

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6344

**Aufbau von optisch–elektrischen Funktionsmodulen
mit Hilfe des LIGA–Verfahrens
für die optische Übertragungstechnik**

P. Ziegler*, J. Wengelink, J. Mohr
Institut für Mikrostrukturtechnik

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

**Aufbau von optisch–elektrischen Funktionsmodulen
mit Hilfe des LIGA–Verfahrens
für die optische Übertragungstechnik**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

an der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)
vorgelegte

Dissertation

von

Dipl.–Phys. Patrick Ziegler
aus Rülzheim

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Juni 1999

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. V. Saile

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. K.–H. Brenner

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein mikrotechnisches Fertigungskonzept auf der Basis des LIGA-Verfahrens für die Herstellung von hybrid integrierten mikrooptischen Modulen erarbeitet. Für Monomodeanwendungen ist eine Justagetoleranz von $\pm 1 \mu\text{m}$ notwendig, welche bisher durch eine aufwendige aktive Justage der mikrooptischen Komponenten sichergestellt wird. Indem die aktiven und passiven optischen Komponenten passiv positioniert werden, wird die Montage vereinfacht, wodurch die Herstellungskosten reduziert werden. Die Tauglichkeit des passiven Montagekonzeptes mittels hochpräziser LIGA-Strukturen wurde innerhalb der Arbeit durch die Realisierung und Charakterisierung eines Heterodyn-Empfängers (optischer Überlagerungsempfänger) nachgewiesen.

Die passive Justage der aktiven und passiven mikrooptischen Komponenten geschieht durch direktlithografisch hergestellte Resiststrukturen aus PMMA auf einem Keramiksubstrat. Die mechanische Fixierung erfolgt mit UV-härtendem Kleber und die elektrische Kontaktierung der aktiven Komponenten mit Leitkleber, welcher bei etwa $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgehärtet wird. Die verwendeten kundenspezifischen Photodioden, Prismen und Kugellinsen sind alle kommerziell erhältlich.

Der Nachweis der Präzision der passiven Montage erfolgte über den Aufbau und den Nachweis der optischen Qualität des optischen Überlagerungsempfängers. Die exemplarische Vermessung der Überlagerung im Bereich der Photodioden zeigt einen lateralen Strahlversatz von $5.1 \mu\text{m}$. Eine laterale Dejustage der beiden Einkoppelfasern für das Empfangs- und Lokaloszillatorsignal von $\pm 1 \mu\text{m}$ relativ zueinander verursacht theoretisch einen lateralen Strahlversatz von $\pm 6.4 \mu\text{m}$ an den Stellen der Photodioden. Da der gemessene Strahlversatz innerhalb dieses Toleranzbereiches liegt, demonstriert diese Messung, daß die für Monomodeanwendungen geforderte Justagegenauigkeit durch direktlithografisch hergestellte LIGA-Strukturen sichergestellt wird.

Der Heterodyn-Empfänger wurde hinsichtlich seiner elektrischen und optischen Eigenschaften charakterisiert. Der auf eine SMD-Auswerteschaltung hybrid integrierte Heterodyn-Empfänger erlaubt die Detektion von Zwischenfrequenzen bis 2.8 GHz . Ein kohärenter Empfang ist in dem Wellenlängenbereich von 1532 nm bis 1566 nm möglich.

Weiterhin wurde die Justagegenauigkeit der passiven Justage mit Justierhilfen, welche mit dem LIGA-Verfahren hergestellt werden, mittels einer einfachen Faser-Faser-Kopplung charakterisiert. Die sich aus dem Überlappintegral ergebende Genauigkeit betrug $1.2 \mu\text{m}$. Da dieser Wert auch die vom Faserhersteller spezifizierte Kernexzentrizität von $\leq 1 \mu\text{m}$ der verwendeten Glasfasern berücksichtigt, zeigt diese Messung, daß eine passive Justage mit einer Präzision im Sub-Mikrometerbereich möglich ist.

Assembly of opto–electronic modules with the help of the LIGA technology for optical communication applications

Abstract

In this work a manufacturing concept on the basis of the LIGA–technology for the production of hybrid integrated micro–optical modules was developed. For monomode applications an alignment accuracy of $\pm 1 \mu\text{m}$ is necessary, which is guaranteed so far by a complex active alignment procedure of the micro–optical components. With the new concept the active and passive optical components are aligned passively, which simplifies the assembling, whereby the manufacturing costs will be reduced. The advantage of the passive assembly by means of highly precise LIGA structures was proven within this work by the realization and characterization of a heterodyne receiver (coherent receiver).

The passive alignment of the active and passive micro–optical components is done by means of resist structures of PMMA, which are manufactured on a ceramic substrate by x–ray lithography. The mechanical fixing takes place with UV–curable adhesive and the electrical contacting of the active components with conductive epoxy resin, which is hardened at 70°C . The used customized photo–diodes, prisms and ball lenses are all commercially available.

The proof of the precision of the passive assembly took place by means of the realization and the proof of the optical quality of an optical heterodyne receiver. The measurement of the beam overlay within the position of the photodiodes shows a lateral misalignment of $5.1 \mu\text{m}$. A lateral misalignment of the signal fibers for the received– and local oscillator signal of $\pm 1 \mu\text{m}$ relative to each other would theoretically cause a lateral beam misalignment of $\pm 6.4 \mu\text{m}$ at the position of a photodiode. Since the measured beam misalignment is within this range, this measurement demonstrates that the alignment accuracy required for monomode applications is guaranteed by the LIGA structures made by x–ray lithography.

The heterodyne receiver was characterized regarding to his electrical and optical characteristics. The heterodyne receiver is hybrid integrated into a SMD evaluation electronic and allows the detection of intermediate frequencies up to 2.8 GHz. A coherent detection is possible in the wavelength range of 1532 nm to 1566 nm.

Furthermore the alignment accuracy with alignment structures made with the LIGA technique, was characterized by means of a simple fiber–fiber–coupling experiment. The alignment accuracy resulting from the overlap integral amounted to $1.2 \mu\text{m}$. This value considers also the core eccentricity specified by the fiber manufacturer of the monomode fibers which is in the range of $1 \mu\text{m}$. Thus this measurement shows, that a passive adjustment with sub–micrometer precision is guaranteed.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Grundlagen optischer Komponenten	7
1.1 Eigenschaften von Monomodefasern	8
1.2 Abbildung eines Gaußschen Strahls	11
1.3 Physikalische Grundlagen von Photodioden	13
1.4 Physikalische Grundlagen von Halbleiterlaserdioden	15
2 Grundlagen und Design für einen Heterodyn-Empfänger	19
2.1 Prinzip	19
2.2 Rauscharten	21
2.3 Gegentakt-detektor	23
2.4 Polarisations-Diversitäts-Anordnung	27
2.5 Stand der Technik	28
2.6 Design für einen hybrid integrierten Polarisations-Diversitäts-Empfänger . . .	31
2.6.1 Design der Photodioden	34
2.6.2 Design der Strahlteiler	35
2.6.3 Strahlverlauf und Überlagerung	39
2.6.4 Einfluß von Fertigungstoleranzen	41
3 Integration optoelektronischer Komponenten	43
3.1 LIGA-Verfahren	44
3.2 Herstellung einer mikrooptischen LIGA-Bank	45
3.3 Maßverfolgung mit dem COSMOS-2D Prüfsystem	51
3.4 Aufbau- und Verbindungstechnik	53

3.5	Justagetoleranzen bei der passiven Justage mit LIGA-Halteelementen	60
3.6	Integration von Laserdioden	63
4	Optische und elektrische Charakterisierungen	67
4.1	DFB-Laserdioden	68
4.2	pin-Photodioden	72
4.3	Strahlteilereigenschaften	74
4.4	Rückreflexe innerhalb des Empfängermoduls	76
4.5	Gegentaktanordnung	79
	Zusammenfassung und Diskussion	83
	Literaturverzeichnis	87
	Anhang	93
	A Spezifikationen der Photodioden	93
	Danksagung	95

Symbolverzeichnis

Variablen

a	Kernradius einer Monomodefaser
a_{PD}	Radius der lichtempfindlichen Photodiodenfläche
C	Kapazität eines Kondensators
d	Dicke
e	Kernexzentrizität einer Monomodefaser
$E(x, y, z)$	Elektrisches Feld an der Position (x,y,z)
E_{lo}	Elektrisches Feld des lokalen Oszillators
E_s	Elektrisches Feld des Sendesignals
f	Brennweite
Δf	Bandbreite des Photodiodenrauschens
ΔI	Differenzstrom
I	Photodiodenstrom
I_d	Dunkelstrom der Photodiode
$I(r, z)$	Intensität
I_0	maximale Intensität eines Gaußstrahls
I_{PD}	Photodiodenstrom
i_{gesamt}	Gesamtrauschsignal der Photodiode
i_{RIN}	Rauschsignal durch Intensitätsrauschen
i_s	Rauschsignal durch Schrotrauschen
i_{th}	Rauschsignal durch thermisches Rauschen
k	Betrag des Wellenvektors
m	Modennummer
n	Brechungsindex
n_{Kern}	Brechungsindex des Faserkerns
n_{Mantel}	Brechungsindex des Fasermantels
\bar{n}	effektiver Modenindex
P	Optische Leistung
δP	Schwankung der abgestrahlten optischen Leistung
P_{lo}	optische Leistung des lokalen Oszillators
P_s	optische Leistung des Senders
$R(z)$	Krümmungsradius der Phasenfront eines Gaußstrahls
R	Radius einer Kugellinse
R	Reflektivität
R	Empfindlichkeit der Photodiode
R_L	Eingangswiderstand am Verstärker
s	Gegenstandsweite
s'	Bildweite
\mathbf{S}	Transfermatrix
δt	Verschiebung der Position der Strahltaile
T	Temperatur
T	Transmissionskoeffizient
U_R	In Sperrichtung an eine Photodiode angelegte Spannung
V	Normierte Frequenz

Δx	Kantenunschärfe der LIGA-Strukturen
z_r	Rayleighlänge

Griechische Buchstaben

α	Dämpfung
α_B	Winkel zwischen der Strukturseitenwand und der Substratnormalen
η	Koppeleffizienz
θ	Divergenz eines Gaußstrahls
κ_I	Zwischenfrequenzänderung bei einer Injektionsstromänderung
κ_T	Zwischenfrequenzänderung bei einer Temperaturänderung
λ	Wellenlänge
$\Delta\lambda$	Spektrale Linienbreite im Wellenlängenbereich
Λ	Gitterperiode eines Bragg-Gitters
ν	Abgestrahlte Frequenz der Laserdiode
$\Delta\nu$	Spektrale Linienbreite im Frequenzbereich
τ_{tr}	Transportzeit
τ	Laufzeitunterschied
φ_r	Phase des reflektierten Lichts
φ_t	Phase des transmittierten Lichts
Φ	Phase
Φ_{lo}	Phase des lokalen Oszillators
Φ_s	Phase des Sendelasers
$\Phi(z)$	Phase eines Gaußstrahls
ω_0	$\frac{1}{e}$ -Weite des Feldes eines Gaußstrahls am Ort der Strahltille
ω'_0	$\frac{1}{e}$ -Weite des Feldes eines Gaußstrahls am Ort der Strahltille in der Bildebene
$\omega(z)$	$\frac{1}{e}$ -Weite des Feldes eines Gaußstrahls
ω_{IF}	Zwischenfrequenz
ω_{lo}	Frequenz der Laserdiode des lokalen Oszillators
ω_s	Frequenz der Laserdiode des Senders

Abkürzungen

AR	Antireflektive Beschichtung
ASK	Amplitude Shift Keying, Amplitudenumtastung
BER	Bit Error Rate, Bitfehlerwahrscheinlichkeit
BPF	Bandpaßfilter
BS	Beam Splitter, Strahlteiler
CAD	Computer Aided Design
CMRR	Common Mode Rejection Ratio, Gleichtaktunterdrückung
COSMOS-2D	Computer System for Measurement of Optically Acquired Structure Surfaces in 2 Dimensions, Prüfsystem
DFB	Distributed Feedback, Laserdiodentyp
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier, Faserverstärker mit Er-dotierter Faser
FM	Frequenz Modulation
FP	Fabry Perot, Laserdiodentyp
FSK	Frequency Shift Keying, Frequenzumtastung
HF	Hochfrequenz

IM	Intensitätsmodulation
LIGA	Röntgentiefen L ithografie mit Synchrotronstrahlung, G alvanoformung von Metallen und A bformung von Kunststoffen
LO	Lokaler Oszillator
MCAD	Mechanical CAD, CAD-System speziell für 2D-Konstruktionen
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit, integrierter Mikrowellenschaltkreis
MOVPE	Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, Metallorganischer Gasphasen-Epitaxie-Prozeß
NA	Numerische Apertur
PBS	Polarisation Beam Splitter, Polarisationsstrahlteiler
PD	Photodiode
PMMA	Polymethylmethacrylat
PSK	Phase Shift Keying, Phasenumtastung
RIN	Relative Intensity Noise, relatives Intensitätsrauschen
RL	Return Loss, Rückflußdämpfung
SMD	Surface Mounted Device, oberflächenmontierbare Bauteile
TPF	Tiefpaßfilter
WDM	Wavelength Division Multiplexing, Wellenlängenmultiplex
ZF	Zwischenfrequenz

Einleitung

Auf dem Weg in die Informationsgesellschaft wird der Bedarf an Modulen für die Übertragung und Verarbeitung von immer größer werdenden Datenströmen ständig zunehmen. Die Übertragung der Information mittels Glasfasern bietet hierbei nahezu unbegrenzte Möglichkeiten, den derzeit und in Zukunft anfallenden Anforderungen hinsichtlich der Übertragungskapazität gerecht zu werden. So bietet eine einzige Glasfaser bereits eine Bandbreite von 50 THz, wobei die zwei Wellenlängenfenster bei 1300 nm und 1550 nm verwendet werden [1]. Im Vergleich dazu ist mit einem Koaxialkabel eine elektrische Bandbreite von bis zu 1 GHz realisierbar [2].

Die Übertragung der Daten geschieht im allgemeinen durch direkte Intensitätsmodulation einer Laserdiode, wobei das Signal mit einer Photodiode detektiert wird. Bei der für Vielkanalsysteme eingesetzten WDM (wavelength division multiplexing)–Technik entspricht jeder optische Übertragungskanal einer ganz bestimmten optischen Wellenlänge. Für den Empfang eines bestimmten Übertragungskanals bedarf es eines optischen Filters, wobei die Anzahl der notwendigen optischen Filter mit der Anzahl der Übertragungskanäle zunimmt. Die optische Bandbreite der Filter bestimmt den minimalen Wellenlängenabstand und damit die maximale Anzahl von möglichen Übertragungskanälen.

In der Rundfunktechnik werden zum selektiven Empfang sehr vieler Kanäle Überlagerungsempfänger eingesetzt. Das empfangene Hochfrequenzsignal wird bei diesen Empfängern in ein Zwischenfrequenzsignal umgesetzt. Durch einen in der Frequenz abstimmbaren Lokaloszillator ist ein selektiver Empfang einzelner Nachrichtenkanäle möglich. Die eigentliche Kanaltrennung geschieht im Zwischenfrequenzbereich unter Verwendung eines Zwischenfrequenzfilters. Die Vorteile eines Überlagerungsempfängers sind seine hohe Empfindlichkeit und gute Kanaltrennschärfe [3].

Beim optischen Überlagerungsempfang werden die empfangenen Nachrichtenkanäle mit Hilfe eines lokalen Lasers (Lokaloszillator) aus dem optischen Frequenzbereich in einen elektrischen Zwischenfrequenzbereich (Heterodyn¹–Empfang) oder direkt in das Basisband (Homodyn²–Empfang) umgesetzt. Der selektive Empfang eines Kanals geschieht hierbei durch das Zusammenspiel eines in der Frequenz abstimmbaren Lokallasers und eines Zwischenfrequenz- oder Basisbandfilters konstanter Mittenfrequenz. Die Vorteile des optischen Überlagerungsempfangs³ sind die gleichen wie in der Rundfunktechnik. Die hohe Empfindlichkeit und die gute Kanaltrennung sind hierbei auf eine große lokale Laserlichtleistung und auf die größere

¹(gr.) hetero: ungleich, (gr.) dyn: Kraft.

²(gr.) homo: gleich

³Da für den optischen Überlagerungsempfang kohärente Lichtquellen notwendig sind, spricht man auch von kohärenten Empfängern bzw. kohärenten Übertragungssystemen.

Trennschärfe elektrischer Filter im Vergleich zu optischen Filtern zurückzuführen. Ein weiterer Vorteil ist, daß elektrische Filter kostengünstiger in ein System integrierbar sind als optische Filter [3].

Mit einem optischen Überlagerungsempfänger ist die Realisierung eines optischen Frequenzmultiplexsystems möglich, bei dem die einzelnen Nachrichtenkanäle nahezu lückenlos im optischen Frequenzbereich nebeneinanderliegen. Die Übertragungskapazität der Glasfaser kann dadurch voll ausgeschöpft werden. Es wird erwartet, daß sich durch den Einsatz von optischen Überlagerungsempfängern die Kapazität eines normalen WDM-Systems um den Faktor acht erhöht [4].

Für die Zukunft werden hybride Lösungen für optische Netzwerke erwartet. Der Empfang von Video/TV-Kanälen soll mit einem optischen Überlagerungsempfänger erfolgen. Der bidirektionale Datenaustausch (Bild-Telefon, Telelearning) zwischen zwei PC's soll im allgemeinen über Kanäle geschehen, bei denen die Information durch direkte Intensitätsmodulation übertragen wird. Bei kohärenten Übertragungssystemen wird im allgemeinen die Trägerfrequenz moduliert [4].

Die Glasfaser wird im großen Stil bis zu jedem einzelnen Teilnehmer nur dann verlegt werden, wenn der optische Anschluß preiswert möglich ist. Für die Anbindung von Teilnehmern an ein optisches Netzwerk werden mikrooptische und monolithisch integrierte optische Schalter, optische Verstärker, Laserquellen, Empfänger, optische Isolatoren, Koppler und Wellenlängenfilter benötigt. Für die Übertragung und Detektion von großen Datenmengen müssen diese mikrooptischen Aufbauten mit Hochfrequenz (HF)-Modulen (MMIC-Verstärker, Multiplexer, Filter, Multiplizierer) kombiniert werden, welche die Modulation von Lichtsignalen und die Detektion von Photoströmen mit Frequenzen im GHz-Bereich erlauben [5].

Der Einsatz und die Verbreitung dieser Technologien wird dadurch bestimmt werden, daß Herstellungsverfahren gefunden werden, die eine kostengünstige Fertigung dieser Module ermöglichen [6]. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Entwicklung von kostengünstigen Fertigungsmethoden für die Herstellung von hybriden Komponenten voranzutreiben.

Der Schlüssel für die kostengünstige Fertigung ist die passive Justierung der optischen Komponenten, d. h. diese werden mit Hilfe mechanischer und optischer Justierhilfen zueinander ausgerichtet. Bei der aktiven Justage wird der optische Aufbau bei eingeschalteter Lichtquelle justiert und die optimale Position der Komponenten anschließend fixiert.

Derzeit gibt es zwei Konzepte für die Herstellung von mikrooptischen Modulen. Zum einen die monolithische Integration, bei der auf der Basis eines bestimmten Halbleitermaterialsystems (etwa Galliumarsenid oder Indiumphosphid) ein komplettes Modul auf einem Substrat hergestellt wird und zum anderen die hybride⁴ Integration, bei der Komponenten aus verschiedenen Materialsystemen zu einem Modul kombiniert werden.

Der wesentliche Vorteil einer monolithischen Integration besteht darin, daß bis auf die Ankopplung der Glasfasern keine Justage einzelner optischer Komponenten notwendig ist. Ein großer Nachteil hingegen ist, daß eine Designänderung innerhalb des Moduls unter Umständen zu weitreichenden Prozeßänderungen führen kann und der Herstellungsprozeß damit relativ unflexibel ist.

⁴(lat.) hybrida: Mischling, von unterschiedlicher Herkunft.

Die hybride Integration von mikrooptischen Aufbauten und von in SMD-Technik aufgebauten elektronischen Schaltungen ermöglicht die flexible Realisierung von hybriden optoelektronischen Modulen. Damit bietet dieses Konzept Lösungsmöglichkeiten für viele Anwendungsfelder, nicht nur für Anwendungen der optischen Nachrichtentechnik. Bei der hybriden Integration hat eine Designänderung meist nur eine Änderung in der Anordnung der jeweiligen Komponenten zur Folge. Ein weiterer Vorteil dieses Montagekonzepts liegt darin, daß der Designer auf eine größere Vielfalt an optischen Komponenten zurückgreifen kann, da er optische Komponenten beliebiger Materialsysteme miteinander kombinieren kann. Die Schwierigkeit bei diesem Aufbaukonzept liegt in einer kostengünstigen Montage. Bei Monomode-Anwendungen für die optische Nachrichtentechnik werden etwa Justagegenauigkeiten im Bereich von $\pm 1 \mu\text{m}$ und weniger benötigt. Bisher wird dies durch eine aufwendige aktive Justage der einzelnen optischen Komponenten zueinander erreicht. Für eine kostengünstige Fertigung ist es jedoch von Vorteil, wenn die aktive Justage durch eine kostengünstigere passive Justage ersetzt werden kann.

Hierzu ist es notwendig, die optischen Komponenten mit mechanischen Justierhilfen (Anschlagskanten) zu versehen und eine Aufnahmeplatte (mikrooptische Bank) herzustellen, welche ebenfalls mechanische Justierhilfen besitzt. Ferner sind Halteelemente notwendig, welche die unterschiedlichen aktiven und passiven mikrooptischen Komponenten entlang der optischen Achse zueinander justieren.

Das Konzept der hybriden Integration wird in den Arbeiten von British Telecom [7], Alcatel [8] und Siemens [9] verfolgt. Diese beschäftigen sich mit dem Aufbau von kombinierten Send- und Empfangsmodulen (Transceivern), wobei die Photo- und Laserdioden gemeinsam auf einem vorstrukturierten Siliziumsubstrat passiv justiert werden. Für die Realisierung eines Lasermoduls, wobei das von der Laserdiode emittierte Licht in eine Monomodefaser eingekoppelt wird, wird bei den Arbeiten der Firmen AT&T [10], IBM [11] und Fujitsu [12] ebenfalls ein vorstrukturiertes Siliziumsubstrat verwendet.

Bei der Verwendung von strukturierten Siliziumsubstraten sind der hybriden Integration von mikrooptischen Komponenten Grenzen gesetzt. Für die Herstellung eines passiv justierten Heterodyn-Empfängers wird eine sogenannte mikrooptische Bank benötigt, welche mechanische Justierhilfen für die Positionierung der mikrooptischen Komponenten und Leiterbahnen für die elektrische Anbindung der aktiven Komponenten bereitstellt. Bei einem Heterodyn-Empfänger handelt es sich um ein Modul, an dem aufgrund seiner Komplexität die Leistungsfähigkeit der verwendeten Herstellungstechnologie eindrucksvoll demonstriert werden kann. So ist für die Realisierung eines Heterodyn-Empfängers der Aufbau einer anspruchsvollen Optik und die Integration aktiver optischer Komponenten unter Berücksichtigung der Problematik der Anbindung an eine HF-Auswerteschaltung notwendig. Beim Versuch von Siemens [13] einen Heterodyn-Empfänger durch hybride Integration der aktiven und passiven mikrooptischen Komponenten herzustellen, mußten die notwendigen Prismen und die Laserdiode aktiv justiert werden, da mit einem vorstrukturierten Siliziumsubstrat die für Monomode-Anwendungen einzuhaltenden Justagetoleranzen nicht realisiert werden konnten.

Die LIGA-Technologie⁵ bietet eine flexible Basis für die Herstellung hochpräziser mechanischer Justierhilfen und damit die Möglichkeit der kostengünstigen passiven Montage von

⁵Verfahren für die Herstellung von sehr präzisen Mikrostrukturen durch Kombination von Röntgentiefenlithografie mit Synchrotronstrahlung, Galvanoformung von Metallen und Abformung von Kunststoffen.

aktiven und passiven optischen Komponenten aus verschiedenen Materialsystemen auf einer mikrooptischen Bank (Hybrid-Integration). Die Vorteile des LIGA-Verfahrens liegen in der beliebig wählbaren lateralen Geometrie der Haltestrukturen und einer geringen Seitenwandrauigkeit. Damit hat das LIGA-Verfahren hervorragende Voraussetzungen für die Herstellung von hybrid aufgebauten mikrooptischen Funktionsmodulen.

Erste Schritte auf dem Weg zu einer hybriden Integration von aktiven und passiven mikrooptischen Komponenten auf einer mikrooptischen LIGA-Bank wurden in den Arbeiten [14–17] gemacht. Innerhalb der Arbeit von A. Müller [14] wurde ein Transceiver mit Hilfe einer mikrooptischen LIGA-Bank realisiert. Die beiden Linsen und der Strahlteiler wurden passiv und die Laser- und Photodioden aktiv positioniert. In den Arbeiten von M. Marth [17] und J. Kuiper [16] wurden die Grundlagen für die hybride Integration von Laserdioden in eine mikrooptische Polymerbank erarbeitet. In der Arbeit von M. Foulger [18] wurde eine mikrooptische Schaltmatrix für Multimode-Anwendungen mit Hilfe der LIGA-Technik hergestellt. Die Glasfasern wurden hierbei mit speziellen Faserhalteelementen passiv positioniert. Für den Aufbau eines optischen Faserverstärkers (EDFA) wurde in der Arbeit von T.v. Freyhold [15] das Konzept der Faserpositionierung mit Faserhalteelementen auf Monomode-Anwendungen erweitert.

Innerhalb dieser Arbeit soll die Integration von aktiven und passiven mikrooptischen Komponenten in eine mikrooptischen Bank demonstriert werden, wobei die Komponenten alle passiv montiert werden sollen. Die erfolgreiche Integration soll anhand eines komplexen Moduls – einem Heterodyn-Empfänger – nachgewiesen werden. Hierbei wurde ein kompaktes optoelektronisches System aufgebaut, in dem der mikrooptische Aufbau hybrid mit einer in SMD-Technik realisierten HF-Auswerteschaltung integriert wurde, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.

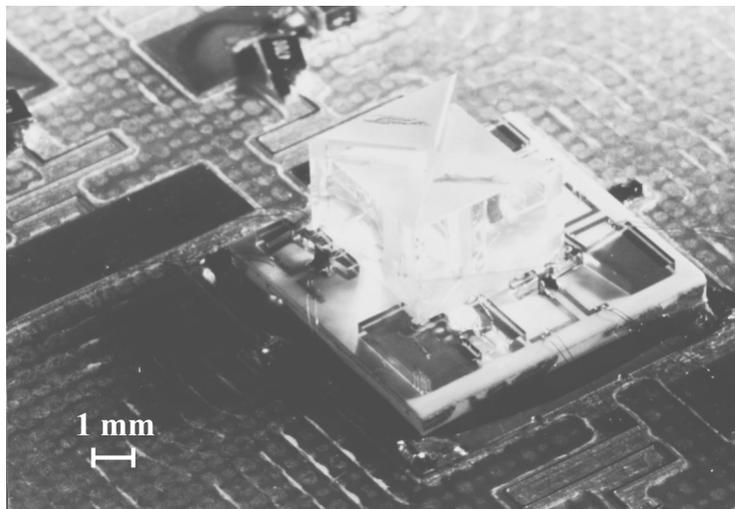


Abbildung 1: Hybride Integration eines passiv justierten mikrooptischen LIGA-Aufbaus auf einer in SMD-Technik realisierten HF-Auswerteschaltung für Frequenzen bis 2.8 GHz.

Die Arbeit gliedert sich in vier Kapitel. In Kapitel 1 werden die optischen Grundlagen erläutert. Die einzelnen mikrooptischen Komponenten, die zur Integration vorgesehen sind, werden vorgestellt. Die Auswahl der Komponenten richtet sich nach dem gewählten Demonstrator,

d. h. dem Heterodyn-Empfänger.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit dem Funktionsprinzip eines Heterodyn-Empfängers. Hierzu wird unter anderem auf die verschiedenen Rauscharten, welche innerhalb der optischen Nachrichtentechnik eine Rolle spielen und auf deren Einfluß auf das optische Design des Heterodyn-Empfängers eingegangen. Nachdem die Grundprinzipien des optischen Überlagerungsempfangs aufgezeigt wurden, wird ein detaillierter Überblick zu bisher aufgebauten Heterodyn-Empfängern gegeben. Anschließend wird das Design für den innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfänger entwickelt.

In Kapitel 3 wird auf die Herstellung der mikrooptischen LIGA-Bänke eingegangen. Ferner wird das Konzept der passiven Montage von mikrooptischen Komponenten mittels Halteelementen dargestellt. Dies beinhaltet die Charakterisierung von Herstellungstoleranzen der Justierhilfen. Erste Ergebnisse bezüglich der Integration von Laserdioden in eine mikrooptische LIGA-Bank werden gezeigt.

In Kapitel 4 werden die experimentell ermittelten optischen und elektrischen Eigenschaften des Heterodyn-Empfängers dargestellt.

Kapitel 1

Grundlagen optischer Komponenten

Die Auswahl der hier vorgestellten optischen Komponenten richtet sich nach der gewählten Anwendung einer mikrooptischen Bank in einem Heterodyn-Empfänger. Für die Herstellung des hybrid auf einer mikrooptischen LIGA-Bank integrierten Heterodyn-Empfängers (siehe Abbildung 1.1) werden zwei Monomodefasern (Signalfaser und Lokaloszillatorfaser) mit

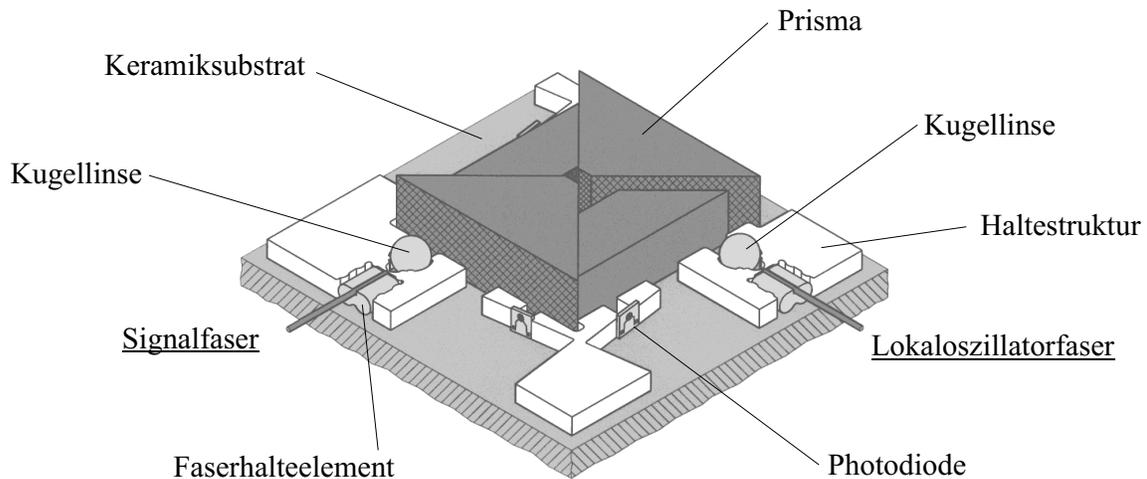


Abbildung 1.1: Hybrid auf eine mikrooptische LIGA-Bank integrierter und vollständig passiv justierter Heterodyn-Empfänger.

Hilft jeweils eines Faserhalteelements entlang der optischen Achse positioniert. Das von den Fasern abgestrahlte Lichtsignal wird jeweils mit einer Kugellinse kollimiert und innerhalb einer Prismenanordnung überlagert. Das optische Überlagerungssignal wird mit vier Photodioden detektiert. Alle Komponenten werden mittels Haltestrukturen justiert. Im Folgenden werden die Eigenschaften der verwendeten Komponenten dargestellt, wobei die Funktion des mikrooptischen Aufbaus in Kapitel 2 ausführlich beschrieben wird.

Für die Auslegung der mikrotechnisch hergestellten Freistrahloptik bedarf es der Kenntnis des Faserabstrahlverhaltens, der Abbildungseigenschaften von Kugellinsen und des Einflusses der Prismenanordnung auf den Strahlverlauf (siehe Abschnitt 1.1).

Für die Detektion der Lichtsignale werden sehr lichtempfindliche und schnelle Photodioden

eingesetzt. Die optische Empfindlichkeit und elektrische Bandbreite dieser Photodioden kann durch Anlegen einer entsprechenden Vorspannung verändert werden. Zum Verständnis der relevanten Mechanismen wird die Funktionsweise von Photodioden in Abschnitt 1.3 beschrieben.

Als Lichtquellen werden Halbleiterlaserdioden eingesetzt. Die Funktionsweise von Halbleiterlaserdioden wird in Abschnitt 1.4 dargestellt.

1.1 Eigenschaften von Monomodefasern

Dämpfungseigenschaften Für die Übertragung optischer Signale über weite Entfernungen sind Monomodefasern aus Quarzglas aufgrund der geringen Dämpfung am besten geeignet. Abbildung 1.2 zeigt die Signaldämpfung als Funktion der Wellenlänge. Bei der Wel-

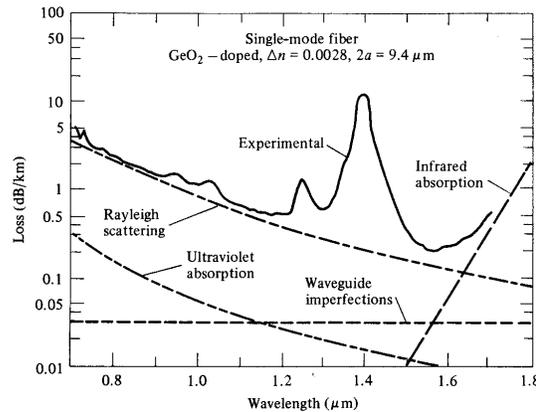


Abbildung 1.2: Dämpfungsspektrum einer Monomodefaser aus synthetischem Quarzglas [19].

lenlänge $1,4 \mu\text{m}$ besitzt die Signaldämpfung ein Maximum. Dieser Peak wird durch Glasverunreinigungen mit Wassermolekülen, d. h. OH-Gruppen verursacht. Die Signaldämpfung wird für Wellenlängen unterhalb von $1,3 \mu\text{m}$ durch Rayleighstreuung und für Wellenlängen oberhalb von $1,55 \mu\text{m}$ durch Materialabsorption bestimmt. Bei der Rayleighstreuung wird das Licht an Dichtefluktuationen innerhalb der Glasfaser gestreut. Ferner verursachen eine nicht perfekte Kern-Mantel-Grenzfläche und Abweichungen von der idealen Kerngeometrie eine zusätzliche Signaldämpfung.

Die geringste Dämpfung wird bei der Wellenlänge $1,55 \mu\text{m}$ gemessen. Der Wellenlängenbereich um $1,55 \mu\text{m}$ eignet sich daher gut für die Übertragung von Daten über lange Distanzen. Da optische Verstärker bei $1,55 \mu\text{m}$ arbeiten, wird dieser Wellenlängenbereich immer wichtiger. Ein zweites Minimum befindet sich bei der Wellenlänge $1,3 \mu\text{m}$. Innerhalb eines optischen Netzwerks ist im allgemeinen der Wellenlängenbereich um $1,55 \mu\text{m}$ für die Datenübertragung zum Endnutzer und der Wellenlängenbereich um $1,3 \mu\text{m}$ für den Datenversand vom Endnutzer zur Vermittlungsstelle vorgesehen [2].

Stufenindexfasern Abbildung 1.3 zeigt schematisch den Aufbau einer Stufenindexfaser. Der innere Bereich des Zylinders ist der Faserkern, wobei dieser aus einem Glas mit Bre-

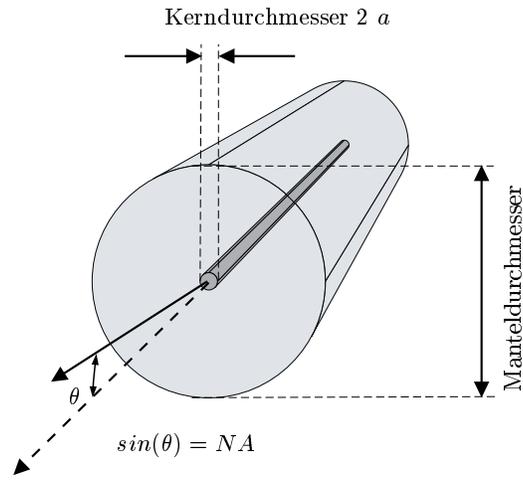


Abbildung 1.3: Aufbau einer Stufenindexfaser.

chungsindex n_{Kern} besteht. Der Faserkern ist mit einem Mantel umgeben, der aus einem Glas mit Brechungsindex n_{Mantel} besteht. Innerhalb des Faserkerns und innerhalb des Fasermantels besitzen die entsprechenden Brechungsindizes einen konstanten Wert. Am Übergang zwischen Faserkern und Mantel ändert sich der Brechungsindex bei einer Stufenindexfaser sprunghaft.

Theorie Gaußscher Strahlen Das Abstrahlverhalten von Monomodefasern und Halbleitlaserdioden läßt sich mit Hilfe von Gaußschen Strahlen beschreiben.

Die Ausbreitung einer elektromagnetischen Feldkomponente E innerhalb eines homogenen und isotropen Mediums mit Brechungsindex n wird durch die skalare Wellengleichung

$$\left[\vec{\nabla}^2 + k^2 \right] E(x, y, z) = 0 \quad \text{mit} \quad k = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (1.1)$$

beschrieben, wobei k die Ausbreitungskonstante innerhalb des Mediums ist [20]. Bei Betrachtung einer rotationssymmetrischen transversalen Abhängigkeit ist der fundamentale Gaußstrahl,

$$E(r, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-i[kz - \Phi(z)] - r^2 \left[\frac{1}{\omega^2(z)} + \frac{ik}{2R(z)} \right]} \quad (1.2)$$

eine Lösung dieser Wellengleichung. Die für den fundamentalen Gaußstrahl eingeführten Größen sind die Strahlweite $\omega(z)$, die Phase $\Phi(z)$, der Radius der Phasenfrontkrümmung $R(z)$ und die Rayleighlänge z_r :

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r} \right)^2}, \quad z_r = \frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda}, \quad (1.3)$$

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{z_r}{z} \right)^2 \right), \quad \Phi(z) = \arctan \left(\frac{z}{z_r} \right). \quad (1.4)$$

In Abbildung 1.4 ist der Verlauf eines solchen Gaußstrahls dargestellt. Für die vollständige Beschreibung sind die Kenntnis der Strahltaillenweite ω_0 an der Stelle $z = 0$ und der Wellenlänge λ erforderlich. Die Rayleighlänge z_r gibt den Abstand vom Ursprung an, bei dem der

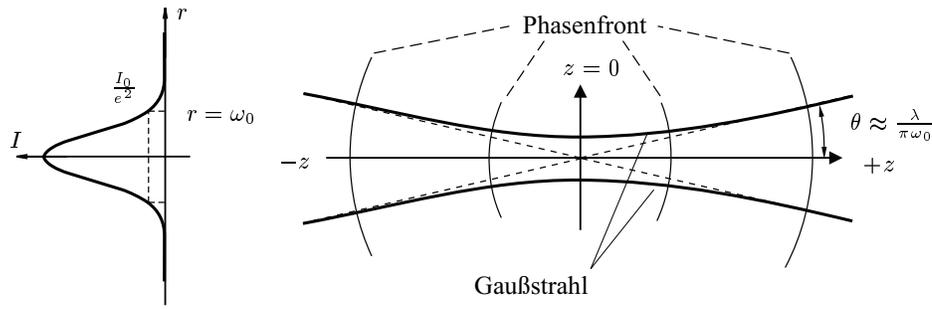


Abbildung 1.4: Ausbreitung eines Gaußstrahls und Querschnitt der Intensitätsverteilung am Ort der Strahltaille.

Strahlradius ω den $\sqrt{2}$ -fachen Wert der Strahltaillenweite ω_0 annimmt. Die Rayleighlänge kennzeichnet ferner den Übergang zwischen Nah- und Fernfeld. Im Fernfeldbereich ($z \gg z_r$) zeigt der Gaußstrahl eine Divergenz von $\theta \approx \frac{\lambda}{\pi \omega_0}$. Die Intensitätsverteilung ergibt sich aus dem Betragsquadrat der Feldverteilung des fundamentalen Gaußstrahls nach Gleichung 1.2 zu

$$I(r, z) = I_0 e^{-2 \frac{r^2}{\omega(z)^2}}. \quad (1.5)$$

Abstrahlverhalten von Stufenindexfasern Die von einer Stufenindexfaser geführte elektromagnetische Feldverteilung ergibt sich durch Lösen der Maxwell Gleichungen für die Randbedingung,

$$n(r) = \begin{cases} n_{\text{Kern}} & \text{für } r \leq a \\ n_{\text{Mantel}} & \text{für } r > a \end{cases} \quad (1.6)$$

mit $n_{\text{Kern}} > n_{\text{Mantel}}$, der in Abbildung 1.3 dargestellten Stufenindexfaser.

Bei den innerhalb dieser Arbeit verwendeten Stufenindexfasern ist der Brechungsindex im Kernbereich n_{Kern} um 0.36 % gegenüber dem Brechungsindex im Mantelbereich n_{Mantel} erhöht [21]. In diesem sogenannten Fall einer schwachen Führung kann die skalare Wellengleichung 1.1 für die Beschreibung von elektromagnetischen Feldern innerhalb einer Stufenindexfaser verwendet werden. Die Lösungen der Wellengleichung werden als Moden bezeichnet.

Ein Maß für die Anzahl der möglichen Moden ist die normierte Frequenz V ,

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_{\text{Kern}}^2 - n_{\text{Mantel}}^2} \quad (1.7)$$

$$:= \frac{2\pi}{\lambda} a NA. \quad (1.8)$$

Die fundamentale Mode wird von Stufenindexfasern immer geführt. Damit diese die einzige Lösung ist, müssen die numerische Apertur¹ NA und damit der Brechungsindexunterschied zwischen Kern und Mantel so eingestellt werden, daß $V < 2.405$ ist [22].

¹Die numerische Apertur ist das Produkt aus dem Sinus des Aperturwinkels, d. h. des halben Winkels des Lichtkonuses, der noch in die Faser eingekoppelt werden kann, und dem Brechungsindex im Ausbreitungsraum (hier $n_{\text{Luft}} = 1$, siehe Abbildung 1.3).

Das von einer Stufenindexfaser abgestrahlte Feld kann durch eine Gaußverteilung angenähert werden. Liegt die normierte Frequenz im Bereich $1.2 < V < 2.4$, so kann die Strahltaillenweite durch die analytische Näherung $\omega_0 \approx a(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6})$ berechnet werden [23].

Der innerhalb dieser Arbeit benutzte Monomode-Fasertyp ist in der Arbeit von T.v. Freyhold [15] charakterisiert. Die Vermessung der Intensitätsverteilung entlang der optischen Achse mit einer Kamera ergibt eine Strahltaillenweite von $\omega_0 \approx 5.25 \mu\text{m}$ bei der Wellenlänge von $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Für die weiteren Rechnungen wird daher dieser Wert für die Strahltaillenweite des von der Monomodefaser abgestrahlten Feldes verwendet.

1.2 Abbildung eines Gaußschen Strahls

Die aus der geometrischen Optik bekannte Abbildungsgleichung kann in dimensionsloser Form folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{1}{s/f} + \frac{1}{s'/f} = 1. \quad (1.9)$$

Hierbei ist s die Gegenstandsweite, d. h. der Abstand zwischen dem Objekt und der Linsenhauptebene, s' kennzeichnet die Bildweite und f die Brennweite der Linse.

