasern zu sehen. Um einen Bruch der Fasern zu vermeiden und den Biegeradius einzustellen, ist ein Viertel eines Metallstiftes ($r = 2 \text{ mm}$)

mit eingeklebt worden. Die Fasern enden in den PMMA Plättchen, rechts und links daneben sind die Justagegestifte zu erkennen. Auf das PMMA Plättchen wird ein Rahmen aufgesetzt, in dem nicht transparentes Epoxidharz eingegossen wird.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Faserbündchen und Lochplatten ist es möglich, 2D-Arrays herzustellen. Zunächst müssen die Fasern in die Löcher eingeführt werden, was bei den hier benutzten Abmessungen nicht einfach ist. In Abbildung 4.15 ist zu sehen, wie mit Hilfe von V-Nuten die Fasern eingefädelt werden. Links im Bild ist das PMMA Plättchen mit den Löchern zu sehen und rechts ein Substrat mit V-Nuten, deren Abstand – entsprechend den Löchern im PMMA Plättchen – $250\ \mu\text{m}$ beträgt. In die V-Nuten werden die freien Enden eines POF Bändchens eingelegt und mit einem Klebeband fixiert. Um optimal arbeiten zu können, stehen die Fasern rund 5 mm über das Ende der V-Nuten hinaus. Nun ist es möglich, ohne optische Hilfsmittel die Fasern in die Löcher einzufädeln.

Als nächstes werden die Fasern mit Hilfe eines schwarzen Epoxidklebers (EPO TEK 509F) verklebt, indem auf der Seite mit den kurzen Fasern 1-2 Tropfen aufgebracht werden. Nach etwa einem Tag ist der Kleber trocken und die Faserenden können poliert werden. Zum Polieren der Faser wird das Plättchen mit Hilfe von Bienenwachs auf einem Polierhalter fixiert, in den eine Nut gefräst worden ist. In dieser Nut werden die Faserbündchen weggeführt. Dieser Halter samt Fasern wird dann auf einer Poliermaschine mit rotierenden Scheiben eingespannt und so werden die Faserendflächen poliert. Mit Hilfe dieser Technik können die Fasern und der Kleber so weit herunterpoliert werden, dass die Fasern nur noch $12\ \mu\text{m}$ hervorstehen.

Nun folgt das Verkleben des Rahmens samt der Justagegestifte mit dem PMMA-Plättchen. Die Justagegestifte werden durch den Rahmen und das Plättchen hindurchgesteckt und richten so den Rahmen mittig auf dem Plättchen aus. Um die Justagegestifte in ei-

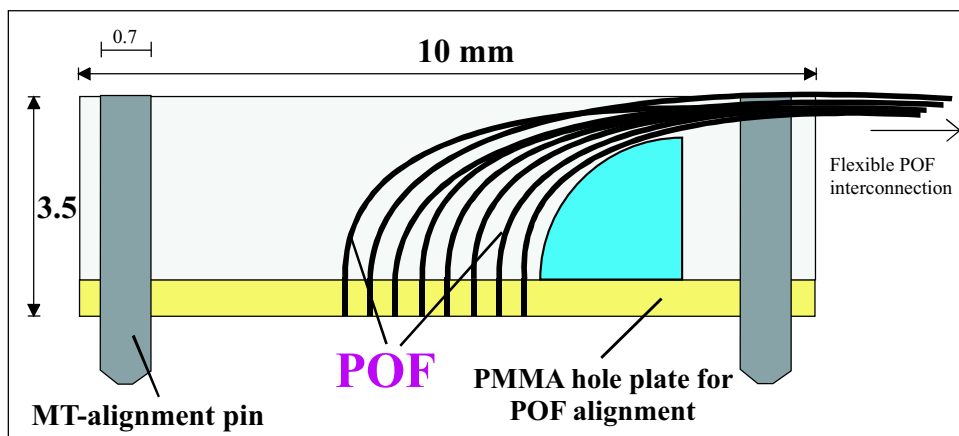


Abbildung 4.14: Querschnitt durch den realisierten OPB.

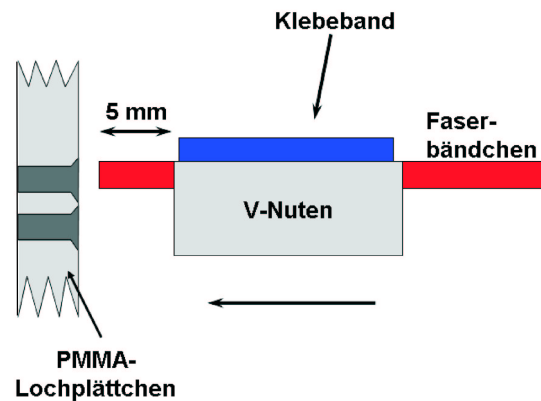


Abbildung 4.15: Einfädeln der POFs mit Hilfe von V-Nuten

ner definierten Länge auf der Vorderseite herausstehen zu lassen, wird zusätzlich noch ein Abstandshalter untergelegt. Als nächstes wird der metallische Viertelstab neben die Fasern gelegt, um den Biegeradius genau einzustellen. Nun werden die Fasern gebogen und mit Hilfe von Klebeband in dieser Position gehalten. Schlussendlich wird der Kleber hineingegossen, dieser ist nach 24 Stunden trocken und der OPB ist fertig.

In Abbildung 4.16 ist ein Foto des OPB zu sehen. Vom anderen Ende des Bauteils wird Licht eingestrahlt, so dass die 128 POF Endflächen gut zu erkennen sind. Links oberhalb und unterhalb der Fasern sind die Justagestifte gut erkennbar.

Die verklebten Fasern haben eine Genauigkeit bezüglich der Justagestifte von $\pm 12 \mu\text{m}$. Für das Projekt OIIC ist eine maximale Toleranz von $\pm 20 \mu\text{m}$ angegeben worden. Diese Spezifikation wird somit sehr gut erfüllt.

In Tabelle 4.8 werden die an den 20 cm langen Verbindungen gemessenen Dämpfungswerte mit der Summe aus Absorption, Biege- und Stirnflächendämpfung verglichen.

Wellenlänge [nm]	gem. Gesamtdämpfung [dB]	\sum Einzeldämpfungen	Biegedämpfung [dB]	Absorption [dB/20cm]	Koppelverluste
980	4,5	3,6	0,6	2,2	$2 \times 0,4$
870	3,5	2,6	0,6	1,2	$2 \times 0,4$
660	1,5	1,5	0,6	0,12	$2 \times 0,4$

Tabelle 4.8: Gemessene Dämpfungen und ihre Zusammensetzung. In Spalte 3 ist die Summe aus den Spalten 4-6 berechnet.

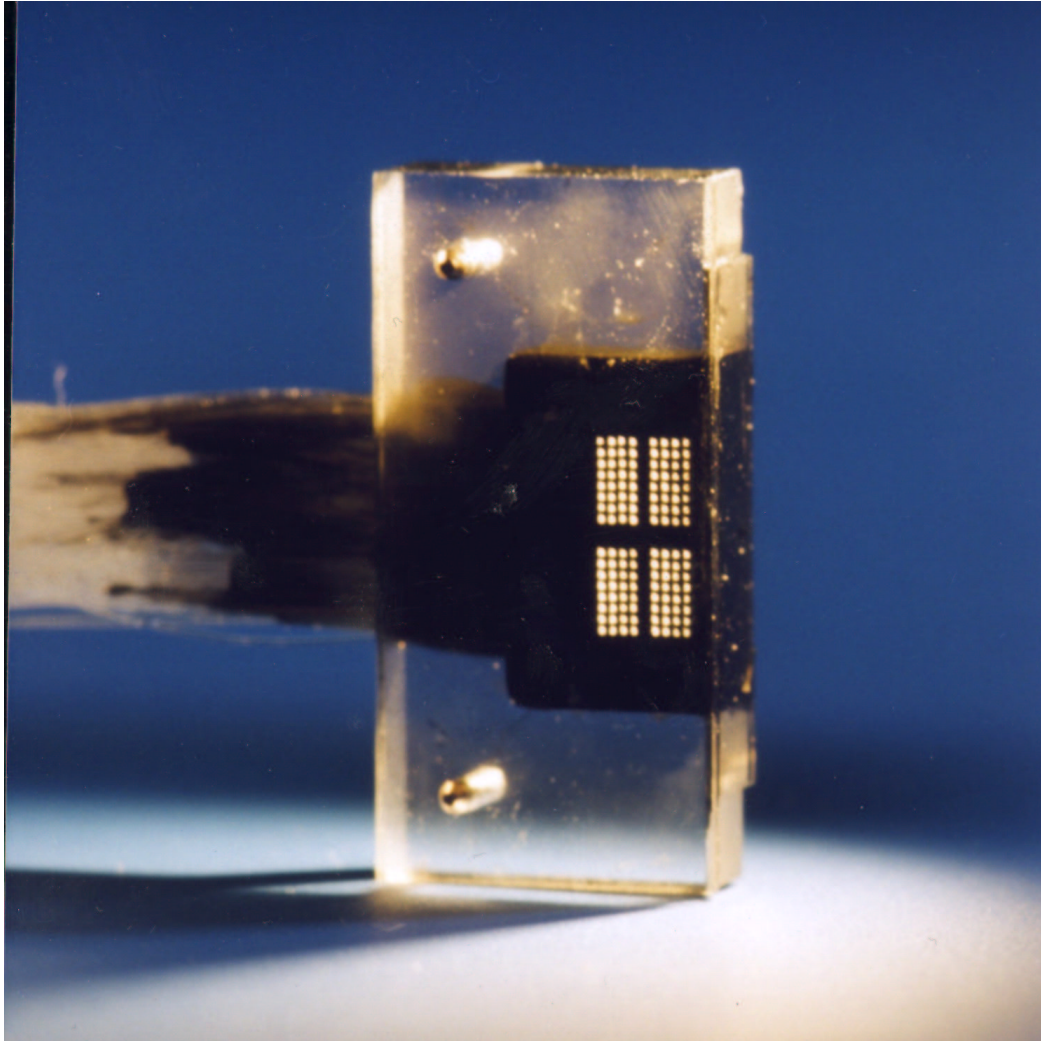


Abbildung 4.16: Foto des realisierten OPBs mit den 128 Fasern und zwei Justagestiften. Der Durchmesser, der links oben und unten zu sehenden Justagestifte beträgt 0,7 mm.

4.3 Charakterisierung

Das optische Verbindungsstück ist nun realisiert. Im Folgenden werden Messungen und Berechnungen zur Charakterisierung vorgestellt.

4.3.1 Temperaturstabilität

An dem Verbindungsstück ist eine Messung zur Temperaturstabilität durchgeführt worden. Für diese Messung wurde es für rund 6 Stunden einer erhöhten Temperatur ausgesetzt und für zwei Stunden abgekühlt. Danach wird die Dämpfung bei 660 nm an einem optischen Dämpfungsmessplatz gemessen. Dies wird für mehrere Temperaturen wiederholt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.17 zu sehen.

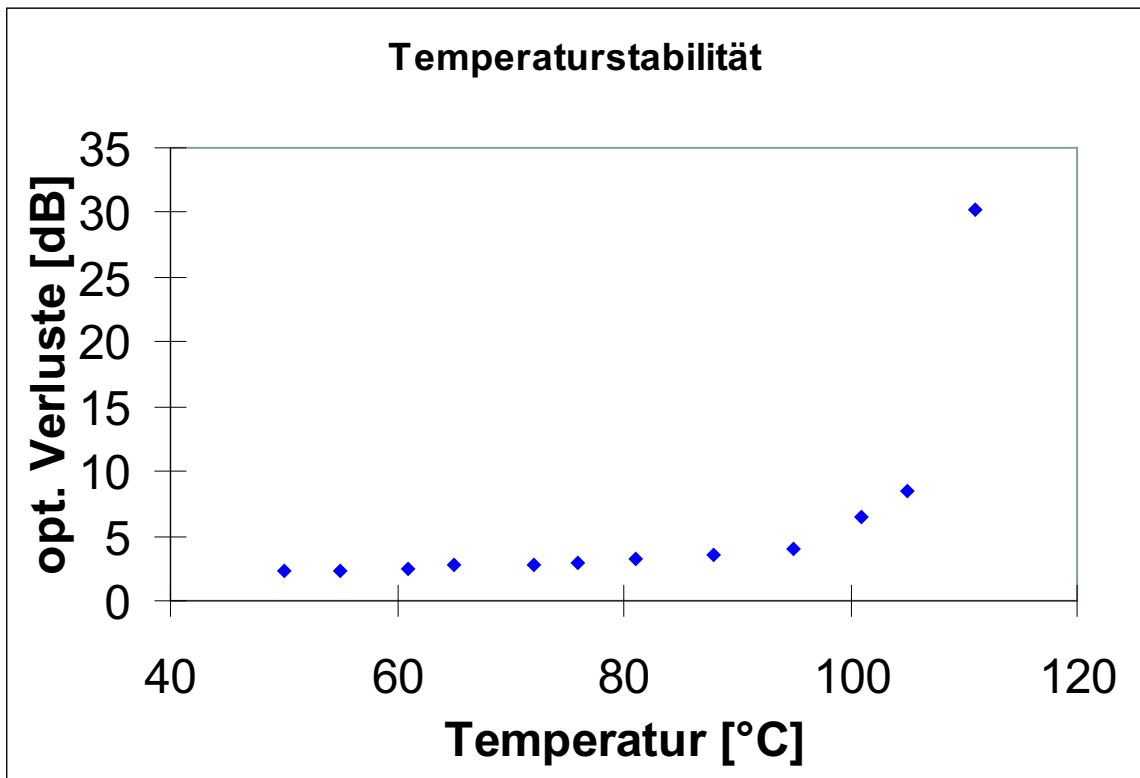


Abbildung 4.17: Temperaturstabilität des optischen Verbindungsstückes.

Deutlich zu erkennen ist der starke Anstieg über 100°C. Das folgt daraus, dass der Glasübergang von PMMA bei 100°C liegt. Für die spätere Anwendung in Rechnern muss eine Stabilität bis zu 80°C gewährleistet sein. Nach dieser Messung sollte das möglich sein.

4.3.2 Verluste durch Versatz

Aus Kapitel 4.2.3 sind die Toleranzen der Fasern in den Lochplättchen bekannt. Für die Ein- und Auskopplung des Lichtes in und aus der Faser im Demonstrator soll der Einfluss von Justageungenauigkeiten betrachtet werden. Nachfolgend werden die dafür durchgeführten Berechnungen und Messungen vorgestellt.

Abstrahlungscharakteristik

Um die Messungen zum lateralen und axialen Versatz interpretieren zu können, muss die Abstrahlcharakteristik der POF bekannt sein. Diese wurde mit dem Aufbau in Abbildung 4.18 gemessen. Die Faser A stellt die zu vermessende Faser mit einem Durchmesser

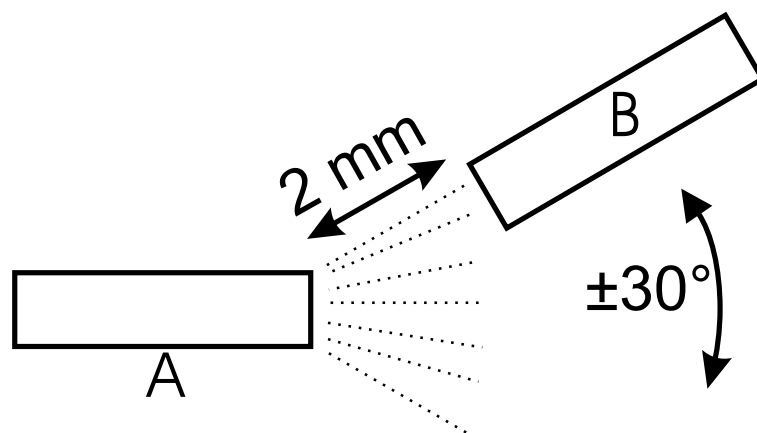


Abbildung 4.18: Skizze zur Messung der Abstrahlcharakteristik

von $120/125 \mu\text{m}$ dar. Über die Faser B wird das Licht zu einem Detektor geführt. Diese Faser hat einen geringeren Durchmesser mit $62/120 \mu\text{m}$. Die numerischen Aperturen der Faser sind mit $\text{NA}=0,5$ gleich. Der Abstand zwischen den Fasern lag bei 2 mm.

Abbildung 4.19 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Deutlich zu erkennen ist, dass die Leistung gaußverteilt ist. Laut Theorie sollten in einer Stufenindexfaser alle Moden angeregt sein und danach eine Gleichverteilung erkennbar sein. Das Diagramm zeigt deutlich eine Gaußverteilung. Aus dem Diagramm lässt sich eine effektive numerische Apertur von 0,42 ($1/e^2$ - Breite) ablesen, was einem halben maximalen Abstrahlwinkel von 25° entspricht.

Eine Erklärung für diese nicht homogene Ausleuchtung des Faserquerschnitts könnte die nicht vollständige Anregung der Moden sein. Vollständige Anregung lässt sich durch eine lange Messfaser A (30 m) und den Einbau von Modenmischern in die Messapparatur erreichen. Dies ist in der Messung berücksichtigt. Die numerische Apertur der Messfaser geht wegen der Faserdrehung nicht in die Messung ein. Von daher bleibt nur die Erklärung,

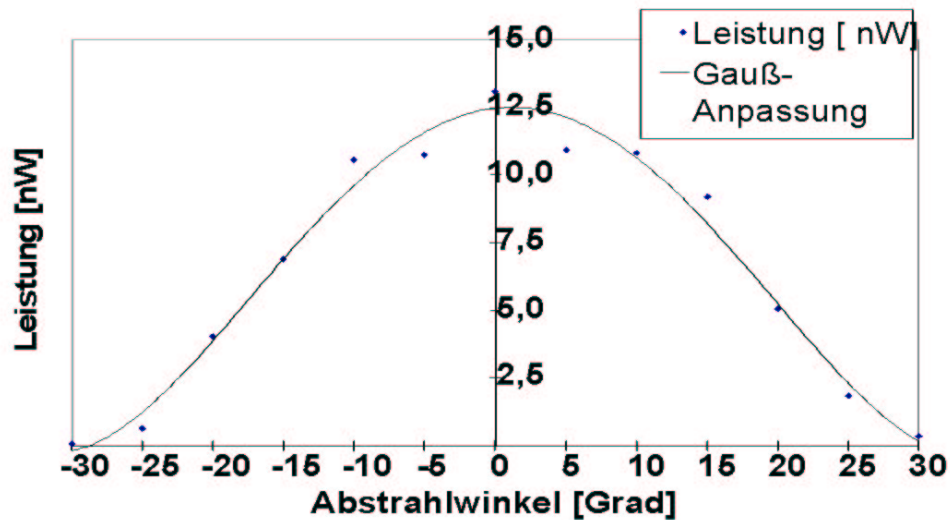


Abbildung 4.19: Abstrahlcharakteristik der 120/125 μm POF. Der Messfehler liegt bei 10 %.

dass die höheren Moden stärker gedämpft werden als die niedrigeren und daraus eine verringerte effektive numerische Apertur resultiert. Diese stärkere Dämpfung der höheren Moden resultiert aus Defekten des Fasermantels, die bei nur 2,5 μm Dicke nicht zu vermeiden sind.

Axialer Versatz

Axialer Versatz bedingt Verluste bei zu großem Abstand von z.B. zwei Faserendflächen (Abbildung 4.20). Für die theoretische Berechnung wird die volle Ausleuchtung des Faserkerns angenommen. In der Rechnung kann dann mit dem Flächenüberlapp von Kreisen gerechnet werden. In Abbildung 4.21 ist das Ergebnis unter Rechnung mit Gleichverteilung zu finden. Es zeichnet sich durch einen starken Abfall aus. Mit solch einem Verhalten würde ein System auf axialen Versatz empfindlich reagieren.

In dem Diagramm ist auch eine Messung zum axialen Versatz mit der 120/125 μm POF dargestellt. Im Vergleich zur Rechnung mit Gleichverteilung fällt sofort der deutlich geringere Abfall der Kurve auf. Dieses Ergebnis legt den Schluss nahe, dass die Faser nicht vollständig ausgeleuchtet ist, was mit dem Ergebnis zur Abstrahlcharakteristik übereinstimmt.

Mit Hilfe einer Gaußschen Leistungsverteilung wird nach [111, 112, 113] folgende Formel

