



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5786

**Aufbau hybrider mikro-
optischer Funktionsmodule für
die optische Nachrichtentechnik
mit dem LIGA-Verfahren**

A. Müller, J. Göttert, J. Mohr
Institut für Mikrostrukturtechnik

Mai 1996

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5786

**Aufbau hybrider mikrooptischer
Funktionsmodule für die optische
Nachrichtentechnik mit dem LIGA-Verfahren**

A. Müller*), J. Göttert, J. Mohr

Institut für Mikrostrukturtechnik

*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe
genehmigte Dissertation

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1996**

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Inhaltsangabe

Die Verwendung von Licht als Informationsträger der Nachrichtentechnik hat in den letzten Jahren zu einem steigendem Bedarf an photonischen Funktionsmodulen geführt. Da sich jedoch im Gegensatz zur Elektronik kein einheitliches Materialsystem für photonische Komponenten durchgesetzt hat, kommen modularen Aufbaukonzepten eine große Bedeutung zu.

Durch die mikrotechnische Fertigung einer präzisen optischen Bank, bei der Fassungen für die hybriden Komponenten mikrometergenau an der für den Strahlengang erforderlichen Position strukturiert sind, wird eine kostengünstige passive Aufbau- und Verbindungstechnik ermöglicht. Da die hybriden optischen Komponenten i.a. uneinheitliche Maße besitzen, muß die mikrooptische Bank zur Anordnung der Komponenten auf der optischen Achse voll dreidimensional strukturiert sein.

Das LIGA-Verfahren eignet sich besonders zur Herstellung dieser mikrooptischen Bank, da die Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung extreme Genauigkeitsanforderungen an die mikrooptischen Aufbauten auch bei Strukturhöhen von typisch mehreren Hundert Mikrometern erfüllen kann und die laterale Geometrie der Haltestrukturen keinen Einschränkungen unterworfen ist. Durch einen mehrstufigen Prozeß bzw. die Kombination mit anderen Mikrostrukturierungstechniken können ferner präzise gestufte mikrooptische Bänke strukturiert werden.

Um in den zwei lateralen Dimensionen die Vorteile einer monolithischen Strukturierung zu erhalten (lateraler Positionierungsfehler max. $1 \mu\text{m}$ pro Mikrobank), werden alle Strukturen zur lateralen Fixierung der Komponenten parallel röntgenlithographisch hergestellt. Die optische Funktion des dabei verwendeten vorstrukturierten Substrats beschränkt sich auf die vertikale Positionierung der Komponenten. Bei den für die Vorstrukturierung untersuchten Verfahren, dem anisotropen, naßchemischen Si-Ätzen und dem LIGA-Prozeß, haben sich vergleichbare Toleranzen bei der Höhenniveaueinstellung ($387,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$) ergeben, die den Präzisionsanforderungen für die Verwendung mit Einmodenfasern genügen.

Zur praktischen Umsetzung der prozeßtechnischen Grundlagen wurden zwei Demonstratoren, ein Bidirektionales Sende-/Empfangsmodul und eine Optomechanische Bypass-Schaltung, nach dem modularen Aufbaukonzept realisiert.

Das Sende-/Empfangsmodul beruht auf einer mikrooptischen Bank, die durch Spritzguß von Polycarbonat hergestellt wird. Diese wird in ein Gehäuse geklebt, an dessen Außenwand die TO-gehäuseten, optoelektronischen Komponenten, Laserdiode und Photodiode, nach aktiver Justage durch Laserschweißen fixiert werden. Für die mikrooptische Bank werden bei einer Wellenlänge von 1300 nm Verluste von $5,3 \text{ dB}$ für die Kopplung zwischen Laserdiode und Einmodenfaser gemessen, die durch eine besser angepaßte Feldverteilung der Laserdioden auf optimal 2 dB vermindert werden können. Unter Verwendung der mikrooptischen Bank wurde ein marktreifer Prototyp des Sende-/Empfangsmoduls aufgebaut, dessen Leistungsdaten marktüblichen Anforderungen genügen.

Die Optomechanische Bypass-Schaltung wird durch lithographische Strukturierung der mikrooptischen Bank mit integriertem elektrostatischem Aktor als Schalter auf vorstrukturierten Silizium-Wafern hergestellt und kann über vier Faserpigtails in ein faseroptisches Netzwerk integriert werden. Die Schaltzeit liegt bei den realisierten Prototypen bei 10 ms , die Einfügedämpfung beträgt $5,3 \text{ dB}$ und kann durch Optimierung der optischen Elemente bis auf $2,5 \text{ dB}$ reduziert werden.

Die Leistungsdaten beider Demonstratoren unterstreichen die Möglichkeit des modularen Aufbaukonzepts. Zusammen mit den gewonnenen Prozeßerkenntnissen sind somit die Voraussetzungen zur Herstellung vielfältiger mikrooptischer und faseroptischer Funktionsmodule unter Verwendung des LIGA-Verfahrens gegeben.

Manufacturing of Hybrid Microoptical Devices for Optical Communication by the LIGA Process

In recent years the use of light as a data carrier in telecommunications has led to an increasing demand for photonic devices. However, as other than in electronics a uniform system of materials has not become generally accepted for photonic components, modular design concepts adopt considerable importance.

Passive packaging and connection at reasonable costs is feasible by manufacture in microengineering of a precise optical bench, with the mounts for the hybrid components structured to micrometer accuracy at the position needed for the beam path. As the hybrid optical components usually differ in size, the microoptical bench has to be given a three-dimensional structure to allow the components to be arranged on the optical axis.

The LIGA technique is particularly suited for manufacture of this microoptical bench because X-ray lithography with synchrotron radiation is capable of satisfying extreme requirements for accuracy made on the microoptical assemblies, even for structural heights of typically several hundreds of micrometers and with the lateral geometry of the holding structures not subjected to any restrictions. In a process comprising several stages and by combination, respectively, with other microstructuring techniques precisely stepped microoptical benches may be structured in addition.

To make use of the advantages of monolithic structuring in the two lateral dimensions (maximum error of lateral positioning $1 \mu\text{m}$ per microbench), all structures for lateral component fixing are made in parallel by X-ray lithography. The optical function of the prestructured substrate used is restricted to vertical positioning of the components. Under the techniques examined for prestructuring - anisotropic wet-chemical Si-etching and the LIGA process - comparable tolerances have been obtained in level setting ($387.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$) which satisfy the requirements for precision in applications with single-mode fibers.

With a view to practical implementation of the process engineering fundamentals two systems were built under the modular design concept for the purpose of demonstration, a bidirectional transceiver module and an optomechanical bypass switch.

The transceiver module consists of a microoptical bench made by injection molding of polycarbonate. The bench is bonded into a housing at the outer wall of which the TO packaged optoelectronic components - the laser diode and the photo diode - are fixed through laser welding after active alignment. The insertion loss measured for the microoptical bench are 5.3 dB in case of coupling of the laser diode with the single mode fiber at 1300 nm wavelength; it can be reduced to 2 dB under optimum conditions by better adaptation of the field distribution of the laser diodes. Using the microoptical bench, a prototype of the transceiver module was assembled whose performance satisfies the requirements of the market.

The optomechanical bypass switch is made by lithographic structuring of the microoptical bench on prestructured silicon wafers, with an integrated electrostatic actuator as switch; it can be integrated into a fiber-optical network via four fiber pigtails. The switching time of the prototypes built is 10 ms. The insertion loss is 5.3 dB and can be further reduced to 2.5 dB by optimization of the optical elements.

The performance data of the two demonstration systems support the concept of modular design. Together with knowledge gathered in the process they provide the prerequisite of manufacturing diverse microoptical and fiber-optical functional modules using the LIGA technique.

1 EINLEITUNG	9
<hr/>	
2 OPTISCH-PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN NACHRICHTENTECHNISCHER FUNKTIONSMODULE	15
<hr/>	
2.1 FUNKTIONSWEISE PHOTONISCHER BASISKOMPONENTEN	15
2.1.1 EINMODENFASERN	15
2.1.2 LASERDIODEN	19
2.1.3 DETEKTOREN	22
2.2 GRUNDLAGEN FÜR DAS DESIGN MIKROOPTISCHER FUNKTIONSMODULE	23
2.2.1 ABSTRAHLVERHALTEN FASEROPTISCHER KOMPONENTEN	23
2.2.2 OPTISCHES DESIGNKONZEPT	25
2.2.3 ABBILDUNGSTHEORIE FÜR GAUßSTRAHLEN	25
2.2.4 TOLERANZEN FÜR EINE LICHTRÖHRE	28
2.3 OPTISCHE MESSTECHNIK	30
3 DIE HERSTELLUNG EINER MIKROOPTISCHEN BANK MIT DEM LIGA-VERFAHREN	35
<hr/>	
3.1 DAS MODIFIZIERTE LIGA-VERFAHREN	35
3.2 GESTUFTE SUBSTRATE FÜR DIE RÖNTGENTIEFENLITHOGRAPHIE	36
3.2.1 SILIZIUM-MIKROMECHANIK	36
3.2.2 RÖNTGENTIEFENLITHOGRAPHIE UND GALVANIK	39
3.3 PROZEBGENAUIGKEIT BEI DER WEITEREN STRUKTURIERUNG	40
3.3.1 VERTIKALE PRÄZISION	40
3.3.2 LATERALE PRÄZISION	43
4 BIDIREKTIONALES SENDE-/EMPFANGSMODUL	51
<hr/>	
4.1 KONZEPTION DES MODULS	51
4.1.1 BESCHREIBUNG DES MODULS	51
4.1.2 SPEZIFIKATIONEN UND KOMPONENTEN	52
4.1.3 DESIGN UND PROZESSIERUNG	54
4.2 QUALIFIZIERUNG DER MIKROOPTISCHEN BANK	56
4.3 DIE AUFBAU- UND VERBINDUNGSTECHNIK DES MODULS	59
4.3.1 TOLERANZUNTERSUCHUNGEN	60
4.3.2 TECHNIKEN ZUR AVT DES MODULS	62
4.4 QUALIFIZIERUNG DES MODULS	64
4.4.1 TECHNISCH-OPTISCHE LEISTUNGSDATEN	64
4.4.2 UMWELTVERTRÄGLICHKEIT	65
5 OPTOMECHANISCHE BYPASS-SCHALTUNG FÜR EINMODENFASERN	67
<hr/>	
5.1 AUFBAUKONZEPT	68
5.2 ELEKTROSTATISCHER LINEARANTRIEB	68
5.2.1 FUNKTIONSPRINZIP	68
5.2.2 DESIGN DER BYPASS-SCHALTUNG	71
5.2.3 PROZESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN	73
5.3 DIE MIKROOPTISCHE BANK DER BYPASS-SCHALTUNG	74

5.4 PROZESSIERUNG	83
5.5 LEISTUNGSDATEN	83
5.5.1 ELEKTROMECHANISCHE CHARAKTERISIERUNG DES AKTORS	84
5.5.2 OPTISCHE CHARAKTERISIERUNG	85
5.6 AUFBAU- UND VERBINDUNGSTECHNIK FÜR DIE BYPASS-SCHALTUNG	86
<hr/> 6 DISKUSSION UND AUSBLICK	<hr/> 88
 7 ANHANG: BEUGUNG IN STRAHLDIAGNOSESYSTEMEN	 93
 8 FORMELZEICHEN	 97
 9 ANMERKUNGEN	 91

1 Einleitung

Licht als Informationsträger hat in den letzten Jahrzehnten die Nachrichtentechnik in deren beiden Teilbereichen, der Informationsübertragung und der Informationsverarbeitung, grundlegend verändert. Wesentlicher Grund für diese Entwicklung ist das steigende Informationsbedürfnis moderner Industriegesellschaften („Informationsgesellschaft“), welches nur durch erheblich größere, ausschließlich optisch realisierbare Bandbreiten bei Übertragungs- und Verarbeitungssystemen befriedigt werden kann. Historisch gesehen fällt der optischen Übertragungstechnik, seit in den sechziger Jahren der Laser entdeckt wurde /1/, die Rolle des Wegbereiters dieser Technologien zu, während die optische Informationsverarbeitung, die sog. Photonik /2/, erst seit den siebziger Jahren erforscht wird.

Unter optischer Übertragungstechnik wird die Übertragung von Informationen aller Art durch Licht verstanden. Von einigen exotischen Ausnahmen, wie der extraterrestrischen Satellitenkommunikation oder speziellen lokalen LAN-Verbindungen /3/ abgesehen, beruhen sämtliche moderne optische Übertragungssysteme auf dem Prinzip der Lichtführung. Glasfasern werden sowohl zur Übertragung von Daten in technischen Kommunikationsnetzen (z.B. Fiber Distributed Data Interface-Protokoll für LANs, FDDI, /4/) als auch in Breitband-Telekommunikationsnetzen (ISDN) eingesetzt. Im Vergleich zum klassischen Telefonnetz auf der Basis von Kupferkabeln, bei dem das Produkt aus Bandbreite und dem Abstand der Verstärkereinheiten (BL-Produkt) typisch 10 Mbit·km/s beträgt, werden mittlerweile mit Glasfasern unter der Verwendung von Faserverstärkern (EDFAs) und Wellenlängenmultiplextechniken (WDM) BL-Produkte von 630 Tbit·km/s erreicht /5/.

Die optische Übertragung von Informationen ist aber nicht nur aufgrund der großen Bandbreite und der geringen Dämpfung von Interesse. Insbesondere auch der geringe Materialaufwand bzw. das geringe Gewicht und das Fehlen der mit der elektrischen Übertragung verbundenen Probleme (Signalstörungen durch elektromagnetische Wellen, sicherheitstechnische Aspekte) sorgen für weitere Einsatzfelder in der Medizintechnik, Robotik und Maschinenführung sowie der Automobil- und Flugzeugindustrie.

Durch Glasfasern werden die Informationen zwischen den verschiedenen Teilnehmern eines Kommunikationsnetzes lediglich ausgetauscht. Die eigentliche Signalerzeugung und -verarbeitung erfolgen - vom Einsatz von Faserverstärkern einmal abgesehen - beim Teilnehmer. Für die Entwicklung von Systemen und Komponenten, die eine direkte

Erfassung, Erzeugung und Verarbeitung optischer Signale ermöglichen, steht der Begriff „Photonik“.

Anwendungsgebiete photonischer Systeme in der Informationsverarbeitung sind die eigentliche Datenverarbeitung (vor allem Bildverarbeitung und Mustererkennung /6/), die Datenspeicherung (CD-ROM und magnetooptische Laufwerke /7/), massiv parallele optische Verbindungen (vor allem in Computern auf Board-to-Board oder Chip-to-Chip-Niveau /8/, „Busplatinen“) und schließlich die faseroptische Sensorik (z.B. für die Umweltanalytik /9/). Multiplexer, Schalter und Koppler werden in der Übertragungstechnik eingesetzt /10/.

In all diesen Bereichen ist in der Zukunft mit einer weiteren rasanten Entwicklung zu rechnen: Faseroptische Sensoren finden wegen ihrer Robustheit zunehmend Anwendung bei der Steuerung, Kontrolle und Automatisierung industrieller Produktionsprozesse, in der Medizintechnik und der Umwelttechnik. Mit der fortschreitenden Miniaturisierung der Schaltkreise tritt in der elektronischen Datenverarbeitung ein Konnektivitätsproblem auf /11/, welches nur durch die Verwendung eines optischen Datenaustauschs auf Chip-Chip-Niveau gelöst werden kann. Auch zur Datenspeicherung werden aufgrund der wachsenden Datenmengen in steigendem Maße optische statt magnetischer Techniken eingesetzt. Schließlich steigt die Zahl von Multimedia-Anwendern im Privatbereich durch die private Nutzung von Computer-Kommunikationsnetzen wie Internet oder Angebote wie interaktives Fernsehen und video-on-demand kontinuierlich an. Die synchrone, digitale Hierarchie (SDH) als neue Multiplextechnik und der asynchrone Übertragungsmodus (ATM) als neue Betriebsform für ISDN werden die Übertragung vieler Kanäle unterschiedlicher Bandbreite ermöglichen. Die Anzahl der Endnutzer mit direkter „fiber to the home“ (FTTH) wird sich deshalb vergrößern.

Die Photonik ist konzeptionell eng an die Elektronik angelehnt: So wie die Mikroelektronik die Verarbeitung von elektrischen Signalen ermöglicht, hat die Photonik die Verarbeitung von Lichtsignalen zum Ziel. Sie bedient sich dazu ähnlicher lithographischer Strukturierungsmethoden wie die Elektronik und die später entwickelte Mikromechanik. Die aus der Mikroelektronik bekannten wesentlichen Vorteile mikrotechnischer Komponenten sind der geringere Platzbedarf, die kleineren Herstellungskosten aufgrund billiger, paralleler Herstellungsverfahren und die höheren Rechenleistungen, die sich aus der kürzeren Laufzeit der elektrischen Signale und der immer kleiner werdenden Anzahl der Ladungsträger ergeben, die pro Bit bewegt werden müssen. Ähnliche Argumente lassen sich auch auf mikrooptische und mikromechanische Komponenten übertragen. Aufgrund dieser Parallelen wird seit Mitte der achtziger Jahre die Mikrosystemtechnik entwickelt. In Mikrosystemen werden die

mechanischen, optischen und elektronischen Funktionen eines Systems weitgehend integriert gefertigt und dadurch die Aufbau- und Verbindungstechnik sowie die Kommunikation innerhalb des Systems und mit der Außenwelt erheblich vereinfacht.

Die in der Mikrosystemtechnik erarbeiteten Methoden der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der mikromechanischen Strukturierung finden breite Verwendung in der Photonik, da modulare Konzepte dort eine erheblich größere Bedeutung haben als in der Elektronik.

Für photonische Komponenten hat sich nämlich im Gegensatz zur Elektronik kein einheitliches Materialsystem durchgesetzt. Die am häufigsten verwendeten Materialien sind Glas für Fasern, Kugellinsen, Filter, Integriert Optische Chips (IOCs, /12/), optische Verstärker (z.B. Erbiumdotierte Faserverstärker, EDFAs, /13/) und Schalter (Nonlinear Optical Loop Mirrors, NOLMs, /14/), Polymere ebenfalls für Fasern, Wellenleiter /15/, Prismen, Strahlteiler und thermooptische sowie nichtlineare Schalter /16/, Lithiumniobat für nichtlineare Schalter /17/ und nicht zuletzt Halbleiter (z.B. InGaAsP) ausschließlich zur Verwendung bei aktiven Komponenten (Leuchtdioden, Laserdioden, Photodioden, optische Halbleiterverstärker [SLAs] /18/, SEEDs /19/). Die monolithische Integration einiger optischer Funktionen in IOCs auf Glas- oder Polymerbasis ist zwar möglich, die Realisierung beliebiger Funktionen in einem Materialsystem ist jedoch aus technologischen, funktionalen und ökonomischen Gründen in naher Zukunft nicht zu erwarten.

Dreidimensionale mikrooptische Freistrahlkomponenten, z.B. für Anwendungen im Bereich der massiv parallelen optischen Verbindungen, sind schließlich aufgrund topologisch-geometrischer Probleme nicht integrierbar. Dies hängt mit dem erheblichen Verlust an spatialer Bandbreite zusammen, die sich durch die lineare oder zweidimensionale Lichtführung im Vergleich zur dreidimensionalen Freiraumausbreitung ergibt.

Eine große Bedeutung kommt deshalb modularen Verfahren zu, die eine kostengünstige passive Aufbau- und Verbindungstechnik bei der Integration von hybriden aktiven und passiven Komponenten aus verschiedenen Herstellungsprozessen ermöglichen. Hierzu eignen sich die modernen Mikrostrukturierungstechnologien, die häufig auf einer lithographischen Primärstrukturierung beruhen (z.B.: Silizium-Mikromechanik, LIGA-Verfahren). Durch die mikrotechnische Fertigung einer präzisen optischen Bank, bei der Fassungen für die hybriden Komponenten mikrometergenau an der für den Strahlengang erforderlichen Position strukturiert sind, kann der Aufwand der aktiven Justage technisch und ökonomisch reduziert werden. Durch die Kombination verschiedener Mikrostrukturierungstechniken ist die Herstellung von gestuften mikrooptischen Bänken möglich, auf denen optische Komponenten

mit unterschiedlichem Durchmesser auf einer optischen Achse angeordnet werden können. Darüber hinaus können auf einer mikrotechnisch hergestellten optischen Bank parallel zu den Halterungen mit lateral lithographischer Präzision auch direkt optische oder optomechanische Bestandteile gefertigt werden.

Das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte LIGA-Verfahren /20, 21/ eignet sich besonders gut zur Realisierung des modularen Aufbaukonzepts, da die Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung extreme Genauigkeitsanforderungen an die mikrooptischen Aufbauten erfüllen kann und die laterale Geometrie der Haltestrukturen keinen Einschränkungen unterworfen ist. Darüber hinaus besitzen LIGA-Mikrostrukturen Seitenwände, die senkrecht auf dem Substrat stehen und optische Qualität haben, so daß einfache optische Komponenten (z.B. Prismen, Zylinderlinsen) direkt im optischen Aufbau strukturiert werden können /22/.

Zudem ermöglicht das LIGA-Verfahren eine extrem kostengünstige Massenfertigung durch Spritzguß oder Heißprägen. Nach einmaliger Strukturierung eines Abformwerkzeuges kann die präzise mikrooptische Bank ohne weiteren prozeßtechnischen Aufwand mit reproduzierbar hoher Präzision kostengünstig hergestellt werden. Damit ergibt sich im Vergleich zu anderen Methoden mit individueller Strukturierung bei großen Stückzahlen, die für Telekommunikationsnetzwerke typisch sind, ein erheblicher Kostenvorteil /23/.

Die Herstellung von refraktiven /24/ und diffraktiven /25/ Komponenten mit dem LIGA-Verfahren und deren Verwendung mit Multimode-Fasern /26/ wurden erfolgreich demonstriert. Möglichkeiten für Anwendungen in der nicht-linearen Optik wurden ebenfalls aufgezeigt /27/.

Ziel dieser Arbeit war es, die Voraussetzungen zu schaffen, um mit dem LIGA-Verfahren mikrooptische Funktionsmodule für Einmodenanwendungen der optischen Nachrichtentechnik nach dem modularen Aufbaukonzept realisieren zu können. Dafür ist entscheidend, daß die mikrooptische Bank mit der für Einmodenfasern notwendigen Präzision hergestellt werden kann, da nur dann das modulare Konzept umsetzbar ist. Aus diesem Grund war eine wesentliche Aufgabe der Arbeit, Techniken zur Herstellung einer voll dreidimensionalen Bank zu erarbeiten und deren Grenzen im Hinblick auf die optischen Anforderungen zu ermitteln.

Als Demonstratoren für die erarbeiteten Techniken wurden zusammen mit Industriepartnern zwei Funktionsmodule für die optische Übertragungstechnik aufgebaut: ein Bidirektionales Sende-/Empfangsmodul und eine Optomechanische Bypass-Schaltung.

Das Bidirektionale Sende-/Empfangsmodul (kurz: Duplexer) wird im bidirektionalen Wellenlängenmultiplexbetrieb eingesetzt. Durch die Reduzierung der beiden Übertragungskanäle auf eine Faser und der damit erzielten Halbierung der Faserkoppelstellen ergeben sich wirtschaftliche, aber besonders auch technische Systemvorteile. Sende-/Empfangsmodule finden hauptsächlich in Telekommunikationsnetzen Verwendung. Das hier realisierte Modul beruht auf einer mikrooptischen Bank, die in Abformtechnik hergestellt wird und in die die passiven mikrooptischen Elemente eingefügt werden. Diese wird in ein Gehäuse montiert, an dessen Außenwand eine Laserdiode als Sender und eine Photodiode als Empfänger nach aktiver Justage fixiert werden.

Mit Hilfe der Optomechanischen Bypass-Schaltung kann ein optisches Signal, welches einen Verbraucher erreicht, optional an diesem vorbei geleitet werden. Das kann zum Beispiel notwendig werden, wenn beim Teilnehmer eine Störung aufgetreten ist oder wenn er nicht am Netzbetrieb teilnimmt. Bypass-Schaltungen werden hauptsächlich in LANs eingesetzt. Die Optomechanische Bypass-Schaltung wird durch lithographische Strukturierung der mikrooptischen Bank mit integriertem elektrostatischem Aktor als Schalter auf vorstrukturierten Silizium-Wafern hergestellt und kann über vier Faserpigtails in ein Netzwerk integriert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden also zunächst passive optischen Komponenten in der mikrooptischen Bank integriert. Damit können die wesentlichen, unterschiedlichen Fragestellungen der Aufbau- und Verbindungstechnik - Positioniergenauigkeit und Temperaturstabilität sowie Entwärmung und Kontaktierung - getrennt untersucht werden.

Beide Demonstratoren sind für Einmodenanwendungen in Teilnehmernetzen konzipiert, womit höchste Präzisionsanforderungen an die mikrooptische Bank verbunden sind. Aus diesem Einsatzfeld ergeben sich auch die weiteren wesentlichen Anforderungen für die Demonstratoren: Um den Massenmarkt der Endteilnehmer bedienen zu können, müssen die Herstellungskosten sehr niedrig gehalten werden, was durch das modulare Aufbaukonzept in Verbindung mit einer automatisierten Bestückung erreicht wird. Kommerzielle Komponenten dieser Art sind momentan aufgrund der aufwendigen konventionellen Herstellungs- und Justiermethoden noch sehr teuer /28/. Zum Zweiten müssen die Systeme niedrige Einfügedämpfungen besitzen, um die Verwendung zusätzlicher, teurer Verstärker zu vermeiden und damit den wirtschaftlichen Systemvorteil der Glasfasertechnik zu erhalten. Dazu müssen die Funktionsmodule die extremen Positioniergenauigkeiten für Einmodenfasern erfüllen ($< 1 \mu\text{m}$). Schließlich wird von den Komponenten eine hohe

Temperaturbeständigkeit gefordert, damit sie auch außerhalb von Gebäuden bei größeren Temperaturschwankungen eingesetzt werden können. Grundvoraussetzung dafür ist die Verwendung von Materialien mit hoher Temperaturstabilität.

Die vorgelegte Arbeit befaßt sich zunächst mit den optischen Grundlagen solcher Funktionsmodule und den Herstellungskonzepten zur Umsetzung der erörterten Anforderungen. Im zweiten Teil werden die prozeßtechnischen Fragen und im dritten Teil Konzeption und technische Eigenschaften sowie die Montage und Gehäusung der Demonstratoren ausführlich diskutiert.

2 Optisch-physikalische Grundlagen nachrichtentechnischer Funktionsmodule

Typische Komponenten von übertragungstechnischen Funktionsmodulen sind Einmodenfasern als passives Übertragungsmedium, Laserdioden als Lichtquellen und Photodioden als Detektoren. Da von Fasern und Dioden das Licht divergent abgestrahlt wird, müssen abbildende Elemente in die mikrooptische Bank integriert werden, um funktionsfähige Systeme aufzubauen. Um die theoretischen Grundlagen für ein angepaßtes Design der mikrooptischen Bänke zu erarbeiten, werden im Folgenden zunächst die Funktionsweise und die optischen Eigenschaften wie das Abstrahl- und Detektionsverhalten dieser Basiskomponenten diskutiert. Aus diesen Eigenschaften leiten sich die Gesetze der optischen Abbildung speziell für Fasern und Laserdioden ab. Schließlich wird aus den Koppelverlusten, die bei Positionierfehlern der optischen Komponenten entstehen, die für eine effektive optische Kopplung erforderliche Genauigkeit der mikrooptischen Bank berechnet. Diese definiert die Anforderungen an die prozeßtechnische Strukturierung.

2.1 Funktionsweise photonischer Basiskomponenten

2.1.1 Einmodenfasern

2.1.1.1 Einmodige Lichtführung

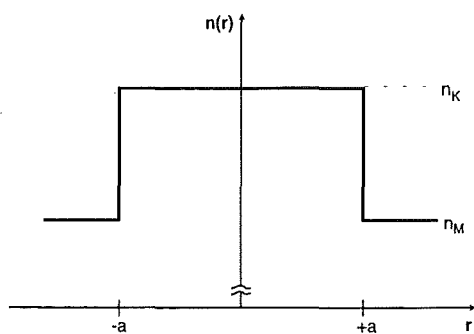


Abbildung 2.1: Brechzahlprofil einer Stufenindexfaser

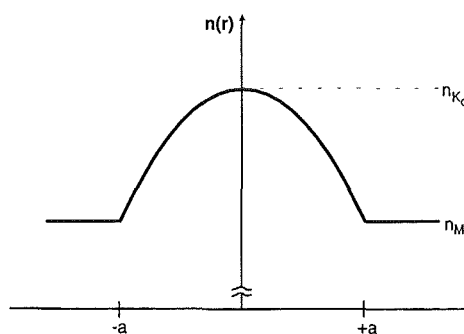


Abbildung 2.2: Brechzahlprofil einer Gradientenindexfaser

In der optischen Nachrichtentechnik werden Glasfasern als Übertragungsmedium eingesetzt. Um eine Lichtführung innerhalb der Fasern zu ermöglichen, hat der zentrale Teil der Faser, der Kern, einen höheren Brechungsindex als der äußere Teil, der Mantel (Abbildung 2.1, Abbildung 2.2). In Abhängigkeit vom Indexübergang zwischen Kern und Mantel werden zwei Fasertypen unterschieden. Bei Stufenindexfasern erfolgt der Übergang sprunghaft, so daß eine

Lichtführung durch innere Totalreflexion möglich wird. Bei Gradientenindexfasern ist dieser Übergang stetig und die Strahlführung erfolgt über kontinuierliche Lichtbrechung. Durch diese abstrahlungsfreien Lichtführungsmechanismen wird in beiden Fällen eine extrem dämpfungsarme Signalübertragung realisiert.

Eine präzise theoretische Beschreibung der Lichtausbreitung in Fasern ist mit Hilfe der geometrischen Optik nicht möglich, da zum Verständnis der niederen Moden Beugungsphänomene berücksichtigt werden müssen. Statt dessen muß aus den *Maxwell*-Gleichungen der klassischen Elektrodynamik die *Helmholtz*-Gleichung speziell für die Beschreibung von Fasern abgeleitet werden /29/ (zur Bedeutung der Formelzeichen: siehe Seite 89 f.):

$$\Delta u - n(r)^2 k^2 u = 0 \quad \text{mit } k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.1)$$

Unter der Annahme einer Ausbreitung entlang der Faserachse und unter Berücksichtigung einer Periodizität in der Winkelkoordinate lautet der allgemeine Lösungsansatz:

$$u(r, \phi, z) = u(r) e^{-i l \phi} e^{-i \beta z} \quad (2.2)$$

Daraus ergibt sich folgende Differentialgleichung für u :

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left(n(r)^2 k^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) u = 0 \quad (2.3)$$

Die Gleichung kann nur gelöst werden, wenn $u(r)$ überall, insbesondere auch an den Grenzen von Kern und Mantel stetig und zweifach differenzierbar ist. Diese Bedingung ist nur bei diskreten Eigenwerten β und l erfüllt. Die diesen Werten zugeordneten Eigenfunktionen heißen Moden, und die allgemeinen Lösungen der Gleichung sind Linearkombinationen dieser Moden /30/.

Die Ausbreitungskonstante β der einzelnen Mode wird mit steigender Quantenzahl kleiner und der Anteil der Radialausbreitung somit größer. Erreicht der Winkel zwischen optischer Achse und der Wellenfrontnormalen einen Grenzwinkel, so kann das Licht den Kern verlassen und wird von der Faser abgestrahlt. Die Anzahl der Moden ist also begrenzt: Sie läßt sich für eine potenzförmige Indexverteilung berechnen zu /31/:

$$N = \frac{\alpha}{\alpha + 2} a^2 k^2 n \frac{\Delta n}{n} \quad (2.4)$$

Wird in schwach führende Fasern ($\frac{\Delta n}{n} < 0.01$) mit einem Kerndurchmesser $2a \approx 10 \mu\text{m}$ Licht mit einer Wellenlänge im nahen Infraroten eingekoppelt, so wird nur die Grundmode geführt,

die niemals unterdrückt werden kann. Solche Fasern heißen Einmodenfasern im Gegensatz zu Mehrmodenfasern, bei denen typischerweise einige Hundert Moden geführt werden.

Da bei der Einmodenfaser nur die Grundmode angeregt werden kann, wird nicht das gesamte anregende Feld in die Faser eingekoppelt. Zur theoretischen Beschreibung der Kopplung muß das anregende Feld nach der Grundmode entwickelt werden. Um Verluste zu vermeiden, ist eine Modenfeldanpassung des anregenden Feldes unerlässlich. Dagegen wird die Modendispersion, also der Laufzeitunterschied zwischen den Moden, vermieden, da das gesamte Signal mit einer festen Ausbreitungskonstante β übertragen wird. Einmodenfasern können deshalb extrem hohe Datenraten (aktuell bis ca. 100 Gbit/s /32/) übertragen.

2.1.1.2 Gauß-Laguerresche Moden

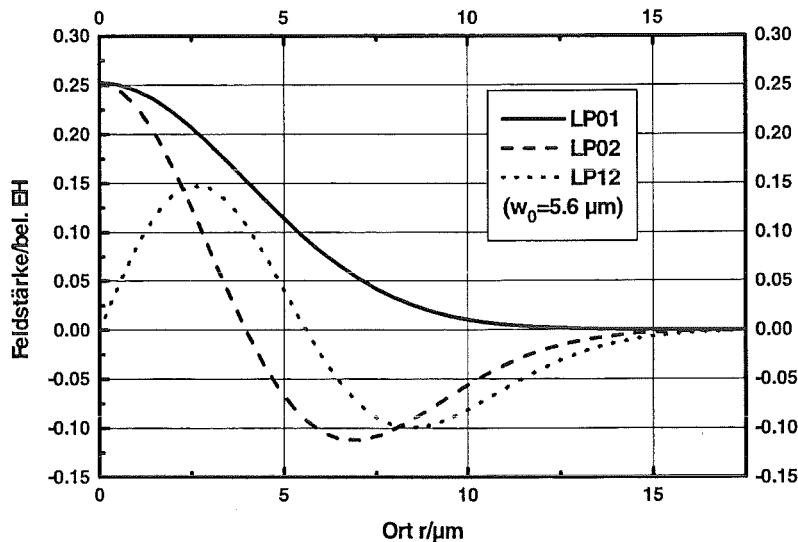


Abbildung 2.3: Radialanteile der ersten drei Gauß-Laguerre-Moden

Für die Berechnung des Strahlverlaufs in mikrooptischen Funktionsmodulen muß das Abstrahlverhalten der Einmodenfasern bekannt sein, das sich wiederum aus der Feldverteilung der Grundmode an der Faserstirnfläche ergibt. Die analytische Berechnung der Grundmode ist im allgemeinen nicht möglich, für den Sonderfall einer parabolischen Abhängigkeit des Indexquadrats vom Radius,

$$n^2 = n_0^2 \left[1 - 2 \frac{\Delta n}{n} \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

, lassen sich jedoch die Feldverteilungen der Moden berechnen. Diese speziellen Lösungen heißen *Gauß-Laguerresche* Moden und sind als Produkt einer Potenzfunktion in r , einem zugeordneten *Laguerre*-Polynom und einer *Gauß*-verteilung darzustellen /33/:

$$u_{l,m}(r, \phi) = \sqrt{\frac{(m-1)!}{(m-1+l)!}} \frac{\sqrt{2}}{w_0} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w_0}\right)^l L_{m-1}^l \left(\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \exp\left[-\frac{r^2}{w_0^2}\right] e^{\pm il\phi} \quad (2.6)$$

Die Quantenzahl l entspricht der Anzahl der polaren Knoten der Feldverteilung und die zweite Quantenzahl m der Zahl der radialen Knoten. Bei der für Einmodenfasern relevanten Grundmode LP_{01} reduziert sich das Produkt auf eine reine *Gauß*-verteilung (Abbildung 2.3).