Für die Abbildung eines Gaußschen Strahls hat S.A. Self [24] eine analoge Gleichung abgeleitet:

$$\frac{1}{s/f + (z_r/f)^2 / (s/f - 1)} + \frac{1}{s'/f} = 1. \quad (1.10)$$

Die Gegenstandsweite s kennzeichnet hierbei den Abstand zwischen der abzubildenden Strahltaille und der Linsenhauptebene. Die Position der Strahltaille mit Radius ω'_0 in der Bildebene wird durch die Bildweite s' gekennzeichnet, d. h. dem bildseitigen Abstand zwischen Strahltaille und der Linsenhauptebene.

In Abbildung 1.5 ist die Bildweite s'/f als Funktion der Gegenstandsweite s/f für einige Werte des Parameters $\left| \frac{z_r}{f} \right|$ aufgetragen. Für die optische Abbildung sind die drei Regionen I, II und III von Bedeutung. Region I kennzeichnet bei der optischen Abbildung mit einer positiven Linse den Fall eines reellen Bildes bei einer virtuellen² Gegenstandsweite, Region II den Fall eines reellen Bildes bei einer reellen Gegenstandsweite und Region III den Fall eines virtuellen Bildes bei einer reellen Gegenstandsweite.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen Gaußscher Strahlenoptik und geometrischer Optik können in den folgenden Punkten zusammengefaßt werden:

- Es gibt eine maximale und minimale Bildweite für Gaußsche Strahlen.
- Die maximale Bildweite wird für einen Gaußschen Strahl bei einer Gegenstandsweite von $s = f + z_r$ erreicht. Im geometrisch optischen Fall ist die Bildweite für eine Gegenstandsweite von $s = f$ maximal.

²Bildebenen, die auf der Gegenstandsseite liegen, sind negativ. Es handelt sich um virtuelle Bilder.

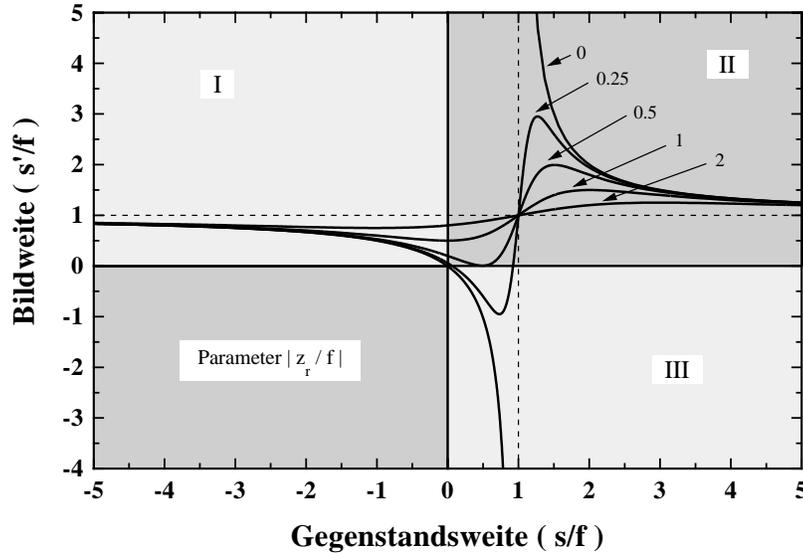


Abbildung 1.5: Darstellung der Abbildungsgleichung für die Abbildung eines Gaußschen Strahls für verschiedene Werte des Parameters $|z_r/f|$.

- Für alle Gaußsche Strahlen gibt es einen gemeinsamen Punkt $s/f = s'/f = 1$. Liegt die Strahltaile des einfallenden Strahls im vorderen Brennpunkt einer positiven Linse, so liegt das Bild der Strahltaile im hinteren Brennpunkt.
- Innerhalb der geometrischen Optik ist für ein reelles Bild bei einer reellen Gegenstandsweite an der Position $s' = s = 2f$ der Abstand zwischen Bild und Gegenstand minimal. Bei der Abbildung von Gaußschen Strahlen gibt es solch einen minimalen Abstand nicht.

Die Strahltaillenweite in der Bildebene ω'_0 berechnet sich gemäß [24,25] nach

$$\omega'_0 = \frac{\omega_0}{\sqrt{(1 - \frac{s}{f})^2 + (\frac{z_r}{f})^2}}, \quad (1.11)$$

und durch umformen von Gleichung 1.10 ergibt sich die Position der Strahltaile in der Bildebene zu

$$s' = f + \frac{f^2(s - f)}{z_r^2 + (s - f)^2}. \quad (1.12)$$

Für die Abbildung des von der Monomodefaser emittierten Gaußstrahls wird innerhalb dieser Arbeit eine Kugellinse verwendet. Eine Kugellinse ist eine dicke Linse mit nur einer Hauptebene durch den Kugelmittelpunkt [26]. Aus dem Radius R und dem Brechungsindex n ergibt sich die Brennweite zu

$$f = \frac{nR}{2(n - 1)}. \quad (1.13)$$

Die Anordnung für die Abbildung des von einer Monomodefaser abgestrahlten Gaußstrahls mit einer Kugellinse und der dazugehörige Strahlverlauf ist in der Abbildung 1.6 (a) dargestellt. Für den innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfänger (siehe Ab-

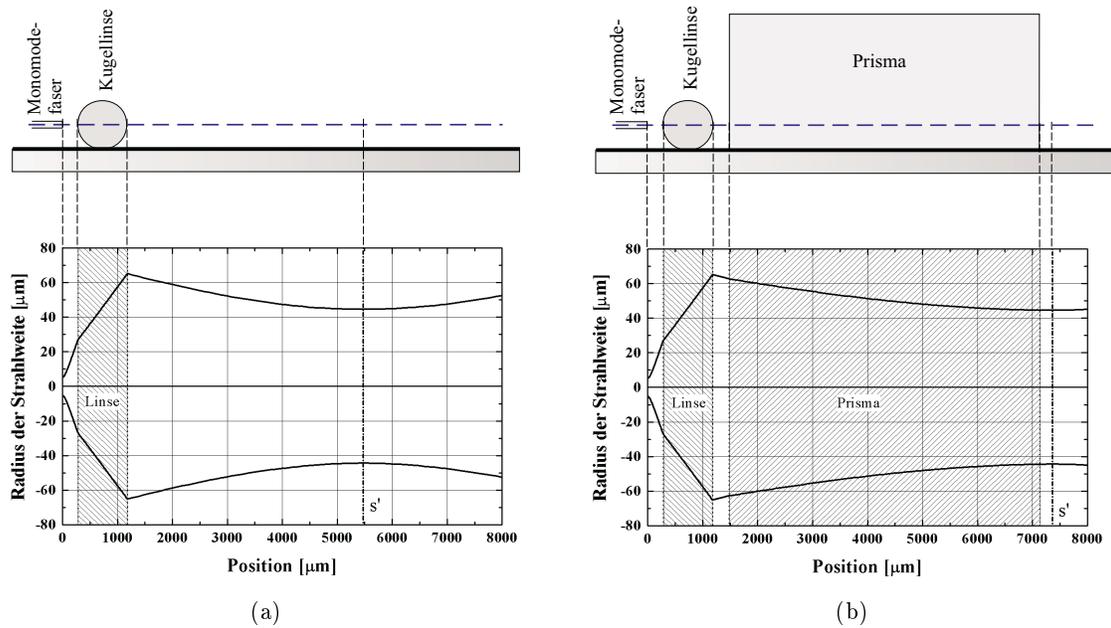


Abbildung 1.6: Abbildung eines Gaußstrahls ($\omega_0 = 5.25 \mu\text{m}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$) mit einer Kugellinse : (a) Abstand Faserstirnfläche–Linsenscheitel $281 \mu\text{m}$, Kugellinse aus BK7–Glas ($n_{\text{BK7}} = 1.5006$ bei $\lambda = 1550 \text{ nm}$) mit einem Radius von $450 \mu\text{m}$. (b) Einfluß eines Prismas auf die Strahltaillenposition: Anordnung Faserstirnfläche–Linsenscheitel wie in (a), Abstand Linsenscheitel–Prisma $300 \mu\text{m}$, Prisma aus BK7–Glas mit einer Dicke von $t = 5657 \mu\text{m}$.

schnitt 2.6) werden optisch beschichtete Prismen als Strahlteiler verwendet. Wird gemäß Abbildung 1.6 (b) hinter der Kugellinse ein Prisma der Dicke t plaziert, so wird die Position der Strahltaille s' um $\delta t = \frac{n_{\text{BK7}} - 1}{n_{\text{BK7}}} t$ von der Linse weg verschoben (vergleiche die Abbildungen 1.6 (a) und (b)) [27]. Diese Verschiebung der Strahltaillenposition ist bei der Gestaltung des optischen Designs für den Heterodyn–Empfänger zu berücksichtigen.

1.3 Physikalische Grundlagen von Photodioden

Die Umwandlung optischer Signale in elektrische geschieht mit Photodioden. Aufgrund der Signaldämpfung durch die Faser muß bei der Übertragung der optischen Signale über weite Strecken die Photodiode am Faserende eine hohe optische Empfindlichkeit haben. Gleichzeitig muß die Antwortzeit der Photodiode auf einen optischen Impuls sehr gering sein, damit es nicht zu Signalverzerrungen bei hohen Datenübertragungsraten kommt. Ferner soll bei der Konversion vermieden werden, daß dem Signal ein zusätzliches Rauschen aufgeprägt wird [28].

pn-Photodioden Photodioden sind im einfachsten Fall aus einer p- und einer n-dotierten Halbleiterschicht aufgebaut, wobei für den Einsatz bei 1300 und 1550 nm Indiumphosphid (InP) als Basismaterial verwendet wird [22,29]. In Abbildung 1.7 ist die Funktionsweise einer Photodiode dargestellt, wobei die Abbildungen 1.7 (a) und (b) den pn-Übergang und das Profil der Halbleiterdotierung am Übergang zeigen. Die linke Seite ist ein p-Halbleiter mit einem Überschuß an Löchern, wobei N_{accept} die Anzahldichte der Löcher beschreibt. Die rechte Seite ist ein n-Halbleiter mit einem Überschuß an Elektronen, wobei N_{donor} die Anzahldichte der Elektronen beschreibt. Werden p- und n-Halbleiter in Kontakt gebracht, so gleichen sich

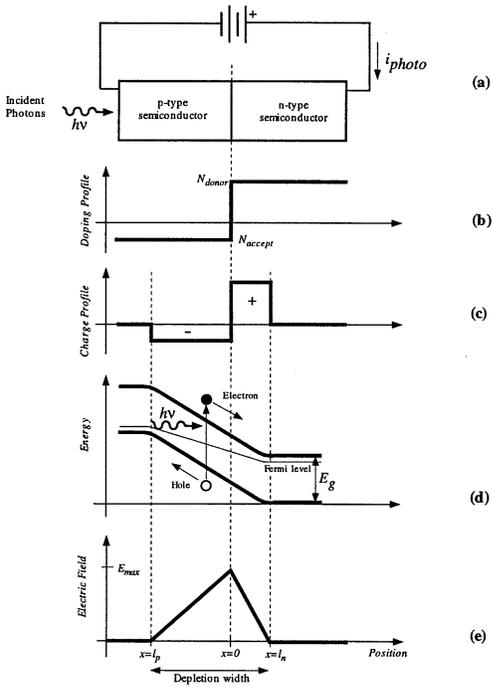


Abbildung 1.7: pn-Photodiode [29].

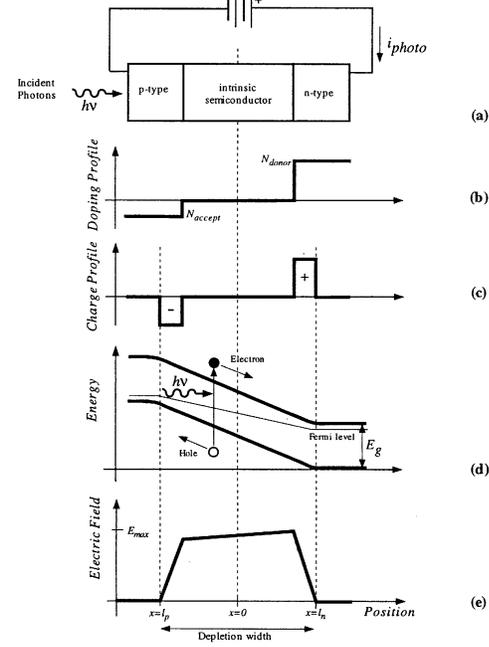


Abbildung 1.8: pin-Photodiode [29].

die Fermi-Niveaus an. Dies geschieht durch Diffusion von Elektronen und Löchern aus den jeweiligen Gebieten hoher in die niedriger Ladungsträgerkonzentration. Dadurch baut sich eine Spannung auf, die der Diffusion entgegenwirkt. Am pn-Übergang bildet sich eine Raumladungszone aus (siehe Abbildung 1.7 (c)). Das Profil des sich hierbei ausbildenden elektrischen Feldes ist in Abbildung 1.7 (e) dargestellt, wobei l_p die Ausdehnung der Raumladungszone innerhalb des p-Halbleiters und l_n innerhalb des n-Halbleiters charakterisiert.

Photonen, die innerhalb der Raumladungszone absorbiert werden, erzeugen dort Elektron-Loch-Paare, welche unter dem Einfluß des elektrischen Feldes jeweils auf die Seite des n- und p-Halbleiters beschleunigt werden (siehe Abbildung 1.7 (d)). Die Stärke des hierbei erzeugten Photostromes i_{photo} wird durch die Empfindlichkeit der Photodiode gegenüber der absorbierten Lichtintensität und durch die eingekoppelte Lichtintensität bestimmt. Die elektrische Bandbreite der Photodiode wird unter anderem durch die Transportzeit der Ladungsträger bestimmt. Typische Werte für die Transportzeiten der Ladungsträger bei pn-Photodioden liegen bei $\tau_{tr} \approx 100$ ps.

pin-Photodioden Die Empfindlichkeit einer pn-Photodiode wird durch eine Vergrößerung der Raumladungszone gesteigert. Hierzu wird eine undotierte Halbleiterschicht zwischen den beiden p- und n-Halbleiterschichten eingefügt (siehe Abbildung 1.8). Diese mittlere Schicht besteht aus nahezu intrinsischem (undotiertem) Material, wodurch auch die Bezeichnung pin-Photodiode herrührt. Durch die Vergrößerung der Raumladungszone durch Einfügen der intrinsischen Schicht wird die Lichtausbeute und damit Empfindlichkeit der Photodiode erhöht. Gleichzeitig wird dadurch die Kapazität des pn-Übergangs kleiner und damit die elektrische Bandbreite der Photodiode größer. Da die Kapazität der Photodiode auch von der Querschnittsfläche des Übergangs abhängig ist, kann die elektrische Bandbreite auch

durch eine kleinere Querschnittsfläche vergrößert werden. Da jedoch die Vergrößerung der Raumladungszone zu längeren Transportzeiten der Ladungsträger führt, wird dadurch die elektrische Bandbreite reduziert. Damit die pin-Photodiode eine große elektrische Bandbreite und eine hohe Empfindlichkeit besitzt, ist eine Optimierung notwendig.

Die Empfindlichkeit und elektrische Bandbreite einer pin-Photodiode kann jedoch auch durch eine extern angelegte Spannung beeinflusst werden. So wird durch eine in Vorwärtsrichtung angelegte Spannung die Raumladungszone verkleinert und damit die Empfindlichkeit vermindert, was gleichzeitig die elektrische Bandbreite vergrößert. Eine Spannung in Gegenrichtung (Sperrspannung) führt dazu, daß die Raumladungszone größer wird und damit auch die Empfindlichkeit, gleichzeitig wird die elektrische Bandbreite reduziert.

Die Empfindlichkeit R einer pin-Photodiode ist der Proportionalitätsfaktor, welcher die Umwandlung der optischen Eingangsleistung P in einen Photostrom I_{PD} beschreibt:

$$I_{PD} = R \cdot P. \quad (1.14)$$

Damit das Licht in die Photodiode verlustlos eingekoppelt werden kann, wird die Lichteintrittsfläche der Photodiode antirefektiv (AR) beschichtet (siehe Abbildung 1.9). Dadurch

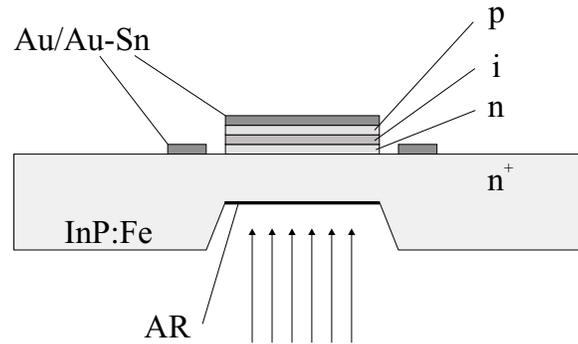


Abbildung 1.9: Schichtaufbau der in dieser Arbeit verwendeten pin-Photodiode [30].

werden die optischen Verluste durch Reflexionen am Luft-Halbleiter-Übergang reduziert. Ferner ist die Photodiode bis auf die eigentlichen Kontaktflächen vollständig passiviert. Die Passivierung schützt das Halbleitermaterial vor Umwelteinflüssen. Gleichzeitig ist nur an diesen Flächen eine elektrische Kontaktierung möglich. Die Einkoppeleffizienz η eines Gaußstrahls mit der Strahltaillenweite ω in eine Photodiode ist

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2a_{PD}^2}{\omega^2}}, \quad (1.15)$$

wobei a_{PD} der Radius der Photodiodenfläche ist [20].

1.4 Physikalische Grundlagen von Halbleiterlaserdioden

Aufbau und Funktion Ein elektromagnetisches Strahlungsfeld kann ein Teilchen aus dem Grundzustand in einen angeregten Zustand heben (Absorption) oder aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand zurücküberführen (stimulierte Emission), vorausgesetzt daß

seine Frequenz ν gerade der Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen entspricht. Ob die Absorption oder die stimulierte Emission überwiegt, hängt von den Besetzungsdichten des Grundzustands n_1 und des angeregten Zustands n_2 ab. Im Fall $n_1 > n_2$ überwiegt die Absorption und die einfallende Welle wird gedämpft. Für den Fall $n_2 > n_1$ wird die einfallende Welle durch stimulierte Emission verstärkt. Nach Boltzmann ist gemäß $n_2 = n_1 e^{-\frac{h\nu}{k_B T}}$ im thermischen Gleichgewicht immer $n_2 < n_1$ [31]. Für die Verstärkung der einfallenden Welle muß der angeregte Zustand stärker besetzt sein als der Grundzustand (Besetzungsinversion).

Bei einer Halbleiterlaserdiode ist zwischen einem n- und einem p-Halbleiter eine zusätzliche Halbleiterschicht eingefügt (Heterostruktur). Der Bandabstand ist bei dem eingefügten Halbleiter geringer als bei den beiden umgebenden Halbleiterschichten (siehe Abbildung 1.10). Bei Anlegen einer Spannung in Vorwärtsrichtung, werden die Leitungselektronen in dem Zwi-

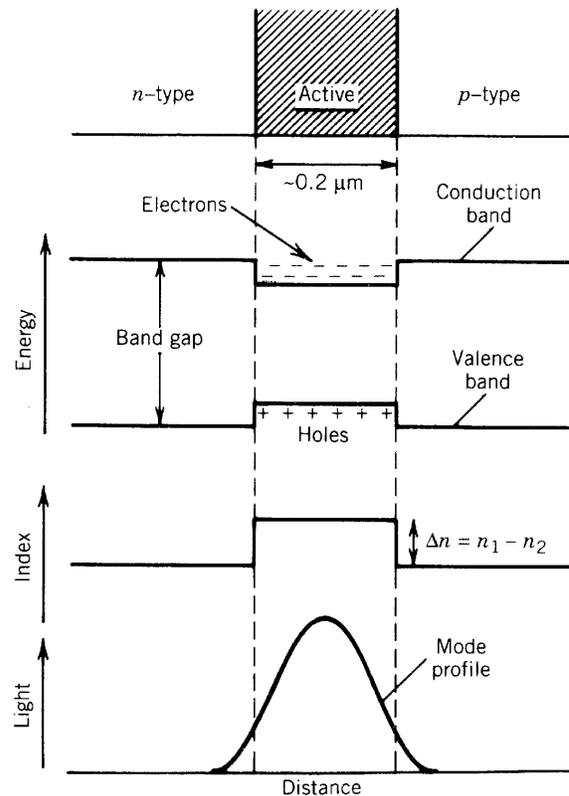


Abbildung 1.10: Prinzip von Halbleiterlaserdioden [22].

schenschichtbereich eingespart. Gleichzeitig bildet sich in diesem Bereich eine Besetzungsinversion von Elektronen aus. Innerhalb dieser Zwischenschicht (aktive Schicht) wird Licht durch Rekombination von Elektronen und Löchern erzeugt.

Die aktive Schicht hat einen größeren Brechungsindex als die umgebenden n- und p-Halbleiterschichten. Aufgrund dieses Brechungsindexunterschieds wirkt die aktive Schicht als Wellenleiter. Das durch Rekombination erzeugte Licht wird innerhalb dieses Wellenleiters geführt, wie durch das in Abbildung 1.10 dargestellte Modenprofil angedeutet wird.

Durch Rückkopplung in einem Resonator mit zwei ebenen Spiegeln läßt sich eine selbsterregende Oszillation oder Lasertätigkeit erreichen. Bei einer Fabry-Perot Laserdiode wird der

optische Resonator z. B. durch die beiden Stirnflächen der Laserdiode gebildet, welche bei einem typischen Brechungsindex der aktiven Schicht von $n = 3.5$ jeweils eine Reflektivität von 30% besitzen.

Bei einer DFB-Laserdiode (engl. **d**istributed **f**eedback) erfolgt die Rückkopplung in den Resonator nicht wie bei einer Fabry-Perot-Laserdiode, an den beiden als Spiegel wirkenden Stirnflächen, sondern entlang der gesamten Laserdiode.

Dies wird durch ein integriertes Gitter erreicht, welches durch eine periodische Brechungsindexänderung erzeugt wird (siehe Abbildung 1.11). Das Gitter wird in den Wellenleiter der

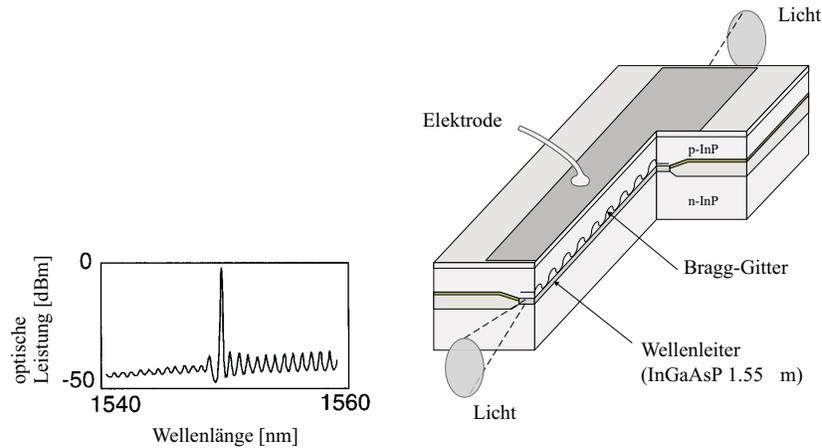


Abbildung 1.11: Aufbau und Funktion einer DFB-Laserdiode und charakteristisches Emissionsspektrum [33].

aktiven Zone strukturiert. Hierzu wird ein Resist holographisch oder mit einem Elektronenstrahlenschreiber belichtet. Nach der Entwicklung wird das Gitter durch einen Ätzschritt in das Halbleitermaterial übertragen [32]. Die innerhalb eines solchen Resonators erlaubten Moden werden durch die Bragg-Bedingung $\Lambda = m\lambda/2\bar{n}$ bestimmt [22]. Bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1550$ nm und einem Modenindex von $\bar{n} = 3.3$ ergibt sich für die Grundmode ($m = 1$) eine Gitterperiode von $\Lambda = 235$ nm.

Damit die Laserdiode nur an einer Stirnfläche Licht emittiert, muß die zweite Stirnfläche entsprechend beschichtet werden. Aufgrund der rechteckigen Form des Wellenleiters der aktiven Zone ergibt sich durch Beugung am Austrittsspalt ein elliptisches Abstrahlverhalten von DFB-Laserdioden.

DFB-Laserdioden haben im Emissionsspektrum eine sehr geringe Linienbreite (siehe Abbildung 1.11) und sind daher für den Betrieb von kohärenten Empfängern geeignet. Eine geringe spektrale Linienbreite ist gleichbedeutend mit einer großen Kohärenzlänge [33]. Aus diesem Grund werden für den späteren Betrieb des innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfängers DFB-Laserdioden verwendet.

Wellenlänge als Funktion von Strom und Temperatur Die von Halbleiterlasern emittierte Wellenlänge und optische Leistung sind vom Injektionsstrom I und der Betriebstemperatur T abhängig. Die Abhängigkeit der emittierten Wellenlänge von I und T kann durch

die Gleichung

$$\lambda(I, T) \approx \lambda_0 + \frac{d\lambda}{dT} T + \frac{d\lambda}{dI} I + \frac{d^2\lambda}{dIdT} TI = \lambda_0 + \Lambda_1 T + \Lambda_2 I + \Lambda_3 TI \quad (1.16)$$

angenähert werden ($\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3 \geq 0$) [34].

Eine Zunahme der Betriebstemperatur oder Stromstärke bewirken nach Gleichung 1.16 eine Verschiebung der emittierten Wellenlänge zu größeren Werten hin, wobei der Koeffizient Λ_3 die Kopplung zwischen Stromstärke und Temperatur beschreibt. Aufgrund dieser Abhängigkeit kann die Wellenlänge in einem gewissen Bereich durch eine Temperaturänderung oder Stromänderung durchgestimmt werden (siehe Abschnitt 4.1). Andererseits erfordert ein stabiler Betrieb eine Temperaturstabilisierung.

Packaging Bei den innerhalb dieser Arbeit verwendeten DFB-Laserdioden [35] ist der Laserdiodenchip in einem Gehäuse eingebaut, das eine optische und elektrische Anbindung unterstützt (siehe Abbildung 1.12). Das von der Laserdiode abgestrahlte, elliptische Feld wird

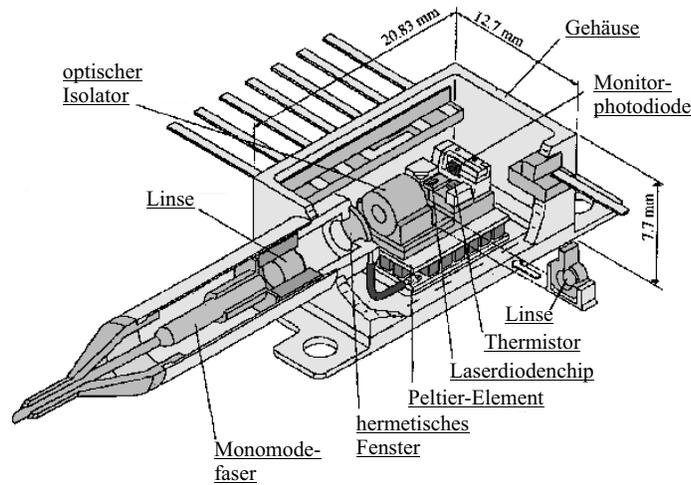


Abbildung 1.12: Packaging eines aktiv justierten DFB-Lasermoduls [36].

mit Hilfe eines asphärischen Linsensystems in eine Monomodefaser eingekoppelt. Zwischen der Faser und dem Laserchip befindet sich ein optischer Isolator, der die Laserdiode vor Rückreflexen schützt. Dies ist notwendig, da Rückreflexe zu Instabilitäten in der abgestrahlten optischen Leistung und Frequenz der Laserdiode führen.

Eine auf der Rückseite des Laserdiodenchips angeordnete Monitorphotodiode detektiert die von der Laserdiode rückseitig abgestrahlte optische Leistung. Dieses Signal wird dazu benutzt, um einer eventuellen Drift in der abgestrahlten optischen Leistung entgegenzuwirken.

Für die Einstellung der gewünschten Betriebstemperatur sind in dem Gehäuse ein Temperatursensor (Thermistor) und ein thermoelektrischer Kühler (Peltier-Element) integriert.

Kapitel 2

Grundlagen und Design für einen Heterodyn–Empfänger

Im folgenden Kapitel soll eine Einführung in die Funktionsweise eines optischen Überlagerungsempfängers gegeben werden. Die innerhalb der optischen Übertragungstechnik relevanten Rauschmechanismen werden aufgeführt und Gegenmaßnahmen aufgezeigt, wie deren Einfluß durch geeignete Wahl der optischen Anordnung minimiert werden kann.

Im Anschluß daran folgt die Darstellung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten optischen Aufbaus, der so gewählt wurde, daß der Empfänger für alle Übertragungsformate eingesetzt werden kann. Dies beinhaltet die Darstellung des Strahlverlaufs innerhalb des Empfängerbausteins und Rechnungen zum Einfluß von Faserdejustagen auf die Überlagerungseigenschaften. Für die Herstellung der für die Überlagerung notwendigen Strahlteiler folgen Betrachtungen zum Design der hierfür notwendigen optischen Beschichtungen.

Ferner wird gezeigt, wie mit Hilfe einer mikrooptischen LIGA–Bank solch ein optischer Überlagerungsempfänger durch eine vollständig passive Justage der mikrooptischen Komponenten realisiert werden kann. Die mikrooptischen Komponenten werden hybrid in die mikrooptische Bank integriert. Die Darstellung des eigentlichen Herstellungsverfahrens für die mikrooptische LIGA–Bank erfolgt in Abschnitt 3.2.

Im Abschnitt 2.5 wird ein technologischer Überblick über bisher mikrooptisch realisierte optische Überlagerungsempfänger gegeben. Hierbei wird auf die Vor– und Nachteile der jeweiligen Herstellungstechnologien und Montagekonzepte eingegangen.

2.1 Prinzip

Bei einem optischen Überlagerungsempfänger wird das empfangene Signal kohärent mit dem optischen Signal eines lokalen Lasers (lokaler Oszillator, LO) überlagert, bevor es auf den Photodetektor PD auftrifft. Bei dem in Abbildung 2.1 dargestellten Prinzip wird die Sendelichtwelle und die Lokallaserlichtwelle mittels eines Strahlteilers überlagert. Damit durch Überlagerung zweier elektromagnetischer Felder ein Interferenzsignal erzeugt werden kann, müssen beide Felder den gleichen Polarisationszustand haben. Um eine zusätzliche Signal-

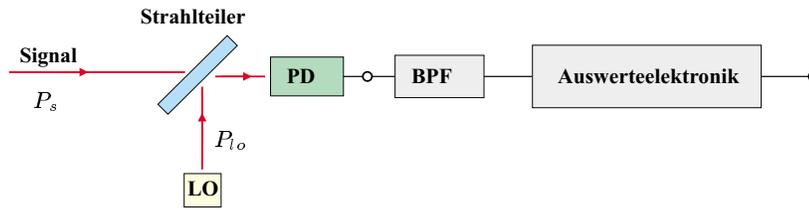


Abbildung 2.1: Darstellung des kohärenten Empfangsschemas [22]: Das optische Eingangssignal wird mit Hilfe eines Strahlteilers mit dem Signal eines lokalen Lasers (LO) überlagert. Die Detektion des Überlagerungssignals geschieht mit einer Photodiode (PD). Zum frequenzselektiven Empfang ist der Auswerteelektronik ein Bandpaßfilter (BPF) vorgeschaltet.

dämpfung durch fehlangepaßte Polarisationszustände zu minimieren, geschieht die Überlagerung mit einer sogenannten Polarisations-Diversitäts-Anordnung (siehe Abschnitt 2.4) [37]. Im Falle identischer Polarisation detektiert der Photodetektor folgendes Signal:

$$P(t) = P_s + P_{l_o} + 2\sqrt{P_s P_{l_o}} \cos(\omega_{IF} t + \Phi_s - \Phi_{l_o}), \quad (2.1)$$

$$\text{mit} \quad \omega_{IF} = \omega_s - \omega_{l_o}. \quad (2.2)$$

Hierbei ist P_s die optische Leistung, ω_s die Lichtfrequenz und Φ_s die Phase des Empfangssignals. Ferner ist P_{l_o} die optische Leistung, ω_{l_o} die Lichtfrequenz und Φ_{l_o} die Phase des lokalen Lasers. Ein Empfang mit $\omega_{IF} = 0$ wird als homodyn und $\omega_{IF} \neq 0$ als heterodyn bezeichnet. Da beim homodynen Empfang der lokale Oszillator exakt die gleiche Frequenz wie das gesendete Signal haben muß, und dies nur mit extrem großen Aufwand zu realisieren ist, wurde auch in dieser Arbeit ein Heterodyn-Empfänger realisiert.

Im heterodynen Fall liegt die Größenordnung für die Zwischenfrequenz im allgemeinen bei 1 GHz. Der genaue Wert für die Zwischenfrequenz richtet sich nach der gewünschten Bandbreite, mit der Information übertragen werden soll, und muß nach dem Abtasttheorem mindestens doppelt so groß sein, wie die zu übertragende Bitrate [22].

Aus Gleichung 2.1 wird deutlich, daß durch eine entsprechend große optische Leistung des lokalen Oszillators P_{l_o} das empfangene Signal P_s verstärkt werden kann, d.h. das Signal kann im Vergleich zum direkten Empfang über längere Strecken übertragen werden. Wird die von der lokalen Laserquelle emittierte Wellenlänge und damit die Frequenz ω_{l_o} verändert, so kann analog zum Radioempfang ein Kanal von mehreren übertragenen Kanälen selektiv detektiert werden. Der minimal auflösbare Kanalabstand wird hierbei durch die spektrale Breite des Bandpaßfilters (BPF) der Empfängerelektronik bestimmt. Das Heterodyn-Prinzip ist damit ideal für distributive Anwendungen in der Datenübertragung geeignet. Dies wird mit den bisher standardisiert eingesetzten Radio- und Fernsehsystemen demonstriert.

Die Informationsübertragung erfolgt durch Modulation der Amplitude $P_s(t)$ (ASK-Format, engl. amplitude shift keying), der Frequenz $\omega_{IF}(t)$ (FSK-Format, engl. frequency shift keying) oder der Phase $\Phi_s(t)$ (PSK-Format, engl. phase shift keying). Mit Umtastung (shift keying) bezeichnet man dabei ein hartes Umschalten zwischen zwei Werten [2]. In Abbildung 2.2 ist die Zwischenfrequenz als Funktion der Zeit für die drei Modulationsformate dargestellt.

Die Empfängerempfindlichkeit wird unter anderem durch das Übertragungsformat bestimmt. Ein Empfänger für das PSK-Format ist hierbei am empfindlichsten und einer für das ASK-Format ist am unempfindlichsten. Für das PSK-Format werden extreme Anforderungen an

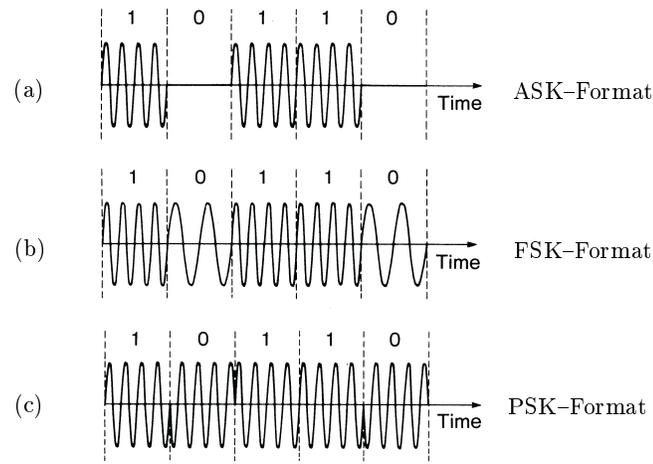


Abbildung 2.2: Übersicht der bei optischen Überlagerungsempfängern verwendeten Übertragungsformate: (a) ASK-, (b) FSK- und (c) PSK-Format [38].

die Stabilität der Phasenlage der Laserquellen gestellt. Da das FSK-Format empfindlicher als das ASK-Format ist, und leichter zu handhaben ist als das PSK-Format, wird im allgemeinen das FSK-Modulationsformat innerhalb kohärent optischer Übertragungssysteme verwendet [22].

2.2 Rauscharten

Bei optischen Netzwerken geschieht die Datenübertragung durch ein moduliertes Lichtsignal, das in eine Glasfaser eingekoppelt und am Faserende von einer Photodiode detektiert wird. Das Rauschen im Empfangssignal wird somit durch die Rauschanteile des Senders (Laserdiode), der Übertragungstrecke (Glasfaser) und des Detektors (Photodiode) bestimmt. Im Folgenden werden die beim kohärenten Empfang relevanten Rauscharten aufgeführt. Anschließend wird gezeigt wie durch eine geschickte Auslegung des optischen Designs des Empfängermoduls bestimmte Rauschanteile unterdrückt werden können.

1. Empfängerverursachtes Rauschen:

Selbst im Fall eines Empfangssignals mit konstanter optischer Leistung führen zwei fundamentale Rauschmechanismen zu Fluktuationen im Photodiodenstrom.

- **Schrot-Rauschen:**

Dieses hat seine Ursache darin, daß der erzeugte Strom durch die zufällige Wechselwirkung von einfallenden Photonen und lokalisierten Elektronen in der Photodiode verursacht wird. Das hierdurch verursachte Stromrauschen beträgt

$$i_s = \sqrt{2 e (R P + I_d) \Delta f}. \quad (2.3)$$

Hierbei ist I_d der Dunkelstrom, der ohne das übertragene optische Signal in der Photodiode erzeugt wird, e die Ladung eines Elektrons, R die Empfindlichkeit der Photodiode, P die eingestrahelte optische Leistung und Δf die elektrische

Bandbreite der Photodiode. Aus Gleichung 2.3 wird deutlich, daß dieses durch die zufällige Wechselwirkung von Photonen und Elektronen verursachte Rauschsignal im wesentlichen durch die eingestrahlte optische Leistung P beeinflusst werden kann.

- **Thermisches Rauschen:**

Elektronen eines Leiters bewegen sich in zufälliger Weise. Eine zufällige Bewegung von Elektronen innerhalb eines Leiters ist einer Stromfluktuation ohne angelegte Spannung gleichzusetzen. Der Eingangswiderstand R_L am Verstärker der Photodiode addiert diese Stromfluktuationen

$$i_{th} = \sqrt{\frac{4 k_B T}{R_L} \Delta f} \quad (2.4)$$

zu dem in der Photodiode erzeugten Photostrom bei der Betriebstemperatur T .

2. Laserverursachtes Rauschen:

Selbst bei einem ideal konstanten Treiberstrom zeigt das emittierte Feld des Lasers Fluktuationen in der Intensität, der Phase und der Frequenz. Intensitätsfluktuationen beeinträchtigen das Signal–Rausch–Verhältnis.

- **Intensitätsrauschen:**

Das relative Intensitätsrauschen (RIN) eines Lasers ist wie folgt definiert [39]:

$$RIN = \frac{\langle \delta P^2 \rangle}{P^2}. \quad (2.5)$$

Hierbei ist P die abgestrahlte optische Leistung und δP die Schwankung in der abgestrahlten Leistung. Der Beitrag des Intensitätsrauschens ist

$$i_{RIN} = \sqrt{R^2 P^2 RIN \Delta f}. \quad (2.6)$$

Dieses zusätzliche Rauschen verringert das Signal–Rausch–Verhältnis. Wie man in Gleichung 2.6 sieht, wird das relative Intensitätsrauschen mit der quadrierten optischen Leistung P gewichtet. Durch den Einsatz eines Gegentaktdetektors kann der Einfluß des relativen Intensitätsrauschens der Laserdiode reduziert werden (siehe Abschnitt 2.3).

- **Phasenrauschen:**

Dieses wird durch thermische Fluktuationen, Fluktuationen in der spontanen Emission und Fluktuationen im Brechungsindex verursacht. Jedes spontan emittierte Photon überlagert dem kohärenten Feld eine Feldkomponente mit zufälliger Phase. Dies führt zu einer zufälligen Störung von Intensität und Phase des emittierten Signals. Fluktuationen in der Phase führen zu einer endlichen Linienbreite des Emissionsspektrums der Laserdiode.

Befinden sich auf der Übertragungstrecke zwei Störstellen, mit Reflexionskoeffizienten R_1 und R_2 , welche Mehrfachreflexionen verursachen, d. h. das von der Laserdiode emittierte Signal P_{s0} wird in Rück- und Vorwärtsrichtung reflektiert, so ergibt sich durch Überlagerung des mehrfachreflektierten Lichts die Intensität zu

$$P_s(t) = P_{s0} \left(1 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(\omega_s \tau + \Phi_s) \right), \quad (2.7)$$

wobei τ die Laufzeit des Lichts zwischen den beiden Reflexionen ist. Fluktuationen in der Phase Φ_s verursachen somit Fluktuationen in der Intensität $P_s(t)$ und damit ein relatives Intensitätsrauschen des Sendesignals [40].

3. Faserverursachtes Rauschen:

- **Polarisationsfluktuationen:**

Diese werden durch lokal entstehende mechanische Spannungen und Temperaturfluktuationen und damit durch Doppelbrechung entlang der Glasfaser verursacht [41, 42]. Fluktuationen des Polarisationszustandes des Signals führen bei einem Überlagerungsempfänger zu Fluktuationen im Überlagerungssignal. Der Einfluß von Polarisationsfluktuationen auf das Signal–Rausch–Verhältnis wird durch den Einsatz einer Polarisations–Diversitäts–Anordnung minimiert (siehe Abschnitt 2.4).

Der Einfluß des Laserphasenrauschens auf das Intensitätsrauschen und damit Photostromrauschen wird durch die Eigenschaften der Übertragungsstrecke bestimmt. Die ebenfalls durch die Übertragungsstrecke verursachten Polarisationsfluktuationen sind niederfrequent und beeinflussen direkt die Amplitude des detektierten Zwischenfrequenzsignals. Das von der Laser- und Photodiode verursachte Gesamtrauschen des Photostroms erhält man durch Addition der voneinander unabhängigen Anteile i_{th} , i_s und i_{RIN} gemäß [33]:

$$i_{gesamt} = \sqrt{\frac{4 k_B T}{R_L} \Delta f + 2 e (R P + I_d) \Delta f + R^2 P^2 RIN \Delta f}. \quad (2.8)$$

Das Schrot–Rauschen ist durch den optischen Aufbau des Empfängers nicht beeinflussbar und stellt gleichzeitig eine physikalische Grenze dar. Das thermische Rauschen kann durch eine Verringerung der Betriebstemperatur und einen größeren Eingangswiderstand am Verstärker reduziert werden. Durch die Auswahl einer geeigneten Laserdiode und durch die von der Laserdiode abgestrahlte optische Leistung kann das Phasenrauschen und damit Intensitätsrauschen beeinflusst werden.

Der Einfluß des relativen Intensitätsrauschens und der Einfluß von Polarisationsfluktuationen kann durch den optischen Aufbau des Empfängers reduziert werden. Um den Anteil des relativen Intensitätsrauschens am Signal zu reduzieren, wird eine sogenannte Gegentaktanordnung verwendet (siehe Abschnitt 2.3). Durch Kombination solch einer Gegentaktanordnung mit einer sogenannten Polarisations–Diversitäts–Anordnung (siehe Abschnitt 2.4) wird das Überlagerungssignal unabhängig gegenüber den durch die signalführende Faser verursachten Polarisationschwankungen.