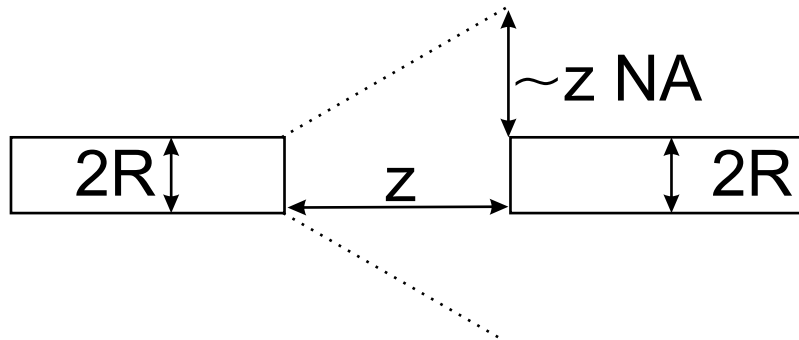


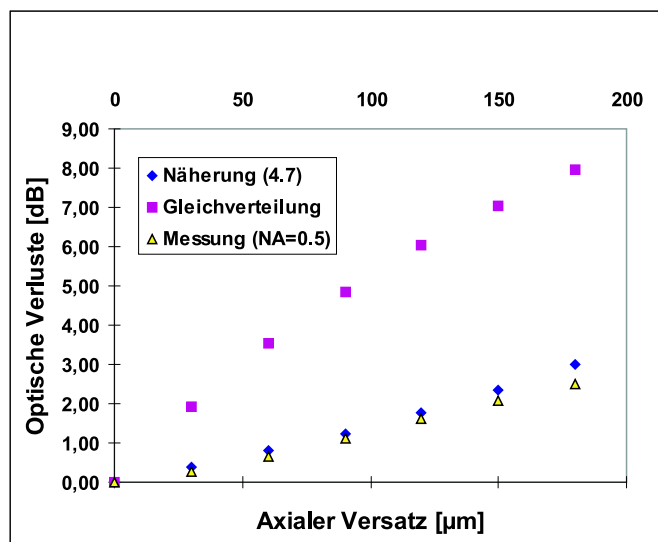
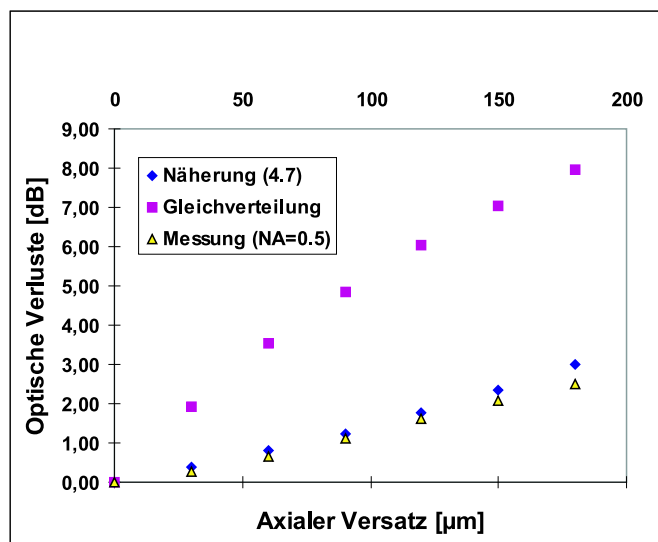
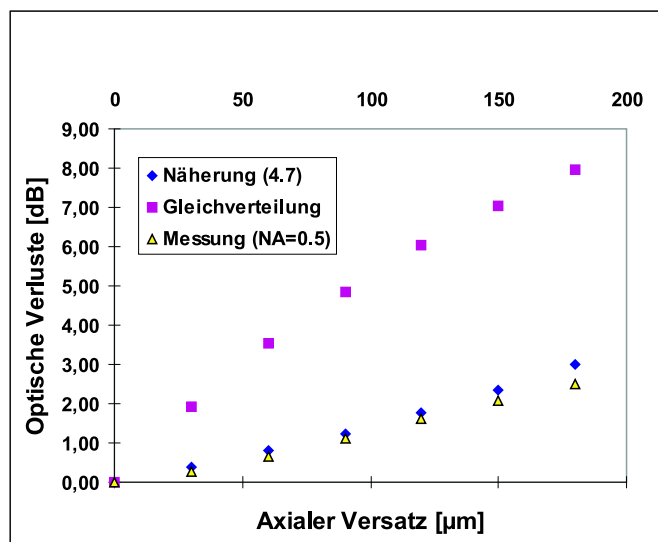
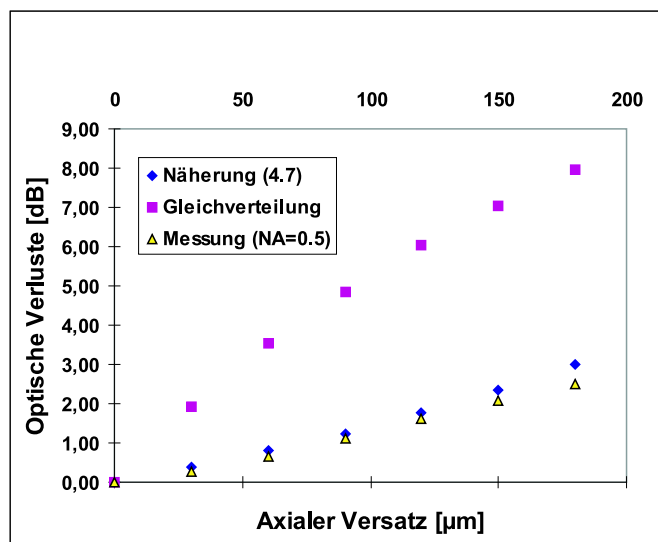
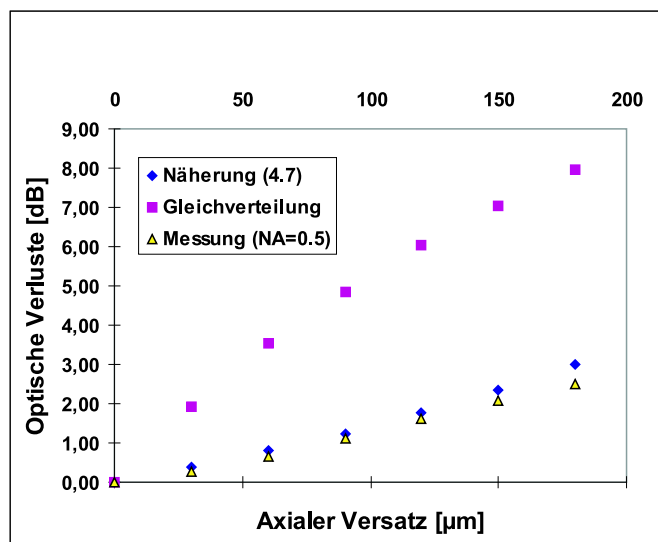
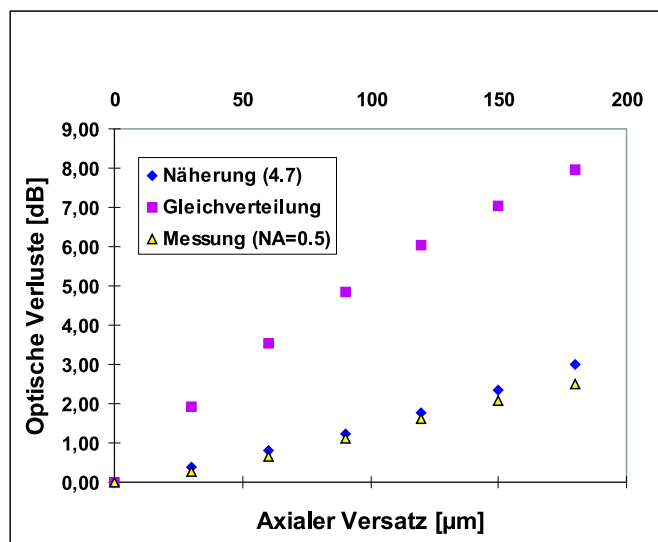
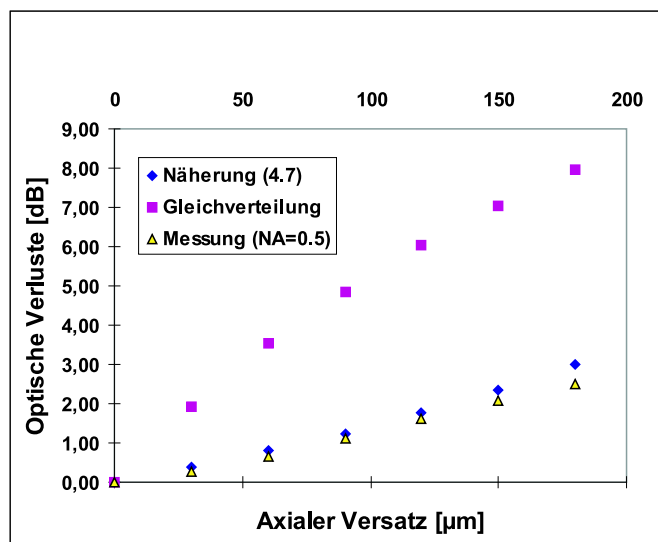
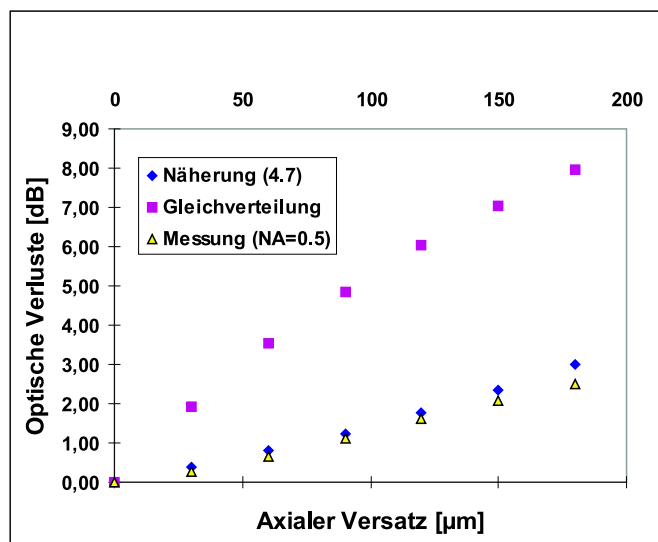
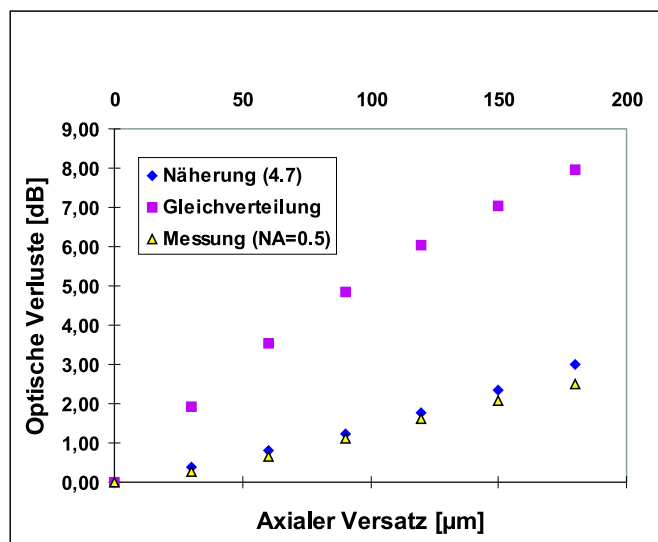
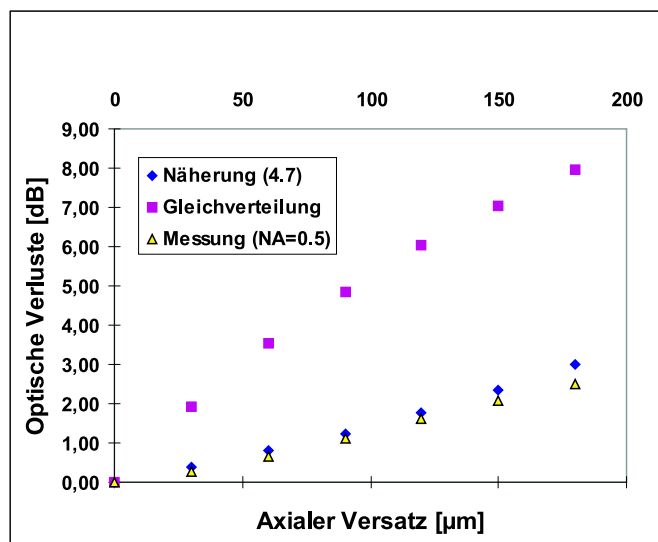
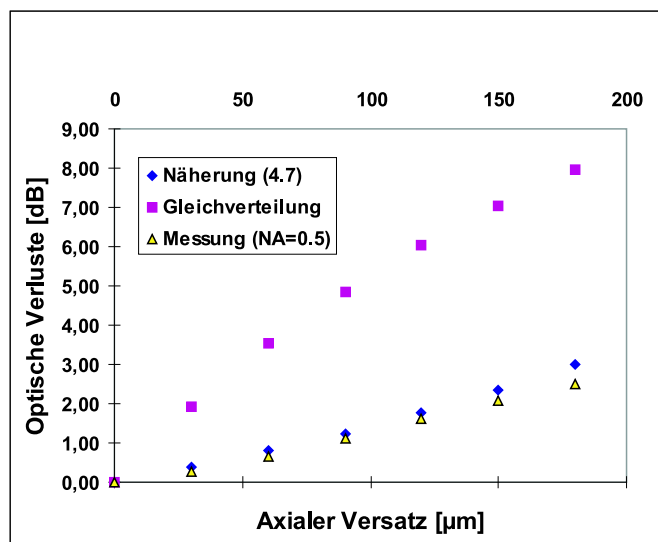
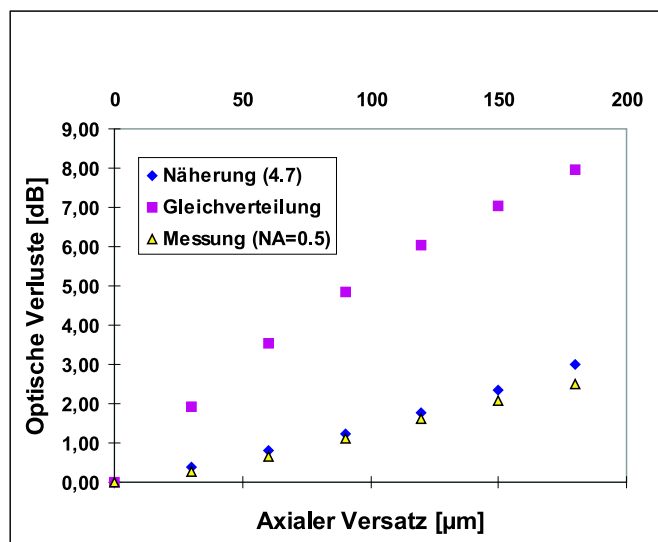
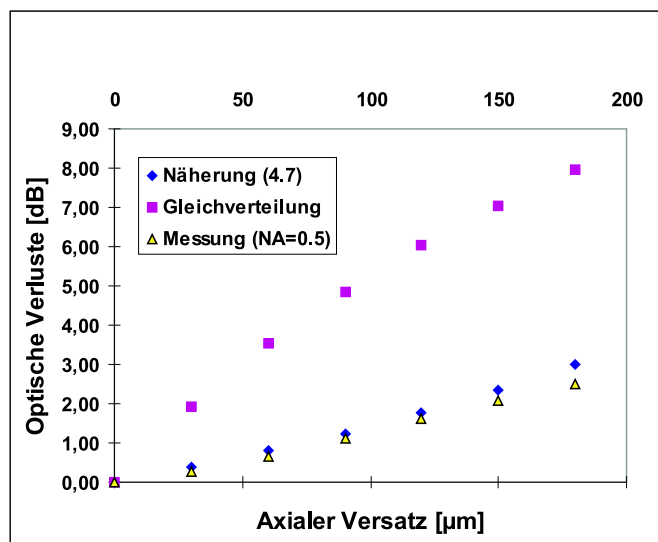
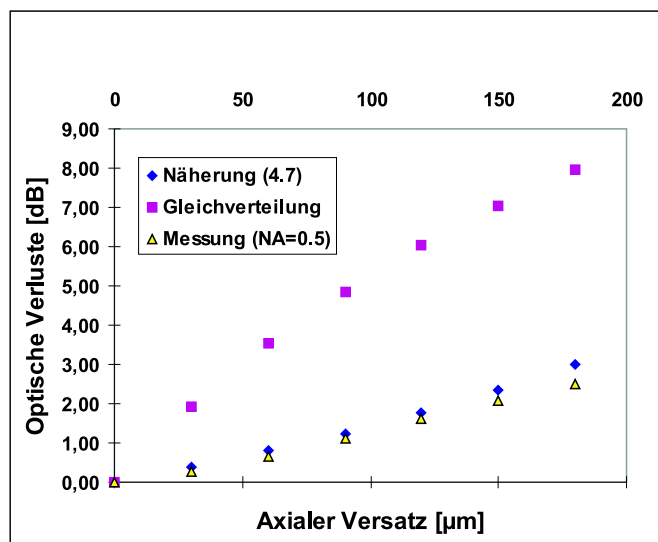
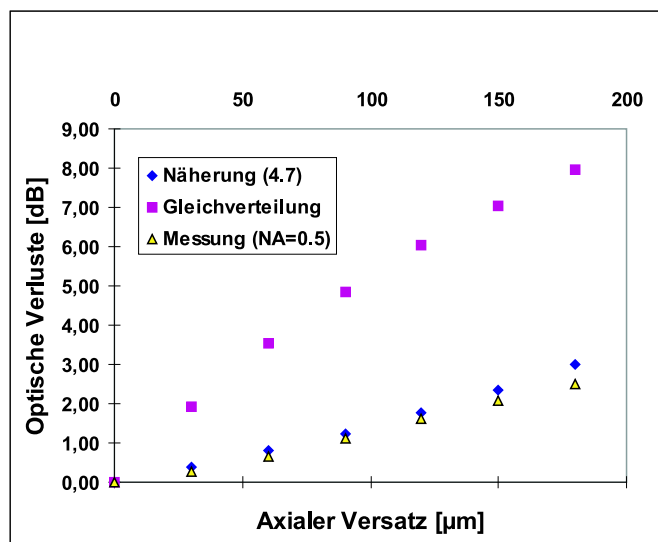
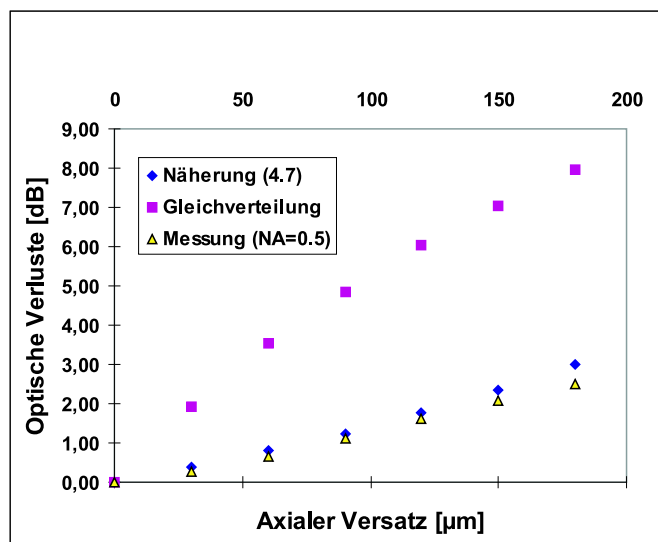
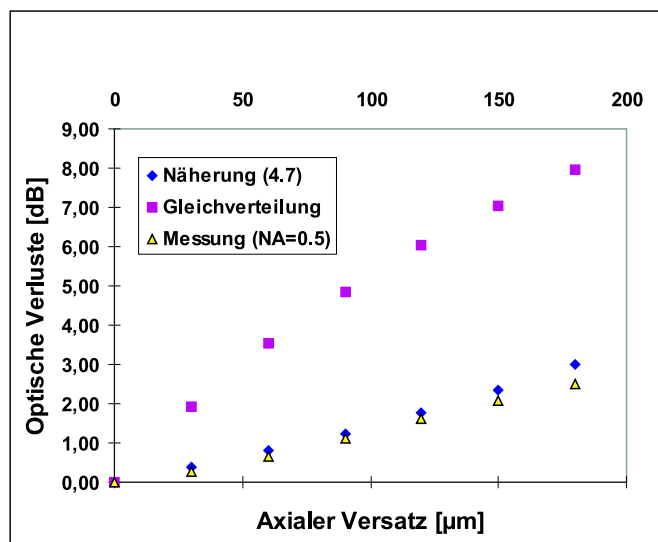
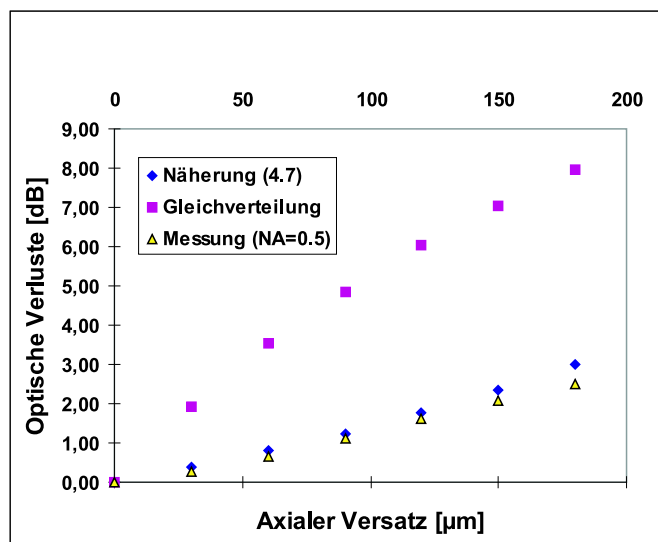
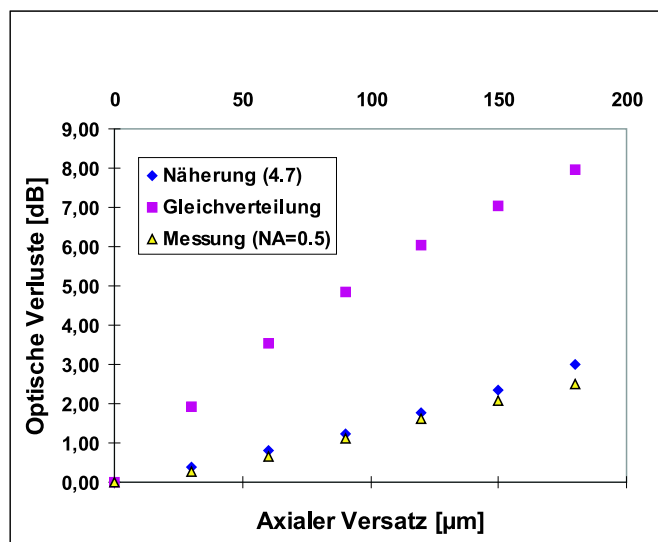
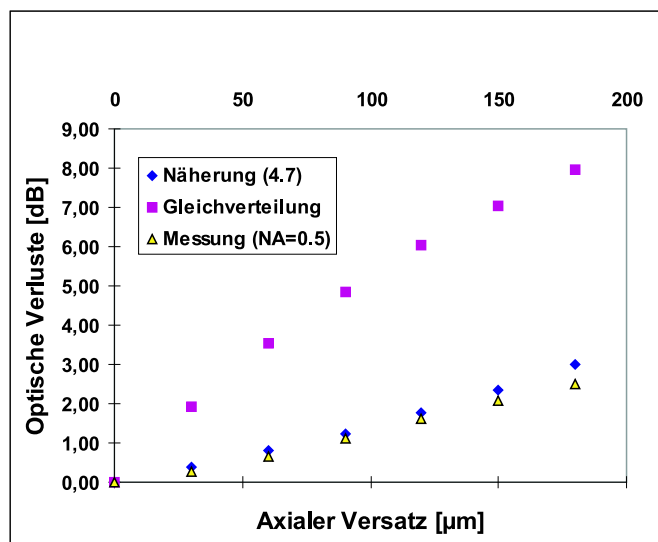
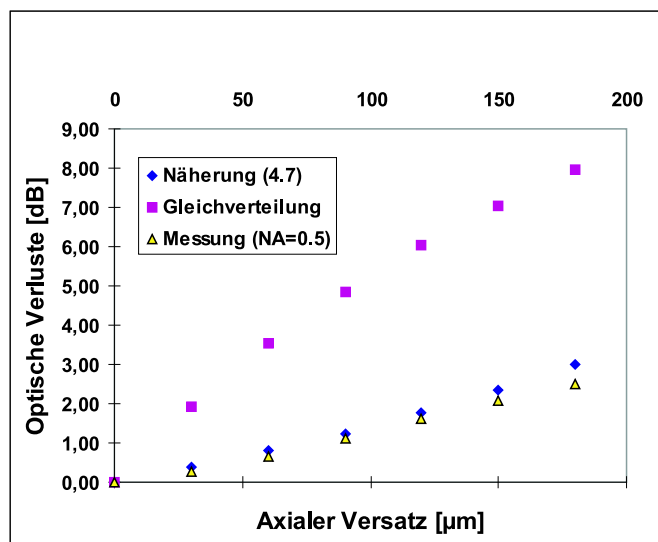
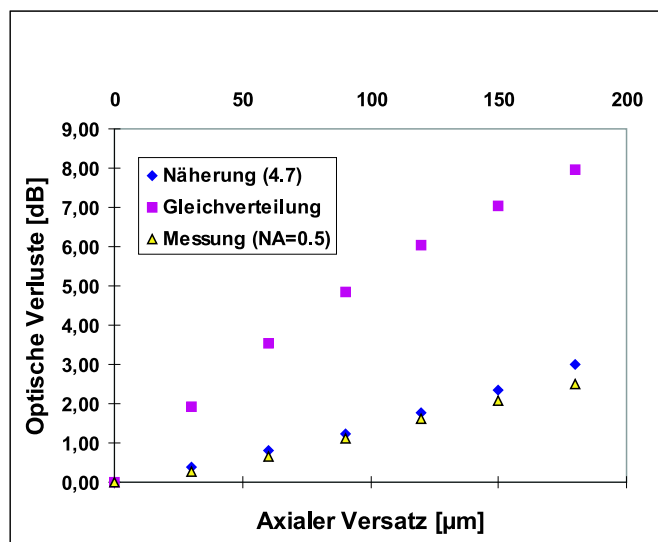
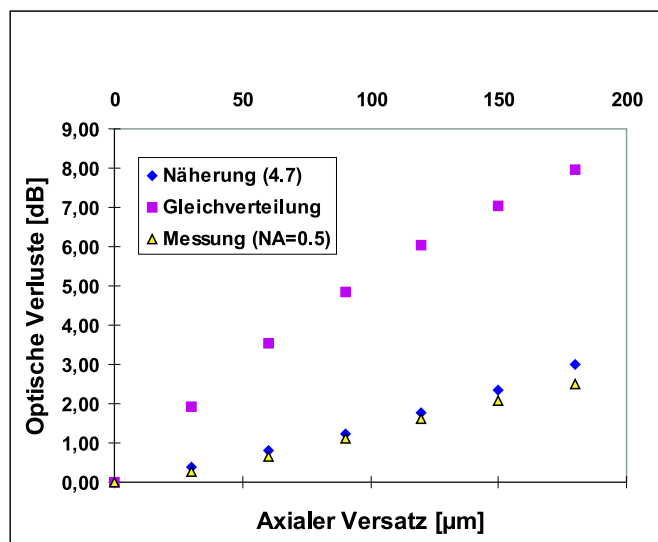
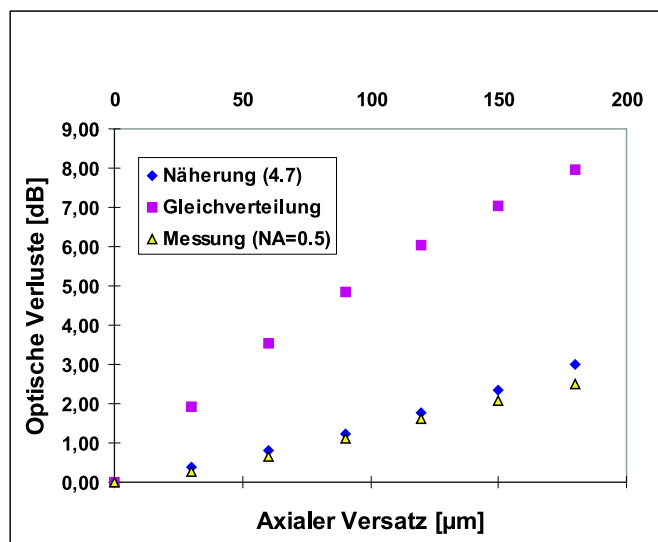
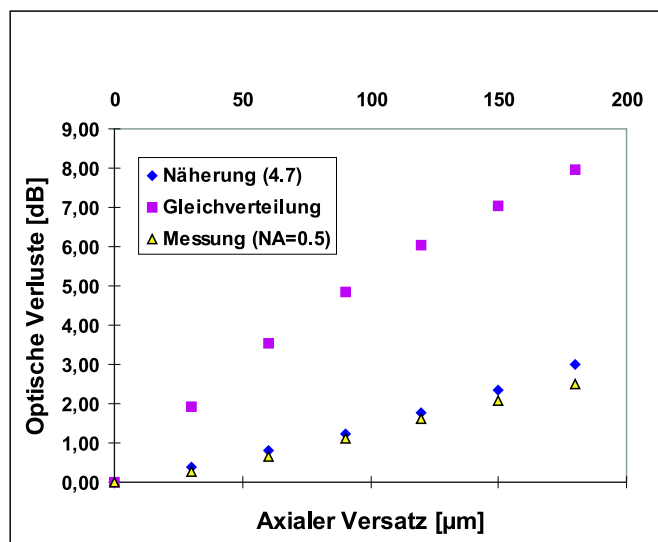
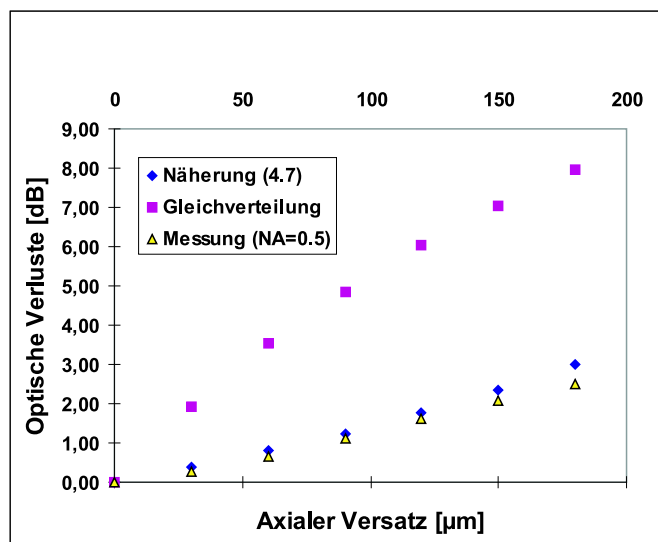
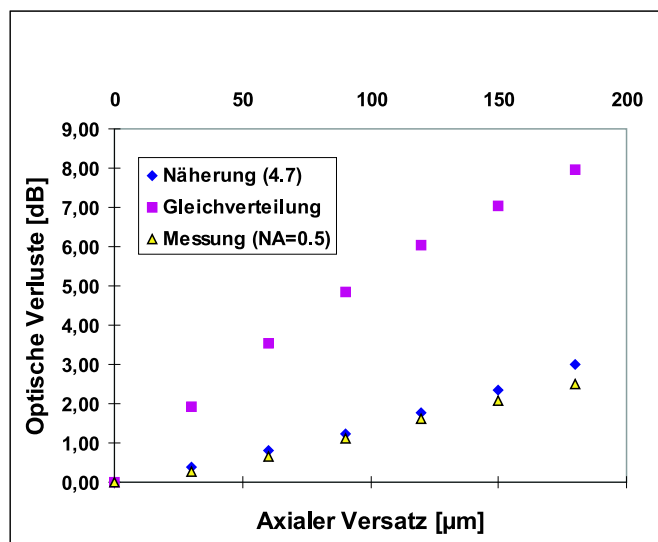
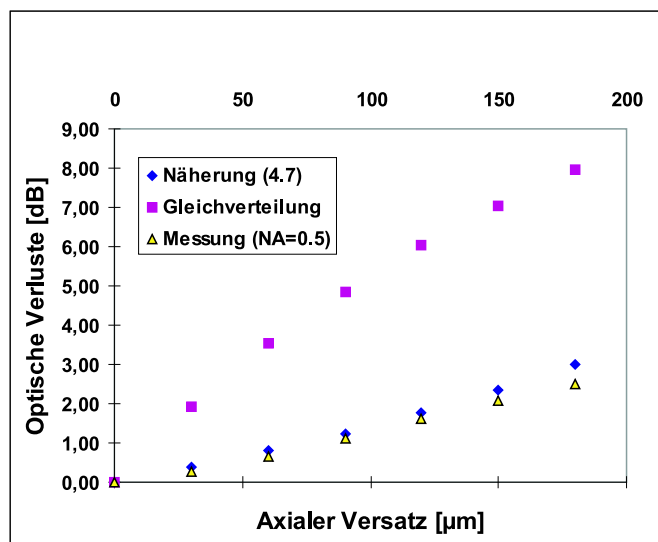
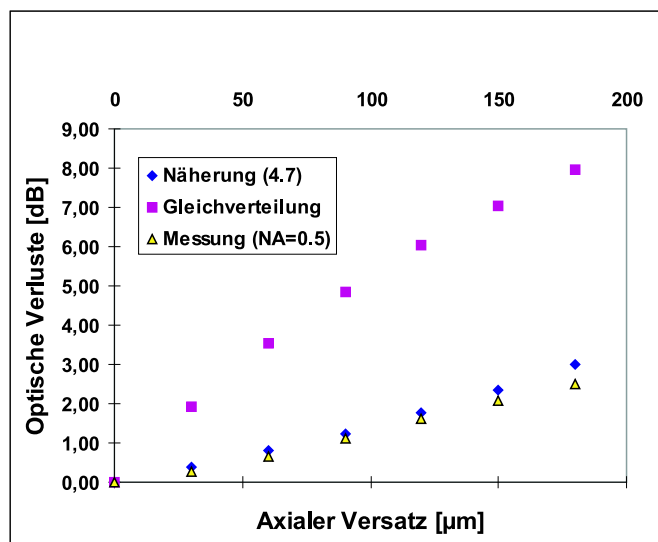
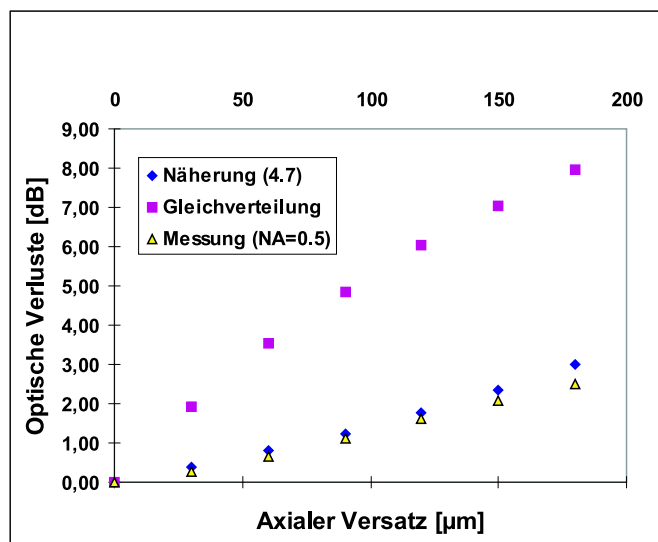
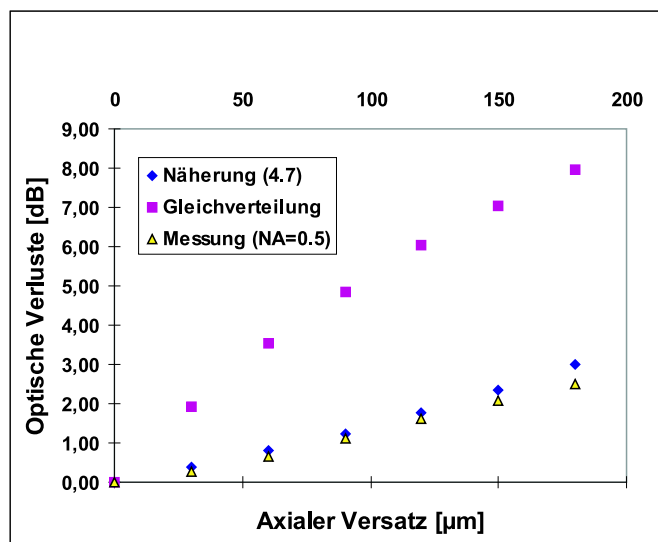
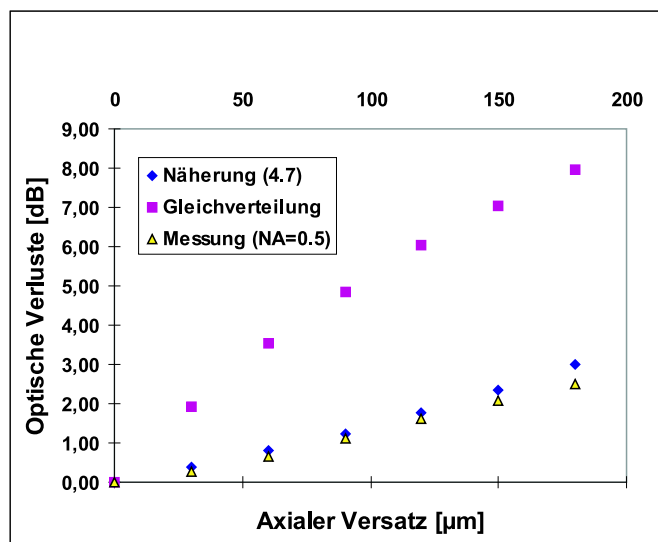
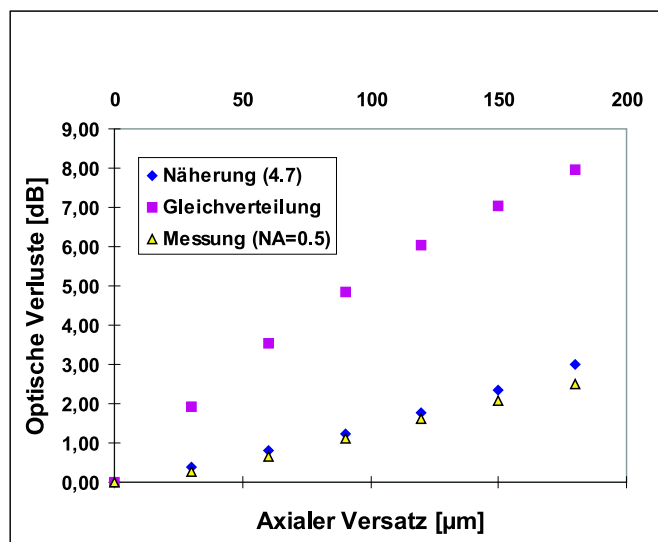
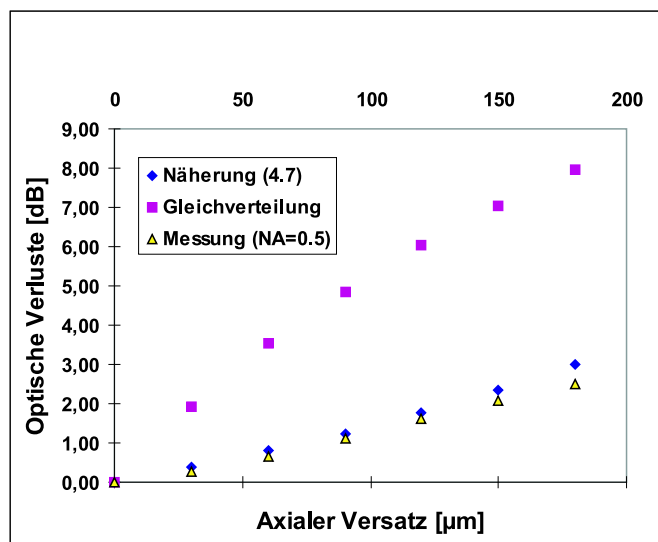
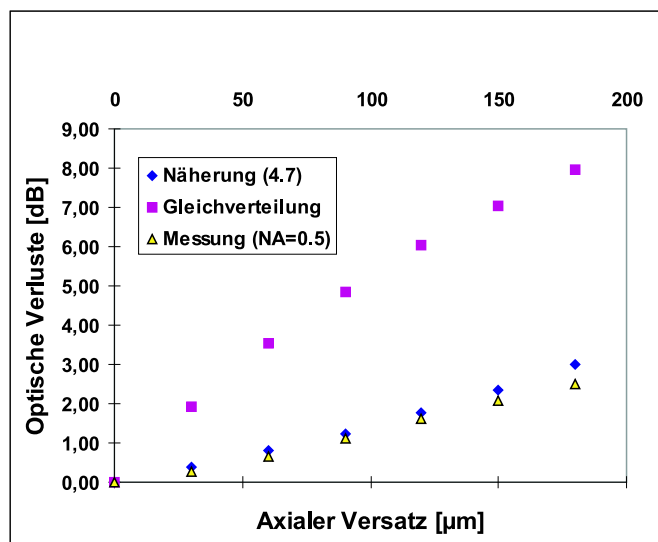
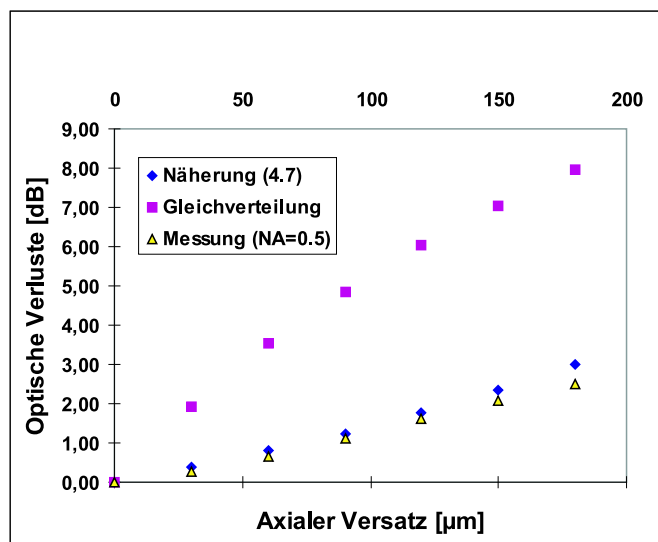
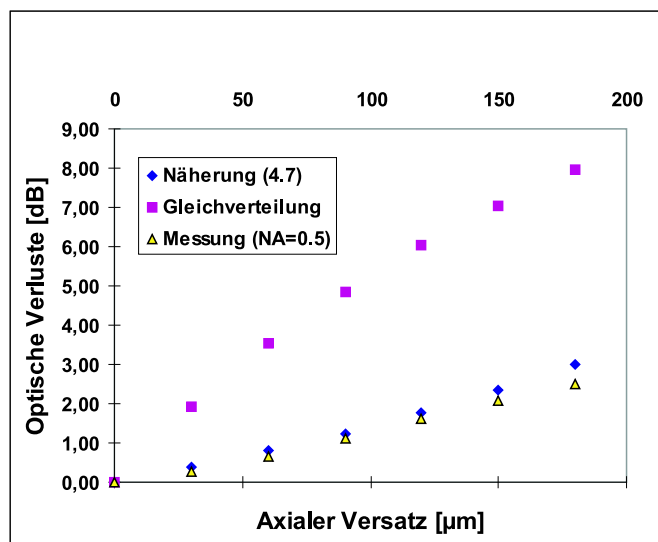
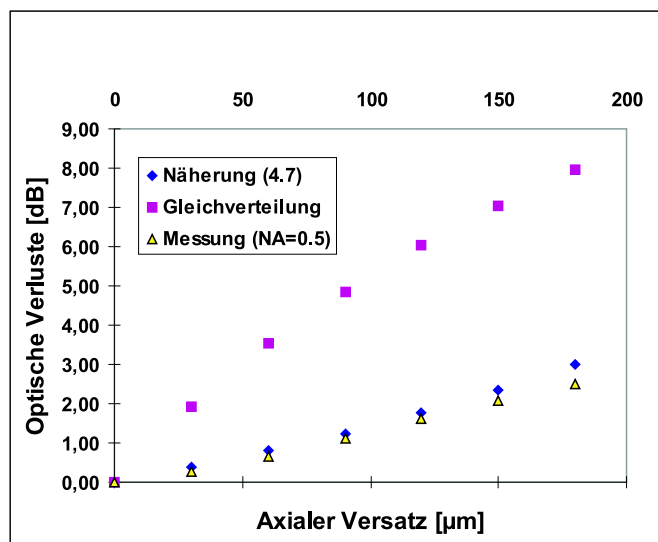
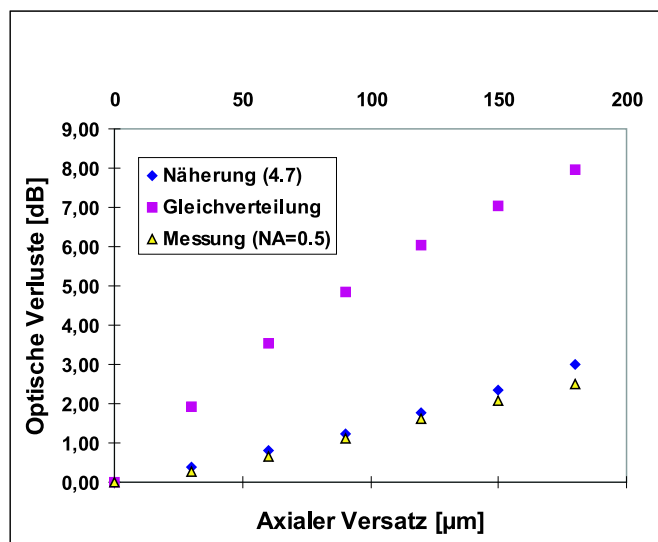
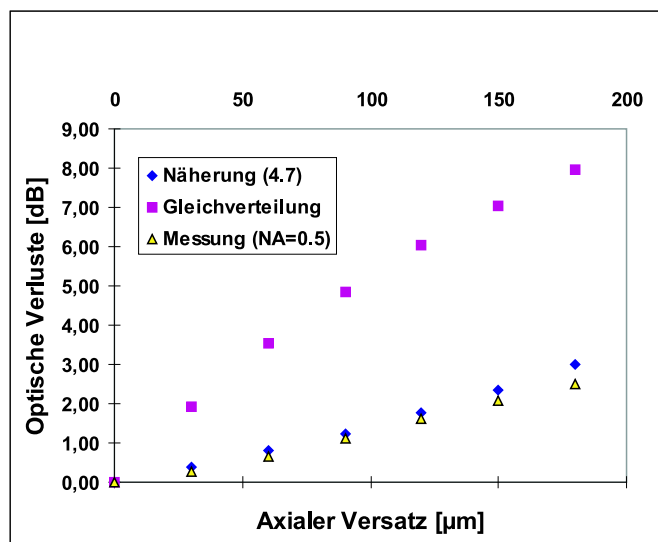
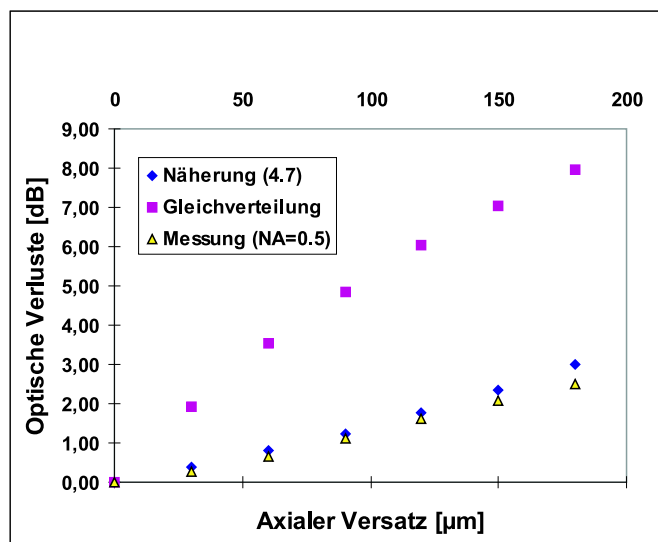
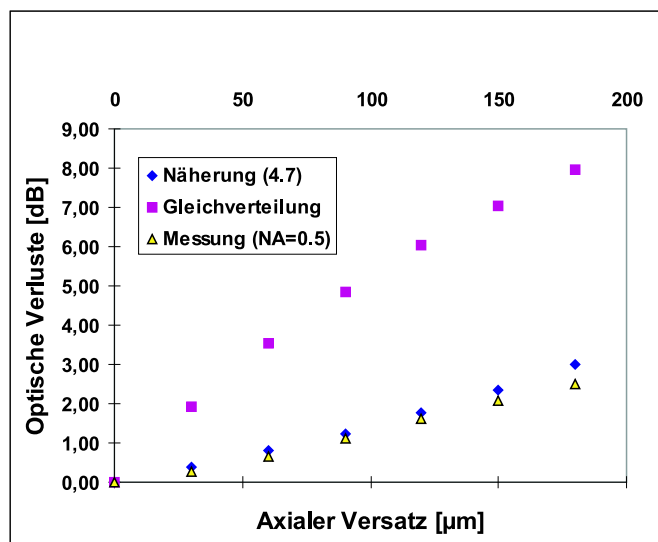
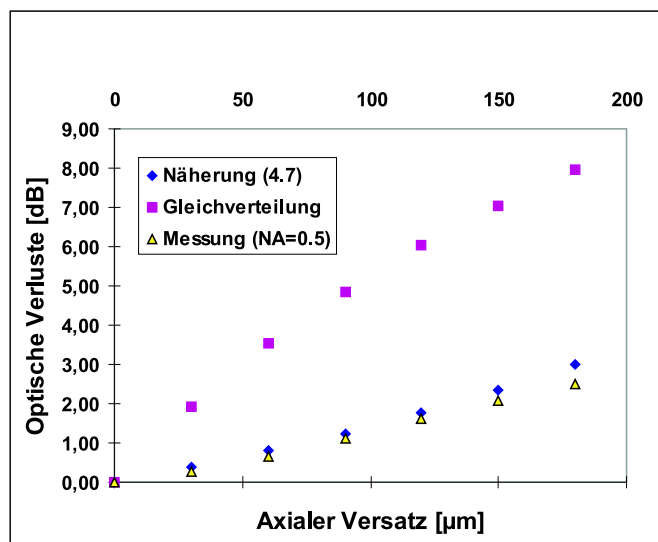
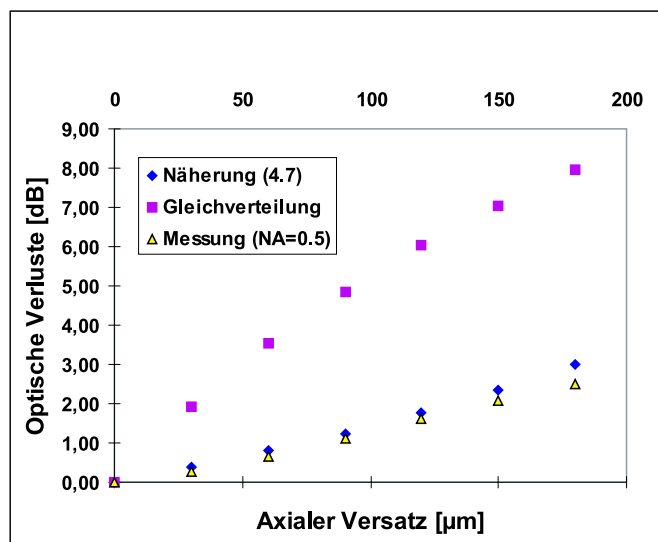
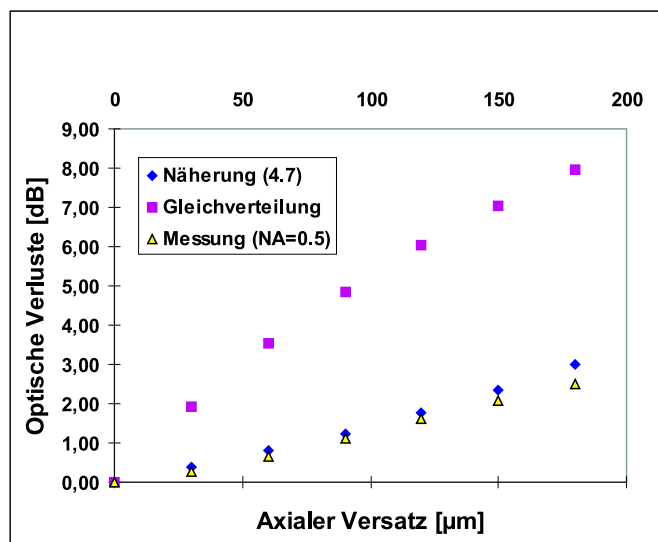
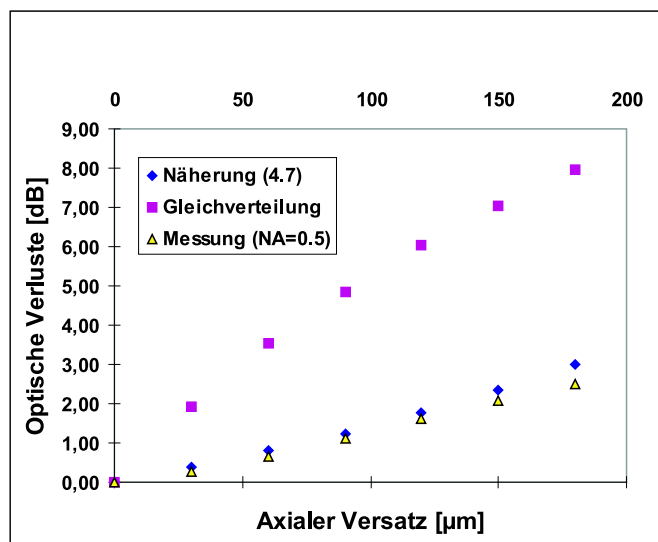
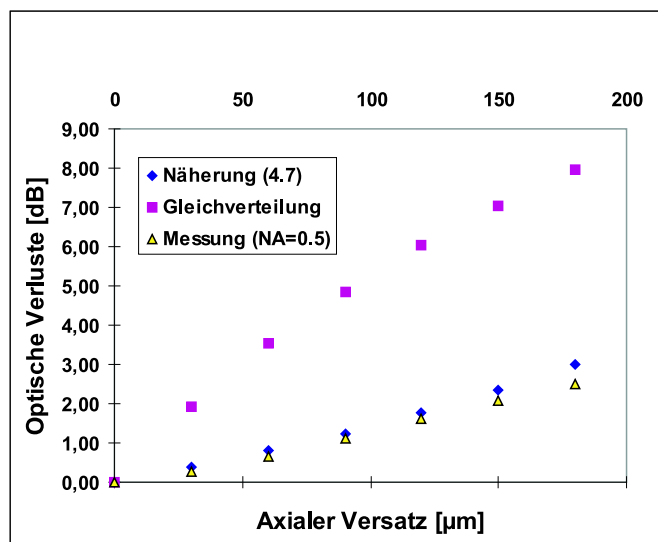
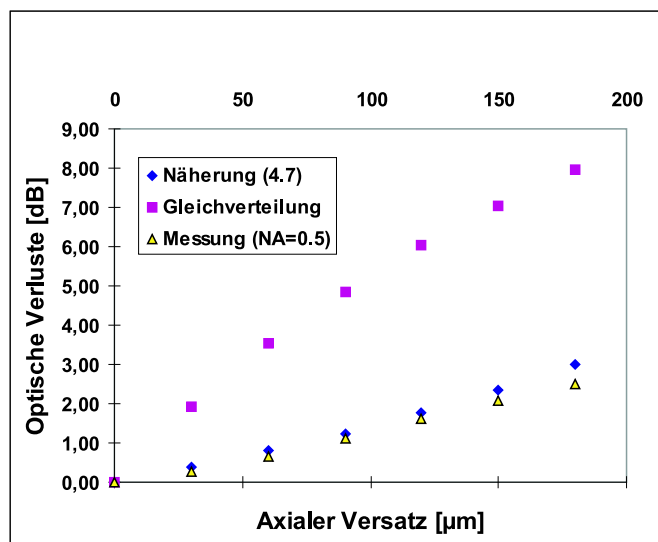
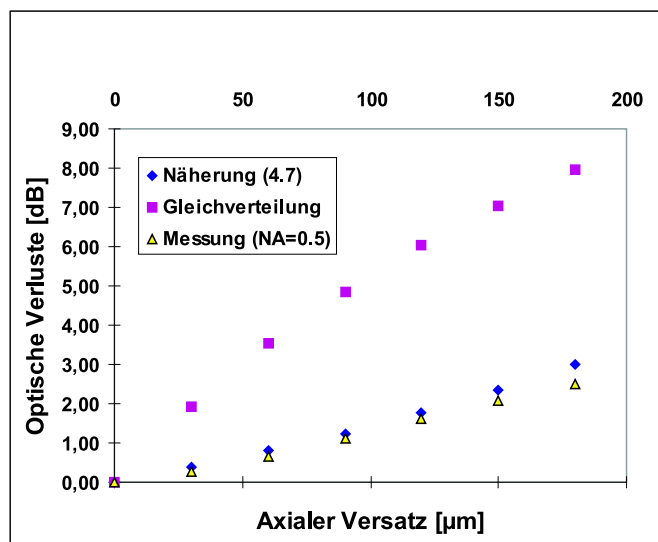
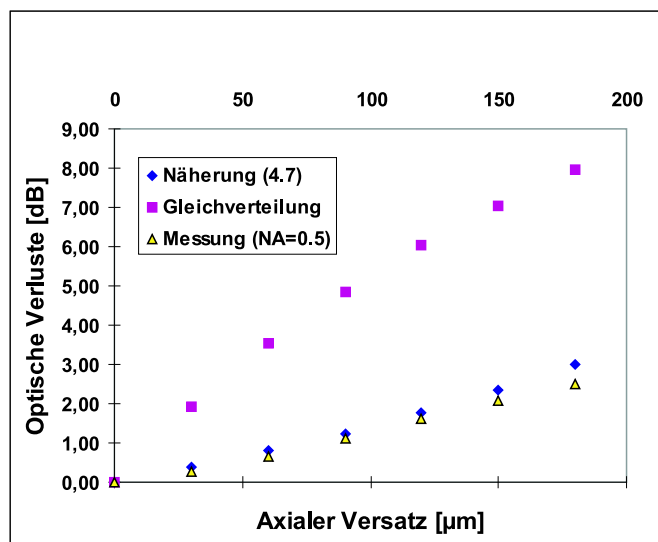
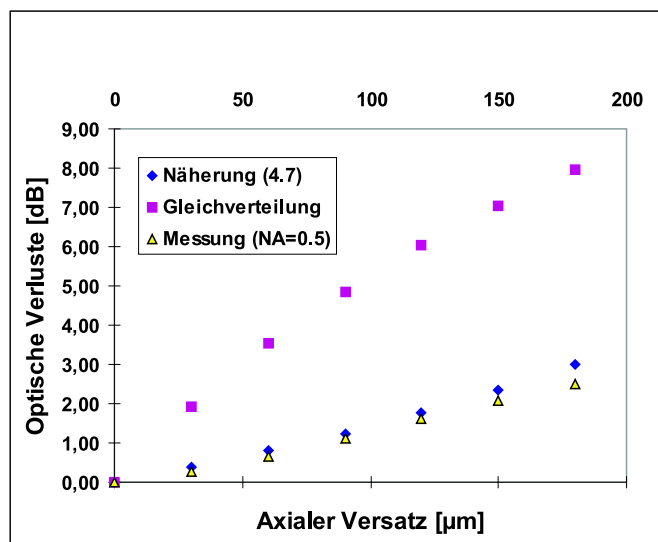
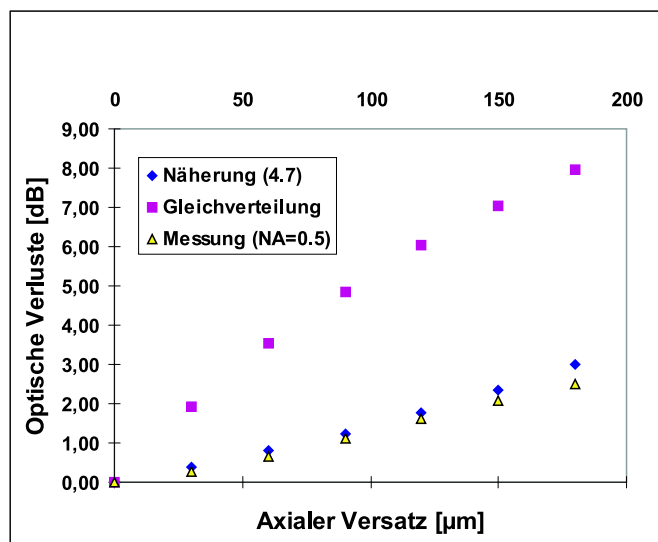
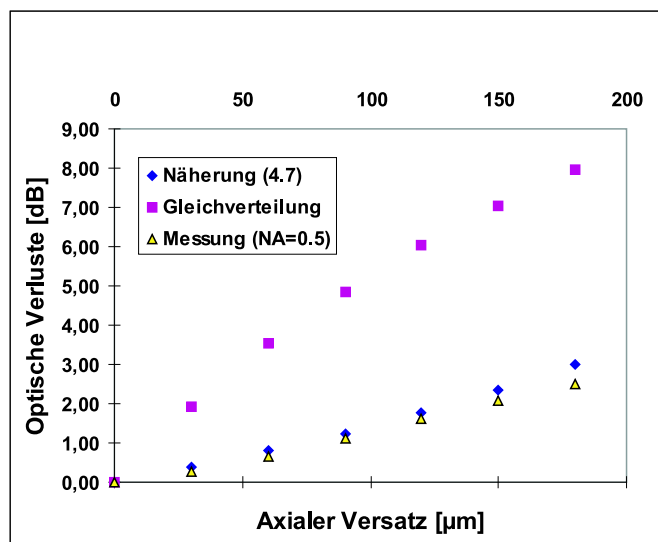
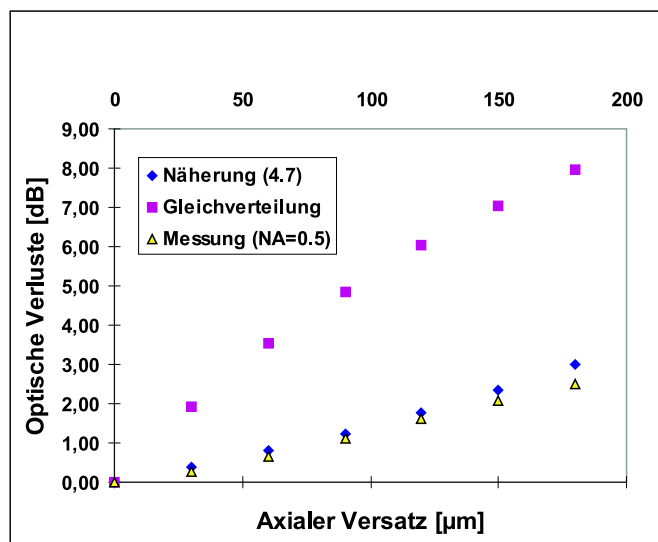
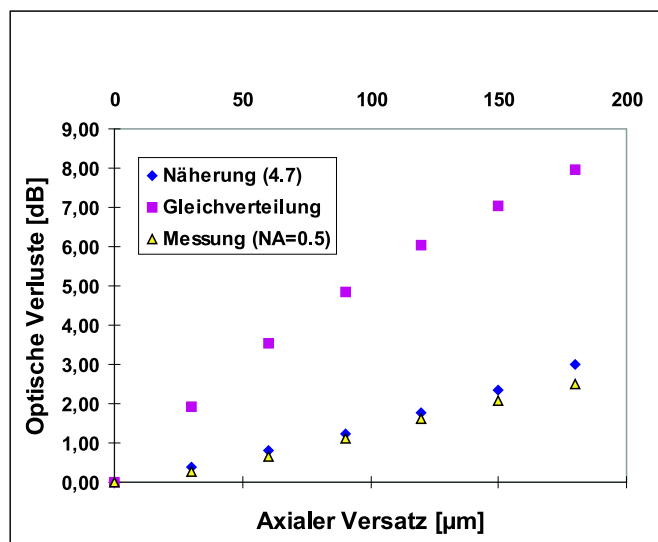
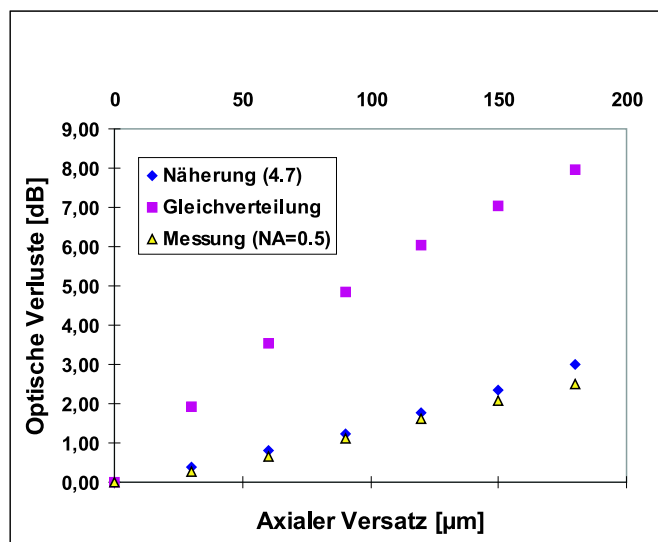
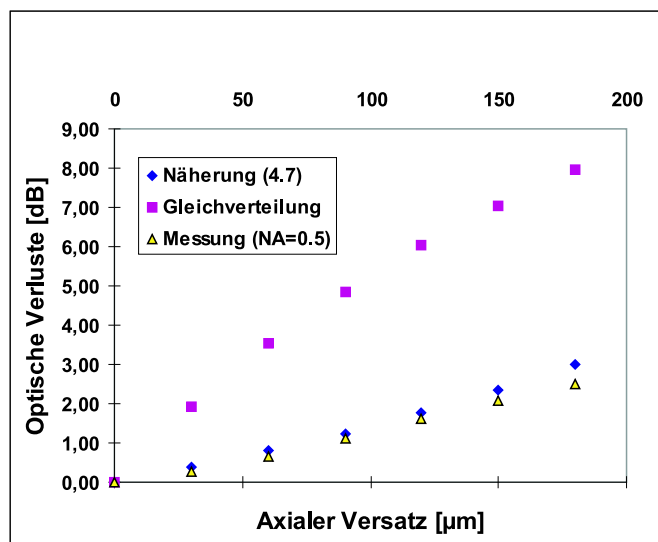
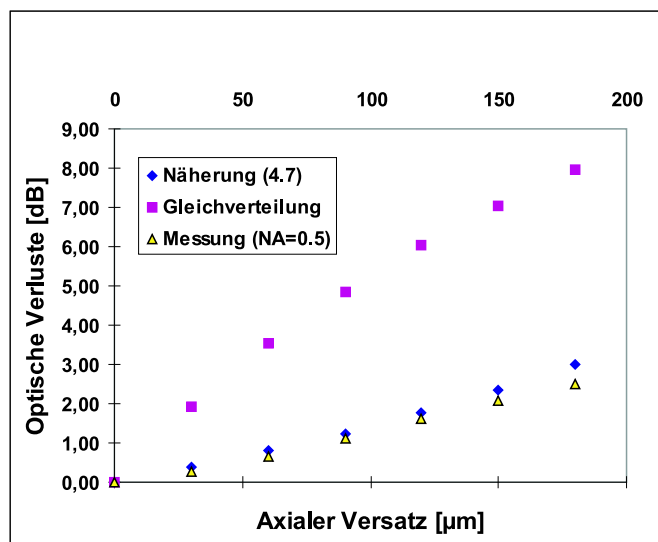
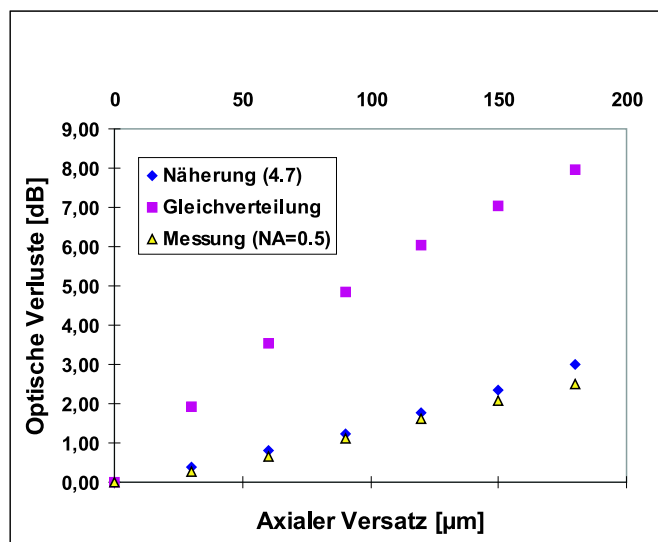
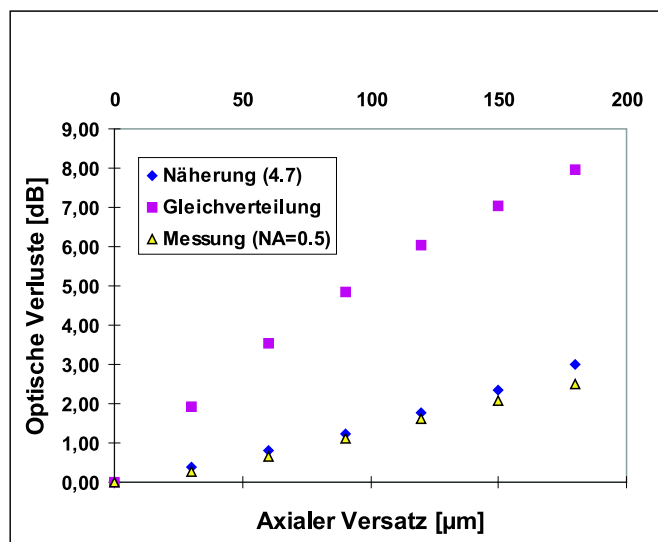
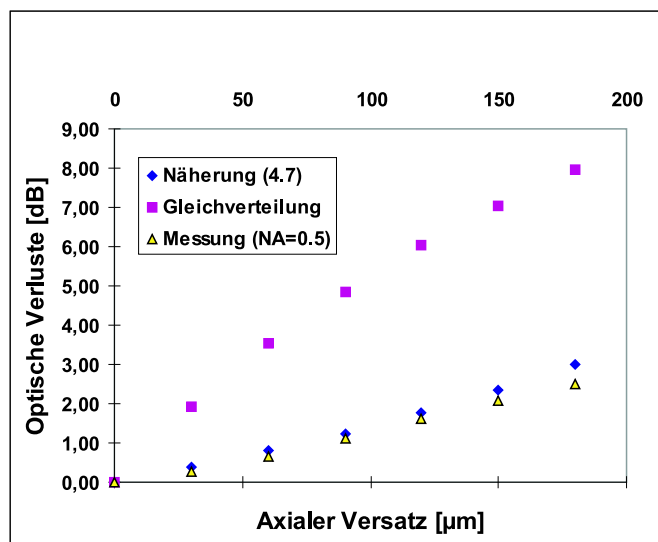
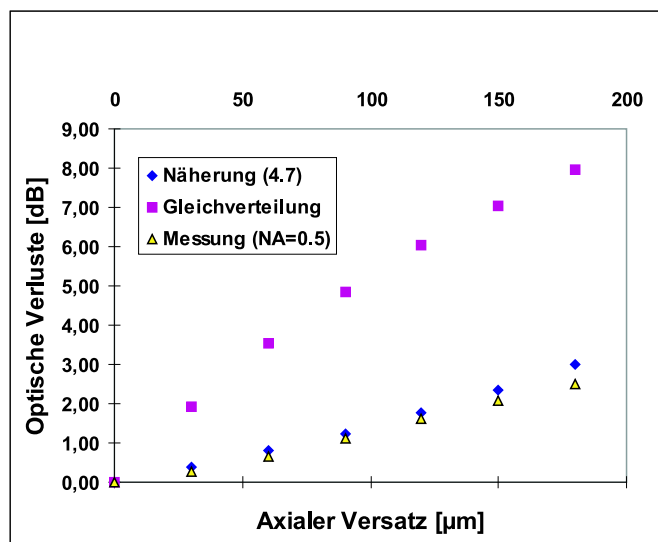
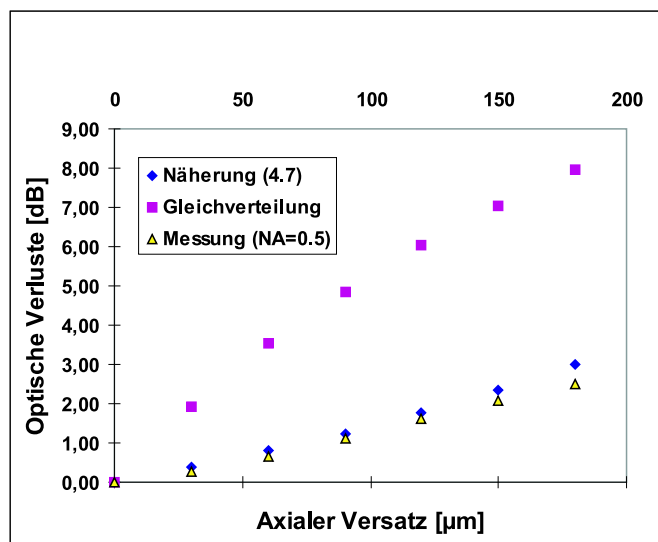
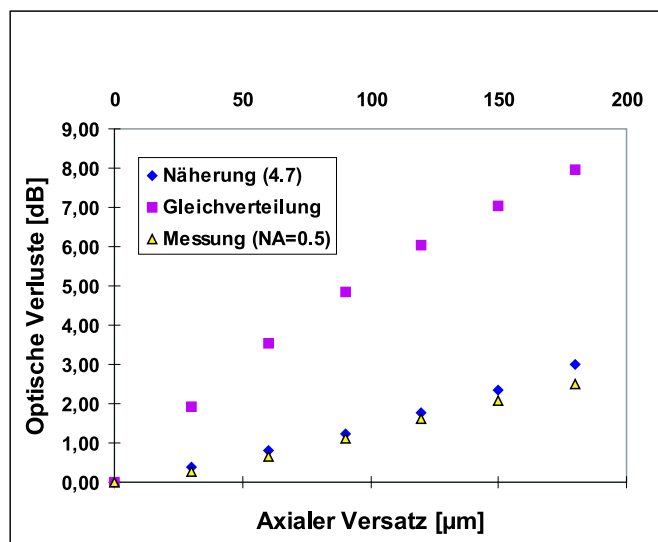
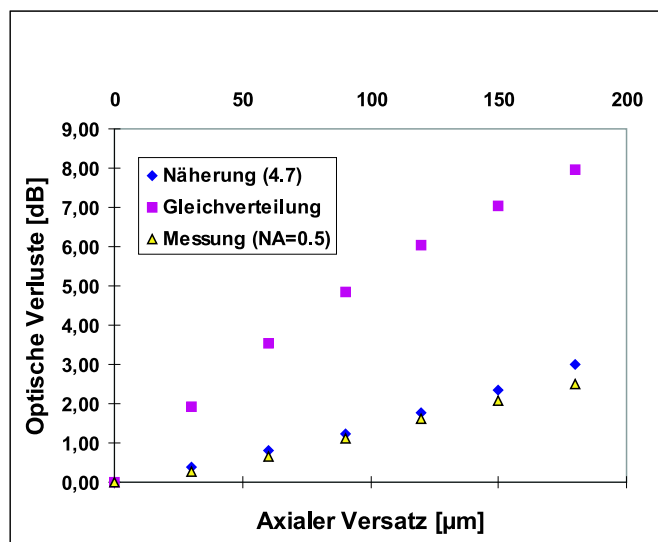
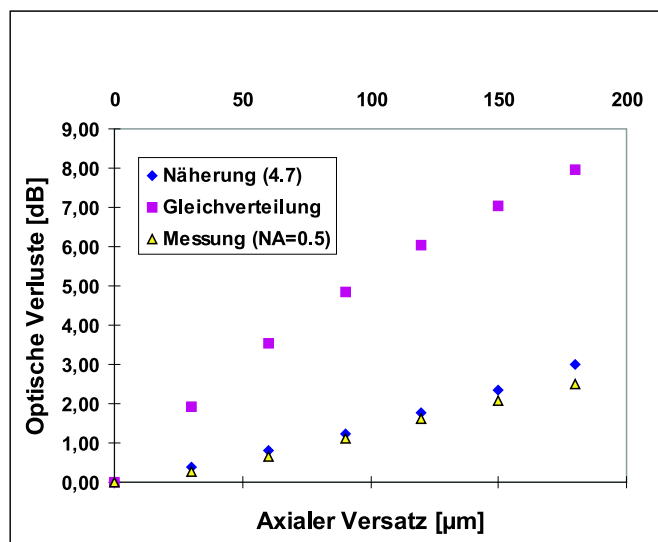
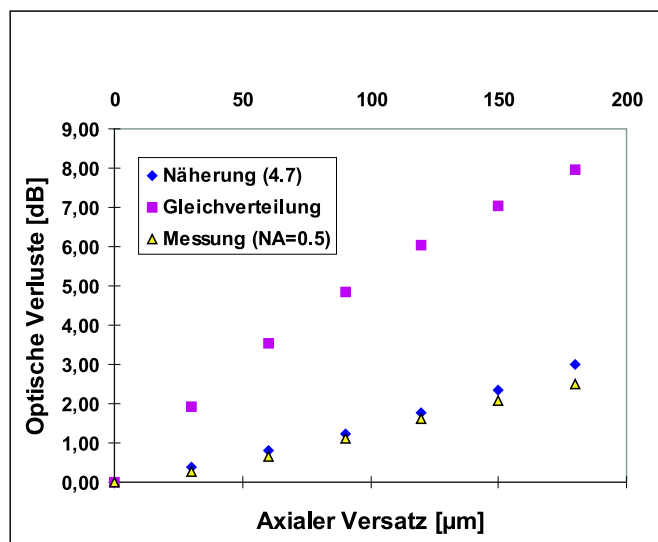
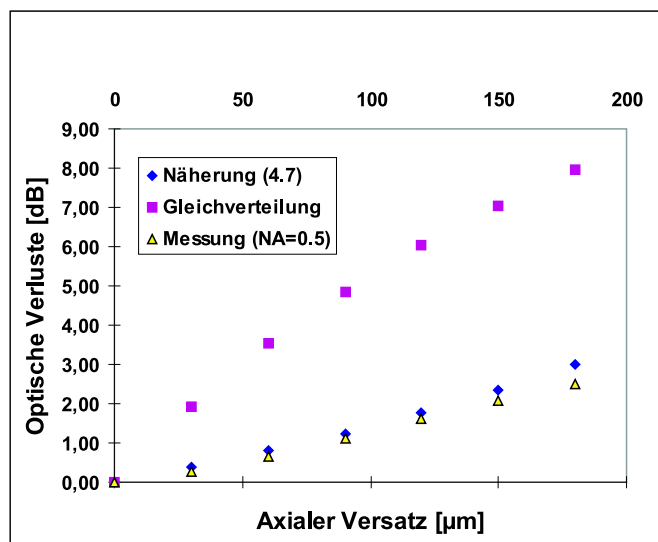
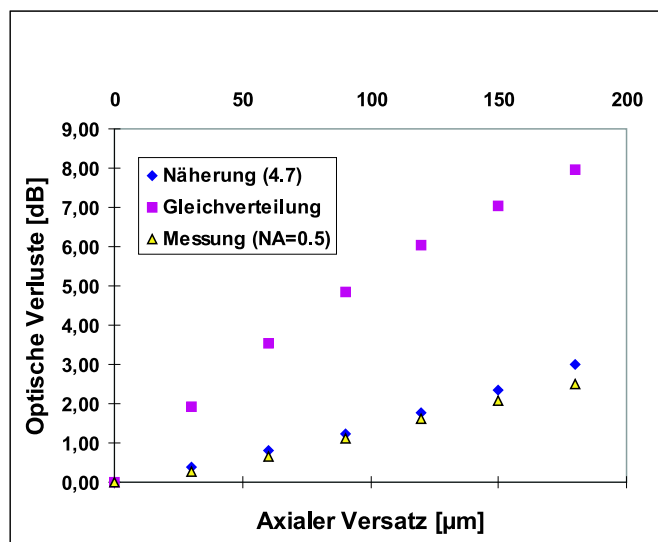
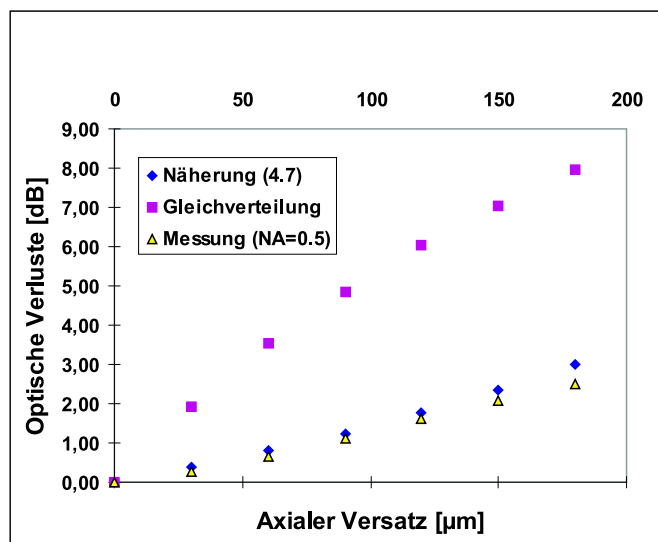
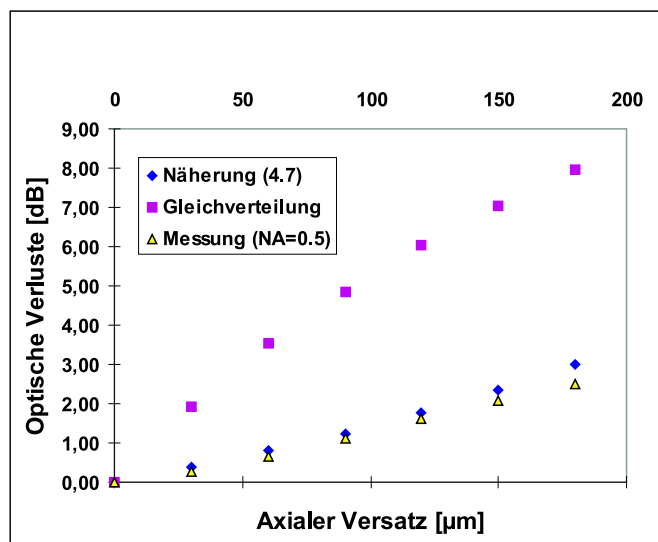
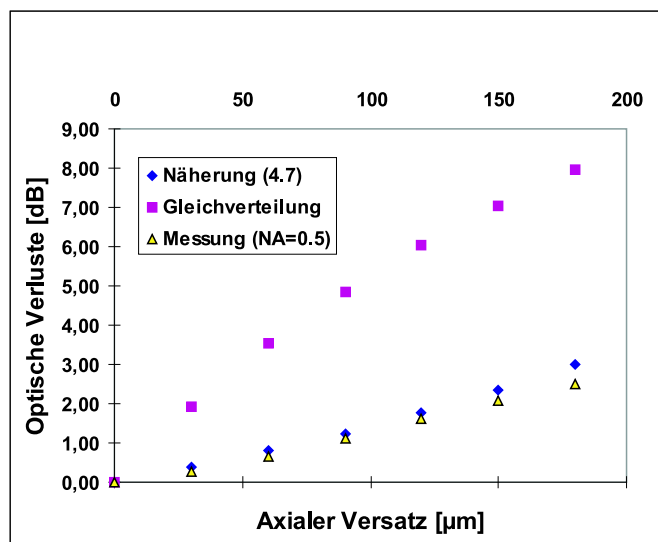
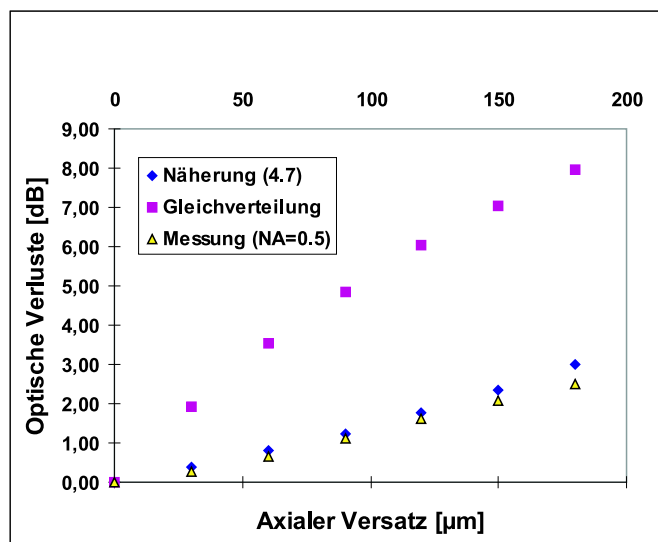
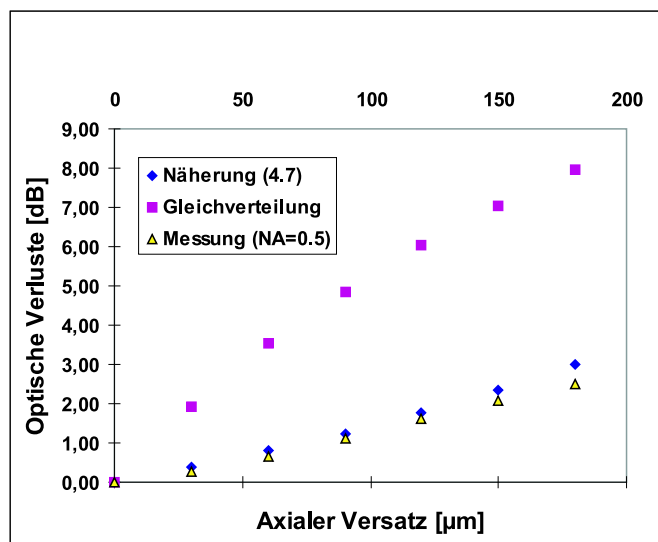
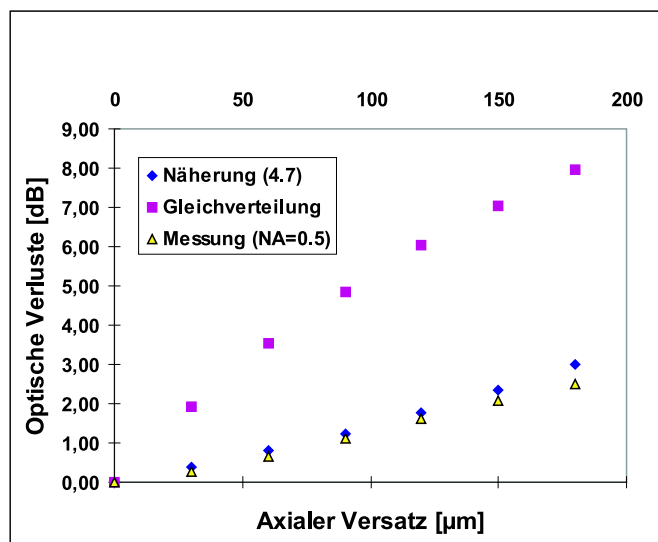
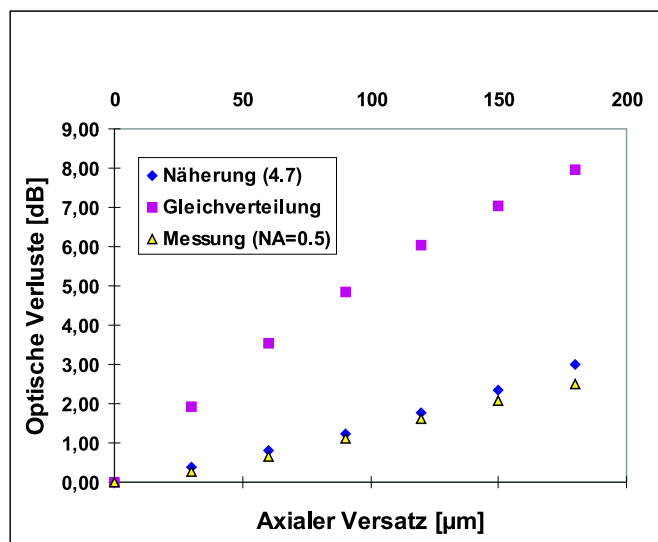
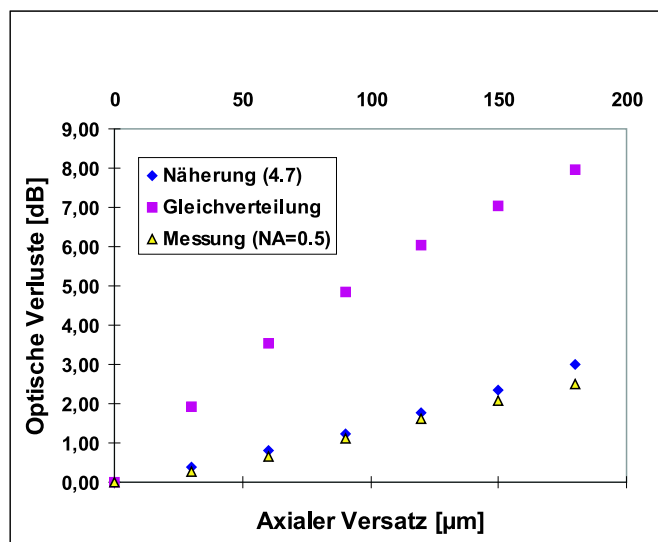
Abbildung 4.20: Axialer Versatz mit Aus- und Einkoppelfaser