Allgemein läßt sich zeigen, daß die Feldverteilungen auch bei abweichendem Indexprofil stets *gauß*förmig sind /34/. Die *Gauß-Laguerreschen* Moden spielen deshalb eine besonders wichtige Rolle für die theoretische Beschreibung der Lichtleitung und des Abstrahlverhaltens bei Fasern. Einen Pseudo-3D-Plot einer bei einer Einmodenfaser gemessenen Intensitätsverteilung der Grundmode zeigt Abbildung 2.4. Die Korrelationskoeffizienten mit der *gauß*schen Grundmode liegen über 99% und unterstreichen die Gültigkeit dieser Näherung.

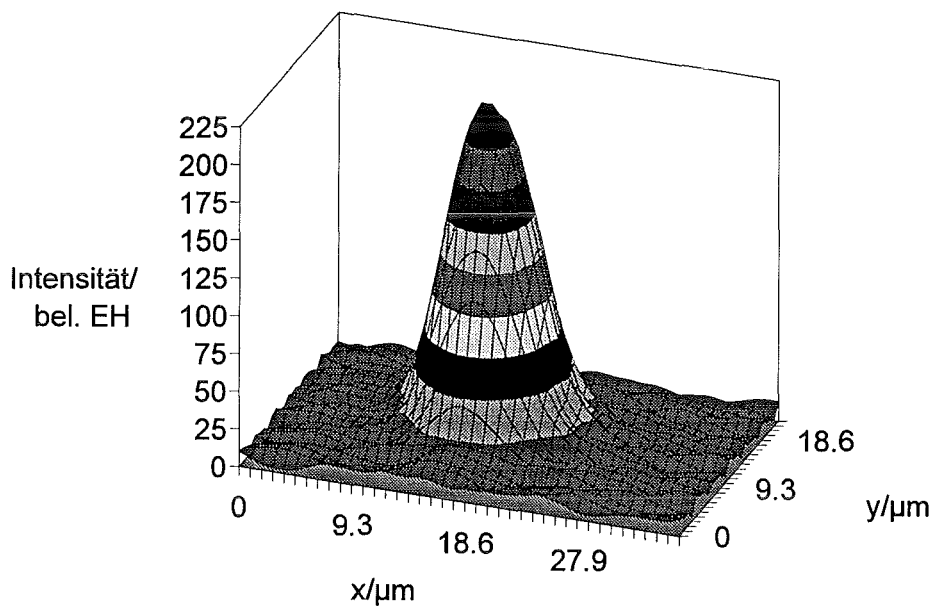


Abbildung 2.4: Pseudo-3D-Plot einer auf der Stirnfläche der Einmodenfaser gemessenen Intensitätsverteilung ($w=5,3 \mu\text{m}$, $\lambda=1,3 \mu\text{m}$)

2.1.1.3 Materialdämpfung bei Glasfasern

Neben der Bandbreite ist der Abstand zwischen den elektronischen Verstärkereinheiten und damit die Dämpfung die zweite wichtige Maßzahl für ein Übertragungssystem.

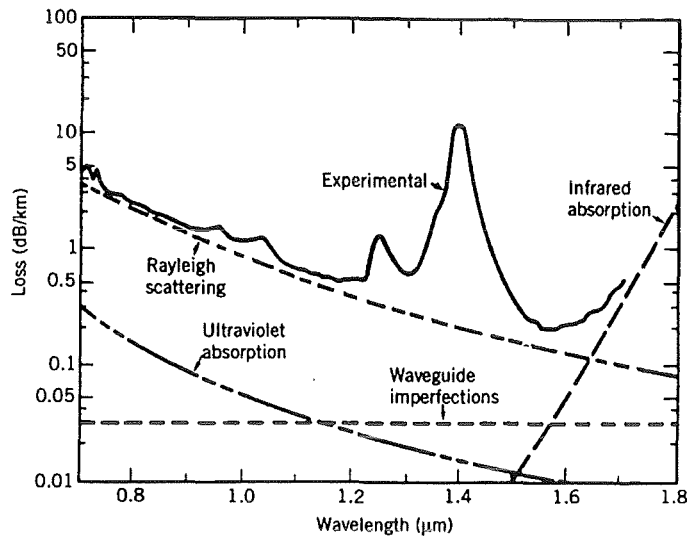


Abbildung 2.5: Absorptionsdiagramm für Silikatfasern /35/

Die wird von der Absorption im Glas bestimmt, die auf atomare Oszillatoren zurückzuführen sind. In der Nähe der Resonanzfrequenzen dieser Oszillationen absorbiert das Material optische Energie. Das Absorptionsdiagramm für Silikatfasern zeigt Abbildung 2.5 /35/. Neben den vibratorischen Resonanzen im Infraroten wird das Absorptionsverhalten von der *Rayleigh*-Streuung an Dichtefluktuationen der erstarrten Silikatschmelze im sichtbaren Bereich bestimmt. Das Dämpfungsmaximum bei 1400 nm wird durch Anregung einer OH-Vibrationsschwingung verursacht. Bei der Wellenlänge 1300 nm liegt ein lokales, bei 1500 nm das absolute Minimum der Absorption. Diese beiden Wellenlängen werden deshalb nahezu ausschließlich für die Entwicklung neuer Übertragungssysteme verwendet.

2.1.2 Laserdioden

Je kleiner die spektrale Bandbreite eines Lichtsignals ist, desto geringer ist die bei Einmodenfasern verbleibende Materialdispersion. Um bei der Signalübertragung die Vorteile der Einmodenfasern bezüglich Dispersion und Dämpfung optimal zu nutzen, benötigt man zur Signalerzeugung also miniaturisierte, wellenlängenangepaßte, kohärente Lichtquellen mit hoher Abstrahlleistung. Eine hohe Energieeinkopplung in die Faser schafft Sicherheitsreserven an den Koppelstellen und vermeidet oder vermindert den Einsatz von teuren Wiederholeinheiten mit Verstärkern in Glasfasernetzen. Aus diesen Gründen werden üblicherweise Halbleiterlaser eingesetzt.

2.1.2.1 Funktionsweise von Laserdioden

Zwei physikalische Voraussetzungen müssen zum Betrieb eines Lasers erfüllt sein: Zum einen muß ein Pumpmechanismus die der *Boltzmann*-statistik entsprechenden Besetzungswahrscheinlichkeiten zweier Energieniveaus so verändern, daß das energetisch höher gelegene Niveau stärker besetzt ist als das energetisch niedrigere Niveau („Besetzungsinversion“). Zum anderen muß ein Verstärkungsmechanismus die Anzahl der durch ein Photon stimulierten Emissionen vor Verlassen des aktiven Mediums vergrößern („Resonator“).

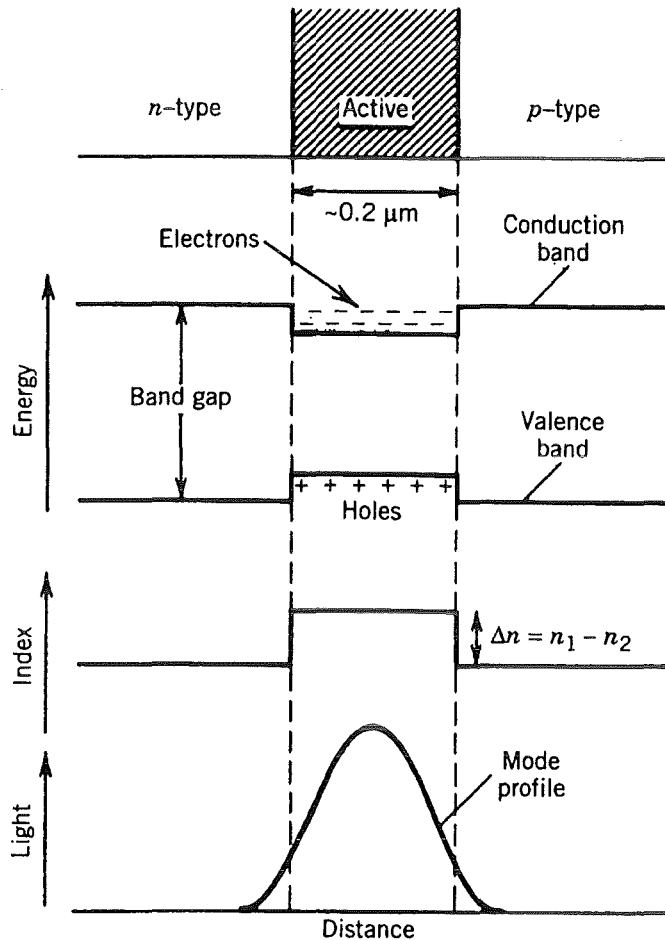


Abbildung 2.6: Elektronische und optische Eigenschaften von Doppelheterostrukturen /36/

Bei Halbleiterlasern werden das Valenz- und das Leitungsband am pn-Übergang als Energieniveaus verwendet. Zum Betrieb einfacher pn-Übergänge als Laser sind jedoch hohe Stromdichten von ca. $50 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ notwendig, die u.a. zu Problemen mit der Entwärmung führen /37/. Einen Ausweg bieten sog. Doppelheterostrukturen. Die aktive Schicht zwischen p- und n-Bereich besteht dabei aus einem Halbleitermaterial mit leicht veränderter chemischer Zusammensetzung, bei dem der Bandabstand kleiner als beim p- und n-Bereich ist. Als Materialsysteme werden vor allem GaAlAs und InGaAsP verwendet, bei denen durch die Veränderung der Al- oder In-Konzentration die Bandlücke

eingestellt werden kann. Wie in Abbildung 2.6 skizziert, sammeln sich die Ladungsträger in der aktiven Zone. Außerdem sorgt bei kantenemittierenden Laserdioden die Brechzahldifferenz für eine Lichtführung in der aktiven Zone. Da für die Verwendung mit Einmodenfasern eine rotationssymmetrische Feldverteilung gewünscht wird, wird bei Kantenemittern die aktive Zone auch in der anderen lateralen Richtung begrenzt, so daß ein Streifenwellenleiter entsteht (vergrabene Heterostruktur). Aufgrund des hohen optischen Index von Halbleitern ($n \approx 3$) sind die *Fresnel*reflexionen an den Endflächen (ca. 30 %) zur Realisierung eines Resonators bereits ausreichend. Soll das Licht nur an einer Endfläche aus dem Chip austreten, kann die zweite Endfläche metallisiert werden.

2.1.2.2 Laterale Moden

Zur theoretischen Beschreibung wird wegen der Rechtecksgeometrie in diesem Fall für die *Helmholtz*gleichung ein kartesischer Ansatz verwendet:

$$u = \phi(y)\psi(x) \exp(i\beta z) \quad (2.7)$$

Durch Trennung der Variablen und Einführung einer modenabhängigen Ausbreitungskonstante $\beta_{\text{eff}}^2 = n^2 k^2 - \kappa^2$ /38/ ergeben sich die typischen Modenverteilungen von Rechteckswellenleitern /39/, z.B. für $\phi(x)$:

$$\phi(y) = \begin{cases} A_1 \cos(\kappa y) + B_1 \sin(\kappa y) & |y| \leq d/2 \\ A_2 \exp(\gamma(|y| - d/2)) & |y| > d/2 \end{cases} \quad (2.8)$$

mit

$$\begin{aligned} \kappa^2 &= n_1^2 k^2 - \beta_{\text{eff}}^2 \\ \gamma^2 &= \beta_{\text{eff}}^2 - n_2^2 k^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Die einzelnen Moden werden wieder aus den Stetigkeitsbedingungen von Feld und Ableitung an den Grenzen der aktiven Zone bestimmt. Die Einmodenbedingung lautet hier /40/:

$$k d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < \pi \quad (2.10)$$

Da die beiden lateralen Dimensionen unterschiedlich strukturiert werden (Epitaxie und Lithographie) und die Einmodenbedingungen zudem verschieden sind, ergeben sich elliptische Strahlprofile. Typischerweise ist die Dicke der aktiven Schicht 0,1 μm und ihre Breite einige μm . Die Modenverteilungen bei Laserdioden lassen sich durch ein Produkt von *Gauß*funktionen in den kartesischen Koordinaten annähern /41/. Es ergeben sich $1/e^2$ -Radien der Intensität im Nahfeld von ca. 1 x 2 μm .

2.1.2.3 Packaging

Aufgrund der unterschiedlichen Form und des unterschiedlichen Durchmessers des von Laserdioden abgestrahlten und von Fasern geführten Feldes, ist es für eine effiziente Kopplung notwendig, die Feldverteilungen von Laser und Glasfaser einander anzupassen.

Hierzu werden in der Integrierten Optik Taper /42/ und in der Mikrooptik Linsen eingesetzt, die die Moden einander anpassen. Als Linsen eignen sich wegen der thermischen Randbedingungen durch RIE geätzte Silizium-Linsen /43/, aber auch Kugellinsen /44/ aus technischen Gläsern, die in die für Laserdioden üblichen TO-Gehäuse integriert werden.

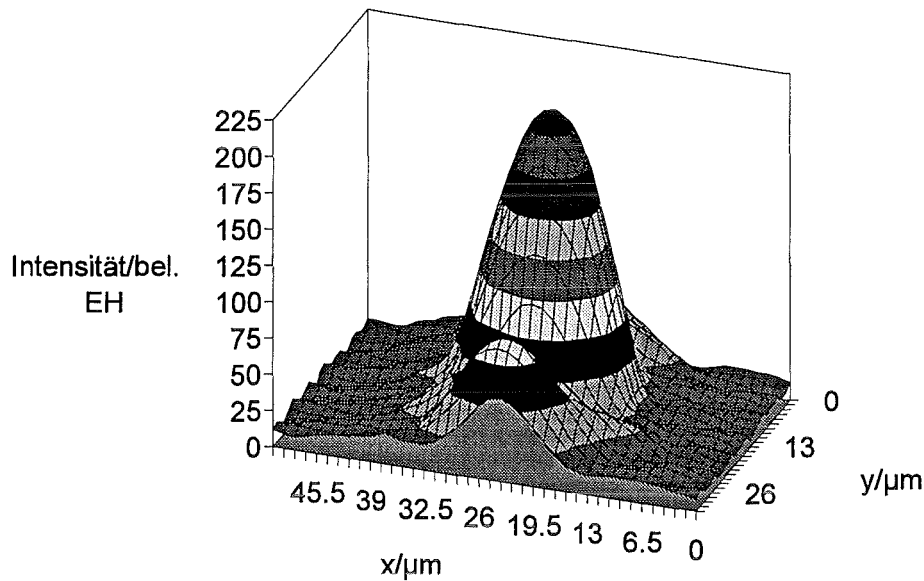


Abbildung 2.7: Intensitätsverteilung an der Strahltaile einer LD vom Typ STH51002Z. Im Vordergrund nicht fokussiertes Streulicht. $w=8,5 \mu\text{m}$.

Das von einer solchen Laserdiode abgestrahlte Feld zeigt Abbildung 2.7. Der $1/e^2$ -Radius w beträgt an der Strahltaile $8,5 \mu\text{m}$, die annähernd *gaußförmige* Form ist zu erkennen. Der Korrelationskoeffizient für diese Verteilung beträgt $98,7 \%$.

Häufig sind kommerzielle, gehäuste Laserdioden auch mit einer Monitordiode ausgestattet, einer gewöhnlichen Photodiode (s.u.), die zur kontinuierlichen Regelung des Lasers dient. Dadurch können z.B. Schwankungen der Laserschwelle durch die Aufheizung des Chips während des Betriebs ausgeglichen werden. Bei solchen Dioden ist der Resonator an beiden Enden des Chips teilweise durchlässig. Auf der dem Gehäusefenster abgewandten Seite wird das dort abgestrahlte Licht geringerer Intensität von der Monitordiode in einen Regelstrom für die Laserdiode gewandelt.

2.1.3 Detektoren

Die in der Photonik verwendeten Detektoren beruhen alle auf dem Prinzip des internen Photoeffekts in Halbleitern: Ein auf den Halbleiterkristall treffendes Photon erzeugt durch Ionisation ein Elektron-Loch-Paar, wenn die Photonenenergie größer als die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband ist. Typische Materialien für Photodioden sind InGaAs und InP.

Um die Ladungsträger abzuleiten ist ein elektrisches Feld notwendig, welches die Elektronen und die Löcher beschleunigt. Eine kurze Impulsantwort wird durch ein besonders großes Feld erreicht. Ohne äußere Vorspannung entstehen solche Felder z.B. in der Ladungsträgerverarmungszone an der Grenzfläche eines pn-Übergangs (ca. 10^5 V/m). Da an der Verarmungszone die gesamte Spannung abfällt, können nur Ladungsträgerpaare, die in dieser Zone

erzeugt werden oder in diese Zone diffundieren, beschleunigt werden. Eine Verstärkung durch Stoßionisationen in den dotierten p- oder n-Bereichen tritt wegen der Dominanz der Majoritätsladungsträger nicht auf. Aufgrund der kleinen Ausdehnung der Verarmungszone ist beim einfachen pn-Übergang die Quanteneffizienz gering und die elektrische Kapazität der Diode sehr groß. Dies führt zu einer großen Zeitkonstante der Diode und begrenzt die nachrichtentechnische Übertragungsrate:

$$\tau = R_{\text{ext}} C_{\text{PD}} \quad (2.11)$$

Einen Kompromiß stellt die pin-Photodiode dar, bei der sich zwischen den dotierten p- und n-Zonen eine Zone mit intrinsischer Ladungsträgerdichte befindet: Die Kapazität der Diode vermindert sich dadurch, die Quanteneffizienz steigt, da die Wechselwirkungszone größer wird, und ein großes elektrisches Feld von ca. $5 \cdot 10^4$ V/m verbleibt.

Da die Kapazität der Diode auch proportional zur Halbleiterfläche ist, sind kleine Detektorflächen für die Datenraten in Einmodenanwendungen Voraussetzung. Typische Durchmesser von Photodiodenchips sind einige Hundert Mikrometer. Damit ergeben sich Zeitkonstanten von einigen Hundert Pikosekunden.

2.2 Grundlagen für das Design mikrooptischer Funktionsmodule

2.2.1 Abstrahlverhalten faseroptischer Komponenten

Wie oben ausgeführt, lassen sich sowohl die Moden von Einmodenfasern als auch von Laserdioden sehr gut mit *gaußförmigen* Feldverteilungen annähern. Deshalb muß die Ausbreitung von *Gaußstrahlen* in homogenen optischen Medien /45/ und ihre optische Abbildung als Grundlage für das optische Design nachrichtentechnischer Funktionsmodule betrachtet werden.

Die Lösung der *Helmholtzgleichung* für die Ausbreitung von *Gaußverteilungen* im freien Raum lautet

$$u(r, z) = \frac{w_0}{w} \exp\left(-i(kz - \Phi) - r^2 \left(\frac{1}{w^2} + \frac{ik}{2R}\right)\right) \quad (2.12)$$

, mit R als Krümmungsradius der Wellenfront und w als 1/e-Radius des Feldes /46/. Entlang der Ausbreitungsrichtung z verändert sich die Strahlbreite w bzw. die Wellenfrontkrümmung R gemäß

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2.13)$$

$$\text{bzw.} \quad R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2 \right] \quad (2.14)$$

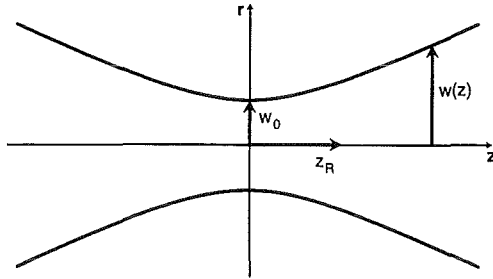


Abbildung 2.8: Ausbreitung eines Gaußstrahls

Der Parameter z_R wird als *Rayleighbereich* bezeichnet und gibt an, in welchem Abstand von der Strahltaile w_0 der Radius w auf den $\sqrt{2}$ -fachen Wert angestiegen ist (Abbildung 2.8). Der Divergenzwinkel im Fernfeld θ errechnet sich aus dem *Rayleighbereich* gemäß

$$\theta = \frac{w_0}{z_R}$$

Zur Bestimmung des Strahldurchmessers wird die Intensitätsverteilung des Strahls,

$$I(r, z) = I_0 \exp -2 \left(\frac{r}{w(z)} \right)^2 \quad (2.15)$$

, mit einem Strahldiagnosesystem gemessen (s.u.). Sie ergibt sich theoretisch durch Quadrieren der Feldverteilung. In Abbildung 2.9 ist das auf diese Weise gemessene Abstrahlverhalten einer Einmodenfaser als Funktion vom Faserabstand aufgetragen. Die gute Übereinstimmung der Meßwerte mit der Theorie zeigt, daß sich das Abstrahlverhalten der Einmodenfasern sehr gut durch die für einen *Gaußschen* Strahl gültigen Formeln beschreiben läßt. Der Korrelationskoeffizient einer einzelnen Messung mit einer *Gaußfunktion* ist stets größer als 98%.

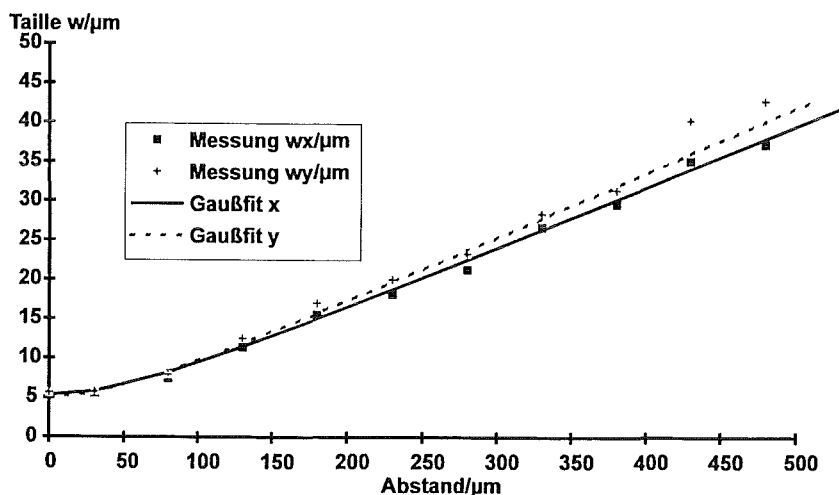


Abbildung 2.9: Strahldurchmesser als Funktion des Abstandes zur Faserstirnfläche im Fernfeld ($w=5,3 \mu\text{m}$).

2.2.2 Optisches Designkonzept

Nachrichtentechnische Funktionsmodule haben die Aufgabe, Signale eines Senders (z.B.: Faser, Laserdiode) möglichst verlustfrei auf einen Empfänger (z.B.: Faser, Photodiode) zu übertragen, wobei zwischen diesen Komponenten in Abhängigkeit von einem physikalischen Parameter, z.B. der Wellenlänge, eine Ablenkung erfolgt. Aufgrund der Divergenz des von Einmodenfasern abgestrahlten Lichts, der Modenfeldanpassung und des Abstands von Sender und Empfänger müssen bei mikrooptischen Funktionsmodulen für Einmodenfasern - anders als bei Mehrmodenfasern - abbildende Elemente eingesetzt werden.

Als klassisches optisches Konzept zur Abbildung einer Lichtquelle auf den Detektor bietet sich die Lichtröhre an, wie sie in der *Fourieroptik* häufig verwendet wird /47/. Eine Lichtröhre besteht aus zwei identischen optischen Elementen, die im Abstand der doppelten Brennweite zueinander positioniert sind. In der hinteren Brennebene der ersten Linse, die auch die vordere Brennebene der zweiten Linse ist, ergibt sich die *Fouriertransformierte* des ursprünglichen Objekts. In der hinteren Brennebene der zweiten Linse entsteht ein punktgespiegeltes Bild des Objekts. Zwischen den beiden Linsen haben durch Strahlablenkungen und Partikel erzeugte Aberrationen den geringsten Einfluß auf die Bildqualität, weil das von einem Punkt abgestrahlte Licht zwischen den Linsen kollimiert ist. Diese Position eignet sich deshalb besonders zum Einbringen von Filtern und ablenkenden Elementen wie Prismen oder Strahlteilern, wie sie in beiden in dieser Arbeit realisierten Funktionsmodulen vorgesehen sind. Desweiteren sind aufgrund der Kollimierung auch der Abstand der beiden Kugellinsen und ihr lateraler Versatz weniger kritisch, so daß dieses System besonders für Einmodenfasern geeignet ist und deshalb in beiden Funktionsmodulen als optisches Aufbaukonzept zugrunde gelegt wird.

2.2.3 Abbildungstheorie für *Gaußstrahlen*

Das Ziel einer möglichst guten Kollimierung zwischen den Linsen einer Lichtröhre ist identisch mit dem Ziel einer größtmöglichen Strahltaille. Für die Strahltaillen von *Gaußstrahlen* ist eine ähnliche Abbildungsformel wie das geometrisch-optische Abbildungsgesetz gültig /48/. Ein *Gaußscher* Strahl wird also wieder in einen *Gaußschen* Strahl abgebildet. Unterschiede in der Krümmung der Wellenfront von Kugelwelle und *Gaußstrahl* führen jedoch zu Korrekturen am Abbildungsgesetz der geometrischen Optik. Die Gegenstandsweite s wird durch einen zusätzlichen Term ergänzt, der die intrinsische Wellenfrontkrümmung von *Gaußstrahlen* berücksichtigt.

$$\frac{1}{s + \frac{z_R^2}{s-f}} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (2.16)$$

Aufgrund dieser Änderung wird als maximale Bildweite $1+1/2(z_R/f)$ erreicht statt ∞ wie im Fall der geometrischen Optik. Gleichung (2.16) gilt für eine beliebige optische Abbildung, also sowohl für Einzellinsen als auch für Kombinationssysteme.

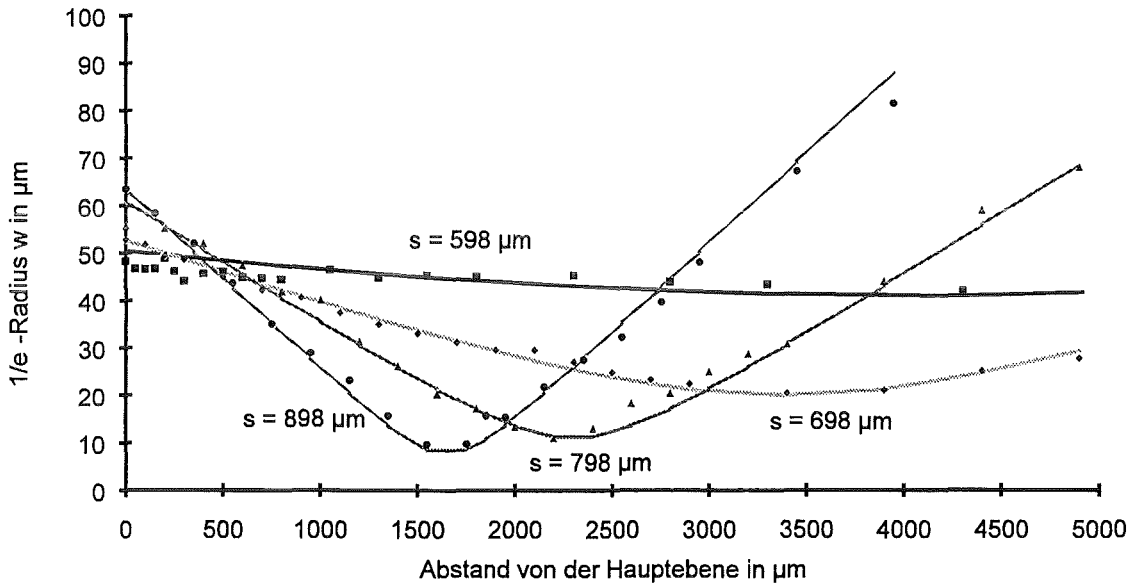


Abbildung 2.10: Strahlengang des abgebildeten Strahls hinter einer Kugellinse für verschiedene Gegenstandsweiten s .

Durch Feldmessungen kann das Abbildungsgesetz für *Gauß*strahlen experimentell bestätigt werden. Die Abbildung 2.10 zeigt als Funktion des Abstandes zur Hauptebene den von einer Einmodenfaser emittierten und von einer Kugellinse abgebildeten, wieder *gauß*förmigen Strahl. Scharparameter dieser Kurven ist die Gegenstandsweite s , also der Abstand zwischen der Hauptebene der Linse und der Stirnfläche der Licht abstrahlenden Faser. Die aufgetragene $1/e$ -Breite des elektrischen Feldes des abgebildeten Strahls entspricht dem $1/e^2$ -Radius seiner Intensitätsverteilung. Mit größerer Gegenstandsweite wird die Fokussierung stärker, d.h. die abgebildete Strahltaile wird kleiner und liegt näher an der Kugellinse. Die stärkste Kollimierung dagegen wird für eine Gegenstandsweite $s = f$ erreicht. In dieser Anordnung ist die abgebildete Fasermode ca. zehnfach vergrößert.

Ähnliche Resultate ergeben sich bei der Vermessung von Laserdioden mit integrierter Kugellinse (Abbildung 2.11). Jedoch sind hier die Korrelationskoeffizienten mit $> 95\%$ aufgrund von Streulicht, wie es in Abbildung 2.7 zu erkennen ist, im Vergleich zu Fasern etwas schlechter.

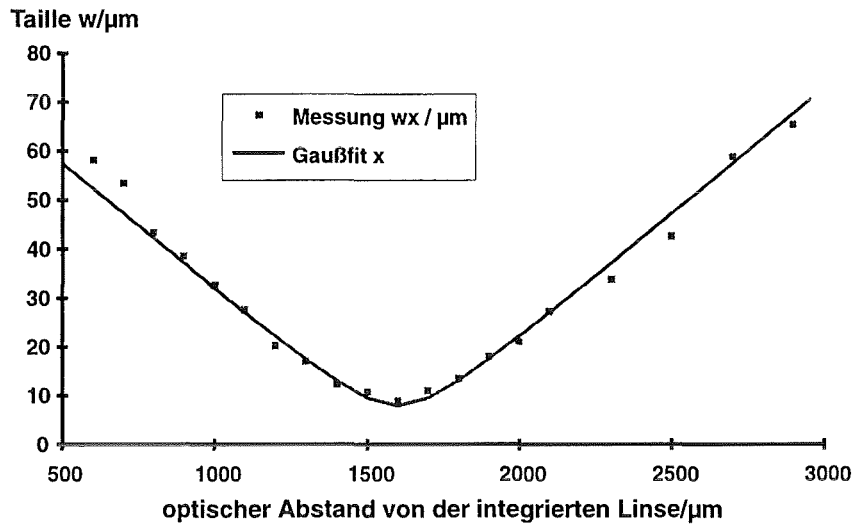


Abbildung 2.11: Strahlentwicklung bei einer LD des Typs STH51002Z ($w=8,5 \mu\text{m}$)

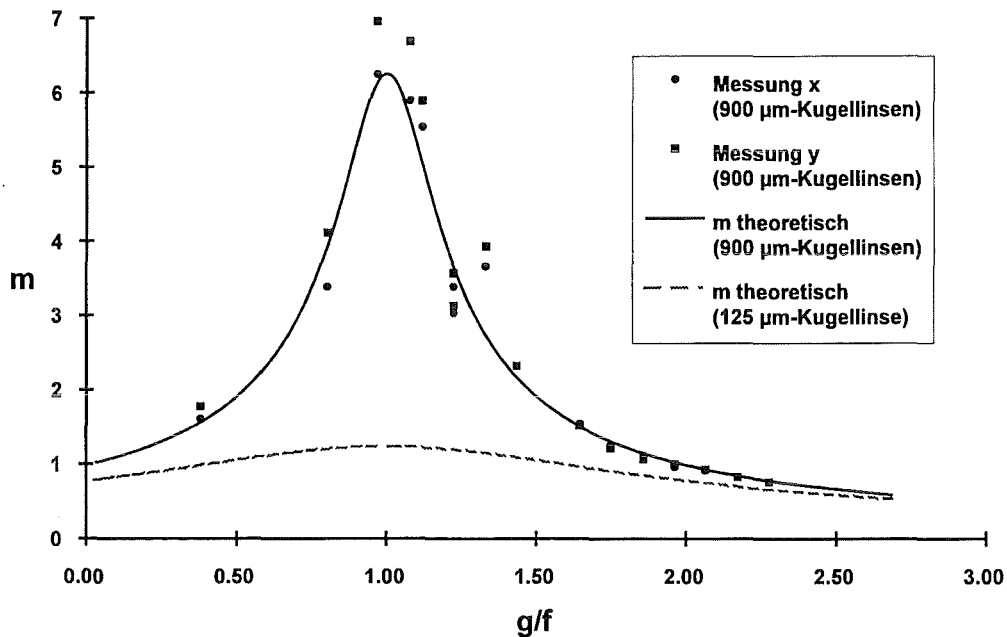


Abbildung 2.12: Vergrößerung in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite: Theorie und Messung für eine Lichtröhre

Auch die Vergrößerung m ändert sich im Vergleich zur geometrischen Optik bei gleicher Gegenstandsweite:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{s}{f}\right)^2 + \left(\frac{z_R}{f}\right)^2}} \quad (2.17)$$

Die erreichbare Vergrößerung eines optischen Systems ist auf f/z_R begrenzt. In Abbildung 2.12 ist die Kurve der Gleichung (2.17) den aus der Abbildung einer Einmodenfaser mit einer

Lichtröhre (900 μm Kugellinsen, 1988 μm Abstand, Systembrennweite $f=-474 \mu\text{m}$) ermittelten Meßwerten gegenübergestellt: Auch diese theoretische Vorhersage wird experimentell bestätigt.