2.3 Gegentakt-detektor

Die Empfindlichkeit eines optischen Überlagerungsempfängers wird durch den Einsatz eines Gegentakt-detektors gesteigert. Dieser verbessert das Signal–Rausch–Verhältnis, indem er das relative Intensitätsrauschen unterdrückt. In Abbildung 2.3 ist solch ein Gegentakt-detektor dargestellt.

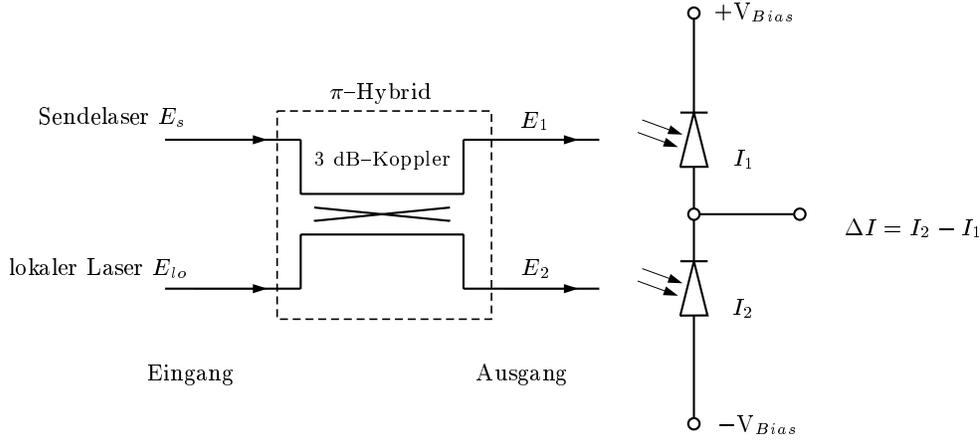


Abbildung 2.3: Gegentakt-detektor.

Ein 3 dB-Koppler (50:50-Koppler) überlagert das Feld des Sendesignals E_s mit dem Feld des lokalen Oszillators E_{lo} , wobei jeweils eine in Sperrichtung betriebene Photodiode das Überlagerungssignal detektiert. Die Gegentaktanordnung nutzt die an den beiden Ausgängen des 3 dB-Kopplers zur Verfügung stehende Lichtleistung vollständig aus [43].

Eine verlustlose 50:50-Aufteilung ist mit dem 3 dB-Koppler nur möglich, wenn eine Phasendifferenz von π entsprechend der Transfermatrix \mathbf{S} in Gleichung 2.9 bei der Transformation der beiden am Eingang eingekoppelten Felder E_s und E_{lo} in die beiden Felder E_1 und E_2 induziert wird [36, 44]¹. Die beiden Felder $E_s(t) = \sqrt{P_s(t)} e^{i(\omega_s(t)t + \Phi_s(t))}$ und $E_{lo}(t) = \sqrt{P_{lo}} e^{i(\omega_{lo}t + \Phi_{lo})}$ werden daher entsprechend den Gleichungen 2.9 und 2.10 in dem 3 dB-Koppler (π -Hybrid) überlagert, und das Überlagerungssignal wird über die beiden Ausgänge des Kopplers in die jeweilige Photodiode eingekoppelt.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}}_{\text{Ausgang } E_a} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}}_{\text{Transfermatrix } \mathbf{S}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} E_s(t) \\ E_{lo}(t) \end{bmatrix}}_{\text{Eingang } E_e} \quad (2.9)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} (+E_s(t) + E_{lo}(t)) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (-E_s(t) + E_{lo}(t)) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Ein solcher π -Hybrid kann mit einem 2×2 -Schmelzkoppler, mit beschichteten Glasplättchen oder Prismen realisiert werden [45].

Die beiden gemäß Abbildung 2.3 verschalteten Photodioden erzeugen folgenden Differenzstrom²:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = -2R\sqrt{P_s(t)P_{lo}} \cos(\omega_{IF}(t)t + \Phi_s(t) - \Phi_{lo}), \quad (2.11)$$

wobei R die Empfindlichkeit der Photodiode ist, die bei einer idealen Gegentaktanordnung bei beiden Photodioden identisch ist. Durch Vergleich der beiden Gleichungen 2.11 und 2.1 wird deutlich, daß durch die Verwendung einer solchen Gegentaktanordnung der sehr große, durch

¹Eine verlustlose Überlagerung bedeutet, daß $E_a^\dagger E_a = E_e^\dagger E_e$ gilt und damit $\mathbf{S}^\dagger \mathbf{S} = 1$ [36].

² $I_{PD} = R \cdot P \sim R \cdot |E|^2$

das relative Intensitätsrauschen beeinflusste Gleichstromterm im Photostrom eliminiert wird. Das Detektionssignal wird allein durch den Produktterm des Überlagerungssignals bestimmt.

Ein Maß für die Wirkung des Gegentakt-detektors ist die Gleichtaktunterdrückung³ ($CMRR$, common mode rejection ratio) [40, 46, 47]:

$$CMRR := \left| \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right|^2. \quad (2.12)$$

Hierbei sind I_1 und I_2 die jeweils von den beiden Photodioden erzeugten Photoströme. Bei einem guten Gegentakt-detektor in Verbindung mit einem idealen Koppler und idealer Ankopplung der beiden Strahlengänge an zwei identische Photodioden, liefern beide Photodioden den gleichen Ausgangsstrom und die Gleichtaktunterdrückung verschwindet. Bei realen Systemen muß auf eine geringe Frequenzabhängigkeit der Empfindlichkeit R der Photodioden geachtet werden. Für einen guten Gegentakt-detektor müssen zwei Photodioden mit annähernd gleichen Eigenschaften ausgewählt werden [48, 49], oder das System muß die Möglichkeit eines Abgleichs der Gegentaktanordnung bieten.

Im Falle identischer Empfindlichkeit R der beiden Photodioden berechnet sich das relative Intensitätsrauschen i_{RIN} nach folgender Beziehung [43]:

$$i_{RIN} = \sqrt{R^2 P^2 CMRR RIN \Delta f}. \quad (2.13)$$

Der übliche Spezifikationsbereich des relativen Intensitätsrauschens von kommerziell erhältlichen DFB-Laserdioden wird durch die beiden Werte $RIN = -120 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}}$ und $RIN = -155 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}}$ abgegrenzt [2, 34]. In den Abbildungen 2.4 und 2.5 ist das Photostromrauschen als Funktion der eingestrahnten optischen Leistung für die beiden Werte des relativen Intensitätsrauschens dargestellt. Für die Berechnung des Rauschsignals wurde eine Empfindlichkeit der Photodioden von $R = 0.9 \frac{\text{A}}{\text{W}}$, eine Temperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, ein Eingangswiderstand von $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ des Verstärkers und die elektrische Bandbreite von $\Delta f = 1.8 \text{ GHz}$ der verwendeten Photodiode und des Verstärkers zugrundegelegt.

Die Abbildungen 2.4 und 2.5 zeigen, daß das Rauschsignal ohne Gleichtaktunterdrückung ($CMRR = 0 \text{ dB}$) mit zunehmender eingestrahelter Lichtleistung von dem relativen Intensitätsrauschen dominiert wird. Durch den Einsatz eines Gegentakt-detektors wird der Einfluß des relativen Intensitätsrauschens reduziert. Bei Verwendung einer Laserdiode mit einem relativen Intensitätsrauschen von $RIN = -120 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}}$ ist eine Gleichtaktunterdrückung von $CMRR = -60 \text{ dB}$ notwendig, um das Gesamtrauschsignal auf das thermische Rauschen und Schrot-Rauschen zu begrenzen (siehe Abbildung 2.4). Wird eine Laserdiode mit einem spezifizierten relativen Intensitätsrauschen von $RIN = -155 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}}$ verwendet, so ist eine Gleichtaktunterdrückung von $CMRR = -20 \text{ dB}$ ausreichend, um das relative Intensitätsrauschen im Gesamtrauschsignal zu unterdrücken (siehe Abbildung 2.5). Dies verdeutlicht, daß bei der Auswahl der Laserdioden auf das relative Intensitätsrauschen geachtet werden muß, da dieses einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf das maximal erreichbare Signal-Rausch-Verhältnis hat.

Da beim heterodynem Empfang zur Steigerung der Empfängerempfindlichkeit die optische Leistung der lokalen Laserdiode entsprechend maximiert wird, erfolgt die Signaldetektion in

³ $CMRR \text{ [dB]} = 10 \log_{10}(CMRR)$

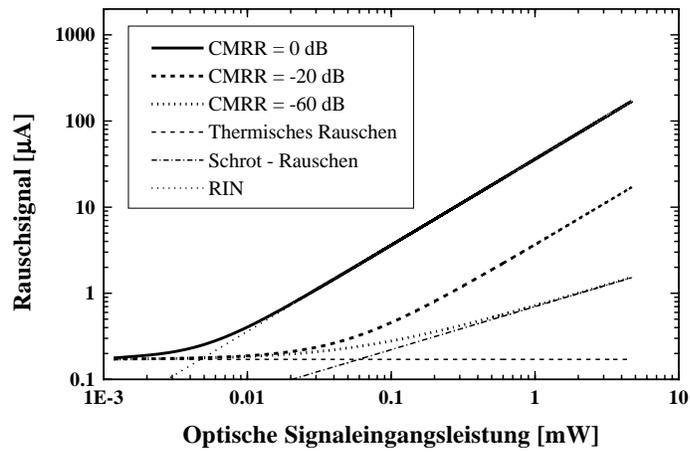


Abbildung 2.4: Rauschsignal als Funktion der optischen Eingangsleistung ($RIN = -120 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}}$).

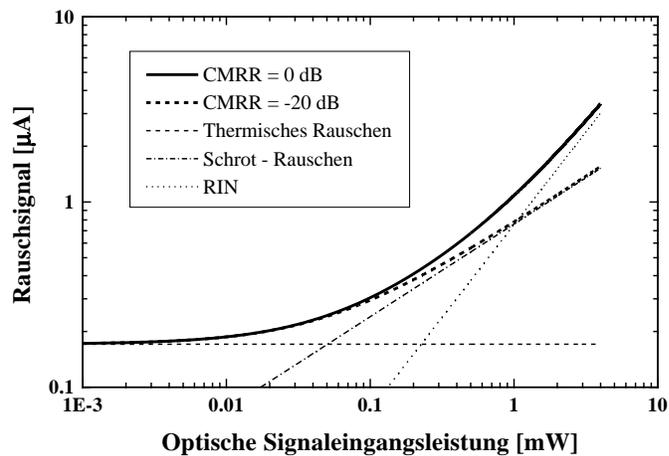


Abbildung 2.5: Rauschsignal als Funktion der optischen Eingangsleistung ($RIN = -155 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}}$).

einem Bereich, wo das Photostromrauschen im wesentlichen durch das relative Intensitätsrauschen bestimmt wird. Da mit einem Gegentaktdetektor das relative Intensitätsrauschen unterdrückt wird, ist dieser eine essentielle Baugruppe eines guten optischen Überlagerungsempfängers [40]. Ferner ermöglicht ein Gegentaktdetektor die optimale Detektion des in einem 3 dB-Koppler erzeugten Überlagerungssignals, welches auf die beiden Ausgänge des Kopplers aufgeteilt wird.

2.4 Polarisations-Diversitäts-Anordnung

Bei kohärenten Empfängern spielt die Polarisationsrichtung des lokalen Oszillators und des empfangenen Signals im Gegensatz zu Direktempfängern⁴ eine wichtige Rolle. So verschwindet das im Empfänger detektierte Signal, falls die Polarisationsrichtungen von \vec{E}_S und \vec{E}_{LO} senkrecht aufeinander stehen. Jede Änderung der relativen Lage der Polarisationsrichtungen von \vec{E}_S und \vec{E}_{LO} beeinflusst somit das Signal-Rausch-Verhältnis und damit die Empfindlichkeit des Empfängers. Eine Änderung in der Polarisationsrichtung kann z. B. durch Doppelbrechung innerhalb der signalführenden Faser hervorgerufen werden (siehe Seite 23). Um von Polarisationsfluktuationen unabhängig zu werden, und nicht auf polarisationserhaltende Fasern zurückgreifen zu müssen, verwendet man einen sogenannten Polarisations-Diversitäts-Empfänger wie er in Abbildung 2.6 dargestellt ist.

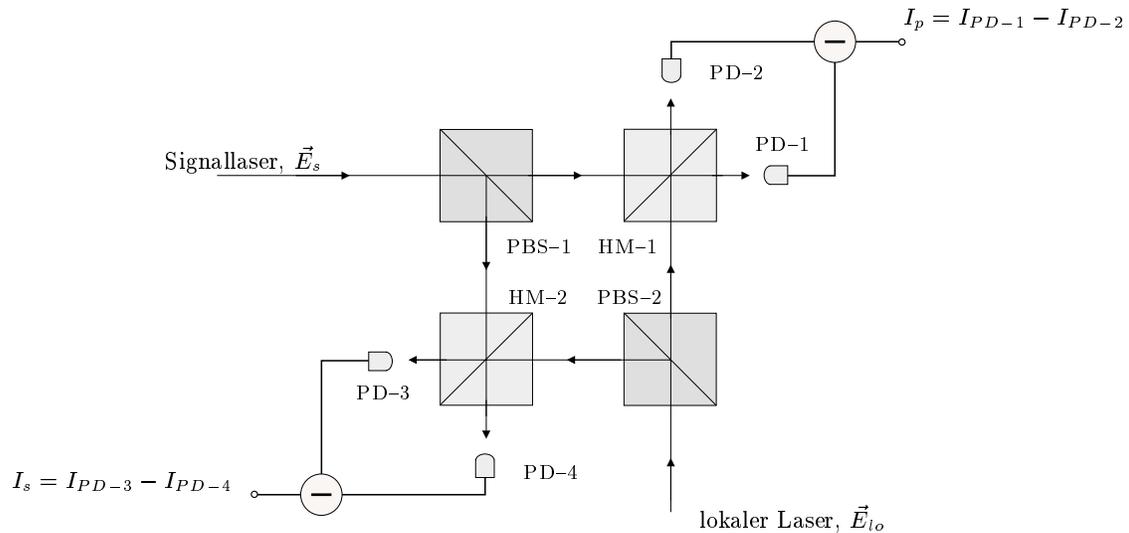


Abbildung 2.6: Skizze des Strahlengangs für eine Polarisations-Diversitäts-Anordnung mit Gegentakt-detektor.

Das Licht der Signallaserdiode \vec{E}_s wird mittels des Polarisationsstrahlteilers PBS-1 in den s- und p-Polarisationsanteil aufgeteilt. Der p-Anteil wird transmittiert und der s-Anteil reflektiert. Das Licht der lokalen Laserdiode wird an dem Polarisationsstrahlteiler PBS-2 in den s- und p-Polarisationsanteil aufgeteilt, wobei auch hier der p-Anteil transmittiert und der s-Anteil reflektiert werden. Die beiden Strahlteiler HM-1 und HM-2 bilden zusammen mit den jeweils paarweise zusammengehörenden Photodioden PD-1, PD-2 und PD-3, PD-4 zwei Gegentaktanordnungen für die entsprechenden p- und s- Anteile von Signallicht und lokalem Oszillatorlicht. Die Gegentaktanordnung für die Überlagerung der p-Anteile liefert das Differenzsignal $\Delta I_p = I_{PD-1} - I_{PD-2}$ und die für die Überlagerung der s-Anteile das Differenzsignal $\Delta I_s = I_{PD-3} - I_{PD-4}$.

Die beiden erzeugten Photoströme ΔI_p und ΔI_s werden anschließend addiert $\Delta I = \Delta I_p + \Delta I_s$. Wird die Polarisationsrichtung des lokalen Oszillators so eingestellt, daß die s- und p-Polarisationszustände zu gleichen Teilen enthalten sind⁵, dann ist das detektierte Zwischen-

⁴Beim Direktempfang wird das lichtleistungsmodulierte Empfangssignal mittels einer Photodiode direkt detektiert.

⁵Dies wird z. B. mit zirkular polarisiertem Licht erreicht

frequenzsignal unabhängig gegenüber Polarisationschwankungen [22, 44].

2.5 Stand der Technik

Bei den meisten mikrooptisch realisierten Heterodyn-Empfänger Systemen wird eine Polarisations-Diversitäts-Anordnung benutzt. Die Auswerteelektronik ist dabei um so einfacher, je geringer die Linienbreite der verwendeten Laserdiode ist [37, 41]. Es werden zunächst die Konzepte vorgestellt und anschließend vergleichend bewertet.

Monolithische Integration In der Arbeit von U. Hilbk wird ein monolithisch integrierter Heterodyn-Empfänger auf der Basis von InP vorgestellt [49]. Alle optischen Komponenten sind auf einem Chip integriert (siehe Abbildung 2.7). Die Standard Bitfehlerwahrschein-

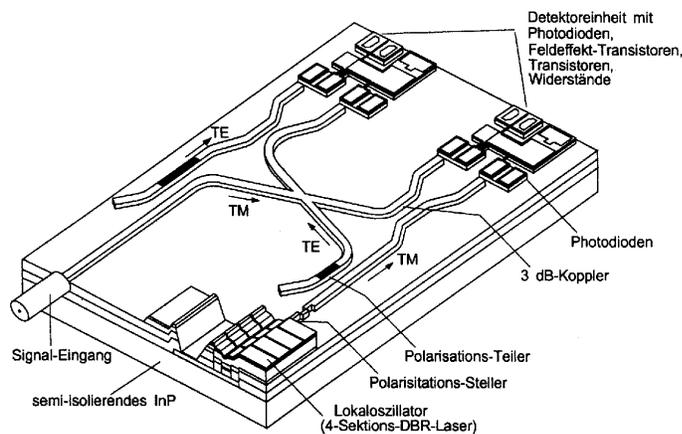


Abbildung 2.7: Realisierung eines Heterodyn-Empfängers durch monolithische Integration der aktiven und passiven optischen Komponenten [50] (HHI).

lichkeit⁶ von 10^{-9} wird noch bei einer minimalen Signalleistung von -33.5 dBm erreicht, wobei die Übertragungsrate 140 Mb/s beträgt. Als lokaler Oszillator wird eine Laserdiode mit einem Durchstimmbereich von $\Delta\lambda = 3.5$ nm verwendet. Der Empfänger besteht aus einer Polarisations-Diversitäts-Anordnung mit Gegentaktdetektor. Auf dem Empfängerchip ($9 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$) ist kein optischer Isolator für die lokale Laserdiode integriert. Die Messungen der Bitfehlerwahrscheinlichkeit zeigen keine signifikante Polarisationsabhängigkeit. Ferner konnte ein stabiler Empfang nachgewiesen werden. Dies zeigt, daß bei diesem Aufbau kein zusätzlicher Schutz der lokalen Laserdiode gegen Reflexionen notwendig ist. Weitere Untersuchungen zeigen eine starke Frequenzabhängigkeit des Gegentaktdetektors im gemessenen Frequenzbereich von 0 bis 2 GHz. Als Grund für diese Abhängigkeit werden lange Bonddrähte und Leitungen zwischen den Photodioden und dem Vorverstärker genannt. Der Empfänger wurde innerhalb eines experimentell aufgebauten Verteilersystems mit 4 Kanälen getestet.

⁶Die Zuverlässigkeit eines digitalen Datenübertragungssystems wird durch die Bitfehlerwahrscheinlichkeit charakterisiert, wobei diese die Wahrscheinlichkeit charakterisiert, daß ein Bit nicht korrekt detektiert wird. Für die digitale Datenübertragung werden Bitfehlerraten von weniger als 10^{-9} gefordert [22].

Ein weiterer monolithisch integrierter Heterodyn-Empfänger wird in der Arbeit von M. Hamacher vorgestellt [46]. Auf dem Empfängerchip ist ein Gegentaktdetektor, d. h. zwei Photodioden, und eine Laserdiode integriert. Die Empfangseigenschaften dieses Heterodyn-Empfängers sind daher polarisationsabhängig. Als lokaler Oszillator wird eine DFB-Laserdiode verwendet, welche bei der Wellenlänge von $\lambda = 1.549 \mu\text{m}$ emittiert. Die Photodioden zeigen einen Dunkelstrom von $I_d = 1 \text{ nA}$ bei einer Sperrspannung von $U_R = 2 \text{ V}$, eine Kapazität von $C = 90 \text{ fF}$ und eine Empfindlichkeit von $R = 0.2 \frac{\text{A}}{\text{W}}$. Die Messung der Gleichaktunterdrückung (CMRR) ergibt -23 dB . Für die Herstellung des Empfängerchips sind drei Epitaxie- und 13 Lithografieschritte notwendig. Die Faser-Chip-Kopplung wird mit einer Dämpfung von 5 dB spezifiziert. Weitere Verluste innerhalb des Chips werden durch Verluste innerhalb der Wellenleiter (1 dB/cm) und durch Fehler in den epitaktisch abgeschiedenen Schichten (8 dB) verursacht.

Hybride Integration Von E.C.M. Pennings wird in den beiden Arbeiten [51, 52] ein Polarisations-Diversitäts-Modul der Fa. Philips vorgestellt (siehe Abbildung 2.8). Bei die-

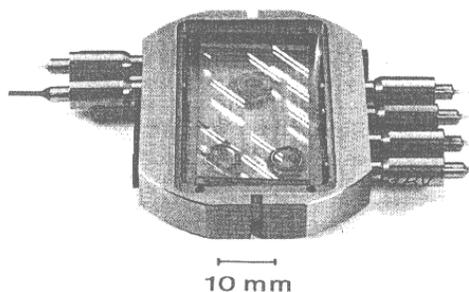


Abbildung 2.8: Realisierung eines Polarisations-Diversitäts-Moduls durch hybride Integration von passiven optischen Komponenten [51, 52] (Fa. Philips).

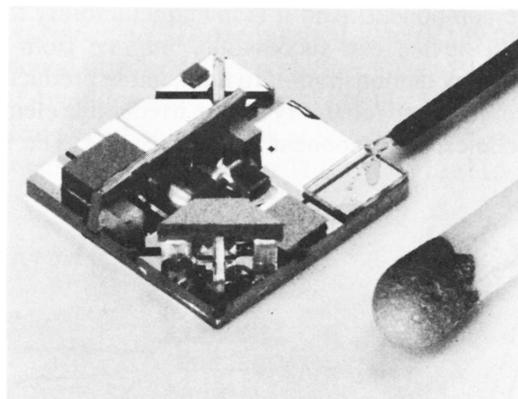


Abbildung 2.9: Hybride Integration von aktiven und passiven optischen Komponenten auf einer mikrooptischen Bank aus Silizium [13] (Fa. Siemens).

sem Aufbau werden die passiven optischen Komponenten auf ein vorstrukturiertes Glassubstrat integriert. Die entsprechend beschichteten Glasplättchen werden in einer speziellen Justierhalterung aktiv justiert. Diese vorjustierte Anordnung wird dann in das durch Sägen vorstrukturierte Glassubstrat zusammen mit der Justierhalterung eingesetzt und mit brechungsindexangepasstem Kleber fixiert. Das Licht der lokalen Laserdiode und des Signals werden mit Hilfe von Linsensteckern kollimiert und in das Glassubstrat eingekoppelt. Mit Hilfe von vier weiteren Linsensteckern werden die Überlagerungssignale in Fasern und dann in die für die beiden Polarisationsrichtungen notwendigen Gegentaktdetektoren eingekoppelt. Die Polarisations-Diversitäts-Anordnung wird aktiv zu den Linsensteckern ausgerichtet, wobei diese an der Gehäusewand des Moduls fixiert sind. Bei diesem Konzept besteht eine räumliche Trennung zwischen passiven und aktiven optischen Komponenten.

In der Arbeit von E. Hormann wird ein Polarisations-Diversitäts-Empfänger der Fa. Siemens vorgestellt [13]. Alle notwendigen optoelektronischen Komponenten wie Signalfaser, lokale Laserdiode, Kugellinsen, $\lambda/4$ -Plättchen, Polarisationsstrahlteiler, 3 dB -Koppler und

Photodioden werden auf einem Siliziumsubstrat ($11 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$) hybrid integriert (siehe Abbildung 2.9). Zwei Kugellinsen fokussieren jeweils das Licht der lokalen Laserdiode und das Signallicht auf die lichtempfindliche Zone der Photodioden. Das Siliziumsubstrat ist mittels Sägen und anisotropem Ätzen vorstrukturiert worden. Mit Hilfe von V-Gruben werden die Signalfaser und eine Kugellinse passiv zueinander justiert. V-Gruben dienen ferner als Lichtkanäle, wobei metallisierte Enden als Umlenkspiegel dienen und das Licht in die Photodioden einkoppeln. Die Photodioden werden optisch an in das Siliziumsubstrat geätzten Justiermarken ausgerichtet. Die weiteren Komponenten werden aktiv justiert, wobei die aus Glas bestehenden Komponenten mittels Glasbonden mit dem Siliziumsubstrat verbunden werden. Die lokale Laserdiode und die Photodioden werden mit Lot fixiert und gleichzeitig elektrisch kontaktiert. Als lokaler Oszillator wird eine DFB-Laserdiode verwendet. Der Durchstimmbereich dieser Laserdiode beträgt 2 nm bei einer Temperaturänderung von 20 K . Bei einem Kanalabstand von 5 GHz können mit diesem Empfänger bis zu 50 Kanäle detektiert werden.

Die Koppelleffizienz zwischen der lokalen Laserdiode und den Photodioden ist mit 30% und zwischen der Signalfaser und den Photodioden mit 80% spezifiziert. Der Strahlüberlapp im Bereich der Photodioden wird mit 70% , die Signaldämpfung mit 8 dB und die elektrische Bandbreite mit 3.5 GHz spezifiziert.

Faseroptischer Aufbau Von den Firmen Daimler Benz [53] und AT&T [54] wurden entsprechend bearbeitete Fasern für die Herstellung eines Polarisations-Diversitäts-Empfängers verwendet. Für die Herstellung eines Polarisationsstrahlteilers werden die Fasern seitlich definiert angeschliffen und dort zusammengeklebt. Diese Anordnungen zeigen zwar gute Dämpfungseigenschaften, haben dafür aber schlechte Polarisationsseigenschaften und Probleme mit der Zuverlässigkeit, da die Klebestelle zwischen den Fasern leicht versagt.

Konventioneller Aufbau Ebenfalls soll an dieser Stelle der in der Arbeit von J.I. Alonso beschriebene Heterodyn-Empfänger erwähnt werden [48]. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt im Aufbau einer für einen Polarisations-Diversitäts-Empfänger mit Gegentaktdetektor geeigneten Elektronik. Bei diesem Aufbau werden kommerziell erhältliche GaInAs/InP pin-Photodioden und GaAs-MMIC (engl. monolithic microwave integrated circuits) als Transimpedanzverstärker verwendet. Als lokale Lichtquelle wird eine DFB-Laserdiode benutzt. Als Schwierigkeiten bei der Realisierung des Empfängers werden die Wahl einer geeigneten Verbindungstechnik zwischen den Photodioden und dem Transimpedanzverstärker genannt und die Realisierung eines perfekten Gegentaktdetektors, da die Photodioden gleiche Eigenschaften haben müssen.

Vergleich Die beiden monolithisch auf der Basis von InP hergestellten Polarisations-Diversitäts-Empfänger [46, 49] haben den Nachteil, daß die Signalfaser aktiv an den Halbleiterchip angekoppelt werden muß. Ferner weisen diese Empfänger eine hohe Signaldämpfung auf. Diese wird zum einen durch eine starke Dämpfung innerhalb des Halbleitermaterials verursacht und zum anderen durch starke optische Verluste an der Koppelstelle zwischen Signalfaser und Empfänger. Die Koppelstelle verursacht eine starke Rückstreuung, welche gerade bei kohärenten Systemen vermieden werden muß, da Rückreflexe zur Laserdiode die Kohärenz

zerstören. Ein weiterer Nachteil der monolithischen Integration auf der Basis von InP besteht darin, daß die Herstellung sehr teuer und die Ausbeute bei der Empfängerherstellung sehr gering ist [50]. Die monolithische Integration von vielen verschiedenen Funktionen auf einem einzelnen optischen Chip bedeutet ferner einen Kompromiß in der Funktion jedes einzelnen Elements. Das Gesamtsystem besitzt somit nicht die Leistungsfähigkeit, als wenn es aus einzelnen Komponenten aufgebaut wird, die für die jeweilige Funktion optimiert sind.

Die besten Resultate werden mit mikrooptischen Aufbauten erzielt [6]. Diese zeichnen sich durch eine geringe Signaldämpfung, geringe Rückreflexionen, eine hohe Zuverlässigkeit, sehr gute Polarisationsseigenschaften und durch die Möglichkeit einer kostengünstigen Fertigung aus.

Der von der Firma Philips [51, 52] realisierte hybride mikrooptische Aufbau besticht durch eine gute Materialkompatibilität, da das Substrat und die Strahlteiler aus der gleichen Glasorte bestehen. Da der optische Aufbau ausschließlich aus passiven Komponenten besteht, wird jedoch eine geringe Integrationsdichte erreicht. Ein weiterer Nachteil ist in der aufwendigen Herstellung zu sehen, denn für diese müssen aufgrund des Designs zwei Spiegel, drei Polarisationsstrahlteiler, ein s- und ein p-Strahlteiler aktiv justiert werden, bevor diese in dem Glassubstrat fixiert werden. Anschließend wird in einem weiteren aktiven Justageschritt dieser mikrooptische Aufbau relativ zu den an der Gehäusewand fixierten Faserkollimatoren ausgerichtet.

Bei dem von der Firma Siemens [13] aufgebauten Polarisations-Diversitäts-Empfänger werden passive und aktive mikrooptische Komponenten hybrid auf einem vorstrukturierten Siliziumsubstrat integriert. Die Integrationsdichte ist mit der bei einer monolithischen Integration erreichten vergleichbar. Durch den Einsatz von V-Gruben ist die passive Justage der Signalfaser und einer Kugellinse möglich. Dies reduziert die Anzahl der aktiven Justageschritte und vereinfacht die Montage. Der Nachteil ist, daß mit dem vorstrukturierten Siliziumsubstrat nicht alle Komponenten passiv justiert werden können. So werden die lokale Laserdiode und die Strahlteiler aktiv justiert, wodurch die Herstellung immer noch relativ aufwendig ist.

Das Ziel einer weiteren Optimierung besteht darin, die Anzahl der aktiven Justageschritte zu minimieren. Im folgenden Abschnitt soll ein Design für einen hybrid aufgebauten Polarisations-Diversitäts-Empfänger gezeigt werden, mit der Perspektive, daß alle aktiven und passiven mikrooptischen Komponenten ohne zusätzliche aktive Justageschritte auf einer mikrooptischen LIGA-Bank integriert werden können. Die hierbei erreichte Integrationsdichte ist dabei mit der in [13] erreichten vergleichbar.

2.6 Design für einen hybrid integrierten und passiv justierten Polarisations-Diversitäts-Empfänger

Im folgenden Abschnitt wird das im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Design für einen Polarisations-Diversitäts-Empfänger auf der Basis einer mikrooptischen LIGA-Bank vorgestellt. Das in Abbildung 2.10 dargestellte Design (siehe auch die perspektivische Ansicht in Abbildung 1.1) ist eine direkte Umsetzung des zuvor an Abbildung 2.6 erläuterten Überlagerungsprinzips. Die aktiven und passiven optischen Komponenten werden hybrid auf der mikrooptischen LIGA-Bank integriert, wobei die einzelnen Komponenten mit Hilfe von me-

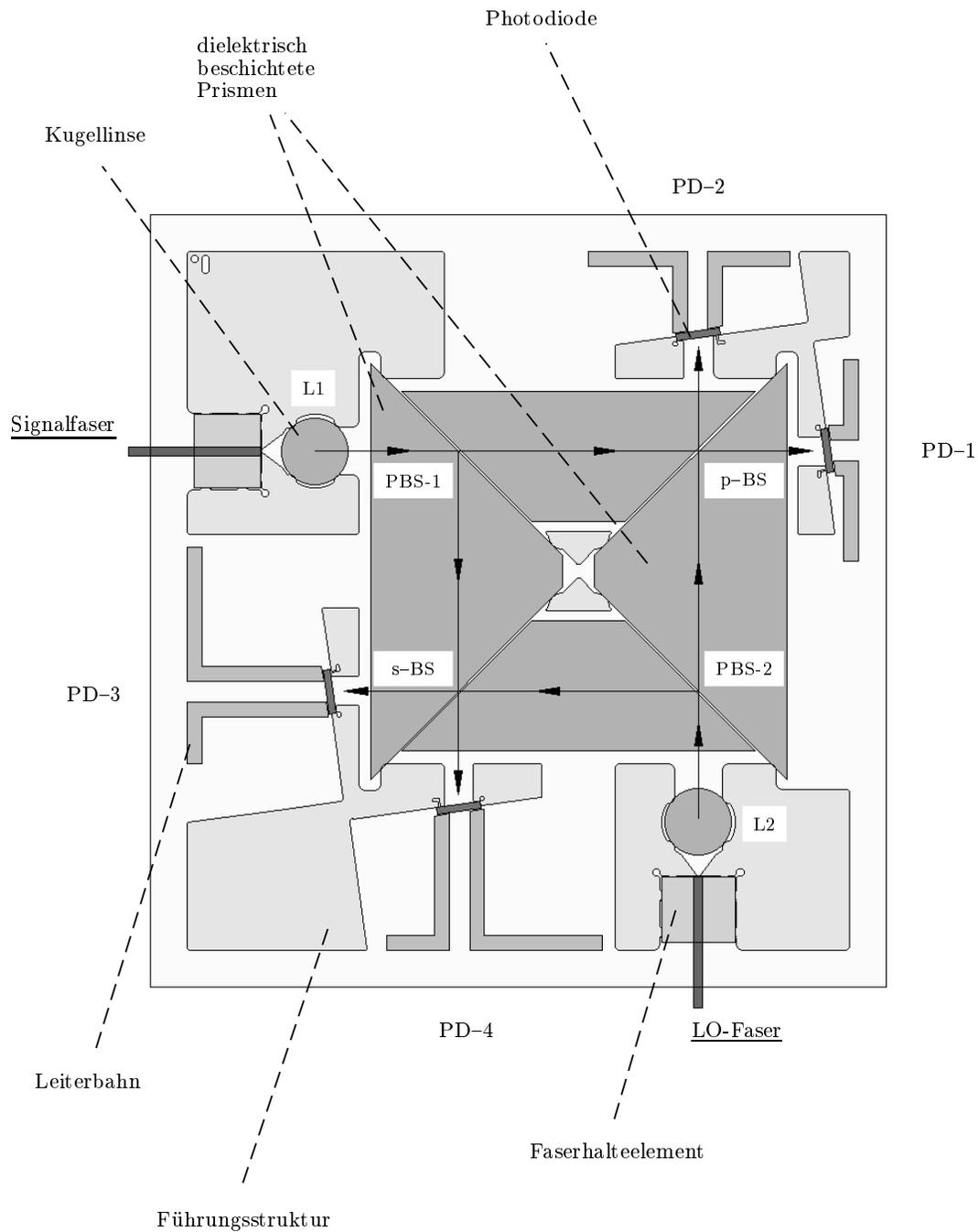


Abbildung 2.10: Design des Strahlengangs für den realisierten Polarisations-Diversitäts-Empfänger mit Gegentakt-detektor.

mechanischen Justierhilfen aus PMMA entlang der optischen Achse passiv justiert werden. Die Justierhilfen werden auf einem Al_2O_3 -Keramiksubstrat mit Hilfe des LIGA-Verfahrens hergestellt. Das Herstellungsverfahren für die mikrooptische Bank wird in Abschnitt 3.2 genauer dargestellt. Die Montage und passive Justage wird detailliert in Abschnitt 3.4 diskutiert.

Auf der mikrooptischen Bank ist noch keine Laserdiode integriert, da zum Zeitpunkt der Designgestaltung keine ungehäuseten Laserdioden mit mechanischen Anschlagkanten (z. B. Ätzgruben) für einen vertretbaren Preis kommerziell erhältlich waren, welche die für einen

lokalen Oszillator notwendigen Spezifikationen erfüllen. Der lokale Oszillator wird in dem in Abbildung 2.10 dargestellten Design folglich über eine Faser eingekoppelt. Dies hat jedoch auch den Vorteil, daß der Endnutzer entsprechend seinen ganz speziellen Systemanforderungen den dafür optimierten Laser einsetzen kann. Das Empfängermodul kann daher flexibel an die unterschiedlichsten Systemanforderungen angepaßt werden.

Das mit der Signalfaser und der Lokaloszillatorfaser (LO) in den mikrooptischen Freistrahlaufbau eingekoppelte Licht wird jeweils mit den Kugellinsen L1 und L2 kollimiert. Die durch dielektrische Mehrschichtsysteme auf Glasprismen realisierten Polarisationsstrahlteiler (PBS-1 und PBS-2) teilen die s- und p-Polarisationsrichtungen der kollimiert eingekoppelten Strahlen auf. Der s-Polarisationsanteil wird hierbei an den dielektrischen Mehrschichtsystemen reflektiert und der p-Polarisationsanteil transmittiert. Hierbei wird der s-Polarisationsanteil von Signallicht und Lokaloszillatorlicht zu einem Strahlteiler reflektiert, welcher speziell für diese Polarisationsrichtung optimiert ist. Dieser s-Strahlteiler sorgt für eine Aufteilung der Intensitäten im Verhältnis 50:50, wobei er gleichzeitig die s-Polarisationsanteile von Signallicht und Lokaloszillatorlicht überlagert. Für die p-Polarisationsanteile wird mit Hilfe eines speziell für die p-Polarisationsrichtung optimierten Strahlteilers analog verfahren. Die Detektion der Überlagerungssignale erfolgt mit Hilfe der Photodioden PD-1, PD-2, PD-3 und PD-4, mit denen paarweise (PD-1 mit PD-2 und PD-3 mit PD-4) eine Gegentaktanordnung aufgebaut wird.

Die Wahl von Prismen als Trägerstrukturen dieser Mehrschichtsysteme wird im Zusammenhang mit der erforderlichen Aufbau- und Verbindungstechnik in Abschnitt 3.4 und durch die geforderten optischen Eigenschaften in Abschnitt 2.6.2 begründet. Das in dieser Arbeit vorgestellte Empfängermodul ist für den Wellenlängenbereich um 1550 nm optimiert. Durch die hybride Integrationstechnik kann der Arbeitswellenlängenbereich durch die Anpassung der optischen Beschichtungen der Strahlteiler auch für den Wellenlängenbereich bei 1300 nm verwendet werden.

Die für die Kollimation eingesetzten Kugellinsen haben einen Durchmesser von 900 μm . Diese sind recht günstig mit einer Toleranz von $\pm 0.5 \mu\text{m}$ im Durchmesser kommerziell erhältlich. Für kleinere Durchmesser wird die Herstellung aufwendiger und damit der Preis höher, wobei zusätzlich die Toleranzen schlechter werden. Für die Optimierung des optischen Strahlengangs wird daher von Kugellinsen mit 900 μm Durchmesser ausgegangen. Die optische Achse verläuft damit 450 μm oberhalb der Substratoberfläche. Für die Auslegung der optischen Anordnung können die Glassorte und damit der Brechungsindex der Kugellinse und der Abstand zwischen Faserstirnfläche und Linsenhauptebene entsprechend angepaßt werden. Die Abbildung des von einer Monomodefaser abgestrahlten Gaußstrahls mittels einer Kugellinse wird hierbei mit der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Theorie berechnet. Der für die optische Überlagerung notwendige Strahlverlauf wird in Abschnitt 2.6.3 genauer dargestellt.

Die Positionierung der Monomodefasern auf der optischen Achse erfolgt mit Hilfe von mit dem LIGA-Verfahren hergestellten Faserhalteelementen. Die Faser liegt auf dem 450 μm dicken Halteelement auf und wird somit in den optischen Strahlengang angehoben (siehe auch Abbildung 1.1 und 3.16). Die Herstellung dieser Faserhalteelemente wird zusammen mit der Herstellung der mikrooptischen LIGA-Bank in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Die für die Detektion des Überlagerungssignals notwendigen Photodioden sind zusammen mit den passiven optischen Komponenten auf dem Substrat angeordnet. Das Design der Photodi-

oden (siehe Abschnitt 2.6.1) ist so gewählt, daß das Zentrum der lichtempfindlichen Zone auf der durch die Kugellinsen vorgegebenen optischen Achse liegt. Die in Abbildung 2.10 dargestellte Anordnung ist so optimiert, daß an den Stellen der Photodioden die Strahltaillen zu liegen kommen. Für die ideale Überlagerung des Lichts des lokalen Oszillators und des Signallichts sollten beide Strahltaillen an der gleichen Position liegen. Abweichungen hiervon führen zu einer reduzierten Strahlüberlappung und damit zu einem verminderten Zwischenfrequenzsignal. Zur Vermeidung störender Rückreflexe sind die Photodioden mit einem Winkel von 8° relativ zur optischen Achse eingebaut, so daß reflektiertes Licht nicht in die Glasfasern eingekoppelt wird.

In Abschnitt 2.6.4 wird auf den Einfluß von Fertigungstoleranzen, insbesondere den Einfluß von Justagefehlern auf die Lage der Gaußstrahlen an der Stelle der Photodiode eingegangen.

2.6.1 Design der Photodioden

Für den Aufbau eines Heterodyn-Empfängers für eine Datenübertragungsrate⁷ von $140 \frac{\text{MBit}}{\text{s}}$ wird eine elektrische Bandbreite von etwa 2 GHz benötigt [34, 43]. Diese Bandbreite ist notwendig, damit die Empfängerelektronik innerhalb eines gewissen Regelbereichs mittels Durchstimmen der lokalen Laserdiode die zum Empfang vorgesehene Zwischenfrequenz einstellen kann.

Bei Photodioden wird die elektrische Bandbreite im wesentlichen durch die Flächengröße der lichtempfindlichen Zone bestimmt. Die elektrische Bandbreite Δf wird dabei mit kleiner werdendem Durchmesser der aktiven Zone größer, da hierdurch die Kapazität C des pn-Übergangs der Photodiode geringer wird ($\Delta f \sim C^{-1}$). Die spezifizierte elektrische Bandbreite der innerhalb dieser Arbeit verwendeten Photodiode bei einer Sperrspannung von $U_R = 2.5 \text{ V}$ beträgt 1.8 GHz, wobei die photoempfindliche Zone einen Durchmesser von $160 \mu\text{m}$ hat.

Die Photodioden werden mit ihren Außenkanten justiert. Da die äußeren Abmessungen mit einer Präzision von $\pm 10 \mu\text{m}$ spezifiziert sind, ergibt sich ein effektiver Durchmesser von $140 \mu\text{m}$, der bei der Auslegung des optischen Designs berücksichtigt werden muß. Unter der Bedingung, daß 99% der optischen Leistung in ein elektrisches Signal umgewandelt werden sollen, darf die Strahlweite damit höchstens einen Radius von $45 \mu\text{m}$ an der Stelle der Photodiode aufweisen. In den beiden Tabellen im Anhang A sind alle relevanten Herstellerangaben der in Abbildung 2.11 dargestellten Photodiode aufgeführt. Abbildung 2.11 zeigt das Design der Photodiodevorderseite. Das Eintrittsfenster zur lichtempfindlichen Zone befindet sich auf der Rückseite. Auf der Vorderseite befinden sich die für die elektrische Kontaktierung von Anode und Kathode notwendigen Bondpads.