zur Berechnung der Verluste durch axialen Versatz verwendet:

$$L_{axial}(z) = -10 \cdot \log \left(1 - NA \frac{z}{3R} \right) \quad (4.7)$$

In dieser Formel ist z der Abstand der Faserstirnflächen, R ist der Radius des Faserkerns und NA ist die numerische Apertur. Mit dieser Formel lassen sich Versätze bis $50 \mu m$ berechnen.

Aus der Messung zum axialen Versatz ist erkennbar, dass ein Versatz von $90 \mu m$ Zusatzverluste von 1 dB (80% Leistungstransmission) verursacht. Rechnet man mit einer homogenen Ausleuchtung der POF kommt man zu einem Versatz-empfindlicheren Ergebnis, nämlich $18 \mu m$.



Lateraler Versatz

Lateraler Versatz (Abbildung 4.22) bezeichnet die seitliche Versetzung der Faserachsen. Auch für diese Versatzart wurden Verluste berechnet und gemessen. Wieder führte die Berechnung mit gleichmäßiger Faserausleuchtung zu einem stärkeren Einfluss des Versatzes, als durch die Messung bestätigt wird.

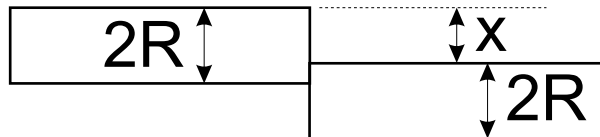


Abbildung 4.22: Lateraler Versatz von zwei Fasern.

$$L_{\text{Lateral}}(x) = -10 \cdot \log \left(1 - \frac{2x}{\pi R} \right) \quad (4.8)$$

Abbildung 4.23 zeigt das Ergebnis der Messung mit der Näherung [113]. Wieder zeigt sich eine gute Übereinstimmung bis ca 50 % des Faserkerndurchmessers. Außerdem erweisen sich kleine Versätze (hier bis $18 \mu\text{m}$) als unkritisch.

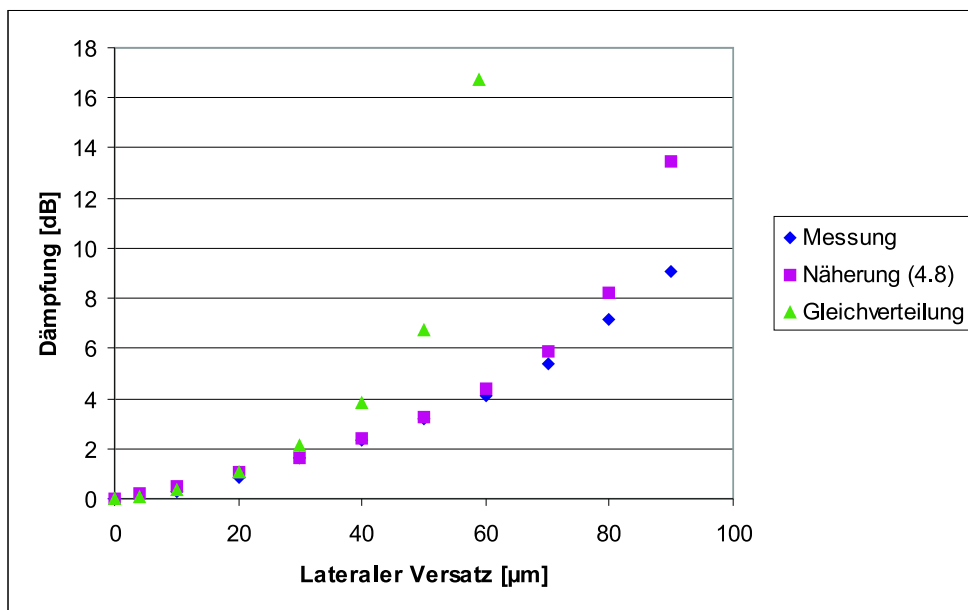


Abbildung 4.23: Messung und Näherung für lateralen Versatz

Winkelversatz

Letzte zu diskutierende Versatzart ist der Winkelversatz (Abb. 4.24). Bei dieser Verlustart stehen die Stirnflächen der Faser nicht parallel voreinander, sondern sind verkippt. Diese

Verkipfung wird durch den Verkipfungswinkel φ beschrieben.

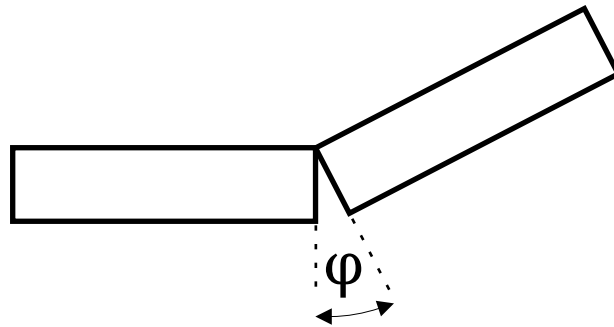


Abbildung 4.24: Winkelversatz zwischen zwei Fasern.

Nach [114] kommt man für kleine Winkel zu folgender Näherungsformel für die Verluste durch Winkelversatz:

$$L_{Winkel}(\varphi) = -10 \cdot \log \left(1 - \frac{4 \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{\pi \cdot NA} \right) \quad (4.9)$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.25 dargestellt.

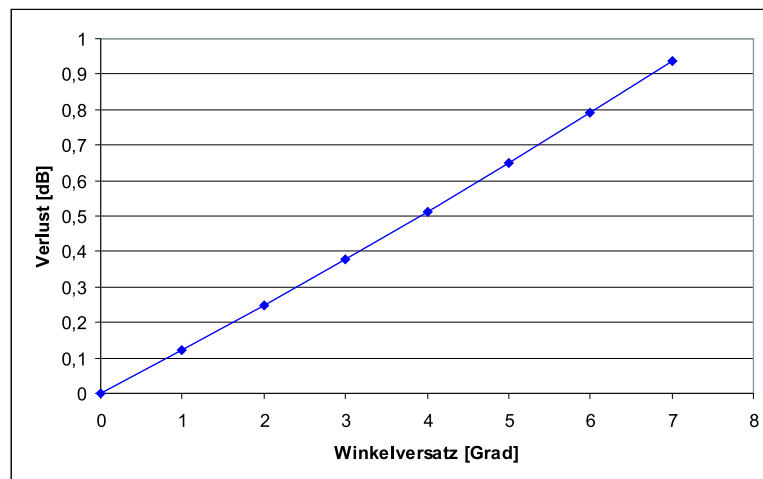


Abbildung 4.25: Verluste durch Winkelversatz.

Aus diesem Diagramm wird deutlich, dass Verkipfungen bis 7° Dämpfungen unter 1 dB verursachen und somit tolerabel sind.

Daraus folgt für das Bauelement:

In Kapitel 4.2.3 sind die realisierten Toleranzen für die Fasern angegeben. Der axiale Versatz führt zu keinen Zusatzverlusten, da die Faserendfläche dadurch näher an den Sende-/Empfangseinheiten herantreten. Der laterale Versatz beträgt maximal $12 \mu m$.

Nach Formel 4.8 resultiert daraus eine Zusatzdämpfung von 0,6 dB. Für den Winkelversatz wird folgende Überlegung angestellt: Da die POF einen Durchmesser von $125 \mu\text{m}$ und die Löcher im Plättchen einen von $130 \mu\text{m}$ haben, kann die Faser darin verkippt sein. Den Verkippungswinkel berechnet man zu 1° und daraus folgt ein Verlust von 0,1 dB.

Verlustart	Dämpfung bei		
	660 nm	870 nm	980 nm
Absorption (20 cm)	0,12 dB	1,20 dB	2,20 dB
Biegeverluste	0,60 dB	0,60 dB	0,60 dB
Kopplungsverluste	0,74 dB	0,74 dB	0,74 dB
max. Versatzverluste	0,82 dB		
Gesamtverluste	2,30 dB	3,40 dB	4,40 dB

Tabelle 4.9: Verlustbilanz der POF.