Vom technischen Standpunkt her wäre es vorteilhaft Kugellinsen zu verwenden, welche den Durchmesser der Fasern (125 μm) besitzen. Der *gaußsche* Abbildungsformalismus zeigt jedoch, daß Licht aus Einmodenfasern mit solchen Linsen nicht kollimiert werden kann (Abbildung 2.12, 125 μm Kugellinse). Für eine Lichtröhre müssen deshalb Linsen mit einem im Vergleich zur Faser größeren Durchmesser verwendet werden. Damit wird zur Festlegung einer einheitlichen optischen Achse eine mehrstufige mikrooptische Bank erforderlich.

2.2.4 Toleranzen für eine Lichtröhre

Da bei der Prozessierung der mikrooptischen Bank mit Maßabweichungen zu rechnen ist, ist es wichtig, die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen auf die optischen Leistungsdaten zu kennen. Dadurch können die kritischsten Strukturierungsfehler gezielt vermieden und bei vorhandenen Toleranzen die erreichbaren Koppeffizienzen umgesetzt werden. Aus dem Überlappintegral der Feldverteilungen von Sender und Empfänger an einer beliebigen Position zwischen den beiden optischen Teilsystemen der Lichtröhre kann die Koppeffizienz in Abhängigkeit von den verschiedenen geometrischen Justagefehlern berechnet werden.

Abbildung 2.13 stellt die möglichen Fehler in der Höheneinstellung am Beispiel einer Lichtröhre mit Fasern als Sender und Empfänger dar: Δy_1 und Δy_3 sind die einzelnen Stufenfehler, Δy_2 ist die Niveaudifferenz zwischen den Linsen.

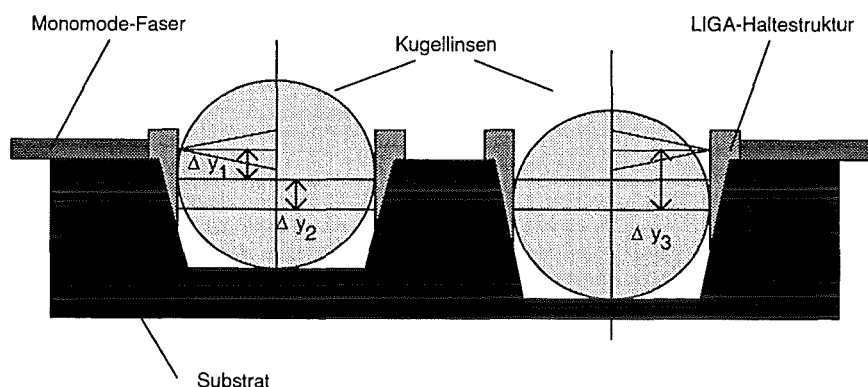


Abbildung 2.13: Positionierfehler bei mikrooptischen Bänken

Die Auswirkungen der Fehlpositionierungen können besonders einfach diskutiert werden, wenn das Überlappintegral in der *Fourierebene* der Lichtröhre ausgewertet wird. Ein lateraler

Versatz in der ersten Brennebene erzeugt eine zusätzliche keilförmige Wellenfront (also einen Winkelfehler θ) in der zweiten Brennebene. In paraxialer Näherung gilt:

$$\theta = \frac{f_y}{f_z} = \frac{\Delta y_{1/3}}{\lambda f} / \frac{1}{\lambda} = \frac{\Delta y_{1/3}}{f} \quad (2.18)$$

Haben die beiden Stufenfehler gleiches Vorzeichen, addiert sich der Winkelfehler zu:

$$\theta_{\text{tot}} \approx \frac{\Delta y_1 + \Delta y_3}{f} \quad (2.19)$$

Der Stufenunterschied Δy_2 bewirkt einen lateralen Versatz der beiden *Gauß*-verteilungen in der *Fourierebene*. Haben die beiden Fasern von der Brennebene der Kugellinsen abweichende Positionen, so werden außerdem die Feldverteilungen unterschiedlich vergrößert und die Position der Strahltaile weicht von der Brennebene ab. Zusätzlich berücksichtigt werden müssen dann also der abweichende Modenfelddurchmesser und der Abstand zwischen den Strahltaillen.

Für die in den Funktionsmodulen verwendeten Standardkomponenten (Einmodenfasern: $w_0=5,6 \mu\text{m}$, $\lambda=1300 \text{ nm}$, Kugellinsen: $r=450 \mu\text{m}$, $n=1,6$) kann mit Hilfe bekannter Formeln für die Kopplung von Einmodenfasern /49/ die Koppeffizienz berechnet werden. Abbildung 2.14 zeigt die errechnete Dämpfung in Abhängigkeit von einem identischen Niveaufehler bei beiden Kugellinsen, der sich bei den untersuchten Strukturierungsmethoden wegen lokal nahezu gleicher Abweichungen ergibt (vgl. 3.2). Ein Stufenfehler von $2,3 \mu\text{m}$ führt bei einer vollständig passiven Justage bereits zu Dämpfungen von über 3 dB !

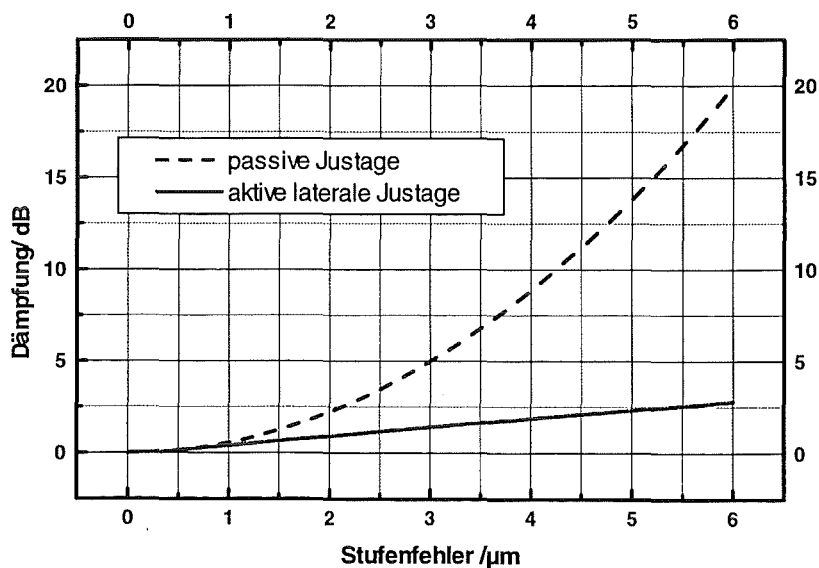


Abbildung 2.14: Einfügedämpfung bei passiver und aktiver, axialer Justage (ohne *Fresnel*-verluste)

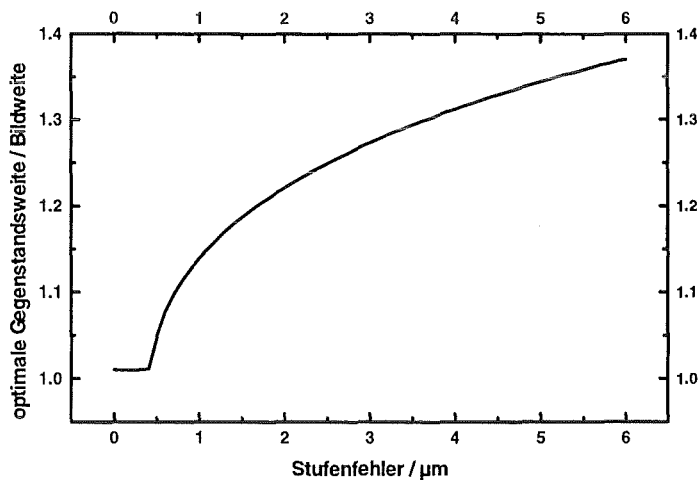


Abbildung 2.15: Gegenstandsweite für optimale Kopplung

Die Gegenstandsweite für eine optimale Kopplung liegt im Falle von Substratfehlern jedoch außerhalb der Brennebene, wie Abbildung 2.15 zeigt. Wird deshalb die Faser axial in der optimalen Gegenstandsweite positioniert, so ergibt sich eine erheblich niedrigere Dämpfung, z.B. bei 2,3 μm nur 1,2 dB (Abbildung 2.14). Unter Berücksichtigung der durch die *Fresnel*reflexion

an den vier Grenzflächen der Kugellinsen und den zwei Faserstirnflächen entstehenden Dämpfung (1 dB) ergeben sich für eine Dämpfung von 3 dB maximale Justiertoleranzen von 4 μm bei aktiver axialer Justage und 2 μm bei passiver Justage.

Da bei einer praktischen Umsetzung der mikrooptischen Bank stets mit Bearbeitungstoleranzen zu rechnen ist, ist es sinnvoll, das erhebliche Leistungspotential auszuschöpfen, das sich bei einer Lichtröhre durch eine axiale Verschiebung von Sender und/oder Empfänger ergibt. Dazu müssen die Fasern frei axial positionierbar in der mikrooptischen Bank integriert werden. Speziell bei der automatisierten Montage einer Faser ist damit nur ein geringer montagetechnischer Mehraufwand verbunden, weil diese vom Rand der mikrooptischen Bank in den Faserschacht eingeführt und positioniert werden muß. Wird die mikrooptische Bank zusätzlich durch Abformung hergestellt, so ist die optimale Faserposition bei allen abgeformten Töchterstrukturen einer Primärstruktur gleich. Die optimale Position kann deshalb nach einmaligem Vermessen im Bestückungsautomaten programmiert werden, so daß die individuelle optische Kontrolle entfallen kann.

2.3 Optische Meßtechnik

Zum Beurteilen der technischen Eigenschaften von Funktionsmodulen der optischen Übertragungstechnik werden verschiedene Dämpfungswerte angegeben. Die Einfügedämpfung, das Verhältnis von eingestrahelter und abgestrahlter optischer Leistung bei einem Funktionsmodul, bestimmt den Verstärkerabstand. Die beiden für die Bestimmung der Bandbreite relevanten Meßgrößen sind die Rückflußdämpfung, die das Verhältnis von reflektierter zu eingestrahelter

Leistung angibt und die Übersprechdämpfung, die das Verhältnis der quergekoppelten Leistung aus anderen Kanälen zur Signalleistung angibt. Funktionsmodule hoher Qualität besitzen also eine niedrige Einfügedämpfung und hohe Rückfluß- und Übersprechdämpfungswerte.

Für die Bestimmung dieser Kenndaten bei den mikrooptischen Bänken wurde ein Versuchsaufbau installiert, der hinreichend stabil und flexibel ist, um reproduzierbare Messungen der unterschiedlichen Kenndaten bei verschiedenen Komponenten durchzuführen. In Abbildung 2.16 ist dieser Meßplatz dargestellt.

Im Zentrum des Meßplatzes befindet sich die zu testende mikrooptische Bank auf einem Aluminiumsockel. Um diesen Sockel sind xyz-Positioniereinheiten aufgestellt, mit denen die aktiven optischen Komponenten und die Fasern optimal zur mikrooptischen Bank positioniert werden können. Die Positioniereinheiten besitzen eine Auflösung von 5 nm und sind somit für Messungen mit Einmodenfasern sehr gut geeignet. Sie bestehen ebenfalls aus Aluminium, so daß eine gewisse Stabilität der Positionierung auch bei globalen Temperaturschwankungen erreicht wird. Als Lichtquellen werden bei den Messungen Laserdioden ($\lambda = 1300 \text{ nm}$ oder $\lambda = 1550 \text{ nm}$) verwendet, die mit einem Laserdiodentreiber angesteuert werden, der den Diodenstrom kontinuierlich nachregelt und bei zu hohen Strömen die Dioden automatisch sperrt. In Abhängigkeit vom Design der mikrooptischen Bank, die zu testen ist, wird das Licht der Laserdiode entweder direkt oder über eine Faser in die mikrooptische Bank eingestrahlt. Bei solchen Messungen wird das Licht über ein Mikroskopobjektiv in das freie Ende der Faser eingekoppelt.

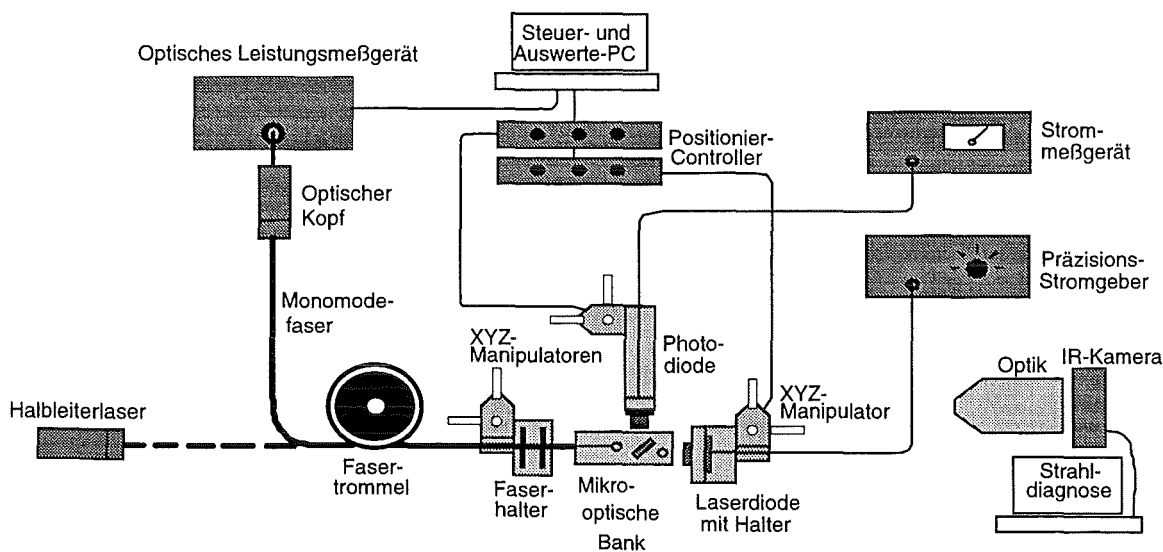


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des Meßplatzes

Der Detektor kann - wieder in Abhängigkeit von der mikrooptischen Bank - entweder eine einfache Photodiode oder ein optisches Leistungsmeßgerät sein. Im Fall der Photodiode wird diese direkt am Rand der mikrooptischen Bank positioniert und die dort eintreffende optische Leistung in einen Diodenstrom gewandelt, der an einem Amperemeter abgelesen werden kann. Das Leistungsmeßgerät wird verwendet, wenn mit Hilfe der mikrooptischen Bank in ein Faserpigtail eingekoppelt wird. Bei Messungen mit dem Leistungsmeßgerät wird direkt die optische Leistung angezeigt, daneben ist die höhere Genauigkeit und die automatisierbare Datenerfassung über IEEE-Bus von Vorteil. Als Referenzwert für die Dämpfungsberechnung wird nach den Leistungsmessungen mit demselben Detektor die integrale optische Leistung bestimmt, die von der LD oder der Faser in die mikrooptische Bank eingestrahlt wird.

Die Messung der Rückflußdämpfung läßt sich mit einem einfachen Richtkoppler vor der Lichtquelle realisieren. Für orts aufgelöste Messungen wurde jedoch ein externes Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) verwendet. Mit einem OTDR wird ein Puls definierter Höhe und Dauer in ein faseroptisches System eingekoppelt. An jedem Reflektor (optische Grenzfläche, Faserspleis oder Materialverunreinigung) im faseroptischen System wird ein Teil der Intensität dieses Lichtpulses in Richtung Quelle reflektiert. Aus dem Zeitpunkt des Eintreffens des Pulses wird der Abstand des Reflektors zum Pulsgeber bestimmt. Auf diese Weise können Störstellen lokalisiert und gezielt verkleinert werden /50/.

Zur Messung der Justiertoleranz von hybriden Komponenten, die nicht in die mikrooptische Bank integriert sind, oder die sich - wie die Faser - auch innerhalb der Bank bewegen lassen, können diese mit Hilfe der Positioniereinheiten relativ zur mikrooptischen Bank verschoben werden. Der Verfahrensweg beträgt $20\ \mu\text{m}$ mit einer Wiederholgenauigkeit von $100\ \text{nm}$. Durch einen Meßrechner können parallel die Positioniereinheiten angesteuert und das optische Leistungsmeßgerät in Echtzeit ausgelesen werden, so daß automatisierte Meßabläufe programmiert werden können.

Die integralen Dämpfungswerte lassen sich häufig aber nur verstehen, wenn die Feldverteilungen innerhalb der mikrooptischen Bank bekannt sind. Deshalb müssen auch orts aufgelöste Intensitäts- und Feldmessungen durchgeführt werden. Dazu können mit einem Strahl- diagnosesystem durch die Aufnahme von Strahlprofilen innerhalb einer mikrooptischen Bank Strahlverfolgungen durchgeführt und die Qualität der Abbildung des optischen Systems überprüft werden.

Aus den Strahlprofilen läßt sich die Standardabweichung des Lichtstrahls an dieser Stelle berechnen nach /51/:

$$\sigma^2(z) = \frac{\iint r^2 I(r, z) r \, dr \, d\phi}{\iint I(r, z) r \, dr \, d\phi} \quad \text{mit } r = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} \quad (2.20)$$

, woraus sich der 1/e-Radius w der entsprechenden *Gauß*-verteilung ergibt:

$$w(z) = \sqrt{2}\sigma(z) \quad (2.21)$$

Durch die Interpretation der axialen Veränderung der Radien mit der *gauß*-schen Strahltheorie lassen sich Dämpfungen, die im Strahlengang begründet sind, auch theoretisch verstehen.

Das in dieser Arbeit verwendete Strahldiagnosesystem besteht aus einer Vidicon-Röhrenkamera mit Abbildungsoptik und einem mit einer Bildspeicherkarte ausgerüsteten PC. Das Videosignal der Kamera wird nach der A/D-Wandlung korrigiert, so daß der digitale Wert linear von der eingestrahnten Intensität abhängt. Dadurch werden lokal unterschiedliche Sensibilitäten sowie Fehler der Verstärkerelektronik ausgeglichen.

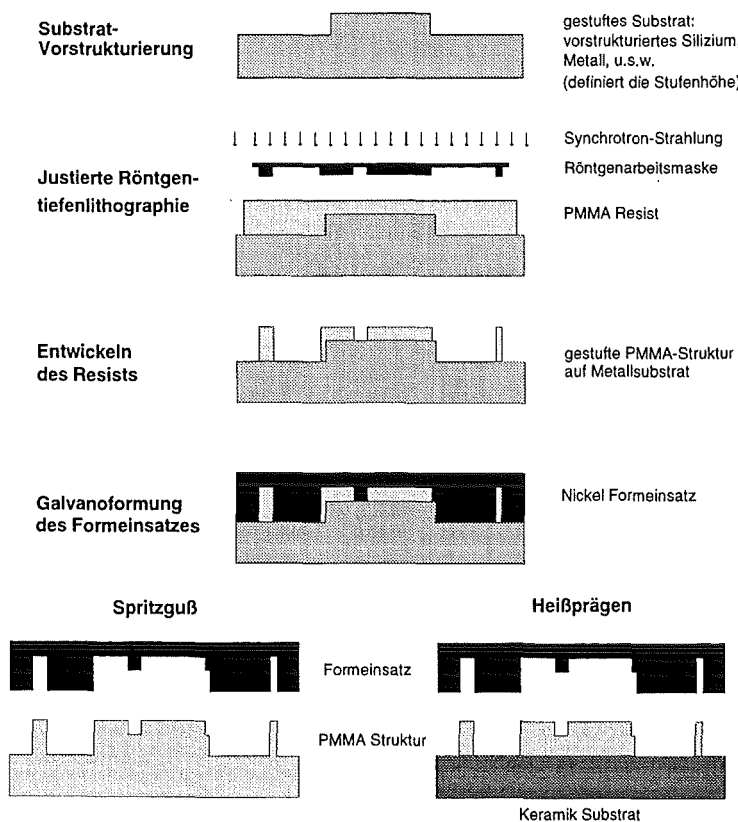
Da die spatiale Auflösung von Vidicon-Kameras für eine direkte Aufnahme der in dieser Arbeit auftretenden Feldverteilungen zu klein ist, werden Mikroskopobjektive zu einer weitgehend aberrationsfreien Vergrößerung eingesetzt. Die damit verbundenen Beugungserscheinungen lassen sich ebenfalls mittels der *gauß*-schen Abbildungstheorie berechnen und müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden (vgl. Anhang).

3 Die Herstellung einer mikrooptischen Bank mit dem LIGA-Verfahren

3.1 Das modifizierte LIGA-Verfahren

Wie in Kapitel 2 dargestellt, muß aus beugungstheoretischen Gründen für eine Realisierung des modularen mikrooptischen Konzepts eine vollständig dreidimensionale mikrooptische Bank verwendet werden. Nur dann ist es möglich, Kugellinsen mit einer Brennweite einzusetzen, die eine ausreichende Vergrößerung der Fasermode sicherstellen. Da das LIGA-Verfahren wie viele andere mikrotechnische Verfahren (z.B. Si-Mikromechanik) auf einer lithographischen Primärstrukturierung in Form einer Schattenprojektion beruht, wird zur dreidimensionalen Strukturierung eine mehrstufige Prozessierung notwendig.

Das modifizierte LIGA-Verfahren /52/ für den Aufbau einfach gestufter mikrooptischer Bänke ist in Abbildung 3.1 skizziert. In einem ersten Schritt wird durch verschiedene Strukturierungsverfahren ein gestuftes Substrat hergestellt. Im Falle einer einfachen, groben Stufengeometrie kann dafür das Substrat mechanisch mit einem Diamanten bearbeitet werden. Bei feineren oder komplexeren Strukturen wird die erste Ebene durch Lithographie und Galvanik



erzeugt. In beiden Fällen wird die Höhe des Plateaus durch Diamantfräsen auf den gewünschten Wert eingestellt. Vorteile der lithographischen Herstellungsmethode sind die Freiheit der lateralen Formgebung und gegebenenfalls der additive Herstellungsprozeß. Bei der mechanischen Strukturierung sind nämlich bei Tiefen von einigen 100 µm größere Abweichungen zu erwarten, da das untere Substratniveau subtraktiv aus der Grundplatte herausgearbeitet wird. Daneben können als gestufte Substrate anisotrop geätzte Silizium-Wafer eingesetzt werden, bei denen jedoch die

Abbildung 3.1: Herstellung einer gestuften mikrooptischen Bank mit dem LIGA-Verfahren

Geometrie der ersten Ebene Einschränkungen aufgrund der Kristallstruktur unterworfen ist. Nach dem Aufbringen isolierender Siliziumnitrid- oder Siliziumoxidschichten sind diese Substrate allerdings auch für den Aufbau elektrostatischer oder elektromagnetischer Aktoren geeignet (vgl. Kapitel 5). Bei Silizium-Wafern ist eine genaue Tiefenätzung der kritische Prozeß für eine präzise Niveaueinstellung der beiden Ebenen.

Auf diesen gestuften Substraten wird der LIGA-Prozeß durchgeführt. Sie werden dazu vor der Resistbeschichtung mit einer Galvanikstartschicht aus Titan besputtert, die anschließend oxidiert wird, um die Resisthaftung zu verbessern /53/. Durch eine justierte Röntgentiefenlithographie wird das Muster der zweiten Ebene auf dem Substrat strukturiert. Die entstehende Struktur bzw. ihr Negativ aus galvanisch abgeschiedenem Metall kann das Endprodukt sein. Alternativ kann durch eine galvanische Abscheidung über die Höhe dieser Kunststoffstruktur hinaus ein Formeinsatz hergestellt werden, der zur Abformung der mikrooptischen Bank entweder durch Heißprägen auf Metall- oder Keramiksubstraten oder durch Spritzguß verwendet werden kann.

Um die Tauglichkeit dieses Konzepts für die Herstellung der mikrooptischen Bank zu untersuchen, muß die Präzision der Positionierung der optischen Komponenten untersucht werden. Im Folgenden wird dazu zunächst die Genauigkeit der Prozesse zur Herstellung der gestuften Substrate und anschließend die Genauigkeit des Kombinationsprozesses am Beispiel der Positionierung von Kugellinsen und Einmodenfasern diskutiert.

Dazu müssen mechanische Messungen durchgeführt und deren Ergebnisse mit optischen Daten korreliert werden. Für die laterale mechanische Vermessung der Strukturen wurden zwei Mikroskope verwendet, von denen das eine mit einem Meßtisch, das andere mit einem Videosystem und einem Balkenmeßgerät ausgestattet ist. Die Höhenvermessungen wurden mit einem mechanischen Meßtaster der Marke Heidenhain und einem optischen Abstandssensor der Marke UBM durchgeführt.

3.2 Gestufte Substrate für die Röntgentiefenlithographie

3.2.1 Silizium-Mikromechanik

3.2.1.1 Die mikromechanische Strukturierung von Silizium

Die Silizium-Mikromechanik ist die neben dem LIGA-Verfahren etablierte Mikrostrukturierungstechnik /54/. Durch trocken- oder naßchemisches Ätzen ist eine isotrope oder anisotrope Strukturierung von Siliziumsubstraten möglich, wobei das naßchemische, anisotrope Ätzen am häufigsten Verwendung findet. Ein Silizium-Festkörper kristallisiert in einem

Diamantgitter. Das anisotrope Ätzverhalten beruht auf der höheren Packungsdichte der $\{111\}$ -Ebenen im Vergleich zu den $\{100\}$ - oder $\{110\}$ -Ebenen. Die Abtragsraten der zum anisotropen Ätzen verwendeten basischen Ätzmedien wie Kalilauge (KOH) oder Ethylendiamin/Pyrazin (EDP) sind deshalb senkrecht zur $\{100\}$ - oder $\{110\}$ -Ebene erheblich höher als zur $\{111\}$ -Ebene. In Siliziumscheiben, deren $\{100\}$ -Ebene parallel zur Oberfläche liegt, können deshalb V-förmige Gruben strukturiert werden, wobei der Winkel zwischen den Ebenen $\{100\}$ und $\{111\}$ ca. 55° beträgt. Zum Ätzen von Gruben definierter Ausdehnung wird das Silizium durch LPCVD-Prozesse mit ca. 100 nm Siliziumoxid und/oder Siliziumnitrid beschichtet, in die anschließend durch optische Lithographie und RIE Öffnungen strukturiert werden. Die eigentlichen Gruben entstehen durch naßchemisches Ätzen mit den bereits erwähnten Ätzmedien.

Durch Passivieren bestehender Strukturen und einen weiteren Ätzprozeß können auch gestufte Strukturen hergestellt werden. Bei mikrooptischen Anwendungen mit stark divergent emittierenden Sendern ist es deshalb möglich, Lichtschächte zu ätzen, die verhindern, daß das Licht am Substrat gebeugt wird.

3.2.1.2 Die Genauigkeit der vertikalen Strukturierung bei Silizium-Substraten

Aufgrund der V-förmigen Grubengeometrie können bei anisotrop geätzten Silizium-Substraten die Kugellinsen entweder auf den Seitenwänden oder am Boden der Ätzgrube aufliegen.

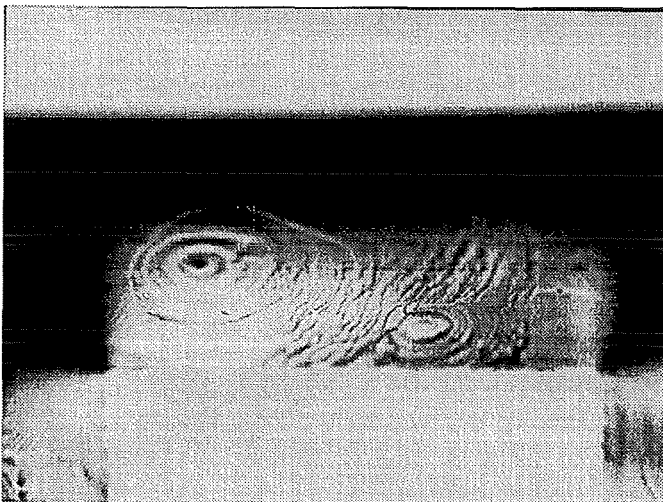


Abbildung 3.2: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Ätzgrubenwand

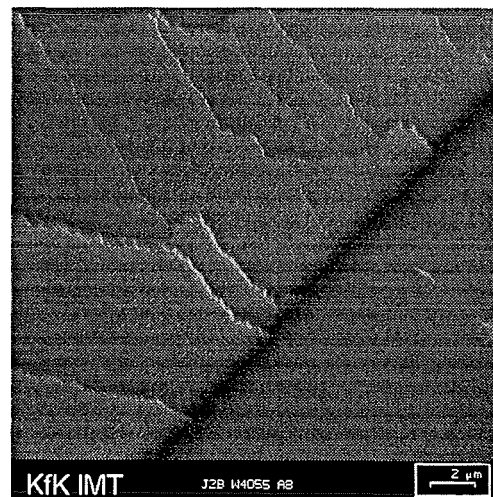


Abbildung 3.3: REM-Aufnahme eines Teils der Grubenwand

Für ein Aufliegen der Kugellinsen auf den Grubenflanken ist die exakte Winkeljustierung der Ätzmaske zum Kristall notwendig, die vor allem durch die ungenaue Flatbestimmung (ca. 2°

Toleranz) erschwert wird. Ein Winkelfehler führt zu einer Unterätzung der Maske /55/ und damit zu treppenförmigen Strukturen auf den Ätzgrubenflanken (Abbildung 3.2). Die Dicke einer einzelnen Schicht beträgt mehrere 100 nm (Abbildung 3.3), so daß mit diesem Effekt eine Unsicherheit in der Höhenposition der Kugellinsen von ca. 1 μm und ein statistisch gemittelter lateraler Positionsfehler von ca. 2 μm verbunden ist. Die Positionierung der Kugellinsen durch die Grubenflanken ist deshalb für einen Aufbau der mikrooptischen Bank nur wenig geeignet.

Liegen dagegen die Linsen alternativ am Grubenboden auf, dann muß die Grubentiefe exakt geätzt werden. Im Falle von Kugellinsen mit 900 μm und Fasern mit 125 μm Durchmesser beträgt diese Tiefe 387,5 μm , was genau der Radiendifferenz von Kugellinse (450 μm) und Faser (62,5 μm) entspricht. Aufgrund der relativ kleinen Ätzraten (Ätzzeiten von einigen Stunden) kann die präzise Tiefenstrukturierung über die Ätzzeit kontrolliert werden. Dazu werden die Gruben zunächst grob vorstrukturiert, anschließend vermessen und in einem zweiten Schritt auf die exakte Tiefe geätzt. Fehler in der Höhenpositionierung der Kugellinsen können bei dieser Aufbauvariante deshalb durch eine falsche Ätzzeit, Variationen der Grubentiefe über dem Wafer und durch Unebenheiten des Grubenbodens verursacht werden.

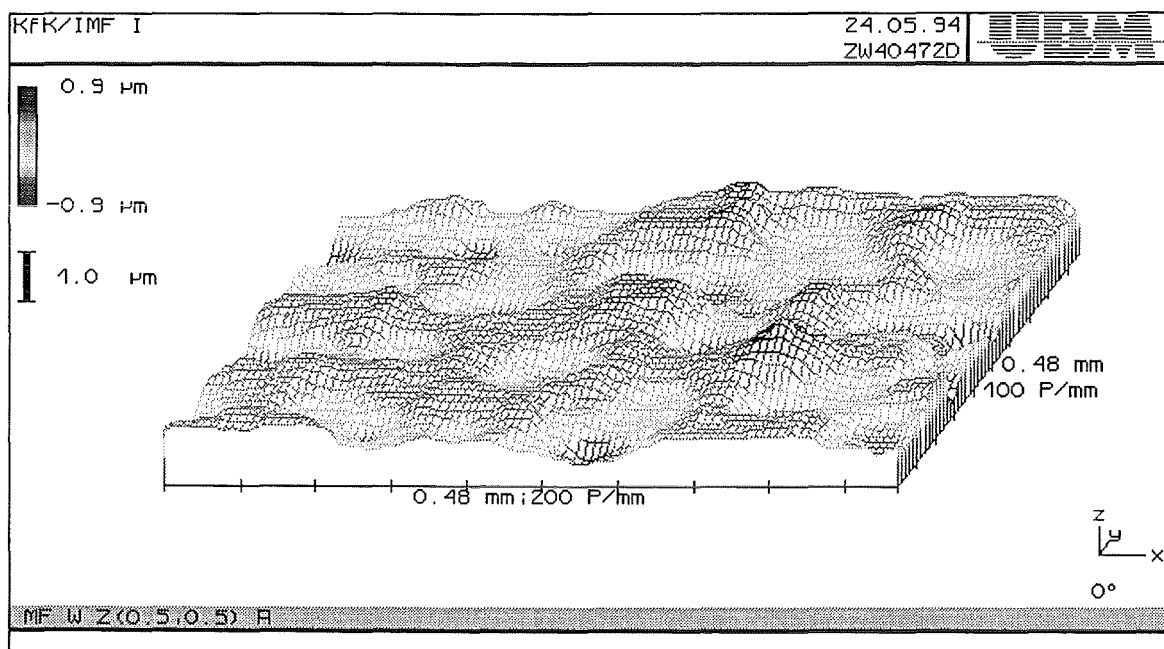


Abbildung 3.4: Profil eines Ätzgrubenbodens

Da die Ätzfront aufgrund lokaler Inhomogenitäten nicht Atomlage für Atomlage im Kristall vordringt, ergibt sich nach Abbruch des Ätzens kein exakt glatter Grubenboden, wie Abbildung 3.4 zeigt. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Silizium-Wafern traten auf einer Fläche von 50 μm x 50 μm Abweichungen von bis zu 2 μm auf. Die Kugelkappe einer der für

diese Arbeit verwendeten Kugellinsen (Durchmesser 900 μm) besitzt auf derselben Grundfläche eine Höhe von ca. 0,5 μm . Dieser Wert definiert daher die prinzipielle Genauigkeitsgrenze der Tiefeneinstellung.

Die Homogenität der Ätzgrubentiefe auf einem Substrat wird durch die Ausrichtung des Strukturfeldes im Ätzbad beim naßchemischen Ätzen bestimmt. Bei einer senkrechten Ausrichtung wird im Mittel eine etwas zu große Grubentiefe strukturiert. Die optimale Tiefe der Ätzgruben ist nur auf einer Seite des Wafers eingestellt. Die mit einem Meßtaster bestimmten maximalen Abweichungen betragen $\pm 1 \mu\text{m}$ (Abbildung 3.5). Durch paralleles Ausrichten des Grubenfeldes im Ätzbad kann dieser Effekt vermieden werden. Es verbleiben dann noch Variationen der Grubentiefe von max. $\pm 0,5 \mu\text{m}$, die auf die Bodenunebenheiten zurückzuführen sind.