Die Kugellinsen für die Kollimation des abgestrahlten Faserlichts haben einen Durchmesser von $900 \mu\text{m}$. Damit liegt die optische Achse des Systems $450 \mu\text{m}$ oberhalb der Substratoberfläche. Da das Zentrum der lichtempfindlichen Zone mit der optischen Achse zusammenfallen soll, ist dieses mit einem Abstand von $450 \mu\text{m}$ von der unteren Kante auf der Photodiode

⁷ $140 \frac{\text{MBit}}{\text{s}}$ ist die maximale Übertragungsrate innerhalb des europäischen Übertragungsstandards (pleiochrone Hierarchie). Ferner ist diese Übertragungsrate zum Übertragungsstandard STM-1 (synchronous transfer mode-1) kompatibel, welcher innerhalb der international standardisierten Transporthierarchie SDH (synchronous digital hierarchy) festgelegt ist. SDH basiert auf dem von AT&T vorgeschlagenen Standard SONET (synchronous optical network) für die digitale Datenübertragung [22, 40].

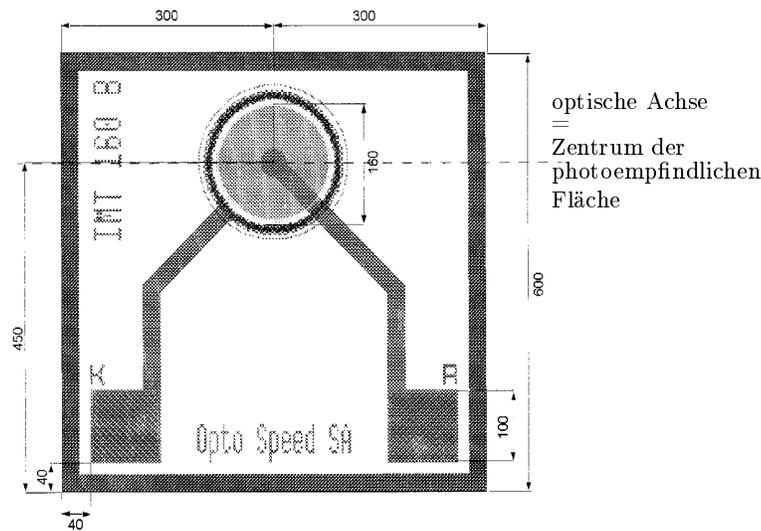


Abbildung 2.11: Vorderseite der verwendeten pin-Photodiode (alle Abmessungen in μm) [30].

angeordnet (siehe Abbildung 2.11).

Für den Aufbau der Gegentaktdetektoranordnung müssen jeweils zwei Photodioden mit der gleichen Empfindlichkeit kombiniert werden. Bei kommerziell erhältlichen gehäuseten Photodioden ist daher eine Sortierung notwendig, da diese im allgemeinen aus verschiedenen Chargen kommen. Die innerhalb dieser Arbeit verwendeten ungehäuseten Photodioden sind aus der gleichen Charge und haben daher nahezu identische Empfindlichkeiten. Eine Sortierung ist daher nicht notwendig.

2.6.2 Design der Strahlteiler

Die für die Herstellung der Strahlteiler verwendeten kundenspezifischen Prismen haben eine Kathetenlänge von 4 mm beziehungsweise 3.3 mm. Die Winkel zwischen den Prismenflächen weisen herstellungsbedingt eine Winkeltoleranz von ± 30 Bogensekunden auf [55]. Durch Kombination je zweier solcher Prismen wird die in Abbildung 2.10 dargestellte Anordnung realisiert.

Für die Realisierung eines Gegentaktdetektors wird gemäß Abschnitt 2.3 ein Strahlteiler benötigt, der idealerweise ein 50:50 Teilungsverhältnis hat. Ferner muß das Design der optischen Beschichtung so gewählt werden, daß die Strahlteileranordnung als π -Hybrid arbeitet.

In Abbildung 2.12 ist eine Gegentaktdetektoranordnung schematisch dargestellt. Für die optische Überlagerung wird hierbei ein dielektrisches Mehrschichtsystem [56,57] verwendet. Bei Transmission des elektrischen Feldes E_1 durch diese optische Beschichtung wird dem elektrischen Feld eine zusätzliche Phase von $e^{i\varphi_t}$ aufgeprägt. Die Reflexion an diesem Mehrschichtsystem verursacht eine zusätzliche Phase von $e^{i\varphi_r}$. Damit die bei der Transmission und Reflexion des elektrischen Feldes E_1 induzierten Phasen φ_t und φ_r mit denen bei der Transmission und Reflexion des elektrischen Feldes E_2 übereinstimmen, muß aus Symmetriegründen vor und hinter der dielektrischen Schichtenfolge die Brechzahl identisch sein. Aus diesem Grund können als Trägerstruktur für die dielektrischen Schichtenfolge keine Glasplättchen

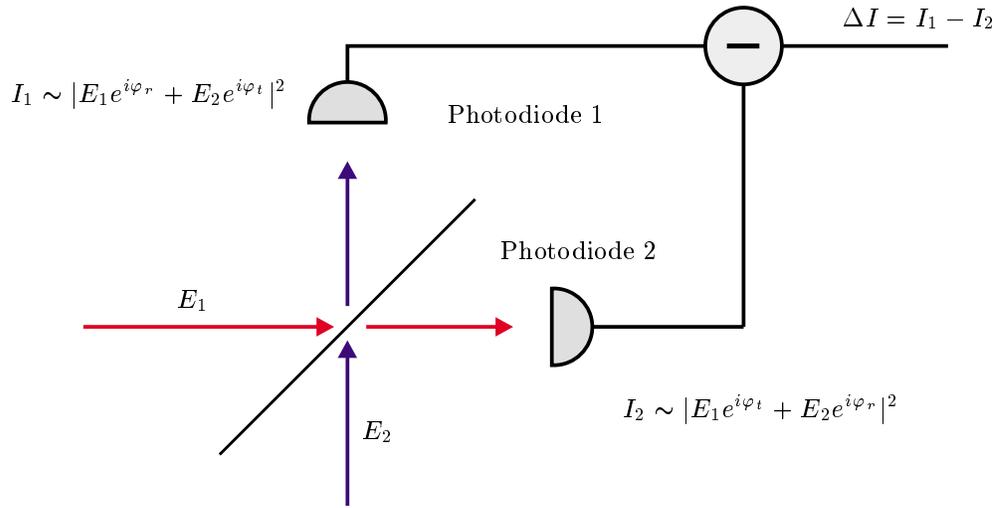


Abbildung 2.12: Strahlteiler für die Überlagerung von s- bzw. p-polarisiertem Licht mit Gegentaktdetektor.

verwendet werden. Ein weiterer Grund, der gegen die Verwendung von Glasplättchen spricht, steht im Zusammenhang mit der erforderlichen Aufbau- und Verbindungstechnik (siehe Abbildung 3.23) und wird in Abschnitt 3.4 dargestellt. Die dielektrische Schichtenfolge wird daher auf eine Prismenfläche aufgedampft, und ein zweites Prisma wird mit einem brechzahlangepaßten UV-härtenden Klebstoff auf diese beschichtete Fläche geklebt. Die optischen Eigenschaften werden durch die Wahl der Glassorte und durch den Aufbau des dielektrischen Mehrschichtsystems bestimmt.

Werden die beiden elektrischen Felder E_1 und E_2 gemäß Abbildung 2.12 überlagert, so detektiert die Photodiode 1 einen Photostrom von $I_1 \sim |E_1 e^{i\varphi_r} + E_2 e^{i\varphi_t}|^2$ und die Photodiode 2 einen von $I_2 \sim |E_1 e^{i\varphi_t} + E_2 e^{i\varphi_r}|^2$. Mit $E_1(t) = E_{10} e^{i(\omega_s t + \phi_s)}$ und $E_2(t) = E_{20} e^{i(\omega_{lo} t + \phi_{lo})}$ berechnet sich der von der Gegentaktdetektoranordnung generierte Differenzstrom $\Delta I(t) = I_1 - I_2$ gemäß:

$$\Delta I(t) \sim \sin((\omega_s - \omega_{lo})t + \phi_s - \phi_{lo}) \cdot \underbrace{\sin(\varphi_r - \varphi_t)}_{\text{Strahlteiler}}. \quad (2.14)$$

Für die in Abbildung 2.12 dargestellte Anordnung wird das Differenzsignal und damit das detektierte Zwischenfrequenzsignal maximal im Falle von:

$$\boxed{\varphi_r - \varphi_t = \frac{\pi}{2}}. \quad (2.15)$$

Die Phasendifferenz von π des π -Hybrids muß symmetrisch auf die beiden Ausgänge des Strahlteilers aufgeteilt werden. Das strahlteilende Mehrschichtsystem muß jeweils für die beiden Polarisationsrichtungen separat optimiert werden.

Für die Realisierung einer Polarisations-Diversitäts-Anordnung werden drei unterschiedliche optische Beschichtungen benötigt. Die Simulationsergebnisse [55] zu den optischen Eigenschaften des Polarisationsstrahlteilers und zu den beiden jeweils für die s- und für p-Polarisationsrichtung optimierten Strahlteilern sind in den Abbildungen 2.13 ... 2.20 dargestellt.

Die Abbildungen 2.13 und 2.14 zeigen die Ergebnisse der Strahlteilereigenschaften des p- und s-Strahlteilers als Funktion der Wellenlänge. Beide Strahlteiler sind für eine Arbeits-

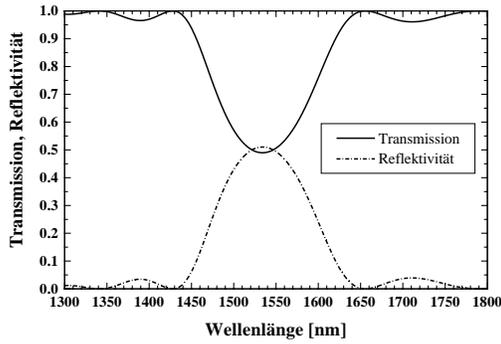


Abbildung 2.13: Transmission und Reflektivität als Funktion der Wellenlänge für p-polarisiertes Licht am p-Strahlteiler (p-BS) [55].

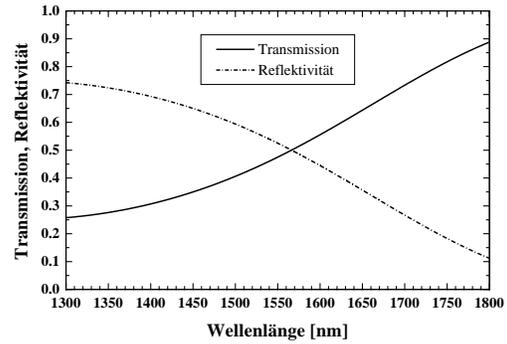


Abbildung 2.14: Transmission und Reflektivität als Funktion der Wellenlänge für s-polarisiertes Licht am s-Strahlteiler (s-BS) [55].

wellenlänge von $\lambda = 1550$ nm optimiert. Ziel der Optimierung ist es, ein ideales 50 : 50 – Teilungsverhältnis zu bekommen. Dieses ist in beiden Fällen annähernd erreicht. So hat der p-Strahlteiler ein simuliertes Teilungsverhältnis von $(T : R) = 50.6 : 49.4$ und der s-Strahlteiler von $(T : R) = 47.5 : 52.5$. Die Simulationsergebnisse beziehen sich hierbei auf einen Strahleinfall von 45° .

Bei der Herstellung der optischen Schichten treten jedoch auch Abweichungen in den optischen Eigenschaften der Strahlteiler auf. Die Transmission der beiden Strahlteiler ist daher vom Hersteller [55] mit jeweils $T = 50 \% \pm 5 \%$ spezifiziert.

In den Abbildungen 2.15 und 2.16 ist die Phase für das am jeweiligen Strahlteiler transmittierte und reflektierte Licht als Funktion der Wellenlänge aufgetragen. Bei den für die s-

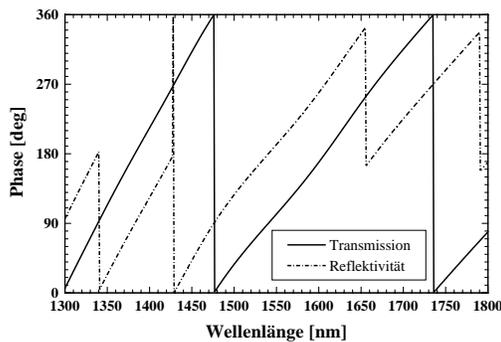


Abbildung 2.15: Phase des transmittierten und reflektierten Lichts als Funktion der Wellenlänge für p-polarisiertes Licht am p-Strahlteiler (p-BS) [55].

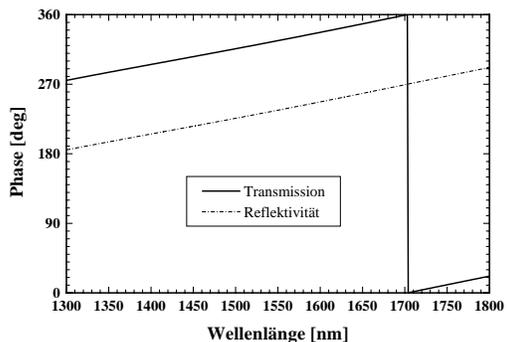


Abbildung 2.16: Phase des transmittierten und reflektierten Lichts als Funktion der Wellenlänge für s-polarisiertes Licht am s-Strahlteiler (s-BS) [55].

und p-Polarisationsrichtung optimierten Strahlteilern wird davon ausgegangen, daß sich das ankommende Licht in dem entsprechenden linear polarisierten Zustand befindet. Innerhalb des Empfängers wird dies durch deren Anordnung relativ zu den Polarisationsstrahlteilern garantiert. Die berechnete Phasendifferenz $\varphi_r - \varphi_t$ ist jeweils in den Abbildungen 2.17 und 2.18 als Funktion der Wellenlänge dargestellt, wobei diese innerhalb des betrachteten Wellenlängenbereichs ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\pi}{2}$ ist.

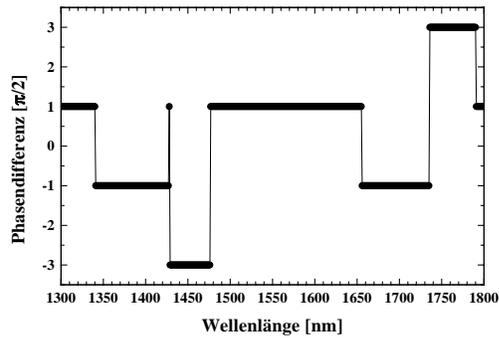


Abbildung 2.17: Phasendifferenz zwischen reflektiertem und transmittiertem Strahl als Funktion der Wellenlänge für p-polarisiertes Licht am p-Strahlteiler (p-BS) [55].

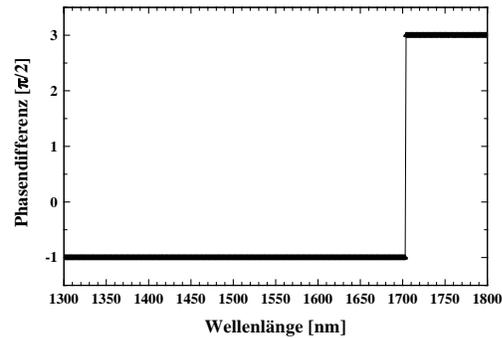


Abbildung 2.18: Phasendifferenz zwischen reflektiertem und transmittiertem Strahl als Funktion der Wellenlänge für s-polarisiertes Licht am s-Strahlteiler (s-BS) [55].

Für die optischen Schichten der Polarisationsstrahlteiler ergeben sich nach den Simulationen (siehe Abbildung 2.19 und 2.20) die in Tabelle 2.1 aufgeführten Transmissionen (T) und Reflektivitäten (R).

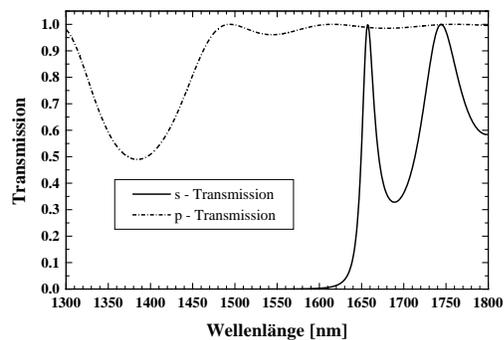


Abbildung 2.19: Transmission des Polarisationsstrahlteilers als Funktion der Wellenlänge für s- und p-polarisiertes Licht [55].

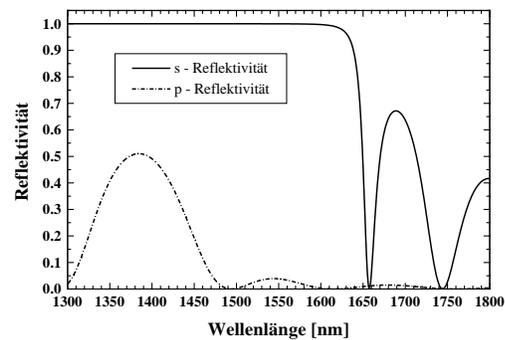


Abbildung 2.20: Reflektivität des Polarisationsstrahlteilers als Funktion der Wellenlänge für s- und p-polarisiertes Licht [55].

	s	p
T	0.02 %	96.16 %
R	99.98 %	3.84 %
T_{spek}	< 0.2 %	> 95 %

Tabelle 2.1: Transmission T und Reflektivität R des Polarisationsstrahlteilers bei einer Wellenlänge von 1550 nm und einem Einfallswinkel von 45° laut Simulation [55]. T_{spek} ist die vom Hersteller garantierte Transmission.

In der Tabelle 2.1 sind ferner die vom Hersteller garantierten Werte für die Transmissionen (T_{spek}) gegenübergestellt. Mit diesen ergibt sich eine Extinktion⁸ von ≥ 26.7 dB. Alle sonsti-

⁸ Die Extinktion ist ein Maß für die Effektivität eines Polarisationsstrahlteilers, den s- und p-

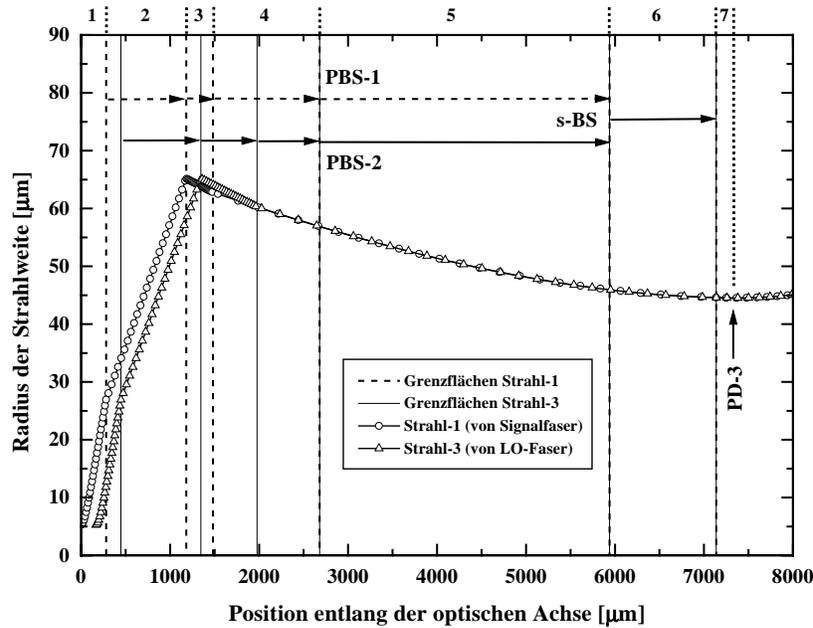


Abbildung 2.21: Simulierter Strahlverlauf für die Überlagerung des vom lokalen Oszillator und Sender abgestrahlten Lichts für PD-3: 1 = Signalfaser – L1 (durch Luft), 2 = L1, 3 = L1 – Prismeneintritt (durch Luft), 4 = Prismeneintritt – PBS-1, 5 = PBS-1 – s-BS, 6 = s-BS – Prismenausritt, 7 = Prismenausritt – Strahltaile. Für Strahl-3 ergeben sich die Strahlabschnitte zwischen den Grenzflächen analog. Sie sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht zusätzlich eingezeichnet.

gen optisch aktiven Flächen sind mit einer antirefektiven Schicht bedampft. Die Reflektivität dieser Schicht ist mit $R < 0.2 \%$ für die Wellenlänge von 1550 nm spezifiziert.

2.6.3 Strahlverlauf und Überlagerung

Im Folgenden wird exemplarisch die Überlagerung des von der lokalen Laserdiode und dem Signal her stammenden s-Polarisationsanteils betrachtet. In Abbildung 2.21 sind die zwei Strahlverläufe, die sich in der Photodiode PD-3 überlagern, dargestellt, in Abbildung 2.22 die Strahlverläufe, die sich in PD-4 überlagern (siehe auch Abbildung 2.10). Bei der Propagation des von der Signalfaser abgestrahlten Gaußstrahls „—○—“ bis zur Photodiode PD-3, muß dieser die in Abbildung 2.21 mit einer vertikalen, gestrichelten Linie „- - -“ gekennzeichneten Grenzflächen passieren. Die Grenzflächen, welcher der von der Lokaloszillatorfaser abgestrahlte Gaußstrahl „—△—“ bis zur Photodiode PD-3 passiert, sind mit einer vertikalen, durchgezogenen Linie „—“ gekennzeichnet.

Der von der Signalfaser abgestrahlte Gaußstrahl „—○—“ wird durch die Linse L1 kollimiert. Mit Hilfe der Linse L2 wird der von der Lokaloszillatorfaser abgestrahlte Gaußstrahl „—△—“ kollimiert. Für die Kollimation des von der Faser abgestrahlten Gaußstrahls ist die Faserstirnfläche jeweils 281 μm vom Scheitel der Kugellinse (BK7-Glas) mit Radius 450 μm entfernt

Polarisationsanteil voneinander zu separieren und ist definiert durch das Verhältnis $\frac{T_p}{T_s}$, welches im hauptsächlich p-polarisierten Strahl gemessen wird.

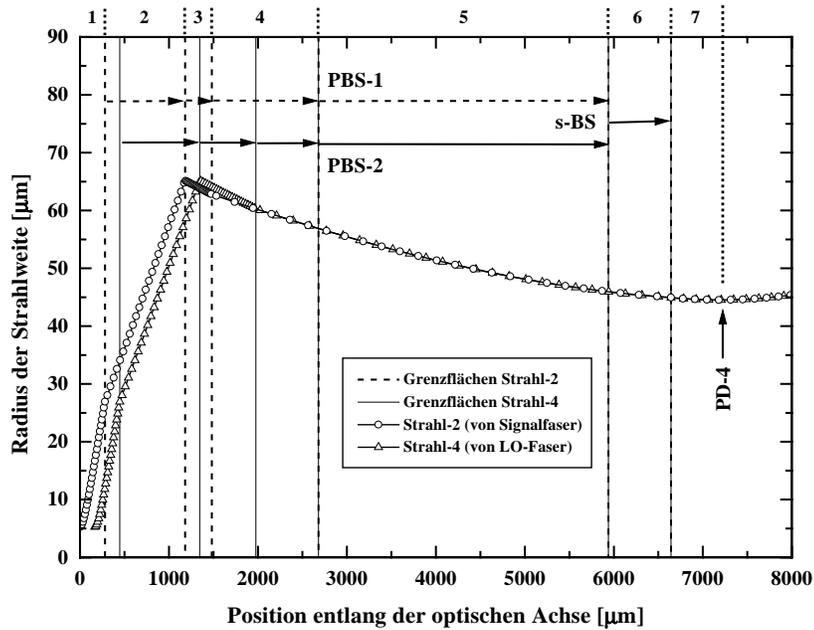


Abbildung 2.22: Simulierter Strahlverlauf für die Überlagerung des vom lokalen Oszillator und Sender abgestrahlten Lichts für PD-4: 1 = Signalfaser – L1 (durch Luft), 2 = L1, 3 = L1 – Prismeneintritt (durch Luft), 4 = Prismeneintritt – PBS-2, 5 = PBS-2 – s-BS, 6 = s-BS – Prismenaustritt, 7 = Prismenaustritt – Strahltaille. Für Strahl-4 ergeben sich die Strahlabschnitte zwischen den Grenzflächen analog. Sie sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht zusätzlich eingezeichnet.

positioniert. Nach der Linse L1 wird der Gaußstrahl $300 \mu\text{m}$ durch Luft propagiert, bis er auf die erste Prismengrenzfläche trifft. Damit die Strahltaille des durch die Linse L2 kollimierten Gaußstrahls an der gleichen Position wie der von der Linse L1 kollimierte Gaußstrahl zu liegen kommt, beträgt der Abstand zwischen Linse L2 und der nächstliegenden Prismengrenzfläche $630 \mu\text{m}$ (siehe auch Abbildung 2.10). Von der Prismengrenzfläche an erfolgt die Propagation bis zum Polarisationsstrahlteiler. Durch die beiden Polarisationssteiler (PBS) wird der s-Polarisationsanteil jeweils zum s-Strahlteiler (s-BS) reflektiert. Dort werden die beiden Gaußstrahlen überlagert. Der durch Überlagerung erzeugte Strahl wird noch $1200 \mu\text{m}$ innerhalb des Prismas propagiert, bis er an die Glas-Luft-Grenzfläche kommt. Der Abstand zwischen der Strahltaillenposition des überlagerten Strahls und der Prismengrenzfläche beträgt $225 \mu\text{m}$.

Die Überlagerung der beiden s-polarisierten Gaußstrahlen und anschließende Detektion des Überlagerungssignals durch die Photodiode PD-4 geschieht bis zur Propagation zur s-Strahlteilerschicht (s-BS) analog zum zuvor beschriebenen Fall (siehe Abbildung 2.22). Der durch Überlagerung erzeugte Gaußstrahl, welcher durch die Photodiode PD-4 detektiert wird, wird ab dem s-Strahlteiler noch $705 \mu\text{m}$ innerhalb des Prismas propagiert bis er an die Glas-Luft-Grenzfläche kommt. Der Abstand zwischen der Strahltaillenposition des überlagerten Strahls und der Prismengrenzfläche beträgt $555 \mu\text{m}$. Werden die beiden Photodioden jeweils an den Stellen der Strahltaillenpositionen montiert, so ergibt sich daraus ein Unterschied in der optischen Weglänge von $624 \mu\text{m}$, bei einem Brechungsindex von $n = 1.5$ der

BK7-Glasprismen. Der sich daraus ergebende Laufzeitunterschied τ wird kompensiert, indem die Photodiode PD-4 um die entsprechende Weglänge von der Prismenfläche weg positioniert wird. Eine Kompensation ist in diesem Fall jedoch nicht unbedingt notwendig. So wird ohne diese Kompensation der detektierte Differenzstrom (Gleichung 2.14) folgendermaßen modifiziert:

$$\begin{aligned} \Delta I(t) &= I_1(t + \tau) - I_2(t) & (2.16) \\ &\sim \sin\left(\underbrace{(\omega_s - \omega_{lo}) t + \phi_s - \phi_{lo}}_{\text{Laufzeitterm}} + \underbrace{\frac{\tau}{2}(\omega_s - \omega_{lo})}_{\text{Laufzeitterm}}\right) \cdot \sin\left(\varphi_r - \varphi_t + \underbrace{\frac{\tau}{2}(\omega_s - \omega_{lo})}_{\text{Laufzeitterm}}\right). & (2.17) \end{aligned}$$

Wegdifferenzen innerhalb der Gegentaktanordnung entlang der optischen Achse von bis zu 1 mm führen somit zu einer Korrektur von $\frac{\tau\omega_{IF}}{2} \leq 0.008$ bei einer Zwischenfrequenz von 750 MHz und sind damit tolerabel.

2.6.4 Einfluß von Fertigungstoleranzen

Die Gleichtaktunterdrückung ($CMRR$) und damit die Funktion des Gegentaktdetektors kann durch Toleranzen im Teilungsverhältnis der Strahlteiler verschlechtert werden (siehe Abschnitt 2.3). Auch unterschiedliche Empfindlichkeiten R der Photodioden und Justagefehler, welche die Überlagerungsqualität beeinflussen oder zu einer Fehlauseleuchtung der photoempfindlichen Zone der Photodiode führen, können die Gleichtaktunterdrückung ungünstig beeinflussen. Es ist deshalb wichtig, die Toleranzen so klein wie möglich zu halten.

In den Abbildungen 2.23 und 2.24 ist der Einfluß eines lateralen Faserversatzes und einer Verkipfung der Faserstirnfläche auf die Position des Strahlschwerpunkts im Bereich der Photodiode dargestellt. Die Punkte sind mit einer geometrisch optischen Simulation mit dem Designprogramm *Solstis* [58] berechnet worden. Hierbei wird der Verlauf des vom Faserkern abgestrahlten Zentralstrahls verfolgt und dessen Schnittpunkt mit der von der Photodiodenfläche aufgespannten Ebene berechnet.

Eine laterale Dejustage der Faser um z. B. $1 \mu\text{m}$ führt demnach zu einem lateralen Versatz des Strahlschwerpunkts von etwa $6.4 \mu\text{m}$. Eine Verkipfung der Faserstirnfläche um z. B. 0.2° führt zu einem lateralen Versatz des Strahlschwerpunkts von etwa $1.1 \mu\text{m}$.

Der Einfluß aller Toleranzen (Prismen, Linsen) auf die Überlagerungsqualität kann analytisch nur mit großem Aufwand nachvollzogen werden. Die genauere Analyse des optischen Systems wurde am Institut für Angewandte Informatik vorgenommen [60–63]. Durch die Winkeltoleranz von $\pm 30''$ bei den verwendeten Prismen ergibt sich eine laterale Dejustage der optischen Achse von $\pm 2.1 \mu\text{m}$ an der Photodiodenposition. Eine zusätzliche Dejustage der Kugellinse von $\pm 2 \mu\text{m}$ bewirkt eine Dejustage der optischen Achse von $\pm 16.2 \mu\text{m}$ an der Position der Photodiode. Wird nur die Kugellinse um $\pm 2 \mu\text{m}$ dejustiert, so schlägt sich dies in einer Dejustage der optischen Achse von $\pm 14 \mu\text{m}$ nieder.

FEM-Simulationen zum Einfluß von thermischen Lasten auf die Überlagerungsqualität zeigen aufgrund der guten Materialkompatibilität zwischen den optischen Komponenten ($\beta_{BK7} = 7.1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ [64]) und dem Keramiksubstrat ($\beta_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ [64]) keinen signifikanten Effekt [63].

Die Analyse zeigt, daß mit dem Aufbau für eine ideale Überlagerung Positionsgenauigkeiten

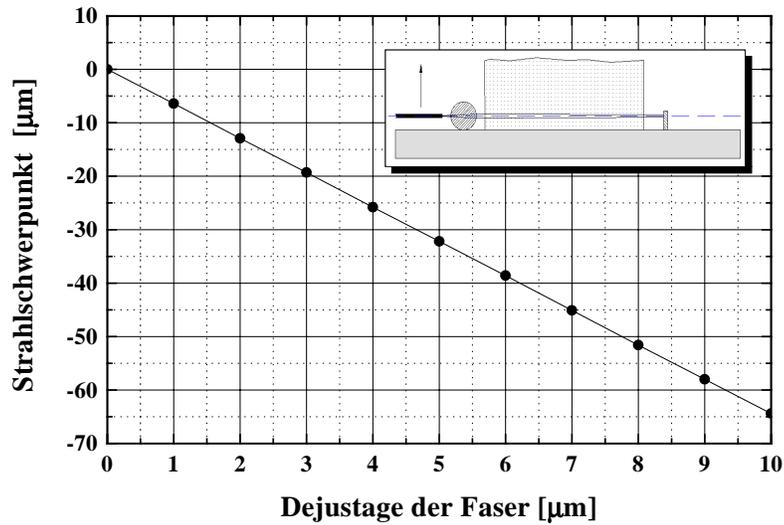


Abbildung 2.23: Verschiebung des Strahlschwerpunkts an der Position der Photodiode durch einen lateralen Versatz der Monomodefaser.

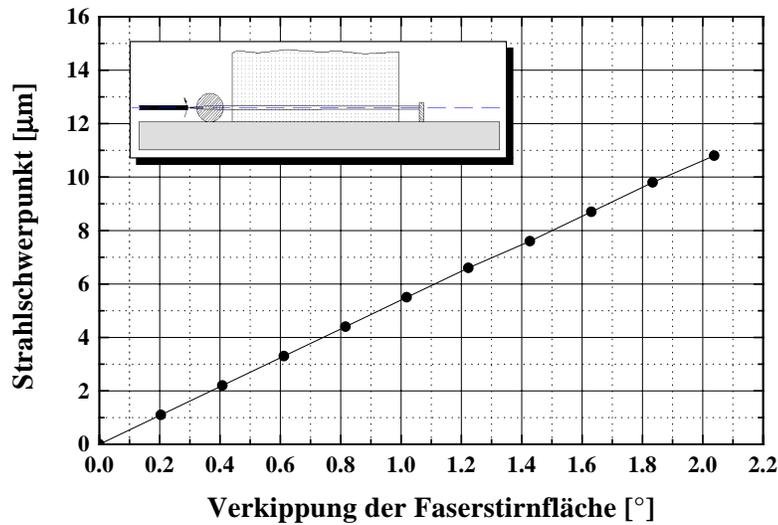


Abbildung 2.24: Verschiebung des Strahlschwerpunkts an der Position der Photodiode durch eine Verkipfung der Faserstirnfläche.

im Bereich von besser $1 \mu\text{m}$ erzielt werden sollten. In diesem Fall liegt die maximale Dejustage bei $6.4 \mu\text{m}$. Damit beträgt die Koppel-effizienz der beiden Strahlen auf der Photodiode 98 %.

Kapitel 3

Integration optoelektronischer Komponenten auf einer mikrooptischen LIGA-Bank

Für Monomode-Anwendungen müssen die optischen Komponenten mit einer Justiergenauigkeit im μm -Bereich auf der optischen Achse zueinander justiert montiert werden, um die volle Funktionalität der optischen Module sicherzustellen. Für die Herstellung mikrooptischer Aufbauten für Anwendungen der optischen Übertragungstechnik ist es daher notwendig, den Einfluß des Herstellungsprozesses auf die Strukturtreue bis in den Sub-Mikrometerbereich zu kennen.

Das LIGA-Verfahren (siehe Abschnitt 3.1) [65,66] ermöglicht die Herstellung von Mikrostrukturen beliebiger lateraler Geometrie, mit einer geringen Seitenwandrauhigkeit und Strukturdetails bis in den Sub-Mikrometerbereich [67] und erfüllt somit alle Grundvoraussetzungen, welche für die Herstellung von optischen Modulen gefordert werden.

Im Abschnitt 3.2 wird darauf eingegangen, welche Prozeßschritte für die Herstellung von mikrooptischen Bänken und Halteelementen notwendig sind, an welchen Stellen des Herstellungsprozesses mit Strukturverlusten zu rechnen ist und wie diese Verluste mit entsprechenden Designvorhalten kompensiert werden können. Hierzu wird kurz auf die röntgenlithografische Herstellung von mikrooptischen Bänken eingegangen und anschließend wird ein Überblick über die Effekte gegeben, welche beim LIGA-Verfahren einen Einfluß auf die Strukturtreue haben. Die Maßhaltigkeit des LIGA-Prozesses wird in Abschnitt 3.3 exemplarisch an Teststrukturen vom CAD-Design über die Arbeitsmaske bis hin zum Produkt verfolgt.

Die für den Aufbau des innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfängers notwendige Aufbau- und Verbindungstechnik wird in Abschnitt 3.4 dargestellt. Für die Herstellung des Heterodyn-Empfängers ist die Montage und Fixierung von Photodioden, Kugellinsen, Halteelementen und Prismen auf der mikrooptischen LIGA-Bank notwendig. Ferner wird auf das Packaging des mikrooptischen Aufbaus eingegangen, wobei dessen Montage auf einer SMD-Auswerteschaltung dargestellt wird.

Mittels einer Faser-Faser-Kopplung wird in Abschnitt 3.5 die Präzision der passiven Justage mit PMMA-Halteelementen charakterisiert. Eine Erhöhung der Integrationsdichte beim

Heterodyn-Empfänger wird erreicht, indem auch die Lokallaserdiode auf der mikrooptischen LIGA-Bank integriert wird. In Abschnitt 3.6 wird das Konzept der passiven Justage von Laserdioden auf eine mikrooptische LIGA-Bank dargestellt.

3.1 LIGA-Verfahren

Die Herstellung einer Mikrostruktur nach dem LIGA-Verfahren ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Das LIGA-Verfahren kombiniert die Röntgentiefenlitographie mit Synchrotronstrahlung, die Galvanoformung von Metallen und die Abformung von Kunststoffen.

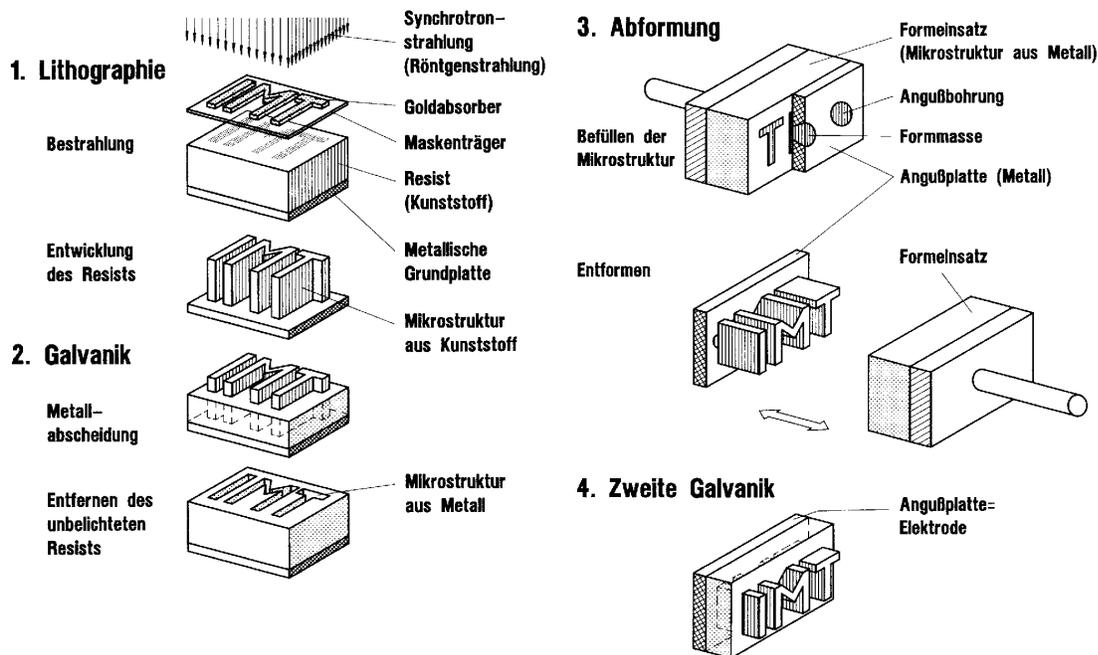


Abbildung 3.1: Herstellung einer Mikrostruktur nach dem LIGA-Verfahren [65].

Lithografie Bei dem ersten Prozessschritt wird eine Primärstruktur durch Belichtung und Entwicklung eines strahlungsempfindlichen Polymermaterials strukturiert.

Die in der Regel mehrere hundert Mikrometer dicke Kunststoffschicht wird im allgemeinen auf ein metallisiertes Substrat aufgebracht. Dieses kann etwa eine metallische Grundplatte oder eine isolierende Platte mit elektrisch leitender Deckschicht sein.

Mit Hilfe der von einer Synchrotronquelle erzeugten Synchrotronstrahlung werden Absorberstrukturen einer Röntgenmaske durch Schattenprojektion in die Kunststoffschicht (Röntgenresist) abgebildet. Als Röntgenresist wird bevorzugt **P**olymethylmethacrylat (PMMA) verwendet. Durch die Bestrahlung werden Polymerketten dieses Röntgenresists zerstört und damit das Molekulargewicht in den bestrahlten Bereichen reduziert. Die Bereiche mit niedrigerem Molekulargewicht werden mit einem geeigneten Entwickler selektiv herausgelöst.

Für die Strukturierung von bis zu 3 mm dicken Kunststoffschichten wird sehr energiereiche Synchrotronstrahlung verwendet. Der Wellenlängenbereich der Synchrotronstrahlung, welcher hauptsächlich zur Strukturierung des Resistmaterials beiträgt, liegt im Bereich von 0.12 bis 0.6 nm [68].

Galvanik In einigen Fällen können die mit Hilfe der Röntgentiefenlithografie hergestellten Mikrostrukturen aus Kunststoff bereits das Endprodukt darstellen (siehe Abschnitt 3.2).

Durch galvanische Metallabscheidung in den Zwischenräumen der Primärstruktur kann eine metallische Komplementärstruktur hergestellt werden. Die Absorber von Röntgenmasken werden mittels Goldgalvanik hergestellt. Für die Strukturherstellung wird überwiegend die Nickelgalvanik verwendet, wobei für die Herstellung von härteren Strukturen (Abformwerkzeug) eine Nickel-Kobaltlösung für die Galvanik eingesetzt wird. Für die Herstellung von magnetischen Strukturen wird eine Nickel-Eisenlegierung aufgalvanisiert.

Abformung Die Vervielfältigung der Mikrostruktur durch Spritzguß, Reaktionsguß oder Prägeverfahren ermöglicht eine kostengünstige Massenfertigung. Die so hergestellten Kunststoffstrukturen können wiederum galvanisch mit Metall aufgefüllt werden oder dienen als verlorene Formen zur Herstellung von keramischen Mikrostrukturen.

3.2 Herstellung einer mikrooptischen LIGA-Bank

Die Herstellung einer mikrooptischen LIGA-Bank (siehe Abbildung 3.2) erfolgt innerhalb dieser Arbeit direktlithografisch, d. h. die Galvanik und Abformung spielen bei der Herstellung keine Rolle.

Auf ein geläpftes Keramiksubstrat wird eine 5 nm dicke Chrom- und danach eine 1.6 μm dicke Goldschicht aufgesputtert. Anschließend werden die Leiterbahnen und Justierkreuze

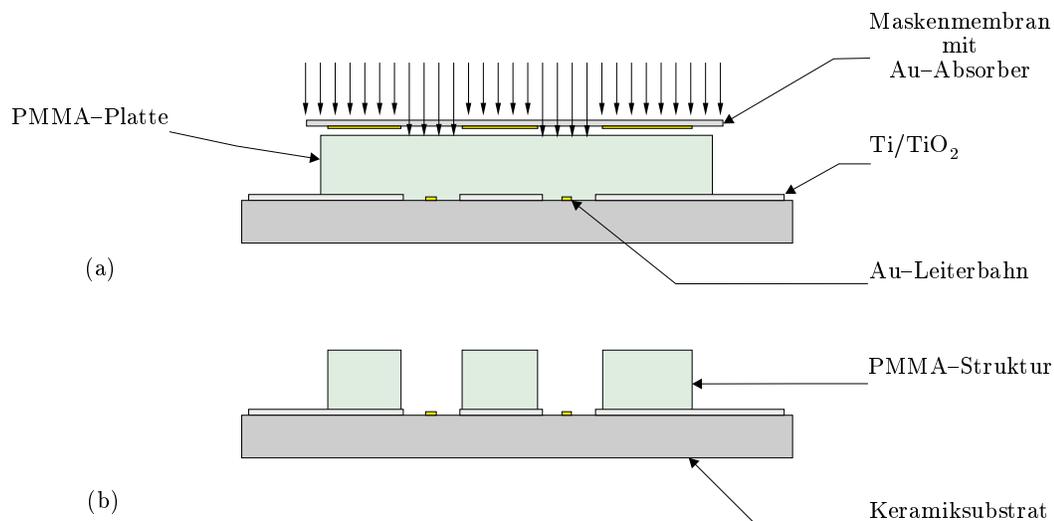


Abbildung 3.2: Herstellung einer mikrooptischen Bank: (a) Bestrahlung der PMMA-Platte (b) PMMA-Strukturen auf der Keramik (nach der Entwicklung).

mittels optischer Lithografie strukturiert. Auf das so vorstrukturierte Keramiksubstrat wird eine Titanschicht aufgesputtert, welche naßchemisch oxidiert wird, um die Rauigkeit und damit die Haftung der auf der geläpften Keramik aufgeklebten Resistplatte zu verbessern. Mit Hilfe eines weiteren optischen Lithografieschritts mit anschließendem Ätzschritt werden die Justierkreuze freigelegt, damit die Bestrahlung justiert zu den Leiterbahnen erfolgen kann. Zusätzlich wird in den Bereichen, in denen sich die Goldleiterbahnen befinden und die für die Justage der Prismen und Kugellinsen vorgesehen sind, die Titanschicht entfernt, damit diese untereinander elektrisch isoliert sind. Auf das so vorbereitete Substrat wird eine $500\ \mu\text{m}$ dicke Polymerplatte aus GS233-Material [69] aufgeklebt.