4.3.3 Messung des Brechungsindex der POF

Um den Brechungsindex der POF festzustellen, wird an der POF eine RNF Messung (**R**efractive **N**earfield) [109, 110] durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird ein Helium-Neon (HeNe)-Laserstrahl auf die Stirnfläche einer Probe fokussiert und der Anteil des aus der Probe herausgebrochenen Lichtes mit einem Detektor aufgefangen. Durch einen Computer erfolgt mit Hilfe eines nachgeschalteten Log-In Verstärkers die elektronische Auswertung. In Abbildung 4.26 ist der prinzipielle Aufbau eines RNF-Messplatzes gezeigt. Um mathematisch die Brechzahlen bestimmen zu können, ist die Brechzahl des

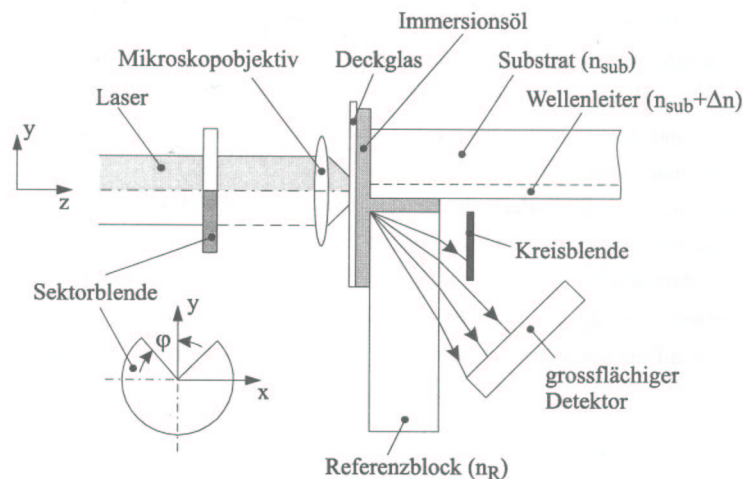


Abbildung 4.26: Aufbau des RNF Messplatzes.

Substrates und des Referenzblockes bekannt. Hier wurde die POF in ein PMMA Substrat

mit einer Brechzahl von 1,4889 bei $\lambda = 633 \text{ nm}$ eingeklebt. Die Brechzahl des Referenzblockes aus BK7(BorKronglas)-Glas liegt mit 1,51509 oberhalb von diesem Wert. Die Abtastung erfolgt mit einer örtlichen Auflösung von $0,3 \mu\text{m}$ in y-Richtung (senkrecht) und $1 \mu\text{m}$ in x-Richtung (waagrecht). Das Abtastfenster hat eine maximale Größe von $400 \times 400 \mu\text{m}^2$. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, wird aus mehreren Messungen ein Mittelwert gebildet. Die Genauigkeit des hier benutzten Verfahrens beträgt $1 \cdot 10^{-4}$.

Um zuverlässige Messungen zu erhalten, muss die Stirnfläche der Probe sehr gut poliert ($R_a < 100 \text{ nm}$) sein und darf keinerlei Kantenabrundungen aufweisen. Abrundungen behindern eine korrekte Fokussierung des abtastenden Lasers und tragen zu einer Verzerrung der Messkurve bei.

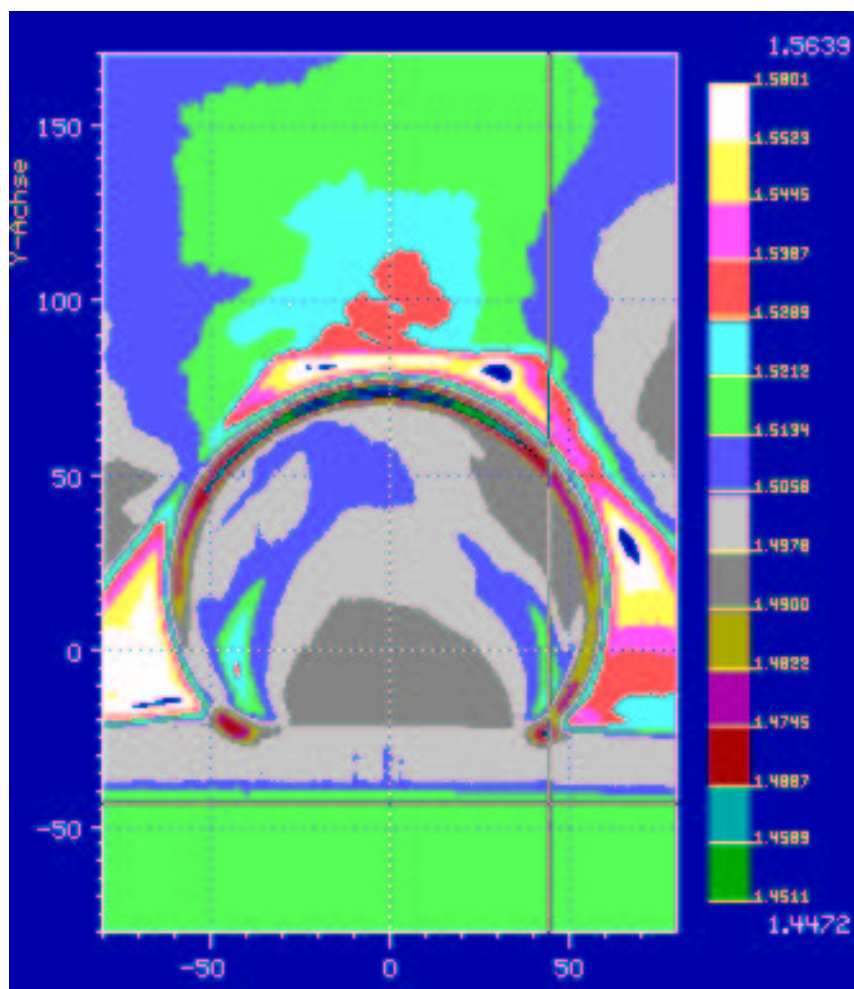


Abbildung 4.27: Messergebnis der RNF Messung an der $120/125 \mu\text{m}$ POF.

Abbildung 4.27 zeigt das Ergebnis für die $120/125 \mu\text{m}$ POF. Rechts neben der graphischen Darstellung des Messergebnisses findet man die Legende mit den Farben und den zugehörigen Zahlenwerten für die Brechungsindizes. Gut zu erkennen ist der runde Rand

der POF mit vielen Farben. Leider reicht die Auflösung des Messplatzes nicht aus, um auch den Brechungsindex des Mantels zu bestimmen. Die POF liegt in einer V-Nut, deren Querschnitt gut zu erkennen ist. Am unteren Rand ist der Referenzblock (BK7; grünes, rechteckiges Feld) zu erkennen. Aus der Skala entnimmt man einen Wert von von 1,5. Betrachtet man die vorherrschenden Farben dunkelgrau ($n=1,4900$), hellgrau ($n=1,4978$) und blau ($n=1,5058$), dann findet man für den Brechungsindex des Faserkerns den Wert $1,4979 \pm 0,0079$. Der Hersteller spezifiziert den Brechungsindex mit $1,492 \pm 0,001$.

4.3.4 Bandbreiten und Übersprechen

Für eine schnelle Datenverbindung soll das Verbindungsstück 10 Gbit/s pro Faser übertragen können. Das Bandbreitenlängenprodukt (BL) kann durch folgende Näherung abgeschätzt werden[115]:

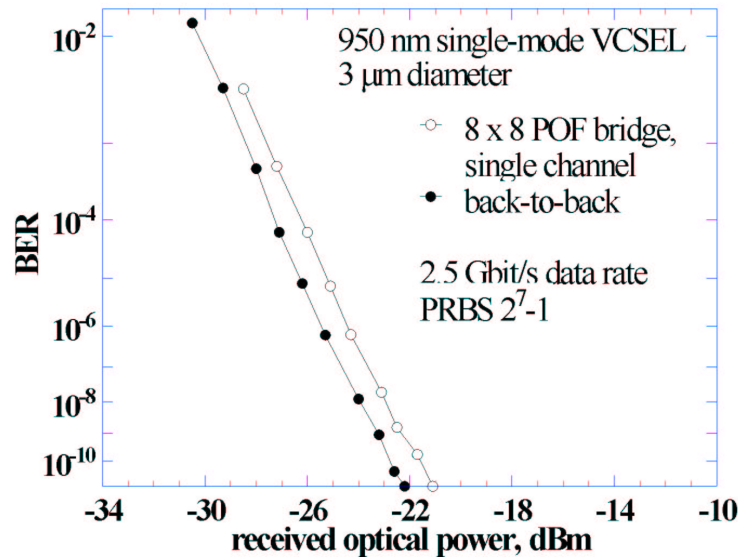
$$BL \cong 0,443 \cdot \frac{c}{\Delta} \quad (4.10)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist und Δ die relative Brechungsindexdifferenz

$$\Delta = \frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{co}} \quad (4.11)$$

Für die hier benutzte Faser mit $\Delta=0,056$ und einer NA von 0,5 ist $BL = 2,37 \text{ MHz} \cdot \text{km}$ oder $2,37 \text{ GHz} \cdot \text{m}$. Damit können Datenraten von 8 GBit/s bei einer Faserlänge von 50 cm erreicht werden. Da eine sehr große Anzahl von Moden auftreten, ist Modenrauschen kein Problem, wie in einem 2,5 GBit/s Experiment gezeigt wird [115]. Um die Qualität der Messung festzustellen, wird die Bit-Error-Rate der Faser gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.28 zu sehen. Die Faserlänge beträgt 50 cm und als Lichtquelle wurde ein VCSEL mit 850 nm Wellenlänge benutzt. Mit einer Germanium Lawinenphotodiode (Bandbreite 2 GHz), werden verzerrungsfreie Datenraten (NRZ, Non Return to Zero) von 2,5 GBit/s mit 27-1 Wort Länge (PRBS, Pseudo Random Bit Sequence) gemessen. Die BER ist besser als 10^{-11} bei einer optischen Empfangsleistung von unter -20 dBm. In anderen Experimenten wurden BL von 6 Bit/s·m beobachtet [116]. Das hier getestete Verbindungsstück kann also noch deutlich höhere Datenraten übertragen, da es weit unter der Grenze für Modenrauschen arbeitet. Die in den Messungen verwendete POF besitzt zwei 90° Winkel mit einem Biegeradius von 2 mm und entspricht damit den Bauteilanforderungen.

Eine weitere wichtige Größe ist das optische Übersprechen zwischen den Fasern. Dieses liegt unter 35 dB und sollte damit vernachlässigbar sein.

Abbildung 4.28: BER Messung an einer 125 μ m POF.

4.4 Optisches Leistungsbudget im Demonstrator

Ziel des in diesem Projekt entwickelten optischen Verbindungsstückes ist es, optische Sender und Empfänger auf einer Platine zu verbinden. Die Sender und Empfänger befinden sich auf Prozessoren. Von diesen Prozessoren sind drei Stück auf der Platine realisiert. Abbildung 4.29 und 4.30 zeigt Bilder davon. Auf dem großen Bild ist die an Strom- und Datenquelle angeschlossene Platine zu sehen. Abbildung 4.30 zeigt einen OPB auf dem optischen Chip. Eine Seite des optischen Chips bleibt unbesetzt, so ist der Chip auf dem Photo erkennbar. Während der Tests ist auch dieser Teil mit einer POF-Verbindung bestückt. Auf dem Photo schlecht zu erkennen sind zwei PMMA-Plättchen, auf denen der OPB seitlich aufliegt, um einen definierten Abstand zu den optischen Sendern/Empfängern einzustellen. Der Demonstrator arbeitet bei 980 nm, deshalb sind die folgenden Dämpfungswerte nur für 980 nm angegeben.

In Tabelle 4.10 sind nochmal die durch die Verbindung verursachten Verluste aufgelistet. Die Länge des Verbindungsstückes beträgt 20 cm.

Verlustart	Dämpfung bei		
	660 nm	870 nm	980 nm
Absorption	0,1 dB/m	1,3 dB/m	2,2 dB/m
Biegeverluste	0,6 dB	0,6 dB	0,6 dB
Stirnflächenverl.	0,7 dB	0,7 dB	0,7 dB
Gesamtverluste	1,4 dB	2,6 dB	3,5 dB

Tabelle 4.10: Verlustbilanz der POF.

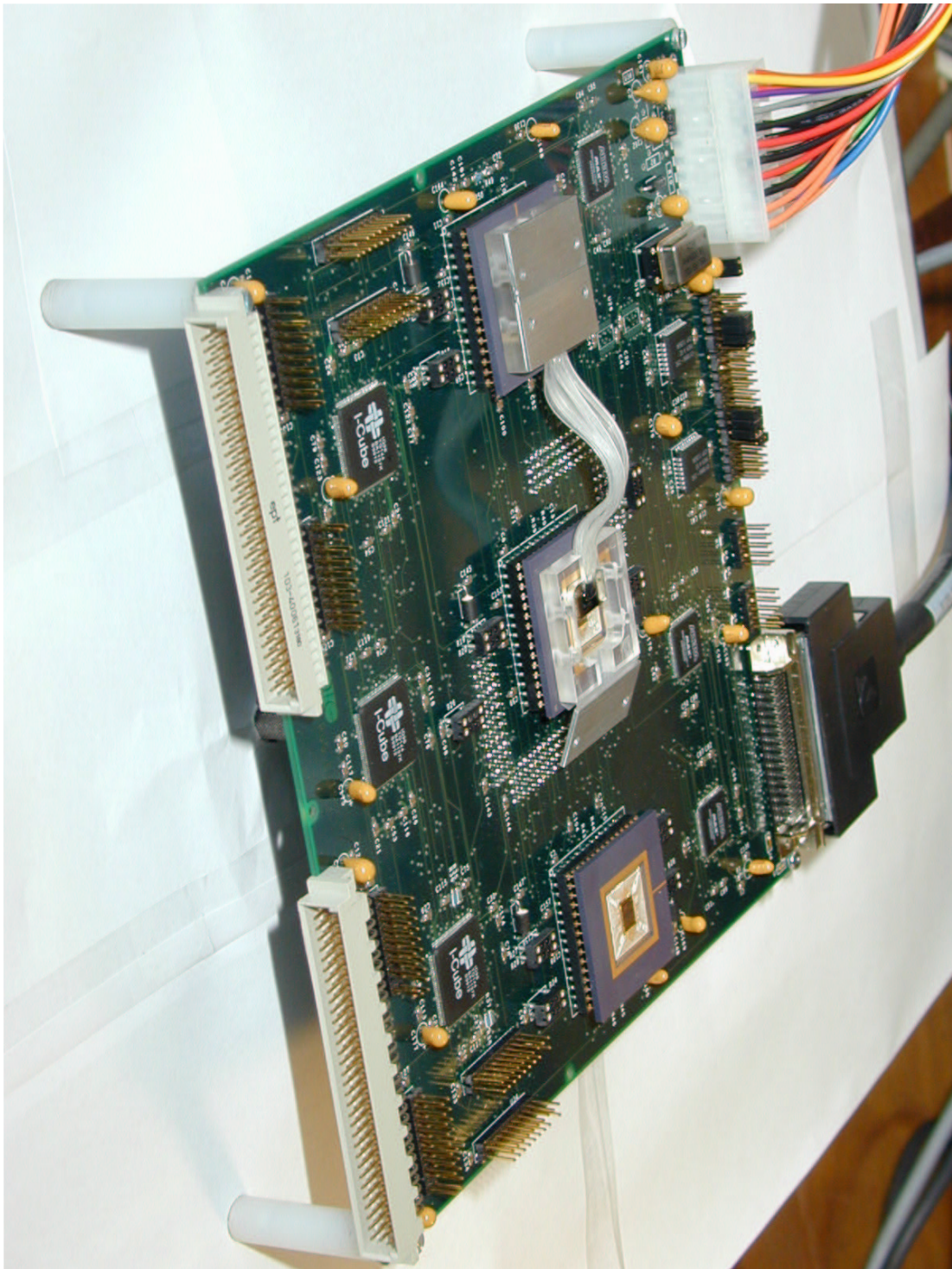


Abbildung 4.29: Der Systemdemonstrator in OIIC. Deutlich erkennbar sind die Faserbündchen des optischen Verbindungsstückes. Auf dem dritten Prozessor fehlt das optische Verbindungsstück. Für Messungen wird auch hier eine optische Datenkommunikation ermöglicht.

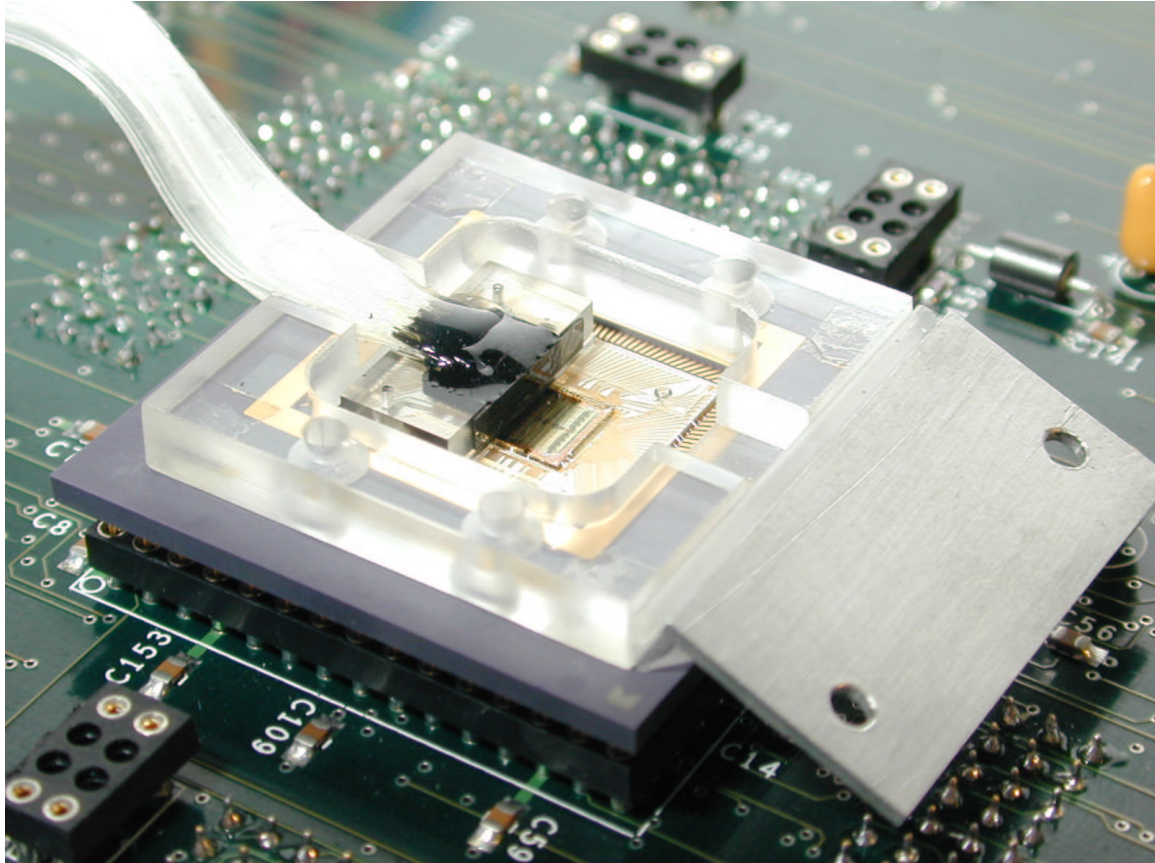


Abbildung 4.30: Der OPB auf den VCSELn und PDs. Deutlich zu erkennen ist der optische Chip unter dem OPB.

Die Werte für 660 nm und 870 nm sind der Vollständigkeit halber aufgelistet. Aus der Tabelle folgt, dass durch die Verbindung 3,5 dB (45 % Transmission) an optischer Leistung durch die Faser verloren gehen.

Um die Bedeutung dieser Werte für den Demonstrator einzuschätzen, müssen die Leistung der VCSEL (1 mW; 0 dBm) und die Empfindlichkeit des Photodetektors (-14 dBm - 0 dBm) bekannt sein. Nachfolgend werden die Einkopplung mit VCSEL und die Auskopplung in die Photodetektoren betrachtet.

4.4.1 Einkopplung in die POF

Die VCSEL werden mit einer aktiven Fläche von $12 \mu\text{m}$ realisiert und strahlen mit einer NA von 0,17 (10°) ab. Daraus folgt für die Einkopplung in die POF (Abstand POF-VCSEL = $40 \mu\text{m}$), ein Strahldurchmesser auf der POF Stirnfläche von $26 \mu\text{m}$. Durch den axialen Versatz sollte also keine Leistung verloren gehen. Abbildung 4.31 verdeutlicht dies. Zusätzlich sind hier nur die Fresnelschen Verlustbeiträge zu beachten [97].

$$D_{Fresnel} = \left(\frac{n_{POF} - n_{Luft}}{n_{POF} + n_{Luft}} \right)^2 = 0,04\% \quad (4.12)$$

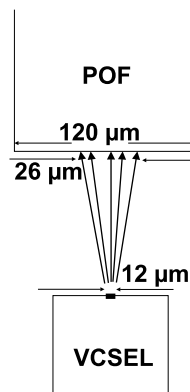


Abbildung 4.31: Die Einkopplung in die POF. Zeichnung ist nicht maßstabsgetreu.

Für die Einkopplung ergeben sich dadurch Zusatzverluste von 0,18 dB.

4.4.2 Auskopplung auf den Photodetektor

Der Durchmesser der aktiven Fläche des Photodetektors beträgt $150 \mu m$ und liegt in $83 \mu m$ Entfernung von der POF Stirnfläche. Aus der Messung der Abstrahlcharakteristik der POF (Abbildung 4.19) ist bekannt, dass die POF eine effektive NA von 0,42 (25°) besitzt. Mit diesen Werten berechnet man einen Strahldurchmesser auf dem Detektor von $198 \mu m$, woraus Verluste von 2,41 dB entstehen. In Abbildung 4.32 ist die Situation dargestellt.

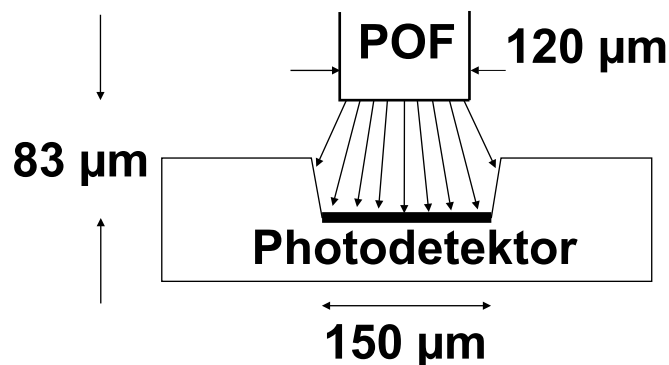


Abbildung 4.32: POF-Detektor Kopplung. Das Licht aus der POF trifft nach $83 \mu m$ auf die aktive Fläche des Photodetektors.

Im Projekt werden die Flanken des Photodetektors verspiegelt, so dass die Lichtstrahlen nicht in das PD-Substrat hineinstrahlen. So sollte ein Großteil des Lichtes den Detektor erreichen. Es handelt sich bei den 2,41 dB also um eine worst case Annahme. Berücksichtigt man noch die Fresnelverluste von 0,17 dB, kommt man auf Gesamtverluste (ohne Versatz) von 2,58 dB bei der Auskopplung in den Photodetektor.

4.4.3 Vergleich mit der Spezifikation

	Verlustart	Verluste	ber. Verluste
Einkopplung	Fresnel	0,20 dB	0,20 dB
POF	Absorption	$2,20 \pm 0,02$ dB	4,00 dB
	Biegung	0,60 dB	6,00 dB
	Kopplung	$0,80 \pm 0,40$ dB	
PD-Kopplung	Ax./Lat. Versatz	2,60 dB	-
	Gesamtverluste	$6,40 \pm 0,30$ dB	14,00 dB*

Tabelle 4.11: Optische Verluste in der realisierten Verbindung. Nur für die Kopplung und die Absorption ist ein Fehler angegeben, da die anderen Werte entweder berechnet (Fresnel) oder Maximalwerte sind (Biegeverluste). *Berechnete Gesamtverluste resultieren aus der Dynamik der Photodiode.

Tabelle 4.11 zeigt die Gesamtverluste der optischen Verbindung im realisierten Demonstrator und wie sie sich zusammensetzen. Der Wert für den axialen Versatz ist Kapitel 4.3.2 entnommen. Da hier die Fresnelverluste einzeln berücksichtigt werden, müssen diese aus den Kopplungsverlusten herausgenommen werden. Die VCSEL emittieren eine Leistung von 1 mW wovon rund 33% den Detektor erreichen. Die VCSEL strahlen eine optische Leistung von 1 mW in die POF ein. Die PDs sind für maximal 1 mW und minimal 0,04 mW (-14 dB) ausgelegt. Somit erfüllt das in dieser Arbeit realisierte Bauteil die Spezifikationen sehr gut.

5 Eine Basiskomponente für optische Kurzstreckenverbindungen: Der Sternkoppler

Bisher ist die POF für direkte Verbindungen von einem Sender zu einem Empfänger benutzt worden. Neben der Chip-to-Chip Verbindung ist die Vernetzung von Computern in Local Area Networks (LAN) eine weitere mögliche Anwendungsmöglichkeit für die POF. Für diese Anwendung sind optische Koppler wie Sternkoppler notwendig. Mit dem LIGA-Verfahren existiert ein Verfahren, Koppler herzustellen, allerdings ist dieses Verfahren aufwendig und teuer [117]. In diesem und dem nächsten Kapitel werden zwei Technologien zur preiswerten Herstellung von Sternkopplern beschrieben. Eine Möglichkeit stellt der

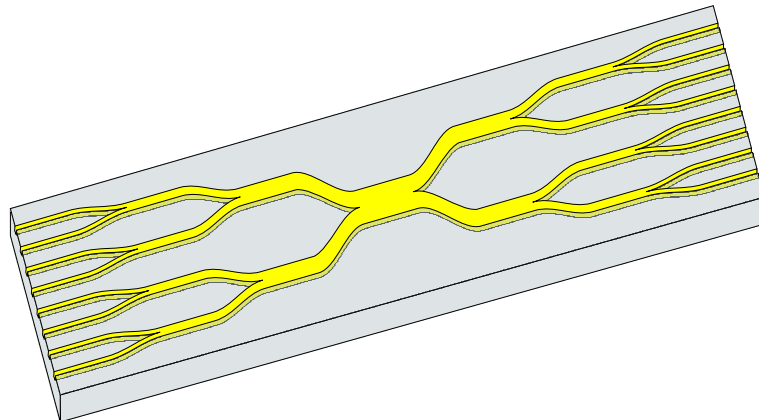


Abbildung 5.1: 8x8 Sternkoppler in Kaskadenstruktur.

Sternkoppler mit Kaskadenstruktur dar. Abbildung 5.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines 8x8 Kopplers. Strahlt man in einen Eingang Licht ein, wird dieses auf alle 8 Ausgänge aufgeteilt. Daraus folgt, dass einerseits hinreichend Lichtleistung in den Koppler eingestrahlt werden muss und andererseits die optischen Leistungsverluste durch Verzweigung und Absorption gering bleiben sollen. Schliesslich soll auf allen Ausgängen die gleiche Lichtleistung ankommen.

Zur Realisierung dieser Struktur werden die aus der Halbleitertechnik bekannten lithographischen Techniken verwendet und auf dickere Lackschichten ($\gg 10 \mu\text{m}$) erweitert.

Hierfür werden in dieser Arbeit neue Techniken entwickelt und beschrieben. Die Verwendung von Lacktechnik verspricht geringe Rauheiten an den Wänden und somit geringe optische Leistungsverluste, schmale Verteilerspitzen und geringe Herstellungskosten. Der

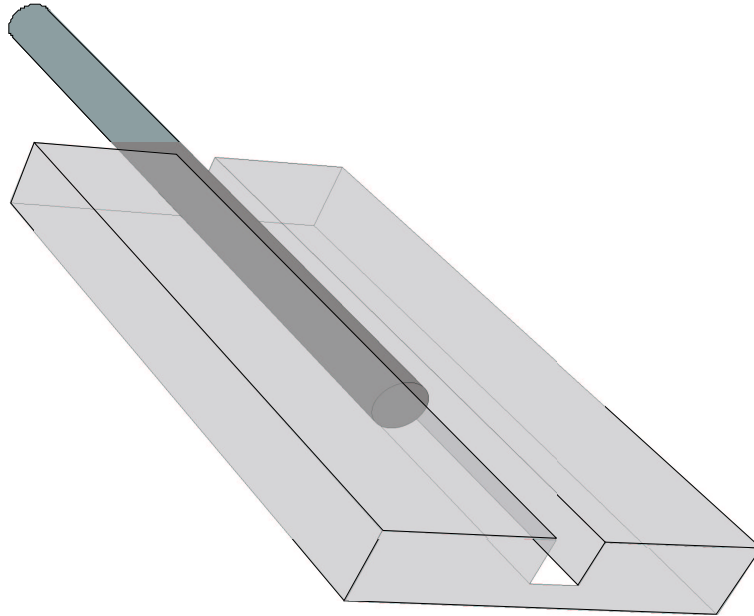


Abbildung 5.2: Faserankopplung wird durch Einlegen der Faser in die LWL-Struktur erreicht. Die Geometrien werden vorher aufeinander abgestimmt.

Vorteil dieser Technik liegt in der einfachen Ankopplung von dünnen POFs an die Wellenleiter, erfordert aber eine hohe Qualität der Verzweigerspitzen. Abbildung 5.2 zeigt die Faserankopplung schematisch: Die Faser wird in die Nut eingelegt. Im nächsten Schritt wird das Wellenleitermaterial in die Nut gebracht und anschließend ausgehärtet. Auf diese Weise wird die Faser in der Nut gehalten. Im letzten Kapitel wird eine weitere Technologie

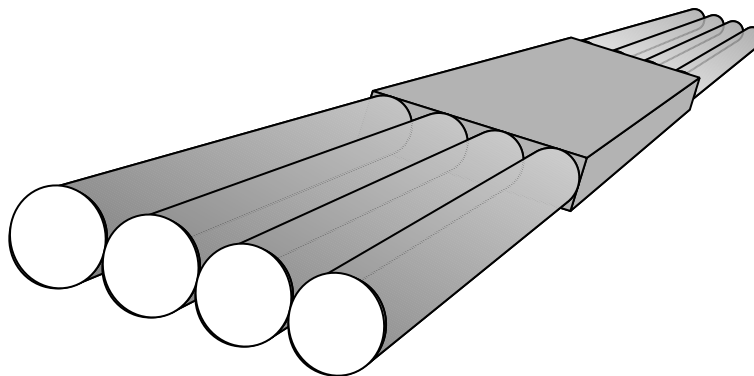


Abbildung 5.3: 4x4 Koppler in Mischerplättchen-Technologie.

zur kostengünstigen Realisierung von Sternkopplern vorgestellt. Abbildung 5.3 zeigt den

prinzipiellen Aufbau eines solchen Kopplers. Deutlich zu erkennen sind die Fasern, die von zwei gegenüberliegenden Seiten an einen quaderförmigen Bereich angrenzen. Der Vorteil dieser Technik liegt in der einfachen Realisierung dieser Struktur. Der Nachteil ist, dass dünne POFs - wie im vorigen Kapitel benutzt - nicht verwendet werden können.

Im folgenden werden zuerst Techniken zur Herstellung von optischen Wellenleitern beschrieben. Anschließend wird detailliert auf die Realisierung des Nickelstempels eingegangen. Der verwendete Lack, die neu entwickelte Belichtungstechnik und die Metallisierung und Abformung werden beschrieben. Im Kapitel 5.3 wird das Abformen und Verkleben der Wellenleiter beschrieben. Schließlich werden die Materialien charakterisiert. In den folgenden Kapiteln werden die erreichten Ergebnisse dokumentiert. Dazu gehören die Charakterisierung der Nickelformen (Rauheiten, Kanalquerschnitte, Homogenität der Lackoberflächen etc), die damit erzielten Wellenleiterdämpfungen und schließlich die Charakterisierung erster Koppler.

5.1 Herstellungstechnologien für Polymerwellenleiter

Im Folgenden werden verschiedene Herstellungstechniken für vielmodige Wellenleiter vorgestellt. Diskutiert werden photochemische Techniken, Ablationsverfahren und Abformtechniken.

5.1.1 Photochemische Verfahren

Prinzip dieses Verfahrens ist die direkte UV-Bestrahlung eines Kunststoffes. Durch selektive Belichtung mit einer Maske werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften verändert, so dass durch Brechzahlhübe Wellenleiterstrukturen entstehen.

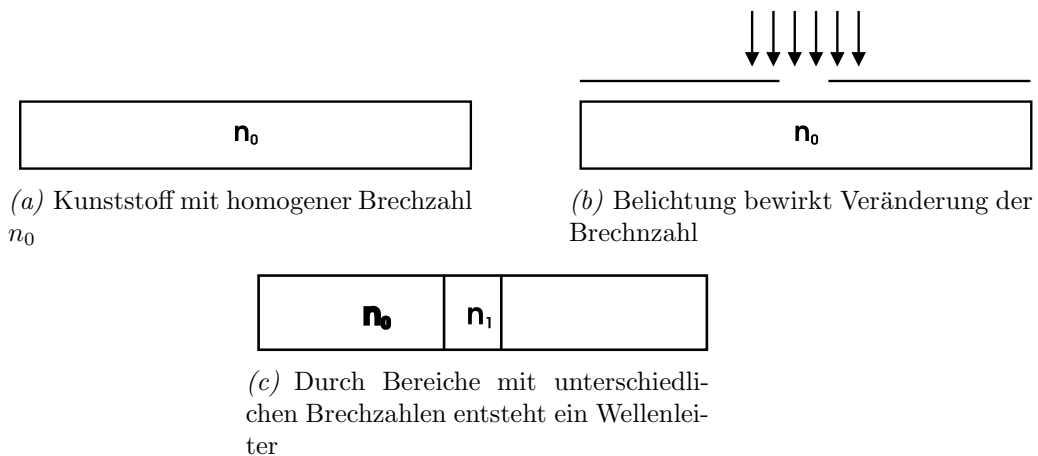


Abbildung 5.4: Prinzip der Wellenleiterherstellung in photochemischen Verfahren.

Wie bei den meisten Herstellungsverfahren liegen die Anfänge in den 70er Jahren. Kurokawa et al. [64] berichten von der selektiven Photopolymerisation von Polycarbonat (PC) und von Methylacrylat (MA) in PC: Durch Diffusion gelangt das flüssige MA in feste PC-Folien. Diese werden durch eine Photomaske hindurch belichtet, was in den belichteten Teilen zu einer Polymerisation des MA führt. Die unbelichteten Bereiche bilden nach dem Ausdampfen des unpolymerisierten MAs die Wellenleiter. Mit den so hergestellten Wellenleitern wurden Dämpfungen von 0,19 dB/cm bei einer Wellenlänge von 830 nm erreicht [65]. Ein mit diesem Verfahren hergestellter Sternkoppler erreicht eine durchschnittliche Verlustdämpfung von 3,7 dB [66]. Abbildung 5.4 zeigt die einzelnen Schritte in diesem Verfahren.

Das PolyguideTM-Verfahren, Ende der 80er Jahre von Booth et al. entwickelt, beruht auf dem Einschluss von Monomeren durch photoinduzierte Polymerisation. Die erreichbaren Dämpfungswerte liegen bei 0,08 dB/cm (800 nm) bzw. 1,6 dB/cm (1550 nm) [67]. Auch hier werden Folien verarbeitet, die durch Fotomasken belichtet werden. Nach der Belichtung wird die Wellenleiterfolie zwischen zwei weiteren Folien mit geringem Monomergehalt einlaminieren. Durch Diffusion des Monomers aus den unbelichteten Bereichen der Wellenleiterfolie in die Boden- und Deckelfolie entstehen komplett eingeschlossene Wellenleiter. Eine abschließende Flutbelichtung und Erwärmung stabilisiert das System. Abb. 5.5 zeigt den Polyguide-Prozess schematisch.

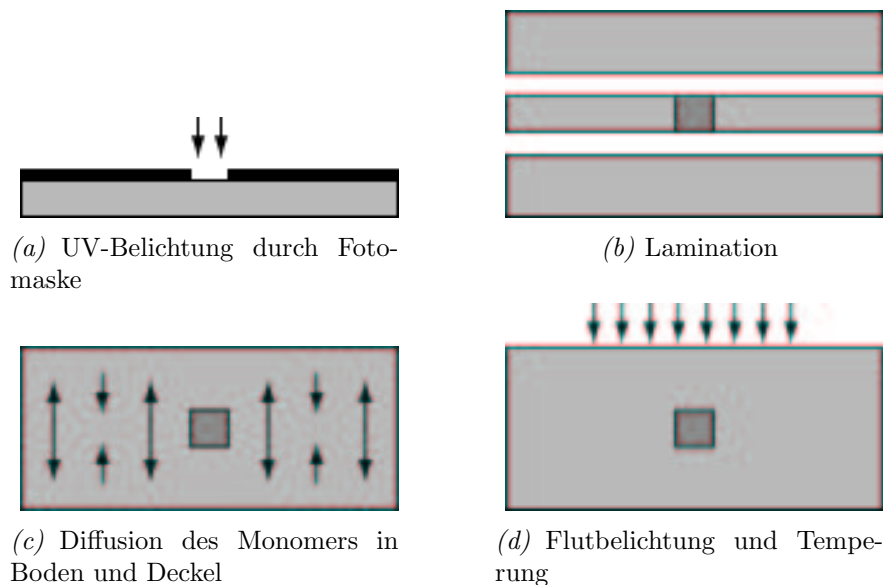


Abbildung 5.5: Schematischer Ablauf beim PolyguideTM-Prozess für vielmodigen Wellenleiter

Es können auch Monomere verarbeitet werden, die durch die Belichtung polymerisieren und dadurch in einen festen Zustand übergehen. Der unbelichtete monomere Anteil kann

mit organischen Lösungsmitteln nach der Belichtung entfernt werden. Auf diese Weise können ORMOCERE (ORganically MOdified CERamics), organisch- anorganische Copolymeren, verarbeitet werden. Die erreichbaren Dämpfungen liegen bei 0,2 dB/cm (1300 nm) bzw 0,4 dB/cm (1550 nm) [68]. Die ORMOCERE zeichnen sich zudem durch hohe Temperaturbeständigkeit von bis zu 250°C aus [65]. Bei der Herstellung von hybriden elektro-optischen Platinen wirkt sich weiterhin die vergleichsweise niedrige Temperatur, bei der die chemischen Prozesse in den ORMOCEREN ablaufen, positiv aus. Sie liegt unter 170 °C [69].

In Polyalkylsilynen, die von Hornak et al. [70] beschrieben werden, laufen die chemischen Polymerisationsprozesse bei Raumtemperatur ab. Durch die Belichtung mit UV-Licht sinkt der Brechungsindex des Materials um rund 15 %. Eine Vernetzung bei Raumtemperatur ist insbesondere bei der Verwendung thermisch instabiler Substratmaterialien von Vorteil. Allerdings sind die erzielten Dämpfungen mit 0,68 dB/cm bei einer Wellenlänge von 633 nm recht hoch. Ein weiteres Verfahren, bei dem die Strukturen optisch definiert werden, ist das direkte Schreiben mit einem Laser. Dies ist insbesondere für das so genannte Rapid-Prototyping interessant, bei dem Strukturen in geringen Stückzahlen hergestellt werden. Das zeitaufwendige Erstellen einer Photomaske entfällt hier. Bei hohen Stückzahlen macht sich allerdings der serielle Charakter des Verfahrens durch lange Herstellungszeiten pro Bauteil negativ bemerkbar. Prinzipiell können die gleichen Materialien wie bei den oben genannten Verfahren benutzt werden. Dies resultiert in ähnlichen erreichbaren Dämpfungswerten.

5.1.2 Ablationsverfahren

Hier wird selektiv Kunststoff abgetragen und im nächsten Schritt ein Kunststoff mit einem anderen Brechungsindex aufgebracht. In der Laserablation wird zunächst eine Schicht des Kernmaterials auf eine untere Claddingschicht aufgebracht. Das Kernmaterial wird anschließend an definierten Stellen wieder abgetragen und die zurückgebliebenen Strukturen mit einer weiteren Claddingschicht überzogen.