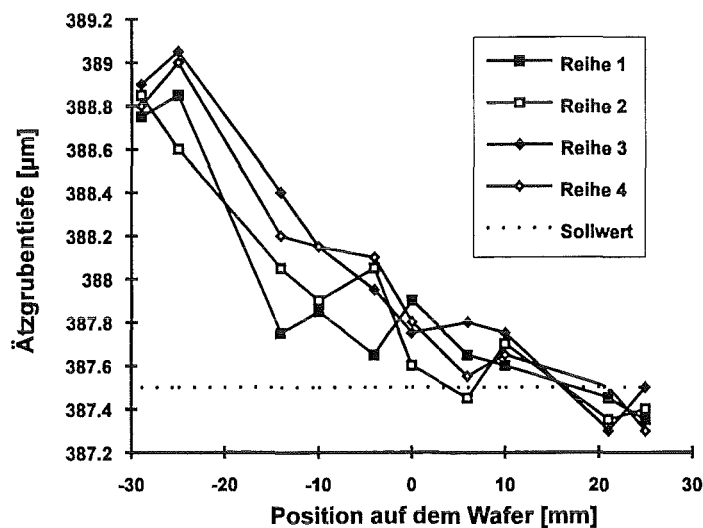


Abbildung 3.5: Ätzgrubentiefe in Abhängigkeit von der Position auf dem Wafer

3.2.2 Röntgentiefenlithographie und Galvanik

Röntgentiefenlithographie und Galvanik, die beiden ersten Prozeßschritte des LIGA-Verfahrens, sind eine weitere Möglichkeit der Herstellung gestufter Substrate. Mit der Röntgentiefenlithographie wird dazu das Negativ des Plateaumusters auf massiven Kupfer-Grundplatten (5 mm Dicke) strukturiert. Die Plateaus werden anschließend über die Sollhöhe hinaus galvanisch aufgebaut und durch Diamantfräsen auf die exakte Niveauhöhe eingestellt /56/. Vorteilhaft an diesem Prozeß ist die Freiheit der lateralen Formgebung aufgrund der Röntgentiefenlithographie sowie eine hohe mechanische Stabilität durch die massiven Substrate und den additiven Strukturaufbau.

Der kritische Prozeßschritt bei dieser Herstellungsmethode ist das Diamantfräsen. Auch bei diesem Verfahren wird die Stufenhöhe zunächst grob voreingestellt und in einem zweiten

Struktur	Mittelwert	Sigma
1.Grundplatte	387.8	0.23
2.Grundplatte	389.5	0.59
3.Grundplatte	386.1	0.21
4.Grundplatte	390.5	0.89

Tabelle 3.1: Stufengeometrie bei mit dem LIGA-Verfahren gefertigten Grundplatten

der Grundplatte. Zur Überprüfung der Niveaueinstellung wurden bei verschiedenen Formeinsatzgrundplatten je 16 Plateaus mit einem Meßtaster bezüglich ihrer Höhe untersucht /57/. Wie Tabelle 3.1 zeigt, sind die Ergebnisse von ähnlicher Art und Qualität wie bei der Silizium-Mikromechanik. Mit beiden Herstellungsmethoden können deshalb bei hinreichender Sorgfalt genügend genau gestufte Substrate hergestellt werden.

Schritt auf den exakten Wert eingestellt. Variationen der Stufenhöhe über dem Substrat entstehen hierbei durch ein nicht exakt planparalleles Einspannen in die Fräse (z. B. wg. Partikeln) oder einem Keilfehler

3.3 Prozeßgenauigkeit bei der weiteren Strukturierung

Die weitere Prozessierung der Substrate mit dem LIGA-Verfahren beeinflusst die Niveaueinstellung der Substratebenen und definiert die laterale Strukturgenauigkeit der mikrooptischen Bank. Der wesentliche Effekt, der zu lateralen und vertikalen Geometrieänderungen sowie Verzügen führt, sind mechanische Spannungen, die durch erhöhte Prozeßtemperaturen in Verbindung mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien verursacht werden. Daneben ist bei der vertikalen Niveaueinstellung der Substrate durch Dünnschichtprozesse beim LIGA-Verfahren eine Veränderung zu erwarten. Die Auswirkungen dieser Effekte auf die laterale und vertikale Strukturgenauigkeit werden im Folgenden diskutiert.

3.3.1 Vertikale Präzision

3.3.1.1 Veränderung der lokalen Niveaueinstellung der Substrate bei der Röntgentiefenlithographie

Vor der Beschichtung der gestuften Substrate für die Röntgentiefenlithographie mit Resist wird eine Titanschicht aufgesputtert, die die Haftung verbessert und auch als Galvanikstartschicht dient /53/. Wegen der Vorstrukturierung der Substrate ist dabei eine lokal unterschiedliche Schichtdicke zu erwarten. Wie oben diskutiert, wird jedoch bereits bei kleinsten Abweichungen von einigen μm die Leistungsfähigkeit der Funktionsmodule erheblich eingeschränkt. Am Beispiel von geätzten Silizium-Substraten wurden deshalb die Auswirkungen einzelner Prozeßschritte des LIGA-Verfahrens auf die Stufenhöhe mit einem Laserprofilometer /58/ charakterisiert. Die Substrate wurden dazu bei der Eingangsinspektion, nach dem Sputtern der Galvanikstartschicht sowie nach der Röntgentiefenlithographie bei

Polymerstrukturen beziehungsweise nach der Galvanik bei metallischen Strukturen aus dem Prozeß herausgenommen und jeweils nach derselben Meßvorschrift vermessen.

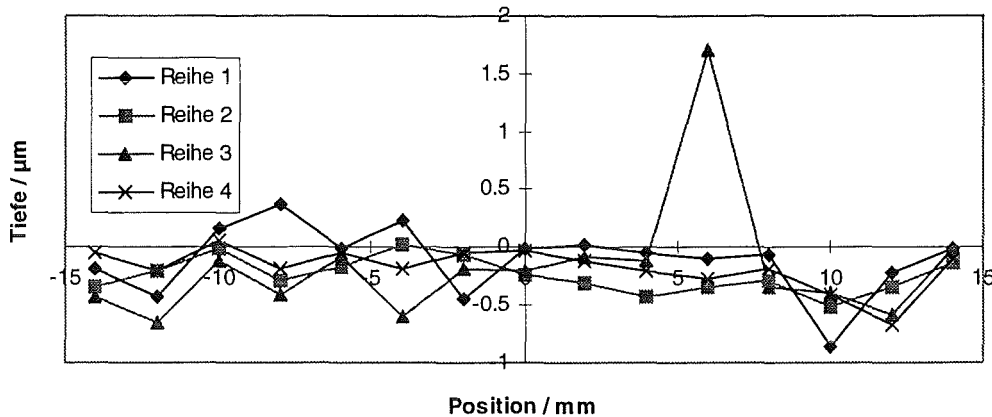


Abbildung 3.6: Änderung der Ätzgrubentiefe über den gesamten LIGA-Prozeß

In Abbildung 3.6 ist die Änderung der Ätzgrubentiefe nach Durchführung der gesamten Primärstrukturierung für einen Wafer exemplarisch dargestellt. Aufgetragen ist die Tiefenänderung von 80 Ätzgruben, die in vier Reihen auf dem Wafer angeordnet sind, in Abhängigkeit von ihrer lateralen Position. Von einem Meßfehler - bedingt durch einen Partikel - abgesehen, ist keine relevante Veränderung des Grubenniveaus zu erkennen. Als wesentliches Ergebnis ist festzuhalten, daß sich die Niveauveränderung nach der Prozeßdurchführung von Lithographie und Galvanik im Rahmen der Meßgenauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ bewegt. Wenn die Primärstrukturen direkt verwendet werden, muß also kein Prozeßvorhalt in der Stufenhöhe berücksichtigt werden.

3.3.1.2 Mechanische Belastung der Substrate während der Röntgentiefenlithographie

Neben den im letzten Kapitel diskutierten Effekten treten durch die Röntgentiefenlithographie außerdem mechanische Verspannungen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien und Abweichungen der Prozeßtemperaturen von der Raumtemperatur auf. Während die Spannungen bei massiven Substraten ohne Auswirkung bleiben, vermindern sie bei Silizium-Wafern die Prozeßausbeute und bewirken eine merkliche Durchbiegung der Substrate /59/. Die Durchbiegungen sind abhängig von der Tiefe und Verteilung der Ätzgruben, der Höhe und Geometrie der LIGA-Mikrostrukturen sowie der Lage des LIGA-Strukturfeldes auf dem Substrat. Sie führen durch die Oberflächenkrümmung zu vertikalen Positionierfehlern und Winkelfehlern zwischen den Strahlengängen und der optischen Achse.

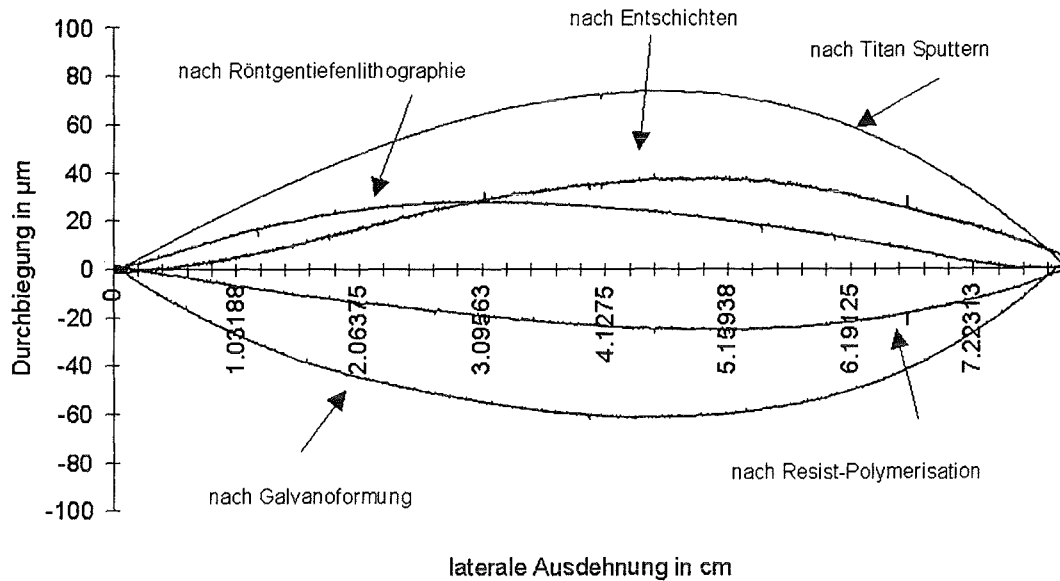


Abbildung 3.7: Durchbiegung eines geätzten Siliziumwafers parallel zum Flat nach den verschiedenen Prozessschritten des LIGA-Verfahrens (Resisthöhe: 90 μm).

Die Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch die Durchbiegung der Substrate nach den verschiedenen Prozessschritten des LIGA-Verfahrens für die Standardbedingungen bei der Probenherstellung und -strukturierung für 90 μm Resistdicke. Dargestellt ist die beim Sputtern induzierte Durchbiegung der Wafer über dem Waferquerschnitt parallel zum Flat.

Durch den LPCVD-Prozess der Ätzmaske und besonders das naßchemische Ätzen werden in die ca. 500 μm dicken Silizium-Scheiben schon vor dem LIGA-Prozess geringe Druckspannungen induziert, welche jedoch nur eine Mittenabweichung von $< 10 \mu\text{m}$ verursachen. Die Durchbiegung der Substrate von +60 μm nach dem Aufputtern des Titans wird durch den Schrumpf beim Auspolymerisieren des Gießharzes auf dem Substrat überkompensiert, der eine Zugspannung mit einer Durchbiegung von -20 μm verursacht. Nach dem Auslösen der bestrahlten Bereiche stellt sich eine Durchbiegung um +20 μm ein. Die galvanische Abscheidung der negativen Nickelstrukturen bewirkt eine Waferdurchbiegung von -60 μm , die nach dem Entfernen des Resists zu einer endgültigen Durchbiegung von +30 μm führt.

Durch eine Anpassung der Prozessparameter kann die Verbiegung der strukturierten Substrate vermindert werden. Dies wird erreicht, indem die Ausgangsspannung der Substrate durch das Sputtern der Titanschicht so eingestellt wird, daß nach der Prozedurchführung spannungsfreie Substrate vorliegen. Die Abbildung 3.8 zeigt, daß durch eine Variation der Parameter die durch den Sputtervorgang induzierte Spannung gezielt und flexibel eingestellt werden kann. Zusätzliche Dämpfungsverluste bei Substraten mit optimierter Prozedurchführung

sind nicht feststellbar, da nach einer Vereinzelung die Durchbiegungen im Bereich eines mikrooptischen Funktionsmoduls nur noch im sub- μm -Bereich liegen.

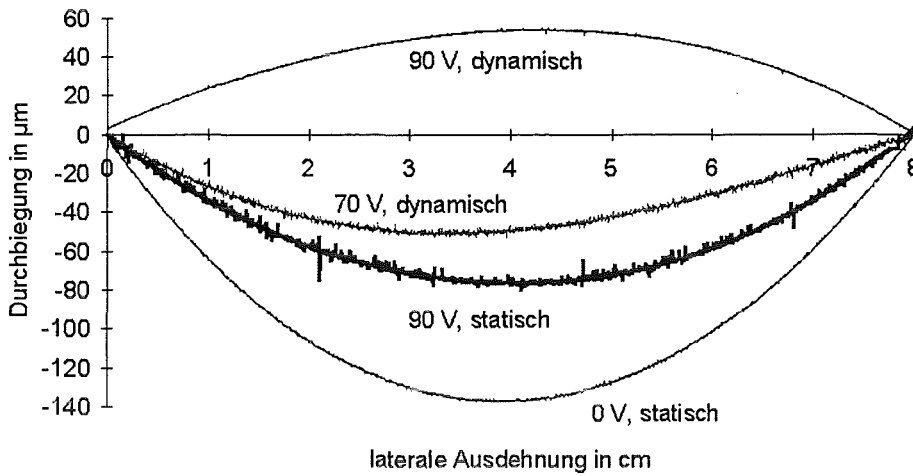


Abbildung 3.8: Variation der induzierten mechanischen Spannungen beim Titansputtern.

3.3.1.3 Abformung

	Mittelwert
Sollwert	385.5
Gestuftes Substrat	387.8
Formeinsatz	387.2
Abgeformte Bank	386.1

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Stufenmessungen aus den verschiedenen Prozessschritten bei der Abformung (Maße in μm)

Auch bei der Herstellung eines Abformwerkzeugs und der anschließenden Abformung bewirken die thermischen Effekte Veränderungen in der Geometrie der mikrooptischen Bank. Wie Tabelle 3.2 zeigt, verkleinert sich die Stufenhöhe zwischen Substrat und Polymerprodukt typischerweise um ca. $1,5 \mu\text{m}$. Die eigentliche Abformung verursacht im Vergleich zur galvanischen Abscheidung des Formeinsatzes

die größeren Veränderungen, da dort sowohl die Prozeßtemperaturen als auch die Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien höher sind. Zum Abformen muß der Formstoff nämlich auf eine Temperatur oberhalb der Glastemperatur erwärmt werden, um ein viskoses und damit fließfähiges Material zu erhalten (z.B. für PMMA $120 \text{ }^\circ\text{C} / 60/$). Beim Abkühlen auf Raumtemperatur schrumpft das Polymer, so daß sich die Geometrie der Struktur verkleinert (z.B. bei PMMA Schrumpf von ca. $0,4 \%$). Durch eine vergrößerte Stufenhöhe des Substrats kann der Schrumpf jedoch kompensiert werden und stellt somit keinen prinzipiellen Strukturierungsfehler dar.

3.3.2 Laterale Präzision

Die laterale Strukturierungsgenauigkeit wird durch Einflüsse der Substratprozesse, des LIGA-Prozesses und durch die Kombination des LIGA-Verfahrens mit den gestuften Substraten -

insbesondere durch die Justage von Maske und Substrat - bestimmt. Die laterale Genauigkeit beim Siliziumätzen wurde bereits in 3.2.1.2 erörtert, bei der Kombination von Lithographie, Galvanik und Diamantfräsen ist sie identisch mit der des LIGA-Prozesses. Die Diskussion beschränkt sich deshalb im Folgenden auf die laterale Genauigkeit des LIGA-Verfahrens und der Kombination von Substraten und Röntgentiefenlithographie.

Für mikrooptische Bänke sind zur sicheren Fixierung der hybriden Komponenten glatte Seitenwände mit hoher Maßtreue notwendig. Um Strukturungenauigkeiten zu vermeiden, werden die Röntgenarbeitsmasken für den LIGA-Prozeß deshalb indirekt strukturiert. Die primäre Mustererzeugung wird von einem Elektronenstrahlschreiber mit sub- μm -Präzision in ca. 5 μm hohen Resists durchgeführt. Die Röntgenzwischenmaske wird anschließend durch niederenergetische Synchrotronstrahlung auf ein Arbeitsmaskensubstrat mit einem PMMA-Resist größerer Höhe (25 μm) umkopiert. Diese Arbeitsmaske wird für die Strukturierung der Produkte verwendet. Veränderungen der lateralen Strukturgeometrie beim LIGA-Verfahren sind aufgrund der Kopie mit hochparallelem Röntgenlicht sehr gering und im wesentlichen auf Maßverluste durch sekundäre und thermische Effekte begrenzt.

3.3.2.1 Maßtoleranzen

Bei der Röntgentiefenlithographie entstehen Maßverluste durch Streustrahlung, die eine Veränderung der Molekulargewichtsverteilung des Resists auch unterhalb der Goldabsorber bewirkt. Eine besonders intensive, niederenergetische Streustrahlung an Maskenmembranen aus Titan verursacht Verrundungen an der Oberfläche von bis zu 5 μm /61/, was bei der Wahl der Strukturhöhe für eine sichere Fixierung der hybriden optischen Komponenten berücksichtigt werden muß. Generell wird bis ca. 1,5 μm hinter der Absorbergrenze eine so große Dosis abgelagert, daß der Resist entwickelt werden kann. Bei galvanisierten Mikrostrukturen tritt entsprechend im Vergleich zum CAD eine Maßvergrößerung von 1 μm pro Kante auf.

Wie bereits in 3.1 dargestellt, können zur Herstellung der Strukturen in größeren Stückzahlen zwei prinzipiell unterschiedliche Abformverfahren verwendet werden: der Spritzguß und das

Substrat	Maßtoleranz
RTL-Produkt (PMMA)	-1,5 μm
RTL-Produkt (Nickel)	+1 μm
Heißprägen	-0,4 %
Spritzguß	-0,4 %
Heißprägen auf Substraten	-0,3 %

Tabelle 3.3: Maßtoleranzen des Faserschachts mikrooptischer Bänke in verschiedenen Prozeßschritten

Heißprägen auf Substrate. Beim Spritzguß werden die in 3.3.1.3 diskutierten Größenveränderungen von 0,4 % auch lateral voll wirksam. Beim Heißprägen dagegen kann die Polymerstruktur wegen der Haftung am Substrat nicht vollständig relaxieren und es

ergibt sich ein kleinerer Schrumpf als beim Spritzguß.

Die Maßtoleranzen der einzelnen Prozeßschritte des LIGA-Verfahrens sind in Tabelle 3.3 nochmals zusammengefaßt. Auch bei der lateralen Strukturierung muß also ein Maßvorhalt berücksichtigt werden, damit die optischen Komponenten von den Haltestrukturen optimal fixiert und positioniert werden.

3.3.2.2 Thermische Verzüge

Beim Umkopieren der Zwischenmaske auf das Arbeitsmaskensubstrat und bei der Röntgentiefenlithographie zur Herstellung des Produkts wird sowohl die Maske als auch das Substrat durch das Überstreichen des Lichtbandes der Synchrotronstrahlung lokal erwärmt. Der thermisch induzierte Verzug ist vom Membranmaterial der Maske und den Absorbern abhängig. Er addiert sich zum bereits vorhandenen, durch die vorausgegangene Prozessierung der Maske verursachten Verzug.

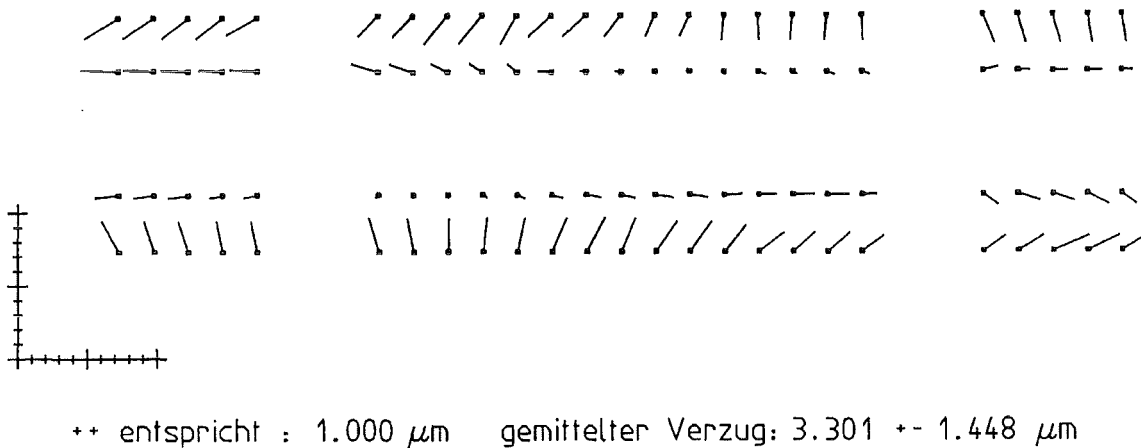


Abbildung 3.9: Laterale Verzüge von PMMA-Strukturen mit 190 μm Resisthöhe auf einem Siliziumsubstrat

Mit dem Meßtisch eines Mikroskops wurden die Verzüge bei Arbeitsmasken und Lithographieprodukten (Polymerstrukturen, Höhe: 190 μm , Siliziumsubstrat) vermessen. Dazu wurde in den beiden lateralen Dimensionen der Abstand von einem festen Punkt in der Mitte des Strukturfelds bestimmt und mit dem Designwert verglichen. In Abbildung 3.9 ist das Ergebnis einer Produktvermessung aufgetragen. In dem maßstäblich vergrößerten Maskenfeld sind an den Meßpunkten (Quadrate) Vektoren eingezeichnet, die Betrag und Richtung des Verzugs an der entsprechenden Stelle wiedergeben. Der gemittelte Fehler beträgt beim Produkt - wie in der Abbildung - ca. 3,5 μm und ca. 2,5 μm für Masken, wenn Titan als Maskenmembranmaterial verwendet wird. Da die Verzüge lokal kaum variieren, sind Betrag

und Richtung benachbarter Vektoren ähnlich. In einer Fläche von der Größe einer typischen optischen Bank (ca. 1 cm x 1 cm) sind die Verzüge deshalb nur noch ca. 1 μm groß.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse muß aber berücksichtigt werden, daß die Verzüge sehr stark vom individuellen Absorbermuster und vom Wärmeleitkoeffizienten des Substratmaterials abhängen, so daß auch bei gleicher Maske sehr unterschiedliche Verzüge entstehen können: Zum Beispiel vergrößert sich der mittlere Verzug bei dem in Abbildung 3.9 dargestellten Beispiel auf 5 μm , wenn bei nur 160 μm Resisthöhe Aluminiumoxidkeramik als Substratmaterial verwendet wird. Dies ist auf die kleinere Wärmeleitfähigkeit und den größeren Temperatúrausdehnungskoeffizienten der Keramik zurückzuführen.

3.3.2.3 Justagepräzision

Die Justierung bei der Röntgentiefenlithographie erfolgt lichtoptisch, indem 2 Justierkreuze (Abstand < 36 mm) auf der Maske mit Justierkreuzen im Substrat unterhalb des mehrere hundert Mikrometer dicken Resists mit Hilfe einer Justiereinheit unter einem Mikroskop zur Deckung gebracht werden [62]. Nach der Justage wird die gesamte Justiereinheit mit Maske und Substrat in den Strahlrohrscanner eingebaut. Winkelfehler beim Einbau der Justiereinheit in den Röntgenscanner können im Vergleich zu systematischen Justierfehlern, die sich durch Verzüge der Masken und der vorstrukturierten Substrate ergeben, vernachlässigt werden.

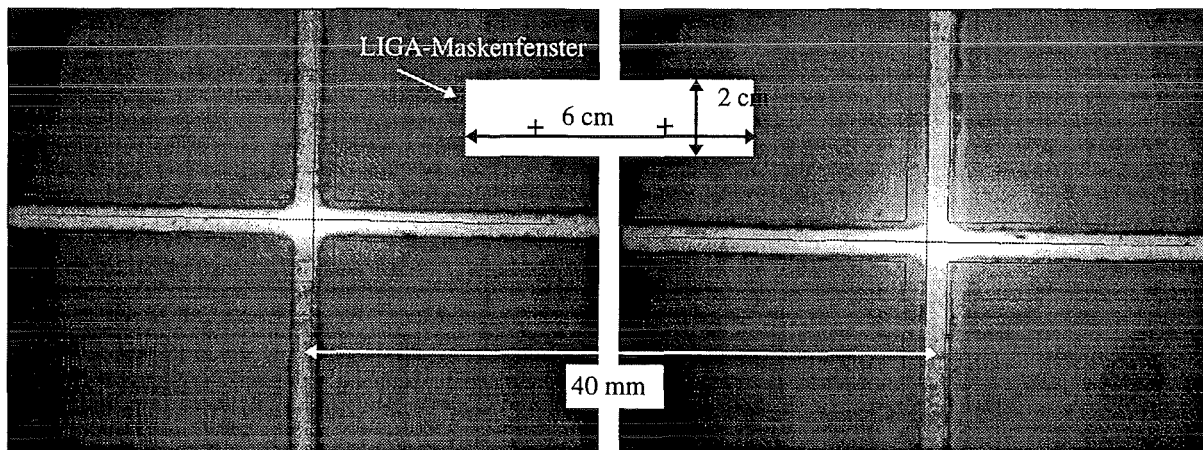


Abbildung 3.10: Justiermarken bei einer fertig justierten Probe vor dem Einbau ins Strahlrohr

Exemplarisch ist in Abbildung 3.10 die Lage der Justierkreuze von Maske und Substrat bei einer fertig justierten Probe vor dem Einbau ins Strahlrohr dargestellt. Das graphische Kreuz zeigt die Position der Justierkreuze der Maske, das Foto die Justierkreuze am Substrat. Ein exaktes Positionieren beider Justiermarken ist wegen der Verzüge nicht möglich. Aus dieser

Darstellung ist für die Kreuze ein Justierfehler von $\pm 5 \mu\text{m}$ in Längsrichtung festzustellen, Verzüge in Querrichtung können dagegen vernachlässigt werden.

Auch zur Justiergenauigkeit wurden Messungen mit dem Mikroskopisch durchgeführt, wobei als Referenzpunkt der einzelnen Messung hier ein lokal benachbarter Punkt am Substrat diente. Es addieren sich deshalb Lagefehler der Referenzpunkte auf dem Substrat, thermische Verzüge vom LIGA-Prozeß und Justierfehler. Bei Berücksichtigung einer statistischen Überlagerung dieser Effekte ergeben sich separierte Justierfehler in der Größenordnung von $5 \mu\text{m}$. Dieser Wert stellt die derzeit erreichbare Grenze der Justiergenauigkeit dar und wird nur durch die Verwendung thermisch stabilerer Membranmaterialien für die Arbeitsmasken - wie z.B. Beryllium - zu verkleinern sein.

3.3.2.4 Vergleich zweier Aufbauvarianten der gestuften mikrooptischen Bank

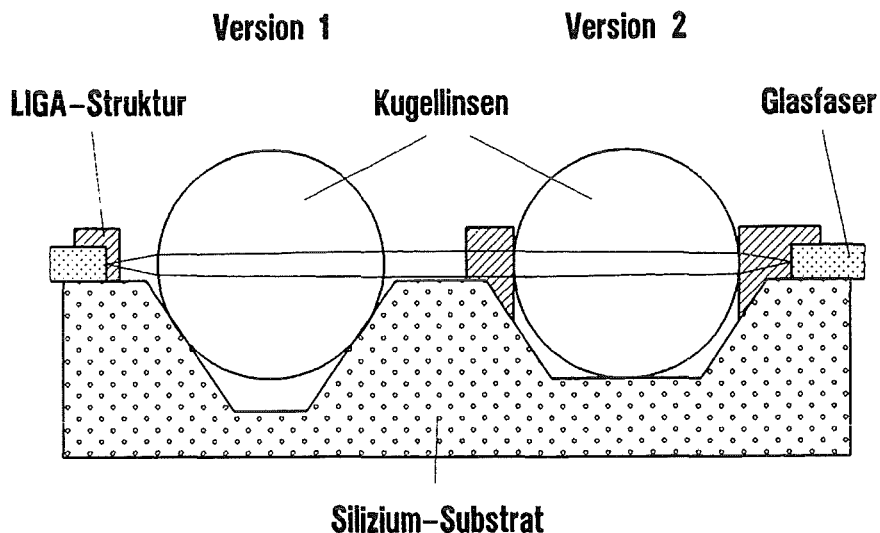


Abbildung 3.11: Aufbauversionen der mikrooptischen Bank am Beispiel eines Siliziumsubstrats

Um trotz dieser Randbedingungen hinreichend genaue mikrooptische Bänke strukturieren zu können, muß eine geeignete Justierstrategie gefunden werden, bei der die Verzüge keine Auswirkungen haben. Zur Herstellung der gestuften mikrooptischen Bank mit dem LIGA-Verfahren wurden deshalb systematische Untersuchungen zu zwei prinzipiell unterschiedlichen Aufbauvarianten durchgeführt, um die optimale Justierstrategie herauszufinden. Bei Variante 1 wird die Position der Kugellinse vollständig, d.h. vertikal und lateral, vom Substrat bestimmt. Bei Variante 2 erfolgt nur eine vertikale Höheneinstellung, aber keine seitliche Fixierung durch das Substrat (Abbildung 3.11). Diese wird ausschließlich durch LIGA-Halterungen bewerkstelligt, die in der zweiten Ebene liegen. In beiden Fällen wird die Faser durch LIGA-Strukturen geführt.

3 DIE HERSTELLUNG EINER MIKROOPTISCHEN BANK MIT DEM LIGA-VERFAHREN

Für beide Aufbauvarianten wurden auf einer Lichtröhre basierende Faserkoppelstrukturen aus PMMA durch Röntgentiefenlithographie auf Silizium-Substraten hergestellt (Abbildung 3.12, Abbildung 3.13).

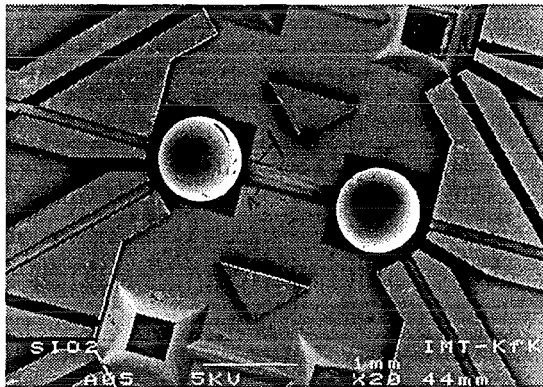


Abbildung 3.12: Bestückter Testwafer der Version 1

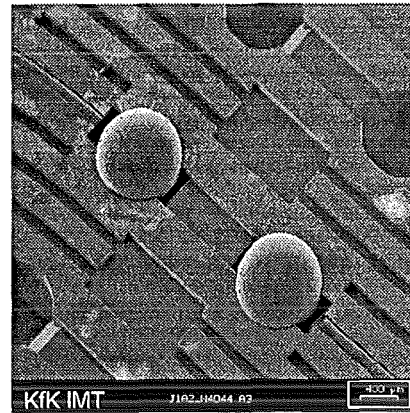


Abbildung 3.13: Bestückter Testwafer der Version 2

	Version 1	Version 2
Fehlerquellen bei Lateralversatz	<ul style="list-style-type: none"> • Substrat • LIGA-Maskenverzug (typ. 3,5 μm) • Justierung (typ. 5 μm) 	<ul style="list-style-type: none"> • LIGA lokal (typ. 100 nm)
Vertikalversatz	Substrat (< 1 μm)	Substrat (< 1 μm)
mittlerer, mechanischer Fehler	$\approx 7 \mu\text{m}$	$\approx 1 \mu\text{m}$
optische Messung (Einfügedämpfung, axial aktive Positionierung)	9 dB	2 dB

Tabelle 3.4: Beiträge zu den Positionsfehlern bei den beiden untersuchten Aufbauvarianten

Wie im vorherigen Kapitel diskutiert, weisen die LIGA-Strukturen aufgrund thermischer Effekte laterale Positionsfehler von ca. $3,5 \mu\text{m} \pm 1,5 \mu\text{m}$ auf (vgl. auch Tabelle 3.4). Der mittlere Fehler vergrößert sich noch durch unpräzise Justierung bei der Bestrahlung und Verzüge des Substrats auf $7 \mu\text{m}$. Dieser statistische Positionsfehler wird bei der Aufbauvariante 1 voll wirksam, da die Fasern relativ zur Linse durch Haltestrukturen aus unterschiedlichen Ebenen positioniert werden. Bei Annahme eines lateralen Versatzes auf nur einer Seite der Lichtröhre wird dadurch eine Dämpfung von ca. 5 dB verursacht. Tritt der volle Versatz auf beiden Seiten auf, so ergibt sich eine Dämpfung von bis zu 27 dB (Kapitel 2). Dabei sind etwaige Zusatzdämpfungen durch eine fehlerhafte vertikale Positionierung durch das Substrat noch nicht berücksichtigt. Messungen an den Faserkoppelstrukturen lieferten mittlere Dämpfungen von 9 dB.

Bei der Aufbauversion 2 spielen die lateralen Positionierfehler des Substrats keine Rolle, da die Kugellinsen nur vertikal durch das Substrat positioniert werden. Durch die damit verbundene parallele Strukturierung der lateralen Haltestrukturen von Kugellinsen und Fasern mit lithographischer Genauigkeit entfällt der Justierfehler. Hier tragen deshalb nur die lokalen Maskenverzüge von ca. 1 μm zur lateralen Justiergenauigkeit bei. Bei Verwendung einer Lichtröhre als Abbildungssystem reduzieren sie sich weiter auf ca. 100 nm, da die Verzüge dann nur noch im Bereich zwischen Fasern und Linsen (max. 1 mm Abstand) zu dämpfungsrelevanten Positionierfehlern führen können. Dies unterstreicht nochmals die Vorteile des Lichtröhren-Konzepts. Die Positionierung der einzelnen Halteelemente innerhalb der LIGA-Ebene liefert also wesentlich bessere Genauigkeiten, die sich in mittleren Einfügedämpfungen von ca. 2 dB widerspiegeln. In diesem experimentell bestimmten Mittelwert sind grundsätzliche Dämpfungsverluste durch Reflexionen an den Grenzflächen der Kugellinsen und der Faserstirnfläche von ca. 1 dB enthalten. Die Zusatzdämpfungen aufgrund prozeßbedingter Fehlpositionierung liegen in derselben Größenordnung.