Anschließend erfolgt die justierte röntgenlithografische Bestrahlung, dann die Entwicklung bei Raumtemperatur und abschließend die Vereinzelung der einzelnen mikrooptischen Bänke durch Laserschneiden. Bevor die optoelektronischen Komponenten auf der mikrooptischen Bank montiert werden, wird das Substrat noch einem abschließenden Reinigungsschritt im Megaschallbad unterworfen.

Herstellung von LIGA-Haltelementen Für die Herstellung der für die passive Justage von Glasfasern und Laserdioden notwendigen Halteelemente, wird auf ein Keramiksubstrat eine etwa $3\ \mu\text{m}$ dicke Titanschicht aufgesputtert, welche naßchemisch oxidiert wird. Die Titanschicht dient als Haftschrift für eine $900\ \mu\text{m}$ dicke Polymerplatte aus GS233-Material [69]. Sollen metallische Halteelemente hergestellt werden, so dient diese als Galvanikstartschicht. In Abbildung 3.3 sind die einzelnen Prozessschritte (a) – (b) dargestellt, welche für die Herstellung von Halteelementen aus PMMA-Material notwendig sind. In Schritt (a) werden die Absorberstrukturen einer Berylliumarbeitsmaske mittels Synchrotronstrahlung in das auf die Keramik geklebte PMMA-Material abgebildet. Durch einen weiteren Entwicklungsschritt (b) werden die so bestrahlten Bereiche selektiv herausgelöst. Die somit hergestellten Strukturen sind das Produkt. Durch Ätzen der Titanschicht werden die PMMA-Haltelemente vom Substrat abgelöst.

Für die Herstellung von Halteelementen aus Nickel, welche für die passive Justage und elektrische Kontaktierung von Laserdioden verwendet werden, sind noch drei weitere Fertigungsschritte (c) – (e) notwendig. Zur Vermeidung einer Gratbildung bei den Halteelementen durch Unterplattierung wird zunächst eine etwa $25\ \mu\text{m}$ hohe Kupferschicht zwischen den Resiststrukturen aufgalvanisiert. Anschließend wird eine etwa $750\ \mu\text{m}$ hohe Nickelschicht aufgalvanisiert. Diese Nickelgalvanikhöhe ist notwendig, damit die innerhalb dieser Arbeit verwendeten $700\ \mu\text{m}$ langen Laserdiodenchips schlüssig auf dem Nickelhalteelement montiert werden können. Eine weitere Nachbearbeitung der Halteelemente entfällt, da durch diese Galvanikhöhe eine Übergalvanisierung der $900\ \mu\text{m}$ hohen PMMA-Resiststrukturen vermieden wird. Mittels einer Flutbelichtung (d) und anschließender Entwicklung (e) wird der PMMA-Resist entfernt. Die metallischen Halteelemente werden durch Ätzen der Kupferopferschicht vom Substrat abgelöst. Die Montage eines vom Substrat abgelösten Halteelements auf einer mikrooptischen Bank ist in den Abbildungen 3.16 und 3.38 dargestellt. Hierbei wird das Halteelement so montiert, daß dessen Strukturseitenwand parallel zur Substratoberfläche verläuft.

Verschiedene physikalische Effekte beeinflussen die Neigung der Strukturseitenwände und die Genauigkeit der röntgenlithografisch hergestellten Strukturen. Durch Beugung gelangt Synchrotronstrahlung hinter die Absorberkante. Der Abstand der Beugungsmaxima zum

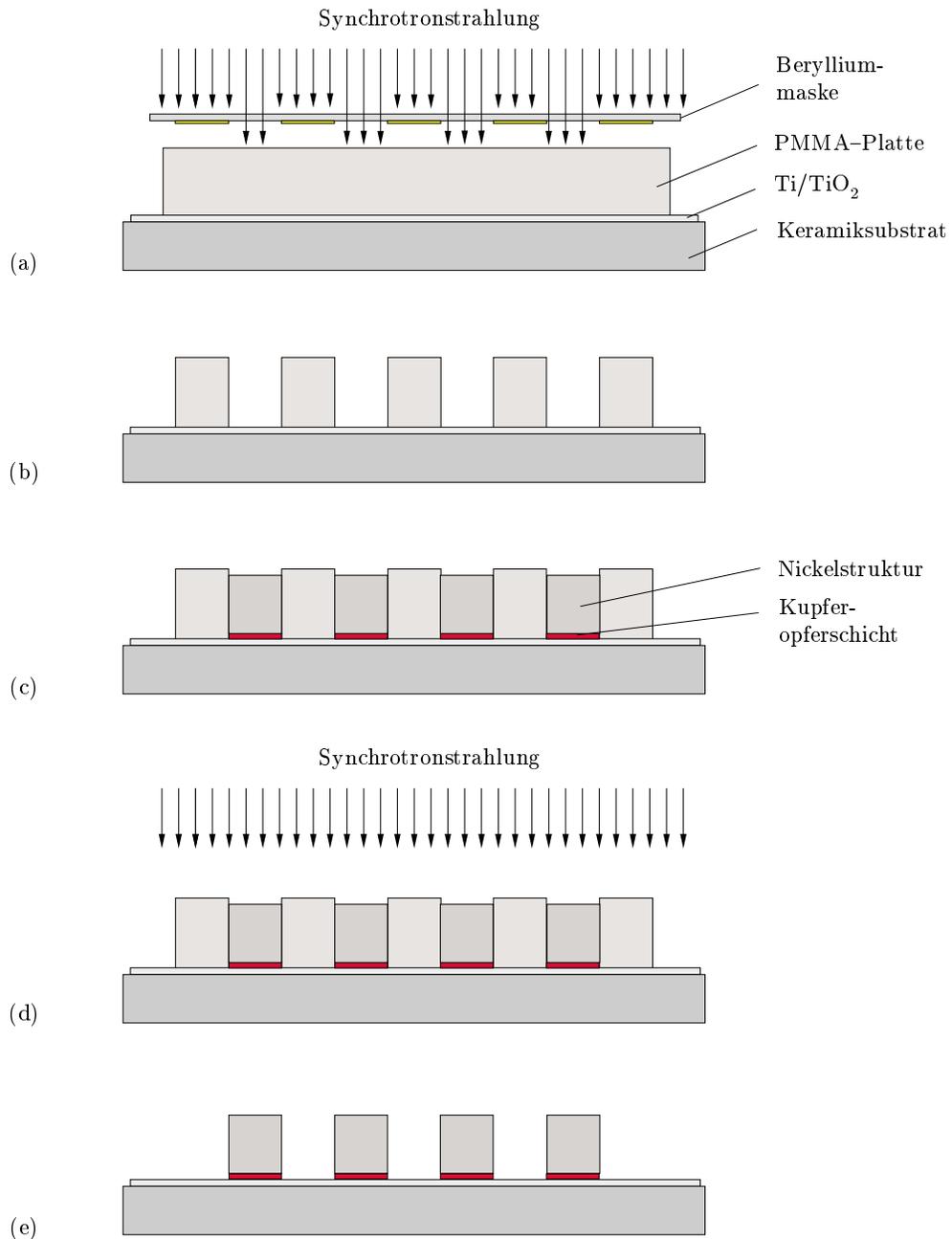


Abbildung 3.3: Herstellung von LIGA-Haltelementen: (a) Bestrahlung der PMMA-Platte, (b) PMMA-Haltelemente auf der Keramik (nach der Entwicklung), (c) Kupfer- und Nickelgalvanikschritt, (d) Flutbelichtung, (e) metallische Halteelemente auf der Keramik (nach der 2. Entwicklung).

Absorberrand nimmt mit zunehmender Photonenenergie ab. In Abbildung 3.4 [65] ist die durch Beugung verursachte Kantenunschärfe als Funktion der charakteristischen Wellenlänge dargestellt. Die Kantenunschärfe Δx wird mit zunehmender Energie, d. h. abnehmender Wellenlänge, geringer.

Durch die Absorption von Photonen innerhalb des Resists werden Photoelektronen erzeugt, welche innerhalb des Resists Reichweiten von mehreren 100 nm haben können. In Abbildung 3.4 ist die durch Photoelektronen verursachte Kantenunschärfe als Funktion der cha-

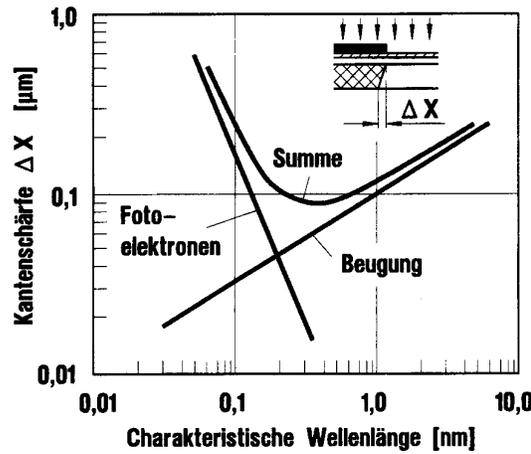


Abbildung 3.4: Einfluß der charakteristischen Wellenlänge auf die Kantenunschärfe [65].

Charakteristische Wellenlänge ebenfalls dargestellt. Der Schnittpunkt beider Abhängigkeiten ergibt die optimale charakteristische Wellenlänge, bei der Strukturen mit der geringsten Kantenunschärfe hergestellt werden können. Bei der Herstellung der mikrooptischen Bank und der Halteelemente betrug die charakteristische Wellenlänge 0,11 nm, so daß mit einer Kantenunschärfe von 0,2 μm aufgrund der beiden erläuterten Effekte zu rechnen ist [70].

Einen weiteren Einfluß auf die Strukturtreue hat die Erwärmung der Goldabsorber und der Maskenmembran während der Bestrahlung. Dadurch bildet sich auf der Röntgenmaske ein inhomogenes Temperaturfeld aus, wodurch es zu Verzügen auf der Maske kommt [68, 71]. Bei großen, rechteckigen Absorberbereichen sind die Verzüge in Richtung der Kanten des Rechtecks etwa proportional zu dessen Seitenlänge.

Bei Titanmasken beträgt die Membrandicke etwa 2,2 μm , und bei Berylliummasken hat die Maskenmembran eine Dicke von etwa 300 μm . Bei Berylliummasken kann die induzierte Wärme dadurch besser abgeführt werden. Ferner verfügt die Berylliummaske über eine größere mechanische Stabilität im Vergleich zu einer Titanmembranmaske. Während der Bestrahlung beträgt der Abstand zwischen Resistoberseite und den Goldabsorbern der Arbeitsmaske etwa 50 bis 100 μm . Die Absorption der Röntgenstrahlung in der Maske und Probe führt zu einer Erwärmung und damit Ausdehnung. Der Maskenrand und die Substratunterseite werden während der Bestrahlung auf einer konstanten Temperatur von 21 $^{\circ}\text{C}$ gehalten, um die Masken- und Probertemperatur konstant zu halten. Die Berylliummembran ist dick genug, um für eine gute Wärmeableitung zu sorgen. So zeigt die Analyse mit der Methode der Finiten-Elemente, daß sich die Titanmembran auf bis zu 55 $^{\circ}\text{C}$ während der Bestrahlung erwärmt. Unter den gleichen Randbedingungen erwärmt sich die Berylliummembran nur auf 22 $^{\circ}\text{C}$ [71]. Somit ist klar, daß durch Verwendung von Berylliummaskenmembranen die thermischen Verzüge reduziert werden.

Aufgrund der Eigenschaften von Berylliummasken sind diese für die Herstellung hochpräziser Strukturen den Titanmasken vorzuziehen. Innerhalb dieser Arbeit wurden daher Berylliummasken für die Herstellung von 900 μm hohen PMMA-Haltelementen eingesetzt (siehe Abschnitt 3.4). Die Herstellung der mikrooptischen LIGA-Bank erfolgte mit einer Titanmaske,

da zum Zeitpunkt der Arbeit nur mit diesem Maskentyp eine justierte Bestrahlung bezüglich der auf dem Substrat befindlichen Leiterbahnen möglich war.

Neben den durch Beugung und thermischen Verzügen verursachten Strukturungenauigkeiten beeinflussen die folgenden Effekte die Strukturtreue:

- Die Synchrotronstrahlung besitzt eine endliche Divergenz (≤ 1 mrad), welche durch die endliche Elektronenenergie und durch Betatronschwingungen verursacht wird [65].
- Die Masken- und Substratnormale können nur mit einer begrenzten Genauigkeit parallel zum Synchrotronstrahl justiert werden.
- Eine weitere Einflußgröße ist die Fluoreszenzstrahlung, die in der Maskenmembran erzeugt wird. Die Synchrotronstrahlung regt Elektronen aus den K- und L-Schalen des Maskenmembranmaterials (in der Regel $2.2 \mu\text{m}$ Titan) an. Durch Rekombination kommt es zu der homogen über den Raumwinkel abgestrahlten Fluoreszenzstrahlung, wobei die Energie hinter die Absorbergrenze deponiert wird, dort den Resist schädigt und zu einer verrundeten Oberflächenkante im Produkt führt. Um die Kantenverrundung zu reduzieren, bietet sich die Verwendung von Beryllium als Maskenmembranmaterial an [68, 72].

Aus der Sicht des Anwenders ist es nicht unbedingt notwendig den Einfluß jedes einzelnen Effektes quantitativ zu kennen, sondern es muß geklärt werden, welche Strukturgenauigkeiten im allgemeinen mit dem eingesetzten Herstellungsverfahren erreicht werden.

Die genannten Effekte beeinflussen in ihrer Gesamtheit die Neigung der Strukturen. So wurde von B. Schweizer [71] eine Neigung von $0.25 \mu\text{m}$ pro $100 \mu\text{m}$ -Resisthöhe der LIGA-Seitenwand ermittelt und damit ein Böschungswinkel von $\alpha_B = 2.5$ mrad (siehe Abbildung 3.5).

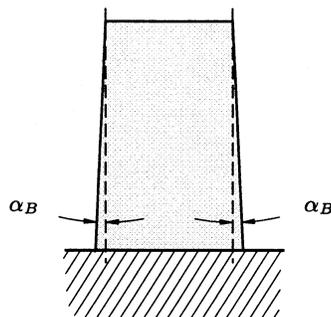


Abbildung 3.5: PMMA-Struktur auf einem Substrat: In der Arbeit von B. Schweizer wurde eine Seitenwandneigung von $\alpha_B = 2.5$ mrad ermittelt, dies entspricht einem Zurückweichen von $\approx 0.25 \mu\text{m}$ pro $100 \mu\text{m}$ Resisthöhe gegenüber einem senkrechten Verlauf [71].

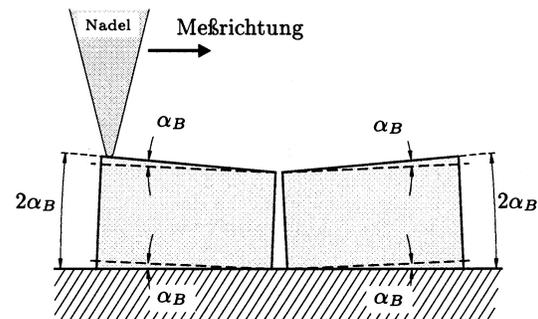


Abbildung 3.6: Zwei identische, auf einem Substrat symmetrisch angeordnete Strukturen.

Um das Seitenwandprofil von PMMA- und Nickel-Strukturen genauer zu charakterisieren, werden mit einem Tastschnittgerät (Fa. Tencor) ergänzende Profilmessungen vorgenommen. Hierzu werden zwei abgelöste und identische Resist- bzw. Nickelstrukturen symmetrisch zueinander angeordnet, d. h. die beiden Resistober- bzw. Unterseiten liegen einander gegenüber

(siehe Abbildung 3.6). Die symmetrische Anordnung erlaubt die Vermessung der Strukturseitenwand auch wenn das Trägersubstrat verkippert ist. In den Abbildungen 3.8 und 3.10 sind typische Meßkurven dargestellt. Die weitere Auswertung ergibt die in Abbildung 3.7 und 3.9 dargestellten typischen Seitenwandprofile für eine PMMA-Struktur und für eine galvanisierte Nickelstruktur. Deutlich zu sehen ist die Abweichung von einem idealen senkrechten Verlauf. Erstaunlich ist, daß durch die Nickelgalvanik das in Strahlrichtung gemessene Profil der PMMA-Seitenwand sich nicht direkt im Profil der Nickelseitenwand widerspiegelt.

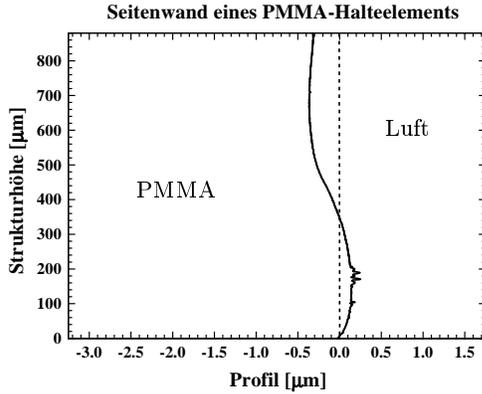


Abbildung 3.7: Profilverlauf einer PMMA-Seitenwand.

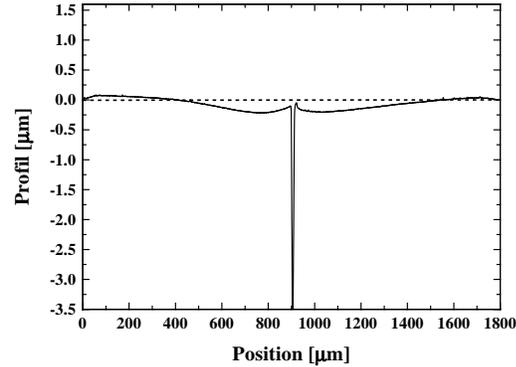


Abbildung 3.8: Messung an zwei PMMA-Strukturen. Die jeweiligen Resistoberseiten liegen einander gegenüber.

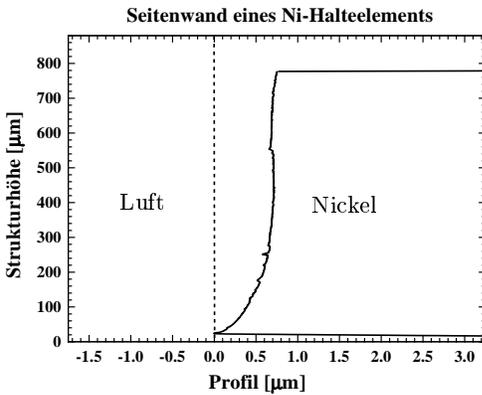


Abbildung 3.9: Profilverlauf einer galvanisierten Nickelseitenwand.

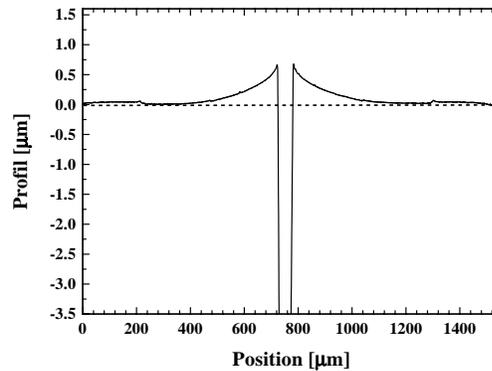


Abbildung 3.10: Messung an zwei Nickelstrukturen. Die jeweiligen Strukturunterseiten liegen einander gegenüber.

Die Profilmessungen zeigen, daß sich die PMMA-Strukturen besser für die Justage von mikrooptischen Komponenten eignen, da die PMMA-Seitenwand einen effektiven Böschungswinkel von $2\alpha_B^{PMMA} \approx \arctan(0.5 \mu\text{m}/900 \mu\text{m}) \approx 0.6 \text{ mrad}$ hat. Wird die Struktur durch eine anschließende Nickelgalvanik erzeugt, dann hat die Seitenwand einen effektiven Böschungswinkel von $2\alpha_B^{Ni} \approx \arctan(0.7 \mu\text{m}/800 \mu\text{m}) \approx 0.9 \text{ mrad}$. Aus diesem Grund werden innerhalb dieser Arbeit die Glasfasern ausschließlich mit PMMA-Strukturen justiert.

3.3 Maßverfolgung mit dem COSMOS-2D Prüfsystem

Für weitergehende Untersuchungen bezüglich der Strukturtreue von LIGA-Strukturen werden mit Hilfe des COSMOS-2D Prüfsystems (Computer System for Measurement of Optically Acquired Structured Surfaces in 2 Dimensions) weitere Messungen durchgeführt. Hierbei wird die Maßhaltigkeit der Absorberstrukturen auf der Arbeitsmaske und des entsprechenden LIGA-Produkts vermessen. Das COSMOS-2D System besteht aus einem computergesteuerten Lichtmikroskop und einem Multiprozessor-Rechner. Durch die Anwendung digitaler Bildverarbeitung und Mustererkennung ist die präzise Vermessung der auf dem Substrat befindlichen Strukturen auch bei ungenauer Positionierung des Substrats möglich. Das System vergleicht vollautomatisch das in einem MCAD¹-System generierte und bemaßte Design mit der erzeugten LIGA-Struktur [73]. Gemessen wird jeweils die Breite einer gemäß CAD-Design 135 μm bzw. 22.5 μm breiten Grabenstruktur, wobei diese Grabenstrukturen mit Hilfe zweier unterschiedlich gefertigter Masken, Maske-A bzw. Maske-B, erzeugt werden.

Maskenherstellung Für die Herstellung der 900 μm hohen LIGA-Strukturen wird eine Arbeitsmaske mit einer 300 μm dicken Berylliummaskenmembran mit 30 μm hohen Goldabsorberstrukturen verwendet. Die Herstellung der Arbeitsmasken erfolgt jeweils mit Hilfe einer Zwischenmaske. Für die Herstellung der Zwischenmaske wird ein ca. 3–4 μm dicker Resist auf einer Titanmembran aufgeschleudert, welcher mit Hilfe eines Elektronenstrahlschreibers strukturiert wird [65]. Die freien Bereiche werden galvanisch mit Gold aufgefüllt und der unbestrahlte Resist wird entfernt. Die Goldabsorber auf der Zwischenmaske haben eine Höhe von etwa 2 μm . Für die Herstellung der Goldabsorberstrukturen von Maske-A werden 40 μm Plexidon² auf das Berylliumblech aufgegossen und nach dem Aushärten mit Hilfe einer Zwischenmaske strukturiert und die freien Bereiche mit Gold aufgefüllt. Die Absorber auf der Maske-B sind durch Strukturierung einer 100 μm dicken Resistplatte und anschließender Goldgalvanik hergestellt worden.

Ziel ist es, die Maßhaltigkeit des Herstellungsprozesses von 900 μm hohen Resiststrukturen aus GS233-Plattenmaterial³ zu überprüfen. Als Probe für die Bestrahlung dient 900 μm dickes GS233-Plattenmaterial, das auf einem Al_2O_3 -Keramiksубstrat aufgeklebt ist. Das Keramiksубstrat ist mit einer 3 μm dicken Ti/TiO_x -Schicht beschichtet, welche als Galvanikstartschicht dient und die Haftung der Strukturen durch Mikroverzahnung auf dem Substrat verbessert [65]. Die Bestrahlung und Entwicklung bei Raumtemperatur erfolgt bei Standardprozessbedingungen. Hierbei sorgt die Entwicklung bei Raumtemperatur für einen höheren Kontrast und eine bessere Haftfestigkeit der LIGA-Struktur auf dem Substrat [70].

Maßabweichungen können bei jedem Prozeßschritt auftreten und müssen für Anwendungen der optischen Nachrichtentechnik mit einer Genauigkeit von besser als 1 μm bekannt sein. Der Videobildschirm des COSMOS-Meßsystems hat 512 \times 512-Pixel. Eine Grabenstruktur mit der Breite von 135 μm wird mit dem Objektiv 10facher Vergrößerung vermessen. Bei einem Bildfeld von 288 μm entspricht dies einer Auflösung von 0.56 μm pro Pixel. Eine 22.5 μm breite Grabenstruktur wird mit dem Objektiv 40facher Vergrößerung vermessen. Bei einem Bildfeld von 72 μm entspricht dies einer Auflösung von 0.14 μm pro Pixel [74].

¹Mechanical CAD, spezielles CAD-System für 2D-Konstruktionen

²Gießharz zur Resistherstellung, PMMA-Material

³Markenname für PMMA-Material, Fa. Röhm [69]

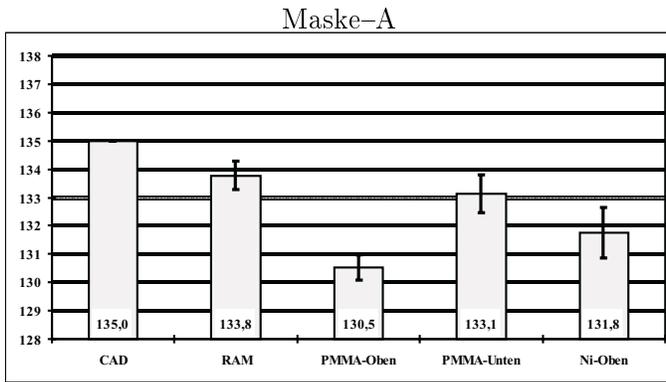


Abbildung 3.11: Mittlere Grabenbreite und Standardabweichung (Fehlerbalken) vom CAD-Design bis zum Produkt (alle Zahlenangaben in μm).

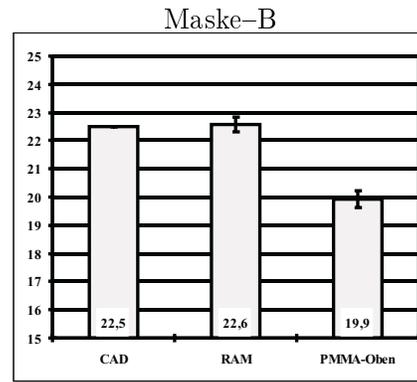


Abbildung 3.12: Mittlere Grabenbreite und Standardabweichung (Fehlerbalken) vom CAD-Design bis zum Produkt (alle Zahlenangaben in μm).

In den Abbildungen 3.11 und 3.12 sind die jeweiligen mittleren Breiten zusammen mit der dazugehörigen Standardabweichung graphisch dargestellt.

Der Wert PMMA-Oben bezeichnet hierbei die Breite der Struktur auf der Resistoberseite und der Wert PMMA-Unten die Breite an der Resistunterseite. Durch Ätzen der Ti/TiO_x-Galvanikstartschicht wird die mit dem Substrat verklebte Resiststruktur abgelöst, so daß die Strukturunterseite vermessen werden kann. Der Wert RAM charakterisiert die Goldabsorberbreite auf der Röntgenarbeitsmaske. Die Breiten der Goldabsorberstrukturen auf den jeweiligen Zwischenmasken sind nicht aufgeführt, da durch ungünstige Kontrastverhältnisse auf den Substratböden der Röntgenzwischenmasken keine korrekte Mustererkennung mit dem COSMOS-2D System möglich ist.

Bei der galvanischen Abscheidung von Nickel kommt es zur Ausbildung eines sogenannten Wanneneffekts [75], d. h. zu einem inhomogenen Wachstum der Galvanik. Die Wachstumshöhe ist abhängig von der jeweiligen Stromdichte, welche durch die Größe und Form der Mikrostruktur selbst und von benachbarten Resist- und Nickelstrukturen bestimmt wird. Ferner wachsen aufgrund der inhomogenen Stromdichteverteilung die Randstrukturen des Designfeldes schneller als in der Mitte, wodurch sich ein wannenförmiges Nickelprofil innerhalb der Designfläche ausbildet. Dies führt zu Schwierigkeiten bei der automatischen Vermessung, da sich die Fokusslage je nach Position der Struktur verändert. Auch eine im Vergleich zu den PMMA-Strukturen größere Oberflächenrauigkeit der Galvanikgrenzschicht reduziert die Meßgenauigkeit. Die Standardabweichung dieser Messung beträgt daher $0,9 \mu\text{m}$, wobei der Wert Ni-Oben die Grabenbreite der galvanisch abgeschiedenen Nickelstruktur kennzeichnet (siehe Abbildung 3.11).

In der Arbeit von A. Müller [14] wird von einer Maßvergrößerung von $1 \mu\text{m}$ pro Kante der Nickelstruktur gegenüber dem CAD-Design berichtet. Die Nickelstruktur wurde hierbei auf einem Metallsubstrat aus Kupfer aufgebaut, um ein Abformwerkzeug herzustellen. Da es sich hierbei nicht um ein keramisches Substrat handelt, sind die Randbedingungen während der Bestrahlung nicht mit denen in dieser Arbeit vergleichbar. Aufgrund unterschiedlicher Wärmeleitungs- und Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Al₂O₃-Keramik ist die Erwärmung und Ausdehnung des Substrats während der Bestrahlung und der Galvanik unterschiedlich, d. h. das Substratmaterial hat ebenfalls einen Einfluß auf die Strukturtreue.

Die innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Messungen zeigen eine Maßreduzierung der im Mittel etwa $700\ \mu\text{m}$ hohen Nickelstrukturen. Die Kante der Nickelstrukturoberseite liegt etwa $1.6\ \mu\text{m}$ hinter der Kante des CAD-Designs und etwa $1\ \mu\text{m}$ hinter der Goldabsorbergrenze der Arbeitsmaske-A (siehe Abbildung 3.11 und Abbildung 3.13).

Auch die $900\ \mu\text{m}$ hohen PMMA-Strukturen zeigen eine Maßreduzierung von $-2.2\ \mu\text{m}$ pro Kante gegenüber dem CAD-Design und $-1.6\ \mu\text{m}$ pro Kante gegenüber der Goldabsorbergrenze auf der Arbeitsmaske-A. Bei der Herstellung von $900\ \mu\text{m}$ hohen PMMA-Strukturen mit der Arbeitsmaske-B wird eine Maßreduzierung von $-1.3\ \mu\text{m}$ pro Kante gegenüber dem CAD-Design und der Goldabsorbergrenze gemessen. Bei dieser Maske stimmen die Maße der Goldabsorber mit dem CAD-Design im Rahmen der Meßgenauigkeit im Gegensatz zur Maske-A sehr gut überein (siehe Abbildung 3.12 und Abbildung 3.14). Die Maßreduzierung der PMMA-Struktur bezüglich der Goldabsorberkante ist in beiden Fällen mit $-1.6\ \mu\text{m}$ (Maske-A) und $-1.3\ \mu\text{m}$ (Maske-B) pro Kante im Rahmen der Meßgenauigkeit gleich groß.

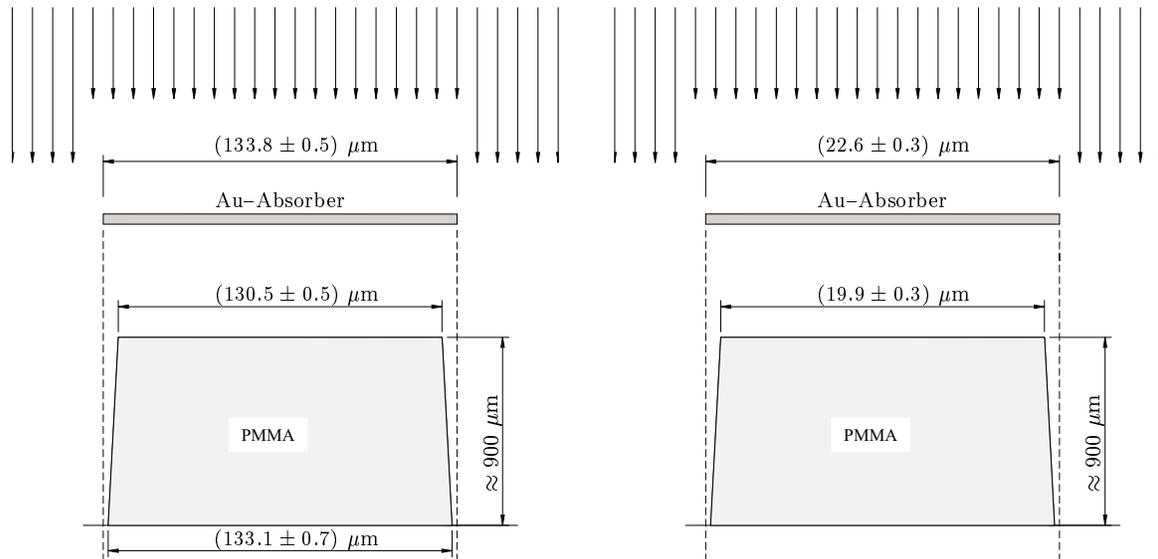


Abbildung 3.13: Maßtoleranzen bei der Herstellung von $900\ \mu\text{m}$ hohen PMMA-Strukturen mit Maske-A.

Abbildung 3.14: Maßtoleranzen bei der Herstellung von $900\ \mu\text{m}$ hohen PMMA-Strukturen mit Maske-B.

Die Unterschiede in den Maßabweichungen der Goldabsorber gegenüber dem CAD-Design sind auf die unterschiedlichen Randbedingungen bei der Herstellung der beiden Arbeitsmasken zurückzuführen. Damit die einmal ermittelten Maßtoleranzen ihre Gültigkeit behalten, müssen alle Masken unter den gleichen Prozeßbedingungen hergestellt werden. Nur so können einmal ermittelte Designvorhalte verwendet werden. Denn selbst geringe Änderungen in der Prozeßführung haben einen Einfluß auf die Strukturtreue der Goldabsorber auf der Arbeitsmaske.

3.4 Aufbau- und Verbindungstechnik

Für die Integration von aktiven Komponenten in eine mikrooptische Bank bedarf es eines Substrats, das über eine gute Wärmeleitfähigkeit verfügt, um die Abwärme beim Betrieb gut abführen zu können. Bei herkömmlichen Technologien geschieht die Integration von aktiven

Komponenten (Photodioden, Laserdioden) durch individuelles Bonden oder durch Reflowlöten⁴ der Gesamtanordnung. Individuelles Löten bedeutet, daß die Chips einzeln durch lokale Erwärmung verlötet werden. Bei Substraten mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit (z. B. Silizium) hat dies den Nachteil, daß sich die Wärme über das gesamte Substrat verteilt und somit zu einer Belastung jeder einzelnen Bondverbindung auf dem Substrat führt. Dies kann zu einem Aufschmelzen des Lötzinns anderer gebondeter Chips führen und damit einen Einfluß auf die vorherige Justage der Komponenten haben. Beim Löten werden ferner Flußmittel eingesetzt. Durch deren Verwendung kann es zu Schwierigkeiten bei der Montage von optischen Komponenten kommen, da es schwierig ist, die optischen Grenzflächen während der Montage sauber zu halten. Des weiteren kommt es durch die Verwendung von Flußmitteln zu einem Schrumpfen während des Lötvorgangs und damit wiederum zu einer Beeinflussung der Positionierung des Bauteils [77].

Bei dem innerhalb dieser Arbeit verwendeten Montagekonzept bestehen diese Nachteile nicht. Durch den Einbau von auf Halteelementen vormontierten aktiven Komponenten in eine mikrooptische Bank wird die thermische Belastung und Verschmutzung durch die Montage mit UV-härtendem Klebstoff und Leitkleber minimiert. Beim Einsatz von mikrooptischen Bänken mit Führungsstrukturen aus Kunststoff muß darauf geachtet werden, daß die Erweichungstemperatur von PMMA bei 80 °C liegt [69]. Die Aushärtung des Leitklebers geschieht unterhalb der Erweichungstemperatur von PMMA bei 70 °C. Hierbei werden keine Dämpfe erzeugt, die sich auf die Grenzflächen der optischen Komponenten niederschlagen und die optische Funktion beeinträchtigen können. Da die Fixierung der mikrooptischen Komponenten bei Temperaturen unterhalb dieser Erweichungstemperatur erfolgt, ist die thermische Belastung der Gesamtanordnung beim Verkleben vernachlässigbar. Durch die Trennung der Herstellung von vormontierten optischen Komponenten und der Montage in die Mikrobank, kann bei der Vormontage auch die etablierte Löttechnik eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.6), ohne die Besonderheiten von Mikrobänken aus Kunststoff berücksichtigen zu müssen.

Montage der Kugellinsen und Glasfasern Um eine Kugellinse mit einem Durchmesser von 900 μm in einer mikrooptischen Bank sicher aufnehmen zu können, beträgt die Resisthöhe der mikrooptischen Bank 500 μm (siehe Abbildung 3.15 und 3.17).

Die Justage der Linse erfolgt mit Punktkontakten. Dies hat den Vorteil, daß die Linse sauber in der dafür vorgesehenen Halterung in der mikrooptischen Bank verklebt werden kann (siehe Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18). Hierbei wird die Linse durch seitliches Applizieren des Klebstoffes (pin-Transfer) fixiert und nicht durch Applizieren eines Klebstofftropfens auf dem Substratboden. Für eine reproduzierbare Positionierung der Kugellinse ist es vorteilhaft, wenn sich zwischen Linse und Substratboden keine Kleberschicht befindet.

Die Montage der Glasfaser mit einem konvex geformten Halteelement (siehe Abbildung 3.16) macht die Justage tolerant gegenüber Partikeln auf dem Substrat, falls solche trotz Reinigung auf dem Substratboden zu liegen kommen. Durch die doppelt konvexe Form entsteht ein Klebekanal, welcher für die Fixierung mit UV-Klebstoff ausgenutzt wird. Ferner kann das konvex geformte Halteelement leichter in die vorgesehene Führungsstruktur eingesetzt werden, als es bei einer rechtwinkligen Form der Fall ist. Weiterhin wird mit dieser Bauform

⁴Das Wiederaufschmelz- oder Reflowlöten ist ein Verfahren zum Löten von oberflächen montierbaren Bauteilen [76].

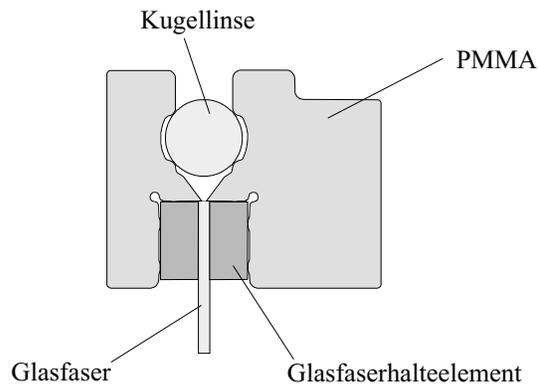


Abbildung 3.15: Eine in einer mikrooptischen Bank passiv montierte Kugellinsen-Faser-Anordnung für die Kollimation des von der Faser abgestrahlten Lichts.

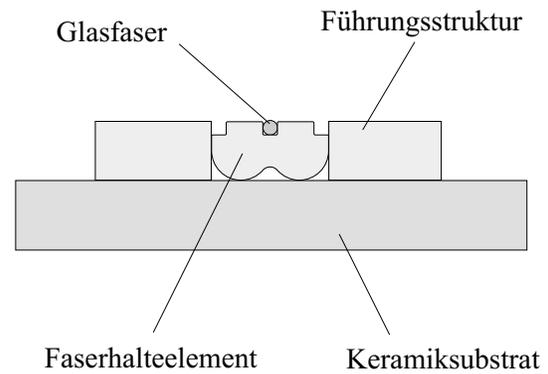


Abbildung 3.16: Passive Montage einer Glasfaser mittels Halteelement in eine mikrooptische LIGA-Bank.

eine schlechte thermische Ankopplung an das Substrat erreicht, wodurch der Einfluß einer thermischen Last auf die positionierten Glasfasern vermindert wird.

Für die Montage von Glasfasern mit Halteelementen sind prinzipiell zwei Vorgehensweisen denkbar. Zum einen kann die Faser in das Faserhalteelement außerhalb der mikrooptischen Bank montiert werden und zum anderen kann erst das Halteelement in die mikrooptische Bank integriert werden, wobei anschließend die Faser in den Fasergraben des sich in der mikrooptischen Bank befindlichen Halteelements eingelegt und mit einem Montagewerkzeug niedergedrückt wird. Die mechanisch vorfixierte Faser wird dann mit einem UV-härtendem Klebstoff dauerhaft fixiert (siehe Abbildung 3.18). Die Position der Faser wird lateral (senkrecht zur optischen Achse) durch das Halteelement bestimmt und axial (entlang der optischen Achse) durch einen auf der mikrooptischen Bank mit PMMA hergestellten Faseranschlag.

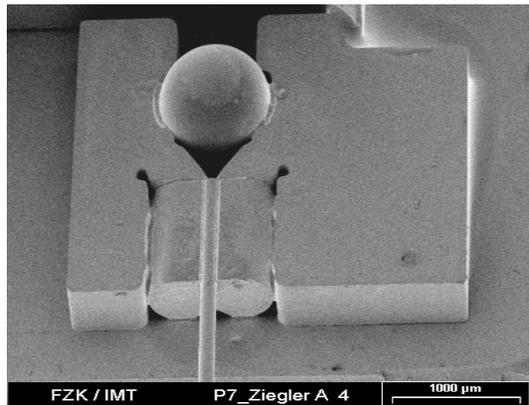


Abbildung 3.17: Passive Montage einer Glasfaser-Kugellinsen-Anordnung in einer mikrooptischen LIGA-Bank.

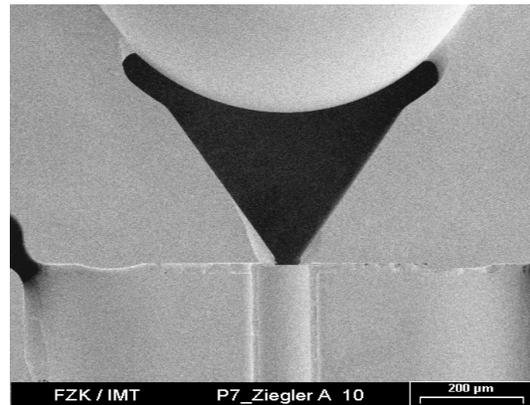


Abbildung 3.18: Detailansicht einer passiv justierten Glasfaser.

Die Vorteile der LIGA-Technik werden an dieser Stelle nochmals besonders deutlich. So kann die Form der Halteelemente und die Form der Faserschächte völlig frei gewählt werden. Auch für die Form der Auflagefläche besteht keine Einschränkung. Die Form unterliegt keinen Designregeln wie sie aus der Siliziumtechnik bekannt sind.