Als Ablationsverfahren wird neben der Laser-Ablation in der Regel das Reaktive Ionen Ätzen(RIE)-Verfahren benutzt. Die Materialabtragung geschieht hierbei durch eine Kombination aus chemischen und physikalischen Vorgängen: Unter vermindertem Druck werden in einer Gasentladung chemisch reaktive neutrale Radikale, reaktive Ionen und – je nach Zusammensetzung des Gases – auch chemisch inaktive Ionen erzeugt. In einem elektrischen Feld werden die Ionen in Richtung der zu ätzenden Probe beschleunigt und tragen beim Auftreffen das Material ab. Gleichzeitig bilden die chemisch aktiven Stoffe flüchtige Verbindungen mit dem Kunststoffsubstrat und führen so ebenfalls zu einem

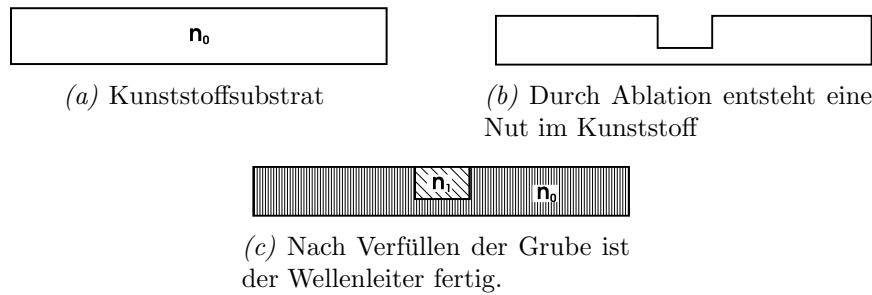


Abbildung 5.6: Prinzip der Wellenleiterherstellung mit Ablationsverfahren.

Schichtabtrag.

Als Maskierungsschicht für die Bereiche, in denen kein Abtrag stattfinden soll, wird ein herkömmlich strukturierter Fotolack benutzt.

Kagami et al. [71] benutzten PMMA als Wellenleiter- und PFPMA (Pentafluorphenylmethacrylat) als Mantelmaterial, kamen allerdings aufgrund der großen Rauheiten der Seitenwände nur auf Dämpfungen von 1,4 dB/cm. Weitere Arbeiten [72, 73] zeigen jedoch, dass Dämpfungen von 0,02 dB/cm bei 830 nm und 0,07 dB/cm bei 1310 nm möglich sind.

Nachteilig bei diesen Verfahren ist der hohe Prozessaufwand durch das Aufbringen der Kern- und Mantelschichten sowie das Aufbringen und Strukturieren der Fotolackschicht.

In Tabelle 5.1 [40] werden kommerziell erhältliche Materialien zusammengefasst, die mit den genannten fotochemischen oder Ablationsverfahren zur Wellenleiterherstellung genutzt werden können.

5.1.3 Abformtechniken

Zur Herstellung von Strukturen mittels Abformtechnik wird eine Vorform benötigt. Zu ihrer Anfertigung müssen zunächst mit geeigneten Strukturierungstechniken die gewünschten Formen erzeugt werden. Dazu existieren eine Vielzahl von Möglichkeiten: Neben der aufwendigen Strukturierung von PMMA durch Synchrotronstrahlung im Lithographie-Galvanik-Abformung(LIGA)-Verfahren bieten sich Verfahren wie die in dieser Arbeit verwendete Dicklacktechnik, verschiedene Ätzverfahren für Silizium oder Präzisionsfräsverfahren an.

Von der so hergestellten Original-Struktur wird dann auf galvanischem Wege ein Metallstempel hergestellt. Nickel eignet sich dazu besonders, weil es sich gut passivieren und dadurch galvanisch kopieren lässt. Um den aufwendig hergestellten 'Master-Stempel' vor Verschleiß zu schützen, wird er galvanisch weiter kopiert. Die Kopien dienen dann als Ausgangspunkt für die Abformung in Kunststoffe.

Vorraussetzung für eine mögliche Abformung sind die thermoplastischen Eigenschaften

Hersteller	Kunststoffart	Strukturierungs- Technik	Optische Verluste dB/cm, λ [nm]	Weitere Eigenschaften
Allied Signal	Acrylate	Lithographie Nassätzen, RIE laser Abtragung	0,02 [840] 0,2 [1300] 0,5 [1550]	Vernetzt, Umweltstabil , T_g :25°C
	Halogenierte Acrylate	Lithographie Nassätzen, RIE laser ablation	<0,01 [840] 0,03 [1300] 0,07 [1550]	Vernetzt, Umweltstabil , T_g :-50°C
Amoco	Flurinierte Polyimide	Lithographie Nassätzen	0,4 [1300] 1,0 [1550]	Vernetzt T-stabil
	Benzocyclo- butene	RIE	0,8 [1300] 1,5 [1550]	T_g : > 350 °C
Dow Chemical	Perfluoro- cyclobutene	Lithographie Nassätzen	0,25 [1300] 0,25 [1550]	T_g : 400 °C
	Acrylate [Polyguide TM]	Photolocking	0,18 [800] 0,2 [1300] 0,6 [1550]	Geschichtete Folien, Excimer Laser
General Electric	Polytherimide [Ultem TM]	RIE laser ablation	0,24 [830]	T-stabil
Hoechst Celanese	PMMA copolymer	Photobleichen	1,0 [1300]	NLO polymer
JDS Uniphase Photonics	[BeamBox TM]	RIE	0,6 [1550]	T-stabil
NTT	Halogenatierte Acrylate	RIE	0,02 [830] 0,07 [1310] 1,7 [1550]	T_g : 110 °C
	Deuterierte Polysiloxane	RIE	0,17 [1310] 0,43 [1550]	Umweltstabil
	Fluorinierte	RIE	TE: 0,3; TM: 0,7 [1310]	Umweltstabil

Tabelle 5.1: Wichtige Eigenschaften und Strukturierungstechniken von optischen Polymeren nach Eldada [40]

von Kunststoffen: Durch Erwärmen werden die Kunststoffe formbar und behalten diese Form nach der Abkühlung bei. Beim Heißprägen wird dazu ein Stempel in den Kunststoff gepresst, beim Spritzgießen wird der flüssige Kunststoff in eine Form gedrückt und erkaltet dort.

Abformtechniken sind sehr gut für die Massenproduktion geeignet. Neben den Wellenleiterstrukturen können im selben Arbeitsschritt auch Justage-Strukturen gefertigt werden, die eine passive Ankopplung der Wellenleiter an Fasern oder elektrooptische Bauteile ermöglichen.

Obwohl die Anfänge der Prägetechnik für optische Strukturen in den 70er Jahren liegen [74, 75], wurde sie wegen mangelnder Nachfrage zunächst nicht weiterentwickelt. Die damaligen Fertigungstoleranzen waren nicht mit der vorherrschenden Monomode-Technik vereinbar.

Erst Anfang der 90er Jahre wurde die Technik aufgrund weiterentwickelter Methoden der Vorformherstellung wieder interessant. Zunächst wurden hauptsächlich Einmodige-Wellenleiter oder passive Einmodige-Komponenten hergestellt [76]-[84].

Neyer berichtet von der Silizium-Galvanik-Abformung(SIGA)-Technik zur Herstellung von Monomodewellenleitern (kann problemlos auf vielmodige Wellenleiter erweitert werden), die innerhalb des sogenannten POPCORN (**P**olymer **O**ptical **P**assiv **C**omponents **R**esearch **N**etwork)-Projektes entwickelt wurde [78]. Diese Technik wird detailliert in [85] beschrieben und soll hier deshalb nur kurz erläutert werden. Erster Schritt in der SIGA Technik ist die Strukturierung eines Silizium-Wafers. Dies kann zum Beispiel mit KOH- oder RIE-Ätzen geschehen. Im nächsten Schritt wird der Wafer metallisiert und anschließend galvanisch Nickel abgeschieden. Mit diesem Prägestempel können dann mit Heißprägen oder Spritzgießen Wellenleiter in Kunststoff abgeformt werden. Die SIGA-Technik ist eine kostengünstige Variante zur Herstellung von Wellenleitern. Von einem Prägestempel kann eine galvanische Kopie erzeugt werden. Die zweite Kopie kann zum Prägen verwendet werden. So wird eine effiziente Herstellung von Vorformen ermöglicht.

Mit dieser Technik konnten Wandrauheiten von 100 nm und Bodenrauheiten um 10 nm realisiert werden. Die eigentliche Bauteilfertigung beinhaltet das Auffüllen der in die polymeren Substrate eingebrachten Gräben mit einem optisch höherbrechenden Polymer. Hierdurch werden die optischen Wellenleiter erzeugt. Abbildung 5.7 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Herstellungsphasen. Die Strukturen im Wafer links, dann die strukturierte Vorform in der Mitte und das abgeformte Kunststoffsubstrat. Mit dieser Technik wurden in einmodigen Wellenleitern Dämpfungen von 0,2-0,3 dB/cm bei $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ erreicht [85]

Paatzsch et al. berichten von einem 4x4-Sternkoppler für den Einmoden-Betrieb, der in LIGA-Technik hergestellt wurde. Bei einer Länge von 28 mm weist er bei $1,31 \mu\text{m}$

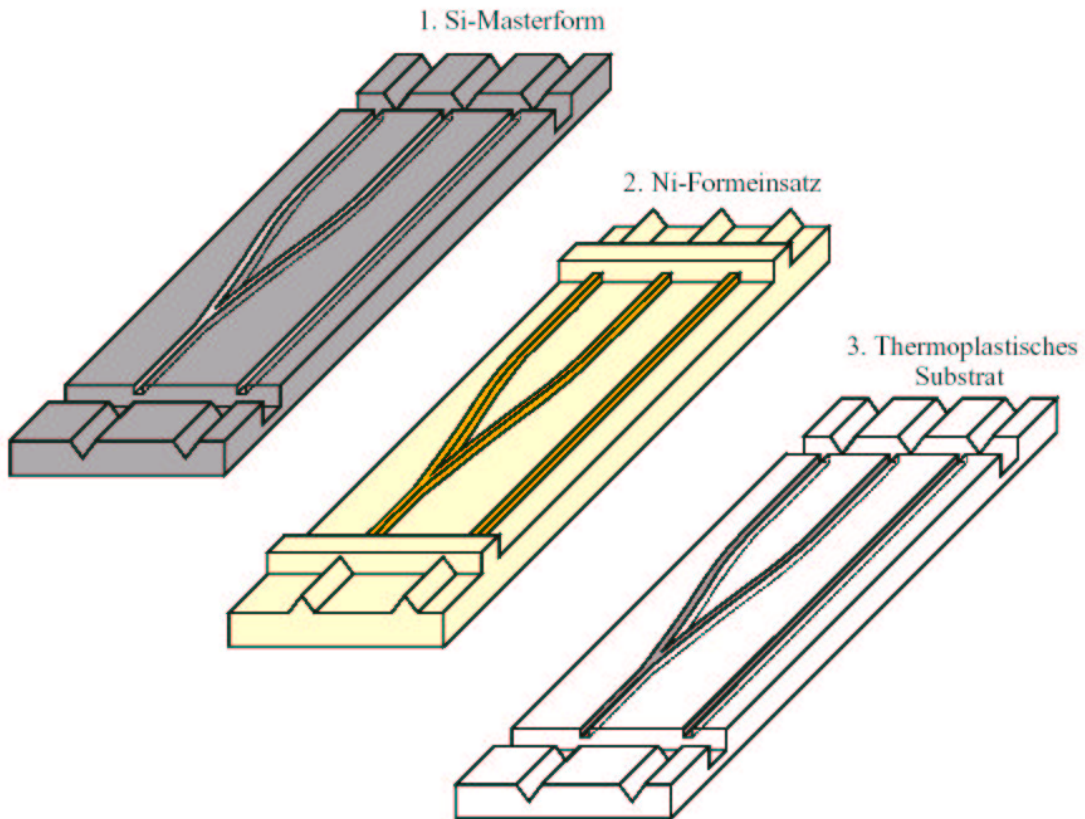


Abbildung 5.7: Vom strukturierten Si-Wafer zum Wellenleiter in Kunststoff [85].

und $1,55 \mu\text{m}$ Wellenlänge eine Uniformität und Verlustdämpfung unter 2 dB auf [86]. Die Seitenwandrauheit liegt bei 50 nm (R_a). Wie sich im Laufe der vorliegenden Arbeit zeigte, werden diese Rauheiten auch mit der hier verwendeten kostengünstigeren Dicklack-Technik erreicht.

Ein großer Vorteil der Präge- und Spritzgusstechnik – die mögliche Herstellung von Strukturen mit stark unterschiedlichen Abmessungen – wird in einer Arbeit von Wu et al. deutlich [87]: Hergestellt wurde ein Taper, d.h. eine sich verjüngende Wellenleiterstruktur in Prägetechnik. Die Struktur weist Maße von $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ am einen und $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ am anderen Ende auf. Solche in drei Dimensionen strukturierten Wellenleiter lassen sich mit den anderen Techniken nicht herstellen. Der Stempel wurde durch galvanisches Kopieren einer präzisionsgefrästen Bronze-Vorform hergestellt. Die Dämpfung der Wellenleiter bei Einkopplung vom schmalen Ende liegt bei 0,5 dB/cm.

Lee et al. [88] berichtet von Soft-Lithography von Abformverfahren, bei denen Vorformen aus flexiblen Kunststoffen, wie z.B. Polydimethylsiloxan (PDMS), benutzt werden. Diese können einfacher von den Original-Strukturen in Fotolacken o.ä. abgeformt werden, da das Aufbringen einer leitfähigen Schicht entfällt. Das Material wird in flüssigem

Zustand auf die Original-Strukturen gegossen und anschließend thermisch oder durch UV-Bestrahlung vernetzt.

Aufgrund der flexiblen Stempel kommt es jedoch insbesondere bei Strukturen mit größeren Abmessungen leicht zu Deformationen des Stempels. Dennoch gelangen mit dieser Technik die Fertigung von vielmöglichen Wellenleitern mit einem Querschnitt von $47 \mu\text{m} \times 41 \mu\text{m}$. Mit dieser Technik werden Dämpfungen von 0,4 dB/cm bei 1300 nm bzw. 0,7 dB/cm bei 1550 nm erzielt.

5.2 Realisierung der Vorform

In diesem Kapitel wird die Prozessierung von SU-8 zur Erzeugung von Mikrostrukturen beschrieben. Dazu gehören die Parameter zum Aufschleudern des Lackes, die Entwicklung einer geeigneten Belichtungstechnik zur Vermeidung von Hinterschneidungen und die Entwicklung.

5.2.1 Prinzip der Vorformherstellung

Ausgangspunkt ist ein Träger mit ebener Oberfläche, vorzugsweise Glas oder Silizium mit minimalen Rauheiten, auf den im ersten Arbeitsschritt ein Fotolack aufgebracht wird. Dies geschieht durch das Aufschleudern, was die Herstellung sehr homogener Schichten ermöglicht ($90 \times 90 \text{ mm}: \pm 5 \mu\text{m}$)[118]. Im Folgenden Arbeitsschritt werden mit einer Maske bestimmte Bereiche der Lackoberfläche abgedeckt. Bei der anschließenden Belichtung des Lackes mit UV-Licht werden somit nur definierte Bereiche des Lackes belichtet. Diese verändern unter Einfluss des Lichtes ihre chemischen Eigenschaften. Die eigentliche Strukturierung erfolgt dann bei der Entwicklung: Je nach Lacktyp lösen sich die belichteten oder unbelichteten Teile des Lackes im Entwickler. Bei so genannten Negativ-Lacken bleiben die belichteten Teile des Lackes stehen, bei Positiv-Lacken werden die belichteten Teile herausgelöst. Auf diese Weise hat man die zweidimensionalen Strukturen der Maske in ein dreidimensionales Relief im Lack übertragen, dessen Höhe durch die Dicke der Lackschicht bestimmt ist. Abb. 5.8 fasst die Schritte zusammen, die zur Erzeugung der Struktur führen [119].

In der vorliegenden Arbeit wird mit einem Negativlack des Typs SU-8 (Hersteller: Shell Chemical) gearbeitet. Die Prozessierung bis hin zur Herstellung einer Lackstruktur wie in Abbildung 5.8(d) wird im Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die darauf Folgenden Arbeitsschritte (Sputtern und Galvanoformung, S. 71 ff) dienen der Übertragung der Strukturen im Lack auf einen Stempel: Zunächst wird eine dünne, elektrisch leitende Metallschicht auf den Lack aufgebracht. Auf diese Metallschicht lässt

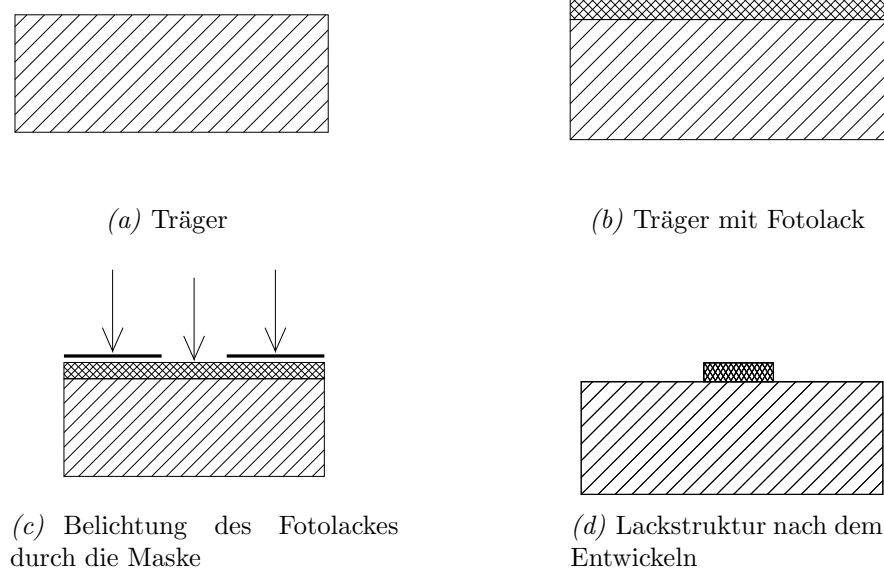


Abbildung 5.8: Strukturerzeugung beim Dicklack-Prozess.

man anschließend galvanisch ein geeignetes Metall abscheiden, in diesem Falle Nickel. Nach dem Abtrennen von Wafer und Lack vom Metall liegt die erste Generation des Stempels vor. Diese kann dann galvanisch weiter kopiert werden, um mit den Kopien schließlich die Kunststoffsubstrate zu prägen. So bleibt die aufwendig hergestellte Urform erhalten und kann bei Verschleiß der Arbeitskopien wieder vervielfältigt werden[85].

5.2.2 Aufbringen der Lackschichten

Der SU-8 Lack wird mit Hilfe einer Lackschleuder (Modell 501 der Firma Convac GmbH) aufgebracht. Es werden zwei verschiedene Belichtungsarten untersucht, für die einerseits Maskengläser (Quarzglas mit 10 x 10 cm Fläche und 3 mm Dicke) und andererseits Siliziumwafer (15 cm Durchmesser) als Lackträger verwendet werden. Als Lackmenge wird sowohl für das Belacken auf 4 Zoll Masken als auch auf 6 Zoll Siliziumwafern 10 ml SU-8 50 (Fa. Microresist) benutzt. Hiermit lassen sich mit der Schleuderkurve des SU-8 reproduzierbar Lackdicken auf $\pm 5 \mu\text{m}$ genau einstellen. SU-8 zeigt schlechte Hafteigenschaften auf dem Substrat, gekennzeichnet durch Ablösen des Lackes bei schmalen Strukturen. Durch Aufbringen einer dünnen Haftschrift konnte die Haftung verbessert werden: Eine dünne Schicht (ca $2 \mu\text{m}$) SU-8 2 (Fa Microresist) wird auf die Maske aufgebracht und von oben belichtet. Durch die Belichtung bleibt die Schicht auch bei der Entwicklung überall bestehen und gewährleistet eine gute Haftung auch für schmale Strukturen. Für die Strukturschicht wird eine höherviskose Sorte SU-8 (SU-8 50 von Microresist) benutzt, die ein Aufbringen der $125 \mu\text{m}$ dicken Strukturschicht in einem Schritt erlaubt. Tabelle 5.2

zeigt die verwendeten Schleuderparameter.

	Haftschicht	Strukturschicht
Anschleudern	20 s, R2, 500 min ⁻¹	20 s, R2, 500 min ⁻¹
Schleudern	40 s, R2, 4000 min ⁻¹	40 s, R2, 1300 min ⁻¹
Abbremsen	20 s, R2, 0 min ⁻¹	7 s, R2, 0 min ⁻¹

Tabelle 5.2: Schleuderparameter für Haft- und Strukturschicht bei der SU-8-Belichtung

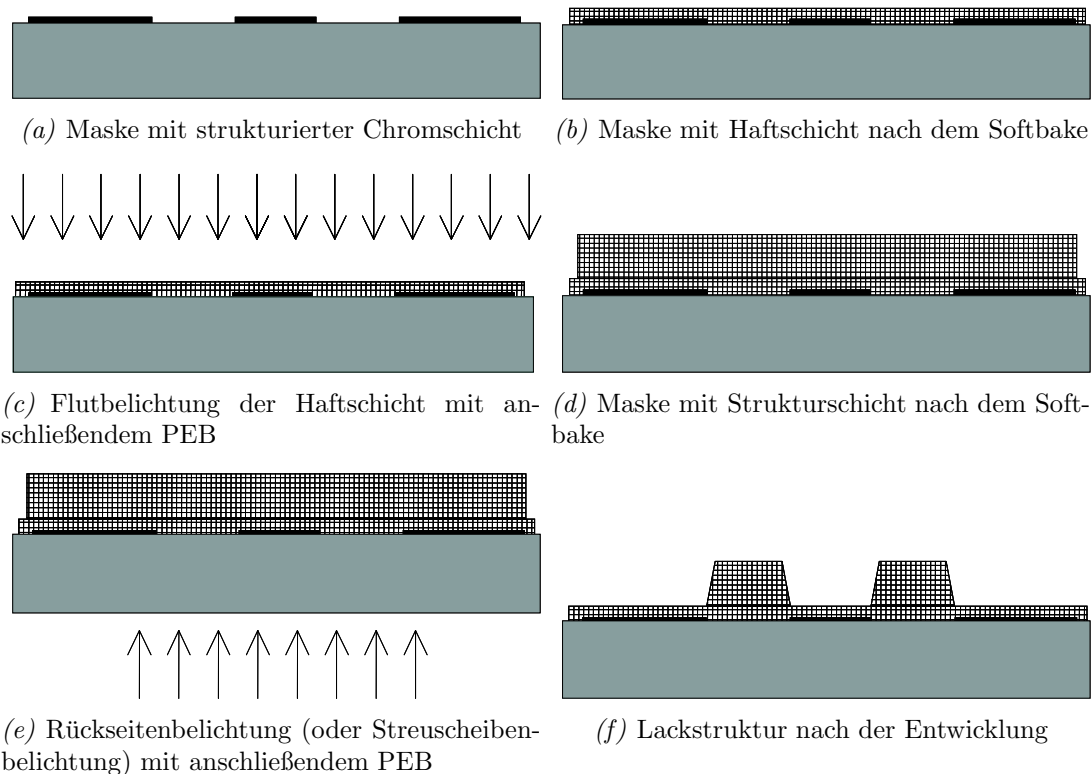


Abbildung 5.9: Schematischer Ablauf des SU-8-Prozesses

5.2.3 Softbake und Post-Exposure-Bake

Zum Austreiben des Lösungsmittels aus dem flüssigen SU-8 wird nach dem Lackauftrag das Softbake durchgeführt. Nach der Belichtung wird das Post-Exposure-Bake (weitere Trocknung durch Erwärmen) nötig, damit die Vernetzungsreaktionen, die durch die Belichtung gestartet wurden, vollständig ablaufen können.

Um Spannungen im Lack (die zu späteren Rissen führen) zu vermeiden, werden zwei Verfahren benutzt. Beim ersten Verfahren wird 20 s (400 mJ cm^{-2}) belichtet und die Trocknung und Vernetzung auf einer Hotplate durchgeführt. Nach dem Erhitzen bleibt der Wafer/die Maske auf der Hotplate liegen und kühlt dort langsam, mit der Geschwindigkeit

der Hotplate, ab. Während des zweiten Verfahrens wird der Wafer/die Maske nach dem Aufschleudern des Lacks für 60 min in einen 90 °C Ofen gelegt und danach für weitere 60 min liegen gelassen. Die Belichtungszeit wird auf 50 s (1000 mJ cm^{-2}) erhöht und kein Post Exposure Bake (PEB) durchgeführt. Zur Vernetzung wird der Wafer für mindestens 15 Stunden bei 25 °C liegen gelassen. Auf diese Weise werden die Spannungen reduziert, und nach der Entwicklung treten keine Risse auf.

Die Trocknung und Vernetzung auf der Hotplate ist ein dreistufiger Prozess. Zuerst wird die Temperatur gemäß den Empfehlungen des Herstellers zunächst für 2 min auf 50 °C, dann für 10 min auf 95 °C gehalten. Anschließend wird das Heizelement abgeschaltet, und die Hotplate kühlt langsam ab. Das Aufheizen geschieht mit etwa 25 °C min^{-1} , das Abkühlen mit etwa $0,5 \text{ °C min}^{-1}$. Der Abkühlvorgang ist durch die Wärmekapazität der Hotplate bestimmt und kann nicht variiert werden. Die einzelnen Schritte der SU-8 Prozessierung sind in Abbildung 5.9 dargestellt.

5.2.4 Belichtung des SU-8

Die Belichtung erfolgt mit dem Belichter MA-6 (Fa Suess AG). Der Lack SU-8 ist ein Negativlack, daher lösen sich beim Entwickeln die unbelichteten Teile des Lackes im Entwickler. Eine grundlegende Eigenschaft von Negativlacken ist, dass die Lackflanken durch die abnehmende Lichtintensität am Rand stets Hinterschneidungen aufweisen. Da diese beim späteren Prägeprozess ein zerstörungsfreies Trennen von Vorform und Substrat verhindern, müssen sie vermieden werden. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit spezielle Belichtungstechniken entwickelt: Die Rückseiten- und die Streuscheibenbelichtung. Bei der Rückseitenbelichtung wird der Lack direkt auf eine Fotomaske aufgebracht und dann durch die Maske hindurch belichtet. Abbildung 5.10 verdeutlicht, wie durch die Rückseitenbelichtung der Hinterschneidungseffekt umgekehrt wird.

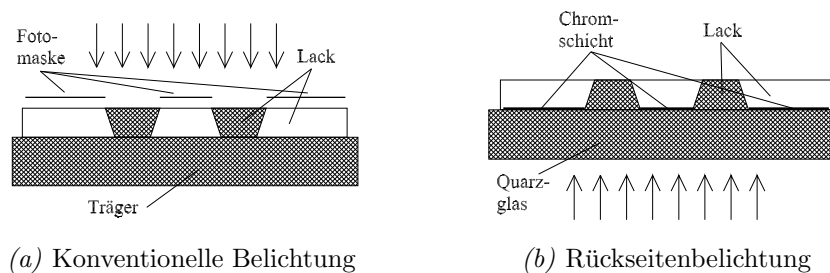


Abbildung 5.10: Umkehrung der Hinterschneidung durch Rückseitenbelichtung beim SU-8-Prozess. Die Bereiche, die beim Entwickeln stehen bleiben, sind schraffiert dargestellt.

Eine weitere Technik zur Realisierung von nicht-hinterschnittenen Wellenleitergruben

ist die Streuscheibenbelichtung. Hierbei wird der Lack auf einen Wafer aufgebracht und in einer Belichtungsmaschine durch eine Maske belichtet. Legt man zwischen Maske und Belichter eine Streuscheibe aus Maskenglas (einseitig angeraut mit $R_a = 2,5 \mu\text{m}$), wird die Parallelität aufgehoben und der Wellenleiterquerschnitt homogener ausgeleuchtet. Abbildung 5.11 zeigt die Streuscheibenbelichtung.

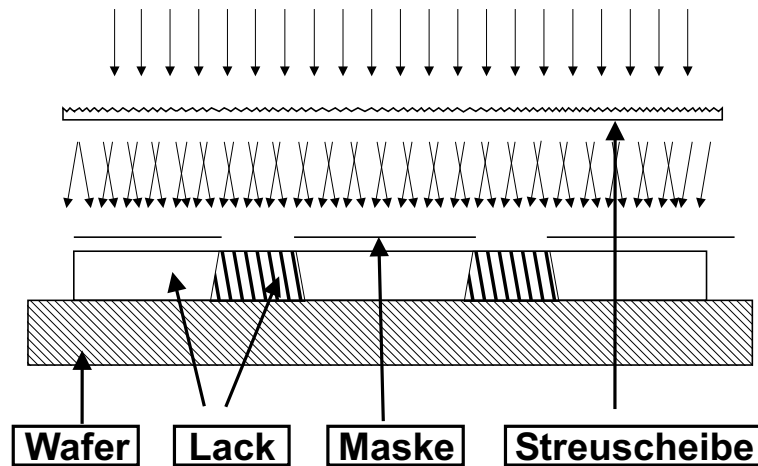


Abbildung 5.11: SU-8 Belichtung in Streuscheibentechnik.

Durch diese Technik werden wannenförmige Gruben mit um 15° (Winkel Boden/Wand: 105°) geöffneten Wänden erreicht. Allerdings wird dies mit einer erhöhten Wandrauigkeit „erkaufte“ (siehe 5.4.6).

Die chemischen Veränderungen des Lackes, die später eine Strukturierung ermöglichen, werden durch die UV-Bestrahlung bei der Belichtung lediglich gestartet; sie sind mit Ende der Belichtungszeit noch nicht abgeschlossen. Damit der belichtete Lack später dem Entwickler widersteht, muss er einige Zeit bei erhöhter Temperatur *vernetzen*. Daher wird ein sogenanntes Post-Exposure-Bake (PEB) durchgeführt, bei dem der Lack nach der Belichtung noch einmal für 60 min in einem 90° Ofen gelagert wird. Damit ist die Belichtung des SU-8 abgeschlossen.

5.2.5 Entwicklung

Die Entwicklung (SU-8 Entwickler der Fa. Microresist) der belichteten SU-8-Maske erfolgt im Tauchverfahren in einer Petrischale. Die Entwicklung dauert etwa 15 min. Anschließend wird die entwickelte Maske mit Isopropanol ab gespült und in einer zweiten, mit Isopropanol gefüllten Petrischale von Entwicklerresten befreit. Nach einigen Minuten wird die Maske aus der Schale gehoben. Nach Verdunsten des Isopropanols ist die Lackstrukturierung abgeschlossen.

5.2.6 Metallisierung

Für die spätere elektrochemische Abformung wird durch Sputtern (Balzers BAK 604 Sputter System) der Lackstrukturen eine dünne Silberschicht auf den Lack aufgebracht. Es wurde fünf Minuten bei einer Spannung von 1 kV und einem Druck von 200 Pa gesputtert. Die Dicke der Silberschicht beträgt danach 60 nm. Dies reicht aus, um eine ausreichende Leitfähigkeit auch an den senkrechten Lackflanken zu gewährleisten. Um die Haftung der Sputterschicht zu erhöhen, wird das so genannte Rücksputtern durchgeführt [118].

5.2.7 Elektrochemische Abformung

In diesem letzten Prozessschritt wird der Stempel hergestellt. Dies geschieht durch die Abscheidung von Nickel auf der aufgesputterten Silberschicht. Die Nickel-Galvanik wird bei einem pH-Wert von $3,7 \pm 0,2$ betrieben. Die Gesamtladungsmenge wird so gewählt, dass die abgeschiedene Nickelschicht eine Dicke von 1,4 mm aufweist. Diese Dicke reicht aus, um eine hinreichende Stabilität des Stempels beim Prägen zu gewährleisten. Die Badtemperatur beträgt 37°C. Die Stromstärke wird in drei Intervallen verändert: Im ersten Intervall wird die Stromstärke linear auf den Maximalwert gefahren. Dieser Prozess dauert zwei Stunden und führt zu einer durchbiegungsfreien Nickelformoberfläche. Im zweiten Intervall wird dann bei konstanter Stromstärke der Großteil der Nickelschicht aufgebaut. Die Dauer dieses Intervalls ist abhängig von der Fläche der Lackstruktur und liegt bei 20 bis 30 Stunden. Im letzten Intervall wird die Stromstärke innerhalb von fünf Minuten heruntergefahren. Bei Proben mit großen Flächen beträgt die maximale Stromstärke 10 A, bei den 4-Zoll-Masken wurde in der Regel mit 6 A gearbeitet [119].

5.3 Wellenleiterherstellung

Mit den in Dicklacktechnik hergestellten Nickelformen können durch Abformung Wellenleitergruben in Kunststoff hergestellt werden. Mit einer hydraulischen Tischpresse werden die Strukturen in ein Substrat geprägt und anschließend mit einem optischen Kleber aufgefüllt und schließlich mit einer Deckelfolie bedeckt.

5.3.1 Der Abformprozess

Für die Übertragung der Strukturen wird eine Tischpresse der Firma Fontijne (TP 200) benutzt. In dieser wird das zu formende Substrat zwischen zwei Platten gelegt, deren Temperatur geregelt werden kann. Abbildung 5.12 zeigt schematisch den Abformprozess.

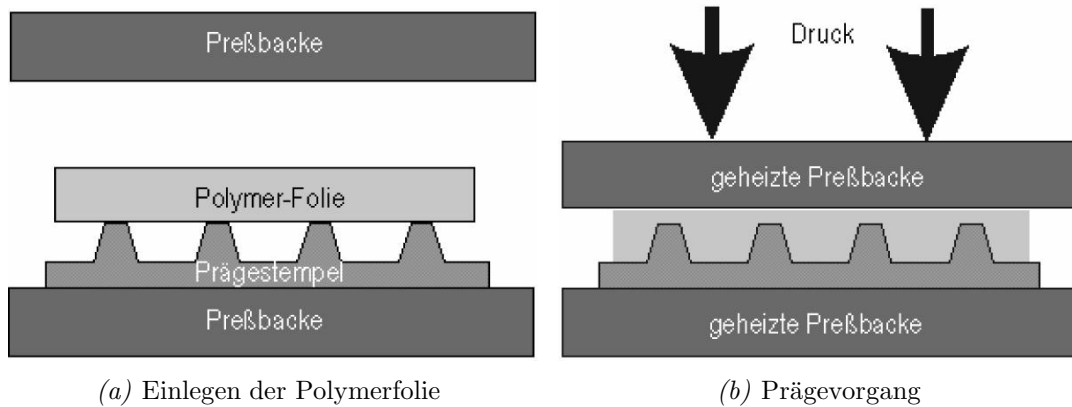


Abbildung 5.12: Übertragen der Vorformstrukturen in eine Polymerfolie durch Heißprägen.

Die Tischpresse ist an eine programmierbare Steuerung angeschlossen, mit deren Hilfe verschiedene Prägeprozesse eingestellt werden können. Prinzipiell geschieht die Abformung in fünf Schritten:

- Anfahren: Die Prägeplatten werden so weit geschlossen bis sie das Substrat berühren
- Heizen: Die Platten werden bis zu einer definierten Temperatur geheizt; dabei wird auch das Substrat erwärmt
- Prägen: Der Druck wird bis auf einen vom Material abhängigen Wert erhöht
- Kühlen: Der Druck wird gehalten und die Temperatur bis auf 50-60°C heruntergefahren
- Nach dem Auseinanderfahren der Platten wird das Substrat entnommen

Die für die Materialien Topas und PMMA benutzten Parameter werden in Tabelle 5.3 angegeben.

	PMMA	TOPAS
Anfahrdruck	2 bar	2 bar
Prägetemperatur	150°C	240°C
Prägedruck	8 bar	12 bar
Prägedauer	3 min	3 min
Abkühlung auf	50°C	150°C

Tabelle 5.3: Prozeßparameter für die Abformung in Topas und PMMA.

Wie die unterschiedlichen Prägetemperaturen andeuten, unterscheiden sich die benutzten Materialien in der Glasübergangstemperatur (PMMA: 100°C, TOPAS (Copolymer auf

Basis von Cycloolefin): 170°C[121]). Dies führt zu einer erhöhten Spröde von TOPAS bei 50°C. Daher muss hier die Entformung bei höheren Temperaturen durchgeführt werden.

5.3.2 Verfüllen der Wellenleiter

Im zweiten Schritt werden der optische Kleber aufgetragen und mit einer Deckelfolie (Mylar™Folie der Firma DuPont) die Wellenleiter verschlossen. Durch den Kleber, der thermisch oder durch UV-Bestrahlung ausgehärtet wird, ist die Einstellung eines definierten Brechzahlhubes möglich. Das Substrat ist schließlich der Mantel und der Kleber der Kern des Lichtleiters. Der Verklebeprozess ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

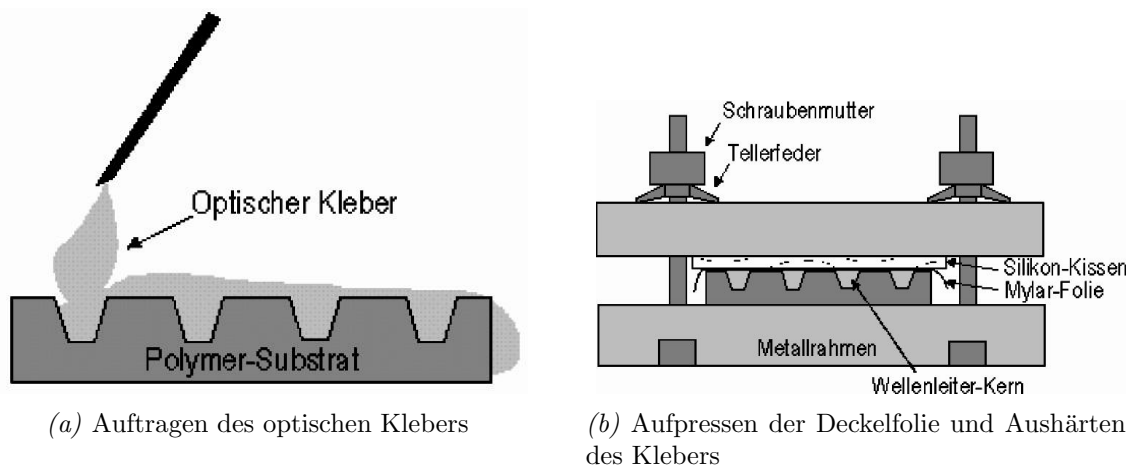


Abbildung 5.13: Verkleben der Wellenleitergruben

Der optische Kleber wird mit einer Spritze auf die Substrate aufgetragen und anschließend einem Vakuum ausgesetzt (30 min), damit eventuell vorhandene Luftblasen wieder entweichen können. Danach wird die Deckelfolie auf das Substrat gelegt. Damit hierbei keine Luftblasen entstehen können, wird die Folie vorsichtig auf das Substrat abgerollt. Das Material der Folie sollte mit dem des Substrates übereinstimmen. Anschließend wird das Substrat in eine mechanische Presse gelegt und dadurch die Folie fest angedrückt. Dadurch werden Zwischenschichten vermieden. Die Aushärtung erfolgt schließlich in einer UV-Kammer oder einem Ofen.

5.3.3 Verarbeitete Materialien

Zwei Materialgruppen werden in dieser Arbeit benutzt: Materialien zur Herstellung von Vorformen und zur Herstellung der Wellenleiter. Die Eigenschaften dieser Materialien werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Der Negativlack SU-8

Bei den Negativlacken wird eine stark unterschiedliche Löslichkeit von belichtetem und unbelichtetem Photolack ausgenutzt, um den Lack nach der Belichtung zu strukturieren. Die Löslichkeitsdifferenz wird im SU-8 durch eine Vernetzung der Lackmoleküle erreicht, die durch die Belichtung ausgelöst wird. Der unbelichtete Lack kann in einem geeigneten organischen Lösungsmittel (z.B. Isopropanol) gelöst werden, der belichtete Teil des Lackes nicht. Abbildung 5.14 zeigt den chemischen Aufbau von nichtvernetztem SU-8.