Mit den letzten beiden Kapiteln sind die Grundlagen erarbeitet, um das modulare mikrooptische Konzept unter Verwendung einer mit dem LIGA-Verfahren hergestellten mikrooptischen Bank erfolgreich in Produkte umzusetzen. Als realistische Beispiele für solche Produkte wurden die beiden Demonstratoren aufgebaut, die in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert werden. Mit den Demonstratoren soll insbesondere gezeigt werden, daß - ausgehend von einer konkreten nachrichtentechnischen Fragestellung - einsatzfähige, industrietaugliche Funktionsmodule nach dem modularen Aufbaukonzept hergestellt werden können. Dazu sind insbesondere die Fragen nach einer reproduzierbaren Abformung und Bestückung der mikrooptischen Bänke, einer mechanisch, thermisch und zeitlich stabilen Aufbau- und Verbindungstechnik und einer industrietauglichen Gehäusung zu klären. Im Sinne einer mikrotechnischen Systemintegration war außerdem die Kompatibilität der mikrooptischen Bank mit anderen mikrotechnischen Komponenten zu untersuchen.

4 Bidirektionales Sende-/Empfangsmodul

In optischen Telekommunikationsnetzen mit Bandbreiten im GHz-Bereich werden kompakte optische Sende- und Empfangsmodule im bidirektionalen Wellenlängenmultiplexbetrieb (WDM) benötigt, mit denen die Anbindung einer Gruppe von sendenden und empfangenden Endteilnehmern an das Übertragungsnetz realisierbar ist (FTTC-, FTTB-Konzept). Durch die Reduzierung der Übertragungskanäle auf eine Faser und der damit erreichten Verringerung der Faserkoppelstellen gewinnt man sowohl wirtschaftliche als auch technische Systemvorteile.

Eine monolithisch integrierte technische Umsetzung eines solchen Moduls ist wegen der Übertragungsfaser nicht möglich. Teilintegrierte Lösungen werden momentan im Labormaßstab untersucht /63/. Die im Rahmen der OPAL-Projekte der Deutschen Telekom in den neuen Bundesländern bereits installierten Sende-/Empfangseinheiten sind jedoch vollständig hybrid aufgebaut. Diese Module werden mit separat gehäusten aktiven mikrooptischen Komponenten und einer mikrooptischen Bank aufgebaut, die mit klassischen mechanischen Methoden (Drehen, Fräsen) hergestellt wird, und die Faser sowie ein wellenlängenselektives Filter zur Wellenlängentrennung enthält /64/. Nachteilig an einem solchen Aufbau sind vor allem die hohen Kosten wegen der individuellen Strukturierung der mikrooptischen Bank. Ziel bei der Realisierung eines Bidirektionalen Duplexers im Rahmen dieser Arbeit war deshalb vor allem der Aufbau eines kostengünstigen Moduls auf der Basis einer abgeformten mikrooptischen Bank und billigen hybriden Komponenten. Zum Aufbau dieses Demonstrators /65/ werden deshalb marktverfügbare passive und bereits TO-gehäuste aktive optische Elemente verwendet.

4.1 Konzeption des Moduls

4.1.1 Beschreibung des Moduls

In Abbildung 4.1 ist der prinzipielle Aufbau des Bidirektionalen Duplexers auf der Basis des modularen Aufbaukonzepts unter Verwendung einer mit dem LIGA-Verfahren hergestellten mikrooptischen Bank dargestellt.

Der Duplexer enthält eine PIN-Photodiode, eine Laserdiode mit Monitor diode, ein wellenlängenselektives Filter und die Monomodefaser für die optische Signalübertragung. Durch eine mikrooptische Aufbauplatte werden die Kugellinsen, das Wellenlängenfilter und die Monomodefaser so angeordnet, daß das von der Laserdiode abgestrahlte Licht der Wellenlänge λ_1 durch den Filter hindurch auf die Stirnfläche der Faser fokussiert wird. Das

von der Faser abgestrahlte Signal der Wellenlänge λ_2 wird über die zweite Kugellinse und durch eine Reflexion an der Filterplatte auf die Photodiode abgebildet. Die aktiven Komponenten werden erst beim Einbau ins Gehäuse relativ zur optischen Bank justiert und anschließend am Gehäuse fixiert. Eine zusätzliche hermetische Gehäusung des gesamten Sende-/Empfangsmoduls ist also nicht notwendig.

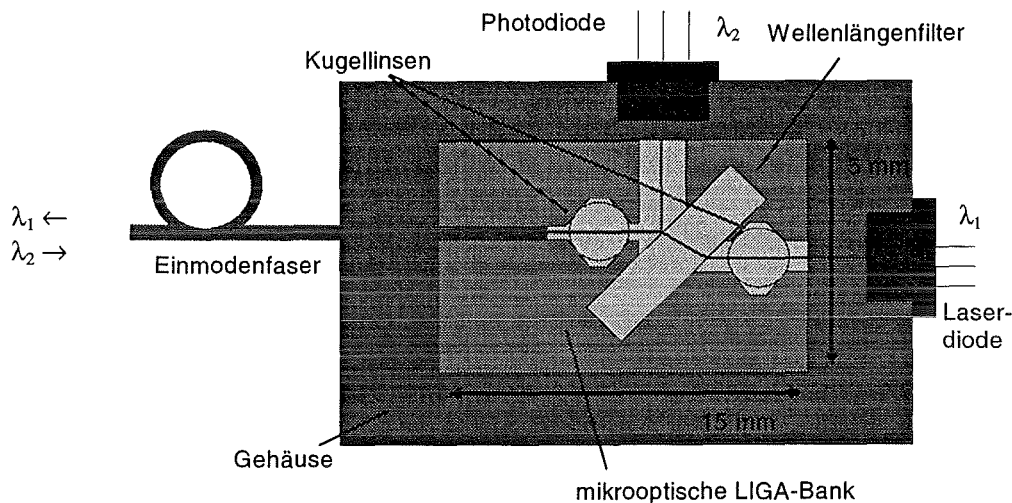


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau der Bidirektionalen Sende- und Empfangseinheit

4.1.2 Spezifikationen und Komponenten

Aufgrund der Applikationen im Bereich des Endanwenders ist der optische Duplexer für die Signalübertragung innerhalb der Amtsverkabelung mit Übertragungsraten von 622 Mbit/s ausgelegt, was der Bitrate der zweiten Ebene von SDH-Systemen /66/ entspricht. Die bidirektionale Signalübertragung wird mit den Wellenlängen $\lambda_1=1310$ nm und $\lambda_2=1550$ nm realisiert. Weitere für eine Industrietauglichkeit relevanten Spezifikationen sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt /67/. Die Spezifikationen des Moduls definieren indirekt auch die meisten Spezifikationen der hybriden Komponenten. Eine Übersicht über die für das Sende-/Empfangsmodul verwendeten Einzelemente ist in Tabelle 4.2 gegeben.

Die spektralen Bandbreiten der Dioden und der Faser müssen der Bitrate des Systems angepaßt sein. Für die Realisierung dieses Systems ist die Verwendung

Modul	Werte
Wellenlängen	1310 nm/1550 nm
Bit-Rate	622 Mbit/s
Betriebstemperatur	-20°C ... +85°C
Übersprechdämpfung	> 30 dB
Laserdiode	
Optische Leistung in der Faser	-3 dBm
Schwellstrom	< 50 mA
Bandbreite	> 1 GHz
Temperaturbedingte Leistungsänderung	± 1 dB
Photodiode	
Empfindlichkeit	0,4 A/W
Bandbreite	> 1 GHz

Tabelle 4.1: System Spezifikationen für den Bidirektionalen Duplexer

von *Fabry-Perot*-Lasern ausreichend, es müssen jedoch in jedem Fall Einmodenfasern verwendet werden. Um große Justiertoleranzen und kleine Aberrationen beim Laser zu erzielen, ist die Verwendung von gehäusten Dioden mit integrierter Linse notwendig. Nach einer Marktrecherche wurden die beiden Laserdioden SFH 4410 und SFH 4610 ausgewählt, die bei niedrigem Preis hinreichende technische Leistungsdaten bieten. Da beide Laserdioden zum Zeitpunkt des Designs gerade erst auf dem Markt eingeführt wurden, mußte das optische Design mit den Datenblattwerten ($w_0=5 \mu\text{m}$) erstellt werden.

Aufgrund der bei *Gaußstrahlen* begrenzten Vergrößerung von optischen Systemen (Kapitel 2) wurden zur Abbildung Kugellinsen mit 900 μm Durchmesser ausgewählt. Als Wellenlängenfilter eignen sich kommerziell verfügbare Plättchen mit dielektrischer Antireflexbeschichtung, hoher Transmission ($< 96\%$) und kleinen geometrischen Dimensionen (3 mm x 3 mm x 1 mm).

Komponente	Funktion	Typ	Material	Spektrales Verhalten	Optische Kenngröße	Abmessung	Bemerkungen
Aufbauplatte	optische Bank	LIGA	Kunststoff			Stufenhöhe =387,5 μm +/-0,5 μm	Herstellung durch Mikroabformung, gestufte Platte
Laserdioden	Sender	Siemens SFH 4410	InGaAsP/InP	$\lambda=1300 \text{ nm}$	$w_0= 5 \mu\text{m}$ (Sollwert)	$\varnothing 4,8 \text{ mm}$	TO 18-Gehäuse, integrierte Optik
		Siemens SFH 4610	InGaAsP/InP	$\lambda=1550 \text{ nm}$	$w_0= 5 \mu\text{m}$ (Sollwert)	$\varnothing 4,8 \text{ mm}$	TO 18-Gehäuse, integrierte Optik
Photodiode	Detektor	SEL 3AG 03187 AAAA	InGaAs-PIN	$\lambda=1200... 1700 \text{ nm}$	$\varnothing 90 \mu\text{m}$ Detektorfläche	$\varnothing 4,7 \text{ mm}$	TO 46-Gehäuse
Strahlteiler	Wellenlängenfilter	1300 nm	BK 7	T > 98 % (1300 nm), R > 96 % (1550 nm)		3 mm x 3 mm x 1 mm	einseitige dielektrische Beschichtung
		1550 nm	BK 7	T > 95 % (1550 nm), R > 96 % (1300 nm)		3 mm x 3 mm x 1 mm	einseitige dielektrische Beschichtung
Kugellinsen	Abbildung		SK 2		f=606 μm n=1,589 (für 1530 nm)	$\varnothing 900\mu\text{m}$ +/-0,5 μm	
Monomode-faser	Datenübertragung	Siecor SMF 1528	Silikat	$\alpha=0,4 \text{ dB/km}$ (1300 nm) $\alpha=0,22 \text{ dB/km}$ (1550 nm)	$w_0=5,6 \mu\text{m}$ (1300 nm) $w_0=5,8 \mu\text{m}$ (1550 nm)	$\varnothing 125\mu\text{m}$ +/-2 μm Konzentrität besser 1 μm	Länge=2200 m

Tabelle 4.2: Optische Komponenten des Duplexers

4.1.3 Design und Prozessierung

Unter Berücksichtigung der Kenndaten der Komponenten wurde mit der *Gaußstrahltheorie* das optische Design des Duplexers berechnet (Abbildung 4.2). Um die von der Spezifikation geforderte optische Leistung von -3 dBm in der Faser zu erreichen, muß der unter 45° im Strahlengang positionierte Filter kollimiert durchstrahlt werden, um Streuverluste und einen großen Öffnungsfehler zu vermeiden. Die Laserdiode (Wellenlänge λ_1) ist deshalb so positioniert, daß die Strahltaile genau in der vorderen Brennebene der ersten Kugellinse liegt und der Lichtstrahl maximal kollimiert wird. Das Filter sitzt im Bereich der Strahltaile des kollimierten Strahls.

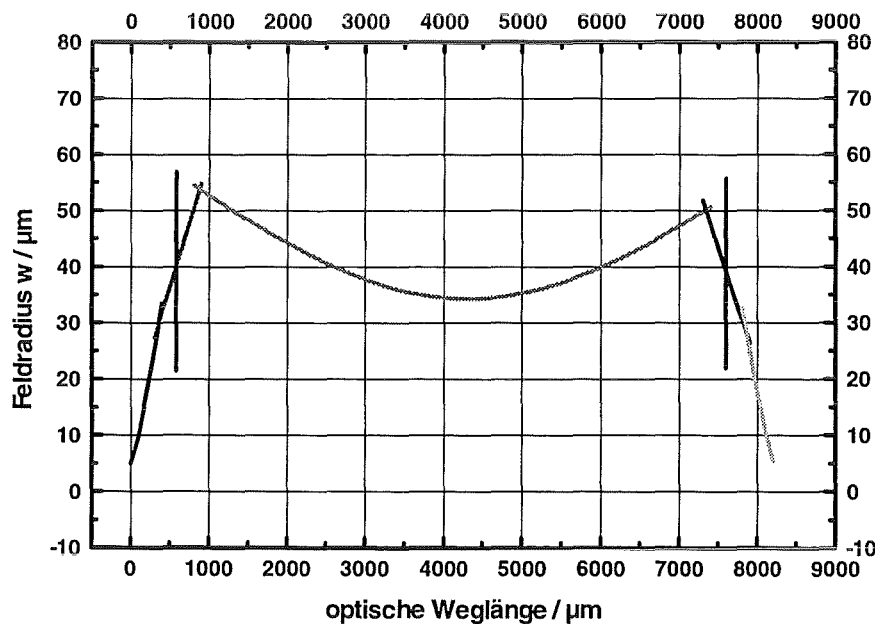


Abbildung 4.2: Berechneter Feldverlauf im Duplexer. Die Lage der Hauptebenen der Kugellinsen wird durch die beiden Linien gekennzeichnet. Die Unstetigkeiten im Strahlverlauf markieren die Position der Scheitelpunkte der Kugellinsen.

Der Abstand der beiden Kugellinsen ist so gewählt, daß die auf die Faserstirnfläche abgebildete Feldverteilung der Fasergrundmode entspricht. Die Faserstirnfläche sitzt dann nahe der hinteren Brennebene der zweiten Linse, so daß ankommendes Licht von der Faser (Wellenlänge λ_2) ebenfalls weitgehend kollimiert wird. Daher ist die Verwendung einer weiteren Kugellinse nach der Umlenkung an der Filterplatte zur Abbildung des von der Faser abgestrahlten Lichts auf die Photodiode unnötig. Außerdem ermöglicht der kollimierte Lichtstrahl eine extrem unkritische Positionierung des Detektors. Eine hohe Übersprechdämpfung zwischen Laserdiode und Photodiode wird durch den Winkel des dielektrischen Filterplättchens mit der optischen Achse gewährleistet.

Schließlich müssen die Reflexionen aus dem optischen System möglichst gering sein, um ein Verstimmen des Resonators der Laserdiode zu vermeiden. Als Grenze der Rückflußdämpfung wurden für den Demonstrator trotzdem nur die *Fresnel*reflexe von der ersten Kugellinse gewählt (16 dB), da sich dieser Wert durch entspiegelte Linsen ohne weiteren prinzipiellen Aufwand drastisch reduzieren läßt.

Beim Bidirektionalen Sende-/Empfangsmodul werden die beiden ersten Prozeßschritte des LIGA-Verfahrens zur Herstellung der gestuften Substrate verwendet. Durch die erste Lithographie wird dann das Negativ des Plateaumusters strukturiert. Das mikrotechnische Design der zweiten Ebene wird hauptsächlich durch den optischen Strahlengang festgelegt (s.u.). Daneben müssen aber auch prozeßtechnische Nebenbedingungen (z. B. Spannungsrißvermeidung) und Gesichtspunkte der Montage (Bestückbarkeit) berücksichtigt werden.

Abbildung 4.3 zeigt das Layout der mikrooptischen Bank. Auf der linken Seite der mikrooptischen Aufbauplatte ist der Faserschacht zu erkennen, in den die Monomodefaser eingelegt wird. Um eine definierte vertikale Höhe der optischen Achse zu gewährleisten, wird die Faser auf dem Plateau der ersten Strukturierung positioniert, dessen Höhenniveau im Idealfall $387,5 \mu\text{m}$ über dem Höhenniveau des übrigen Substrates liegt. Die nachfolgenden Strukturen dienen als Halteelemente für die Kugellinsen und das Wellenlängenfilter. Durch das LIGA-Verfahren werden bei diesem Funktionsmodul also keine funktionalen Komponenten des optischen Systems hergestellt, sondern ausschließlich Haltestrukturen für die passiven optischen Komponenten. 16 solcher Strukturen werden parallel auf einem Substrat gefertigt.

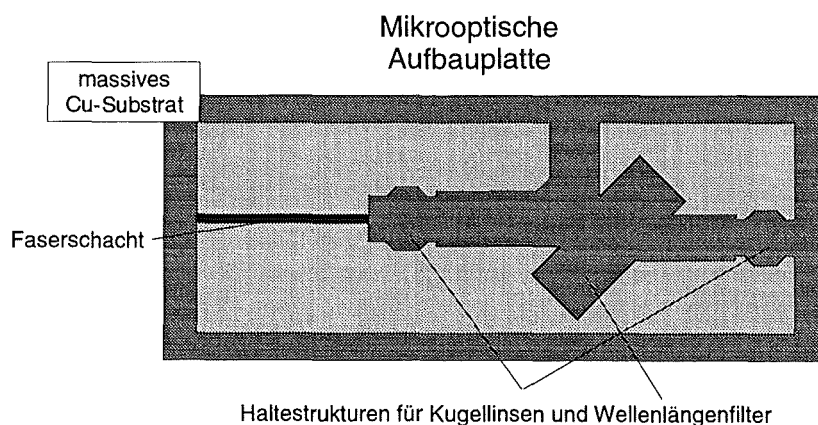


Abbildung 4.3: Design der mikrooptischen Aufbauplatte mit Halteelementen für $900\mu\text{m}$ -Kugellinsen, Wellenlängenfilter und Monomodefaser.

Durch das modifizierte LIGA-Verfahren wurde auf einem gestuften Substrat ein Formeinsatz galvanisch aufgebaut. Dieser Formeinsatz wurde verwendet, um Strukturen aus PMMA und Polycarbonat durch Spritzguß herzustellen und Strukturen aus PMMA auf Keramiken abzu-

prägen. Für die im folgenden beschriebenen Arbeiten wurden diese abgeformten Strukturen eingesetzt.

4.2 Qualifizierung der mikrooptischen Bank

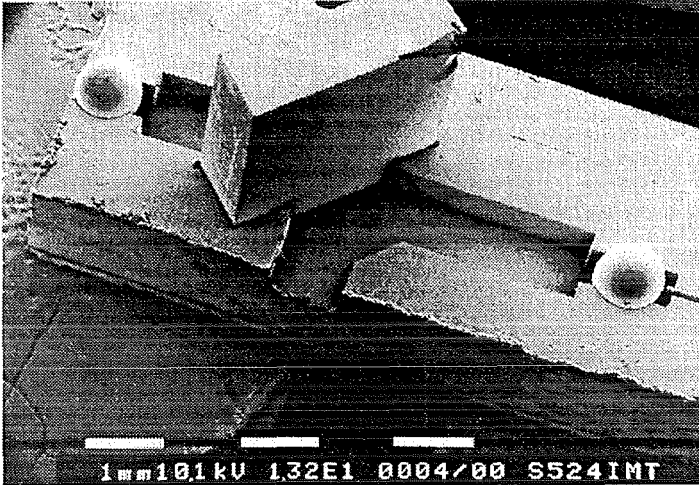


Abbildung 4.4: Bestückte mikrooptische Bank des Bidirektionalen Send-/Empfangsmoduls

Für die Charakterisierung der mikrooptischen Bänke wurden die passiven mikrooptischen Komponenten durch das Untermaß der Preßpassungen fixiert (Abbildung 4.4). Mit den so bestückten Bänken war eine flexible und sichere Charakterisierung mit dem Versuchsaufbau aus 2.3 möglich.

In Tabelle 4.3 sind die gemessenen Leistungsdaten den geforderten Daten für das Gesamtsystem und den theoretischen Werten gegenübergestellt. Dabei ist die Wellenlänge der Laserdiode mit λ_1 bezeichnet, die Wellenlänge des durch die Faser zugeführten Lichts mit λ_2 . Die Länge der Glasfaser betrug bei diesen Messungen ca. 2200 m, eine mittlere Dämpfung der Faser von 0,4 dB/km (1300 nm) bzw. 0,22 dB/km (1550 nm) ist bei den angegebenen Dämpfungen schon berücksichtigt.

In Tabelle 4.3 sind die gemessenen Leistungsdaten den geforderten Daten für das Gesamtsystem und den

Parameter	Meßwerte		Sollwerte	Theorie
	$\lambda_1= 1300 \text{ nm}$ $\lambda_2= 1550 \text{ nm}$	$\lambda_1= 1550 \text{ nm}$ $\lambda_2= 1300 \text{ nm}$		
Einfügedämpfung zwischen Laserdiode und Faser	5,0 dB	9,5 dB	10 dB	< 2 dB
Einfügedämpfung zwischen Faser und Photodiode	0,63 dB	0,69 dB	3 dB	0,7 dB
Übersprechdämpfung zwischen Laserdiode und Photodiode	40,2 dB	34,0 dB	30 dB	
Rückflußdämpfung	16 dB		14 dB	14 dB

Tabelle 4.3: Optische Leistungsdaten des Meßaufbaus im Vergleich zu den Sollwerten des Moduls

Die Einfügedämpfungen LD/Faser sind durch eine aktive Justage der Laserdiode bei einer festen, optimierten, axialen Position der Faser erzielt. Bei 1300 nm wird der Minimalwert von 5,3 dB bei einem Abstand zwischen Laserdiode und Strukturkante von ca. 0,9 - 1 mm

gemessen. Bei 1550 nm wird eine minimale Einfügedämpfung von 9,5 dB bei einem Abstand von ca. 2,3 mm erreicht. Bei geringeren Abständen werden jeweils schlechtere Werte gemessen. Der Abstand der Faser zum Scheitel der Kugellinse beträgt bei beiden Wellenlängen 220 μm .

In der Position mit der minimalen Einfügedämpfung zwischen LD und Faser bleibt die Faser zur Bestimmung der Einfügedämpfung Faser/Photodiode (ca. 0,7 dB) fixiert. In derselben Konfiguration wird auch die von der Laserdiode in die Photodiode quergekoppelte Leistung gemessen und aus deren Verhältnis zur gesamten Abstrahlleistung der Laserdiode die Übersprechdämpfung berechnet.

Wie Tabelle 4.3 zeigt, werden die geforderten Leistungsdaten durch die mikrooptische Bank erfüllt bzw. teilweise sogar deutlich übererfüllt. Da die Sollwerte auf das Gesamtsystem bezogen sind, ergibt sich außer bei der Einfügedämpfung der 1550 nm-Diode noch eine gewisse Leistungsreserve für die Montage des Moduls. Mit Ausnahme der Einfügedämpfungen entsprechen die Daten auch den theoretischen Erwartungen aus dem Design. Die Einfügedämpfung zwischen Faser und Photodiode errechnet sich aus dem Überlappintegral von abgestrahltem Feld und Chipfläche. Die Dämpfung von 0,7 dB ergibt sich aus der beugungsbedingt nicht vollständigen Kollimierung. Das Übersprechen zwischen LD und Photodiode wird aufgrund der Filterstellung rein durch Streulicht verursacht, was den extrem niedrigen Wert erklärt. Die Rückflußdämpfung ist wegen der Kugelgeometrie der Linse kleiner als der *Fresnel*wert für senkrechte Inzidenz.

Die theoretisch erwartete Einfügedämpfung LD/Faser liegt aufgrund von *Fresnel*reflexionen an den optischen Grenzflächen, Aberrationen am Strahlteiler und das nicht exakt *gauß*förmige Abstrahlprofil der LD bei einem Wert von < 2 dB. Die gemessenen Werte weichen davon jedoch erheblich ab und sind darüber hinaus noch stark abhängig von der Wellenlänge der Laserdiode. Um diese Diskrepanz zu klären, wurden über die Intensitätsmessungen hinaus ausführliche Felduntersuchungen durchgeführt (vgl. 2.3) und der Strahlverlauf im Duplexer ermittelt. Außerdem wurde nach den einzelnen optischen Komponenten jeweils die integrale Leistung ermittelt, um die durch die Abweichungen verursachten Leistungsverluste zu bestimmen.

Den gemessenen Strahlengang im Duplexer zeigt Abbildung 4.5. Die Lage der Hauptebenen der Kugellinsen und der Faser ist markiert. Im Bereich der Faser sind Abweichungen bei den Meßpunkten aufgrund der Aperturbegrenzung der verwendeten Mikroskopobjektive zu erkennen.

Die Strahltaile der Laserdioden weist in allen Fällen gegenüber dem Datenblatt einen deutlich zu großen Wert ($w_0=15 \mu\text{m}$) auf, so daß der für die spezifizierte Strahltaile von $5 \mu\text{m}$ berechnete und im Design vorgegebene Strahlengang nicht mehr den optimalen Lichtweg wiedergibt. Die große Divergenz zwischen den Linsen führt zu einer Überblendung der zweiten Kugellinse und damit zu Koppelverlusten. Durch den zu großen Felddurchmesser im Bereich der Apertur ergibt sich außerdem in der korrespondierenden *Fourierebene* auf der Faserstirnfläche ein zu kleiner Felddurchmesser ($w_0=3,7 \mu\text{m}$) und damit ein weiterer Verlust durch die fehlende Modenfeldanpassung.

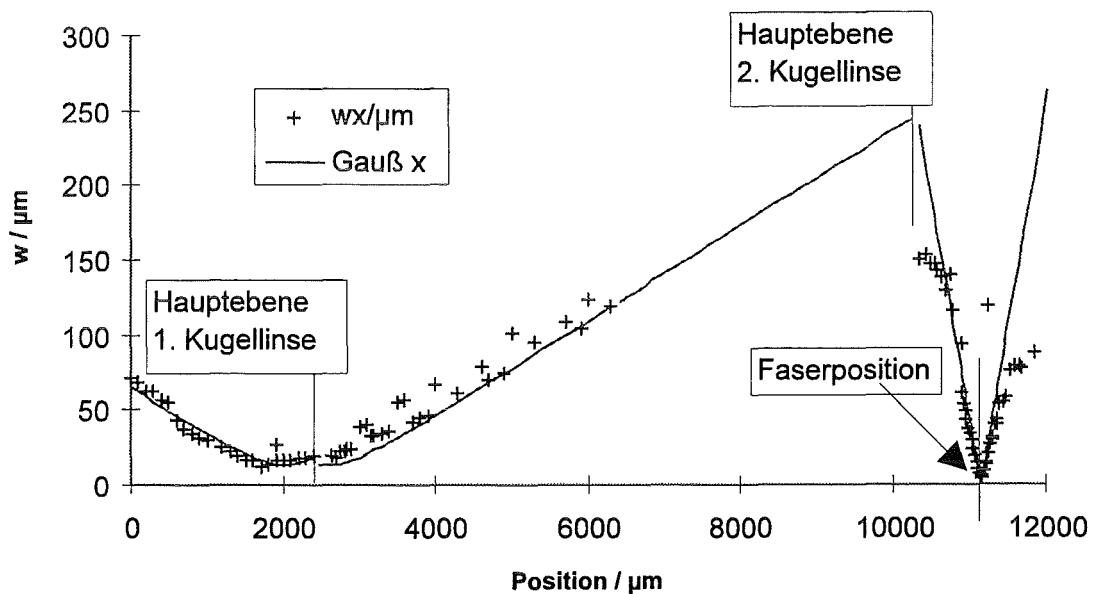


Abbildung 4.5: Feldverlauf im Duplexer für 1300 nm

	Komponente		1.Kugellinse	Strahlteiler	2.Kugellinse	Faser
Messung	Gesamtdämpfung nach der Komponente	Dämpfung / dB	0.60	0.92	2.43	5.00
	Einzelverlust an der Komponente	Dämpfung / dB	0.60	0.32	1.51	2.57
Theorie (Einzelverluste)	Fresnelverluste	Dämpfung / dB	0.48	0.09	0.48	0.27
	Koppelverluste	Dämpfung / dB				2.16
	Theoretische Summe	Dämpfung / dB	0.48	0.09	0.48	2.43
Zusatzverluste		Dämpfung / dB	0.12	0.23	1.03	0.14

Tabelle 4.4: Gemessene Dämpfungen nach den einzelnen Komponenten des Duplexers bei 1300 nm

Die Ergebnisse der integralen Leistungsmessungen unterstreichen die Ergebnisse aus den Feldmessungen.

Tabelle 4.4 zeigt im oberen Teil die nach den einzelnen optischen Elementen gemessenen Gesamtdämpfungen und die daraus berechneten Dämpfungen durch die Einzelkomponenten bezogen auf die gesamte von der Laserdiode abgestrahlte Leistung. Wie aus den Abstrahlmessungen erwartet, sind die Einzeldämpfungen bei der zweiten Kugellinse und bei der Kopplung auf die Faser besonders groß. Im mittleren Teil der Tabelle sind für die Einzelkomponenten die theoretischen Daten von *Fresnel*verlusten an den optischen Grenzflächen und der Koppelverlust an der Faser durch die Radianfehlpassung der Moden aufgelistet. Wie in der letzten Zeile der Tabelle zu erkennen ist, ergeben sich überall geringe Zusatzverluste durch die außer am Scheitel nicht senkrechte Inzidenz. Die Zusatzdämpfung von 1 dB bei der zweiten Kugellinse ist durch deren Überstrahlung verursacht. An der Faser entstehen neben den berechneten Koppelverlusten Mehrverluste durch Abweichungen des eingestrahlten Feldes von der exakten *Gauß*verteilung.

Insgesamt können also die bei der mikrooptischen Bank auftretenden Verluste sehr gut erklärt werden, wenn man die gemessenen Feldverteilungen zugrunde legt. Der Hauptgrund für die über 2 dB liegenden Zusatzdämpfungen liegt in der Radianfehlpassung bei der Kopplung in die Einmodenfaser, die durch die zu große Strahltaile der LD hervorgerufen wird. Messungen der Einfügedämpfung zwischen LD und Faser unter Verwendung eines anderen Diodentyps ($w_0 = 10 \mu\text{m}$, Dämpfung 4,1 dB) bestätigen, daß das Design unter Verwendung einer angepaßten Diode voll verwendbar ist. Die praktische untere Grenze der Einfügedämpfung, die durch *Fresnel*verluste und Abweichungen des Modenfelds der Laserdiode vom exakten *Gauß*profil verursacht wird, liegt bei ca. 2,5 dB und konnte mit einer Mehrmodenfaser bestimmt werden [68].

4.3 Die Aufbau- und Verbindungstechnik des Moduls

Um grundlegende Erkenntnisse über die industrielle Umsetzbarkeit des modularen mikrooptischen Konzepts zu gewinnen, wurde mit der mikrooptischen Bank ein Produktprototyp aufgebaut. Die prozeßtechnische Reproduzierbarkeit der Leistungsdaten der mikrooptischen Bank sowie ihre geringe Abhängigkeit von Toleranzen der passiven hybriden Komponenten sind die Voraussetzung für eine erfolgreiche Aufbau- und Verbindungstechnik. Durch den Nachweis konkurrenzfähiger technischer Daten auch beim gehäusten Modul und seiner Temperaturstabilität kann der Nachweis der Industrietauglichkeit geführt werden.

4.3.1 Toleranzuntersuchungen

4.3.1.1 Prozeßstabilität

Die optische Vermessung der mikrooptischen Bank ist eine sehr empfindliche Meßmethode, um die Stabilität des Fertigungsprozesses charakterisieren zu können. Für die folgende Statistik wurde deshalb bei fünf verschiedenen Nutzen jeweils die gleiche Struktur mit den gleichen passiven Elementen bestückt und die Einfügedämpfung zwischen der 1300 nm-Laserdiode und der Monomodefaser gemessen.

	SO523	SO524	SO525	SO526	SO527
Einfügedämpfung (LD-Faser)	5,0 dB	5,2 dB	5,1 dB	5,7 dB	5,4 dB

Tabelle 4.5: Einfügedämpfungen für verschiedene Nutzen ($\lambda=1300$ nm)

Aus den Meßwerten ergibt sich für die Einfügedämpfung ein mittlerer Wert von 5,28 dB mit einer Standardabweichung von +/- 0,12 dB. Dies entspricht mechanischen Toleranzen im Sub-Mikrometerbereich und dokumentiert die sehr gute prozeßtechnische Reproduzierbarkeit der mikrooptischen Bank.

4.3.1.2 Toleranzen verursacht durch passive Komponenten

Ein weiterer wichtiger Punkt für eine industrielle Umsetzung des modularen mikrooptischen Konzepts ist eine geringe Abhängigkeit der technischen Leistungsdaten von mechanischen Toleranzen der hybriden, passiven Komponenten. Um deren Einfluß auf die Einfügedämpfungen zu ermitteln, muß hier die gleiche Duplexerstruktur mit verschiedenen Sätzen von passiven Komponenten bestückt werden. Die Ergebnisse der Messungen der Einfügedämpfung Laserdiode/Faser bei 1550 nm sind in Tabelle 4.6 aufgeführt. Die Struktur wurde nacheinander mit 5 Sets Kugellinsen und 2 Wellenlängenfiltern (Strahlteilern) bestückt.

	Kugellinsen				
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5
Strahlteiler 1	10,6 dB	9,7 dB	9,5 dB	10,0 dB	11,9 dB
Strahlteiler 2	10,0 dB	10,8 dB	11,2 dB	11,6 dB	16,8 dB

Tabelle 4.6: Einfügedämpfung für verschiedene optische Komponenten ($\lambda=1550$ nm)

Die Messungen beim 1. - 4. Kugellinsenset ergaben vergleichbare Ergebnisse. Ab der Messung mit dem 5. Set wies die LIGA-Struktur bereits starke Abnutzungserscheinungen auf. In den beiden Meßreihen wurden deshalb bei gleichem Referenzwert schlechtere Ergebnisse als bei der vierten Messung erreicht. Diese begrenzte mechanische Belastbarkeit der

mikrooptischen Bank ist insofern unproblematisch, als bei einer industriellen Fertigung jede mikrooptische Bank nur einmalig bestückt wird.

Betrachtet man aus diesen Gründen nur die beim 1. - 4. Set Kugellinsen gemessenen Einfügedämpfungen der Laserdiode in die Faser, so ergibt sich ein mittlerer Dämpfungswert von 10,4 dB mit einer durch die Filter bedingten Standardabweichung von 0,5 dB und einer durch die Kugellinsen bedingten Standardabweichung von 0,2 dB. Die etwas größere Abweichung bei den Filtern ist auf deren im Vergleich zu den Kugellinsen komplexere Montage zurückzuführen. Die aus der Standardabweichung der Kugellinsen rückgerechnete mechanische Toleranz entspricht der Herstellerangabe (0,5 µm). Damit ist gezeigt, daß auch bei hybriden mikrooptischen Systemen die Toleranzen in den technischen Daten kleingehalten werden können, wenn die hybriden Komponenten eine hinreichende Präzision besitzen. Das hybride Konzept stellt dann eine Alternative zur Integrierten Optik dar.