Montage der Photodioden Die Montage der Photodioden geschieht mit Hilfe eines Vakuumgreifers. Die Photodiode (siehe Abbildung 3.19) wird mit diesem Vakuumgreifer aufgenommen und zur Führungsstruktur auf der mikrooptischen Bank gebracht. Das Substrat mit der mikrooptischen Bank wird zuvor relativ zum Montagewerkzeug ausgerichtet. Wie

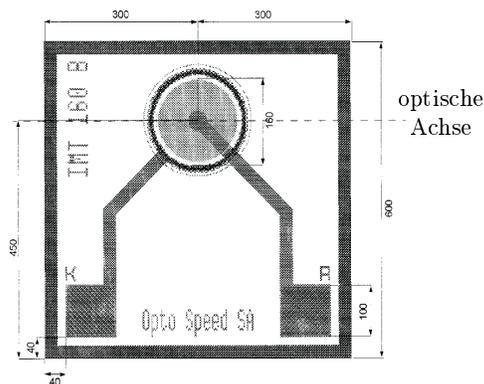


Abbildung 3.19: Skizze der innerhalb der Arbeit verwendeten pin-Photodiode [30].

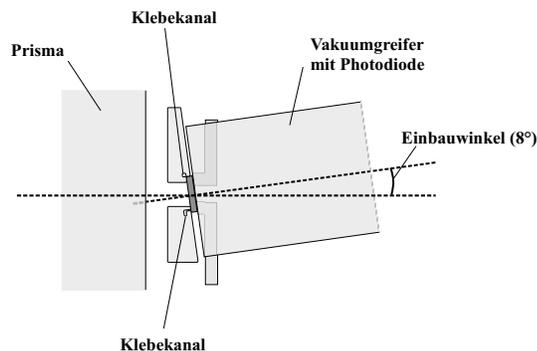


Abbildung 3.20: Montage einer Photodiode auf der mikrooptischen LIGA-Bank.

in Abbildung 3.20 zu sehen ist, wird die Photodiode in Richtung der vom Vakuumgreifer vorgegebenen Längsachse bis zum Anschlag an die Führungsstruktur gefahren. Danach wird das Montagewerkzeug mit der Photodiode senkrecht zu seiner Längsachse verfahren. Nach der passiven Justage wird die Photodiode mit einem UV-härtenden Klebstoff fixiert (siehe Abbildung 3.21). Die Montage der Photodiode wird hierbei mit Hilfe eines Mikroskops verfolgt. Für einen vollständig automatisierten Montageablauf, der im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt wurde, bedarf es eines Montagewerkzeugs, das in allen drei Raumrichtungen kraftsensitiv ist, um die Anschlagposition der Photodiode ohne optische Hilfsmittel detektieren zu können.

Die Resisthöhe bei den verwendeten mikrooptischen LIGA-Bänken beträgt $500 \mu\text{m}$. Untersuchungen zur Scherfestigkeit von $500 \mu\text{m}$ hohen PMMA-Resiststrukturen auf Al_2O_3 -Keramik zeigen Scherfestigkeiten, welche im Bereich von 4 bis $7.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ [78] liegen. Dies ist bei der Auslegung der Montagewerkzeuge berücksichtigt worden, um ein Abscheren der Resiststruktur bei der Montage der mikrooptischen Komponenten zu vermeiden.

Die Photodiode wird mit einem Leitkleber mit den auf dem Substrat befindlichen Goldleiterbahnen elektrisch kontaktiert (siehe Abbildung 3.21 und 3.22). Die Aushärtung erfolgt bei $70 \text{ }^\circ\text{C}$ und damit bei einer Temperatur, welche unterhalb der Erweichungstemperatur von PMMA liegt.

Integration eines Strahlteilers Für die Realisierung von Heterodyn-Empfängern werden Strahlteiler für die Überlagerung zweier Lichtsignale benötigt. Für Anwendungen mit Monomodefasern sind entsprechende Justagetoleranzen einzuhalten.

Wird das aus einer Glasfaser abgestrahlte Licht über einen Strahlteiler in eine zweite Glasfaser eingekoppelt, so sind die Anforderungen an die Justagegenauigkeit größer, als wenn das Licht direkt auf die lichtempfindliche Zone einer Photodiode abgebildet wird.

Am einfachsten wird ein Strahlteiler realisiert, indem ein Glasplättchen mit einer der Anwen-

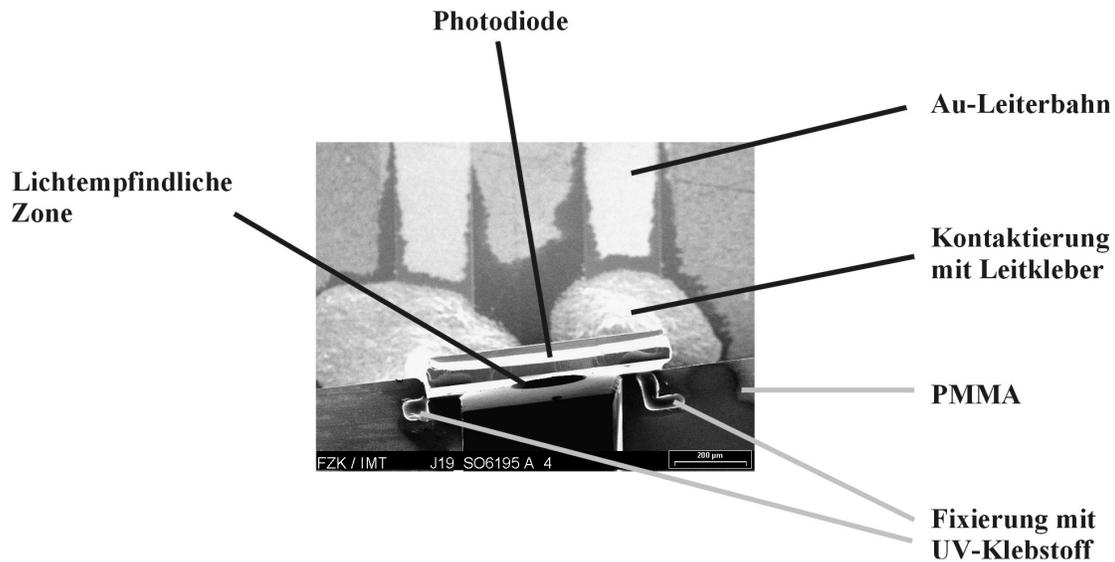


Abbildung 3.21: Passiv auf einer mikrooptischen Bank montierte Photodiode (Rückseite).

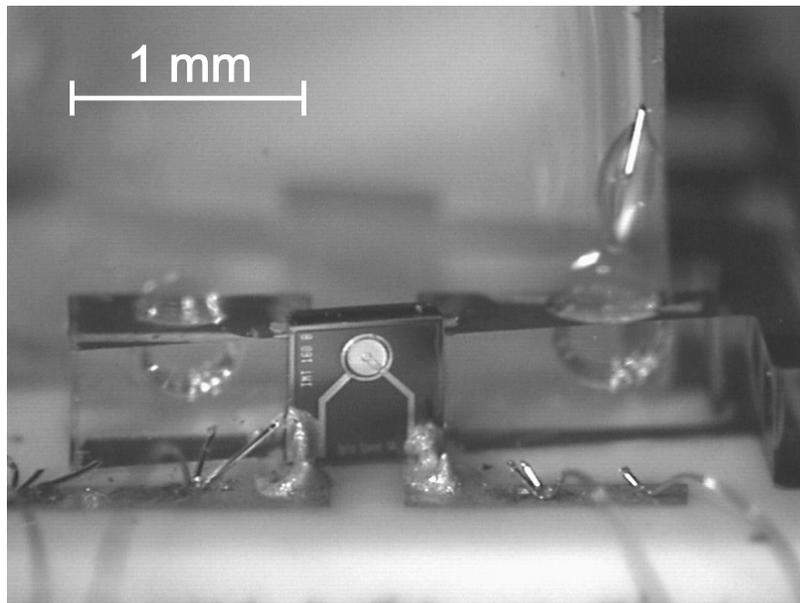


Abbildung 3.22: Passiv auf einer mikrooptischen Bank montierte Photodiode (Vorderseite).

ung entsprechenden optischen Schicht bedampft wird. Hierbei wird die reflektive Schicht durch eine PMMA-Haltestruktur mit der notwendigen Präzision auf der mikrooptischen Bank positioniert (siehe Abbildung 3.23).

Bei einem Einfallswinkel von 45° erfährt der transmittierte Strahl in Abhängigkeit der Dicke d des Glasplättchens (BK7-Glas) einen Strahlversatz von $d \cdot 0.33$ [79]. Die herstellungsbedingten Dickentoleranzen der kommerziell erhältlichen Glasplättchen liegen im Bereich von $100 \mu\text{m}$ [55]. Für den transmittierten Strahl ergeben sich damit Abweichungen im Strahlversatz von bis zu $33 \mu\text{m}$.

Da Toleranzen in der Dicke der Glasplättchen zu Strahlversätzen senkrecht zur optischen Ach-

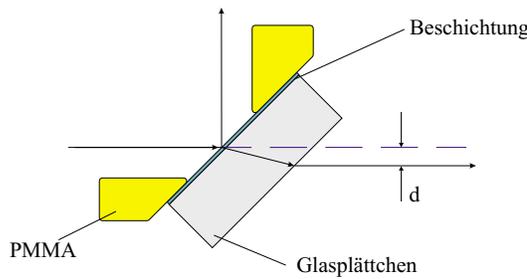


Abbildung 3.23: Zum Einfluß der Dickentoleranz von Glasplättchen auf die Justagetoleranz eines Strahlteilers.

se führen, ist dieses Strahlteilerkonzept mittels Glasplättchen für die Überlagerung innerhalb eines passiven Justagekonzepts nicht uneingeschränkt einsetzbar. Glasplättchen sollten hierbei nur für die Herstellung von Umlenkspiegeln eingesetzt werden. Dies ist ein weiterer Grund dafür, daß die Strahlteiler für den Heterodyn-Empfänger mit Prismen realisiert werden.

Montage der Prismen In Abbildung 3.24 und Abbildung 3.25 ist der Ablauf der Montage der Prismenanordnung auf der mikrooptischen Bank dargestellt. Im ersten Schritt werden die

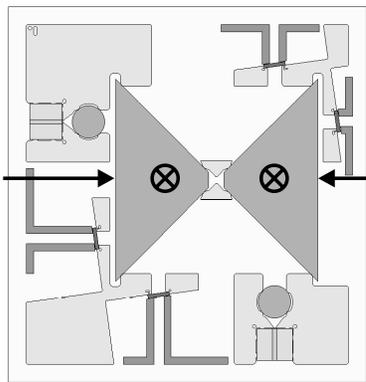


Abbildung 3.24: Montage der auf den Katheten optisch beschichteten Prismen.

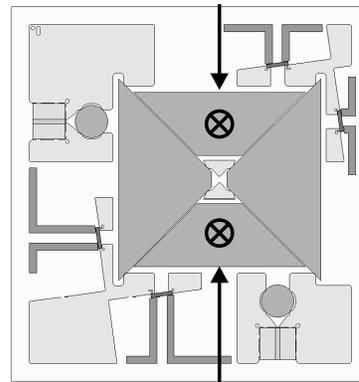


Abbildung 3.25: Montage der kleineren, auf den Katheten unbeschichteten Prismen.

beiden Prismen, welche mit den für den Aufbau eines Heterodyn-Empfängers notwendigen optischen Schichten bedampft sind, nacheinander in die mikrooptische Bank eingesetzt. Die Justage erfolgt mit Hilfe einer entsprechenden Führungsstruktur. Die Prismen werden gegen die Anschläge geschoben und gleichzeitig mit einem Montagewerkzeug auf das Substrat gedrückt. Die Anordnung wird mit einem UV-härtenden Klebstoff fixiert.

In einem zweiten Schritt werden die beiden kleineren Prismen eingesetzt. Bei diesem zweiten Montageschritt dienen die zuvor justierten und fixierten Prismen als Anschlags- bzw. Führungsstruktur. Die kleinen Prismen werden gegen die großen Prismen geschoben. Für die Montage werden auch diese mit einem zweiten Montagewerkzeug auf das Substrat gedrückt. Da die kleinen Prismen punktuell gedrückt werden, zentrieren sich diese selbst. Auf die entsprechenden Stirnflächen wird ein spezieller UV-härtender Kleber aufgetragen, der den gleichen Brechungsindex wie das BK7-Glas der Prismen besitzt. Damit wird die Fixierung der Prismen sichergestellt. Die vollständig bestückte mikrooptische Bank ist in Abbildung 3.26

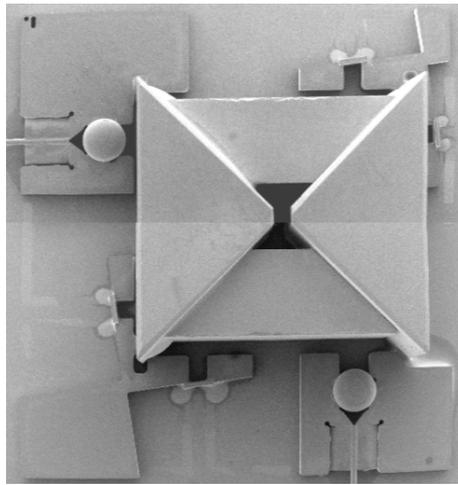


Abbildung 3.26: Heterodyn-Empfänger.

dargestellt.

Hybride Integration des mikrooptischen LIGA-Aufbaus auf einer SMD-Platine

Der LIGA-Aufbau wird auf die auf einer SMD-Platine vorgesehene Massefläche aufgeklebt und durch Drahtbonden elektrisch mit der Auswerteelektronik [80,81] verbunden (siehe Abbildung 3.27). Die Platine wird in das in Abbildung 3.28 dargestellte HF-Gehäuse eingesetzt.

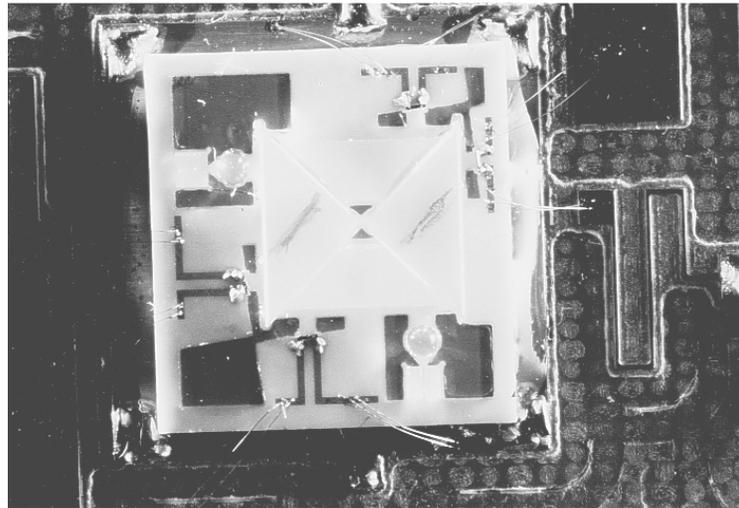


Abbildung 3.27: Heterodyn-Empfänger auf SMD-Platine montiert.

Das hochfrequente Zwischenfrequenzsignal wird jeweils für die beiden Polarisationsrichtungen getrennt mittels einer entsprechenden Durchführung nach außen geführt. Die für die Regelung der jeweiligen Photodioden-Sperrspannungen notwendigen Gleichstromsignale werden durch entsprechende Gehäusedurchführungen mit der SMD-Auswerteschaltung verbunden. Die Einkopplung des Sendesignal- und Lokaloszillatorlichts in den Heterodyn-Empfänger erfolgt mittels zweier Glasfasern. Diese werden ebenfalls durch die Gehäusewand hindurchgeführt, in die auf der mikrooptischen Bank eingesetzten Faserhalteelemente eingelegt und mit UV-härtendem Klebstoff fixiert. Zusätzlich werden die Glasfasern am HF-Gehäuse fixiert und

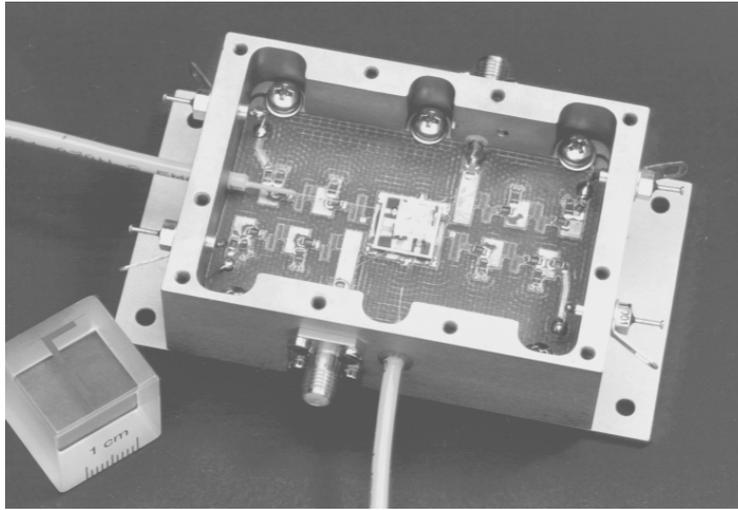


Abbildung 3.28: Komplett montierter Heterodyn-Empfänger.

somit gegen Zug entlastet. Der so innerhalb dieser Arbeit realisierte Heterodyn-Empfänger ist in Abbildung 3.28 dargestellt. In der Mitte ist der mikrooptische Aufbau zu sehen, welcher auf die SMD-Auswerteschaltung aufgeklebt ist. Die mikrooptische Bank hat eine quadratische Geometrie mit einer Kantenlänge von $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. Die Charakterisierung seiner optischen und elektrischen Eigenschaften geschieht in den Abschnitten 4.3, 4.4 und 4.5.

3.5 Justagetoleranzen bei der passiven Justage mit LIGA-Haltelementen

Die Überprüfung der Justagetoleranzen bei der passiven Justage von Monomodefasern mit Hilfe von PMMA-Haltelementen geschieht durch die Analyse eines Faser-Faser-Koppelexperiments.

Koppeffizienzen bei einer Faser-Faser-Kopplung Werden Stirnflächen zweier Monomodefasern in direkten Kontakt gebracht, so wird das Licht der Faser-1 in die Faser-2 eingekoppelt. Sind die beiden Fasern ideal gebrochen, d. h. die Faserstirnflächen verlaufen senkrecht zur optischen Achse, und sind die optischen Achsen zueinander ausgerichtet, so wird bei einem sogenannten Stoßkontakt das Licht verlustlos von Faser-1 in Faser-2 eingekoppelt.

Die Koppeffizienz η zwischen den zwei Monomode-Fasern kann durch die Auswertung des normierten Überlappintegrals

$$\eta = \frac{|\iint E_1 E_2^* dx dy|^2}{\iint E_1 E_1^* dx dy \iint E_2 E_2^* dx dy} \quad (3.1)$$

berechnet werden. Hierbei ist E_1 das Modenfeld der Faser-1 und E_2 das der Faser-2, wobei die beiden Modenfelder jeweils durch den fundamentalen Gaußstrahl (siehe Gleichung 1.2) approximiert werden. Für zwei identische Modenfelder ist die Koppeffizienz $\eta = 1$.

In der Praxis treten jedoch Justagefehler auf. Die drei wichtigsten Justagefehler sind in Abbildung 3.29 (a)–(c) dargestellt.

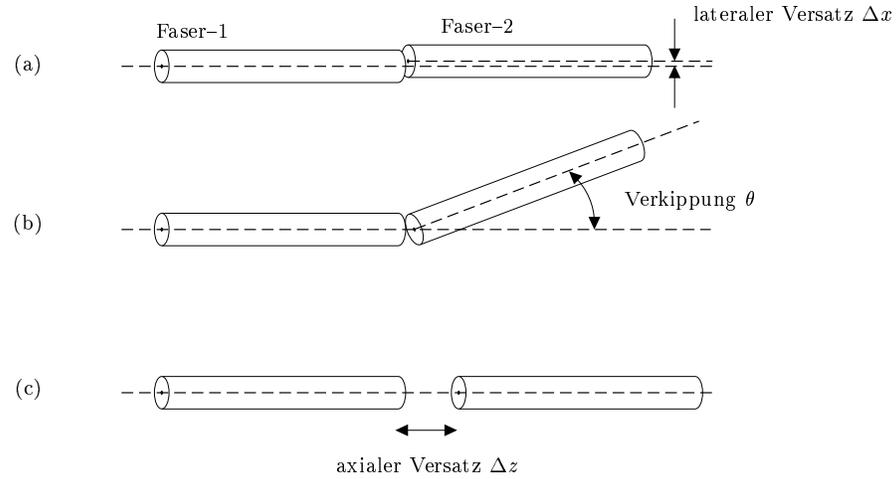


Abbildung 3.29: Drei Verlustfaktoren bei einer Faser-Faser-Kopplung: (a) lateraler Versatz, (b) Verkippung und (c) axialer Versatz.

Die Koppelverluste und damit die Dämpfung $\alpha = -10 \cdot \log_{10}(\eta)$ für zwei Monomode-Fasern mit identischer Strahltaile ω_0 errechnet sich für die drei in Abbildung 3.29 dargestellten Fälle gemäß [82, 83]

$$(a) \quad \alpha(\Delta x) \approx 4.34 \cdot \left(\frac{\Delta x}{\omega_0} \right)^2, \quad (3.2)$$

$$(b) \quad \alpha(\theta) \approx 4.34 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^2 \quad \text{mit} \quad \theta_0 = \frac{\omega_0}{z_r} \quad \text{und} \quad (3.3)$$

$$(c) \quad \alpha(\Delta z) \approx 10 \cdot \log_{10} \left(1 + \left(\frac{\Delta z}{2z_r} \right)^2 \right). \quad (3.4)$$

Die Parameter Δx , θ und Δz sind in Abbildung 3.29 illustriert. Der Parameter Δx charakterisiert den lateralen Versatz, θ die relative Verkippung und Δz den Abstand zwischen den beiden Faserstirnflächen.

Messung der Einkoppeldämpfung Hierbei werden zwei Monomodefasern mit jeweils einem PMMA-Haltelement in einer mikrooptischen Bank entlang der optischen Achse passiv zueinander justiert und die Einkoppeldämpfung gemessen. Die Halteelemente und Fasern werden hierbei nicht mit Kleber fixiert. Die Fasern werden in die Fasergräben der Halteelemente eingelegt und für die Dämpfungsmessung mit einem Montagewerkzeug fixiert. Danach werden die Fasern wieder aus der mikrooptischen Bank entfernt. Nach erneuter Justage und Fixierung wird die Dämpfungsmessung wiederholt. Eine typische Häufigkeitsverteilung der Dämpfungswerte ist in Abbildung 3.30 dargestellt. Die mittlere Dämpfung beträgt hierbei 0.22 dB.

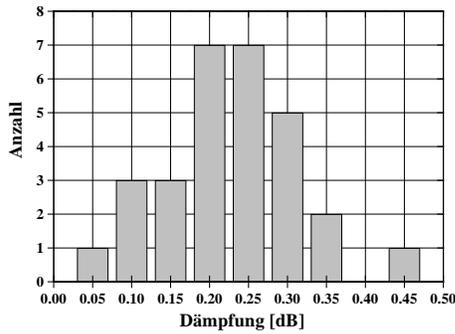


Abbildung 3.30: Typische Häufigkeitsverteilung der Dämpfungswerte einer Faser-Faser-Kopplung mit PMMA-Haltelementen.

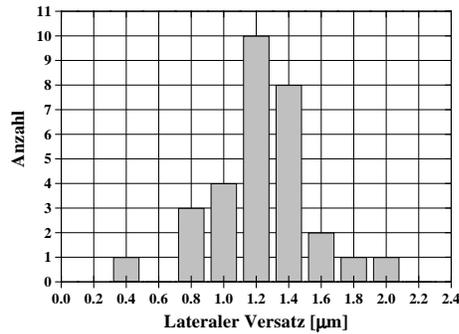


Abbildung 3.31: Typische Häufigkeitsverteilung des lateralen Faserversatzes bei einer Faser-Faser-Kopplung mit PMMA-Haltelementen.

Durch Vergleich der Dämpfungswerte mit den nach den Gleichungen 3.4, 3.3 und 3.2 für die verwendete Standard-Monomodefaser mit einer Strahltaillenweite von $\omega_0 = 5.25 \mu\text{m}$ bei der Wellenlänge von 1550 nm berechneten Koppelkurven (siehe Abbildung 3.32, 3.33 und 3.34) wird die mechanische Dejustage ermittelt.

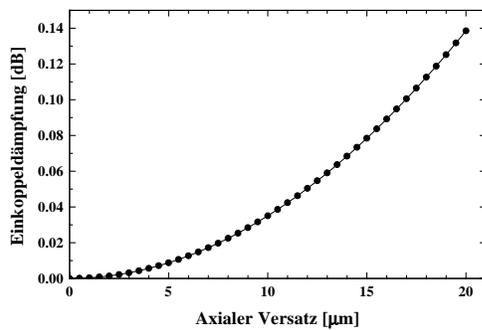


Abbildung 3.32: Einkoppeldämpfung als Funktion eines axialen Faserversatzes.

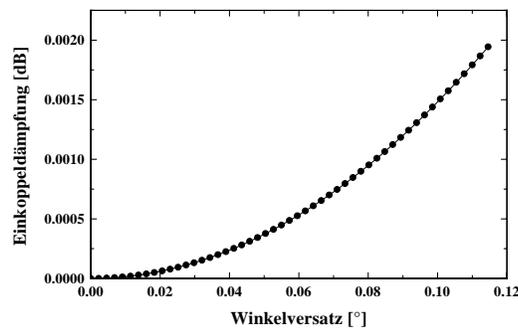


Abbildung 3.33: Einkoppeldämpfung als Funktion der gegenseitigen Verkippung zweier Faserstirflächen.

In Abbildung 3.32 ist die Dämpfung in Abhängigkeit des Abstands der beiden Faserstirflächen aufgetragen und in Abbildung 3.33 als Funktion einer gegenseitigen Verkippung der beiden Faserstirflächen. Da die beiden Faserstirflächen bei einer Stoßkopplung in direktem Kontakt zueinander sind, ist der Abstand entlang der optischen Achse selbst bei nicht idealen Faserstirflächen kleiner als $10 \mu\text{m}$. Dies entspricht einer maximalen Signaldämpfung von 0,02 dB. Eine Verkippung der beiden Faserstirflächen durch eine nicht ideale LIGA-Seitenwand (siehe Abschnitt 3.2 und 3.3) von maximal $2 \text{ mrad} \approx 0.12^\circ$, führt im Extremfall zu einer Signaldämpfung von 0,002 dB. Der axiale und angulare Faserversatz kann aufgrund seines geringen Einflusses auf die Signaldämpfung bei der weiteren Analyse vernachlässigt werden.

Aus Abbildung 3.34 ist zu entnehmen, daß der laterale Faserversatz den größten Einfluß auf die Einkoppeldämpfung hat. So verursacht eine Dejustage von z. B. $2.4 \mu\text{m}$ eine zusätzliche Signaldämpfung von 1 dB.

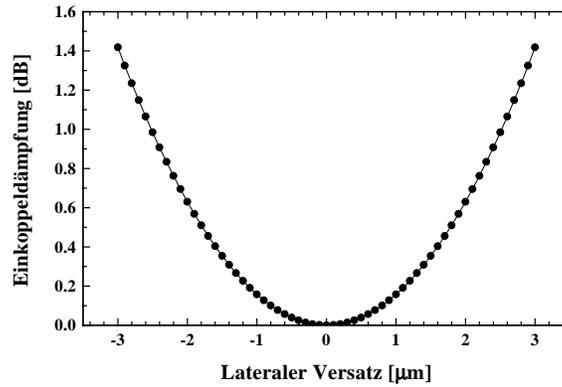


Abbildung 3.34: Einkoppeldämpfung als Funktion eines lateralen Faserversatzes.

Durch direkte Umrechnung des jeweiligen Dämpfungswertes in einen lateralen Faserversatz ergibt sich die in Abbildung 3.31 dargestellte Häufigkeitsverteilung. Im Mittel beträgt der Faserversatz $1,2 \mu\text{m}$. Laut Datenblatt [21] besitzt die verwendete Standard Monomodefaser eine Kernexzentrizität von $e \leq 1 \mu\text{m}$. Damit ist gezeigt, daß bei einer passiven Justage mit PMMA-Haltelementen Justiertoleranzen von weniger als $1 \mu\text{m}$ realisierbar sind.

3.6 Integration von Laserdioden in eine mikrooptische LIGA-Bank

Da eine auf einer mikrooptischen LIGA-Bank integrierte Laserdiode nicht Teil des mikrooptischen Freistrahlaufbaus für den Heterodyn-Empfänger ist, wird diese Aufgabe unabhängig davon bearbeitet. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und aufgebauten Heterodyn-Empfänger wird eine externe Laserdiode als lokaler Oszillator verwendet.

In Abbildung 3.35 ist das Prinzip der passiven Montage von Laserdioden mit Hilfe von metallischen LIGA-Haltelementen dargestellt. Die Laserdiode mit Präzisionskante wird mittels einer mechanischen Anschlagkante auf dem LIGA-Haltelement passiv justiert. Das Laserdiodenhalteelement besitzt im Vergleich zum Faserhalteelement eine große Auflagefläche, um eine gute thermische Ankopplung der Laserdiode zu ermöglichen. Dies ist notwendig, um die beim Betrieb der Laserdiode erzeugte Verlustleistung abführen zu können.

Mit Hilfe dieses Haltelements wird die Laserdiode innerhalb des mikrooptischen Aufbaus positioniert. Die Justage auf der mikrooptischen LIGA-Bank erfolgt wie bei den Faserhalteelementen durch Führungsstrukturen aus PMMA. Das metallische Halteelement dient gleichzeitig der elektrischen Kontaktierung der Laserdiode. Abbildung 3.36 zeigt eine auf einem LIGA-Haltelement montierte Laserdiode. Die Positionierung der Laserdiode auf dem Haltelement mit Hilfe einer Präzisionsanschlagskante ist in Abbildung 3.37 dargestellt.

Montage der Laserdiode Für die Montage der Laserdiode auf dem Haltelement wird auf die Oberfläche des Haltelements zunächst eine etwa $2 \mu\text{m}$ dicke Lotschicht aufgedampft.

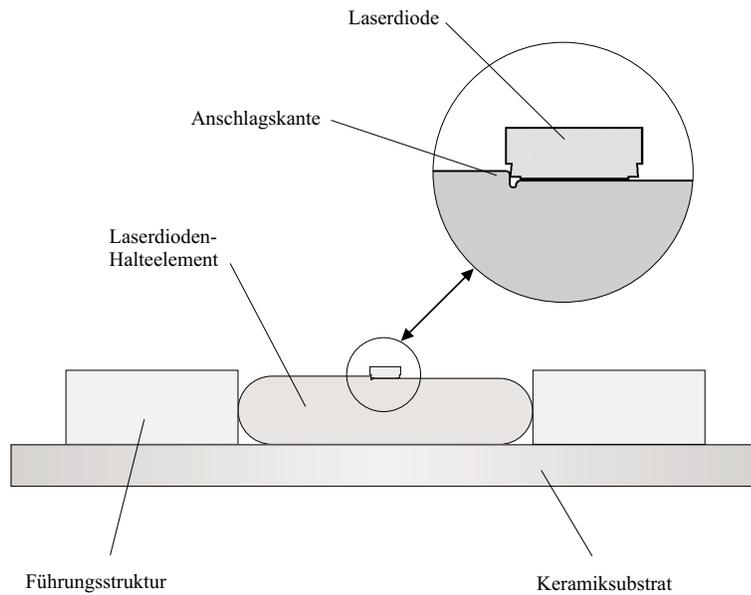


Abbildung 3.35: Prinzip der passiven Justage einer Laserdiode mit einem metallischen LIGA-Haltelement.

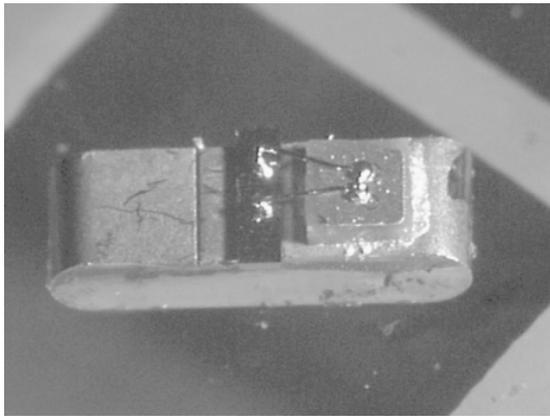


Abbildung 3.36: Laserdiode auf einem metallischen LIGA-Haltelement.

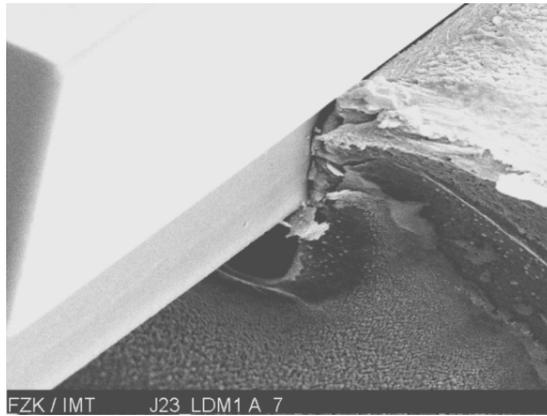


Abbildung 3.37: Justage einer Laserdiode mit einer Anschlagskante auf dem Laserdiodenhalteelement.

Nachdem das Lot aufgeschmolzen wurde, wird die Laserdiode auf das Halteelement gesetzt und die Präzisionskante der Laserdiode an die Anschlagskante geschoben (vgl. Abbildung 3.37). Nach dem Abkühlen ist die Laserdiode fixiert und mit dem Halteelement elektrisch kontaktiert [84].

Abbildung 3.38 zeigt die Integration einer solch kontaktierten Laserdiode in eine mikrooptische LIGA-Bank. Die Laserdiodenoberseite wird durch einen oder mehrere Bonddrähte und die Laserdiodenunterseite mittels Leitkleber mit den sich auf dem Keramiksubstrat befindlichen Bondpads kontaktiert.

Da das Abstrahlverhalten von Laserdioden unter anderem von der Betriebstemperatur abhängt, ist es notwendig für eine optimale thermische Ankopplung der Laserdioden zu sorgen. Zum Vergleich der thermischen Ankopplung einer auf einem kommerziell erhältlichen Laser-

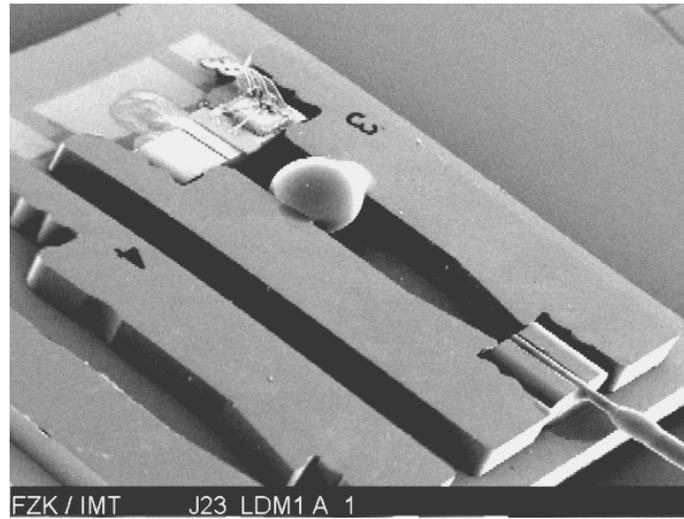


Abbildung 3.38: Hybride Integration einer Laserdiode in eine mikrooptische LIGA-Bank.

diodehalterelement (Kyocera-Mount⁵) mit einer auf einem LIGA-Haltelement montierten Laserdiode werden jeweils die Kennlinien, d. h. die abgestrahlte optische Leistung als Funktion des Injektionsstroms, für verschiedene Betriebstemperaturen aufgenommen. Der Schwellstrom I_{th} , ab der die Laserdiode mit ihrer Lasertätigkeit beginnt, gibt hierbei einen Hinweis auf die Größe des thermischen Widerstands zwischen Laserdiode und Wärmesenke.

Abbildungen 3.39 und 3.40 zeigen die gemessenen Kennlinien für die Laserdiode auf dem Kyocera-Mount und die für die auf einem Nickelhalterelement in eine mikrooptische LIGA-Bank integrierten Laserdiode.

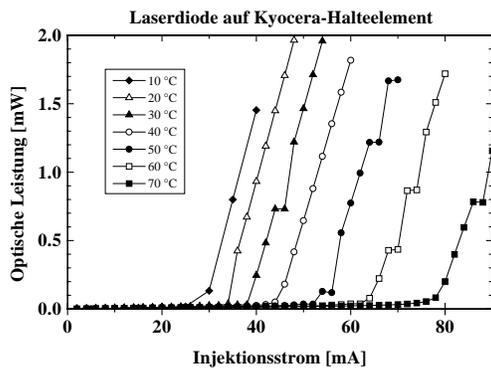


Abbildung 3.39: Kennlinien einer auf einem Kyocera-Haltelement montierten Laserdiode.

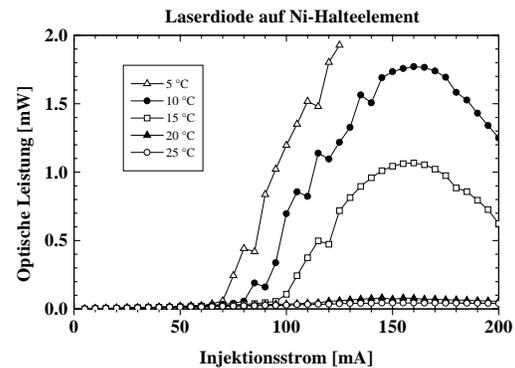


Abbildung 3.40: Kennlinien einer auf einem Nickelhalterelement montierten und in eine mikrooptische LIGA-Bank integrierten Laserdiode.

In Abbildung 3.40 ist zu sehen, daß eine Lasertätigkeit für die Laserdiode auf dem LIGA-Haltelement nur bei entsprechender Kühlung erreicht wird. Dies ist bei der Laserdiode auf dem Kyocera-Haltelement nicht der Fall.

Die Messungen zeigen, daß bei der thermischen Ankopplung von auf Nickelhalterelementen

⁵Kommerziell erhältliches Laserdiodenhalterelement ohne Präzisionsanschlagskante.

montierten Laserdioden noch Probleme bestehen. Kritische Stellen bei der Ankopplung der Laserdiode sind die Übergänge zwischen Substrat und Halteelement und zwischen Halteelement und Laserdiode. In beiden Fällen können Lufteinschlüsse den thermischen Widerstand erhöhen. Für die Sicherstellung einer optimalen thermischen Ankopplung der Laserdioden sind an dieser Stelle weitere Untersuchungen notwendig.

In diesem Zusammenhang sollte auch der Einfluß einer nicht mit dem Halteelement schließig abschließenden Laserdiode auf deren Abstrahlverhalten geklärt werden. Bei Laserdioden, die einige Mikrometer über das Halteelement hinausragen, kann es zu einer starken Erwärmung der Laserstirflächen kommen, wodurch das Abstrahlverhalten unkontrolliert beeinflusst wird [85]. Ferner ist der Einfluß der Aufbau- und Verbindungstechnik auf das Hochfrequenzverhalten zu untersuchen, falls die Laserdiode bei späteren Anwendungen hochfrequent moduliert werden soll. Für die passive Justage der Laserdiode muß eine Justagetoleranz von weniger als $\pm 1 \mu\text{m}$ erreicht werden. Damit diese reproduzierbar erreicht wird, sind auch an dieser Stelle noch umfangreiche Untersuchungen notwendig.

Kapitel 4

Optische und elektrische Charakterisierungen

Für die Charakterisierung des innerhalb dieser Arbeit aufgebauten Heterodyn-Empfängers werden zwei Laserdioden benötigt. Eine Laserdiode dient als Sendelaser und eine als Lokaloszillator. Die Ergebnisse der Charakterisierung der beiden verwendeten DFB-Laserdioden [35] werden in Abschnitt 4.1 dargestellt.

Das in Abschnitt 2.1 dargestellte Heterodyn-Prinzip eignet sich nicht nur für die Realisierung eines optischen Überlagerungsempfängers. Durch Überlagerung zweier kohärenter Lichtsignale können beliebige Zwischenfrequenzen generiert werden. Für die Charakterisierung des Frequenzgangs einer auf einer mikrooptischen Bank kontaktierten Photodiode (siehe Abschnitt 4.2) werden die beiden in Abschnitt 4.1 charakterisierten DFB-Laserdioden verwendet, um ein in der Frequenz moduliertes Photostromsignal zu erzeugen.

Bei dem innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfänger wird das Überlagerungssignal mit einer Gegentaktanordnung (siehe Abschnitt 2.3) detektiert. Hierzu bedarf es eines Strahlteilers, welcher die zu überlagernden optischen Leistungen im Verhältnis 50:50 aufteilt und überlagert. In Abschnitt 4.3 wird das Ergebnis der Vermessung des Teilungsverhältnisses als Funktion der Wellenlänge dargestellt.

Beim Betrieb einer mikrooptischen Komponente innerhalb eines optischen Netzwerks ist darauf zu achten, daß wenig Licht in das optische Netzwerk zurück zum Sendelaser reflektiert wird, da das zurückreflektierte Licht die Abstrahlcharakteristik der Sendelaserdiode beeinflussen kann. Die orts aufgelöste Charakterisierung der vom Heterodyn-Empfänger verursachten Rückreflexe erfolgt interferometrisch. Das hierzu eingesetzte Meßverfahren ist in Abschnitt 4.4 zusammen mit den Meßergebnissen dargestellt. Die orts aufgelöste Charakterisierung hat den Vorteil, daß der Entstehungsort der Rückreflexe lokalisiert wird.

In Abschnitt 4.5 sind die Ergebnisse der elektrischen Charakterisierung des innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfängers dargestellt. Die beiden in Abschnitt 4.1 charakterisierten DFB-Laserdioden werden als Sendelaser und Lokallaser eingesetzt. Das generierte Zwischenfrequenzsignal wird mit der für die jeweilige Polarisationsrichtung vorgesehenen Gegentaktanordnung detektiert. Zusammen mit der durch Überlagerung erzeugten Intensitätsverteilung an der Position der Photodiode wird gezeigt, daß die LIGA-Haltestrukturen

die Position der optischen Komponenten durch passive Justage sicherstellen.

4.1 DFB–Laserdioden

Für die Erzeugung einer schmalbandigen Zwischenfrequenz wird das Licht zweier DFB–Laserdioden [35] überlagert. Um ein stabiles Zwischenfrequenzsignal zu generieren, muß die Betriebstemperatur der beiden DFB–Laserdioden im Millikelvinbereich stabilisiert werden. Dies wird erreicht, indem die Laserdiodenmodule in ein zusätzliches temperaturstabilisiertes Kupfergehäuse eingesetzt werden. In Abbildung 4.1 ist der innere Aufbau des modifizierten DFB–Lasermoduls zu sehen.

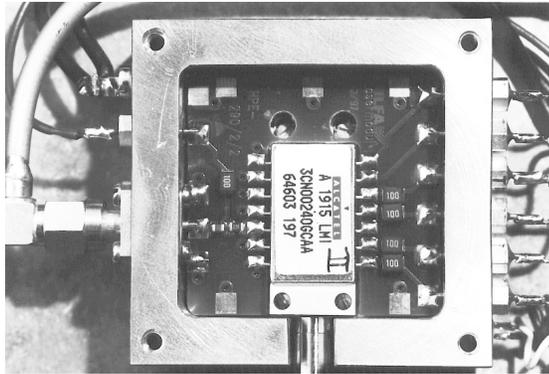


Abbildung 4.1: Aufbau des DFB–Lasermoduls.