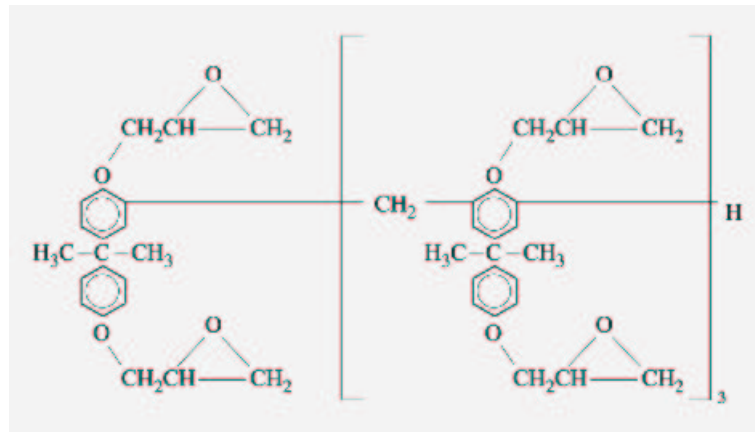


Abbildung 5.14: Strukturformel des SU-8 [126]

Als Photoinitiator wird ein lichtempfindliches Salz benutzt, das im UV-Licht eine Säure freisetzt. Dies führt zur Vernetzung des SU-8 in einer matrixartigen, chemisch und thermisch sehr stabilen Struktur. Um den SU-8 verarbeiten zu können, wird er in einem organischen Lösungsmittel gelöst, wobei die Viskosität durch Variation der Lösungsmittelkonzentration in einem großen Bereich eingestellt werden kann. Bei einer maximalen Konzentration von 85% kann der Lack in einem Schritt in Schichten von mehr als 200 μm aufgeschleudert werden. Da der SU-8 hochtransparent ist, können solche Schichtdicken auch in einem Schritt belichtet werden. Abbildung 5.15 zeigt die Absorptionsspektren von SU-8, einem DNQ Lack und einem Lacksystem, das dem des Polyguide ähnelt.

Wellenleitermaterialien

Ein Wellenleiter besteht aus einem Kern und einem Mantel. In dieser Arbeit werden als Materialsysteme (Kern/Mantel) EpoTek UVO-114(Fa EpoTek)/PMMA und EpoTek 301-2(Fa EpoTek)/TOPAS(Fa Hoechst) benutzt.

PMMA besteht aus langen Molekülketten, die sich aus dem Molekül aus Abbildung 5.16 aufbauen. In TOPAS wechseln sich zwei Bausteine ab: Ethylen und Norbonen. TOPAS ist thermisch stabiler, allerdings auch spröder, was zu Problemen bei Abformung führen

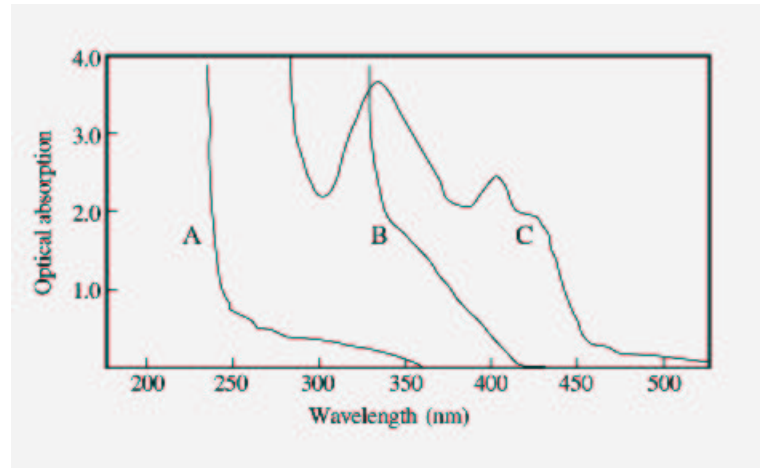


Abbildung 5.15: Absorptionsspektren von (A): $25\mu\text{m}$ SU-8, (B): $25\mu\text{m}$ RISTON und (C): $10\mu\text{m}$ DNQ-Lack [126]. Deutlich erkennbar ist die geringe Absorption bei 365 nm , die eine Belichtung von Schichten bis zu 2 mm Lack ermöglicht und bei den RISTON und DNQ Lacken wesentlich höher ist.

kann. Beide Kunststoffe gehören zu den *Thermoplasten*. Deren Temperaturabhängigkeit von Zugfestigkeit und Dehnbarkeit ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

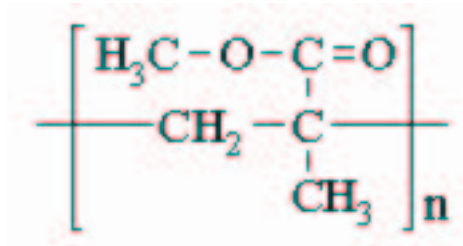


Abbildung 5.16: Strukturformel von PMMA.

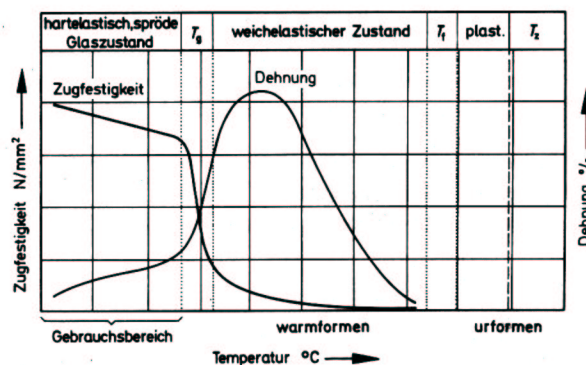


Abbildung 5.17: Zug- und Dehnfestigkeit von Thermoplasten in Abhängigkeit von der Temperatur.

Für die Abformung ist die Kenntnis der Glasübergangstemperatur wichtig. Oberhalb dieser Temperatur ist der Kunststoff in einem weichelastischen Zustand und die Strukturen können durch eine Form übertragen werden. Nach Abkühlen unter die Glasübergangstemperatur bleibt die Struktur in dem Kunststoff erhalten und Substrat und Form können getrennt werden. Bei der UV-Aushärtung von Klebern (EpoTek UVO 114) wird eine Polymerisation durch einen Photoinitiator ausgelöst. Dabei entstehen Radikale, die ein Aufbrechen von Bindungen in den Monomeren erlauben. Da die Bindungsenergie geringer ist, schließen sich diese dann in Ketten zusammen. Der thermisch aushärtende Kleber EpoTek 301-2 besteht aus zwei Komponenten. Deren chemisch wichtige Bestandteile sind ein Epoxidharz und im Härter vorhandene Amin-Gruppen. Durch thermische Anregung findet eine Additionsreaktion statt, die zum Aushärten des Klebers führt.

5.4 Charakterisierung der Stempel

Mit den folgenden Messungen werden die erreichten Ergebnisse dokumentiert und klassifiziert. Eine große Rolle spielen die Rauheiten der Grenzflächen.

5.4.1 Messtechnik

Für die Charakterisierung der Oberflächenqualität und zur Messung der Wellenleiterverluste sind Messplätze genutzt worden, die in diesem Kapitel vorgestellt werden.

Oberflächenmesstechnik

Für die Messung der Rauheiten und Oberflächenprofile wird das optische Profilometer *Microfocus* der Firma UBM benutzt.

Mit einem fokussierten Laserstrahl wird die Oberfläche der Probe abgescannt. Das reflektierte Licht wird von einem Photodiodenpaar aufgefangen. Bei einer Abstandsänderung wandert der Lichtfleck und die Photodioden werden unterschiedlich stark ausgeleuchtet. Die Differenz zwischen den Ausgangssignalen der beiden Photodioden steuert über einen Regelkreis die beweglich aufgehängte Frontlinse, so dass der Brennpunkt der Linse stets auf der Probenoberfläche liegt. Über die Auslenkung der Linse dieses Autofokussystems lässt sich das Oberflächenprofil der Probe aufnehmen. Die horizontale Genauigkeit des Gerätes liegt bei einem μm . Die vertikale Auflösung liegt bei 5 nm.

Dämpfungsmessplatz

Als Lichtquelle dient ein Helium-Neon-Laser, dessen Licht in eine 50 μm -Glasfaser eingekoppelt wird. Das andere Ende der Faser kann auf 1 μm genau positioniert werden, so dass

eine optimale Einkopplung des Lichtes in den Wellenleiter erreicht werden kann. Aus dem Wellenleiter kommend, wird das Licht in eine $500\ \mu\text{m}$ -POF eingekoppelt, die ebenfalls auf einem Verfahrtschiff montiert ist. Abbildung 5.18 zeigt den Aufbau des Messplatzes.

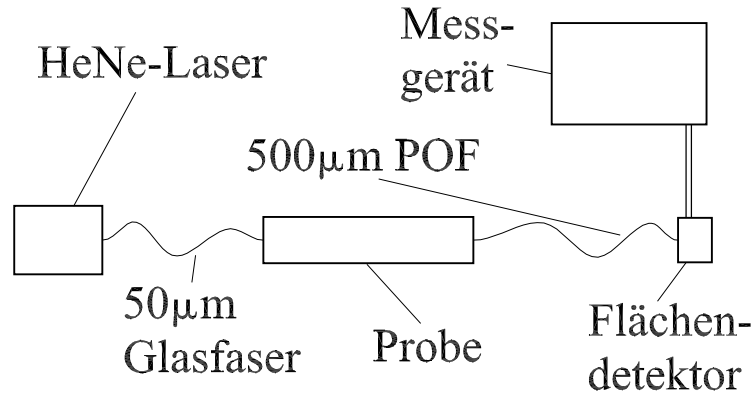


Abbildung 5.18: Der Wellenleiter Dämpfungsmessplatz.

Die POF ist an einen Flächendetektor angeschlossen, der in Abhängigkeit von der einfallenden Lichtintensität ein elektrisches Ausgangssignal erzeugt. Dies wird von einem Messgerät direkt in dB umgerechnet und angezeigt. Um die Dämpfung der Probe zu bestimmen, muss in der Regel eine Referenzmessung ohne Probe durchgeführt werden. Dabei wird das aus der Glasfaser austretende Licht direkt in die POF eingekoppelt. Subtrahiert man diesen Wert von allen Messwerten, erhält man direkt die Dämpfung der Probe in dB.

Um Verluste bei der Ein- und Auskopplung zu minimieren, wird der Bereich zwischen Probe und Ein- bzw. Auskoppelfaser mit einem so genannten *Indexöl* ausgefüllt: Das Öl hat den gleichen Brechungsindex wie das Wellenleitermaterial der Probe, so dass das Licht die Stirnflächen des Wellenleiters nicht „sieht“. Bei exakt gleichem Brechungsindex „sieht“ das Licht lediglich den Brechzahlssprung von der Einkoppelfaser zum Indexöl und wieder zur Auskoppelfaser. So werden Verluste vermieden, die durch Reflexionen beim Übergang zwischen optisch unterschiedlich dichten Medien auftreten. Außerdem spielt die Rauheit der Stirnfläche, die durch das Sägen der Proben stets vorhanden ist, keine Rolle mehr. Da die Brechzahlen von Indexöl und Wellenleiter nicht exakt übereinstimmen, treten dennoch Verluste auf. Diese sind jedoch gegenüber allen anderen Verlusten vernachlässigbar.

Die noch vorhandenen Reflexionsverluste beim Übergang von der Glasfaser zum Indexöl und vom Indexöl zur POF treten auch bei der Referenzmessung auf und werden durch die Differenzbildung eliminiert. Daher müssen sie nicht weiter betrachtet werden. Abbildung 5.19 zeigt die Einkoppelstelle bei Verwendung von Indexöl.

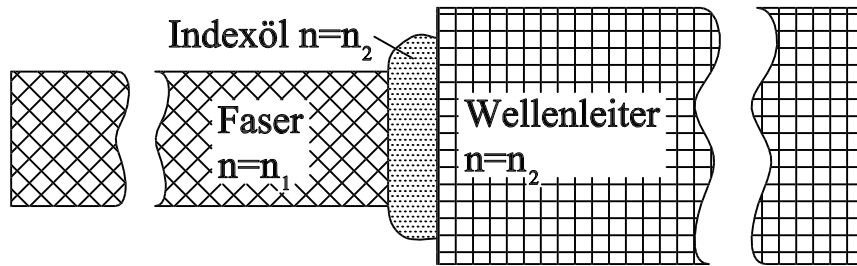


Abbildung 5.19: Wellenleiter mit Faser und eingefügtem Indexöl.

5.4.2 Homogenität der Lackoberflächen

Der Negativ-Lack SU-8 konnte in einem Schritt zu einer Dicke von $125\ \mu\text{m}$ aufgeschleudert werden. Die Variation der SU-8 Lackdicke liegt bei $\pm 10\ \mu\text{m}$ (auf einer Fläche von $90 \times 90\ \text{mm}$). Dieser Wert wird nach Entfernung der Randwulst gemessen. Abbildung 5.20 zeigt einen Wafer mit strukturierter SU-8 Schicht. In der Mitte sind gerade Wellenleiterstrukturen zu sehen und rechts und links davon Koppler.

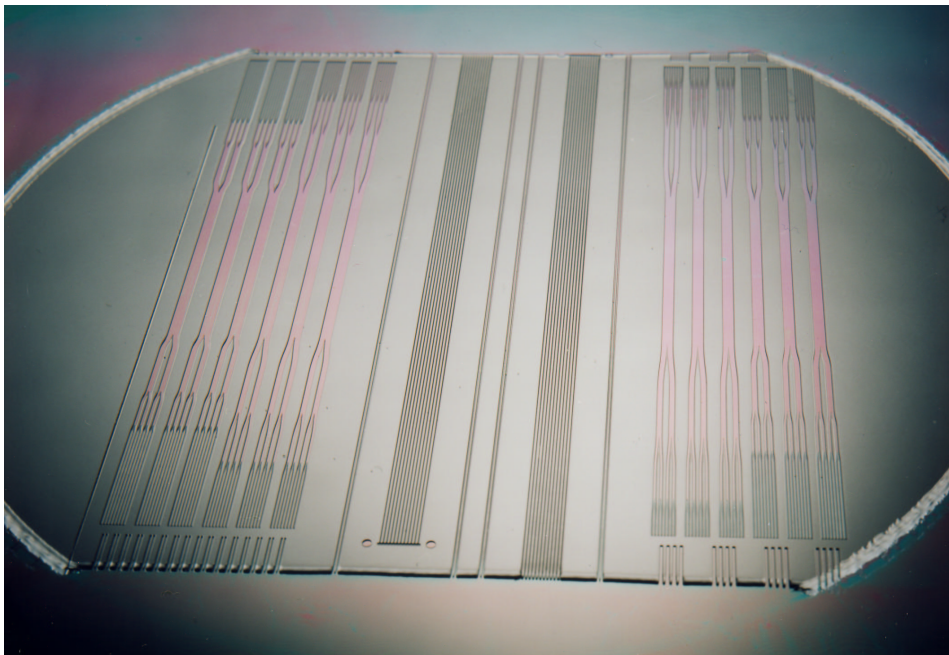
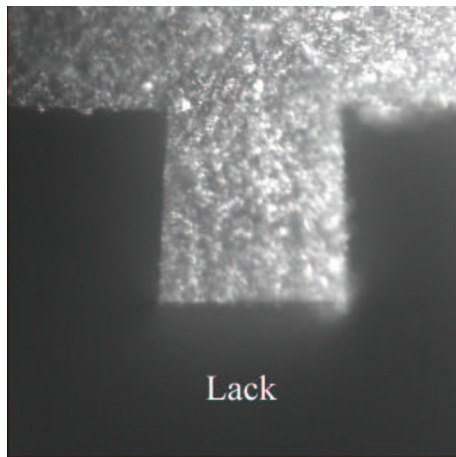


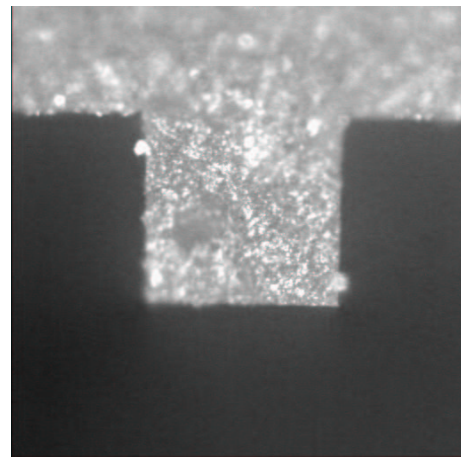
Abbildung 5.20: Wafer mit strukturiertem SU-8.

5.4.3 Kanalquerschnitte

In Abbildung 5.21 sind realisierte Wellenleiter zu sehen, die zum einen konventionell von oben belichtet und dadurch hinterschnitten sind, weiter sind die mit Rückseitenbelichtung und Streuscheibenbelichtung hergestellten Wellenleiter zu sehen.



(a) Konventionelle Belichtung ($90\mu\text{m}$ tiefer Wellenleiter)



(b) Rückseitenbelichtung ($90\mu\text{m}$ tiefer Wellenleiter)



(c) Streuscheibenbelichtung ($120\mu\text{m}$ tiefer Wellenleiter)

Abbildung 5.21: Effekt der Rückseitenn- und Streuscheibenbelichtung beim SU-8.

In Abbildung 5.21(a) ist deutlich die für Negativlacke typische Hinterschneidung zu sehen. Die Rückseitenbelichtung und die Streuscheibenbelichtung verhindern eine Hinterschneidung. Dass die Flankenwinkel durch die Rückseitenbelichtung nicht genau umgekehrt werden, liegt an der unterschiedlichen Belichtungsenergie: Obwohl mit der gleichen Belichtungszeit belichtet wurde, wird bei der Rückseitenbelichtung ein Teil des Lichtes vom Quarzglas absorbiert. Insgesamt wurden mit dem SU-8 Kantensteilheiten nahe 90° erreicht. Dies wird auch auf Bildern der Wellenleiterquerschnitte im Abschnitt 5.5 deutlich.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Streuscheibenbelichtung konnte die Neigung der Wellenleiterwände noch etwas vergrößert und zu rund 15° gemessen werden. Abbildung 5.21(c) zeigt einen Wellenleiterquerschnitt.

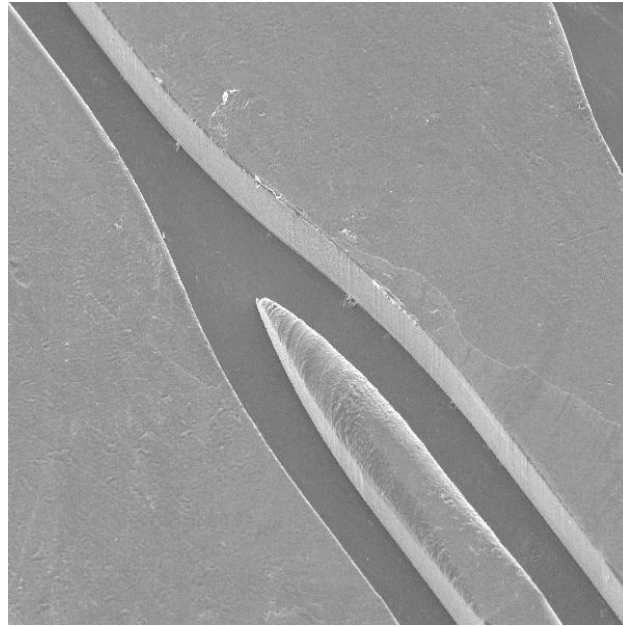


Abbildung 5.22: Gesamtansicht des Kopplers, aus dem die Vergrößerung in Abbildung 5.23 stammt. Die Wellenleiterbreite beträgt $125 \mu\text{m}$.

5.4.4 Form der Verzweigerspitzen

Die minimale Breite der Spitzen im Verzweiger wird bei der Belichtung durch die Beugung des Lichtes begrenzt. Die Auflösungsgrenze lässt sich durch die einfache Formel

$$b_{min} \approx \sqrt{\lambda \cdot d} \quad (5.1)$$

b_{min} : Minimale Strukturweite; λ : Wellenlänge; d : Abstand zur Maske

abschätzen [118]. Die Breite der Spitzen sollte also beugungsbedingt mit zunehmender Tiefe ebenfalls zunehmen. Bei einer Wellenlänge von rund 400 nm ergibt sich am Waferboden ein Wert von etwa $7 \mu\text{m}$.

Die im SU-8-Prozess entstandenen Spitzen zeigt die Raster Elektronen Mikroskop(REM)-Aufnahme in Abbildung 5.23. Die gemessene Breite der Spitze liegt bei $3\text{-}5 \mu\text{m}$. Die Spitze ist abgeflacht, da sich in der Prägeform noch SU-8 Reste befinden. Abbildung 5.24 zeigt eine nichtabgeflachte realisierte Spitze von oben, die mit $6 \mu\text{m}$ an der Grenze der Realisierbarkeit liegt. Dies Photo ist an einem metallisierten Kunststoffsubstrat aufgenommen worden.

5.4.5 Qualität der Grenzflächen

Die Grenzflächen von Wellenleitern dienen zur Führung des Lichtes durch Reflexion. Sind deren Oberflächenrauheiten [120] zu groß, nimmt der Anteil von Streuung und somit

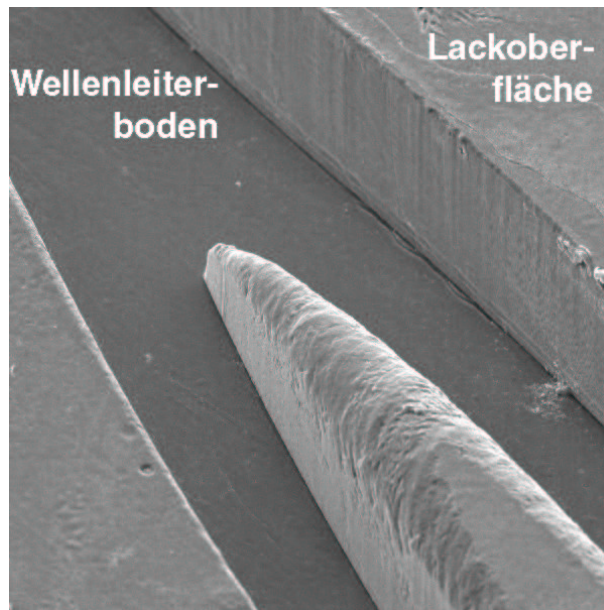


Abbildung 5.23: REM-Aufnahme der Spitze im Y-Verzweiger. Die Abflachung der Spitze wird durch SU-8 Reste in der Vorform verursacht. Die Kanalbreite beträgt $125\ \mu\text{m}$ nach der Teilung des Wellenleiters (Rückseitenbelichtung).

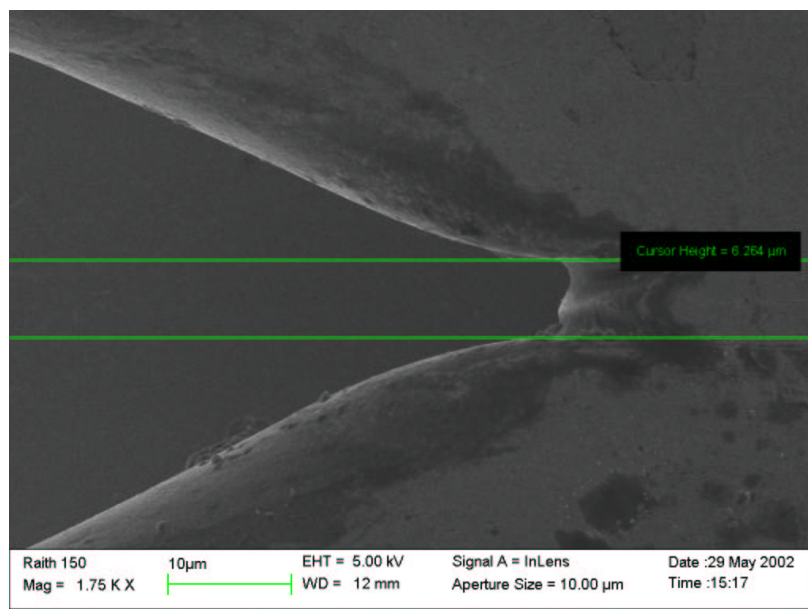


Abbildung 5.24: In Kunststoff abgeformte SU-8 Verzweigerspitze.

Verlusten zu. Die Grenzflächen der hergestellten Wellenleiter sind die Seitenwände sowie Boden und Deckel.

Der Boden der Wellenleiter wurde beim Galvanikschritt durch die Trägeroberfläche definiert. Seine Rauwerte liegen im Bereich der Rauheiten der Glas- und Siliziumoberflächen von Maske bzw. Wafer. Die obere Grenzfläche, der Deckel, entsteht beim Auflegen der Folie nach dem Verkleben. Sie hat also im schlechtesten Fall die Rauwerte der Deckelfolie.

Im Gegensatz zu den materialabhängigen Rauwerten von Boden und Deckel sind die Rauwerte der Seitenwände nicht von vornherein zugänglich: Sie entstehen beim Entwicklungsschritt und sind durch die senkrechten Wände der Lackstruktur bestimmt.

Zur Ermittlung der Rauheiten wird diese Grenzflächen mit dem *Microfocus* (optisches Profilometer der Firma UBM) vermessen. Die Messung der Seitenwandrauhigkeit ist nicht ohne ein Zersägen der Probe möglich, da die auszumessende Fläche senkrecht zum Messstrahl des *Microfocus* stehen muss. Die Sägearbeiten werden mit einer Wafersäge durchgeführt und die Probe an der in Abbildung 5.25 skizzierten Stelle zersägt. Anschließend kann dann mit dem *Microfocus* senkrecht zur Seitenwand gemessen werden.

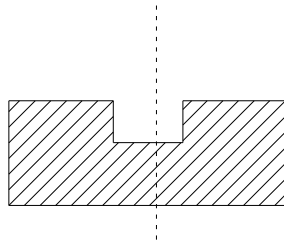


Abbildung 5.25: Position des Sägeschnittes

Die Messungen werden in der Regel an geprägten Substraten vorgenommen. Messungen direkt auf den SU-8-Seitenwänden sind nicht möglich, da der Maskenblank nicht auf der Wafersäge bearbeitet werden kann.

Tabelle 5.4 fasst die typischen Rauheitswerte der verschiedenen Grenzflächen für den SU-8-Prozess zusammen. Außerdem sind die Rauheiten der Lackoberflächen mit aufgeführt. Bei den Messungen wird mit einer Taststrecke von 2 mm und einer Auflösung von 2000 Messpunkten pro mm gearbeitet.

5.4.6 Seitenwände im SU-8

Die Qualität der Seitenwände wird von der Belichtungsart beeinflusst. Daher werden einerseits die Ergebnisse in Rückseitenbelichtung und andererseits in Streuscheibenbelichtung

	SU-8-Prozess		
	R_a	R_z	R_{max}
Boden	≤ 10 nm	80 - 100 nm	100 - 200 nm
Seitenwand (Rückseitenbel.)	50 - 60 nm	300 - 400 nm	500 - 600 nm
Seitenwand (Streuscheibenbel.)	85 - 125 nm	500 - 700 nm	600 - 700 nm
Lackoberfläche	20 nm	200 nm	400 - 500 nm

Tabelle 5.4: Typische Werte für die verschiedenen Rauheitskenngrößen beim SU-8-Prozess.

dargestellt.

Rückseitenbelichtung

Die Qualität des Wellenleiterbodens wird durch die Waferoberfläche bestimmt und ist daher von hoher optischer Qualität, wie die Rauheitswerte zeigen. Die Seitenwände sind durch die chemische Entwicklung von geringerer Qualität. Wie aus Tabelle 5.4 hervorgeht, weisen die SU-8-Wände (Rückseitenbelichtung) optische Qualität auf, die allerdings noch optimiert werden kann (z. B. Beschichtung). Abbildung 5.26 zeigt ein REM-Photo einer mit Rückseitentechnik realisierten Seitenwand. Das Photo ist an einem metallisierten Kunststoffsubstrat aufgenommen worden.

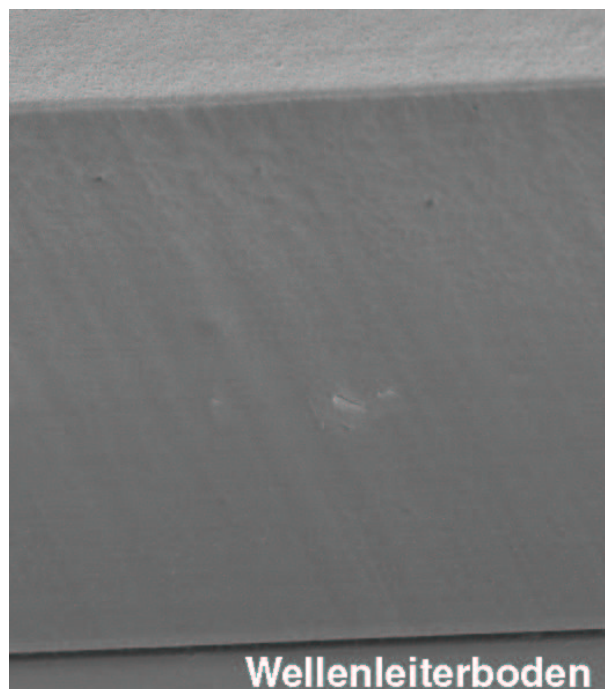


Abbildung 5.26: Mit SU-8-Prozess erzeugte Seitenwand (Rückseitenbelichtung). Die Wandhöhe beträgt $120 \mu\text{m}$.

Streuscheibenbelichtung

Aus Tabelle 5.4 entnimmt man, dass die Wandrauheiten bei Belichtung mit einer Streuscheibe leicht erhöht sind. Die Ursache liegt in der Streuscheibe, die durch Sandstrahlen hergestellt worden ist und deren Rauheiten bei $R_a = 3\mu\text{m}$ ($R_z = 13\mu\text{m}$; $R_{max} = 28\mu\text{m}$) liegen.

5.5 Wellenleiter-Dämpfungen

Die Dämpfungen der Wellenleiter werden am Dämpfungs-Messplatz ermittelt, der in Kapitel 5.4.1 beschrieben wird. Die Stirnfläche eines geraden Wellenleiters, die im SU-8-Prozess hergestellt wurde, zeigt Abbildung 5.27. Dieser Wellenleiter ist $75\mu\text{m}$ breit, die Kanaltiefe

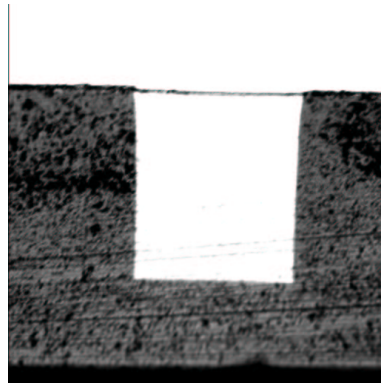


Abbildung 5.27: Wellenleiter aus EpoTek UVO-114 in PMMA, $90\mu\text{m}$ tief.

des Wellenleiters beträgt $90\mu\text{m}$. Durch Korrekturen bei den Schleuderparametern wurden schließlich $125\mu\text{m}$ erreicht. Abbildung 5.28 zeigt den Eingang eines Y-Verzweigers aus EpoTek 301-2 (Fa EpoTek, $n=1,530$) in Topas (Fa Hoechst, $n=1,564$). Diese Materialkombination wird in Hinblick auf eine spätere Integration in den Platinenherstellungsprozess gewählt, da dort hohe Temperaturen (kurzzeitig bis 230°C) von den Kopplermaterialien ausgehalten werden müssen.

Um die Dämpfung genauer zu bestimmen, werden gerade Wellenleiter nach der Cut-Back-Methode vermessen. Bei dieser Methode wird zunächst die Dämpfung eines Wellenleiters bestimmt. Anschließend wird er wiederholt auf der Wafersäge um ein definiertes Stück gekürzt und erneut die Dämpfung gemessen. Mit einer Ausgleichsrechnung lässt sich dann die Wellenleiterdämpfung pro Längeneinheit bestimmen. Abbildung 5.29 zeigt das Ergebnis einer Cut-back Dämpfungsmessung an zwei Wellenleitern.

Die Steigung der beiden Regressionsgeraden liegt bei 1 dB/cm . Dies ist eine hohe Dämpfung und widerspricht den oben gemessenen Rauheitswerten. Berücksichtigt man aber die

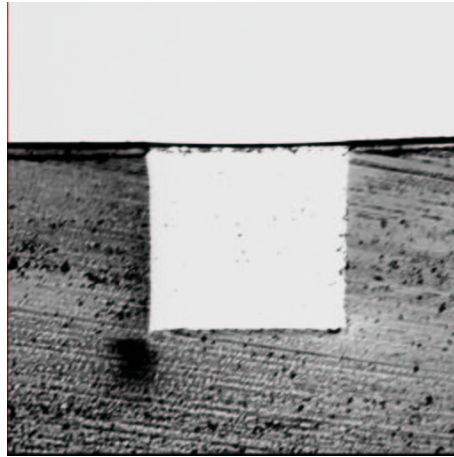


Abbildung 5.28: Wellenleiter aus EpoTek 301-2 in Topas mit einem $125 \times 125 \mu\text{m}$ Querschnitt.

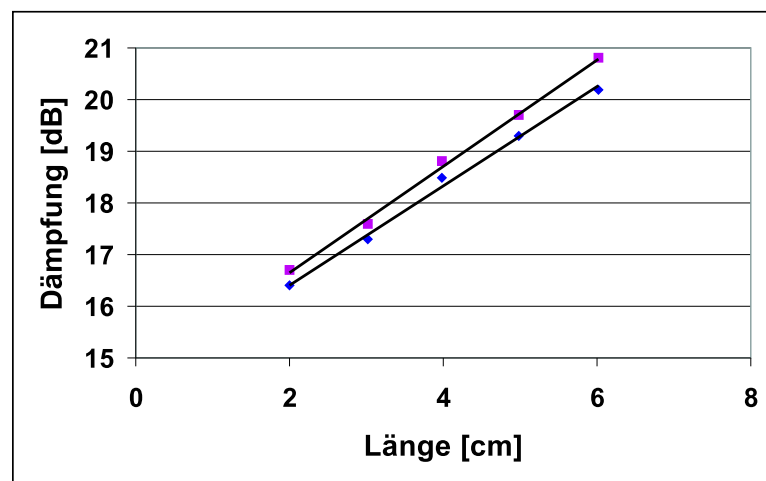


Abbildung 5.29: Cut back Messung an zwei Wellenleitern ($\lambda = 632 \text{ nm}$, Fehler: $\pm 0,1 \text{ dB}$).

Schwierigkeiten bei der Herauslösung des SU-8 nach dem Galvanisieren, erscheint dieses Ergebnis einleuchtend. Reste des SU-8 bleiben auf der Nickeloberfläche und verursachen beim Abformen zusätzliche Streuzentren in der Nickelwand. Trotzdem sind seine Eigenschaften vielversprechend und ein Arbeiten an diesem Problem erscheint lohnenswert. Der Wellenleiter ist im Materialsystem Topas/Epotek 301-2 hergestellt. Wie man Abbildung 5.32 entnimmt, ist die Materialdämpfung des verwendeten optischen Klebers bei 632 nm unter $0,1 \text{ dB/cm}$.

5.6 Charakterisierung der Koppler

In diesem Kapitel werden die realisierten Koppler charakterisiert.

5.6.1 Teilungsverluste

An den mit SU-8 hergestellten Wellenleiterkopplern wurden die Teilungsverluste gemessen. Mit Teilungsverlusten sind die Verluste gemeint, die nur durch die Aufteilung eines Wellenleiters auf zwei Kanäle entstehen, also ohne Streuung, Materialabsorption oder Koppelverluste. Aus dem letzten Kapitel ist die Dämpfung pro cm von einem geraden Wellenleiter bekannt. Subtrahiert man diese von den gemessenen Werten für die Zusatzdämpfungen (s.u.), erhält man für die Koppeldämpfung einen Wert von 0,5 dB pro Verzweigung.

In [117] werden die Teilungsverluste mit dem Raytracing Programm SPEOC simuliert. Dieses Programm berechnet die Verluste mit strahlenoptischen Berechnungsmethoden. In der Simulation werden die Verluste in Abhängigkeit vom Teilungsaspektverhältnis (h_{WL}/d_{Spitze} ; h_{WL} : Der Wellenleiterdurchmesser; d_{Spitze} ist die breite der realen Verzweigerspitze) berechnet. Die benutzten Parameter stimmen mit dem in dieser Arbeit benutzten Modell überein:

- Verzweigungswinkel 1°
- Aspektverhältnis der Spitze 10 oder größer

Das Ergebnis der Simulation ist, dass die Verzweigerdämpfung bei rund 0,5 dB pro Verzweigung liegt.

5.6.2 Dämpfungsmessungen an 8x8 Kopplern

Zur Charakterisierung von optischen Sternkopplern gibt es definierte Größen, deren Berechnung kurz dargestellt wird.

Rechengrundlagen zur Kopplercharakterisierung

Für die optische Charakterisierung der Koppler werden drei Definitionen verwendet:

- Die Einfügedämpfung η_i (insertion loss) , die das logarithmische Verhältnis der eingekoppelten Eingangsleistung P_0 zur Ausgangsleistung P_S eines einzelnen Ausgangs angibt:

$$\eta_i = -10 \cdot \log \left(\frac{P_0}{P_S} \right) [dB] \quad (5.2)$$

Dieser Wert gibt die Dämpfung zwischen einem Eingang und einem Ausgang des Kopplers an. Typisch hierbei ist, dass η_i bei passiven Kopplern niemals Null werden kann. Z.B. teilt sich die Eingangsleistung bei einem idealen 1x2-Koppler je zur Hälfte auf die beiden Ausgänge auf. Daraus resultiert eine Mindestdämpfung von 3dB.

- Die Zusatzdämpfung η_e (excess loss), die das logarithmische Verhältnis der eingekoppelten Eingangsleistung P_0 zur Summe der Ausgangsleistungen $P_{S,j}$ der n Ausgänge angibt:

$$\eta_e = -10 \cdot \log \left(\frac{P_0}{\sum_{j=1}^n P_{S,j}} \right) [dB] \quad (5.3)$$

η_e ist geeignet, die gesamten Verluste des Kopplers anzugeben. Dieser Wert kann theoretisch durchaus zu Null werden, vorausgesetzt, es würde keine Leistung durch Abstrahlung oder Absorption verloren gehen, was in der Praxis aber unmöglich ist.

- Und letztendlich die Gleichmäßigkeit U (uniformity), die das logarithmische Verhältnis zwischen dem maximalen Wert $P_{s,max}$ und minimalen Wert $P_{s,min}$ der Ausgangsleistungen $P_{s,j}$ (mit $j=1,2,\dots,n$) angibt:

$$U = 10 \cdot \log \frac{P_{s,max}}{P_{s,min}} [dB] \quad (5.4)$$

U beschreibt die Schwankungen der Einfügedämpfungen innerhalb eines Kopplers. Bei allen Angaben zur Dämpfung ist zu beachten, dass nur im Zusammenhang mit der Gleichmäßigkeit U eine Aussage über die Qualität eines Kopplers gemacht werden kann. Ein Koppler mit einer sehr geringen Zusatzdämpfung kann durchaus eine schlechte Gleichmäßigkeit U haben und wäre somit für eine Anwendung ungeeignet.

Neben den geraden Wellenleitern ist auch ein erster 8x8 Koppler realisiert worden. Abbildung 5.30 und 5.31 zeigen die gemessenen Werte für die Zusatzdämpfung und die Uniformität. Für die Messungen wird der Dämpfungsmessplatz aus Kapitel 5.4.1 benutzt.

Deutlich erkennbar sind die relativ großen Schwankungen in den Werten für die Zusatzdämpfung und Uniformität.