4.3.1.3 Justiertoleranzen der aktiven Komponenten

Schließlich wurden als Vorbereitung der Gehäusung und der Integration der aktiven Komponenten für beide Dioden die Justiertoleranzen in axialer und lateraler Richtung sowie für die Faser ausschließlich jene in axialer Richtung bestimmt. Diese Werte definieren die Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik bei der Fixierung der aktiven Komponenten und der Faser. Als Kriterium für die Justiertoleranzen wurde die 3 dB-Breite gewählt, innerhalb der der gemessene Dämpfungswert um 3 dB relativ zum Optimalwert ansteigt. Alle Messungen wurden an einer Struktur durchgeführt, in die die passiven Komponenten fest fixiert waren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.7 zusammengefaßt.

	Substrat	SO518/520	SO522
	Struktur	D4	D4
Wellenlänge	LD	1550 nm	1300 nm
	PD	1300 nm	1550 nm
Toleranzen	LD lateral	+ -9 µm/3 dB	+ -6,5 µm/3 dB
	LD axial	+ -600 µm/3 dB	+ -300 µm/3 dB
	PD lateral	+ -50 µm/3 dB	+ -60 µm/3 dB
	PD axial	+ -3 mm/1 dB	+ -3,5 mm/1 dB
Faser axial	bei LD	+ -110 µm/3 dB	+ -100 µm/3 dB
	bei PD	+ -300 µm/3 dB	+ -380 µm/3 dB

Tabelle 4.7: Toleranzen für die AVT des Send-/Empfangsmoduls

Die axialen Toleranzen der Laserdioden liegen bei einigen hundert Mikrometern. Die größeren 3 dB-Breiten für die 1550 nm-Laserdiode im Vergleich zur 1300 nm-Diode lassen sich durch das unterschiedliche Abstrahlverhalten der Laserdioden erklären. Mit nur wenigen

Mikrometern sind die Justiertoleranzen in lateraler Richtung jedoch wesentlich kritischer als jene in axialer Richtung.

Die Justiertoleranzen der Photodiode wurden bei der optimierten Faserposition der LD-Faser-Kopplung bestimmt. Der axiale Abstand der Photodiode ist aufgrund der Kollimation vollkommen unkritisch (einige Millimeter). Die Position für die geringste Einfügedämpfung liegt am Strukturrand der mikrooptischen Bank. Die laterale 3 dB-Breite der Einfügedämpfung in dieser Position für 1300 nm und 1550 nm liegt in der Größenordnung 0,1 mm und stellt ebenfalls kein Problem für die AVT dar.

Der Einfluß der Faserposition wurde sowohl bei der Einfügedämpfung zwischen Laser und Faser als auch zwischen Faser und Photodiode untersucht. Bei allen Messungen ist die optimale Position der Faser 220 μm vom Linsenscheitelpunkt entfernt. Die 3 dB-Breiten liegen für die Kopplung Laserdiode/Faser bei 0,1 mm und für die Kopplung Faser/Photodiode bei 0,3 mm.

Die ermittelten Positioniertoleranzen der Dioden sind relativ unkritisch und stellen mit Ausnahme der lateralen Position der Laserdioden keine extremen Ansprüche an die AVT. Die Montage der Laserdiode am Gehäuse erfordert jedoch eine präzise Positionierung sowie eine geeignete, verzugsfreie Verbindungstechnik, damit die niedrige Einfügedämpfung der mikrooptischen Bank auf das Gesamtsystem übertragen werden kann.

4.3.2 Techniken zur AVT des Moduls /69/

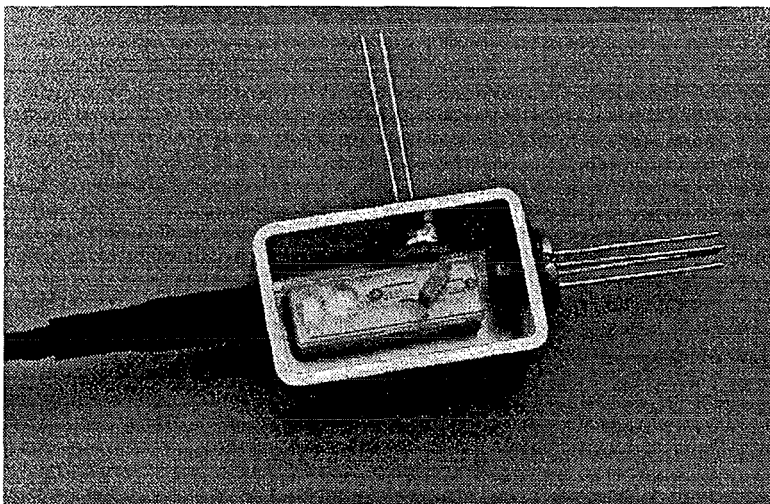


Abbildung 4.6: Montiertes Sende-/Empfangsmodul /70/

Beim Duplexer muß das Gehäuse der unterschiedlichen Höhe von mikrooptischer Bank und TO-gehäusten aktiven Komponenten Rechnung tragen. Dazu wird ein industrielles Standardgehäuse aus Kovar /71/ um einen Sockel ergänzt, welcher auf dem Grund der Gehäusewanne festgelötet ist.

Um das System zu montieren, wird die mikrooptische Bank zunächst auf diesem Sockel aufgeklebt. Dadurch wird die Handhabung der mikrooptischen Bank zur Bestückung der passiven optischen Komponenten erheblich vereinfacht. Um den Montageprozeß zu erleichtern, insbesondere aber um ein Ein-

kleben der mikrooptischen Bank mit der für die Komponenten verlangten Genauigkeit zu erreichen, wurde bei einem der Industriepartner eine halbautomatische Montagestation konstruiert. Mit Hilfe dieser Station läßt sich eine Winkeltoleranz von $0,2^\circ$ und eine Genauigkeit von $15\ \mu\text{m}$ bzw. $20\ \mu\text{m}$ für den vertikalen und horizontalen Einbau der mikrooptischen Bank erreichen /72/. Die Toleranzen sind zwar deutlich größer als die in 4.3.1.3 spezifizierten Grenzwerte, durch die aktive Justage der aktiven Komponenten ist diese Genauigkeit für die Montage des Duplexers aber ausreichend.

Auch die passiven mikrooptischen Komponenten werden unter Verwendung von UV-härtenden Klebern hybrid in die optische Bank eingeklebt. Sie werden ohne weitere Justierung von Halteelementen der mikrooptischen Bank positioniert. Um ein definiertes Einsetzen der Kugellinsen und damit eine definierte Höhenposition zu erreichen, wurde eine Einpreßvorrichtung aufgebaut, mit der die Kugellinsen mit definierter Kraft auf den Substratgrund gepreßt werden können /72/.

Die Faser wird zur Stabilisierung in ein Metallröhrchen eingeklebt und durch Schrumpfschläuche zusätzlich mechanisch stabilisiert. Die konfektionierte Faser wird anschließend durch die Faserdurchführung des Gehäuses in den Faserschacht der mikrooptischen Bank eingeführt und durch Festlöten der Hülse an der Faserdurchführung fixiert. Zusätzlich wird die Faser an der mikrooptischen Bank festgeklebt.

Auf die TO-Gehäuse der Laserdioden werden Distanzringe aufgelötet, um die unterschiedlichen axialen Positionen der Strahltaile zu kompensieren. Da durch Löten die im letzten Kapitel ermittelten Genauigkeiten nicht erreicht werden können werden die Dioden nach der aktiven lateralen Justierung in den Gehäuseöffnungen durch Laserschweißen an mehreren Punkten am Gehäuse fixiert. Um den Verzug beim Festschweißen der Dioden möglichst klein zu halten, müssen die Materialien von Ring und Wanne ähnliche thermische Eigenschaften besitzen. Die Distanzringe für die Dioden wurden deshalb auch aus Kovar gefertigt. Durch das Trimmen einzelner Schweißpunkte und eine Verminderung der Winkelfehler durch ein Schweißen in der Ebene der Laserdioden-Strahltaile besteht beim Laserschweißen noch ein Optimierungspotential /73/.

Auch der Gehäusedeckel wird durch Punktschweißen mit dem Gehäuse verbunden. Durch Nahtschweißen zwischen Deckel und Wanne und zwischen Distanzringen und Wanne bei den Diodendurchführungen kann das Gehäuse für Anwendungen mit extremen Umwelteinflüssen hermetisch verschlossen werden.

4.4 Qualifizierung des Moduls /74/

4.4.1 Technisch-Optische Leistungsdaten

Meßgröße	Ist	Soll
Einfügedämpfung LD/Faser	9 dB	10 dB
Einfügedämpfung Faser/Photodiode	0,7 dB	3 dB
Übersprechen	> 35 dB	30 dB
Optische Leistung in der Faser	-3 dBm	- 3 dBm

Tabelle 4.8: Leistungsdaten des fertig gehäusten Moduls ($\lambda_{LD}=1300$ nm)

Tabelle 4.8 zeigt, daß die geforderten Spezifikationen vom fertigen Modul erfüllt werden können. Die Einfügedämpfung zwischen Faser und Photodiode sowie die Übersprechdämpfung entsprechen den Daten der mikrooptischen Bank, da beide Größen ausschließlich durch das optische Design bestimmt werden. Die Einfügedämpfung zwischen Laserdiode und Faser vergrößert sich dagegen beim Festschweißen nochmals um ca. 3 dB. Bitratenmessungen bei 622 Mbit/s zeigen ein weit geöffnetes Augendiagramm (Abbildung 4.7), so daß die Verwendung des Moduls bei der spezifizierten Bitrate problemlos möglich ist. Die Mittelwertkurve ist jedoch von einem starken Laserrauschen überlagert, welches durch eine externe Kavität bestehend aus der Oberfläche der ersten Kugellinse und den Endflächen des Diodenchips erzeugt wird. Dieser Effekt ist nur durch die Verwendung von entspiegelten Linsen zu beseitigen.

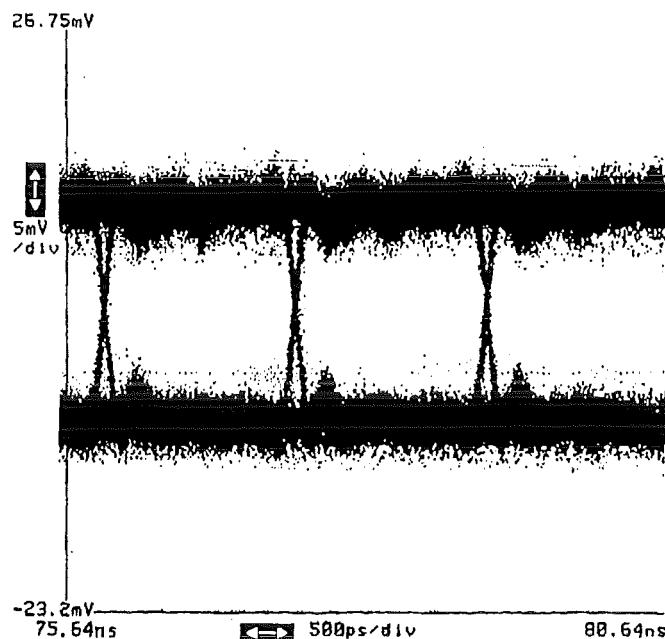


Abbildung 4.7: Augendiagramm bei 622 Mbit/s ($\lambda_{LD}=1300$ nm)

4.4.2 Umweltverträglichkeit

Wie sich bei thermischen Simulationen gezeigt hat [75], ist bei spritzgegossenen mikrooptischen Bänken aus PMMA mit einer Standard-Polymerrestschicht von 1 mm im Temperaturbereich bis 85°C [76] mit einem vertikalen Versatz der Faser von 5 µm zu rechnen, so daß keine hinreichende thermische Stabilität für das Modul erreicht wird. Um dieses Problem zu vermeiden wurden zwei Lösungsansätze verfolgt: Das Abprägen von PMMA-Strukturen auf Keramiksubstrate, wobei nur eine Polymerrestschicht von 50 µm verbleibt, und der Spritzguß in Polycarbonat. Polycarbonat besitzt eine höhere Glastemperatur wie PMMA (130° statt 80 °). Außerdem wurden bei diesen mikrooptischen Bänken die Restschichten mechanisch auf 200 µm reduziert. Bei Raumtemperatur sind bei beiden Materialsystemen Unterschiede in den technischen Daten der mikrooptischen Bank nicht festzustellen.

Bei Temperaturänderungen zwischen -20 °C und +70 °C verbleiben bei einem komplett montierten Modul mit einer nachbearbeiteten Vollpolymerbank Schwankungen der optischen Leistung in der Faser von ± 1 dB (Abbildung 4.8). Tests im Temperaturbereich bis 85 °C lassen aufgrund der Glastemperatur von Polycarbonat (130 °C) ähnliche Werte erwarten. Auch in diesem Fall ist die Mittelwertkurve von einem starken Laserrauschen überlagert.

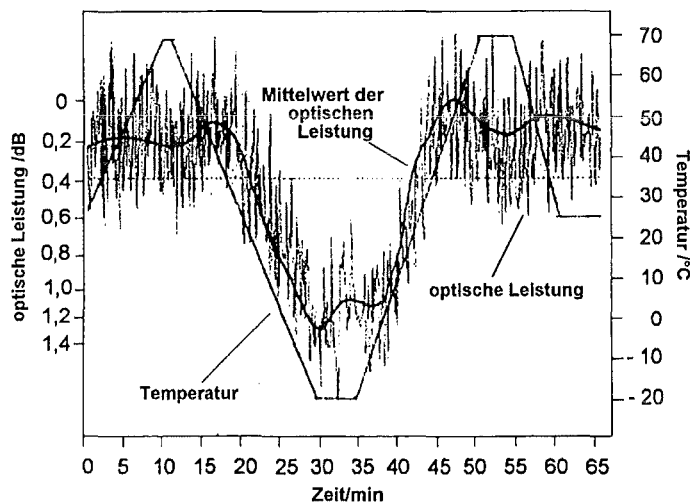


Abbildung 4.8: Thermische Stabilität zwischen -20° und +70°C ($\lambda_{LD}=1300$ nm)

Dieselben Messungen wurden auch mit auf Keramiksubstraten geprägten Strukturen aus PMMA durchgeführt, ohne daß eine signifikante Veränderung der Temperaturstabilität zu erkennen war. Der stabilisierende Einfluß des Substrats kompensiert also die höhere Glastemperatur des Polycarbonats. Da die Polycarbonatstrukturen in einem optimierten Prozeß

jedoch ohne Nachbearbeitung herstellbar sind, ist dieses Materialsystem das ökonomisch vorteilhaftere.

Insgesamt wurde mit den Arbeiten zur Aufbau- und Verbindungstechnik gezeigt, daß die technischen Daten beim hybriden Konzept reproduzierbar sind, angepaßte und leistungsfähige Aufbau- und Verbindungstechniken für das Konzept existieren und die technischen und thermischen Eigenschaften bei fertig prozessierten Modulen mit marktgängigen Komponenten vergleichbar sind. Damit ist der Nachweis der industriellen Umsetzbarkeit des modularen mikrooptischen Konzepts geführt.

5 Optomechanische Bypass-Schaltung für Einmodenfasern

Bypass-Schaltungen werden in der optischen Nachrichtentechnik verwendet, um einen Netzknoten alternativ am Netzbetrieb zu beteiligen (Normalzustand) oder bei Ausfall oder Passivität zu überbrücken (Bypass-Zustand). Ein Netzknoten kann z.B. eine Vermittlung oder eine Verstärkerstation sein. Er ist allgemein dadurch gekennzeichnet, daß er Informationen empfängt, bearbeitet und wieder aussendet. Sicherheitskomponenten wie die Bypass-Schaltung finden häufig in Netzen mit hohen Übertragungsraten, d.h. im Einmodenbetrieb, Verwendung, so z.B. in Übertragungsnetzen für die Telekommunikation und in LANs lokaler Rechenzentren (FDDI-Protokoll). Um eine hohe Betriebssicherheit zu erreichen, wird ein voll-optischer Bypass-Zustand angestrebt und auf integrierte optoelektronische Komponenten zur elektrooptischen Signalwandlung verzichtet. Weitere Gründe dafür sind eine voll optische Signalverarbeitung (z.B. EDFA) und eine universelle Verwendbarkeit.

Aufgrund der Sicherheitsfunktion muß eine Bypass-Schaltung eine hohe Zuverlässigkeit besitzen. Weitere Forderungen sind eine geringe Einfügedämpfung und eine niedrige Schaltleistung. Schließlich soll sie mit niedrigen Kosten herstellbar sein. Einen besonderen Vorteil bieten deshalb Schaltprinzipien, die durch eine Potentialdifferenz getrieben werden und damit keine elektrische Energie dissipieren. Da der Ausfall oder auch das Zu- und Abschalten eines Knotens außerdem relativ seltene Ereignisse sind, eignen sich für Bypass-Schaltungen auch langsamere, thermooptische /77/ oder optomechanische /78/ Schaltmechanismen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine miniaturisierte Optomechanische Bypass-Schaltung für Einmodenfasern durch die Kombination von Silizium-Ätztechnik und LIGA-Verfahren realisiert /79/. Die optische Signalführung wird bei diesem Funktionsmodul durch eine mikrooptische Bank bewerkstelligt, die durch Röntgentiefenlithographie und Galvanik auf einem anisotrop geätzten Siliziumwafer hergestellt wird. Die Schaltfunktion übernimmt ein mit dem LIGA-Verfahren parallel zur mikrooptischen Bank hergestellter elektrostatischer Linearantrieb /80/. Die laterale Genauigkeit dieser Anordnung im sub- μm -Bereich wird durch die monolithische Strukturierung sichergestellt.

Wesentliche Demonstrationsziele bei diesem Funktionsmodul sind also die Integration von mikromechanischen Komponenten in die mikrooptische Bank und der Aufbau einer komplexen Komponente durch Kombination verschiedener Mikrostrukturierungstechniken.

5.1 Aufbaukonzept

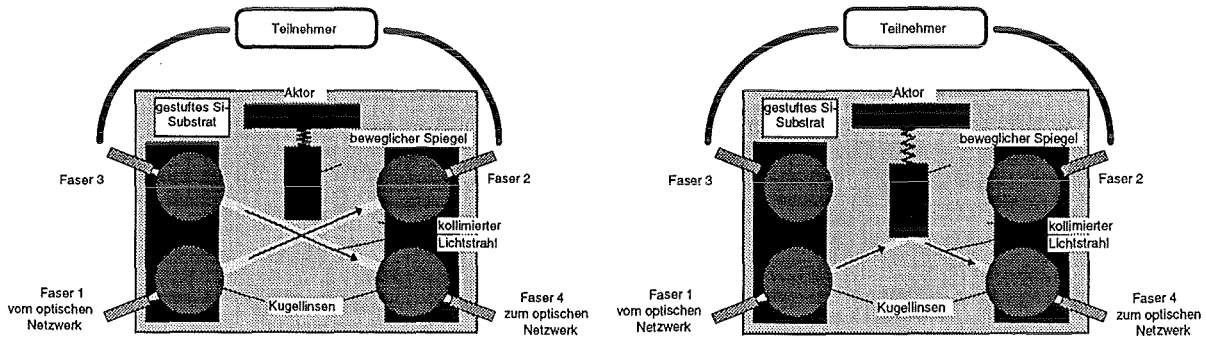


Abbildung 5.1a: Teilnehmer im Normalzustand

Abbildung 5.1b: Teilnehmer im Bypass-Zustand

Die Funktionsweise der Schaltung ist in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt. Die Gegenstandsweite der mit dem Netzwerk verbundenen Monomodefaser (Faser 1) ist so gewählt, daß die Strahltaile hinter der Kugellinse genau im Kreuzungspunkt der beiden Transmissionskanäle liegt. Mit Hilfe der rechten, oberen Kugellinse wird die Strahltaile auf die Stirnfläche der mit dem Teilnehmer verbundenen Faser 2 refokussiert. Der Teilnehmer verarbeitet das Signal und sendet ein aufbereitetes optisches Signal in die Faser 3. Über die beiden anderen Kugellinsen wird das Signal in die Faser 4 und weiter ins Netzwerk geleitet. Im Bypass-Zustand wird ein beweglicher Spiegel in den Strahlengang derart eingefahren, daß der von Faser 1 emittierte Lichtstrahl mit Hilfe der beiden unteren Kugellinsen direkt auf die Stirnfläche der Faser 4 am Teilnehmer vorbei abgebildet wird.

5.2 Elektrostatischer Linearantrieb

5.2.1 Funktionsprinzip

Das Schaltelement für den Spiegel ist als elektrostatischer Linearaktor aufgebaut (/81/, Abbildung 5.2). Bei der zur Prozessierung dieses Aktors verwendeten LIGA-Opferschichttechnik /82/ werden Titan als Opferschichtmaterial und Flußsäure als Ätzmedium verwendet. Mit der Opferschichttechnik kann parallel zu den starr mit dem Substrat verbundenen kammartigen Statoren eine an vier Blattfederpaaren aufgehängte, bewegliche Platte mit Gegenelektroden prozessiert werden. Beim Anlegen einer Spannung tauchen die Gegenelektroden in die Kammstrukturen der Statoren ein, wobei der an dieser Platte befestigte Spiegel verschoben wird. Beim Abschalten der Spannung zieht die federnde Aufhängung den Spiegel in die Gleichgewichtslage zurück. Der realisierbare Stellweg hängt von dem Design und der Anzahl der Kondensatorelemente, der Betriebsspannung, sowie von der elastischen Gegenkraft der Biegefedern ab.

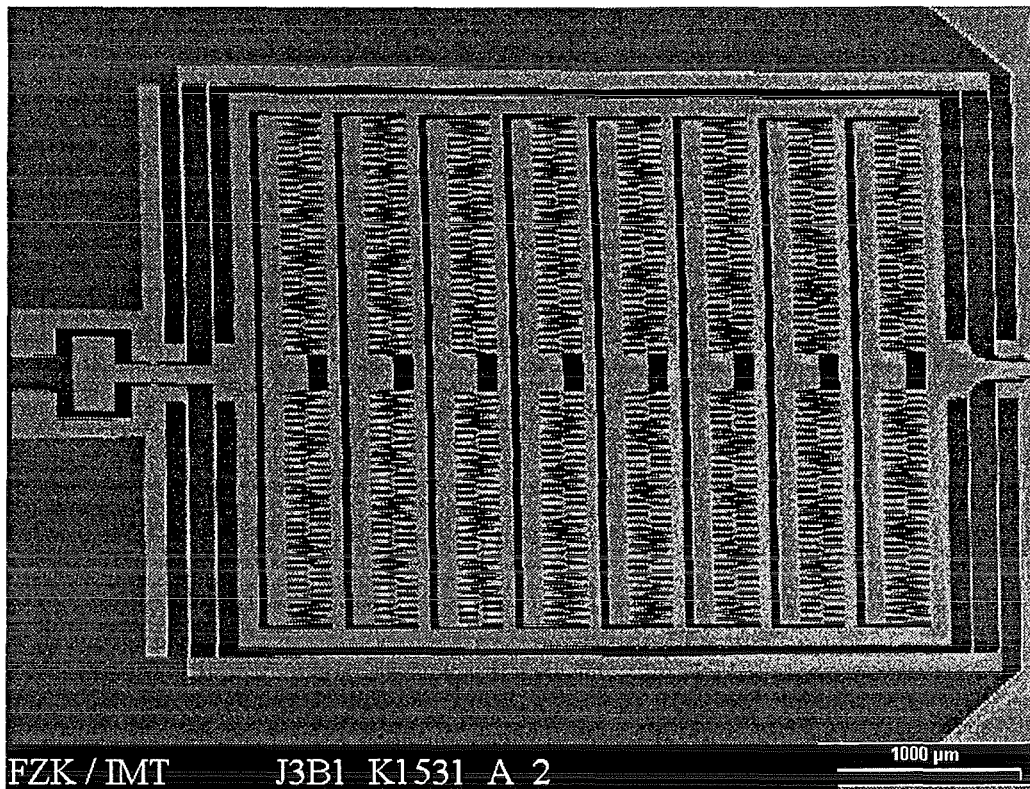


Abbildung 5.2: Elektrostatiches Schaltelement für die Bypass-Schaltung

Die elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen den Platten eines Kondensators lassen sich besonders einfach aus der im elektrischen Feld gespeicherten potentiellen Energie berechnen. Beim Plattenkondensator gilt unter Vernachlässigung der Streufelder:

$$W_{\text{pot}} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 V \quad (5.1)$$

Durch die Variation des Volumens bei Längs- und Querverschiebungen lassen sich die elektrostatischen Kräfte parallel (F_x) und senkrecht (F_y) zu den Kondensatorplatten (Länge L , Höhe H) gemäß der folgenden Gleichungen analytisch berechnen:

$$F_x(x) = -\frac{1}{2} \epsilon H U^2 \frac{1}{y} \quad F_y(x) = -\frac{1}{2} \epsilon H U^2 \frac{x}{y^2} \quad (5.2)$$

Die Schaltspannung U wird durch die Anwendung vorgegeben und darf in LANs nicht höher als 70 V liegen. Die maximale Strukturhöhe H wird durch den Faserdurchmesser begrenzt und der minimale Plattenabstand y wird durch die Prozeßgrenzen bestimmt (ca. 10 μm bei 150 μm Strukturhöhe). Die maximal erzeugbaren elektrostatischen Kräfte pro Kondensatorelement sind somit weitgehend festgelegt.

Werden diese Elemente parallel zur Stellrichtung ausgelegt, wird außerdem für die Plattenverschiebung ausschließlich die bei hinreichend kleinen Abständen kleinere Kraftkomponente $F_x(x)$ genutzt, während die größere Kraft $F_y(x)$ als Querkraft senkrecht zur Verstellrichtung wirkt.

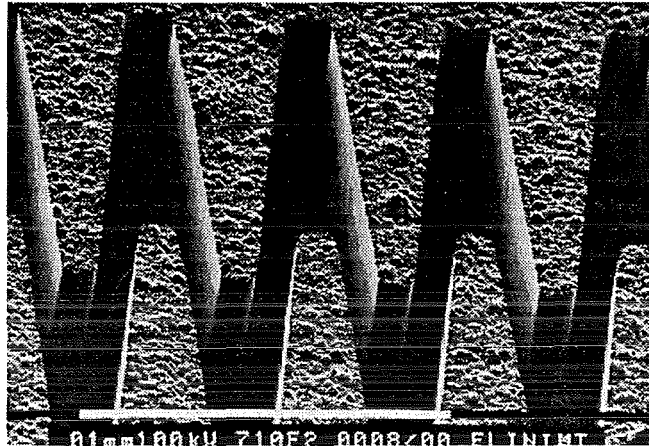


Abbildung 5.3: Konische Kondensatorelemente beim Linearantrieb

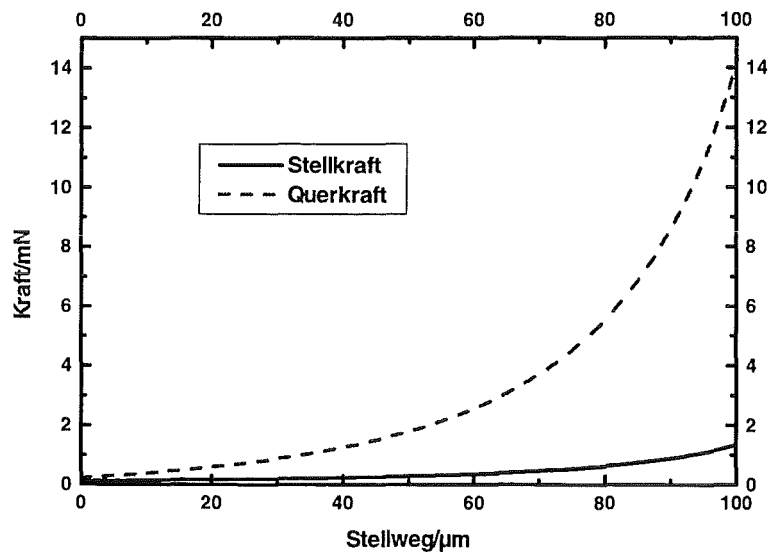


Abbildung 5.4: Elektrostatistische Längs- und Querkräfte beim Plattenkondensator

Bei einer konischen Elementgeometrie (Abbildung 5.3) werden dagegen auch diese Querkräfte für den Aktor nutzbar. Außerdem vergrößern sich die Aktorkräfte durch die lineare Abnahme des Plattenabstands $y(x)$ auch unter die Prozeßgrenze (Abbildung 5.4), so daß in Stellrichtung erheblich größere Kräfte als bei der Parallelplattenanordnung wirken /80/. Die elektrostatistische Gesamtkraft eines Aktors in Stellrichtung berechnet sich bei konischer Geometrie dann nach /83/:

$$F_{el}(x, V) = \frac{N}{2} \epsilon U^2 H \left[\frac{\cos(\varphi)}{D(x)} + (E + x \cos(\varphi)) \frac{\sin(\varphi)}{(D(x))^2} \right] \quad (5.3), \quad \text{mit}$$

$$D(x) = D_{\max} - x \sin(\varphi)$$

als auslenkungsabhängigem Kondensatorspalt und E als Nullüberlapp der Kondensatorplatten.

Die Querkräfte bleiben bei einer ideal symmetrisch aufgehängten Gegenelektrode ohne Auswirkung, da sich die Kraftanteile auf beiden Seiten der Kondensatorzähne gerade aufheben. Da bei realen Systemen jedoch immer kleine Asymmetrien vorhanden sind, muß ein möglichst großes Verhältnis von Stell- und Querkräften angestrebt werden. Dieses Verhältnis steigt mit sinkender Plattengröße der Kondensatoren /80/ und wird deshalb unter Berücksichtigung hinreichend stabiler Querverbindungen bei einer hohen Anzahl kleiner Platten pro Substratfläche optimal.

Die Länge des Stellwegs bei einer bestimmten Spannung wird durch das Gleichgewicht der elektrostatischen Kräfte und der elastischen Gegenkräfte der Biegefedern festgelegt. Eine elektrostatische Kraft F_{fed} in Stellrichtung bewirkt eine Auslenkung der 4 gefalteten Doppelrechtecksfedern um einen Stellweg x :

$$F_{fed} = 2 \cdot \frac{EHb^3}{L^3} x \quad (5.4)$$

Die durch Instabilitäten verursachten elektrostatischen Kräfte in Querrichtung werden dagegen von einer Kombination der elastischen Kräfte der Dehnung, Streckung und Knickung der Federn und Aktorquerverstrebungen kompensiert und lassen sich deshalb nicht durch einen ähnlich kompakten analytischen Ausdruck darstellen. Um den Einfluß dieser Querkräfte klein zu halten, wurden diese Geometrien mit Hilfe von FEM-Rechnungen so ausgelegt, daß Anisotropien der Federkonstanten von mehr als 1000 erzielt werden /84/.

5.2.2 Design der Bypass-Schaltung

Die vollständige Kollimierung der Lichtstrahlen in den Lichtrohren erfordert Stellwege von ca. 200 μm , die mit Spannungen < 70 V zwar prinzipiell realisierbar sind, jedoch große Aktorflächen und niedrige Federkonstanten der Rückstellelemente erzwingen. Dies führt zu einer Reihe von Problemen, wie z.B. geringen Lagestabilitäten bereits im Schwerfeld, hohen elektrostatischen Querkräften senkrecht zur Bewegungsrichtung und großer Defektanfälligkeit bei der Prozessierung /85/. Deshalb wurde auf die volle Kollimierung zugunsten einer stabileren Aufhängung des Spiegels verzichtet und der Aktorstellweg auf 100 μm begrenzt. Weitere Randbedingungen, die beim Design des Aktors berücksichtigt werden müssen, sind

Weitere Randbedingungen, die beim Design des Aktors berücksichtigt werden müssen, sind der Faserdurchmesser, der die Höhe der LIGA-Struktur auf 120 μm begrenzt und die kleinste sicher mit dem LIGA-Verfahren prozessierbare Kondensatorspaltbreite und -elementgröße von je 10 μm . Der Konuswinkel der Aktorzähne ergibt sich aus dem Stellweg und der Differenz der Plattenabstände. Er ist so gewählt, daß der Mehrbedarf an Fläche für einen Aktorzahn die Gesamtanzahl der Kondensatorelemente nicht in dem Maße verringert, daß die Zusatzkraft kompensiert wird. Auf einer Grundfläche von ca. 4 x 3,5 mm können dann 992 Einzelkondensatoren prozessiert werden, die in 8 Kämmen mit je 62 Zähnen angeordnet sind. Wenn eine Schaltspannung von ca. 70 V beibehalten wird, sind in dieser Konfiguration Federkonstanten von 11,4 N/m möglich. In Tabelle 5.1 sind diese und weitere abgeleitete Designdaten des elektrostatischen Linearantriebs zusammengefaßt /86/.

H/ μm	L/ μm	S/ μm	φ	D _{max} / μm	D _{min} / μm	U _{schalt} /V	F _k /N/m
120	120	90 *	4°	10	3	62	11,4

Tabelle 5.1: Designparameter des elektrostatischen Linearantriebs: LIGA-Höhe H, Kondensatorplattenlänge L, Stellweg S (* begrenzt durch Anschläge), Konuswinkel der Kondensatorplatten φ , Plattenabstände in Start- und Endposition D_{start} und D_{end}, Schaltspannung V_{schalt}, Federkonstante F_k

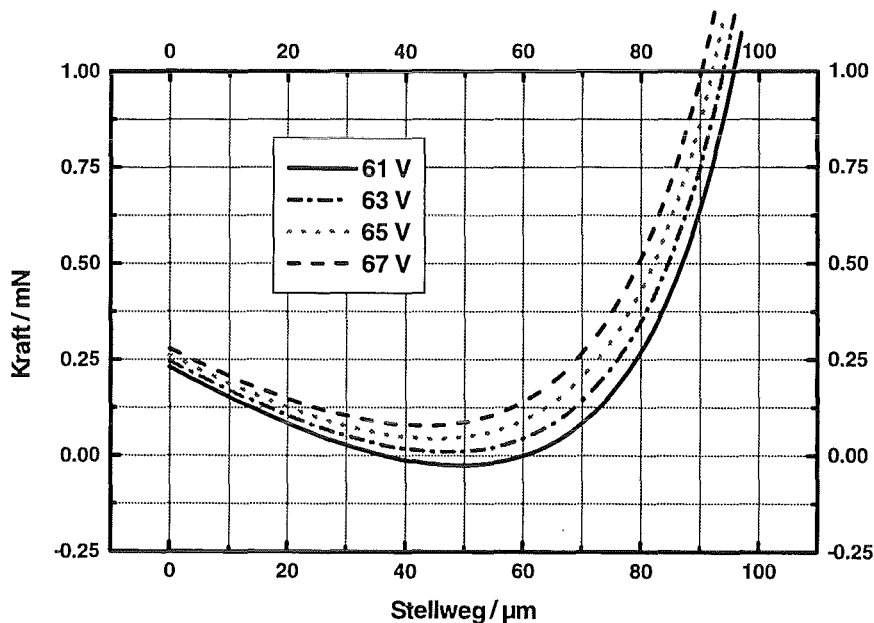


Abbildung 5.5: Berechnete Kraft-Weg-Kennlinien für Betriebsspannungen von 61 V (durchgezogene Linie), 63 V (strichpunktierte Linie), 65 V (punktierte Linie) und 67 V (gestrichelte Linie).