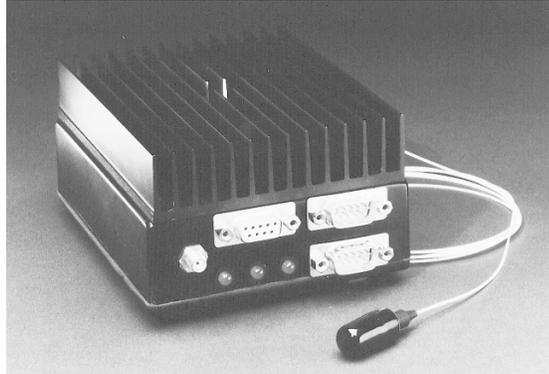


Abbildung 4.2: Gesamtansicht DFB–Lasermodul.

Die elektrische Anbindung des Lasermoduls erfolgt mit Hilfe einer SMD–Platine, welche eine Aussparung hat, in der das Gehäuse der DFB–Laserdiode [35] eingehängt wird. Die Unterseite des DFB–Laserdiodenmoduls ist mit dem Kupfergehäuse verschraubt.

Das Kupfergehäuse hat entsprechende Durchführungen für die optische und elektrische Anbindung und sitzt auf einem separaten Peltierelement. Die Gehäusetemperatur wird mit einem Temperatursfühler (AD590), der in die Gehäusewand eingelassen ist, kontrolliert.

Für die hochfrequente Modulation der Laserdiode befindet sich auf der SMD–Platine ein elektrisches Netzwerk. Der hierbei realisierte Aufbau gestattet eine Modulation der Laserdiode bis zu einer Modulationsfrequenz von etwa 2 GHz [86].

In Abbildung 4.2 ist die Gesamtansicht eines derart modifizierten Lasermoduls dargestellt. Auf der Vorderseite befinden sich ein Anschluß für die Ansteuerung des Laserdiodenstroms und die beiden Anschlüsse für die beiden Temperaturregelkreise: einen für die Temperaturregelung des Kupfergehäuses, und einen für die interne Temperaturregelung des eigentlichen DFB–Lasermoduls.

Die Temperatur des Kupfergehäuses wird mit der Temperaturregelung des Laserdioden-ansteuergerätes LDC1000 (Fa. Profile) eingestellt. Für die interne Temperaturregelung wurde von der Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik des Forschungszentrums Karlsruhe (kurz HPE) eine separate Temperaturregelung entwickelt, welche die Betriebstemperatur der Laserdiode auf ± 1 mK stabilisiert [86]. Die interne Temperaturkontrolle erfolgt hierbei mit einem Thermistor ($R_0 = 10$ k Ω bei 25 °C), welcher eine Temperrauflösung im

Millikelvinbereich ermöglicht.

Die Charakterisierung der von einer DFB-Laserdiode abgestrahlten Wellenlänge als Funktion der Temperatur und des Injektionsstromes erfolgt mit Hilfe eines Wellenlängenmeßgeräts (HP86120B [87]). Hierbei wird der Strom und die Temperatur mit dem Laserdiodenansteuergerät LDC1000 (Fa. Profile) variiert und die jeweils emittierte Wellenlänge gemessen. Das Wellenlängenmeßgerät hat eine Auflösung von 0.001 nm im Meßbereich von 700 nm bis 1650 nm.

Die Temperatur wird für die Messung im Bereich von 10...38 °C und der Injektionsstrom im Bereich von 14...70 mA variiert. Die Kennlinien für die Abhängigkeit der emittierten Wellenlänge vom Injektionsstrom und der Betriebstemperatur sind in den Abbildungen 4.3 und 4.4 dargestellt.

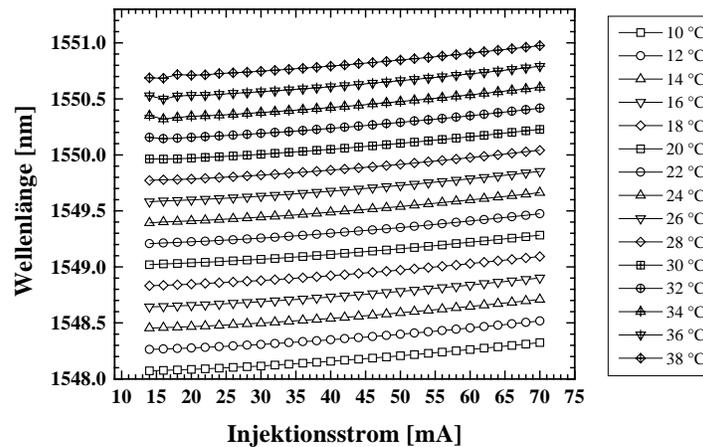


Abbildung 4.3: Lasermodul I – Wellenlänge als Funktion des Injektionsstroms für verschiedene Betriebstemperaturen. Das verwendete Wellenlängenmeßgerät (HP86120B) hat eine Auflösung von 0.001 nm.

Aus diesen Kurven erhält man durch eine nichtlineare Regression die mit Gleichung 1.16 eingeführten Koeffizienten Λ_1 , Λ_2 und Λ_3 , welche die Abhängigkeit der emittierten Wellenlänge vom Injektionsstrom und der Betriebstemperatur charakterisieren. In Tabelle 4.1 sind die für die beiden Lasermodule ermittelten Koeffizienten aufgeführt.

Beim heterodynem Empfang sind die Wellenlängen der einzelnen Übertragungskanäle fest-

Lasermodule	λ_0 [nm]	Λ_1 [$\frac{\text{nm}}{\text{mA}}$]	Λ_2 [$\frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}$]	Λ_3 [$\frac{\text{nm}}{\text{mA } ^\circ\text{C}}$]
I	1547.057	0.00438	0.09357	0.00002
II	1547.117	0.00514	0.09315	0.00002

Tabelle 4.1: Koeffizienten Λ_1 , Λ_2 und Λ_3 für die beiden Lasermodule I und II.

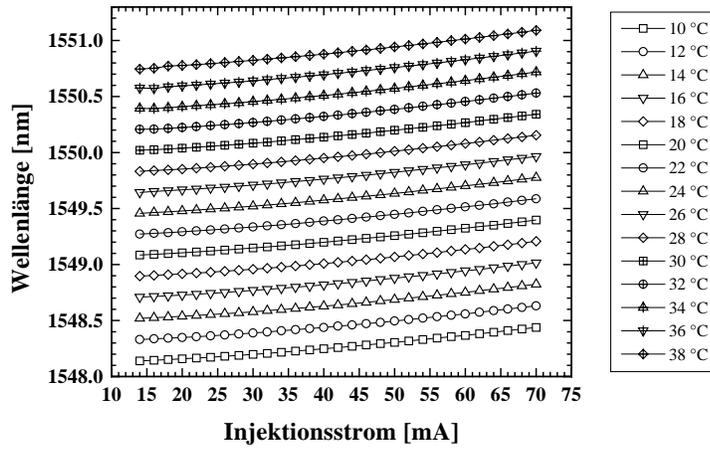


Abbildung 4.4: Lasermodul II – Wellenlänge als Funktion des Injektionsstroms für verschiedene Betriebstemperaturen. Das verwendete Wellenlängenmeßgerät (HP86120B) hat eine Auflösung von 0.001 nm.

gelegt. Zum selektiven Empfang eines Übertragungskanals wird die Wellenlänge der lokalen Laserdiode durchgestimmt bis die durch die Auswertelektronik festgelegte Zwischenfrequenz eingestellt ist. Mit Hilfe der Koeffizienten Λ_1 , Λ_2 und Λ_3 läßt sich die Abhängigkeit der Zwischenfrequenz vom Injektionsstrom und der Betriebstemperatur der lokalen Laserdiode bestimmen.

Einfluß einer Temperatur- oder Stromänderung auf die Zwischenfrequenz

Um den Einfluß einer Temperatur- oder Stromänderung auf die erzeugte Zwischenfrequenz zu ermitteln, werden die folgenden Betrachtungen angestellt. Dabei wird angenommen, daß der Sendelaser eine konstante Lichtleistung bei der Wellenlänge $\lambda_S = 1550$ nm emittiert. Die Zwischenfrequenz $\Delta\nu$ wird durch die Differenzfrequenz zwischen Signal- und LO-Frequenz bestimmt. Rechnerisch erhält man diese über die Differenzwellenlänge $\Delta\lambda(I, T) = \lambda_S - \lambda_{LO}(I, T)$, wobei λ_S die konstante Signalwellenlänge und $\lambda_{LO}(I, T)$ die Wellenlänge des lokalen Oszillators ist, d.h.

$$\Delta\nu(I, T) \approx -\frac{c_0}{\lambda_0^2} \Delta\lambda(I, T) \quad (4.1)$$

mit $\lambda_0 = 1550$ nm, da die folgenden Betrachtungen zur Zwischenfrequenzänderung in der Umgebung dieser Wellenlänge angestellt werden. Für die Erzeugung einer festen Zwischenfrequenz von z. B. 750 MHz sind die folgenden beiden Vorgehensweisen möglich.

- **Konstanter Injektionsstrom:** Hierbei wird die lokale Laserdiode (Lasermodul I) mit einem konstanten Injektionsstrom $I_0 = 40$ mA betrieben, was zu einer optischen Ausgangsleistung von $P_{out} = 3$ mW führt. Die hierdurch berechneten Zwischenfrequenzen sind im Bereich $T = 29.25 \dots 29.32$ °C in Abbildung 4.5 aufgetragen. Die Funktion $\lambda_{LO}(I, T)$ wird hierbei mit Hilfe der in Tabelle 4.1 aufgeführten Koeffizienten beschrieben. Die Zwischenfrequenz von 750 MHz wird in diesem Fall bei der Betriebstemperatur

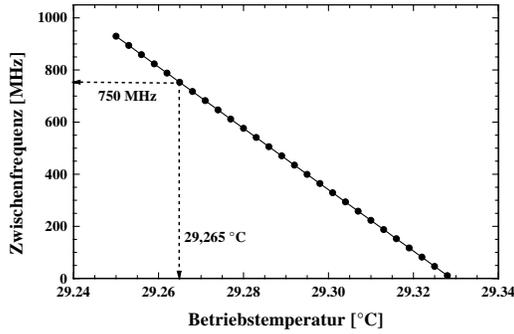


Abbildung 4.5: Zwischenfrequenz als Funktion der Betriebstemperatur der lokalen Laserdiode: $I_0 = 40$ mA.

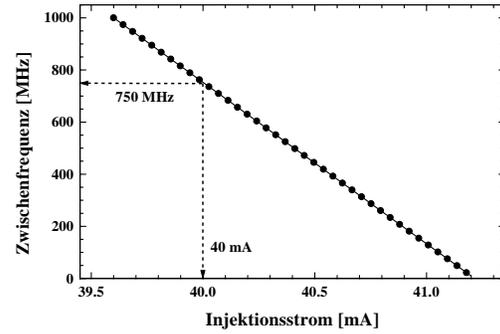


Abbildung 4.6: Zwischenfrequenz als Funktion des Injektionsstroms der lokalen Laserdiode: $T = 29.265$ °C.

von 29.265 °C erzeugt. Eine lineare Regression durch die hierbei erzeugte Abhängigkeit der Zwischenfrequenz von der Betriebstemperatur des Lasermoduls I liefert den Koeffizienten $\kappa_T = -11.8 \frac{\text{MHz}}{\text{mK}}$. Der Koeffizient κ_T beschreibt die Zwischenfrequenzänderung bei einer Änderung der Betriebstemperatur ($\Delta\nu = \kappa_T \Delta T$).

- **Konstante Betriebstemperatur:** Hierbei wird die lokale Laserdiode z. B. bei einer konstanten Betriebstemperatur von $T = 29.265$ °C betrieben, was zu einer optischen Ausgangsleistung von $P_{out} = 3$ mW führt. Die Zwischenfrequenz von 750 MHz wird in diesem Fall bei einem Injektionsstrom von 40 mA erzeugt. Eine lineare Regression durch die in Abbildung 4.6 dargestellte Abhängigkeit, ergibt den Koeffizient $\kappa_I = -0.62 \frac{\text{MHz}}{\mu\text{A}}$. Der Koeffizient κ_I beschreibt die Zwischenfrequenzänderung bei einer Änderung des Injektionsstroms ($\Delta\nu = \kappa_I \Delta I$).

Vergleich der beiden Lasermodule: Werden die gleichen Betrachtungen für den Fall angestellt, daß das Lasermodul II als lokaler Oszillator eingesetzt wird, dann erhält man die in Tabelle 4.2 aufgeführten Koeffizienten κ_T und κ_I .

Lasermodul	κ_T	κ_I
I	$-11.8 \frac{\text{MHz}}{\text{mK}}$	$-0.62 \frac{\text{MHz}}{\mu\text{A}}$
II	$-11.7 \frac{\text{MHz}}{\text{mK}}$	$-0.71 \frac{\text{MHz}}{\mu\text{A}}$

Tabelle 4.2: Koeffizienten κ_T und κ_I für die beiden Lasermodule I und II.

Da durch eine Temperaturänderung die Zwischenfrequenz leicht innerhalb eines großen Frequenzbereichs verändert werden kann, wird die Betriebstemperatur dazu benutzt, die abgestrahlte Frequenz der lokalen Laserdiode in den Frequenzbereich des gewünschten Übertragungskanalns zu schieben.

Durch Modulation des Injektionsstroms der Sendelaserdiode können Daten mit dem FSK-Format (siehe Abschnitt 2.1) übertragen werden, da hierdurch die von der Laserdiode abgestrahlte Frequenz hochfrequent moduliert werden kann.

Empfindlichkeit der Temperaturregelung Bei dem speziell für die Stabilisierung der Laserdiodenbetriebstemperatur aufgebauten Temperaturregelung wird die Solltemperatur durch ein externes Spannungssignal am Eingang der Temperaturregelung eingestellt (Koeffizient: $200 \frac{\text{mV}}{\text{°C}} \equiv 5 \frac{\text{mK}}{\text{mV}}$ [86]). Als Grundeinstellung sind zwei Temperatursollstellungen (25 °C und 27 °C) einstellbar.

Durch die periodische Änderung der Solltemperatur beim Anlegen eines periodischen Spannungssignals kann die durch Überlagerung erzeugte Zwischenfrequenz ebenfalls periodisch verändert werden.

4.2 pin-Photodioden

Die Charakterisierung einer mit Leitkleber auf einer mikrooptischen LIGA-Bank kontaktierten Photodiode geschieht, indem ein Zwischenfrequenzsignal im Frequenzbereich von 10 MHz bis 2.8 GHz erzeugt und detektiert wird.

Der Vorteil bei der Vermessung der elektrischen Bandbreite mit Hilfe eines durch Überlagerung erzeugten Zwischenfrequenzsignals liegt darin, daß die Messung nicht durch den Frequenzgang, den das Lasermodul im Falle einer direkten Amplitudenmodulation hat, überlagert wird. Durch optische Überlagerung kann mit Hilfe der beiden DFB-Lasermodule I und II eine beliebige Zwischenfrequenz erzeugt werden, deren Amplitude nicht durch den Frequenzgang eines elektrischen Netzwerks beeinflusst wird.

Abbildung 4.7 zeigt den hierfür notwendigen Meßaufbau. Das Licht der beiden DFB-Lasermodule wird mit Hilfe eines 3 dB-Kopplers überlagert, wobei das Überlagerungssignal mit der zu vermessenden Photodiode detektiert wird. Gleichzeitig kann mit Hilfe eines Wellenlängenmeßgeräts im Rahmen der Meßgenauigkeit kontrolliert werden, ob die Emissionswellenlängen der beiden Laserdioden auch spektral nahe genug beieinander liegen.

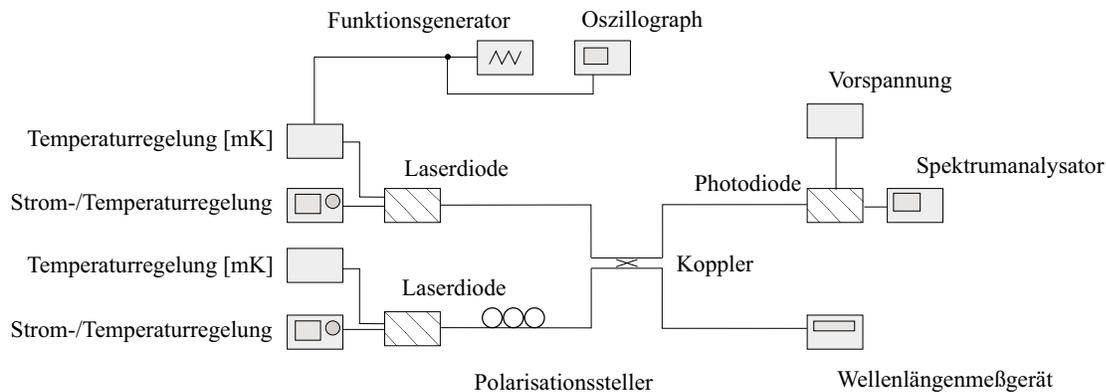


Abbildung 4.7: Meßaufbau zur Charakterisierung der elektrischen Bandbreite der Photodiode: $U_R = 2.5 \text{ V}$.

Mit Hilfe eines Polarisationsstellers wird das Zwischenfrequenzsignal maximiert, indem die Polarisationsrichtungen der beiden Signale zur Deckung gebracht werden.

Durch Anlegen einer sich periodisch ändernden Spannung (Frequenz ≈ 0.1 Hz) an die Temperaturregelung einer DFB-Laserdiode wird die emittierte Wellenlänge geändert. Damit ändert sich die Zwischenfrequenz periodisch im Bereich von 10 MHz bis 2.8 GHz. Der mit der Zwischenfrequenz modulierte Photostrom wird mit einem Spektrumanalysator (HP8563A [88]) detektiert.

Abbildung 4.8 zeigt als Beispiel das durch Überlagerung erzeugte Zwischenfrequenzsignal mit einer Amplitude¹ von -23 dBm bei einer Mittenfrequenz von etwa 2.1 GHz.

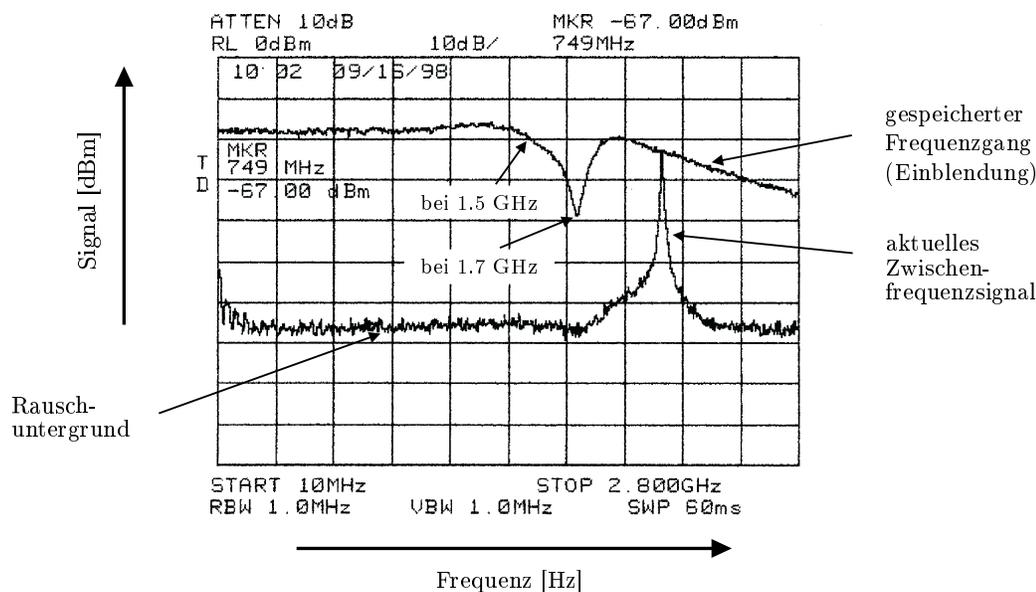


Abbildung 4.8: Elektrischer Signalpegel als Funktion der Zwischenfrequenz.

Für die Charakterisierung des Frequenzgangs der mit Leitleber kontaktierten Photodiode wird die maximale Amplitude des Zwischenfrequenzsignals im Spektrumanalysator gespeichert und zusammen mit dem aktuellen Zwischenfrequenzsignal angezeigt (siehe Abbildung 4.8).

Zwischen 10 MHz und 1.4 GHz zeigt die maximale Zwischenfrequenzamplitude einen nahezu gleichförmigen Verlauf. In diesem Frequenzbereich werden Zwischenfrequenzen mit einer Amplitude von etwa -18 dBm gemessen. Die in Abbildung 4.8 dargestellte Messung zeigt ferner einen Rauschuntergrund von etwa -67 dBm. Unter der Annahme, daß die gemessene Signalleistung verlustlos mit dem Spektrumanalysator detektiert wird, entspricht dies bei einer 50Ω -Leitung einer Photostromamplitude von etwa 0.5 mA und einem Rauschsignal im Photostrom von etwa $2 \mu\text{A}$.

Der Verlauf der maximalen Zwischenfrequenzamplitude als Funktion der eingestellten Zwischenfrequenz (siehe Abbildung 4.8) zeigt einen Einbruch bei etwa 1.7 GHz auf -39 dBm. Die maximale elektrische Bandbreite der Photodiode ist mit 1.8 GHz spezifiziert (siehe Ta-

¹Leistungen werden wie Dämpfungen häufig innerhalb der Dezibelskala spezifiziert:
 $P [\text{dBm}] = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right)$. Eine Leistung von 1 mW entspricht innerhalb dieser Skala 0 dBm.

belle A.2). Die Messung zeigt, daß diese mit Leitkleber auf der mikrooptischen LIGA-Bank kontaktierte Photodiode (siehe Abbildung 3.21 und 3.22) für Frequenzen bis etwa 1.5 GHz eingesetzt werden kann. Damit ist gezeigt, daß die Kontaktierung der Photodioden mit Leitkleber für Anwendungen in diesem Frequenzbereich möglich ist und eine Alternative zur herkömmlichen Löttechnik darstellt.

4.3 Strahlteilereigenschaften

Die Charakterisierung der optischen Strahlteilereigenschaften des Heterodyn-Empfängermoduls erfolgt mit dem in Abbildung 4.9 skizzierten Messaufbau.

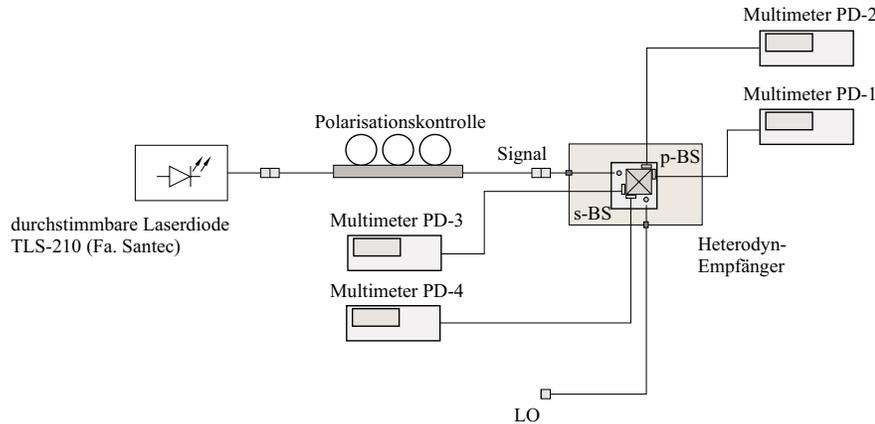


Abbildung 4.9: Meßaufbau zur Bestimmung der Teilungsverhältnisse.

Licht einer durchstimmbaren Laserdiode TLS-210 der Firma Santec [89] wird am Signaleingang in den Heterodyn-Empfänger eingekoppelt. Dieser Aufbau ermöglicht die Vermessung der Strahlteilereigenschaften im Wellenlängenbereich von 1500 bis 1580 nm. Das Licht der durchstimmbaren Laserdiode wird durch den vorgeschalteten Polarisationsstrahlteiler je nach Polarisationslage zum s- oder p-Strahlteiler reflektiert oder transmittiert. Mit Hilfe eines Polarisationsstellers wird die Polarisationslage so eingestellt, daß die zur Messung zur Verfügung stehende Lichtleistung zum zu vermessenden Strahlteiler gelangt. Das Teilungsverhältnis der jeweiligen Gegentaktanordnung und damit das Teilungsverhältnis des entsprechenden Strahlteilers wird bestimmt, indem jeweils die Photoströme der beiden Photodioden mit einem Multimeter als Funktion der Wellenlänge gemessen werden.

Abbildung 4.10 zeigt den Verlauf der Transmission und Reflektivität des p-Strahlteilers als Funktion der Wellenlänge und Abbildung 4.11 entsprechend für den s-Strahlteiler.

Der Verlauf der Transmission und Reflektivität des p-Strahlteilers stimmt im Rahmen der Meßgenauigkeit mit den in Abbildung 4.12 dargestellten Simulationsergebnissen überein. Der Verlauf der Transmission und Reflektivität des s-Strahlteilers weicht etwas von den in Abbildung 4.13 dargestellten Simulationsergebnissen ab. Der Strahlteiler erfüllt trotzdem die vom Hersteller zugesagte Spezifikation von $T = 50 \% \pm 5 \%$ bei der Wellenlänge von 1550 nm. Die Abweichungen zwischen Messung und Simulation lassen sich auf Abweichungen bei der Herstellung der optischen Beschichtung zurückführen.

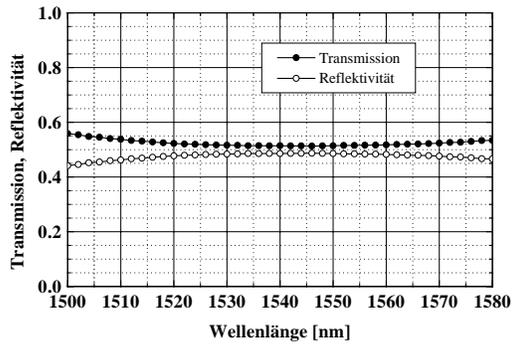


Abbildung 4.10: Gemessene Wellenlängenabhängigkeit der Transmission und Reflektivität des p-Strahlteilers.

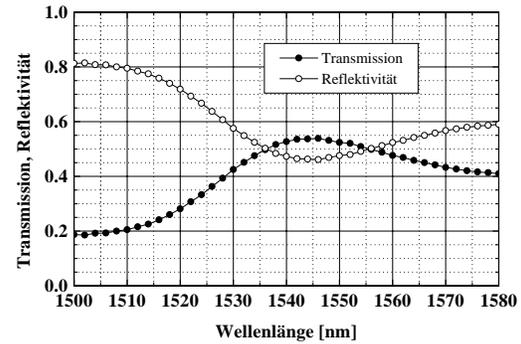


Abbildung 4.11: Gemessene Wellenlängenabhängigkeit der Transmission und Reflektivität des s-Strahlteilers.

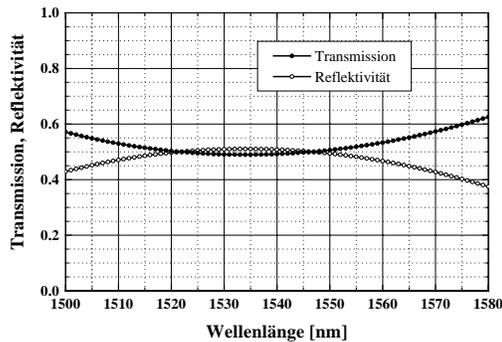


Abbildung 4.12: p-Strahlteiler: Transmission und Reflektivität als Funktion der Wellenlänge für p-polarisiertes Licht (Ausschnitt von den in Abbildung 2.13 dargestellten Simulationsergebnissen).

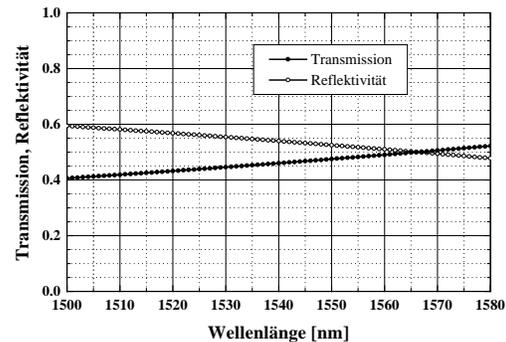


Abbildung 4.13: s-Strahlteiler: Transmission und Reflektivität als Funktion der Wellenlänge für s-polarisiertes Licht (Ausschnitt von den in Abbildung 2.14 dargestellten Simulationsergebnissen).

In Tabelle 4.3 sind die für die einzelnen Strahlteiler verwendbaren Wellenlängenbereiche aufgelistet. Der verwendbare Wellenlängenbereich des Heterodyn-Empfängermoduls wird durch den s-Strahlteiler bestimmt und liegt im Bereich von 1532 bis 1566 nm.

Strahlteiler	Wellenlängenbereich [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
s-BS	1532 ... 1566	34
p-BS	1504 ... 1580	76

Tabelle 4.3: Verwendbarer Spektralbereich der Strahlteiler ($T = 50 \% \pm 5 \%$).

4.4 Rückreflexe innerhalb des Empfängermoduls

Bei kohärent-optischen Systemen ist neben der elektrischen und optischen Bandbreite auch die Rückflußdämpfung eine wichtige Kenngröße. Die Rückflußdämpfung (RL, return loss)

$$RL \text{ [dB]} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{refl}}}{P_0} \right) \quad (4.2)$$

charakterisiert hierbei den Anteil P_{refl} , der von der geführten Gesamtlichtintensität P_0 durch Reflexion an optischen Streuzentren wieder zurück zur ursprünglichen Lichtquelle reflektiert wird. Da P_{refl}/P_0 gerade mit der Reflektivität $R \text{ [dB]} = 10 \log_{10}(R)$ gleichgesetzt werden kann, besteht zwischen der Rückflußdämpfung RL und der Reflektivität R die Beziehung

$$RL \text{ [dB]} = -R \text{ [dB]}. \quad (4.3)$$

Wird Licht von einem Bauteil über die Übertragungsstrecke zurück zum Sendelaser reflektiert und dort in dessen Resonator eingekoppelt, so kann dies die Sende-Laserdiode destabilisieren, das relative Intensitätsrauschen verstärken und die Kohärenz zerstören.

Die orts aufgelöste Charakterisierung entlang der optischen Achse von optischen Streuzentren innerhalb eines Empfängermoduls geschieht mit Hilfe eines sogenannten Reflektometers (OCDR, optical coherence domain reflectometer). In Abbildung 4.14 ist das Funktionsprinzip des OCDR-Meßverfahrens dargestellt [33, 90].

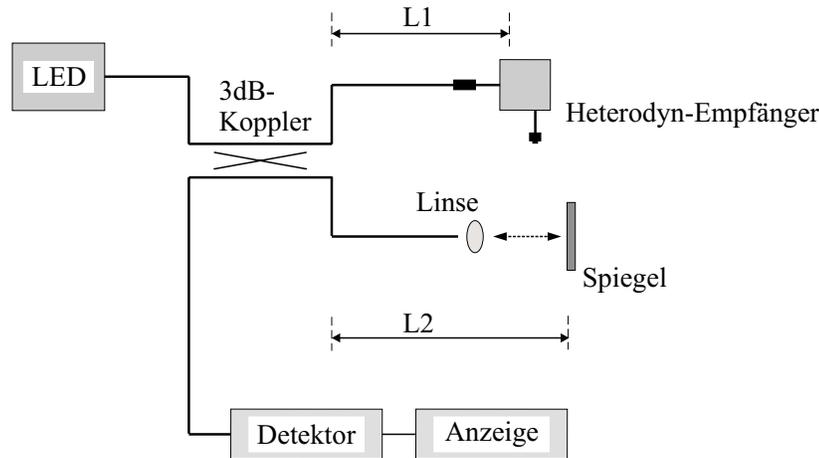


Abbildung 4.14: Orts aufgelöste Vermessung der Rückreflexe innerhalb eines Heterodyn-Empfängers.

Bei dem OCDR-Verfahren wird das Empfängermodul in den Meßarm eines Michelsoninterferometers plaziert. Im Referenzarm befindet sich ein beweglicher Spiegel. Als Lichtquelle wird eine breitbandige LED mit einer sehr kurzen Kohärenzlänge ($\leq 10 \mu\text{m}$) benutzt. Zu einer Interferenz kann es nur kommen, falls der Unterschied zwischen der Weglänge des Lichtes L_1 im Meßarm und die Weglänge des Lichtes L_2 im Referenzarm kleiner als die Kohärenzlänge des verwendeten Lichtes ist. Die Ortsauflösung wird durch die Kohärenzlänge bestimmt und liegt bei dem HP8504B Reflektometer bei etwa $25 \mu\text{m}$. Der Meßbereich wird dabei durch die Bewegungsfreiheit des beweglichen Spiegels beschränkt und beträgt 400 mm [90, 91].

In den Tabellen 4.4 und 4.5 sowie den Abbildungen 4.15 und 4.16 sind die Meßergebnisse zusammen mit den theoretisch erwarteten Rückflußdämpfungswerten bzw. Reflektivitäten dargestellt.

Grenzfläche	Position [mm] (optische Weglänge)	Position [mm] (geometrische Weglänge)	RL [dB] (Simulation)	RL [dB] (Messung)
Faserstirnfläche	0	0	14.7	14.1
Linsenvorderseite	0.281	0.281	33.3	31.2
Linsenrückseite	1.631	1.181	43.0	38.2
Prismengrenzfläche (gr.)	1.931	1.481	52.0	61.3
Strahlteilerschicht (PBS)	3.731	2.681	≥ 80.0	74.0
Strahlteilerschicht (BS)	8.616	5.938	≥ 80.0	73.0
Prismengrenzfläche (kl.)	9.673	6.643	43.0	47.0
Prismengrenzfläche (gr.)	10.416	7.138	43.0	59.6

Tabelle 4.4: Rückflußdämpfungswerte am Signaleingang (vgl. Abbildung 4.15).

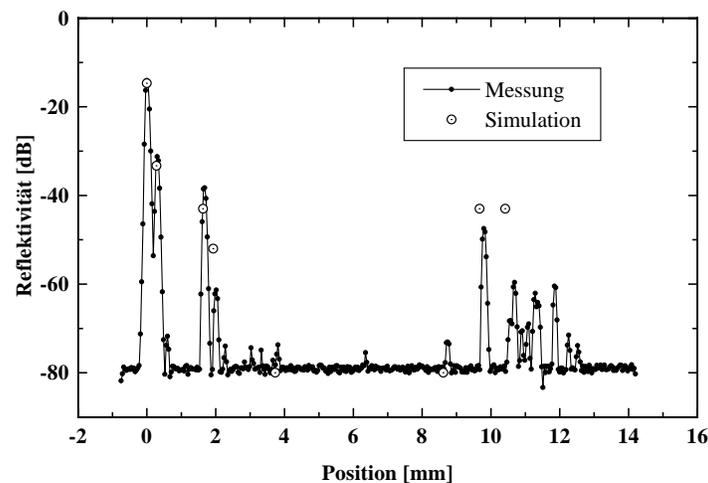


Abbildung 4.15: Am Signaleingang gemessene Reflektivitäten R (RL [dB] = $-R$ [dB]).

Abweichungen der Meßergebnisse zu den theoretischen Rückflußdämpfungswerten treten besonders bei den großen Prismen auf. Sie werden durch eventuelle Schwankungen in der Güte der optischen Beschichtung der Prismenstirnflächen oder durch eine Dejustage (z.B. Verkipfung) der Grenzflächen hervorgerufen.

Die Rückflußdämpfung des Heterodyn-Empfängers wird durch die Rückflußdämpfung der Faserstirnflächen bestimmt und beträgt etwa 14.1 dB. Dieser Wert ist besser als bei monolithisch auf der Basis von Indiumphosphid integrierten Empfängern [49], identisch mit dem von der Fa. Siemens [13] erreichten Wert und bescheiden im Vergleich zu dem von der Fa. Phi-

Grenzfläche	Position [mm] (optische Weglänge)	Position [mm] (geometrische Weglänge)	RL [dB] (Simulation)	RL [dB] (Messung)
Faserstirnfläche	0	0	14.7	14.2
Linsenvorderseite	0.281	0.281	33.3	30.0
Linsenrückseite	1.631	1.181	43.0	38.0
Prismengrenzfläche (gr.)	2.261	1.811	52.9	36.0
Strahlteilerschicht (PBS)	3.319	2.516	≥ 80.0	74.6
Strahlteilerschicht (BS)	8.204	5.773	≥ 80.0	≥ 80.0
Prismengrenzfläche (kl.)	9.261	6.478	43.1	48.3
Prismengrenzfläche (gr.)	10.003	6.973	43.8	51.6

Tabelle 4.5: Rückflußdämpfungswerte am LO-Eingang (vgl. Abbildung 4.16).

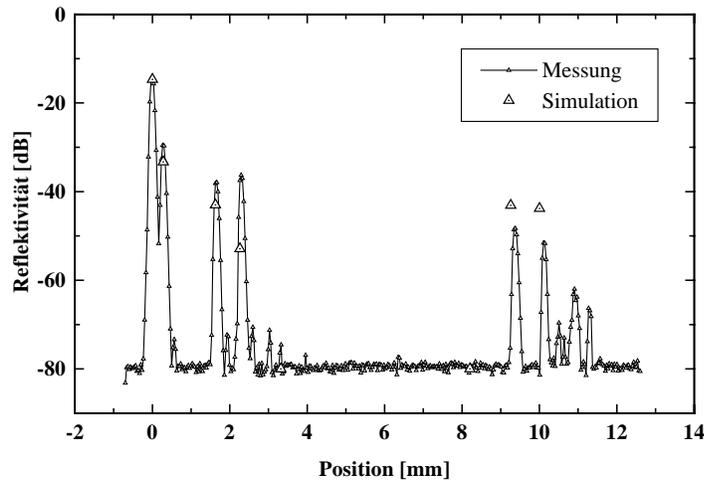


Abbildung 4.16: Am LO-Eingang gemessene Reflektivitäten R (RL [dB] = $-R$ [dB]).

lips [51,52] erreichten Rückflußdämpfungswert. Für den Betrieb von optischen Komponenten innerhalb eines optischen Netzwerks wird eine Rückflußdämpfung von $RL \geq 60$ dB gefordert. Der Aufbau der Fa. Philips [51,52] genügt dieser Forderung, da hierbei aktiv justierte Faserkollimatoren verwendet werden, bei denen das von einer angeschrägten Faserstirnfläche abgestrahlte Licht mit einer aktiv justierten Optik kollimiert in das Glassubstrat eingekoppelt wird (siehe Seite 29). Bei dem monolithisch integrierten Empfänger wird die Rückflußdämpfung durch die Reflektivität des Übergangs zwischen Glasfaser ($n \approx 1.46$) und Halbleiterchip ($n_{\text{InP}} \approx 3.45$) verursacht und ist damit ungünstiger als bei einem Glas-Luft-Übergang. Die Signaleinkopplung bei dem Heterodyn-Empfänger der Fa. Siemens [13] geschieht wie bei dem innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfänger mit einer senkrechten Faserstirnfläche, daher der gleiche Rückflußdämpfungswert.

Durch die Verwendung jeweils eines optischen Isolators für den Signal- und den LO-Eingang

kann der innerhalb dieser Arbeit entwickelte und hergestellte Heterodyn-Empfänger in ein optisches Netzwerk eingebaut werden.

4.5 Gegentaktanordnung

Der Funktionsnachweis des Heterodyn-Empfängers erfolgt durch den Funktionsnachweis der Gegentaktanordnung.

Hierzu werden die beiden DFB-Laserdioden an die beiden Eingänge des Heterodyn-Empfängermoduls entsprechend des in Abbildung 4.17 dargestellten Meßaufbaus angeschlossen. Der Polarisationszustand beider Lichtsignale kann jeweils mit einem Polarisationssteller [92] eingestellt werden.

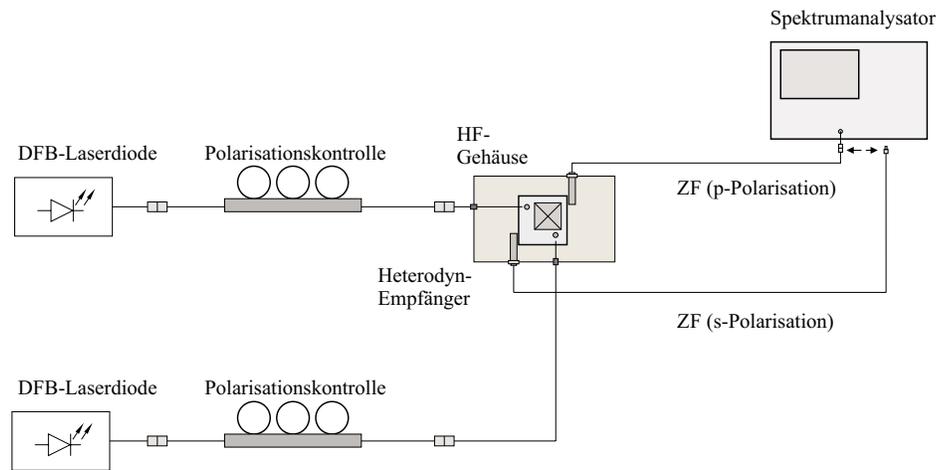
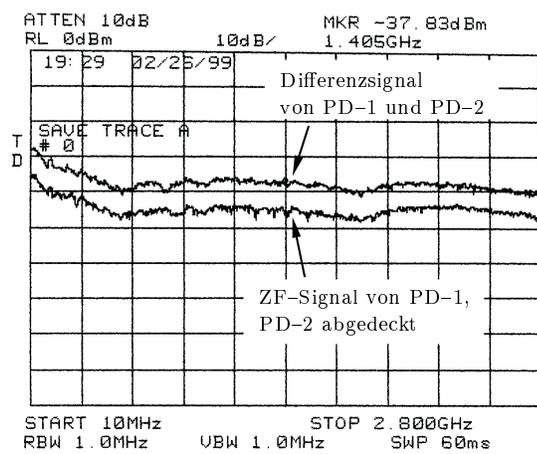


Abbildung 4.17: Meßaufbau zur Charakterisierung der elektrischen Bandbreite der Gegentaktanordnung.

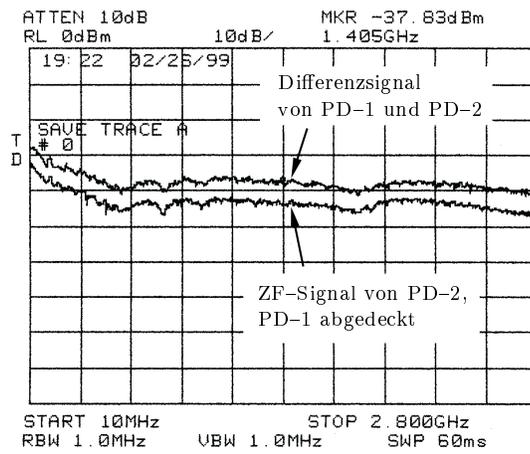
Die beiden Gegentaktanordnungen werden durch Variation der jeweiligen Sperrspannungen abgeglichen, da die Sperrspannung die Empfindlichkeit der jeweiligen Photodiode beeinflusst (siehe Abschnitt 1.3, Seite 15). Die Sperrspannung jeder Photodiode kann hierzu separat eingestellt werden (vgl. Abbildung 3.28).

Die Betriebstemperatur einer DFB-Laserdiode und damit die Zwischenfrequenz wird periodisch variiert. Das hochfrequente Differenzsignal der jeweiligen Gegentaktanordnung wird mit einem Spektrumanalysator (HP8563A [88]) detektiert.