Für die Zusatzdämpfung sind folgende Dämpfungsfaktoren bekannt: Zum einen die Teilungsverluste mit 1,5 dB, zum anderen die Verluste durch Absorption und Streuung mit 6,5 dB (rund 1 dB/cm). Berücksichtigt man diese 8 dB, dann liegt die Zusatzdämpfung bei 2 dB. Durch Minimierung der Streuung durch SU-8 Rückstände sind bessere Werte für die Zusatzdämpfung und Uniformität zu erwarten.

5.7 Bewertung

Mit der Rückseitenbelichtung konnte die Hinterschneidung von Strukturen vermieden werden. Die mit dieser Technik realisierten Nickelformen besitzen Wandrauheiten von 50 nm bis 60 nm. Im Abformprozess zeigte sich, dass das Substrat bei der Trennung von Substrat und Stempel durch die steilen Wände stark mechanisch belastet werden

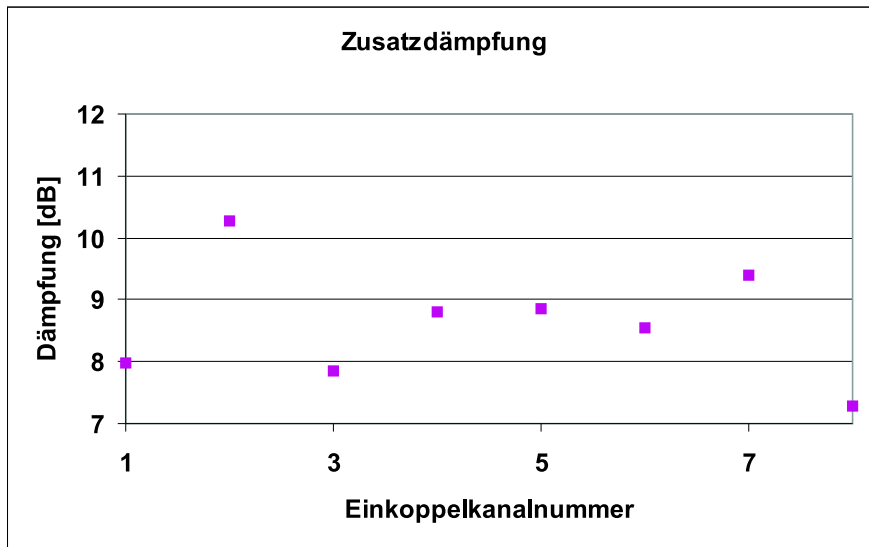


Abbildung 5.30: Zusatzdämpfung des realisierten 8x8 Koppler. Der Messfehler beträgt $\pm 0,1$ dB.

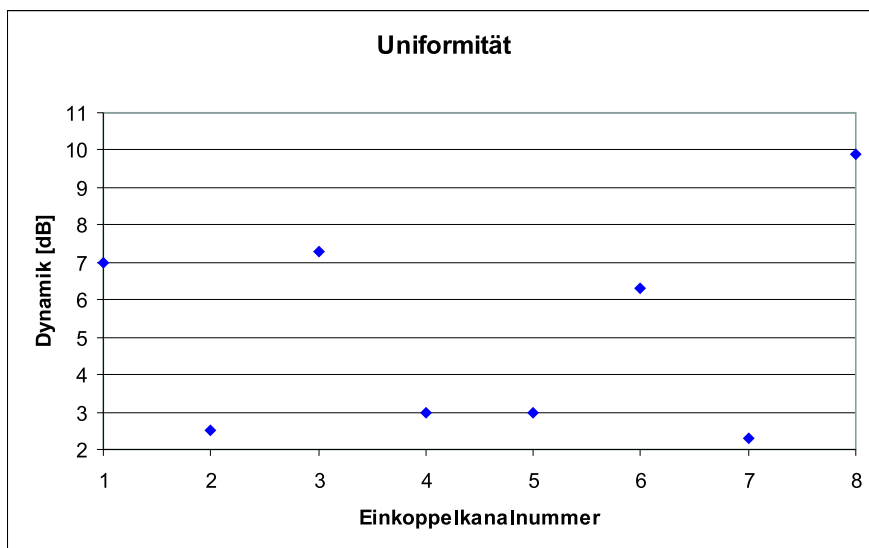


Abbildung 5.31: Uniformität von realisierten 8x8 Kopplern. Der Messfehler beträgt $\pm 0,1$ dB.

musste. Daher ist eine zusätzliche Technik entwickelt worden, um stärker geneigte Wände zu erreichen.

Mit der oben beschriebenen Belichtung durch eine Streuscheibe werden die Seitenwände der Wellenleiter etwas gekippt. Damit bekommen die Querschnitte ein wannenförmiges Aussehen. Die Streuscheibenbelichtung bedingt einen Winkel zwischen Boden und Wand von rund 100° . Durch diesen Winkel lassen sich die Plastikteile im Abformprozess leichter

entformen: Risse und Rauheiten, die erst durch die Entformung erzeugt werden, lassen sich so vermeiden. Allerdings zeigte sich auch, dass durch die Streuscheibe die Wandrauheiten im Lack und damit auch im Nickel erhöht wurden: Der Wert liegt hier bei $R_a = 120 \text{ nm}$.

Mit dem SU-8 Prozess sind 1 dB/cm Wellenleiterdämpfung (Rückseitenbelichtung) erreicht worden. In [127] wird mit einer Glasvorform eine Wellenleiterdämpfung von 0,1 dB/cm erreicht. Daher wird – wie anfangs bereits erwähnt – weiter an dieser Technik gearbeitet. Optimiert werden sollte Folgendes:

- Vollständige Entfernung des SU-8 aus den Nickelformen nach der Galvanik
- Materialoptimierung; besser abformbares Material benutzen

An der chemischen Ablösung des SU-8 von der Nickelform wird derzeit gearbeitet. Auch Versuche, den SU-8 mechanisch herauszulösen, werden verwendet. Bisher konnte kein Verfahren den SU-8 rückstandslos herauslösen.

Abbildung 5.33 zeigt eine REM-Aufnahme eines metallisierten Kunststoffsubstrates. Dieses ist mit einem in Rückseitenbelichtungs-Technik hergestellten Nickelstempel hergestellt worden. Solche Fehlstellen sind nach dem Entwickeln auf SU-8 Wänden nicht zu erkennen und werden daher von SU-8 Resten auf der Nickeloberfläche verursacht. Auch Defekte an Wellenleiterspitzen und Wellenleiterkanten werden dadurch verursacht und führen zu weiteren Verlusten durch Streuung.

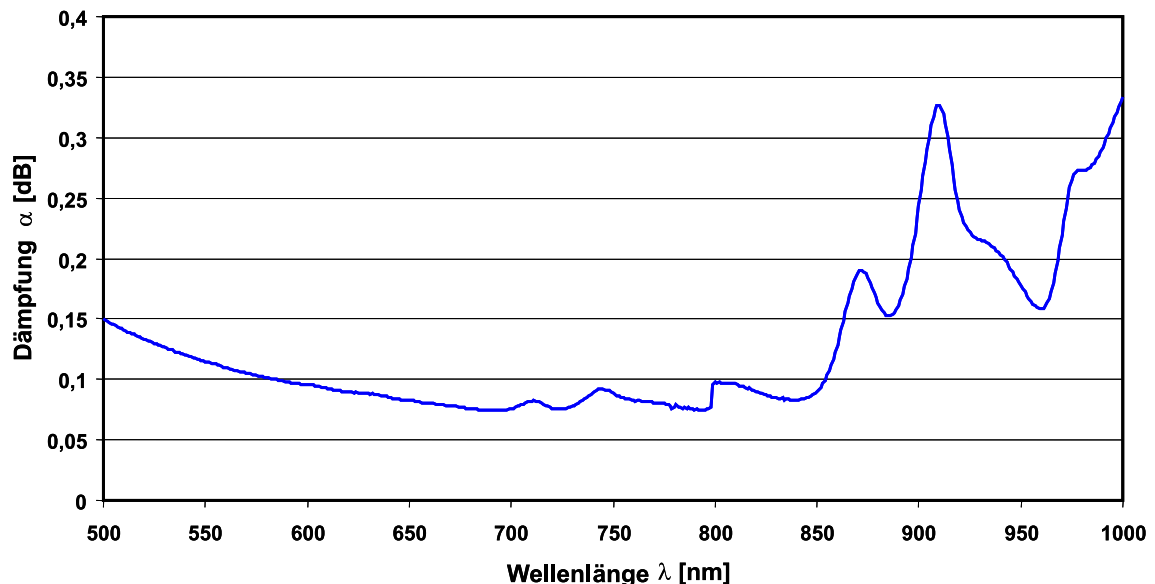


Abbildung 5.32: Bulkspektrum einer Epotek 301-2 Probe (Dämpfung: dB/cm) [121].

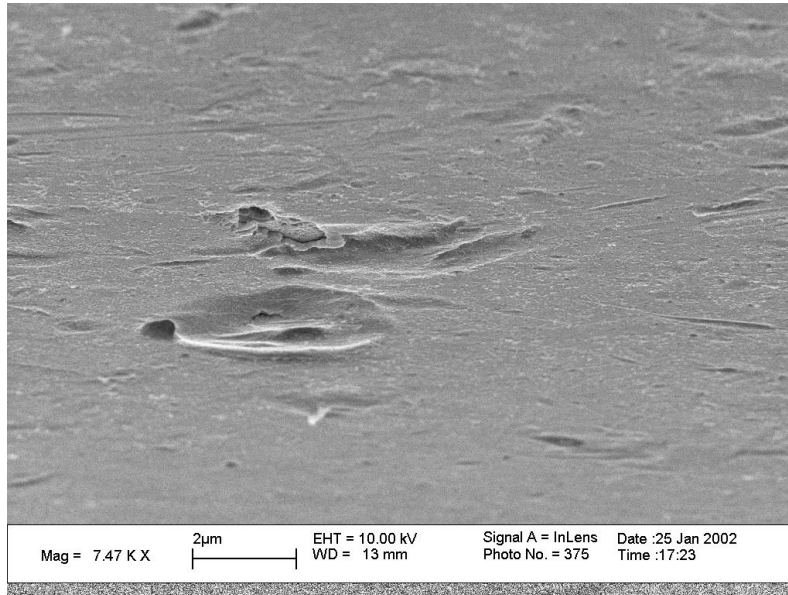


Abbildung 5.33: Wanddefekte in einer abgeformten Wellenleiterwand (Streuscheibenbeleuchtung).

5.8 Realisierte Komponente

Mit den oben beschriebenen Techniken wurde ein erster 8x8 Koppler mit Kaskadenstruktur realisiert. Abbildung 5.34 zeigt ein Bild des ganzen Kopplers. In Abbildung 5.35 zeigt die 8 Ausgänge eines Kopplers. Licht wird hier nur in einen Kanal eingestrahlt.

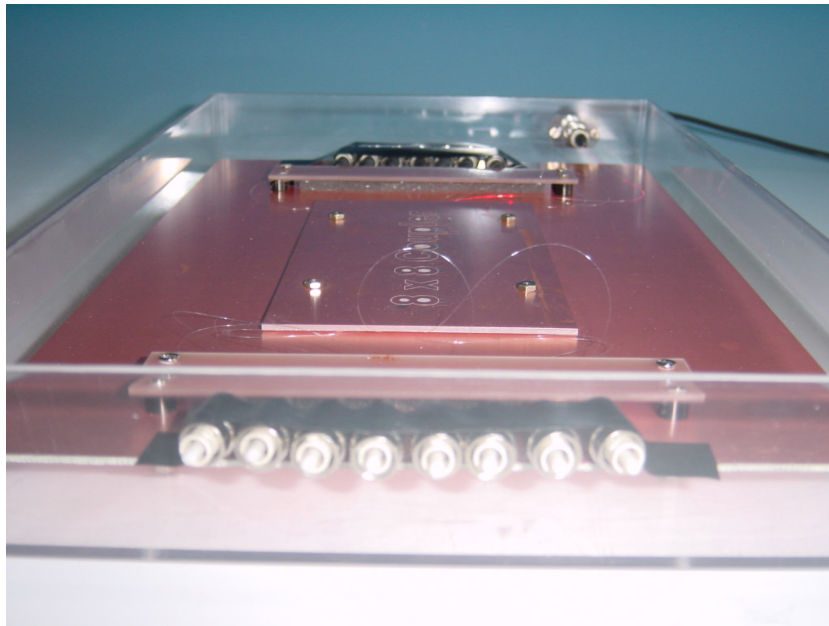


Abbildung 5.34: Realisierter Kaskadensternkoppler mit Fasern und verklebten FC-Steckern



Abbildung 5.35: Acht Ausgänge eines Kaskadenkopplers. Eingestrahlt wird durch einen Kanal.

6 Herstellung und Charakterisierung von Sternkopplern mit Mischerstruktur

In diesem Kapitel werden Koppler für vielmodige Plastikfasern vorgestellt, die auf folgendem Prinzip basieren: Licht wird aus mehreren Fasern in einen Mischerbereich eingestrahlt, in dem sich das Licht homogen verteilt, um dann in die nebeneinander liegenden Auskoppelfasern eingekoppelt zu werden. Aus technologischen Gründen wird hier mit der 480/500 μm Faser gearbeitet; mit geringem technischem Aufwand lässt sich diese durch die 120/125 μm POF ersetzen. Ziel ist die Realisierung von Kopplern mit einer Zusatzdämpfung von rund 2 dB. Dies folgt aus der Betrachtung der Dämpfungen, die durch Flächenfehlanspassung und Materialabsorption verursacht werden. Es werden die Technologie, die Messmethode und die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

6.1 Sternkoppler mit Mischerstruktur

In Abbildung 6.1 ist ein Mischerkoppler skizziert. Deutlich zu erkennen sind die Ein- bzw. Auskoppelfasern, die links und rechts anliegen. Wird Licht von einer Seite eingestrahlt, verteilt sich das Licht (optisches Mischen) so, dass die optische Leistung zu gleichen Teilen auf die gegenüberliegenden Fasern aufgeteilt wird. Die Koppler bestehen aus drei Bauteilen:

- Der vielmodigen Faser, bestehend aus einem PMMA Kern ($n_k = 1,49$) mit einem perfluorinierten PMMA Mantel ($n_M = 1,41$).
- Dem Mischerplättchen mit einer Dicke, die wegen der Auskoppelleffizienz nicht größer als der Faserkern sein sollte.
- Dem optischen Kleber Protaviv L110 mit einem Brechungsindex von 1,53

Alles zusammen befindet sich in einer Hülle aus PMMA, die zur Führung der Fasern und als Verpackung dient. In Abbildung 6.1 ist der Mischerbereich mit Einkoppel- und

Auskoppelfasern zu sehen. Das Mischerplättchen aus Polycarbonat füllt diesen Mischerbereich fast vollständig aus und schwimmt in einem optischen Kleber der einerseits die Führung des Lichtes im Mischer ermöglicht und andererseits die Fasern fixiert.

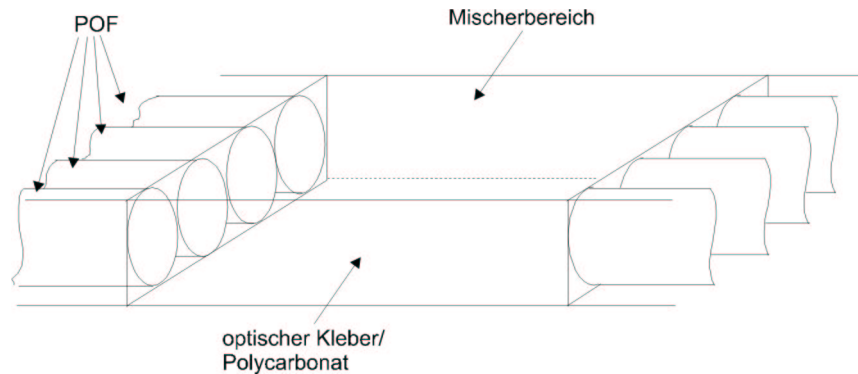


Abbildung 6.1: Prinzip von Kopplern der optischen Mischung.

6.2 Herstellungstechnik

Das hier verwendete Verfahren zur Realisierung des Mischer-Sternkopplers basiert auf der SiGA-Technik (**S**ilizium-Mikrostrukturierung, **G**alvanik, **A**bformung) [78]. Dieses Verfahren gliedert sich im wesentlichen in die drei folgenden Prozessschritte:

1. Mikrostrukturierung von Siliziumwafern
2. Galvanische Abformung der mikrostrukturierten Siliziumvorformen mit Nickel
3. Abformung der Nickelformen durch Guss- oder Prägetechniken auf Polymersubstrate

Das SiGA-Verfahren ähnelt dem LIGA-Verfahren[117]. Der Unterschied liegt in der Strukturierung: Im SiGA-Verfahren wird statt der aufwendigen Röntgen-Belichtung von PMMA eine Ätz-Strukturierung von Silizium vorgenommen. Der Galvanisierungs- und Abformungsschritt ist identisch. Im folgenden Teil werden die einzelnen Schritte, die zur Realisierung des Plastik Substrats nötig sind, beschrieben.

6.2.1 Herstellung des Nickel Prägeblechs

Das herzustellende Kunststoffsubstrat soll folgende Anforderungen erfüllen:

1. Die Gruben müssen POF mit $500\ \mu\text{m}$ Durchmesser aufnehmen können.

2. Da ein Mischerplättchen verwendet wird, müssen die Oberflächen nicht von höchster optischer Qualität sein
3. Geringe Toleranzen

Aus dem ersten Punkt folgen direkt die Ätztiefe der Siliziumwafer und die Weite der späteren Gruben. Da die Si-Wafer aber max $500\ \mu\text{m}$ dick sind, müssen die Koppler für die $500\ \mu\text{m}$ -POF aus zwei Hälften mit je $250\ \mu\text{m}$ tiefen Gruben hergestellt werden. Die Struktur wird in einen (110) Wafer geätzt und führt zu U-förmigen Gruben.

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Punkte und der Tatsache, dass die Si-Strukturierung mit einem Positiv-Lackprozess (Hoechst AZ 5214E) durchgeführt wird, muss die Belichtungsmaske die Bereiche abdecken, die später die Gruben des Kunststoffsubstrates darstellen. Die Breite der Strukturen folgt aus der Faser Breite: $2000\ \mu\text{m}$. Die Länge der Strukturen ergibt sich aus den folgenden Randbedingungen:

- Ausgehend von den Berechnungsergebnissen in [130], ist bei 4×4 -Kopplern mit $500\ \mu\text{m}$ -Fasern eine Koppellänge von ca. 30 mm ausreichend.
- Bedingt durch das Aufnahmewerkzeug der Tischpresse, müssen die Ni-Prägebleche eine Breite von 40 mm haben.
- Die Fläche der 4-Zoll-Si-Wafer ($4'' = 10,16\ \text{cm}$) soll möglichst gut genutzt werden.

Diese Bedingungen werden durch zwei je $40 \times 40\ \text{mm}$ große Ni-Prägebleche erfüllt. Jedes Prägeblech bietet so genügend Platz für drei Kopplerstrukturen.

Nach der Metallisierung des Wafers kann dieser galvanisch in Nickel abgeformt werden. Das hierzu verwendete Verfahren entspricht dem in Kapitel 5.2.6 und 5.2.7.

6.2.2 Heißprägen des PMMA Substrates

Die Abformung der Polymersubstrate erfolgt durch Heißprägen in der Tischpresse. Es wird die Tischpresse aus Kapitel 5.3.1 benutzt. Als Polymer wird PMMA aufgrund seiner hohen Abformtreue und optischen Qualität gewählt. Die nachfolgend aufgeführten Daten beziehen sich auf das Prägen eines PMMA-Substrats von 20 mm Breite, 100 mm Länge (für zwei 40 mm-Bauteile) und 3 mm Dicke.

Das PMMA Substrat wird in der Tischpresse nach folgenden Parametern heißgeformt: Haben beide Werkzeughälften die Solltemperatur von 125°C erreicht, wird die Tischpresse bei einem Druck von 4,5 bar zusammengefahren. Nach 3 min bei einem Druck von 4,5 bar wird die Kühlung angestellt. Sobald die letzte Werkzeughälfte 70°C erreicht hat, werden

die Werkzeughälften auseinandergefahren. Ein kompletter Prägezyklus dauert zwischen 18 und 20 min. Durch die offene Kavität weist das Substrat an den Seiten Prägewülste auf, die für die nächsten Prozessschritte entfernt werden müssen.

6.2.3 Realisierung der Mischer-Sternkoppler

Der Mischerstab wird aus 500 μm -Polycarbonatfolie gefertigt, da diese erstens gute optische Eigenschaften hat und zweitens mit 1,59 einen höheren Brechungsindex als der Kleber ($n=1,53$) hat. Als Kleber, der den Mischerstab sowohl fixiert als auch den Mantel bildet, wird Protavic L110 verwendet. Der Mischerstab kann recht einfach auf der Wafersäge aus der Folie ausgesägt werden. Hier liegt aber auch das Problem dieses Verfahrens: Die verhältnismäßig kleinen Mischer können nach dem Zuschneiden nicht weiter bearbeitet werden und müssen deshalb Schnittflächen mit einer guten Oberflächengüte vorweisen. Aus diesem Grund muss sowohl das verwendete Sägeblatt fein genug sein, damit es keine Riefen hinterlässt, als auch die Sägeparameter wie Umdrehungszahl und Vorschub stimmen, um ein Aufschmelzen des Polycarbonates beim Sägen durch zu hohe Wärmeentwicklung zu verhindern.

Abbildung 6.2 zeigt links den Schnitt mit einem Sägeblatt des Typs Minitron 2.187-10-45H. Auf der rechten Seite wurde der Blatt-Typ Mitsubishi MCT 0,03 Tx 01 2/4 verwendet. Bei beiden wurden ein Vorschub von 1 mm/s und eine Umdrehungszahl von 21000 U/min gewählt. Deutlich ist auf der rechten Seite die wesentlich geringere Riefenbildung zu erkennen.

Da auf der Wafersäge nur, von der Stirnfläche her betrachtet, rechtwinklige Mischer ausgesägt werden können, kann hier nur auf die PMMA-Substrate mit U-Gruben zurückgegriffen werden. Die Stirnflächenpräparation der Fasern erfolgt folgendermaßen:

- Jeweils n Fasern werden passend abgeschnitten und so mit Tesafilm verklebt, dass ihre Enden eine gerade Linie bilden.
- Die fixierten Fasern werden in einen Polierhalter gespannt und auf der Poliermaschine mit 1200er, 2400er, 4800er und abschließend mit Syton ($0,5 \mu\text{m}$ große Partikel) poliert.
- Mikroskopische Kontrolle des Polierergebnisses

Eine Grube der Substrat-Hälfte wird nun vollständig mit Kleber aufgefüllt. In diese Grube wird der exakt passend gesägte PC-Mischerstab gelegt. Um einen geschlossenen Mantel des Mischerstabs zu erzielen, wird dieser komplett mit Kleber bedeckt. Nun wird die obere Substrat-Hälfte aufgelegt und mit einem Halter verpresst. Die Justierung der

Hälften zueinander erfolgt durch den eingelegten Mischstab. Die Fasern werden im Koppler bis an den Mischer heran eingeführt. Der Mischerstab dient so auch als „Anschlag“ für die Fasern, der eine gerade Ausrichtung der Faserenden und eine exakt reproduzierbare Koppellänge gewährleistet. Durch den Kleber im Koppler werden die Fasern sowohl fixiert als auch optisch gut an den Mischer gekoppelt („Index-Matching“). Diese Anordnung wird ebenfalls mit Tesafilm auf einer Platte befestigt und anschließend zur schnelleren Aushärtung bei 60°C in den Autoklaven gelegt. Ein zusätzlicher Druck ist hier nicht notwendig.

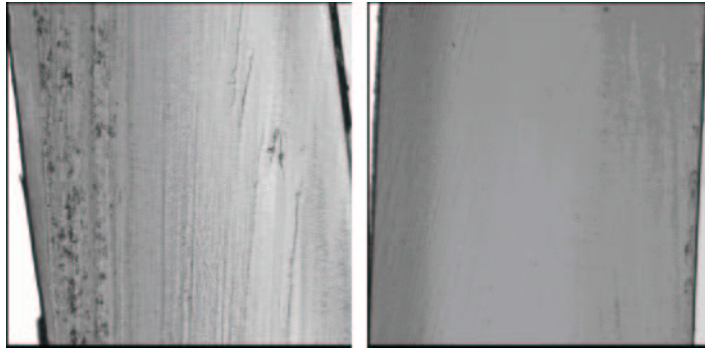


Abbildung 6.2: Wafersägeschnitte durch 500 μm -Polycarbonatfolie mit unterschiedlichen Sägeblättern. Die Photos zeigen zwei 500 μm dicke PC-Folien.

In Abbildung 6.3 ist ein 4×4 -Koppler für 500 μm -POF dargestellt. Der Mischerstab besteht aus Polycarbonat mit 2 mm Breite, 0,5 mm Höhe und 18 mm Länge. Die nicht benötigten Gruben links und rechts des Mixers wurden abgetrennt.

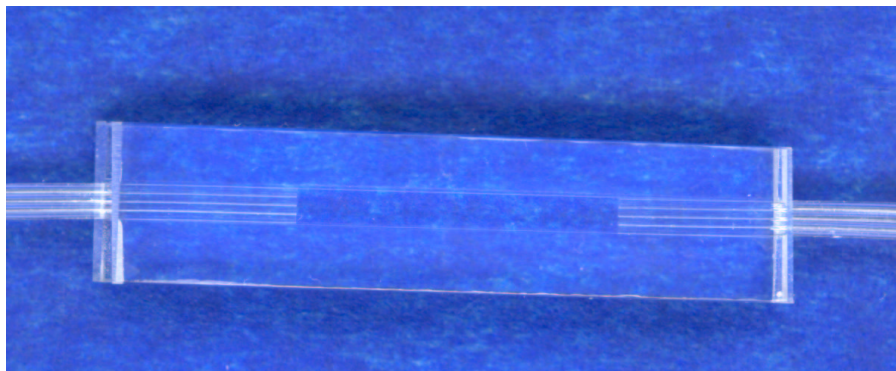


Abbildung 6.3: 4x4-Koppler mit Polycarbonat-Mischerstab

6.3 Messungen

Im Folgenden werden die hergestellten Koppler charakterisiert. Die Einfügedämpfung, Zusatzdämpfung und Gleichmäßigkeit (Berechnung nach Kapitel 5.6.2) werden angegeben. Außerdem wird aus einer Meßreihe die optimale Mischerlänge ermittelt.

6.3.1 Vorbereitung und Messaufbau

Zu Messzwecken werden an die noch freien Enden der Fasern Stecker angeklebt und deren Koppelflächen wie oben beschrieben poliert. Abbildung 6.4 zeigt den Messaufbau.

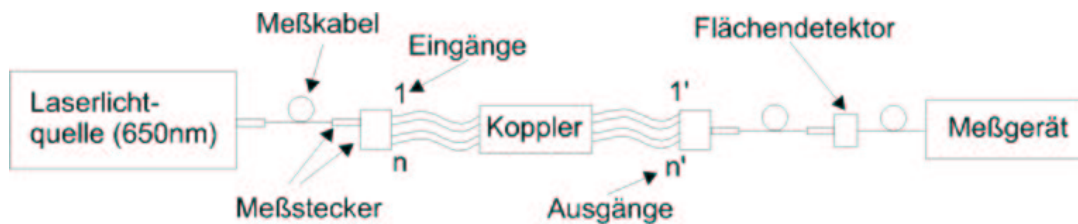


Abbildung 6.4: Meßaufbau

Die Eingänge des Kopplers werden von 1 bis n und die Ausgänge von 1' bis n' nummeriert. Der fertige Koppler wird dann in den Messaufbau eingebaut. Die verwendeten Meßkabel bestehen aus den gleichen Fasern wie die Fasern des Kopplers. Als Messgerät dient ein optischer Leistungsmesser des Typs Anritsu ML 910 B. Gemessen wird bei 650 nm.

6.3.2 Durchführung der Messung

Vor jeder Messreihe wird ein Leistungsreferenzwert gemessen. Dieser gibt die Leistung am Flächendetektor an, wenn sich nur die zwei Messkabel ohne Koppler im Versuchsaufbau befinden. Anschließend wird der Koppler zwischen die Messkabel geschaltet und jeweils die Ausgangsleistung von jedem Eingang zu jedem Ausgang gemessen. Um die Koppelverluste möglichst gering zu halten, werden alle Übergangsf lächen auf Stoß gekoppelt. Die Koppelverluste der Stecker und Dämpfungsverluste durch die Fasern des Kopplers werden folgendermaßen bestimmt:

Eine POF mit der Länge eines kompletten Kopplers wird an ihren Enden mit den Steckern versehen, die auch bei den Kopplern Anwendung finden. Diese werden dann poliert und anschließend durchgemessen (s.o.). Die Messung ergibt eine Zusatzdämpfung von 0,3 dB, die zum größten Teil auf Koppelverluste an den Steckerendflächen zurückzuführen ist. Die Durchgangsdämpfung einer 20 cm langen POF liegt bei ca. 0,02 - 0,03 dB und ist somit zu vernachlässigen.

6.3.3 Auswertung

Aus den PMMA-Substraten mit U-Gruben wurden $500\mu\text{m} - 4 \times 4$ -Koppler mit einem Mischerstab aus Polycarbonat hergestellt. Die Koppellänge ist durch das Mischerplättchen vorgegeben und erleichtert die gerade Ausrichtung der Faserendflächen. Tabelle 6.1 zeigt die gemessenen Werte

Koppellänge [mm]	Einfügedämpf.[dB]	Zusatzdämpf.[dB]	Uniformität [dB]
12	8,2-10,2	2,0-2,1	2,0
14	8,5-9,9	1,8-2,1	1,4
16	8,8-9,4	2,0-2,3	0,8
18	8,7-9,3	1,9-2,2	0,6

Tabelle 6.1: $500\mu\text{m} - 4 \times 4$ -Koppler mit Polycarbonat-Mischerplättchen

Die Zusatzdämpfung liegt zwischen 1,8 dB und 2,3 dB. Hier zeigt sich die gute Reproduzierbarkeit dieses Verfahrens. Eine Gleichmäßigkeit unterhalb von 1 dB lässt sich bei diesem Verfahren ab einer Koppellänge von ca. 15 mm erreichen.

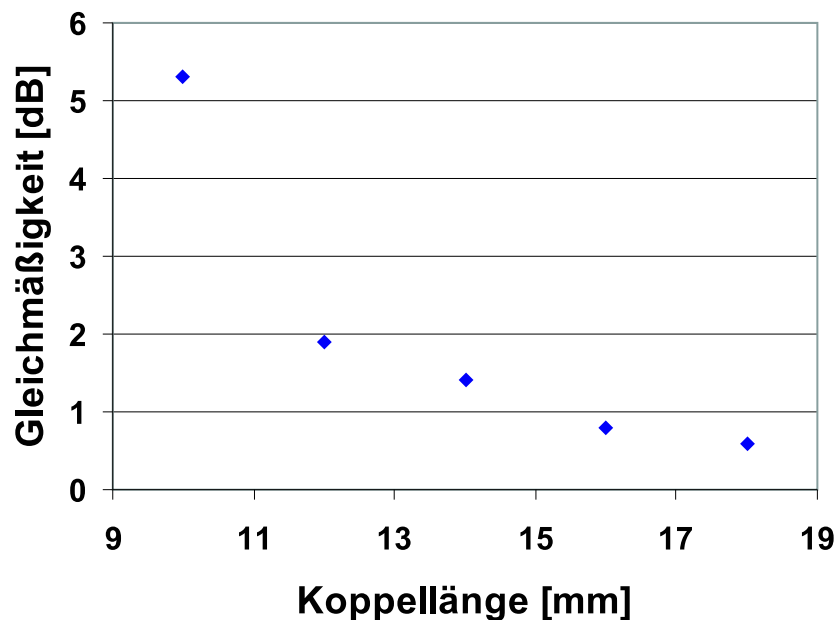


Abbildung 6.5: Optische Mischung in Abh. von der Mischerlänge

6.4 Bewertung

Mischerkoppler mit einer optimierten Koppellänge von 18 mm zeigen Zusatzdämpfungen von max. 2,2 dB. Da der Mischerstab eine fest vorgegebene Höhe von $500\ \mu\text{m}$ hat, kann von einer Flächenfehlpassung $FU(d = 0) = 1,4\ \text{dB}$ ausgegangen werden. Flächenfehlpassung wird in den Kopplern durch das Überstrahlen der Fasermantel und Vorbeistrahlen an den Fasern verursacht. Werden die 0,3 dB Koppelverluste hinzuaddiert, so bleiben bei durchschnittlich 2 dB Zusatzdämpfung lediglich 0,5 dB Verlust durch Abstrahlung und Materialabsorption. Am Leuchtverhalten des Kopplers kann erkannt werden, dass der Hauptanteil der Abstrahlverluste durch die seitlichen gesägten und damit rauen Flächen des Mischerstabes erfolgt. Diese Art von Koppler stellen eine hervorragende Lösung für den Einsatz in LAN dar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit werden zwei passive optische Bauteile hergestellt: Ein optisches Verbindungsstück auf Basis der Polymer Optischen Faser zur Verbindung von Prozessoren und in Kunststoff abgeformte Sternkoppler.

Innerhalb des EU-Forschungsprojektes OIIC ist es gelungen, ein optisches Übertragungssystem zwischen Prozessoren auf einer Platine zu realisieren. Neben den VCSELn und PDs musste dafür eine vielkanalige optische Führung entwickelt werden. Als Medium für dieses mehrkanalige Bauteil wird die vielmodige 120/125 μm POF gewählt. Erster Schritt in der Entwicklung ist die Charakterisierung der POF.

Für das optische Verbindungsstück wird die Dämpfungscharakteristik für die verwendete dünne POF und eine Standard 1 mm-POF aufgenommen. Die 1 mm POF dient als eine Art Eichmessung, um die Genauigkeit des verwendeten Verfahrens einschätzen zu können. Im Ergebniss zeigt sich eine hohe Genauigkeit, da die Messung an der 1 mm POF eine überzeugende Übereinstimmung mit Messungen anderer Gruppen und der Hersteller zeigt. Daher sind für die dünne POF folgende Ergebnisse festzustellen: Die Dämpfung ist im unteren Bereich des Spektrums leicht erhöht (z.B. 550 nm: 0,7 dB/m statt 0,2 dB/m (1 mm POF)). Bei großen Dämpfungen (905 nm; 30 dB/m) ist eine große Differenz von 10 dB zwischen den beiden Fasern gemessen worden. Hier ist wegen der großen Dämpfung nur eine Messung an einem kurzen Faserstück möglich. Die anfangs in einer Faser geführten Mantelmoden sind dann noch nicht herausgebrochen worden und werden bei der Leistungsdetektion mitgemessen. Die im Projekt eingesetzte Wellenlänge liegt bei 980 nm; hier liegt die Dämpfung bei 11,0 dB.

Nächster Schritt ist die Messung der Abhängigkeit der Faserdämpfung von Faserbiegungen. Die untersuchten Biegeradien lagen zwischen 0,5 mm und 2 mm. In dem Bauteil ist ein möglichst geringer Biegeradius zu realisieren, der mit Hilfe dieser Messung zu 2 mm gewählt wird, da dort die Biegedämpfung unter 0,3 dB liegt.

Im Unterschied zur Glasfaser ist die Präparation der POF-Faserendflächen schwierig. In dieser Arbeit werden vier Verfahren untersucht: Schnitt mit heißem Messer ($1,9 \pm 0,4$ dB Koppeldämpfung), Schnitt mit anschließender kurzer Erhitzung ($1,6 \pm 0,2$ dB), Schnitt mit einer Wafersäge ($1,6 \pm 0,3$ dB) und Polieren ($0,37 \pm 0,18$ dB). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Stirnfläche der POF poliert, da dieses Verfahren die geringsten Dämpfun-

gen verursacht.

Mit Hilfe dieser Messungen kann der mehrkanalige Stecker realisiert werden. Zur Vorbereitung werden 8 Fasern in Bändchen angeordnet, um sie vor mechanischer Belastung zu schützen und leichter verarbeitbar zu machen. Die Fasern werden in einem Silikon vergossen, das einen Brechungsindex von 1,41 besitzt und somit die Lichtführung auch bei beschädigtem Fasermantel gewährleistet. Der Abstand zwischen den Fasern beträgt $250 \mu\text{m}$.

Als Nächstes gilt es, die Fasern in einem zweidimensionalen Raster – passend zu den optischen Sendern und Empfängern – mit einem Raster von $250 \mu\text{m}$ anzuordnen. Zur Fixierung des Rasters werden $0,5 \text{ mm}$ dicke PMMA Plättchen verwendet, in die 128 Löcher mit einem Durchmesser von $130 \mu\text{m}$ mechanisch gebohrt sind und ein einseitiger Konus zum leichteren Einfädeln dient. Zwei weitere Löcher mit einem Durchmesser von rund $700 \mu\text{m}$ dienen zum Verkleben von Justagestiften, mit deren Hilfe eine passive Justage zu den PD bzw VCSELarrays ermöglicht wird. Der Biegeradius wird mit Hilfe eines Viertelmetallstabes eingestellt, der auf dem PMMA Plättchen verklebt wird. Schließlich kommt noch ein Rahmen auf das Plättchen und die POFs werden mit schwarzem Epoxy vergossen.

Das so hergestellte Bauteil wird mit Hilfe von Messungen charakterisiert. Zum einen wird die Dämpfung in Abhängigkeit von der Temperaturbelastung gemessen. Die geforderten 80°C können von dem Bauteil ohne signifikante Erhöhung der Dämpfung ausgehalten werden, zum anderen werden die durch axialen, lateralen und radialen Versatz bedingten Dämpfungen gemessen und theoretisch abgeschätzt. Aus diesen Messungen folgt, dass die Faser nicht homogen ausgeleuchtet wird, sondern mit einer effektiven numerischen Apertur von 0,42. Dies wird durch eine Messung der Abstrahlcharakteristik bestätigt. Durch Versätze werden geringere Verluste verursacht als angenommen.

Der Brechungsindex des POF-Kerns wird mit Hilfe einer RNF-Messung zu $1,4979 \pm 0,0079$ bestimmt. Mit einer Bandbreiten Messung wird die Übertragungsbandbreite der $120/125 \mu\text{m}$ POF auf 50 cm zu $2,5 \text{ Gbit/s}$ gemessen. Dabei liegt die Bit-Fehler-Rate unter 10^{-11} bei optischen Empfangsleistungen unter -20 dBm . Das Übersprechen zwischen einzelnen Fasern liegt unter 35 dB .

Im Hinblick auf den OIIC-Demonstrator wird mit Hilfe der durchgeführten Dämpfungsmessungen das optische Leistungsbudget berechnet. Dafür werden einerseits die durch den Stecker, andererseits die durch die Ein- und Auskopplung verursachten Verluste berücksichtigt. Da die VCSEL mit einer Leistung von 1 mW senden und die Photodetektoren eine Dynamik von 0 dBm bis zu -14 dBm besitzen, sollte die optische Übertragung nicht mehr als 14 dB Dämpfung verursachen. Für die Übertragungstrecke von VCSEL über

POF bis zur Photodiode wird eine Dämpfung von $6,4 \pm 0,3$ dB gemessen. Somit wird die Spezifikation sicher erfüllt.

Mit dem innerhalb des EU Projektes OIIC entwickelten Verbindungsstück konnten in einem Demonstrator Gesamtbandbreiten von über 10 Gbit/s (20 cm Länge) realisiert werden. Das Potential der POF ist jedoch wesentlich höher. Eine Bandbreite von 16 Gbit/s ist mit ihr theoretisch zu erreichen. Bei 128 Kanälen liegt die Gesamtbandbreite dann bei 2 Tbit/s. Allerdings müssen für solche Bandbreiten die optoelektronischen Sender und Empfänger und die dafür notwendige Steuerelektronik noch entwickelt werden.