Abbildung 5.5 zeigt die Kraft-Weg-Kennlinien für diesen Aktor bei vier verschiedenen Betriebsspannungen zwischen 61 V und 67 V für 120 μm Strukturhöhe. Oberhalb der

Schaltspannung von ca. 62 V überwiegen die elektrostatischen Stellkräfte die Federkräfte, so daß die Nettostellkraft für den gesamten Stellweg positiv bleibt. In diesem Fall kann der gesamte Stellweg durchlaufen werden. Querkräfte spielen erst nach einem Stellweg von ca. 95 μm eine Rolle. Durch den Entwurf von Anschlügen kann der Einfluß von Querkräften vollständig ausgeschaltet werden /86/.

5.2.3 Prozeßtechnische Untersuchungen

Zur Herstellung des Aktors wird die LIGA-Opferschichttechnik /82/ verwendet, die zum Aufbau beweglicher mechanischer und elektrischer Mikrosysteme entwickelt wurde. Dazu wird zunächst eine Cr/Ag-Schicht aufgedampft, aus der durch optische Lithographie und Ätzen selektiv die Leiterbahnen strukturiert werden. Als zweite Schicht wird Titan als Opferschichtmaterial aufgesputtert und durch dieselben Dünnschichttechniken strukturiert. Dadurch ist die monolithische Herstellung beweglicher und starrer Systemkomponenten möglich, die auf den Substraten durch Röntgentiefenlithographie und Galvanik hergestellt werden. Beim abschließenden Ätzen mit Flußsäure werden die beweglichen Teile vom Substrat gelöst.

Der LIGA-Opferschichtprozeß wird im Normalfall auf Substraten aus Al_2O_3 -Keramik durchgeführt. Zur Strukturierung der Bypass-Schaltung auf einem Substrat war deshalb der Opferschichtprozeß auf halbleitende Silizium-Wafer zu übertragen. Um einerseits die Potentialdifferenz zwischen den unterschiedlich geladenen Aktorplatten zu erhalten und um andererseits die Opferschicht entfernen zu können, muß eine HF-resistente Isolierungsschicht auf die Wafer aufgebracht werden. Hierzu kann die schon zum Ätzen des Siliziums verwendete Si_3N_4 -Ätzmaske genutzt werden, da das Silizium des Wafers nicht und das LPCVD-Nitrid der Ätzmaske nur wenig von der Flußsäure angegriffen werden (Ätzrate: 1 nm/min bei 5%-iger HF-Säure /87/). Da in den opferschichtfreien Bereichen der Ätzangriff außerdem nur seitlich durch Unterätzen der Galvanik erfolgt, wird eine hinreichende Ätzselektivität und damit elektrostatische Isolierung erreicht.

Um aber eine mechanisch möglichst spannungsfreie Ätzmaske herzustellen, wird unter der Siliziumnitridschicht zusätzlich eine Siliziumoxidschicht (50 nm) aufgebracht /88/. Die Ätzrate von Siliziumoxid ist jedoch mit 18 nm/min für 5%-ige HF-Konzentration /87/ erheblich höher als die von Siliziumnitrid. Wie sich in Testuntersuchungen aber gezeigt hat besitzt die Siliziumnitridschicht eine hinreichende Dichte, so daß die LIGA-Strukturen auch bei einer kombinierten Maske nicht unterätzt werden. Bei Wafern ohne Oxidschicht treten dagegen Strukturablösungen durch die mechanischen Spannungen des Wafers auf. Die auf den Siliziumsubstraten prozessierten Testaktoren weisen die gleichen Schalteigenschaften wie

auf Keramiksubstraten prozessierte Stallelemente auf. Damit sind für die Gesamtschaltung Substrate mit einer standardmäßig hergestellten Ätzmaske verwendbar.

Da die üblichen Cr/Ag-Kontaktierungs pads durch die Prozeßmedien korrodiert werden, ergaben sich gelegentlich Probleme beim Drahtbonden der Testaktoren. Parallel wurde daher eine Kombination von Cr und Au /89/ als alternatives Materialsystem für die Leiterbahnebene untersucht. Aufgrund der geringeren Korrosion von Gold konnten die alternativen Bondpads zuverlässig kontaktiert werden.

5.3 Die mikrooptische Bank der Bypass-Schaltung

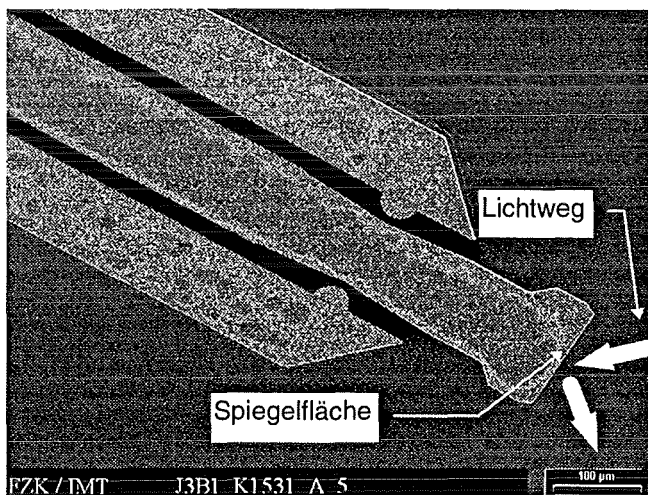


Abbildung 5.6a: Parallelspiegel

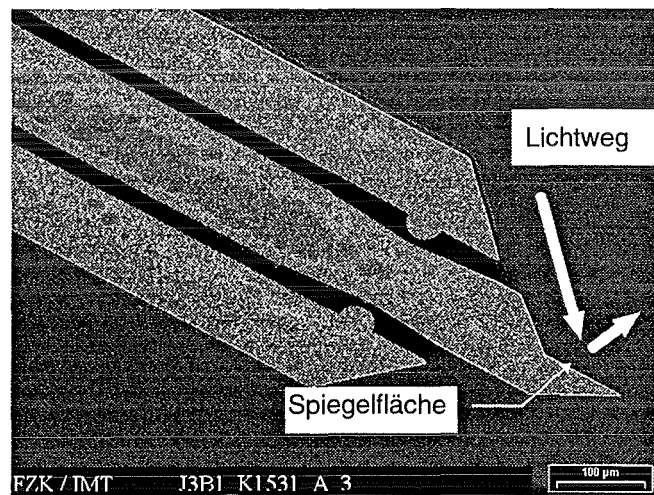


Abbildung 5.6b: Senkrecht orientierte Spiegelform

Im Hinblick auf die Anfahrsgenauigkeit des beweglichen Spiegels in die Sollposition wurde die Spiegelanordnung variiert. Neben der ursprünglich angedachten Spiegelform (Parallelspiegel, Abbildung 5.6a) wurde ein dazu um 90° gedrehter Spiegel (senkrecht orientierter Spiegel, Abbildung 5.6b) konstruiert. Bei diesem Spiegel erfolgt das vom Feder-Masse-System verursachte Nachschwingen um die Sollposition quer zur Oberfläche, so daß keine Signaländerung entsteht. Beide Spiegelformen sind vom Design her identisch, wenn vom Einfallswinkel zum Komplementärwinkel auf 90° übergegangen wird. Die weiteren Ergebnisse sind deshalb explizit nur für den Parallelspiegel ausgeführt.

Um in allen Strahlengängen den gleichen Strahlverlauf realisieren zu können und damit Zusatzverluste durch Modenfehlanspassungen zu vermeiden, wurde die optische Anordnung im Gesamtsystem in Form eines Andreaskreuzes ausgelegt. Die Lichtröhre wurde bei der Bypass-Schaltung zugunsten des kürzeren Aktorstellweges modifiziert.

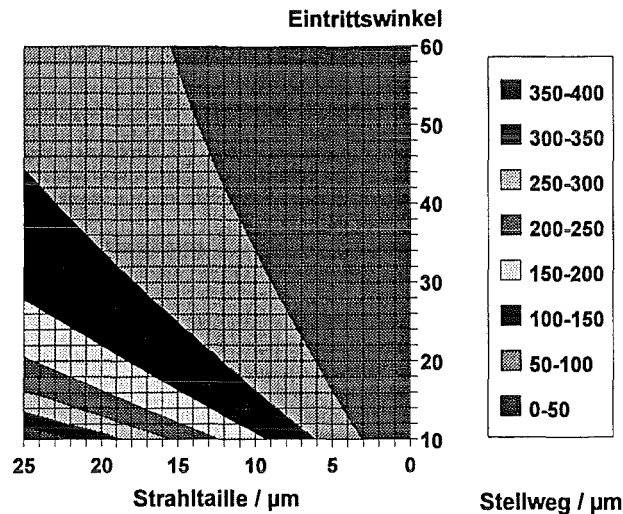


Abbildung 5.7: Aktorstellweg/µm als Funktion von Eintrittswinkel und Strahltaille ($\lambda = 1300 \text{ nm}$)

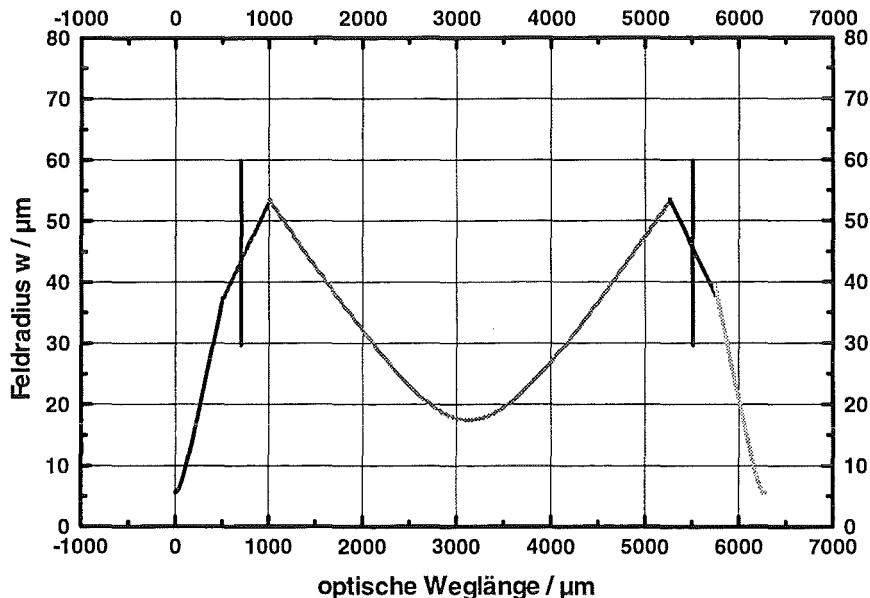


Abbildung 5.8: Berechneter Strahldurchmesser in der Bypass-Schaltung zwischen zwei Fasern in Abhängigkeit von der Achsposition (Maße in μm). Die vertikalen Linien geben die Position der Hauptebenen der Kugellinsen, die Unstetigkeiten im Strahlverlauf die Position der Scheitelpunkte an. Bei $z=0$ und $z= 6500$ befinden sich die Faserstirnflächen ($\lambda = 1300 \text{ nm}$).

Abbildung 5.7 zeigt den Aktorstellweg als Funktion von Eintrittswinkel und Strahltaille bei der Wellenlänge $\lambda = 1300 \text{ nm}$. Kleine Strahltaillen und große Einfallswinkel vermindern den Aktorstellweg. Zu kleine Taillen müssen jedoch vermieden werden, da sonst zusätzliche Verluste durch Streuung am Spiegel entstehen, bei dem eine typische Rauigkeit von 30 nm zu erwarten ist /90/. Zu große Einfallswinkel dagegen erzwingen wegen des streifenden Einfalls einen sehr breiten Spiegel. Als Kompromiß wurden bei dem Demonstrator ein Eintrittswinkel von 55° und ein Taillenradius von $18 \mu\text{m}$ gewählt. Der benötigte

Aktorstellweg beträgt dann nur 60 μm . Mittelgroße Strahltaillen sind jedoch nur bei großen Kugellinsenabständen zu verwirklichen. Für den Strahlengang der Bypass-Schaltung ist ein Kugellinsenabstand von 4700 μm notwendig (Abbildung 5.8). Die paraxiale Bild- und Gegenstandsweite beträgt 785 μm . In dieser Anordnung bewirken Aberrationen eine Verschiebung der Bildposition von 37 μm von der Linse weg und Beugungsverluste am Aktor eine Zusatzdämpfung von 1,3 %. Durch die große Gegenstandsweite werden die optischen Felder im Bereich der Kugellinsen so groß ($w_0 = 120 \mu\text{m}$), daß im Siliziumsubstrat zusätzliche Lichtschächte freigeätzt werden müssen.

5.4 Prozessierung

Für die Prozessierung der Optomechanischen Bypass-Schaltung wird ein fünfteiliger Maskensatz benötigt, der aus vier Chrommasken und einer Röntgenmaske für die Tiefenlithographie besteht. Da beim zweistufigen Silizium-Ätzen ein Nitridmaskenprozeß [91] verwendet wird, ist auf der ersten Chrom-Maske nur das Layout der Lichtschächte zu strukturieren. Die zweite Chrom-Maske dagegen muß das Absorbermuster für die Kugellinsengruben und die Lichtschächte enthalten. Die dritte und die vierte Chrommaske des Designs werden zur Strukturierung der Dünnschichtebenen des Aktors benötigt, also der Leiterbahn- und der Opferschichtebene. Mit der fünften Designebene wird die LIGA-Maske zum Aufbau der mikrooptischen Bank und der Mikromechanik des Aktors definiert. In einem Nutzen können acht Schaltungen strukturiert werden. Der Block der Schaltungen ist um 45° gegen den Hauptflats des Silizium-Wafers gedreht, um die Lichtschächte entsprechend den Kristallebenen des Siliziums ausrichten und damit einfacher strukturieren zu können.

5.5 Leistungsdaten

Die Aufnahme einer fertig prozessierten Bypass-Schaltung zeigt Abbildung 5.9. Im oberen Bereich der Abbildung ist der Linearaktor zu erkennen, der mit zwei Bonddrähten kontaktiert ist. Der Mikrospiegel befindet sich am Ende des Aktorarms, der in das Zentrum des von den Einmodenfasern gebildeten Andreaskreuzes reicht. Vor den Einmodenfasern sind die Kugellinsen für die optische Abbildung und die in das Silizium-Substrat geätzten Lichtschächte zu erkennen. Zur Charakterisierung dieser Schaltung wurden elektromechanische Funktionstests mit dem Aktor, statische optische Messungen zum Bestimmen der Einfügedämpfung und dynamische optische Messungen zum Schaltverhalten durchgeführt.

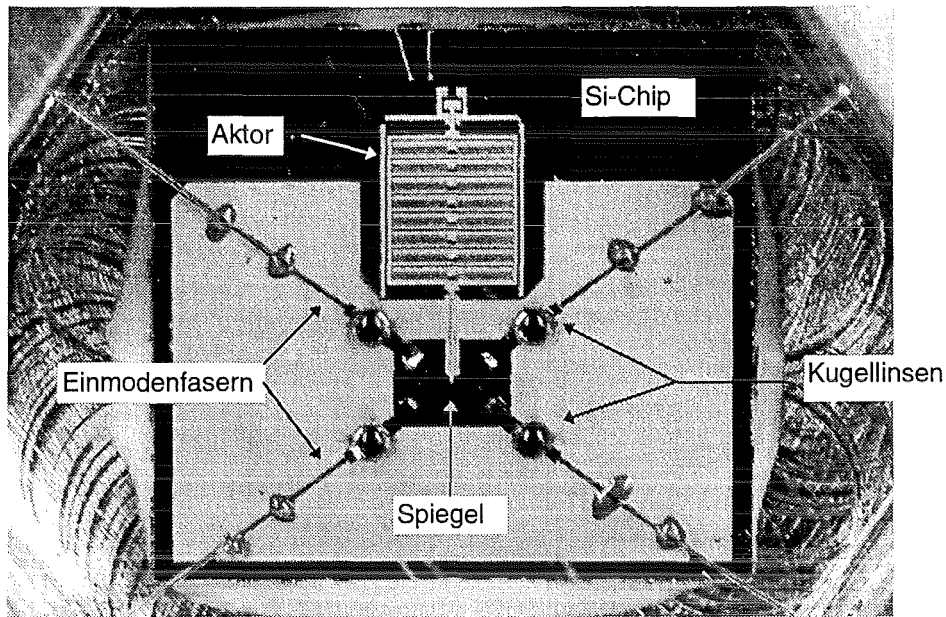


Abbildung 5.9: Foto einer prozessierten Optomechanischen Bypass-Schaltung

5.5.1 Elektromechanische Charakterisierung des Aktors

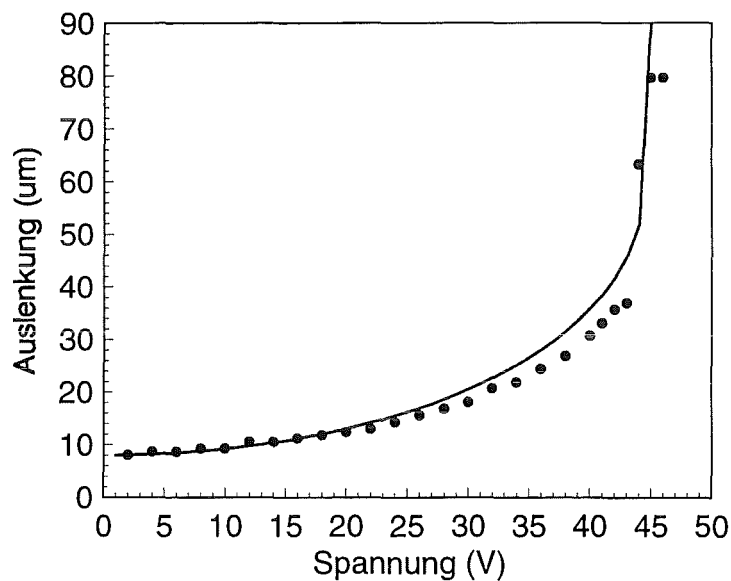


Abbildung 5.10: Spannungs-Weg-Kennlinie einer Bypass-Schaltung

Zur mechanischen Charakterisierung des Aktors wurde die Spannungs-Weg-Kennlinie durch ein Mikroskop mit Balkenmeßgerät bestimmt (Abbildung 5.10). Beim Anlegen einer Spannung, die kleiner ist als die zum Durchschalten erforderliche Schaltspannung, wird der Aktor definiert auf eine feste Position, die kleiner ist als der maximale Stellweg, gefahren. Bei einer Spannung von 46 V erreicht er eine Nicht-Gleichgewichts-Position und schaltet sprunghaft in die Endposition.

Wie diese Messung zeigt, ist der prozeßbedingte Maßverlust bei der Prozessierung der Biegefedern besonders groß, so daß sich aufgrund der kleineren Federkonstante eine

Vorauslenkung des Spiegels um 8 μm und eine Abweichung der dynamischen Eigenschaften vom Design ergibt. Unter Berücksichtigung der korrigierten Eingangsdaten entspricht die gemessene Spannungs-Weg-Kennlinie gut der theoretischen Vorhersage.

5.5.2 Optische Charakterisierung

Für die optische Charakterisierung wurden mehrere Bypass-Schaltungen mit Kugellinsen und Fasern bestückt und die Einfügedämpfung zwischen den beiden Fasern mit dem Aufbau aus Kapitel 2.3 gemessen. Die Meßdaten wurden durch aktive Justierung der Fasern in axialer Richtung bestimmt. Als Referenz wurde die direkt mit einem optischen Leistungsmeßgerät bestimmte abgestrahlte Leistung der Einkoppelfaser verwendet.

Schaltung	senkrechter Spiegel	Parallelspiegel	ohne Spiegel
1	-4,5	-5,6	-1,6
2	-4,2	-4,8	-1,9
3	-5,5		-1,9
4	-4,9		-1,7
5	-5,9		-1,5
6	-5,1		
Mittelwert	-5,0	-5,2	-1,7
Standardabweichung	0,6	0,4	0,2

Tabelle 5.2: Einfügedämpfungen verschiedener Bypass-Schaltungen ($\lambda = 1300 \text{ nm}$)

Die Tabelle 5.2 zeigt die gemessenen Einfügedämpfungen in Abhängigkeit vom verwendeten Spiegel bei Reflexion bzw. bei Transmission und einer Wellenlänge $\lambda = 1300 \text{ nm}$. Die Mittelwerte liegen für den Reflexionsstrahlengang bei ca. 5 dB, im Transmissionsfall bei 1,7 dB. Die größere Dämpfung beim Lichtweg über die Spiegel läßt sich auf die relativ geringe Reflektivität von Nickel (ca. 70 % = -1,5 dB) und hier speziell die Oberflächenrauigkeit von galvanisiertem Nickel ($R_a=30 \text{ nm} / 90^\circ$, -1,5 dB) zurückführen, die das Entstehen von Specklen verursacht. Die Reflektivität kann durch Aufspütern von 100 nm Gold auf ca. 95 % vergrößert werden /90/. Der geringfügige Unterschied zwischen dem parallelen und dem senkrechten Spiegel läßt sich durch den unterschiedlichen Einfallswinkel erklären. Unter Verwendung von entspiegelten Kugellinsen (- 1 dB) ist für derart optimierte Bypass-Schaltungen eine Einfügedämpfung um 2,5 dB zu erwarten.

Um schließlich die Schaltfunktion zu untersuchen, wurden die Schaltungen elektrisch gebondet und mit Multimodefasern bestückt. Das von der Auskoppelfaser der Bypass-Schaltung geführte Licht wird mit einer hinreichend schnellen Photodiode detektiert und von

einem Speicheroszillographen zeitaufgelöst dargestellt. Den zeitlichen Verlauf eines Schaltvorganges zeigt Abbildung 5.11. Die Schaltzeit liegt bei ca. 10 ms und ist wegen des Maßverlusts an den Biegefedern doppelt so groß wie vom Design her zu erwarten war. Die aus diesem Wert errechnete Schaltfrequenz von 100 Hz entspricht dem korrigierten theoretischen Wert des Feder-Masse-Systems.

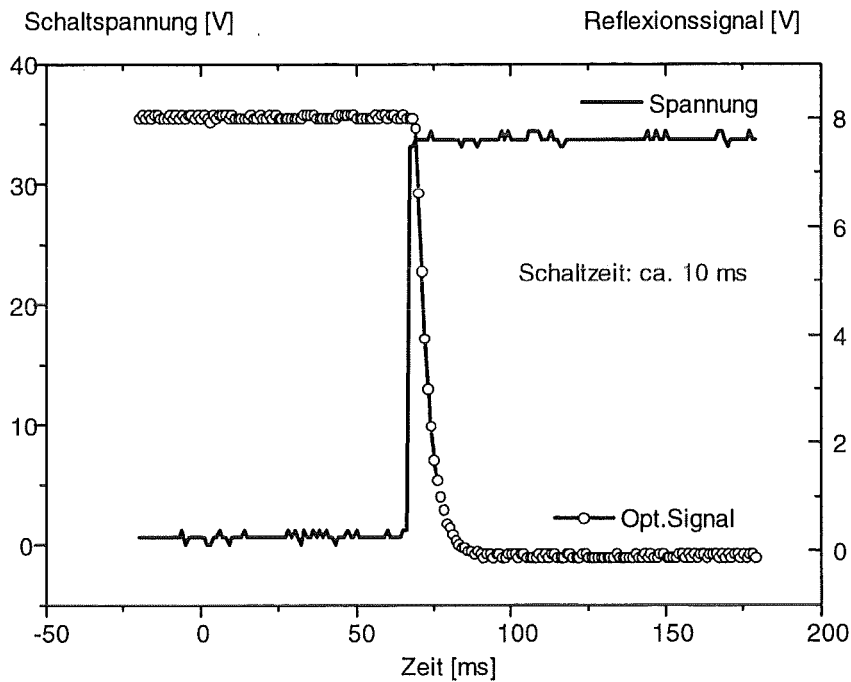


Abbildung 5.11: Zeitlicher Verlauf eines Schaltvorganges ($\lambda = 1300 \text{ nm}$)

5.6 Aufbau- und Verbindungstechnik für die Bypass-Schaltung

Da die Kondensatormatrix des Aktorelements sehr empfindlich gegen eine Kontamination mit Staubpartikeln ist, wurde für die Bypass-Schaltung ein sechseckiges Laborgehäuse konstruiert (Abbildung 5.12). Darauf aufbauend wurde ein Konzept für die AVT entworfen und erste Arbeiten dazu durchgeführt: Zunächst müssen die Siliziumchips an den Faserdurchführungen ausgerichtet werden, bevor sie am Gehäuseboden verklebt werden. Die Fasern werden zur Stabilisierung in Metallröhrchen eingeklebt und sind durch Schrumpfschläuche zusätzlich mechanisch stabilisiert. Die in den Röhrchen konfektionierten Fasern werden in den Faserdurchführungen ebenfalls durch Kleben fixiert. Die Faserdurchführungen haben einen Winkel von 10° zum Gehäuseboden, so daß die Fasern in den Faserführungskanälen auf die Substratoberfläche gedrückt und an mehreren Punkten mit den Führungskanälen verklebt werden können (vgl. Abbildung 5.9). Die Kugellinsen werden mittels einer Vakuumpinzette auf den Haltestrukturen abgelegt und durch definierten Druck bis zur Berührung mit dem Grubenboden in die Preßpassungen eingedrückt. Anschließend werden die Linsen am Rand mit den

Halteelementen verklebt. Zur Kontaktierung der Aktoren ist eine Steckerleiste in eine Aussparung der Gehäusewand eingeklebt. Die Bondpads der Aktoren werden durch Drahtbonden mit dieser Steckerleiste verbunden. Zur Deckelung dient eine polierte Plexiglasplatte, die auch ein Beobachten der Schaltfunktion ermöglicht.

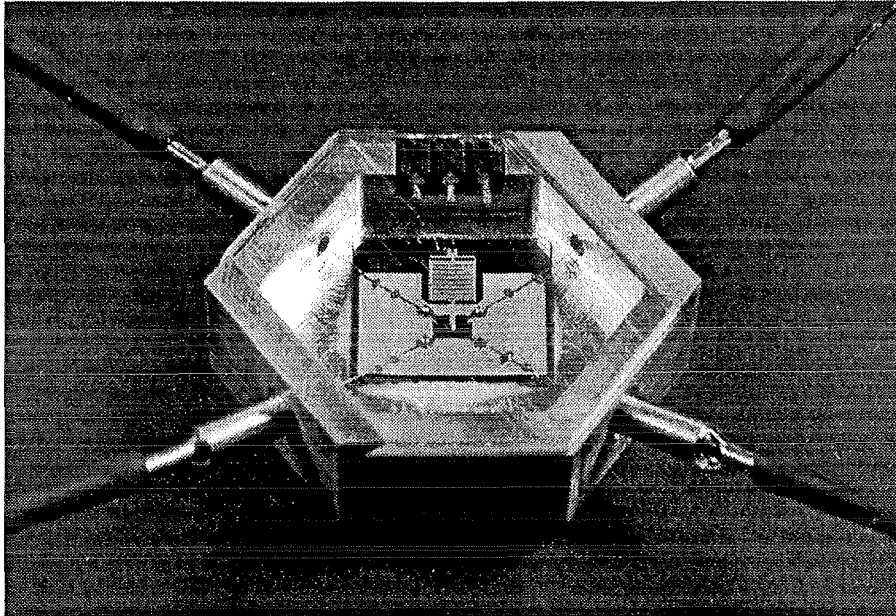


Abbildung 5.12: Foto einer fertig gebondeten und gehäusten Bypass-Schaltung.

Die Verbindungstechniken und der Montageablauf wurden bereits erfolgreich beim Bidirektionalen Sende-/Empfangsmodul eingesetzt. Im Gegensatz zum Sende-/Empfangsmodul ist die Montage bei der Bypass-Schaltung aufgrund der empfindlichen Aktorstruktur wesentlich kritischer. Aufbauend auf den ersten Erkenntnissen müssen daher Optimierungen hinsichtlich einer schnellen, zuverlässigen und sicheren Positionierung und Fixierung der Fasern durchgeführt werden, die für eine industrielle Fertigung unumgänglich ist. Darüber hinaus stehen anwendungsorientierte Umweltverträglichkeitsmessungen und nachrichtentechnische Funktionstests der gehäusten Schaltung noch aus.

6 Diskussion und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, daß durch die Kombination der LIGA-Prozeßschritte Röntgentiefenlithographie und Galvanik mit anderen Mikrostrukturierungsverfahren und den LIGA-Abformtechniken mikrooptische Bänke als Basis für modulare mikrooptische Funktionsmodule hergestellt werden können. Die Bänke erfüllen die Präzisionsanforderungen, die für den Einsatz von Einmodenfasern notwendig sind. Der Hauptvorteil in der Verwendung des LIGA-Verfahrens liegt darin, daß die laterale Strukturierung der mikrooptischen Bank keinen prozeßtechnischen Einschränkungen unterworfen ist. Außerdem lassen sich neben fixierenden Strukturen aktive mikromechanische und einfache optische Komponenten parallel in monolithischer Integration herstellen. Diese Vorzüge wurden an Hand zweier optischer Funktionsmodule eindrucksvoll demonstriert.

Normalerweise besitzen die verschiedenen mikrooptischen Komponenten, die hybrid in die mikrooptische Bank zu integrieren sind, uneinheitliche Maße. Bei einer konsequenten Anwendung des modularen mikrooptischen Konzepts müssen die mikrooptischen Bänke deshalb voll dreidimensional aufgebaut werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Herstellung derartig gestufter mikrooptischer Bänke ermöglicht. Dazu wird die Röntgentiefenlithographie auf einem gestuften Substrat durchgeführt.

Je nach Komplexität der mikrooptischen Bank kommen für die Strukturierung des Substrats unterschiedliche mikrotechnische Verfahren in Frage. Bei den für diese Arbeit untersuchten Herstellungsverfahren, dem anisotropen, naßchemischen Si-Ätzen und dem LIGA-Verfahren haben sich vergleichbare Toleranzen bei der Niveaueinstellung von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ergeben. Beim Silizium-Ätzen wird das gestufte Substrat durch einen subtraktiven Prozeß hergestellt; die laterale Strukturierbarkeit ist durch die Kristallebenen eingeschränkt. Allerdings können Siliziumsubstrate auch zum Aufbau elektro-mechanischer Komponenten verwendet werden. Die mit dem LIGA-Verfahren gefertigten Substrate dagegen werden additiv in beliebiger lateraler Geometrie strukturiert und sind elektrisch leitfähig. Welches der jeweiligen Verfahren eingesetzt wird, hängt deshalb vor allem vom Design des jeweiligen Funktionsmoduls ab.

Die Genauigkeit bleibt auch bei der Formeinsatzherstellung erhalten, da die ersten Prozeßschritte des LIGA-Verfahrens keinen Einfluß auf die vertikale Niveaueinstellung der unterschiedlichen Ebenen der mikrooptischen Bank haben. Allerdings muß berücksichtigt

werden, daß bei der Abformung ein thermischer Schrumpf auftritt, der jedoch aus den Ausdehnungskoeffizienten vorausberechnet werden kann.

Aufgrund der durch die Toleranzen bei der Justierung verursachten lateralen Ungenauigkeiten dürfen Strukturen zur lateralen Fixierung der Komponenten nicht in verschiedenen Ebenen angeordnet werden. Da die Röntgentiefenlithographie lokal die größte laterale Genauigkeit bietet, werden die Halteelemente für alle Komponenten parallel lithographisch strukturiert. Somit bleiben in zwei Dimensionen die Vorteile der monolithischen Integration erhalten. In diesem Fall sind die optisch wirksamen, lateralen Fehlpositionierungen durch lokale Maskenverzüge auf ca. 100 nm begrenzt. Die Funktion der gestuften Grundplatte beschränkt sich auf die Bereitstellung einer präzisen vertikalen Stufe.

Mit den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß die Kompatibilität des LIGA-Verfahrens mit anderen Mikrostrukturierungstechniken auch bei Hochpräzisionsanwendungen wie Funktionsmodulen für Einmodenfasern gegeben ist. Die entwickelten Prozeßtechniken sind selbstverständlich nicht auf die mikrooptischen Anwendungen beschränkt, sondern können auch in anderen Bereichen wie z.B. bei der Herstellung von Mikropumpen, Mikroventilen oder Mikrorotoren eingesetzt werden. Damit erweitert sich die Anwendungsmöglichkeit der LIGA- und insbesondere der Abformtechnik.

Die Leistungsfähigkeit des modularen Aufbaukonzepts wurde am Beispiel zweier übertragungstechnischer Funktionsmodule für Einmodenfasern gezeigt, bei denen jeweils unterschiedliche Verfahren kombiniert wurden. Als rein passive Komponente wurde ein Bidirektionales Sende-/Empfangsmodul aufgebaut, als aktives Funktionsmodul eine Optomechanische Bypass-Schaltung.

Beim Bidirektionalen Sende-/Empfangsmodul wurde sowohl die erste als auch die zweite Ebene der mikrooptischen Bank mittels Röntgentiefenlithographie strukturiert. In die mikrooptische Bank, die in ein Gehäuse eingeklebt ist, sind die passiven mikrooptischen Komponenten hybrid eingebaut. Die gehäusten Dioden werden aktiv zur mikrooptischen Bank justiert und in dieser Position am Gehäuse festgeschweißt.

Für die mikrooptische Bank werden bei 1300 nm Wellenlänge Verluste von 5,3 dB zwischen Laserdiode und Faser gemessen. 1 dB Dämpfung ist auf *Fresnel*reflexionen zurückzuführen, die durch den Einsatz entspiegelter Linsenelemente vermieden werden können. Weitere 2,5 dB sind durch das Abstrahlverhalten der Laserdiode verursacht. Die technisch-optischen Anforderungen an die mikrooptische Bank sind für 1300 nm erfüllt, so daß noch eine Leistungsreserve für die weiteren Montageschritte verbleibt. Das vollständig montierte Modul

hat eine Gesamtdämpfung < 9 dB. Für 1550 nm werden Verluste von ca. 10 dB gemessen. Die höheren Verluste sind auf das schlechtere Abstrahlverhalten der Laserdioden mit 1550 nm Wellenlänge und nicht auf Bearbeitungs- oder Montagefehler der mikrooptischen Bank zurückzuführen. Dies zeigt, daß bei der Auslegung der mikrooptischen Bank die Kenndaten genau bekannt sein müssen. Nur dann kann die mikrooptische Bank optimal ausgelegt werden, und es sind Dämpfungen von ca. 2 dB realisierbar.