Im zweiten Teil der Arbeit wird an der Realisierung von Sternkopplern mit Kaskaden- oder Mischerstruktur gearbeitet. Die Koppler mit Kaskadenstruktur werden mit dem negativ Epoxidharz-Lack SU-8 realisiert. Der auf Epoxidharz basierende Lack SU-8 kann in einem Schritt bis zu Lackdicken von 1 mm aufgeschleudert, belichtet und entwickelt werden. Da es sich bei SU-8 um einen Negativlack handelt, treten beim konventionellen Belichten Hinterschneidungen auf, die beim späteren Abformprozess hinderlich sind. Um Hinterschneidungen zu vermeiden, wird in dieser Arbeit die Rückseiten- und die Streuscheibenbelichtung verwendet. Bei der Rückseitenbelichtung wird der Lack direkt auf eine Maske aufgeschleudert und durch die Maske belichtet. Auf diese Weise werden Bodenrauigkeiten von $R_a < 10$ nm und Wandrauigkeiten von $R_a = 50$ nm bis $R_a = 60$ nm erreicht. Der Winkel zwischen Boden und Seitenwand beträgt unter 5° . In einem weiteren Ansatz, dem Streuscheibenverfahren, wird eine Neigung der Wellenleiterwand von 15° erzielt. Bei diesem Verfahren wird zwischen Maske und Belichter eine Glasscheibe gelegt, die auf einer Seite durch Sandstrahlen angeraut ist. Dadurch werden die Parallelität des UV-Lichtes aufgehoben und der Wellenleiterquerschnitt homogener ausgeleuchtet. Mit diesem Verfahren werden Wellenleiter Bodenrauigkeiten von $R_a < 10$ nm und Wandrauigkeiten von $R_a = 85$ nm bis $R_a = 125$ nm erzielt. Mit beiden Verfahren werden Dämpfungswerte von 1 dB/cm gemessen. Dieser hohe Wert wird durch SU-8 Reste verursacht, die sich nach der galvanischen Abformung nicht vollständig aus dem Nickel herauslösen lassen und somit zu zusätzlicher Streuung von Licht führen.

Die so verursachten Dämpfungswerte führen zu relativ hohen Dämpfungsverlusten bei 8x8 Kopplern. Die Zusatzdämpfung liegt zwischen 7 dB und 12 dB und die gemessene Uniformität zwischen 2 dB und 11 dB. Die durch die Teilung der Wellenleiter verursachte Teilungsdämpfung wird zu 0,5 dB pro Kopplung gemessen. Die um die Wellenleiterdämpfung (6,5 dB) und die Kopplungsverluste (1,5 dB) korrigierten Zusatzverluste liegen bei 2 dB.

Im zweiten Ansatz zur Herstellung von 8x8 Kopplern wird die Kopplung des Lichtes

nicht durch Verzweigung erreicht, sondern durch einen Mischerbereich, in den die parallelliegenden Fasern hineinstrahlen und an den die Auskoppelfasern nach einer definierten Mischerlänge parallel nebeneinanderliegend angrenzen. Die in diesem Verfahren verwendete POF misst 480/500 μm im Durchmesser. Durch geringfügige Modifikationen des Herstellungsverfahrens lässt sich aber auch die 120/125 μm POF verwenden.

Die Herstellung der Koppler erfolgt mit dem sogenannten SIGA Verfahren. In diesem Verfahren werden die Strukturen in einen Siliziumwafer geätzt. In dem Mischerbereich liegt ein Polycarbonat Plättchen, dass von einem optischen Kleber (Protavic L110) umgeben ist.

Mit dieser Technik werden 4x4 Koppler realisiert, deren Mischerlänge zwischen 10 mm und 18 mm liegen. Die günstigsten Dämpfungswerte erreichen Koppler mit 18 mm Koppungslänge. Hier liegen die Werte für die Einfügedämpfung zwischen 8,7 und 9,3 dB, für die Zusatzdämpfung zwischen 1,9 und 2,2 dB und für die Uniformität erzielt man 0,6 dB.

Die zwei in dieser Arbeit realisierten Koppler haben unterschiedliche Perspektiven. Die Sternkoppler mit Mischerstruktur eignen sich für LAN. Die Sternkoppler mit Kaskadenstruktur sind technisch bedingt in dünnen Folien ($< 200 \mu\text{m}$) realisiert. Daher sind sie hervorragend für die Integration in Platinen geeignet. Auf Grund dieser Ergebnisse und der hervorragenden optischen Qualität hat die SU-8 Dicklacktechnik eine sehr gute Perspektive.

8 Anhang

Abbildungsverzeichnis

2.1	Dämpfungscharakteristika von POF, PF-POF und Glasfaser	5
2.2	Einsatzfelder der POF [27].	6
2.3	Das Paroli Modul von Infineon (Länge des Bauteils: 5 cm).	9
2.4	Das PONI Module (Hewlett Packard) des POLO Projekts	11
2.5	Endfläche der Imagefaser nach Datenübertragung	12
3.1	Prinzip von OIIC	16
3.2	Aufbau eines VCSEL	16
3.3	Solder Pads von VCSEL	17
3.4	4x8 VCSEL Array	17
3.5	Leistungsdiagramm eines VCSEL	18
3.6	PD Querschnitt	18
3.7	REM Photos eines PD Feld	19
3.8	Abstrahlungscharakteristik der VCSEL [Quelle: Uni Ulm]	20
3.9	VCSEL und PD Feld für OIIC	21
4.1	Ziel der Chip-to-Chip Verbindung	24
4.2	Die verwendete Polymer Optische Faser.	25
4.3	Skizzierter Aufbau des Weißlichtmessplatzes	26
4.4	Gemessene Absorptionsspektrum	29
4.5	Biegeradien-Verluste bei 660 nm, 870 nm und 980 nm für eine 360° Biegung.	32
4.6	Ergebnisse der verschiedenen Endflächen-Präparationstechniken	34
4.7	Herstellung der Faserbändchen.	36
4.8	Querschnittsfoto eines Faserbändchens	37
4.9	Lockplättchen für das Verbindungsstück	37
4.10	32 gebohrte Löcher des PMMA Plättchens.	38
4.11	Bemaßung des PMMA Plättchens	38
4.12	Skizze für K1 Wert.	39
4.13	Skizze der gemessenen Werte.	39

4.14	Querschnitt durch den realisierten OPB.	40
4.15	Einfädeln der POFs mit Hilfe von V-Nuten	41
4.16	Foto des realisierten OPBs	42
4.17	Temperaturstabilität des optischen Verbindungstückes.	43
4.18	Skizze zur Messung der Abstrahlcharakteristik	44
4.19	Abstrahlcharakteristik der 120/125 μm POF	45
4.20	Axialer Versatz mit Aus- und Einkoppelfaser	46
4.21	Diagramm zum axialen Verlust	46
4.22	Lateraler Versatz von zwei Fasern.	47
4.23	Messung und Näherung für lateralen Versatz	47
4.24	Winkelversatz zwischen zwei Fasern.	48
4.25	Verluste durch Winkelversatz.	48
4.26	Aufbau des RNF Messplatzes.	49
4.27	Messergebnis der RNF Messung an der 120/125 μm POF.	50
4.28	BER Messung an einer 125 μm POF.	52
4.29	Systemdemonstrator in OIIC	53
4.30	Detailphoto Demonstrator	54
4.31	Die Einkopplung in die POF	55
4.32	POF-Detektor Kopplung	55
5.1	8x8 Sternkoppler in Kaskadenstruktur.	57
5.2	Faserankopplung wird durch Einlegen der Faser in die LWL-Struktur erreicht. Die Geometrien werden vorher aufeinander abgestimmt.	58
5.3	4x4 Koppler in Mischerplättchen-Technologie.	58
5.4	Prinzip der Wellenleiterherstellung in photochemischen Verfahren.	59
5.5	Schematischer Ablauf beim Polyguide TM -Prozess für vielmodigen Wellenleiter	60
5.6	Prinzip der Wellenleiterherstellung mit Ablationsverfahren.	62
5.7	Vom strukturierten Si-Wafer zum Wellenleiter in Kunststoff	65
5.8	Strukturerzeugung beim Dicklack-Prozess.	67
5.9	Schematischer Ablauf des SU-8-Prozesses	68
5.10	Umkehrung der Hinterschneidung durch Rückseitenbelichtung beim SU-8-Prozess	69
5.11	SU-8 Belichtung in Streuscheibentechnik.	70
5.12	Übertragen der Vorformstrukturen in eine Polymerfolie durch Heißprägen.	72
5.13	Verkleben der Wellenleitergruben	73
5.14	Strukturformel des SU-8	74
5.15	Absorptionsspektren von SU-8, RISTON und DNQ-Lack	75

5.16	Strukturformel von PMMA.	75
5.17	Zug- und Dehnfestigkeit von Thermoplasten	75
5.18	Der Wellenleiter Dämpfungsmessplatz.	77
5.19	Wellenleiter mit Faser und eingefügtem Indexöl.	78
5.20	Wafer mit strukturiertem SU-8.	78
5.21	Effekt der Rückseitenn- und Streuscheibenbelichtung beim SU-8.	79
5.22	Gesamtansicht eines Kopplers	80
5.23	REM-Aufnahme der Spitze im Y-Verzweiger	81
5.24	In Kunststoff abgeformte SU-8 Verzweigerspitze.	81
5.25	Position des Sägeschnittes	82
5.26	Mit SU-8-Prozess erzeugte Seitenwand (Rückseitenbelichtung)	83
5.27	Wellenleiter aus EpoTek UVO-114 in PMMA (SU-8)	84
5.28	Wellenleiter aus EpoTek 301-2 in Topas mit einem 125 x 125 μm Querschnitt.	85
5.29	Cut back Messung an einem Wellenleiter aus dem SU-8 Prozess	85
5.30	Zusatzdämpfung des 8x8 Koppler	88
5.31	Uniformität der 8x8 Koppler	88
5.32	Bulkspektrum einer Epotek 301-2 Probe (Dämpfung: dB/cm) [121].	89
5.33	Wanddefekte in einer abgeformten Wellenleiterwand (Streuscheibenbelichtung).	90
5.34	Realisierter Kaskadensternkoppler mit Fasern und verklebten FC-Steckern	91
5.35	Acht Ausgänge eines Kaskadenkopplers. Eingestrahlt wird durch einen Kanal.	91
6.1	Prinzip von Kopplern der optischen Mischung.	94
6.2	Wafersägeschnitte durch 500 μm -Polycarbonatfolie	97
6.3	4x4-Koppler mit Polycarbonat-Mischerstab	97
6.4	Meßaufbau	98
6.5	Optische Mischung in Abh. von der Mischerlänge	99

Tabellenverzeichnis

2.1	Kennzahlen weiterer optischer Verbindungstechnologien.	13
4.1	Dämpfungsmaxima und -minima der untersuchten POFs	26
4.2	Dämpfungsursachen der PMMA-POF.	27
4.3	Gerechnete Frequenzen und Intensitäten der Absorptionsschwingungen . . .	30
4.4	Dämpfungswerte für charakteristische Wellenlängen	31
4.5	Verlustbilanz der POF.	32
4.6	Verlustbilanz der POF.	35
4.7	Gemessene Toleranzen für die PMMA Plättchen.	39
4.8	Am Bauteilgemessene Dämpfungen	41
4.9	Verlustbilanz der POF.	49
4.10	Verlustbilanz der POF.	52
4.11	Optische Verluste in der realisierten Verbindung	56
5.1	Wichtige Eigenschaften und Strukturierungstechniken von optischen Polymeren	63
5.2	Schleuderparameter für SU-8 Belackung	68
5.3	Prozeßparameter für die Abformung in Topas und PMMA.	72
5.4	Gemessene Rauheiten für SU-8 Prozess	83
6.1	500 μm - 4 \times 4-Koppler mit Polycarbonat-Mischerplättchen	99

Literaturverzeichnis

- [1] Lehmacher, S.; Neyer, A.: "Integration of Polymer Optical Waveguides into Printed Circuit Boards (PCB)"; *Proceedings of Micro.tec 2000*; Vol 1; S. 111-114
- [2] Kragl, H.; Hohmann, R.; Loddoch, M.; Papen, G. v. et al.: "Microstructured Three-dimensional Printed Circuit Boards: A Novel Fabrication Technology for Optical Transceiver Modules"; *Proceedings of Micro.tec 2000*; Vol 1; S. 107-110
- [3] Ciocan, C.: "The Audio/Video Telematic Databus"; *Proceedings of Micro.tec 2000*; Vol 1; S. 179-182
- [4] Seidl, D.; Merget, J.; Schwarz, J.; Schneider, J.; Weniger, R.; Zeeb, E.: "Application of POFs in data links of mobile systems"; *Plastic Optical Fiber*, Conf. Proceedings, S. 205-211, Berlin, 1998
- [5] Buchold, B.: "Integriert-optische Wellenlängenmultiplexer in Glas für WDM-Systeme"; *Fortschrittsberichte VDI*, Reihe 10, Nr 545, ISBN 3-18-354510
- [6] Grimes, G.J.: "High Speed Systems Applications of POF"; *Plastic Optical Fiber*; Proceedings, S. 9-16, 1998
- [7] Cross, G.: "Current Status of Plastics in Photonics"; *textitPlastics in Telecommunications VIII*; Conference Proceedings, S. 1-7, London, 1998
- [8] World Wide Web: <http://www.intec.rug.ac.be/OIIC/>
- [9] Wittmann, B.; Jöhnck, M.; Neyer, A.: "1D and 2D Arrays of 125 μ m POFs: Fabrication and characterisation"; *Plastic Optical Fibers*, Conf. Proceedings, Berlin, S. 147-151, 1998
- [10] Jöhnck, M.; Wittmann, B.; Neyer, A.; Michalzik, R.; Wiedenmann, D.: "POF-Based Integrated Circuit Interconnects"; *Plastic Optical Fibers*, Conf. Proceedings, Berlin, S. 130-131, 1998

-
- [11] Jöhnck, M.; Wittmann, B.; Neyer, A.; et al.: "8x8 POF Based Interchip Interconnection with 2,5 Gbit/s per Channel Transmission"; *24th European Conference on Optical Communication*, Madrid, Paper MoA04, 1998
- [12] Jöhnck, M.; Wittmann, B.; Neyer, A.: "64 Channel Two Dimensional POF Based Optical Array Interchip Interconnect" *Optics in Computing*, Conf. Proceedings, Brügge, 1998
- [13] B. Wittmann, M. Jöhnck, R. Michalzik; Neyer, A.: "POF-Based Interconnects for Intra-Computer Applications"; *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol 5, S. 1243-1248, 1999
- [14] Neyer, A.; Wittmann, B.; Jöhnck, M.: "Plastic-Optical-Fiber-Based Parallel Optical Interconnections (Invited paper)"; *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 5, S. 193-200, 1999
- [15] Jöhnck, M.; Wittmann, B.; Neyer, A.: "64 Channel 2D POF-Based Optical Array Interchip Interconnect"; *Journal of Pure and Applied Optics*, Vol 1, S. 313-316, 1999
- [16] Wittmann, B.; Michalzik, R.; Neyer, A. [et al]: "Optical Interconnect Based on 62 – μm -Core POF"; *Plastic Optical Fiber*, Conf. Proceedings, S. 140-143, Chiba (Japan), 1999
- [17] Brunfaut, M.; Wittmann, B.; Neyer, A.; et al.: "A Multi-FPGA Demonstrator with POF-Based Optical Area Interconnect" *IEEE LEOS Annual Meeting*, Conf. Proceedings, Vol 2, Piscataway (NJ,USA), S. 625-626, 1999
- [18] Wittmann, B.; Neyer, A.: "Optical Interconnect for Inter-Processor Communication"; *MICRO.tec*, Conf. Proceedings Vol 1, Hannover (D), S. 91-94, 2000
- [19] Mederer, F.; Wittmann, B.; Neyer, A.; et al.: "Improved VCSEL Structures for 10 Gigabit Ethernet and Next Generation Optical - Integrated PC - Boards"; *Electronics Letters*, 2001
- [20] Mederer, F.; Wittmann, B.; Neyer, A.; et al.: "Improved VCSEL Structures for 10 Gigabit Ethernet and Next Generation Optical - Integrated PC - Boards"; *51st Electronic Components and Technology Conference 2001*, Piscataway (NJ,USA), XX-XIII+1518, S. 1-7, 2001
- [21] Wittmann, B.; Lehmacher, S.; Kopetz, S.; Neyer, A.: "Optical Interconnects on and in Printed Circuit Boards"; *International J. Electron. Commun. (AEÜ)*, Vol 55, No 5, S. 319-322, 2001

- [22] Ebeling, K.J.: "Integrierte Optoelektronik"; *Springer Verlag*, 2. Auflage, S. 311, 1992
- [23] Karstensen, H.; Melchior, L.; Plickert, V.; Blank, J.; Wipiejewski, T.; Wolf, H.-D.; Wieland, J.; Jeiter, G.; Dal' Ara, R. and Blase, M.: "Parallel optical link (Paroli) for multichannel gigabit rate interconnection"; *48th Electron. Comp. & Technol. Conf., ECTC*; Conf. Proc., S. 747-754, Seattle, 1998
- [24] Aus: URL <http://grouper.ieee.org/groups/802/3/ae/>
- [25] Seifert, R.: "Gigabit Ethernet: Technology and Applications for High-Speed LANs"; *Addison Wesley, Reading, Mass.*
- [26] Cunningham, D.G.; Lane, W.G.: "Gigabit Ethernet Networking"; *Macmillan Technical Publishing*, 1999
- [27] Fischer, D.: "Mehrmodige integrierte-optische Wellenleiterschaltungen aus Polymeren"; *VDI-Fortschrittsberichte Nr. 477*, 1997
- [28] Ishigure, T.; Koike, Y.: "Potential bit rate of GI-POF link"; *Polymer Optical Fiber, Conf. Proceedings*, S. 14-18, 2000
- [29] Kogenazawa, K.; Onishi, T.: "Progress in perfluorinated GI-POF, Lucina™."; *Plastic Optical Fiber, Conf. Proceedings*, S. 19-21, Cambridge (USA), 2000
- [30] Ziemann, O.; Giehmann, L.; Zamzow, P.E.; Steinberg, H.; Tu, D.: "Potential of PM-MA based SI-POF for Gbps transmission in automotive applications."; *Plastic Optical Fiber, Conf. Proceedings*, S. 44-48, Cambridge (USA), 2000
- [31] Zhou, G.; Zhang, Y.; Liu, W.: "Optical fiber interconnection for the scalable parallel computing system"; *Proc. IEEE 88*, S. 849-855, 2000
- [32] Melchior, L.; Kropp, J.R.: "A high density optical backplane connector"; *46th Electron. Comp. & Technol. Conf. (ECTC)*, Orlando, 1996
- [33] Yoshikawa, T.; Matsuoka, H.: "Optical Interconnections for parallel and distributed computing"; *Proc. IEEE 88*, S. 849-855, 2000
- [34] Rode, M.; Moisel, J.; Krumpholz, O.; Schickl, O.: "Novel optical backplane board-to-board interconnection."; *11th Int. Conf. on Integrated Optics and Opt. Fibre Commun. & 23rd Europ. Conf. on Opt. Commun., IOOC-ECOC, 2: 228-231.*, Conf. Proceedings, Edinburgh, 1997

- [35] Tan, Q.; Vandewege, J.; De Pestel, G.; Vetter, P.; Migom, F.: "2,5 Gb/s/mm optical fiber interconnections"; *22nd Europ. Conf. on Opt. Commun.*, S. 2.55-2.58, Oslo, 1996
- [36] Cannell, G.J.: "Standardized packaging and interconnection for inter- and intra-board optical communication (SPIBOC)."; *22nd Europ. Conf. on Opt. Commun., ECOC, Conf. Proc.*, S. 3.249-3.252, Oslo, 1996
- [37] Peall, R.G.; Priddle, H.F.; Gear, M.C.; Shaw, B.; Briggs, A.; Harrison, P.M.; Schmid, A.; Bitter, M.; Wieland, J.; Zorba, O.; Harcourt, R.: "12 × 2,5 Gbit/s receiver array module", *Electronics Letters* 32, S. 682-683, 1996
- [38] Hibbs-Brenner, M.; Lehman, J.: "In search of the 1 meter cost competitive optical interconnect."; *IEEE Lasers and Electro-Opt. Soc. Annual Meeting, LEOS*, 2nd Vol, S. 381-382, Orlando, 1998
- [39] Bristow, J.: "Intra computer optical interconnects: progress and challenges."; *Optoelectronic Interconnects and Packaging, SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology CR62*, S. 318-326, 96
- [40] Eldada, L.; Shacklette, L.: "Advances in polymer integrated optics"; *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics*, Vol 6, Nr. 1, S. 54-68, 2000
- [41] Liu, Y.S.: "Lighting the way in computer design"; *IEEE Circuits & Devices*, Vol 14, S. 23-31, 1998
- [42] Liu, Y.S.; Wojnarowski, R.J.; Hennessy, W.A.; Bristow, J.P.; Liu, Y.; Peczalski, A.; Rowlette, J.; Plotts, A.; Stack, J.; Yardley, J.; Eldada, L.; Osgood, R.M.; Scarmozzino, W.; Lee, S.H.; Uzguz, V.: "Polymer optical interconnect technology (POINT) - optoelectronic packaging and interconnects for board and backplane applications"; *Optoelectronic Interconnects and Packaging, SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology CR62*, S. 405-414, 1996
- [43] Sakamoto, T.; Tsuda, H.; Hikita, M.; Kagawa, T.; Tateno, K.; Amano, C.: "Optical interconnection using VCSELs and polymeric waveguide circuits."; *J. Lightwave Technology*, Vol 18, S. 1487-1492, 2000
- [44] Booth, B.L.: "Low loss channel waveguides in polymers"; *J. Lightwave Technology*, Vol 7, S. 1445-1453, 1989

- [45] Szymanski, T.H.; Tyan, V.: "Error and flow control in terabit intelligent optical backplanes"; *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, Vol 5, S. 339-352, 1999
- [46] Szymanski, T.H.; Hinton, H.S.: "Reconfigurable intelligent optical backplane for parallel computing and communications"; *Appl. Opt.*, Vol 35, S. 1253-1268, 1996
- [47] Li, Y.; Popelek, J.: "Volume consumption comparisons of free-space and guided-wave optical interconnections"; *Appl. Opt.*, Vol 39, S. 1815-1825, 2000
- [48] Chen, R.T.; Zhao, C.; Oh, T.-H.: "Performance-optimized optical bidirectional backplane bus for multiprocessor systems"; *Optoelectronic Interconnects and Packaging; SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology CR62*, S. 299-317, 1996
- [49] Lytel, R.; Davidson, H.L.; Nettleton, N.; Sze, T.: "Optical interconnections within modern high-performance computing systems"; *Proc. IEEE*, Vol 88, S. 758-763, 2000
- [50] Lehmacher, S.; Neyer, A.; Mederer, F.: "Polymer optical waveguides integrated in printed circuit boards"; *Proc. 27th Europ. Conf. on Opt. Commun., ECOC*, Vol 3, S. 302-303, Amsterdam
- [51] Kicherer, M.; Mederer, F.; Jäger, R.; Unold, H.; Ebeling, K.J.; Lehmacher, S.; Neyer, A.; Griese, E.: "Data transmission at 3 Gbit/s over intraboard polymer waveguides with GaAs VCSELs"; *Proc. 26th Europ. Conf. on Opt. Commun., ECOC*, Vol 3, S. 289-290, München
- [52] Haney, M.W.; Christensen, M.P.; Milojkovic, P.; Fokken, G.J.; Vickberg, M.; Gilbert, B.K.; Rieve, J.; Ekman, J.; Chandramani, P.; Kiamilev, R.: "Description and evaluation of the FAST-Net smart pixel-based optical interconnection prototype"; *Proc. IEEE*, Vol 88, S. 819-828, 2000
- [53] McArdle, N.; Naruse, M.; Toyoda, H.; Kobayashi, Y.; Ishikawa, M.: "Reconfigurable optical interconnections for parallel computing"; *Proc. IEEE*, Vol 88, S. 829-837, 2000
- [54] Ludwig, D.; Carson, J.; Lome, L.: "Optoelectronic interconnects for 3D wafer stacks"; *Optoelectronic Interconnects and Packaging, SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology, CR62*, S. 366-389, 1996
- [55] Esener, S.; Marchand, P.: "3D Optoelectronic stacked processors: Design and analysis"; *Optics in Computing, OC '98, Proc. SPIE 3490*, S. 541-545, 1998

- [56] Thienpont, H.; Debaes, C.; Baukens, V.; Ottevaere, H.; Vynck, P.; Tuteleers, P.; Verschaffelt, G.; Volckaerts, B.; Hermans, A.; Hanney, M.: "Plastic microoptical interconnection modules for parallel free-space inter- and intra-MCM data communication"; *Proc. IEEE*, Vol 88, S. 769-779
- [57] Cryan, C.V.: "Two-dimensional multimode fibre array for optical interconnects"; *Electronics Letters*, Vol 34, S. 586-587, 1998
- [58] Chiarulli, D.M.; Levitan, S.P.; Derr, P.; Hofmann, R.; Greiner, B.; Robinson, M.: "Demonstration of a multichannel optical interconnection by use of imaging fiber bundles butt coupled to optoelectronic circuits"; *Applied Optics*, Vol 39, S. 698-703, 2000
- [59] Li Y.; Wang, T.; Kosaka, H.; Kawai, S.; Kasahara, K.: "Fiber-image-guide-based bit-parallel optical interconnects"; *Applied Optics*, Vol 35, S. 6920-6933, 1996
- [60] Kosaka, H.; Kajita, M.; Li, Y.; Sugimoto, Y.: "A two dimensional optical parallel transmission using a vertical-cavity surface-emitting laser array module and an image fiber"; *IEEE Photon. Technol. Letters*, Vol 9, Nr 2, S. 253-255, 1997
- [61] Maj, T.; Kirk, A.G.; Plant, D.V.; Ahadian, J.F.; Fonstad, C.G.; Lear, K.L.; Tattah, K.; Robinson, M.S.; Trezza, J.A.: "Interconnection of a two dimensional array of vertical-cavity surface-emitting lasers to a receiver by means of a fiber image guide"; *Applied Optics*, Vol 39, S. 683-689, 2000
- [62] Heremans, P.; Kuijk, M.; Peeters, S.; Windisch, R.; Filkins, D.; Borghs, S.: "Thin-film 850 nm light emitters on fiber optic face plate"; *Proc. 25th Europ. Conf. on Opt. Commun., ECOC*, Vol 2, S. 304-305, Nizza, 1999
- [63] Li, Y.J.; Popelek, J.: "Board-level 2D data-capable optical interconnection circuits using polymer fiber-image guides"; *Proc. IEEE*, Vol 88, S. 794-805, 2000
- [64] Kurokawa, T. et al.: "Fiber optic sheet formation by selective photopolymerisation"; *Applied Optics*, 17. Jahrgang, Nr. 4, S. 646-650, 1978
- [65] Roscher, C. et al.: "New inorganic-organic hybrid polymers for integrated optics"; *Organic/Inorganic Hybrid Materials Symposium*, S. 239-244, April 1998
- [66] Ota, T. et al.: "Eight-port multimode interconnectable star coupler adopting intersected optical waveguide circuits"; *Electronics Letters*, 32. Jahrgang, Nr. 4, S. 320-321, 1996

- [67] Booth, B. L. et al.: „Polyguide(tm) polymeric technology for optical interconnect circuits and components“; *World Wide Web*, <http://www.polymerphotonics.com/paper.htm>
- [68] Schonfeld, D. et al.: „Enhanced performance of polymer waveguides by replication and uv-patterning in ormocer“; *Proc. SPIE*, No 3135, S. 53-61, 1997
- [69] Dabek, A. et al.: „Evaluation of ormocers for microelectronic applications“; *Proceedings of the 11th European Microelectronics Conference*, S. 125-132, May 1997
- [70] Hornack, L. A. et al.: „Polyalkylsilyne photodefined thin-film optical waveguides“; *Journal of Applied Physics*, 67. Jahrgang, Nr. 5, S. 2235- 2239, 1990
- [71] Kagami, M. et al.: „Fabrication of large-core, high-delta optical waveguides in polymers“; *Applied Optics*, 34. Jahrgang, Nr. 6, S. 1041-1046, Feb. 1995
- [72] Yoshimura, R. et al.: „Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylat“; *Journal of Lightwave Technology*, 16. Jahrgang, Nr. 6, S. 1030-1037, Jun. 1998
- [73] Hikita, M. et al.: „Polymeric optical waveguides for optical interconnections“; *Thin Solid Films*, Vol 331, Nr. 1-2, S. 303-308, Oct. 1998
- [74] Ulrich, R. et al.: „Embossed optical waveguides“; *Applied Physics Letters*, 20. Jahrgang, S. 213-215, 1972
- [75] Aumiller, G. D. et al.: „Submicrometer resolution replication of relief patterns for integrated optics“; *Journal of Applied Physics*, 45. Jahrgang, Nr. 10, S. 4557-4562, 1974
- [76] Baraldi, L. et al.: „Fabrication of single-mode ridge waveguide structures by embossing in polycarbonate on glass“; *Proceedings of ECOC*, S. 561-564, 1992
- [77] Gale, M. T. et al.: „Replicated microstructures for integrated optics“; *Proc. SPIE: Int. Symp. on Integrated Optics, Nanofabrication Technologies and Device Integration*, Vol 2213, S. 2-10, April 1994
- [78] Knoche, T. et al.: „Low loss polymer waveguides at 1300 and 1550nm using halogenated acrylates“; *Electronics Letters*, 32. Jahrgang, Nr 14, S. 1284-1285, 1996
- [79] Neyer, A.; Knoche, T.; Müller, L.; Klein, R.; Fischer, D.; Yunkin, V.A.: „Low Cost Fabrication Technology for Low Loss Passive Polymer Waveguides at 1300 nm and

- 1550 nm“; *19th European Conference on Optical Communication, ECOC'93*, Conf. Proceedings, Montreux, S. 337-340, 1993
- [80] Neyer, A.: “Low-cost passive polymer devices“; *IPR'94*, Conf. Proceedings, San Francisco, S. 268-270, 1994
- [81] Kalveram, S.; Groß, M.; Neyer, A.: “Injection moulded 2x8 couplers for optical communications“; *European Conference on Integrated Optics, ECIO '95*, Delft, S. 77-80, 1995
- [82] Wiesmann, R.; Kalveram, S.; Neyer, A.: “Monomode polymer waveguides with integrated mirrors“; *European Conference on Optical Communication, ECOC '96*, Conf. Proceedings, Vol. 2, Oslo, S. 265-269, 1996
- [83] Kalveram, S.; Neyer, A.: “Precision moulding techniques for optical waveguide devices“; *Proceedings of SPIE, „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“*, Vol 3135, San Diego, S. 2-11, 1997
- [84] Lehmacher, S.; Pompe, G.; Rudolph, S.; Kalveram, S.; Jöhnck, M.; Neyer, A.: “Plastic single mode waveguides with passive fibre alignment“; *Plastic Optical Fibres, POF 98*, Conf. Proceedings, Berlin, Paper P 59, 1998
- [85] Knoche, T.: “Integriert optische Komponenten in Polymeren“; *VDI Fortschrittsberichte*; Nr 474, ISBN 3-18-347410-7
- [86] Paatzsch, T. et al.: “Wellenleiterkomponenten aus Kunststoff für die optische Daten- und Telekommunikation von morgen“; *Laser und Optoelektronik*, 30. Jahrgang, Nr. 5, S. 58-64, 1998
- [87] Wu, L. et al.: “Compression-molded three-dimensional tapered polymeric waveguides for low-loss optoelectronic packaging“; *IEEE Photonics Technology Letters*, 9. Jahrgang, Nr. 10, S. 1601-1603, 1997
- [88] Lee, B.-T. et al.: “Fabrication of polymeric large-core waveguides for optical interconnects using a rubber molding process“; *IEEE Photonics Technology Letters*, 12. Jahrgang, Nr. 1, S. 62-64, 2000
- [89] Zhu, S. X. et al.: “Breaking the data bottleneck with speedy optical interconnects“; *Photonics Spectra*; July 1996
- [90] Yatagai, T. et al.: “Optical Computing and Interconnects“; *Proceedings of the IEEE*, Vol. 84, Nr 6, 1996

- [91] Hahn, K. et al.: "Gigabyte/s data communication with the POLO parallel optical link"; *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 1996
- [92] World Wide Web:
http://www.usc.edu/dept/engineering/eleceng/Adv_Network_Tech/Html/polo2.html
- [93] Madhavan, B. et al.: "A 55.0 Gb/s/cm data bandwidth density interface in 0.5 um CMOS for advanced parallel optical interconnects"; *Electronics Letters*; Vol 34, S. 1846-1847, 1998
- [94] World Wide Web:
http://www.usc.edu/dept/engineering/eleceng/Adv_Network_Tech/Html/poni.html
- [95] Apone, S. et al.: „Plastic optical fibres: properties and aging behaviour “; *Proc. Plastics in Telecommunications VIII*, London 1998, S. 65-74
- [96] Koike, Y. et al.: „Light Scattering and Heterogeneities in Low-Loss Poly(methylmethacrylate) Glasses “; *Macromolecules*; Jahrgang 22; S. 1367-1373; 1989
- [97] Pedrotti, F. et al.: „Optik für Ingenieure: Grundlagen“; *Springer*; ISBN 3-540-67379; 2. Auflage; S. 503-525, 1996
- [98] Kaino et al.: „Low loss poly(methylmethacrylate-d8) core optical fibres“; *Applied Physics Letters*; Vol. 42; Nr. 7; 1. April 1983; S. 567-568
- [99] Kaiser et al.: „Chances and Limits of High Speed Transmission on Plastic Optical Fibres“; *EFOC 1990*, München; S. 261-265
- [100] Groh, W.: „Overtone absorption in macromolecules for polymer optical fibers“; *Die Makromolekulare Chemie*, Vol 189, S. 2861-2874, 1988
- [101] Minami, S.: "The Exploitation and Application of Plastics optical fiber"; S. 443-453, 1994 [zitiert aus: Ziemann, O.: "Der Fernmeldeingenieur"; Vol. 50, Nr 11/12, S. 13, 1996]
- [102] Asahi Chemical Industry Co., Ltd.: "Plastic Optical Fiber for High Speed Transmission (Luminous)". Katalog über Nichimen; [zitiert aus: Ziemann, O.: "Der Fernmeldeingenieur"; Vol. 50, Nr 11/12, S. 13, 1996]
- [103] Toray Polymer Optical Fiber Cord, PF, PG, PHK Fibers. Technical Bulletin, Toray Industries, Inc.; [zitiert aus: Ziemann, O.: "Der Fernmeldeingenieur"; Vol. 50, Nr 11/12, S. 13, 1996]

- [104] Loke, M.-Y.: "Simulation and Measurement of Radiation Loss at Multimode Fiber Macrobends"; *Journal of Lightwave Technology*, Vol 8, Nr 8, S. 1250-1256, 1990
- [105] Badar, A.H.: "Transition and pure bending losses in multimode and single-mode bent optical fibers"; *IEEE Proceedings-Journal*, Vol 138, Nr 4, S. 261-268, 1991
- [106] Coosemans, T. et al.: "Parallel optical data communication using 125 μm POF: End facet termination and coupling alignment using MTTM ferrules"; *Proceedings of POF 98*, S. 143-146, Berlin, 1998
- [107] Koike, Y. et al.: "Progress of Plastic Optical Fibre technology"; *Proc. of ECOC 96*, S. 1.41-1.48, 1996
- [108] Hornak: "Polymers for lightwave and integrated optics"; *Verlag Marcel Dekker Inc.*; New York; 1992
- [109] Klein, R.: "Integrierte Optik in Glas für biologisch-chemische Sensoren"; *Fortschrittberichte VDI*, Reihe 8, Nr. 230, VDI Verlag, 1990
- [110] Jestel, D.: "Integrierte Optik in Glas für interferometrische Sensoren"; *Fortschrittberichte VDI*, Reihe 8, Nr. 337, VDI Verlag, 1993
- [111] Grau, G. K.: "Optische Nachrichtentechnik", *Springer Verlag*, 1981
- [112] Weinert, A.: "Kunststofflichtwellenleiter", *Publicis MCD Verlag*, Erlangen, 1998
- [113] Etten, W. van: "Loss in multimode fibre connections with a gap"; *Applied Optics*, 24. Jahrgang, Nr. 7, S. 970-976, 1985
- [114] Opielka, D.: "Transmission loss caused by an angular misalignment between two multimode fibers with arbitrary profile exponents"; *Applied Optics*, 22. Jahrgang, Nr. 7, S. 991-994, 1983
- [115] Koike, Y.: "High bandwidth graded-index polymer optical fiber"; *J. Lightwave Technol.*, 13. Jahrgang, S. 1475 - 1489, 1995
- [116] Baukens, V. et al.: "Performance simulations of optical multi-chip-module interconnects: Comparing guided-wave and free-space pathways"; *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 1. Jahrgang, S. 255-261, 1999
- [117] Popp, M.: "Passive integriert-optische Koppler in Polymeren: Design, Herstellung und Charakterisierung"; *Fortschritt-Berichte VDI*; Reihe 9, Nr. 331, VDI Verlag, 2001

- [118] Menz, W., Mohr, J.: "Mikrosystemtechnik für Ingenieure"; *VCH Verlagsgesellschaft mbH*, 1997.
- [119] Rabe, E.: "Herstellung und Charakterisierung von vielwelligen Lichtwellenleiterkomponenten aus Polymerwerkstoffen"; *Diplomarbeit des Arbeitsgebietes Mikrostrukturtechnik*, Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik, 2001
- [120] Kaiser, O.: "Polymeroptische Koppelmodule für den Einsatz in bidirektionalen Transceivern"; *Diplomarbeit an der Universität Dortmund*, Fakultät für Elektrotechnik, AG Mikrostrukturtechnik, 2000
- [121] Kopecz, S.: "Herstellung Dämpfungsarmer Polymer-Lichtwellenleiter"; *Hauptpraktikumsbericht*, Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik, Fakultät für Elektrotechnik, Universität Dortmund, 2000
- [122] Yeh, T.-F.; Shih, H.-Y.; Reiser, A.: "A percolation view of novolack dissolution and dissolution inhibition"; *Macromolecules*, Vol 25, No 20, S. 5345-5352, 1992
- [123] Yeh, T.-F.; Shih, H.-Y.; Reiser, A.: "Quantitative description of dissolution and dissolution inhibition in Novolack and other phenolic resins"; *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol 10, No 2, S. 715-722, 1992
- [124] Shih, H.-Y.; Yeh, T.-F.; Reiser, A.; Dammel, R.D.; Merrem, H.J.; Pawlowski, G.: "A percolation view of novolack dissolution. 3. dissolution inhibition"; *Macromolecules*, Vol 27, No 12, S. 3330-3336, 1994
- [125] Schulz, J.; Mono, T.; Chung, S.J.; Mohr, J.: "The effect of residual solvent on the profiles of thick positive dno-photoresist for microsystem technologies"; *Microsystem Technologies*, Vol 2, No 2, S. 50-55, 1996
- [126] Shaw, J.M.; Gelorme, J.D.; LaBianca, N.C.; Conley, W.E.; Holmes, S.J.: " "; *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 41, No 1/2, S. 81-94, 1997
- [127] Lehmacher, S.; Neyer, A.: "Integration of polymer optical waveguides into printed circuit boards."; *Electronics Letters*, Vol 36, S. 1052-1053, 2000
- [128] Neyer, A.: "Low-cost passive polymer devices"; *IPR '94*, Conf. Proceedings, San Francisco, S. 268-270, 1994
- [129] Hilleringmann, U.: "Silizium-Halbleitertechnik"; *Teubner Verlag*, Stuttgart 1996

- [130] Gorzinski, D:“Optimierung von planaren Mehrmodensternkopplern durch Ray-Trace-Simulation“; *Universität Dortmund*, 1994