Wie die Analyse gezeigt hat, ist bei qualitativ hochwertigen optischen Komponenten ein merklicher Einfluß der passiven mikrooptischen Komponenten weder aufgrund der mechanischen Toleranzen noch aufgrund des Bestückungsablaufs zu erwarten. Die technisch-optischen Leistungsdaten sind auch unabhängig vom Materialsystem, reproduzierbar und zeitlich konstant. In weiteren Arbeiten wurde demonstriert, daß das modulare mikrooptische Konzept für das Bidirektionale Sende-/Empfangsmodul mit einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik in marktreife Produkte umgesetzt werden kann.

Die Optomechanische Bypass-Schaltung wird durch eine Kombination von anisotropen Siliziumätzen und Röntgentiefenlithographie aufgebaut. Die Schaltfunktion übernimmt ein monolithisch in die mikrooptische Bank integrierter elektrostatischer Linearantrieb. Die Einfügedämpfung der Bypass-Schaltung beträgt 5 dB und kann durch Vergolden des Mikrospiegels (Reduktion um 1,5 dB) und Entspiegeln der Kugellinsen (Reduktion um 1 dB) auf 2,5 dB verkleinert werden; die Schaltzeit liegt bei den realisierten Prototypen aufgrund von Maßverlusten an den Biegefedern bei 10 ms und kann bei gleichen Betriebsparametern auf 5 ms verringert werden. Die Schaltspannung wird durch den gleichen Effekt vom Designwert (63 V) auf 46 V gesenkt. Die Optomechanische Bypass-Schaltung stellt mit diesen Kenndaten eine Alternative zu thermooptischen Schaltern dar /92/.

Bei beiden Demonstratoren konnten mit den ersten Prototypen niedrige Einfügedämpfungen erreicht und Möglichkeiten zu einer weiteren Verbesserung der technischen Daten aufgezeigt werden. Die erzielten Ergebnisse demonstrieren somit, daß das modulare mikrooptische Konzept auf der Basis einer mikrooptischen Bank einen aussichtsreichen Weg zum Aufbau mikrooptischer Funktionsmodule für die Nachrichtentechnik darstellt.

Vom industriellen Standpunkt her sind besonders die erhebliche Verringerung des Montageaufwands sowie der Montagekosten und die Verwendung billiger, marktüblicher Komponenten Vorteile des modularen mikrooptischen Konzepts. Dieser Kostenvorteil bleibt auch bei Berücksichtigung der Kosten der mikrooptischen Bank erhalten, da die präzise individuelle Strukturierung der einzelnen Bank entfällt und diese durch die LIGA-

Abformtechniken sehr billig hergestellt werden kann. Die reproduzierbare Abformung im Rahmen einer kleinen Serie wurde beim Duplexer mit Erfolg demonstriert.

Das modulare Aufbaukonzept stellt somit eine billige Alternative zur integrierten Optik dar und kann deren topologische Nachteile überwinden. Damit sind die Voraussetzungen zur Herstellung vielfältiger mikrooptischer und faseroptischer Funktionsmodule - sowohl für Einmoden- als auch für Mehrmodenanwendungen - in den in der Einleitung diskutierten Einsatzfeldern der Photonik gegeben.

Bei einer industriellen Umsetzung ist es allerdings sinnvoll, die Bestückung zu automatisieren /93/. Dadurch wird ein schnellerer, billigerer und reproduzierbarer Aufbau der hybriden Funktionsmodule bei gleichbleibenden oder sogar besseren Leistungsdaten möglich. Dazu muß die Aufbau- und Verbindungstechnik fertigungstechnisch angepaßt und bezüglich typischer Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen qualifiziert werden. Die beim Duplexer gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik wurden bereits in ein Redesign umgesetzt, welches Designaspekte für eine automatisierte Bestückung berücksichtigt. An dieser mikrooptischen Bank können erste Erfahrungen in der automatisierten Montage von Mikrosystemen gesammelt werden /94/.

Die Attraktivität des modularen mikrooptischen Konzepts kann durch eine höhere Integrationsdichte weiter gesteigert werden. Insbesondere beim Duplexer wurde deutlich, daß der montagetechnische Aufwand (Abstandsscheiben, aktive Justierung) für die Fixierung der Dioden am Gehäuse das wesentliche Problem für eine industrielle Umsetzung des Moduls darstellt. Es ist deshalb sinnvoll das modulare mikrooptische Konzept im Sinne einer Integration auch der aktiven Komponenten konsequent weiterzuentwickeln /95/. In Bereichen, in denen die Integrierte Optik Vorteile besitzt, können diese durch die monolithische Integration ein- oder mehrmodiger LIGA-Wellenleiter genutzt werden. Für komplexere Anwendungen wird außerdem - entsprechend den Prinzipien der Mikrosystemtechnik - die on-board Integration der Treiberelektronik vorteilhaft sein /96/. Solche Systeme sind besonders für Anwendungen der Übertragungstechnik und der faseroptischen Sensorik mit ökonomischen und technischen Vorteilen verbunden.

7 Anhang: Beugung in Strahldiagnosesystemen

Trifft ein *Gauß*strahl auf ein Linsensystem mit kreisförmiger Aperturblende, so nimmt die Strahltaille nach dem Linsensystem in Abhängigkeit von der Größe der Apertur zwei Extremformen an: Ist der Aperturradius a sehr groß gegenüber dem Strahlradius w , so wird sich als Bildwaist wieder ein *Gauß*profil gemäß den unter 2.2.3 angegebenen Formeln ausbilden. Im anderen Extremfall läßt sich der *Gauß*strahl innerhalb der Apertur als ebene Welle annähern und es entsteht ein klassisches Airymuster als Beugungsbild. Den Übergang zwischen diesen beiden Extremfällen zeigt Abbildung 7.1 /97/.

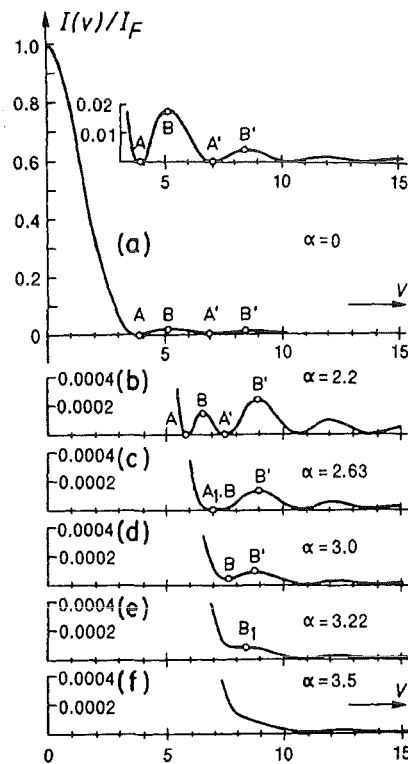


Abbildung 7.1: Übergang des *Gauß*schen Fokus in ein Airy-Beugungsmuster ($\alpha=(a/w)^2$, $v=2\pi ar/\lambda f$, /97/)

Im allgemeinen Fall läßt sich der abgeblendete *Gauß*strahl in Abhängigkeit von der

Aperturanpassung $\xi = \frac{\sqrt{2}a}{w}$ nach den *Gauß-Laguerre-Moden* entwickeln /98/, da diese als

Lösungen der *Helmholtzgleichung* ein vollständiges Orthonormalsystem darstellen /99/. Die Entwicklungskoeffizienten zeigt Abbildung 7.2. Die Entwicklungsreihe der abgeblendeten *Gauß*funktion läßt sich mittels der Matrizenmethode /100/ abbilden. Der verallgemeinerte w -Parameter für abgeblendete *Gauß*strahlen wird aus der Standardabweichung der abgebildeten Funktionenreihe berechnet. Dann ergibt sich für dünne Linsen folgende Gleichung für den Strahldurchmesser hinter der Linse:

$$w(z, z_2) = w(z) \cdot \sqrt{E(\xi)^2 \left(1 + \frac{z_2}{R(z)} - \frac{z_2}{f}\right)^2 + F(\xi)^2 \left(\frac{\lambda z_2}{\pi w(z)^2}\right)^2} \quad (7.1)$$

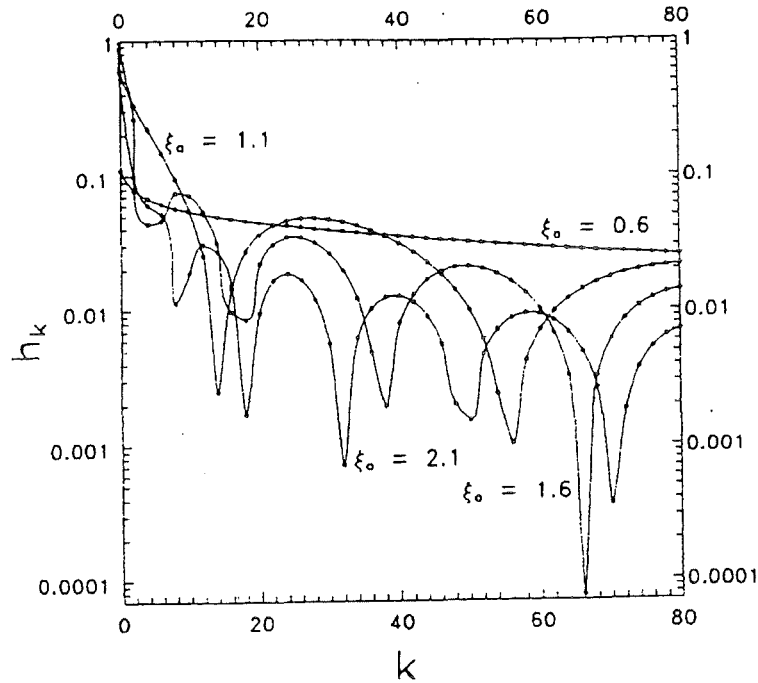


Abbildung 7.2: Entwicklungskoeffizienten des abgeblendeten *Gauß*strahls bei unterschiedlichem Öffnungsverhältnis /98/

E und F sind zwei zusätzliche Abbildungsparameter, die sich aus dem Abblenden ergeben (Abbildung 7.3). Für eine große Aperturanpassung streben beide Parameter gegen 1.

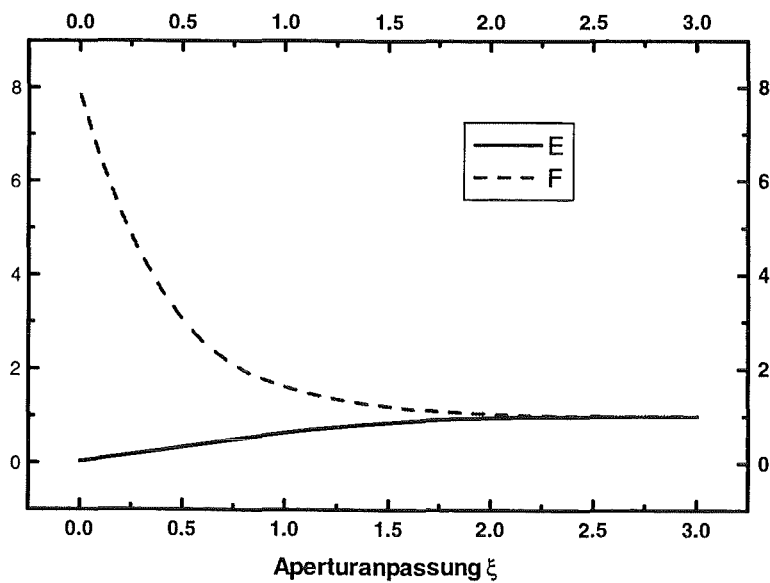


Abbildung 7.3: Parameter E und F für die Abbildung abgeblendeter *Gauß*strahlen

Bei der Strahlverfolgung entsteht in der Apertur beim Wegfahren von der Strahlmitte ein immer größerer Strahldurchmesser und eine immer kleinere Wellenfrontkrümmung, deshalb ändern sich E und F im Laufe der Messung. Wie in Abbildung 7.4, die durch Simulation gewonnen wurde, zu sehen ist, werden dadurch im Fernfeld zu kleine Strahldurchmesser gemessen, im Nahfeld ist die Taille durch Beugung zu groß. Bei bekannter Aperturlage bzw. bekanntem -durchmesser kann der Effekt der Beugung aus den Meßdaten direkt herausgerechnet werden. Anderenfalls können diese Werte durch Fit aus den Meßdaten bestimmt werden. Alternativ kann der richtige Abstrahlwinkel aber auch aus verschiedenen Fernfeldmessungen mit unterschiedlicher Achsposition gewonnen werden.

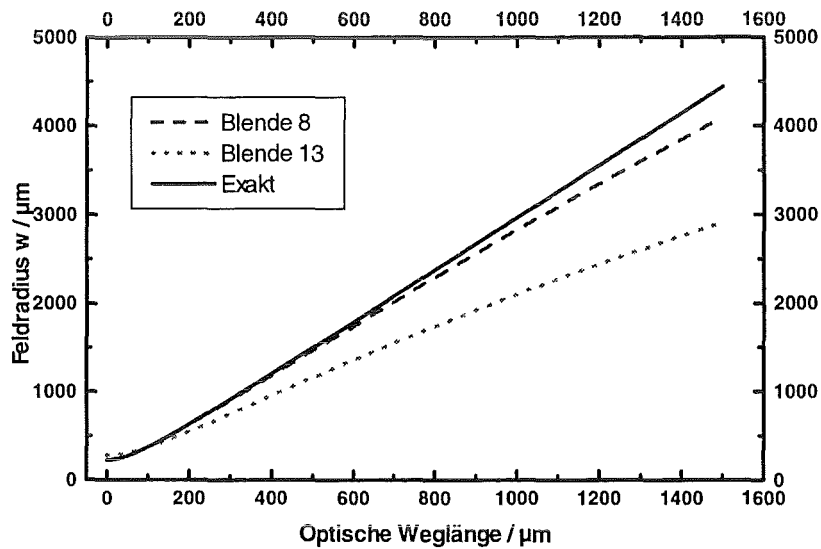


Abbildung 7.4: Mit einem Mikroskopobjektiv abgebildeter *Gaußstrahl*

8 Formelzeichen

a	Radius des Faserkerns
B	Bandbreite
b	Dicke der Blattfedern beim Aktor
c	Lichtgeschwindigkeit
C_{PD}	Kapazität
d	Breite des Kerns in y -Richtung
D	Abstand der Kondensatorplatten
D_{max}	maximaler Abstand der Kondensatorplatten
D_{min}	minimaler Abstand der Kondensatorplatten
E	elektrisches Feld
E, F	Parameter für die Abbildung abgeblendeter <i>Gauß</i> strahlen
E	Elastizitätsmodul
f	Brennweite
F_k	Federkonstante des Aktors
f_x, f_y, f_z	Ortsfrequenzen in x -, y -, z -Richtung
H	Höhe der Kondensatorplatten
h_k	k -ter Entwicklungskoeffizient
I	Intensität
I_F	maximale Intensität
\mathbf{k}	Wellenzahlvektor
k	Entwicklungsindex
L	Faserlänge
L	Länge der Blattfeder beim Aktor
L_m^l	zugeordnete <i>Laguerre</i> -Polynome
l	Polarquantenzahl
m	Radialquantenzahl
m	Vergrößerung
N	Anzahl der geführten Moden in einer Faser
N	Anzahl der Kondensatorelemente
n	Brechungsindex
n_0	Brechungsindex im Faserzentrum
n_1	Brechungsindex im Kern
n_2	Brechungsindex im Mantel
R	Krümmungsradius der Wellenfront
R_{ext}	Widerstand
\mathbf{r}	Ortsvektor
S	Stellweg
s	Gegenstandsweite
s'	Bildweite
u	kartesische Komponente des stationären elektromagnetischen Feldes
U	Spannung
U_{schalt}	Schaltspannung des Aktors
V	Volumen
v	normierte Ortskoordinate
W_{pot}	potentielle Energie
w	$1/e$ -Radius des Feldes eines <i>Gauß</i> strahls
w_0	$1/e$ -Radius des Feldes des Grundmodes bzw. eines <i>Gauß</i> strahls bei der Strahltaile

8 FORMELZEICHEN

x,y	laterale kartesische Koordinaten
z	kartesische Koordinate entlang der optischen Achse
z_2	beliebiger Abstand hinter einer Linse
z_R	<i>Rayleigh</i> weite
α	Indexprofilexponent
β	Ausbreitungskonstante entlang der optischen Achse
γ	Ausbreitungskonstante quer zur optischen Achse im Mantel
$\Delta n/n$	relativer Brechzahlhub in einer Faser
Δ	<i>Laplace</i> -Operator
Δy_i	Stufenfehler der mikrooptischen Bank
Δz	axialer Versatz
ϵ	Dielektrizitätskonstante
η	Koppeffizienz
θ	Divergenzwinkel
θ	Winkelfehler
θ_0	Divergenzwinkel im Fernfeld
κ	Ausbreitungskonstante quer zur optischen Achse im Kern
λ	Wellenlänge
ξ	Aperturanpassung
σ	Standardabweichung
τ	Zeitkonstante
ϕ	Kartesische Feldkomponente in y-Richtung
ϕ	Polarkoordinate
φ	Konuswinkel der Kondensatorplatten beim Aktor
ψ	Kartesische Feldkomponente in x-Richtung
ω	Kreisfrequenz

9 Anmerkungen

- /1/ Theoretische Grundlagen: Schalow, Townes 1958; Erster Rubinlaser: Maiman 1960
- /2/ B.Saleh, M.C. Teich: Fundamentals of Photonics, New York 1991 (Wiley)
- /3/ H. Lentke: „Connection of data networks (LAN) directly through the atmosphere using infrared light“ in „Proc. EFOC&N 1994: Papers on Optical Communication Systems and Optical Access Networks“, Heidelberg 1994, S. 109
- /4/ Peter Gerke: Digitale Kommunikationsnetze, ¹Berlin 1991 (Springer), S. 254
- /5/ Bergano et al.: WDM Transmission of Twenty 5 Gb/s NRZ Data Channels over Transoceanic Distances using Gain Flattened Amplifier Chain, Proc. ECOC '95, Brüssel 1995, Bd. 3, S. 967
- /6/ T.J. Hall: Optical Information Processing, in I. Andonovic, D. Uttamchandani: Principles of Modern Optical Systems, Norwood 1989 (Artech House), S. 461;
- J. Jahns, S. Lee: Optical Computing Hardware, Boston 1994 (Academic Press)
- /7/ R. Carey et al.: Optical Disc Storage Systems, in I. Andonovic, D. Uttamchandani: Principles of Modern Optical Systems, Norwood 1989 (Artech House), S. 551
- /8/ Ph. Lalanne, P. Chavel (Hg.): Perspectives for Parallel Optical Interconnects, Berlin 1993 (Springer, ESPRIT Basic Research Series)
- /9/ D. Uttamchandani, J.P. Dakin: Optical Fiber Sensors and Sensor Networks, in I. Andonovic, D. Uttamchandani (Hg.): Principles of Modern Optical Systems, Norwood 1989 (Artech House), S. 551
- /10/ C. Wrobel (Hg.): Optische Übertragungstechnik in industrieller Praxis, Heidelberg 1994 (Hüthig)
- /11/ „Rents Rule“, vgl. z.B.: J. Jahns, S. Lee: Optical Computing Hardware, Boston 1994 (Academic Press), S. 5
- /12/ R. Fürst et al.: Planar Splitter Trays for OPAL: Performance and reliability, Proc. EFOC & N '94, Papers on Optical Components, Fibres and Cables, Heidelberg 1994, S. 130
- /13/ G. Agrawal: Fiber-Optic Communication Systems, New York 1992 (Wiley), S. 364
- /14/ E Patzak: Photonic Signal Processing in Fiber Optic Links, Proc. ECOC '95, Brüssel 1995, Bd. 4, S.83
- /15/ A. Neyer et al.: Fabrication of Low Loss Polymer Waveguides Using Injection Moulding Technology, Electronics Letters, Bd. 29 (1993), S. 399
- /16/ W. Horsthuis et al.: Packaged Polymeric 1 x 8 Digital Optical Switches, Proc. ECOC '95, Brüssel 1995, Bd. 3, S. 1059
- /17/ T. Pohlmann et al.: Polarization Independent Ti:LiNbO₃ Switches and Filters, IEEE J. Quantum Electronics, Bd. 27 (1991), S. 602
- /18/ G. Agrawal: Fiber-Optic Communication Systems, New York 1992 (Wiley), S. 337
- /19/ A.L. Lentine: Self-Electro-Optic Effect Devices for Optical Information Processing in J. Jahns, S. Lee (Hg.): Optical Computing Hardware, Boston 1994 (Academic Press), S. 45
- /20/ E.W. Becker et. al.: Fabrication of microstructures with high aspect ratio and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming and plastic moulding (LIGA process), Microelectronic Engineering, Bd. 4 (1986), S. 35
- /21/ W. Menz, P. Bley: Mikrosystemtechnik für Ingenieure, Weinheim 1993 (VCH)
- /22/ K.-H. Brenner et al.: Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming, and plastic molding, Applied Optics, Bd. 32 (1993), S. 6464
- /23/ Vgl. dazu auch einen ähnlichen Ansatz auf der Basis von anisotrop geätzten Primärstrukturen:
R. Klein, A. Neyer: Silicon micromachining for micro-replication technologies, Electronics Letters, Bd. 30 (1994), S. 1672
- /24/ J. Göttert, J. Mohr: Characterisation of Micro-Optical Components Fabricated by Deep-Etch X-Ray Lithography, SPIE Proc. Bd. 1506 (1991), S. 170
- /25/ C. Müller, J. Mohr: A Microspectrometer Fabricated by the LIGA Process, Interdisciplinary Science Review, Bd. 18 (1993), S. 273
- /26/ J. Göttert, J. Mohr, C. Müller: Coupling Elements For Multimode Fibers By The LIGA Process, Proc. Micro System Technologies '92, Berlin 1992, S. 297
- /27/ H. Schiff: Aufbau und Untersuchung photonischer Mikrobauelemente in LIGA-Technik, Diss. Univ. Karlsruhe 1994
- /28/ vgl. z.B.: T. Kaps et al.: Optical technologies for the transport of video and telephony services in an access network, Proc. EFOC & N '94, Papers on Optical Communication Systems and Optical Access Networks, Heidelberg 1994, S. 78
- /29/ A. Ghatak, K. Thyagarajan: Graded Index Optical Waveguides: A Review, in E. Wolf (Hg.): Progress in Optics, Bd. 18, S. 15
- /30/ L. Collatz: Differentialgleichungen, ⁶Stuttgart 1981 (Teubner), S. 154
- /31/ Serge Ungar: Fibre Optics, ¹Chichester 1990 (Wiley), S. 17
- /32/ T. Morioka et al.: 100 Gbit/s x 4ch, 100 km Repeaterless TDM-WDM Transmission using a Single Supercontinuum Source, Proc. ECOC '95, Brüssel 1995, Bd. 3, S. 979

- /33/ A. Ghatak, K. Thyagarajan: Graded Index Optical Waveguides: A Review, in E. Wolf (Hg.): Progress in Optics, Bd. 18, S. 21
- /34/ Wegen der großen Ähnlichkeit der Wellengleichung mit der *Schrödingergleichung* läßt sich die quantenmechanische Störungstheorie anwenden. Damit ergeben sich die exakten Moden einer beliebigen Indexverteilung aus den *Gaußmoden* und einer im Vergleich kleinen Korrekturfunktion. Eine experimentelle Untersuchung dieser Problematik bei Einmodenfasern bestätigt die theoretischen Vorhersagen und liefert Näherungsformeln für w_0 bei allgemeinem, potenzförmigem Indexprofil (vgl. D. Marcuse: Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers, Applied Optics, Bd. 68 (1978), S. 103).
- /35/ G. Agrawal: Fiber-Optic Communication Systems, ¹New York 1992 (Wiley), S. 58
- /36/ G. Agrawal: Fiber-Optic Communication Systems, ¹New York 1992 (Wiley), S. 82
- /37/ H. Foukhardt: Photonik, Stuttgart 1994 (Teubner), S. 204
- /38/ G. Agrawal: Fiber-Optic Communication Systems, ¹New York 1992 (Wiley), S. 102
- /39/ J. D. Jackson: Klassische Elektrodynamik, ²Berlin 1983 (De Gruyter), S. 407
- /40/ G. Agrawal: Fiber-Optic Communication Systems, ¹New York 1992 (Wiley), S. 204
- /41/ D. Botez, M. Ettenberg: Beamwidth approximations for the fundamental mode in symmetric double-heterojunction lasers, IEEE J. Quantum Electron., 1978, S. 827
- /42/ R. März: Integrated Optics, Design and Modeling, Boston 1995 (Artech House), S. 166
- /43/ z.B. bei Siemens STH 51002Z
- /44/ z.B. bei Siemens SFH 4410
- /45/ Historisch gesehen war die Ausbreitung *gaußscher* Strahlen schon aus der Theorie der makroskopischen Laser bekannt. Vgl. dazu:
H. Kogelnik/T. Li: Laser Beams and Resonators, Applied Optics, Bd. 5 (1966) S. 1550
- /46/ R. Guenther: Modern Optics, New York 1990 (Wiley), S. 344
- /47/ J. W. Goodman: Introduction to Fourier Optics, San Francisco 1968 (Mc Graw-Hill), S. 86
- /48/ H. Kogelnik, T. Li: Laser Beams and Resonators, Applied Optics, Bd. 5 (1966), S. 1550
- /49/ E.-G. Neumann: Single-Mode Fibers, Berlin 1988 (Springer), S. 216
- /50/ G. Cancellieri: Single-Mode Optical Fiber Measurements, Norwood 1993 (Artech House), S. 130
- /51/ International Organization for Standardization: Provisional manuscript for ISO/DIS 11146 „Optics and optical instruments, Lasers and laser related equipment, Test methods for laser beam parameters: Beam widths, divergence angle and beam propagation factor“ (= Document ISO/TC 172/SC 9/WG 1 N73)
- /52/ A. Müller et al.: Fabrication of stepped microoptical benches for fibre and free space applications, Proc. HARMST 95, Karlsruhe 1995 (in Druck)
- /53/ J. Mohr: Analyse der Defektursachen und Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1988
- /54/ W. Menz, P. Bley: Mikrosystemtechnik für Ingenieure, Weinheim 1993 (VCH);
A. Heuberger (Hg.): Mikromechanik, Berlin 1989 (Springer)
- /55/ Persönliche Mitteilung R. Müller-Fiedler, Robert Bosch GmbH, Stuttgart
- /56/ A. Rogner, H. Pannhoff: Mass fabrication of passive polymer multimode and singlemode waveguide devices, Proc. OFC 1994, San Jose 1995, S. 279
- /57/ Persönliche Mitteilung A. Rogner, MicroParts GmbH, Dortmund
- /58/ U. Breitmeier, G. Häusler: Optical Profile Measurement of Micro-Structures with High Aspect Ratio, Proc. HARMST 95, Karlsruhe 1995 (in Druck)
- /59/ A. Müller et al.: LIGA microstructures on top of micromachined silicon wafers used to fabricate a microoptical switch, J. Micromech. Microeng., Bd. 3 (1993), S. 158.
- /60/ A. Michel: Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993
- /61/ K.-H. Brenner et al.: Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming, and plastic molding, Applied Optics, Bd. 32 (1993), S. 6464
- /62/ B. Köhler: unveröffentlichter Bericht, Kernforschungszentrum Karlsruhe
- /63/ vgl. z.B.:
C. Jones et al.: An Optical Transceiver on a Silicon Motherboard, Proc. ECIO '95, Den Haag 1995, S. 591
M. Marth et al.: Integration von III/V-Sende-/Empfangskomponenten mit Fasern und polymeren optischen Wellenleitern, Tagungsband 2. Statuskolloquium des Projekts Mikrotechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1995 (in Druck)
R. Matz et al.: Monolithisch integrierte Send-/Empfangsmodule für den optischen Teilnehmeranschluß, Tagungsband Diskussionstagung Integrierte Optik, Jena 1995
- /64/ T. Kaps et al.: Optical technologies for the transport of video and telephony services in an access network, Proc. EFOC & N '94, Papers on Optical Communication Systems and Optical Access Networks, Heidelberg 1994, S. 78
- /65/ vgl. zum Demonstrator auch
A. Müller et al.: Hybrid Optical Transceiver Module with a Microoptical LIGA-Bench, Proc. ECOC '95, Brüssel 1995, Bd. 1, S. 23

- /66/ R. Ballart, Y. Ching: SONET: Now It's the Standard Optical Network, IEEE Communications Mag., 3/1989, S. 8
- /67/ Persönliche Mitteilung J. Hehmann, Alcatel-SEL AG Stuttgart
- /68/ Persönliche Mitteilung J. Hehmann, Alcatel-SEL AG, Stuttgart
- /69/ Die Arbeiten zur Gehäusung der mikrooptischen Bank wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts AVT-KEO von D. Gorzinski, MicroParts GmbH, Dortmund, und J. Hehmann, Alcatel-SEL-AG, Stuttgart durchgeführt. Vgl. dazu:
D. Gorzinski: Herstellung und Charakterisierung von hybriden LIGA-Duplexern für die optische Übertragungstechnik, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1995
microParts GmbH: Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt AVT-KEO, Oktober 1995
Alcatel-SEL AG: Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt AVT-KEO, Oktober 1995
- /70/ Persönliche Mitteilung J. Hehmann, Alcatel-SEL AG, Stuttgart
- /71/ Electrovac GmbH: Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt AVT-KEO, Oktober 1995
- /72/ D. Gorzinski: Herstellung und Charakterisierung von hybriden LIGA-Duplexern für die optische Übertragungstechnik, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1995
- /73/ Persönliche Mitteilung J. Hehmann, Alcatel-SEL AG, Stuttgart
- /74/ Die Arbeiten zur Ermittlung der technisch-optischen Leistungsdaten des Moduls wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts AVT-KEO von J. Hehmann, Alcatel-SEL-AG, durchgeführt. Vgl. dazu
Alcatel-SEL AG: Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt AVT-KEO, Oktober 1995
- /75/ Persönliche Mitteilung Anja Koschel, Technologien der Mikroperipherik, Technische Universität Berlin
- /76/ Bell Communications Research: Generic Requirements for Fiber Optic Branching Components, Technical Reference TR-NWT-001209, Issue 1, November 1992
- /77/ Robert Bosch GmbH: Abschlußbericht BMBF-Verbundprojekt AVT-KEO
- /78/ M. Dautartas et al.: A Silicon-Based Moving-Mirror Optical Switch, J. Lightwave Tech., Bd. 10 (1992), S. 1078
- /79/ vgl. dazu auch:
A. Müller et al.: Optomechanische Bypass-Schaltung für die optische Informationstechnik, Tagungsband 2. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik, Wissenschaftliche Berichte Forschungszentrum Karlsruhe, Bd. 5670
- /80/ J. Mohr et al.: Micro Optical Switching by Electrostatic Linear Actuators with large Displacements, Proc. Transducers '93, Yokohama 1993, S. 120
- /81/ J. Mohr et al.: Mikrooptischer Schalter als Bypass-Element in optischen Datennetzwerken, Tagungsband 1. Statuskolloquium des Projekts Mikrosystemtechnik, KfK-Bericht 5238, S. 71
- /82/ C. Burbaum: Herstellung von mikromechanischen Beschleunigungssensoren in LIGA-Technik, Dissertation, Universität Karlsruhe 1991
- /83/ M. Kohl et al. Verification of the Micromechanical Characteristics of Electrostatic Linear Actuators, Proc. Transducers '95, Stockholm 1995, S. 400
- /84/ Persönliche Mitteilung M. Kohl, Forschungszentrum Karlsruhe, IMT
- /85/ J. Mohr et al.: Mikrooptische Bypass-Schaltung für die Kommunikationstechnik, FZK-Nachrichten 1/95, S. 40
- /86/ Persönliche Mitteilung M. Kohl, Forschungszentrum Karlsruhe, IMT
- /87/ Landolt/Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik, Neue Serie, Heidelberg 1984, Bd. 17c, S. 293
- /88/ Persönliche Mitteilung R. Müller-Fiedler, Robert Bosch GmbH, Stuttgart.
- /89/ B. Rogge et al.: Fully Batch Fabricated Magnetic Microactuators Using a two Layer LIGA Process, Proc. Transducers '95, Stockholm 1995, S. 320
- /90/ U. Erhard: Untersuchungen zum Reflexionsvermögen von metallischen und metalisierten LIGA-Mikrostrukturen, Diplomarbeit Universität Karlsruhe 1993
- /91/ Robert Bosch GmbH: 3. Zwischenbericht BMFT-Verbundprojekt AVT-KEO, Januar 1994
- /92/ Horsthuis et al.: Packaged Polymeric 1x8 Digital Optical Switches, Proc. ECOC 95, Brüssel 1995, Bd. 4, S. 1059
- /93/ U. Gengenbach, J. Göttert: Requirements and first results of an assembly and handling apparatus for automated fabrication of microsystems, Proc. Seminar on Handling and Assembly of Microparts, Wien 1994
- /94/ BMBF-Verbundprojekt „Entwicklung und Erprobung von fertigungsgerechten Montage- und Fügeverfahren zum Aufbau von Mikrosystemen“ (MFV-Mikrosysteme)
- /95/ M. Marth et al: Integration von III/V-Sende-/Empfangskomponenten mit Fasern und polymeren optischen Wellenleitern, Tagungsband 2. Statuskolloquium des Projekts Mikrotechnik, Wissenschaftliche Berichte Forschungszentrum Karlsruhe, Bd. 5670
- /96/ J. Mohr et al.: Mikrooptische Funktionsmodule auf der Basis von LIGA-Technik sowie Aufbau- und Verbindungstechnik; Konzepte, Potential und Anwendungen in der Informationstechnik, Tagungsband 2. Statuskolloquium des Projekts Mikrotechnik, Wissenschaftliche Berichte Forschungszentrum Karlsruhe, Bd. 5670

9 ANMERKUNGEN

/97/ Yajun Li: Degeneracy in the Fraunhofer diffraction of truncated Gaussian beams, J. Opt. Soc. Am. A, Bd. 4 (1987), S. 1237

/98/ M. A. Porrás et al.: Gaussian beams passing through apertured ABCD optical systems, Optik, Bd. 94 (1993), S. 23

In dieser Veröffentlichung ist der Formalismus ausführlich behandelt. Die weitere Diskussion lehnt sich daran an.

/99/ L. Collatz: Differentialgleichungen, ⁶ Stuttgart 1981 (Teubner), S. 154

/100/ R. Guenther: Modern Optics, New York 1990 (Wiley), S. 138