Der Verlauf der maximalen Zwischenfrequenzamplitude als Funktion der Zwischenfrequenz für die Gegentaktanordnung für den p-Polarisationsanteil ist in den Abbildungen 4.18 (a) und (b) dargestellt (obere Kurve). Abbildung 4.18 (a) und (b) zeigt ferner den Signalverlauf der Zwischenfrequenzamplitude für den Fall, daß (a) PD-2 oder (b) PD-1 abgedeckt ist. In beiden Fällen liegt das Differenzsignal der beiden Photoströme von PD-1 und PD-2 um annähernd 3 dB oberhalb des Signalverlaufs von einer einzelnen Photodiode. Da die Differenzbildung der beiden Photodiodenströme einer Addition der beiden Photoströme von PD-1 und PD-2 gleichkommt, bestätigt diese Beobachtung, daß die Strahlteilerschicht die gewünschte Phasendifferenz von $\varphi_r - \varphi_t = \frac{\pi}{2}$ induziert (siehe Abschnitt 2.6.2). Die in Abbildung 4.18 (c) und (d) dargestellten Meßergebnisse bestätigen dies auch für die Gegentaktanordnung,

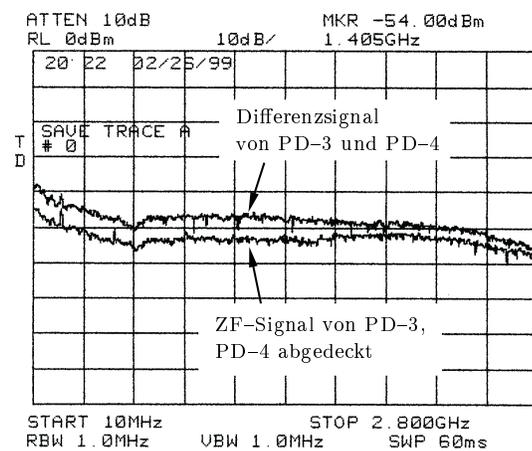


(a)

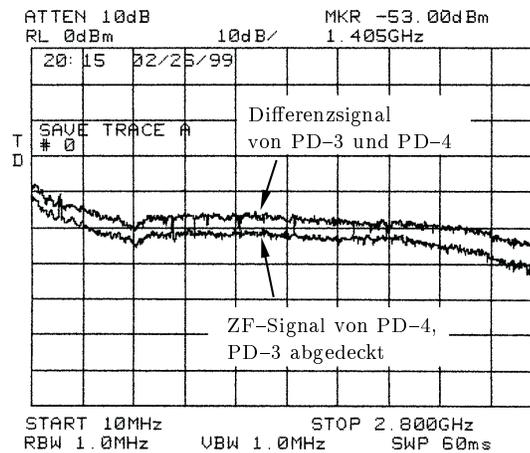


(b)

Abbildung 4.18: Differenzsignal der Gegentaktanordnung für den p-Polarisationsanteil als Funktion der Zwischenfrequenz zusammen mit dem Überlagerungssignal falls (a) Photodiode PD-2 bzw. (b) Photodiode PD-1 abgedeckt ist.



(a)



(b)

Abbildung 4.19: Differenzsignal der Gegentaktanordnung für den s-Polarisationsanteil als Funktion der Zwischenfrequenz zusammen mit dem Überlagerungssignal falls (a) Photodiode PD-4 bzw. (b) Photodiode PD-3 abgedeckt ist.

welche den s-Polarisationsanteil detektiert.

Die Sperrspannung bei den in den Abbildungen 4.18 und 4.19 dargestellten Messungen beträgt $U_R = 15 \text{ V}$.

Die unterschiedlich große Signalamplitude der p- und s-Gegentaktanordnung ist unter anderem auf ein nicht optimiertes elektrisches Netzwerk zurückzuführen. Aus Abbildung 2.10 ist ersichtlich, daß die auf dem Keramiksubstrat befindlichen Goldleiterbahnen der s-Gegentaktanordnung etwas länger als die der p-Gegentaktanordnung sind. Ferner zeigen die Messungen einen relativ gleichmäßigen Signalverlauf im Meßbereich von 10 MHz bis 2.8 GHz. Die, bei der in Abbildung 4.8 dargestellten Messung, beobachtete Zunahme in der Signaldämpfung bei etwa 1.7 GHz ist hier nicht zu beobachten.

Die Messungen zeigen, daß die Strahlteilerschichten die Phasendifferenz von $\frac{\pi}{2}$ zwischen dem transmittierten und reflektierten Strahl induzieren (siehe Abschnitt 2.6.2), da die Anordnung

als π -Hybrid arbeitet. Ferner zeigen die Messungen, daß der innerhalb dieser Arbeit realisierte Heterodyn-Empfänger die Detektion von Zwischenfrequenzen bis 2.8 GHz ermöglicht.

Der nahezu identische Verlauf des von PD-1 und PD-2 detektierten Zwischenfrequenzsignals zeigt, daß die Strahlteilerschichten für eine 50:50-Lichtleistungsaufteilung sorgen. Da das Zwischenfrequenzsignal durch Überlagerung zweier Gaußstrahlen erzeugt wird, und der Überlappbereich der beiden Gaußstrahlen die Amplitude des Zwischenfrequenzsignals bestimmt, zeigen diese Messungen ferner, daß der passiv justierte Aufbau die optische Überlagerung innerhalb der Gegentaktanordnung für den p-Polarisationsanteil sicherstellt. Gleiches gilt für die Gegentaktanordnung für den s-Polarisationsanteil.

In Abbildung 4.20 ist die durch Überlagerung des Sendesignals und Lokalszillatorlichts an der Position der Photodiode PD-1 erzeugte Intensitätsverteilung dargestellt, welche mit einer Röhrenkamera aufgenommen wurde. Hierbei beschreibt die Achse mit der Beschriftung „senkrecht“ die Position senkrecht zur optischen Achse und senkrecht zum Substrat. Die Achse, welche die Position parallel zum Substrat und senkrecht zur optischen Achse beschreibt, ist durch die Beschriftung „parallel“ gekennzeichnet.

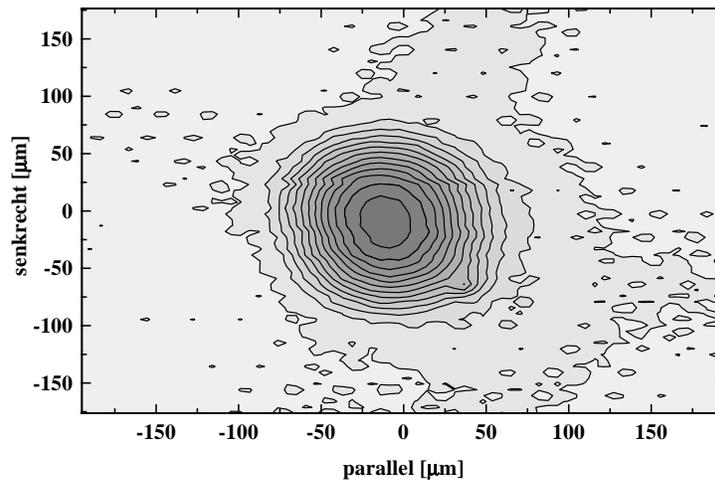


Abbildung 4.20: Intensitätsverteilung durch Überlagerung von Sendesignallicht und Lokalszillatorlicht.

Diese Intensitätsverteilung des überlagerten Signals an der Position der Photodiode zeigt ebenfalls, daß der mikrooptische Aufbau die Überlagerung des Sendesignals und Lokalszillatorlichts sicherstellt.

Indem die Intensitätsverteilung jeweils bei ausgeschalteter Lokallaserdiode und ausgeschalteter Sendelaserdiode mit der Röhrenkamera detektiert wird, ist eine quantitative Analyse der Überlagerung durch Vermessung des Abstands der Schwerpunkte der Intensitätsverteilungen möglich. In Abbildung 4.21 ist der Schnitt durch die hierdurch gewonnen drei Intensitätsverteilungen dargestellt. Die Schnittrichtung ist hierbei „parallel“ zum Substrat gewählt. Die Maxima der beiden jeweils durch Sendelaser und Lokallaser stammenden Intensitätsverteilungen haben einen Abstand von $5.1 \mu\text{m}$. Diese Messung zeigt, daß die Strahlschwerpunkte der beiden Gaußstrahlen durch den mittels LIGA-Strukturen passiv justierten mikrooptischen Freistrahlaufbau mit einer Genauigkeit zur Deckung gebracht werden, welche eine relative

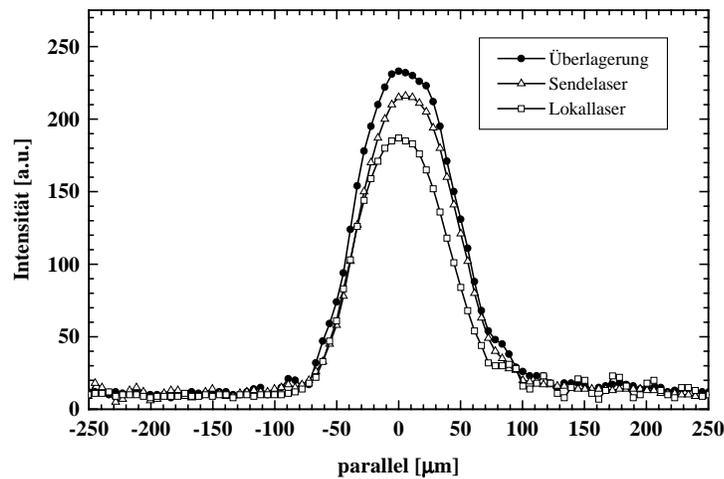


Abbildung 4.21: —●— Schnitt in Richtung „parallel“ durch den Schwerpunkt der in Abbildung 4.20 dargestellten Intensitätsverteilung, welche durch Überlagerung des —△— Sendesignallichts und —□— Lokaloszillatorlichts an der Position der Photodiode PD-1 erzeugt wird.

Positioniergenauigkeit der beiden Fasern zueinander von besser $\pm 1 \mu\text{m}$ lateral zur optischen Achse erfordert (siehe Abbildung 2.23). Ferner ergibt ein Gaußfit durch die jeweiligen Intensitätsverteilungen, daß die Strahlweite an der Position der Photodiode etwa $47 \mu\text{m}$ beträgt, wobei die nichtlineare Kennlinie der verwendeten Röhrenkamera berücksichtigt ist. Der Designwert der Strahlweite von $45 \mu\text{m}$ an der Position der Photodiode wird durch die Messung der Intensitätsverteilung im Rahmen der Meßgenauigkeit bestätigt.

Die durch Überlagerung generierten Zwischenfrequenzsignale (siehe Abbildung 4.18 und 4.19) und die Vermessung der durch Überlagerung generierten Intensitätsverteilung am Ort der Photodioden zeigen zusammen mit den in Abschnitt 3.5 gemessenen Justagetoleranzen bei einer Faser-Faser-Kopplung, daß eine passive Justage mit der für Monomode-Anwendungen geforderten Präzision von $\pm 1 \mu\text{m}$ gewährleistet werden kann.

Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein mikrotechnisches Fertigungskonzept auf der Basis des LIGA-Verfahrens für die Herstellung von hybrid integrierten mikrooptischen Modulen qualifiziert, welches eine passive Montage aller optischen Komponenten ermöglicht und somit im Vergleich zu bisher veröffentlichten Fertigungstechniken eine wesentliche Vereinfachung und Kostenreduktion mit sich bringt. Die Tauglichkeit des Konzeptes wurde innerhalb der Arbeit durch die Realisierung und optische Charakterisierung eines Heterodyn-Empfängers (optischer Überlagerungsempfänger) nachgewiesen.

Durch das LIGA-Verfahren können auf einer Aufbauplatte hochpräzise Justierhilfen erzeugt werden. Dies ermöglicht die Herstellung von mikrooptischen Freistrahlaufbauten durch passive Justage der optischen Komponenten. Hierzu wird mit dem LIGA-Verfahren eine mikrooptische Bank hergestellt, mit der die Positionierung der aktiven und passiven mikrooptischen Komponenten entlang und senkrecht zur optischen Achse in der Substratebene erfolgt. Für die Justierung in vertikaler Richtung wurde in dieser Arbeit das Konzept der Halteelemente verfolgt. Mit diesen hochpräzisen Halteelementen werden die aus verschiedenen Materialsystemen stammenden Komponenten auf der optischen Achse angeordnet. Die vertikale Positionierung in den Halteelementen erfolgt über mechanische Positionierhilfen (Fasergräben, Anschlagskanten). Die Halteelemente selbst werden in der mikrooptischen Bank durch die präzisen Justierhilfen im optischen Strahl positioniert. Während für passive Elemente wie Kugellinsen, Prismen oder Fasern polymere Halteelemente verwendet werden können, sind für die Montage und elektrische Kontaktierung von Laserdioden metallische Halteelemente notwendig. Die Leistungsfähigkeit des optischen Gesamtsystems wird durch die Präzision bestimmt, mit der die optischen Komponenten passiv justiert werden.

Zur Spezifizierung des Maßverlusts bei der röntgentiefenlithografischen Herstellung von Mikrostrukturen wurden entsprechende Messungen mit einem optischen Prüfsystem (COSMOS2D) durchgeführt. Hierbei wurden die Maße der Goldabsorber auf der verwendeten Berylliummembranmaske und des Produkts (900 μm hohe PMMA-Strukturen) vermessen und mit dem ursprünglichen CAD-Maßen verglichen. Hierbei ergab sich eine systematische Abweichung zwischen den Produktmaßen und den Goldabsorbermaßen auf der Arbeitsmaske von 1 μm pro Kante, die bei der Herstellung der Berylliummembranmasken als Vorhalt zu berücksichtigen sind. Die zusätzlich bei den beiden innerhalb dieser Arbeit verwendeten Berylliummembranmasken ermittelten unterschiedlichen Abweichungen zwischen den CAD-Designmaßen und den Goldabsorbermaßen werden auf die unterschiedliche Herstellung der beiden Masken zurückgeführt. Um die einmal ermittelten Maßvorhalte für die Herstellung neuer Masken verwenden zu können, muß der Herstellungsprozeß von Berylliummembranmasken standardisiert werden. In diesem Fall läßt sich die Genauigkeit weiter erhöhen und

die prozeßbedingten Schwankungen liegen im Sub-Mikrometerbereich (einige zehntel Mikrometer).

Die prinzipielle Grenze einer passiven Justage durch mit dem LIGA-Verfahren hergestellter Justierhilfen wurde durch eine einfache Faser-Faser-Kopplung ermittelt. Die sich aus dem Überlappintegral ergebende Genauigkeit der passiven Justage betrug $1.2 \mu\text{m}$. Da dieser Wert auch die vom Faserhersteller spezifizierte Kernexzentrizität von $\leq 1 \mu\text{m}$ der verwendeten Glasfasern berücksichtigt, ist festzuhalten, daß durch die passive Justage nur eine unwesentliche Zunahme der Fehlpositionierung auftritt. Somit ist gezeigt, daß eine passive Justage mit einer Präzision im Sub-Mikrometerbereich möglich ist.

Ein weiterer Nachweis der Präzision der passiven Montage erfolgte über den Aufbau und den Nachweis der optischen Qualität des optischen Überlagerungsempfängers. Durch den Einsatz von optischen Überlagerungsempfängern innerhalb optischer Netzwerke können die einzelnen Übertragungskanäle nahezu lückenlos im optischen Bereich nebeneinander angeordnet werden. Daher ist ein Heterodyn-Empfänger ein Bauteil, mit dem die von einer Glasfaser zur Verfügung gestellte Übertragungsbandbreite optimal ausgenutzt werden kann.

Für die Gestaltung des optischen Designs für den innerhalb dieser Arbeit realisierten Heterodyn-Empfänger wurden optische Komponenten ausgewählt, welche passiv mit der notwendigen Präzision justiert werden können und kommerziell erhältlich sind. Aufgrund der freien Geometriewahl des LIGA-Verfahrens und des hybriden Konzepts konnte das optische Design so gestaltet werden, daß das detektierte Signal unempfindlich gegenüber Polarisationschwankungen ist, und daß der Einfluß des Laserdioden-Intensitätsrauschens (Gegentaktanordnung) unterdrückt werden kann. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit geeigneter hybrid montierbarer DFB-Laserdioden wurde der lokale Oszillator des Heterodyn-Empfängers ebenfalls über eine Faser in das Element eingekoppelt. Die Möglichkeit der Integration von Laserdioden in eine mikrooptische Bank wurde allerdings unabhängig davon mit anderen Laserdioden untersucht.

Das Design für die mikrooptische Bank wurde so gestaltet, daß die optoelektronischen Komponenten mit einem entsprechenden Mikropositioniersystem auf der mikrooptischen Bank passiv montiert werden können. Das Montagekonzept kann daher direkt mit einem automatischen Montagesystem umgesetzt werden. Um in der industriellen Umsetzung eine vollautomatische Montage der Empfängermodule durchführen zu können, sind entsprechende Montageautomaten [94] zu entwickeln. Mit diesen müssen die optischen Komponenten kraftsensitiv montiert werden können. Hierzu sind entsprechende Untersuchungen notwendig.

Für die Herstellung der mikrooptischen Bank wird ein Keramiksubstrat verwendet, auf dem sich mittels Dünnschichttechnik hergestellte Goldleiterbahnen befinden, die für die Anbindung der aktiven Komponenten an die elektronische Schaltung verwendet werden. Die Herstellung der Haltestrukturen auf dem Keramiksubstrat erfolgt justiert zu den Leiterbahnen, um die Kontaktierung einfach gestalten zu können. Damit kann die elektrische Kontaktierung der aktiven Komponenten mit Leitkleber erfolgen, welcher bei etwa $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgehärtet wird. Die mechanische Fixierung der passiven Komponenten (Kugellinsen, Prismen, Glasfasern und PMMA-Halteelementen) erfolgt mit UV-härtendem Klebstoff. Da die Aushärtetemperaturen unterhalb der Erweichungstemperatur von PMMA liegen, ist sichergestellt, daß die Fixierung der Komponenten keinen Einfluß auf die Justage der Komponenten hat.

Die Charakterisierung des Hochfrequenzverhaltens der mit Leitkleber kontaktierten Photodioden zeigt, daß mit dieser Kontaktierung Hochfrequenzanwendungen bis 2.8 GHz möglich sind. Die Fixierung der Komponenten durch Verkleben stellt damit eine kostengünstige und flexible Alternative zu der im allgemeinen eingesetzten Löttechnik dar. Für ein marktreifes Produkt sind allerdings noch Untersuchungen zur Zuverlässigkeit dieser Kontaktierung und damit des gesamten Empfängermoduls notwendig, denn gerade beim Einsatz innerhalb von optischen Netzwerken ist es wichtig, daß die Datenübertragung über viele Betriebsstunden garantiert ist.

Zur Kombination des optischen Aufbaus mit der Elektronik wird der mikrooptische Freistrahl-aufbau direkt auf eine dafür vorgesehene Fläche innerhalb einer SMD-Auswerteschaltung aufgeklebt und durch Drahtbonden elektrisch mit der Schaltung verbunden. Der elektrisch-optische Aufbau wird in einem HF-Gehäuse fixiert. Entsprechende Gehäusedurchführungen ermöglichen die elektrische und optische Anbindung an die Außenwelt. Hierbei ist zu beachten, daß die Länge der Goldleiterbahnen und der Bonddrähte die elektrische Bandbreite des Empfängermoduls begrenzen. In einem zukünftigen Design kann die Geometrie der Goldleiterbahnen optimiert werden. Die Länge der Bonddrähte wird reduziert, indem die auf der SMD-Platine befindlichen Bondpads näher an den mikrooptischen LIGA-Aufbau herangeführt werden. Wird in einem zukünftigen Aufbau die mikrooptische Bank in die SMD-Platine versenkt, so wird der Abstand zwischen den Leiterbahnen auf dem Keramiksubstrat und den Bondpads auf der SMD-Platine zusätzlich reduziert.

Der Heterodyn-Empfänger wurde hinsichtlich seiner elektrischen und optischen Eigenschaften charakterisiert. Dabei zeigt es sich, daß mit dem gewählten Aufbau ein kohärenter Empfang in dem Wellenlängenbereich von 1532 bis 1566 nm möglich ist. Der auf einer SMD-Auswerteschaltung hybrid integrierte Heterodyn-Empfänger erlaubt die Detektion von Zwischenfrequenzen bis 2.8 GHz. Die gemessene optische und elektrische Bandbreite ist mit den Spezifikationen von bisher veröffentlichten Empfängermodulen vergleichbar. Die Untersuchungen zeigten, daß die optische Bandbreite des Empfängermoduls im wesentlichen durch die optische Bandbreite des Strahlteilers für die s-Polarisationsrichtung bestimmt wird. Durch weitere optische Simulationen und Untersuchungen zur Herstellung geeigneter optischer Mehrschichtsysteme sollte die optische Bandbreite des s-Strahlteilers erweitert werden können. Aufgrund des hybriden Aufbaus läßt sich der bisherige Strahlteiler leicht durch den besseren Strahlteiler ersetzen. Für die Optimierung der elektrischen Bandbreite müssen die Maßnahmen bei den Leiterbahnen durchgeführt werden sowie Photodioden mit einer größeren elektrischen Bandbreite eingesetzt werden. Auch dies ist durch den hybriden Aufbau problemlos möglich.

Da die Funktion von Laserdioden auf Haltelementen prinzipiell nachgewiesen wurde, besteht die Möglichkeit, den lokalen Oszillator in einem zukünftigen Aufbau direkt in die mikrooptische Bank des Heterodyn-Empfängers zu integrieren. Hierbei muß allerdings berücksichtigt werden, daß diese im Millikelvinbereich stabilisiert werden muß. Ein Durchstimmen der Laserdiode durch Variation der Betriebstemperatur bedeutet neben einer Änderung des Schwellstroms, daß der gesamte mikrooptische Aufbau entsprechend thermisch durchgestimmt wird. Dies ändert die Zwischenfrequenz. Für die Sicherstellung einer optimalen thermischen Ankopplung der auf einer mikrooptischen LIGA-Bank integrierten Laserdiode sind weitere Untersuchungen notwendig. In diesem Zusammenhang sollte auch der Einfluß einer nicht mit dem Haltelement schlüssig abschließenden Laserdiode auf deren Abstrahlverhalten geklärt

werden. Bei Laserdioden, die einige Mikrometer über das Halteelement hinausragen, kann es zu einer starken Erwärmung der Laserstirnflächen kommen, wodurch das Abstrahlverhalten unkontrolliert beeinflusst wird [85].

Die optischen und elektrischen Untersuchungen des Heterodyn-Empfängers ergaben eine gute Überlagerung der beiden Strahlen. Eine abschließende Aussage im Hinblick auf die Anwendung erfordert eine Aussage zur Empfindlichkeit des Empfängermoduls. Hierzu muß der Empfänger in ein Übertragungssystem eingebaut und die Bitfehlerwahrscheinlichkeit als Funktion der eingestrahlten optischen Signalleistung gemessen werden.

Bei dem im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten und charakterisierten Prototypen eines Heterodyn-Empfängers erwies sich die Rückflußdämpfung als kritisch, da eine geringe Rückflußdämpfung für einen stabilen Betrieb des gesamten optischen Netzwerks notwendig ist. Insbesondere die Dämpfung von 14.1 dB an der Faserstirnfläche ist zu gering. Der Wert von 14.1 dB kann jedoch durch eine Antireflexbeschichtung der Faserstirnfläche auf etwa 42 dB verbessert werden. Ein einstufiger optischer Isolator ($RL \geq 30$ dB) in der Signalfaser verbessert diesen Wert auf die gewünschte Rückflußdämpfung von ≥ 60 dB. Eine Möglichkeit zur Lösung des Problems der Rückflußdämpfung kann auch die Entwicklung eines mikrooptischen Isolators sein, der in die mikrooptische Bank des Heterodyn-Empfängers integriert wird. Andere Lösungsansätze, wie etwa das direkte Verkleben der Faserstirnfläche mit einer Plankonvexlinse führen ebenfalls zu einer Reduktion der Rückflußdämpfung. Als Plankonvexlinsen können z. B. LIGA-Linsen [93] verwendet werden. Ferner bietet sich die Verwendung von angeschrägten Faserstirnflächen an.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, daß mit dem Konzept der mikrooptischen LIGA-Bank auch ein so komplexes Modul wie ein Heterodyn-Empfänger durch passive Montage aller auf der mikrooptischen Bank befindlichen Komponenten hergestellt werden kann. Damit können durch die modulare hybride Integrationstechnik auch andere komplexe optoelektronische Module einfach und kostengünstig realisiert werden. Da hybride mikrooptische Aufbauten für beliebige Module optimiert werden können, kann dieses Herstellungsverfahren sehr flexibel eingesetzt werden. Damit hat das im Rahmen der Arbeit entwickelte Konzept ein breites Anwendungsspektrum.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Baack and C. Walf, *Photonics in Future Telecommunications*, Proceedings of the IEEE **81**, 1624–1632 (1993).
- [2] V. Jung und H.–J. Warnecke, *Handbuch für die Telekommunikation*, Springer–Verlag Berlin Heidelberg (1998).
- [3] J. Franz, *Optische Übertragungssysteme mit Überlagerungsempfang – Berechnung, Optimierung, Vergleich*, Springer–Verlag Berlin Heidelberg (1988).
- [4] E.–J. Bachus, T. Almeida, P. Demeester, G. Depovere, A. Ebberg, M.R. Ferreira, G.–D. Khoe, O. Koning, R. Marsden, J. Rawsthorne, and N. Wauters, *Coherent Optical Systems Implemented for Business Traffic Routing and Access: The RACE COBRA Project*, J. Lightwave Technol. **LT–14**, 1309–1319 (1996).
- [5] R. Heinstein, *Communication Technology: An Overview*, mst news **1**, 4–5 (1998).
- [6] E. Pennings, G.D. Khoe, M.K. Smit, and T. Staring, *Integrated–Optic Versus Microoptic Devices for Fiber–Optic Telecommunication Systems: A Comparison*, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics **QE–2**, 151–164 (1996).
- [7] C.A. Jones, K. Cooper, M.W. Nield, J.D. Rush, R.G. Waller, J.V. Collins, and P.J. Fiddymont, *Hybrid Integration of a Laser Diode with a Planar Silica Waveguide*, Electron. Lett. **30**, 215–216 (1994).
- [8] A. Ambrosy und H. Haupt, *Vom Chip zum Mikrosystem*, Phys. Bl. **52**, 1247–1249 (1996).
- [9] J. Beller mann, *Selbstjustierende Aufbautechnik zur Ankopplung von Glasfaser–Arrays an integrierte optoelektronische Schaltkreise*, Doktorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München (1996).
- [10] L.Y. Lin, S.S. Lee, K.S.J. Pister, and M.C. Wu, *Self–Aligned Hybrid Integration of Semiconductor Lasers with Micromachined Micro–Optics for Optoelectronic Packaging*, Appl. Phys. Lett. **66**, 2946–2948 (1995).
- [11] W. Hunziker, *Passive Self–Aligned Low–Cost Packaging of Semiconductor Laser Arrays on Si Motherboard*, IEEE Photon. Technol. Lett. **7**, 1324–1326 (1995).
- [12] G. Nakagawa, K. Miura, S. Sasaki, and M. Yano, *Lens–Coupled Laser Diode Module Integrated on Silicon Platform*, J. Lightwave Technol. **LT–14**, 1519–1523 (1996).

- [13] E. Hormann, K.-A. Steinhauser, K. Deubel, G. Schmidt-Sodingen, and J. Smola, *Compact Optical Heterodyne Receiver in Silicon Technology*, in Digest of Conference on Optical Fiber Communication, 1992 OSA Technical Digest Series, Vol. 5 (Optical Society of America, Washington, D.C., 1992), page 120.
- [14] A. Müller, *Aufbau hybrider mikrooptischer Funktionsmodule für die optische Nachrichtentechnik mit dem LIGA-Verfahren*, Doktorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (1996).
- [15] T.v. Freyhold, *Aufbau eines Erbium-dotierten Faserverstärkers unter Verwendung einer mikrooptischen LIGA-Bank und ungehäusten aktiven Komponenten*, Diplomarbeit, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe (1997).
- [16] J. Kuiper, *Integration von Laserdioden auf abgeformten mikrooptischen Polymerbänken*, Diplomarbeit, Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik, Fachhochschule Ostfriesland (1996).
- [17] M. Marth, *Untersuchungen zur Integration aktiver Komponenten und polymerer Wellenleiter auf abgeformten mikrooptischen Bänken*, Diplomarbeit, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe (1995).
- [18] M. Foulger, C.D. Hannaford, and W. Henderson, *X-Ray Lithography of Self Aligning Micro Structures for Fibre Optic Applications*, The Institution of Electrical Engineers, 1-7 (1996).
- [19] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications*, 5th ed., Oxford University Press (1997).
- [20] A.E. Siegman, *Lasers*, Oxford University Press (1986).
- [21] Fa. Siecor GmbH, Neustadt, *Datenblatt, Single Mode Fiber 9/125/250 SMF-1528* (1989).
- [22] G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc. (1992).
- [23] D. Marcuse, *Gaussian Approximation of the Fundamental Modes of Graded-Index Fibers*, J. Opt. Soc. Amer. **68**, 103-109 (1978).
- [24] S.A. Self, *Focusing of Spherical Gaussian Beams*, Appl. Opt. **22**, 658-661 (1983).
- [25] H. Kogelnik and T. Li, *Laser Beams and Resonators*, Appl. Opt. **5**, 1550-1567 (1966).
- [26] R. März, *Integrated Optics - Design and Modeling*, Artech House (1995).
- [27] S. Nemoto, *Waist Shift of a Gaussian Beam by a Dielectric Plate*, Appl. Opt. **28**, 1643-1647 (1989).
- [28] M.J.N. Sibley, *Optical Communications*, Macmillan (1990).
- [29] S.B. Alexander, *Optical Communication Receiver Design*, Tutorial texts in optical engineering (TT22), SPIE-The International Society for Optical Engineering (1997).
- [30] M. Blaser, *Persönliche Mitteilung*, Fa. Opto Speed SA, Via Cantonale, CH-6805 Mezzovico (1997).

- [31] C. Gerthsen, H.O. Kneser und H. Vogel, *Physik – Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1989).
- [32] G. Morthier and P. Vankwikelberge, *Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes*, Artech House (1997).
- [33] D. Derickson, *Fiber Optic Test and Measurement*, Prentice-Hall, Inc. (1998).
- [34] O. Ziemann, *Zur Experimentellen Charakterisierung des Optischen Überlagerungsempfangs*, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 504, Düsseldorf: VDI-Verlag (1995).
- [35] Fa. Alcatel SEL AG, *Produktbeschreibung – DFB Laserdiode A1915 LMI-WDM 100 GHz Spacing*, Unternehmensbereich Bauelemente, Produktbereich Faseroptik, Postfach 4756, D-90025 Nürnberg (1997).
- [36] L. Kazovsky, *Optical Fiber Communication Systems*, Artech House (1996).
- [37] T. Imai, N. Ohkawa, Y. Hayashi, and Y. Ichihashi, *Polarization Diversity Detection Performance of 2.5-Gb/s CPFSK Regenerators Intended for Field Use*, J. Lightwave Technol. **LT-9**, 761–769 (1991).
- [38] S. Ryu, *Coherent Lightwave Communication Systems*, Artech House (1995).
- [39] S. Shimada, *Coherent Lightwave Communications Technology*, Chapman & Hall (1995).
- [40] P.W. Hooijmans, *Coherent Optical System Design*, John Wiley & Sons, Inc. (1994).
- [41] S. Rhy, S. Yamamoto, Y. Namihira, K. Mochizuki, and H. Wakabayashi, *Polarization Diversity Techniques for the Use of Coherent Optical Fiber Submarine Cable Systems*, J. Lightwave Technol. **LT-9**, 675–682 (1991).
- [42] C. Hentschel, *Fiber Optics Handbook – An Introduction and Reference Guide to Fiber Optic Technology and Measurement Techniques*, 3rd ed. – Böblingen: Hewlett-Packard (1989).
- [43] M. Bischoff, *Simulation Kohärent-Optischer Übertragungssysteme am Beispiel eines CPFSK-Heterodynsystems*, Doktorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik, Universität Karlsruhe (1993).
- [44] S. Betti, G. de Marchis, and I. Iannone, *Coherent Optical Communications Systems*, John Wiley & Sons, Inc. (1995).
- [45] L.G. Kazovsky, *Phase- and Polarization-Diversity Coherent Optical Techniques*, J. Lightwave Technol. **LT-7**, 279–292 (1989).
- [46] M. Hamacher, D. Trommer, K. Li, H. Schroeter-Janßen, W. Rehbein, and H. Heidrich, *Fabrication of a Heterodyne Receiver OEIC with Optimized Integration Process Using Three MOVPE Growth Steps Only*, IEEE Photon. Technol. Lett. **8**, 75–77 (1996).
- [47] F. Ghirardi, A. Bruno, B. Mersali, J. Brandon, L. Giraudet, A. Scavennec, and A. Carencoc, *Monolithic Integration of an InP Based Polarization Diversity Heterodyne Photoreceiver with Electrooptic Adjustability*, J. Lightwave Technol. **LT-13**, 1536–1549 (1995).

- [48] J.I. Alonso, B.P. Dorta, C. Crespo, and F. Pèrez, *A Commercial Balanced Optical Front-End for 2.5 Gbit/s CPFSK Coherent Transmission System*, Proceedings EUROPTO, Amsterdam, Volume **2449**, 142–151 (1995).
- [49] U. Hilbk, T. Hermes, P. Meissner, F.J. Westphal, G. Jacumeit, R. Stenzel, and G. Unterbörsch, *First System Experiments with a Monolithically Integrated Tunable Diversity Heterodyne Receiver OEIC on InP*, IEEE Photon. Technol. Lett. **7**, 129–131 (1995).
- [50] H. Hultzsich, *Optische Telekommunikationssysteme*, Damm-Verlag (1997).
- [51] E.C.M. Pennings, D. Schouten, G.D. Khoe, R.A.J.C.M. van Gils, and G.F.G. Depovere, *Ultra Fabrication-Tolerant Fully Packaged Micro-Optical Polarization-Diversity Hybrid*, J. Lightwave Technol. **LT-13**, 1985–1991 (1995).
- [52] E.C.M. Pennings, D. Schouten, and G.D. Khoe, *Ultra Fabrication-Tolerant Micro-Optical Polarization-Diversity Hybrid*, Proc. 20th ECOC, Firenze, Italy, Sept. 25–29, 217–220 (1994).
- [53] R. Deufel, M. Eisenmann, H. Gottsmann, B. Hillerich, A. Schurr, and E. Weidel, *All-Fiber Optical Front End for a Balanced Polarization Diversity Receiver with 0.2 dB Excess Loss and High Noise Rejection*, J. Opt. Comm. **14**, 96–100 (1993).
- [54] J.-M.P. Delavaux, Y.K. Park, S. Barski, H. Lefevre, M. Failes, and C. Warner, *All-Fiber Optical Hybrid for Coherent Polarization Diversity Receivers*, Electron. Lett. **26**, 1303–1305 (1990).
- [55] D. Schäfer, *Persönliche Mitteilung*, Fa. QUARTERWAVE GmbH, Rudower Chaussee 6, 12484 Berlin (1997).
- [56] H.A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, 2nd ed. – Bristol: Adam Hilger Ltd. (1986).
- [57] A. Thelen, *Design of Optical Interference Coatings*, McGraw-Hill, Inc. (1988).
- [58] OPTIS, Toulon, *Manual – SOLSTIS for Windows, Version 4.5* (1996), Chapter 21 and 22.
- [59] I. Sieber, *Persönliche Mitteilung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Angewandte Informatik (1998).
- [60] I. Sieber, H. Eggert, H. Guth, and W. Jakob, *Design Simulation and Optimization of Microoptical Components*, Novel Optical System Design and Large-Aperture Imaging, SPIE **3430** (1998).
- [61] I. Sieber, H. Eggert, H. Guth, W. Jakob, K.P. Scherer, and P. Ziegler, *Design Optimization Considering Tolerance Effects of Microoptical Benches*, Micro-System Technologies, 1.–3.12.1998, Potsdam, Germany.
- [62] H. Eggert, H. Guth, W. Jakob, I. Sieber und W. Süß, *Designoptimierung für Mikrosysteme*, 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, 2./3. April 1998 im Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 6080, Seite 131–136.
- [63] K.P. Scherer, *Persönliche Mitteilung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Angewandte Informatik (1998).

- [64] M. Wutz, *Wärmeabfuhr in der Elektronik*, Braunschweig: Verlag Vieweg (1991).
- [65] W. Menz und J. Mohr, *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, VCH (1997).
- [66] M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press (1997).
- [67] C. Müller, *Miniaturisiertes Spektrometersystem in LIGA-Technik*, Doktorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (1995).
- [68] F.J. Pantenburg, S. Achenbach und M. Sesterhenn, *LIGA Strukturen mit Strukturhöhen von mehreren Millimetern durch Ultratiefe Röntgenlithographie (UDXRL)*, 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, 2./3. April 1998 im Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 6080, Seiten 77–82.
- [69] Fa. Röhm GmbH, *Produktbeschreibung Plexiglas GS*, Darmstadt (1993).
- [70] F.J. Pantenburg, *Persönliche Mitteilung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Mikrostrukturtechnik (1997).
- [71] B. Schweizer, *Einflüsse thermisch induzierter Verzüge auf die Strukturtreue von LIGA-Mikrostrukturen: Messungen und FEM-Simulationen*, Diplomarbeit, Fakultät für Physik, Universität Darmstadt (1996).
- [72] S. Achenbach, *Genauigkeitsbegrenzende Effekte bei der Übertragung von Mikrostrukturen in große Resistdicken mittels Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung*, Diplomarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (1996).
- [73] K.P. Scherer, H. Eggert, H. Guth, P. Stiller und U. Stucky, *CAD und optische Qualitätskontrolle für LIGA-Mikrostrukturen*, 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, 28./29. November 1995 im Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 5670, Seiten 57–61.
- [74] P. Jakobs, *Persönliche Mitteilung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Mikrostrukturtechnik (1998).
- [75] J. Kiwitt, *Untersuchungen zum Einfluß dielektrischer Blenden bei der galvanischen Abscheidung von Mikrostrukturen*, Diplomarbeit, Fakultät für Elektrotechnik, Universität Karlsruhe (1994)
- [76] H. Reichl, *Hybridintegration – Technologie und Entwurf von Dickschichtschaltungen*, Dr. Alfred Hüthig Verlag Heidelberg (1988).
- [77] T. Hashimoto, Y. Nakasuga, Y. Yamada, H. Terui, M. Yanagisawa, Y. Akahori, Y. Tohmori, K. Kato, and Y. Suzuki, *Multichip Optical Hybrid Integration Technique with Planar Lightwave Circuit Platform*, J. Lightwave Technol. **LT-16**, 1249–1258 (1998).
- [78] S. Pschibl, *Persönliche Mitteilung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Mikrostrukturtechnik (1997).
- [79] E. Hecht, *Optics*, Addison–Wesley, 2nd Edition (1987).
- [80] L. Berger, *Persönliche Mitteilung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (1998).

- [81] F. Königer, *Persönliche Mitteilung*, Fa. PROMETH GmbH, Gesellschaft für Prozeßmeßtechnik und Hochfrequenzsysteme mbH, Alt-Zeilsheim 21, D-65931 Frankfurt (1998).
- [82] E.G. Neumann, *Single-Mode Fibers*, Springer-Verlag Berlin (1988).
- [83] M. Saruwatari and K. Nawata, *Semiconductor Laser to Single-Mode Fiber Coupler*, *Appl. Opt.* **18**, 1847-1856 (1979).
- [84] C. Ford, *Persönliche Mitteilung*, BT Laboratories, Technology Integration, Ipswich, U.K. (1997).
- [85] A.R. Mickelson, N.R. Basavanahally, and Y.-C. Lee, *Optoelectronic Packaging*, John Wiley & Sons (1997).
- [86] O. Krömer, *Persönliche Mitteilung*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hauptabteilung Prozeßdatenverarbeitung und Elektronik (1997).
- [87] Hewlett-Packard Company, U.S.A., *HP86120B Multi-Wavelength Meter*, Operation Manual (1996).
- [88] Hewlett-Packard Company, U.S.A., *HP8563A Spectrum Analyzer*, Operation and Programming Manual (1989).
- [89] Santec Photonics Laboratories, Japan, *Tunable LD Light Source TSL-210*, Operation Manual (1997).
- [90] HP Product Note 8504-1, *Measurement of Lightwave Component Reflections with the HP8504B Precision Reflectometer*, Hewlett-Packard Company, U.S.A. (1995).
- [91] Hewlett-Packard Company, U.S.A., *HP8504B Precision Reflectometer*, Operation Manual (1995).
- [92] H.C. Lefevre, *Single-Mode Fibre Fractional Wave Devices and Polarisation Controllers*, *Electron. Lett.* **16**, 778-780 (1980).
- [93] P. Ruther, B. Gerlach, J. Götttert, M. Ilie, J. Mohr, A. Müller, and C. Oßmann, *Fabrication and Characterization of Microlenses Realized by a Modified LIGA Process*, *Pure Appl. Opt.* **6**, 643-653 (1997).
- [94] U. Gengenbach, F. Engelhardt, P. Ruther, R. Scharnowell und D. Seidel, *Montage hybrider Mikrosysteme*, 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, 2./3. April 1998 im Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 6080, Seiten 17-24.

Anhang A

Spezifikationen der Photodioden

Länge	$l = (600 \pm 10) \mu\text{m}$
Breite	$w = (600 \pm 10) \mu\text{m}$
Dicke	$t = 100 \mu\text{m} \left(\begin{smallmatrix} +10 \\ -5 \end{smallmatrix} \right) \mu\text{m}$
Bondpadfläche	$A_{BP} = 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
Lochdurchmesser (Rückseite)	$D_{BH} = (180 \pm 20) \mu\text{m}$
Lochtiefe (Rückseite)	$H_{BH} = (40 \pm 10) \mu\text{m}$

Tabelle A.1: Mechanische Eigenschaften der Photodioden [30].

Durchmesser der sensitiven Fläche	$\varnothing = 160 \mu\text{m}$
Empfindlichkeit ($\lambda = 1550 \text{ nm}$)	$R = (0.90 \pm 0.05) \frac{\text{A}}{\text{W}}$
Oberflächenreflektivität	$R_s \leq 1 \%$
Dunkelstrom	$I_D \approx 50 \text{ nA}$
Bandbreite	$B_W \approx 1.8 \text{ GHz}$
maximale optische Eingangsleistung	$P \approx 3 \text{ dBm}$
Gesamtkapazität	$C = (1.3 \pm 0.3) \text{ pF}$
Isolationswiderstand (Kontaktseite–Rückseite)	$R_I \geq 0.1 \text{ G}\Omega$

Tabelle A.2: Elektrische und optische Eigenschaften der Photodioden für eine Sperrspannung von $U_R = 2.5 \text{ V}$ bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. V. Saile für die Übernahme des Referats und Herrn Prof. Dr. K.-H. Brenner für die Übernahme des Korreferats danken.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr. J. Mohr für sein offenes Ohr und Unterstützung bei Problemen, und die Möglichkeit die Arbeit selbständig durchführen zu können.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. J. Wengelink für die Betreuung der Arbeit, die vielen hilfreichen Diskussionen und die gute Zusammenarbeit.

Ich danke Frau Dr. U. Wallrabe für die Unterstützung in der Endphase der Arbeit (insbesondere das Korrekturlesen). Herrn A. Last für das Korrekturlesen und der gesamten Optikgruppe für das kollegiale Arbeitsklima.

Weiterhin danke ich

- Herrn Dr. H. Hein für die Herstellung der Berylliumarbeitsmasken,
- Herrn P. Jakobs für die Messungen mit dem COSMOS-2D System,
- Herrn Dr. D. Seidel und Herrn Dr. A. Gerlach für den Aufbau des Mikropositioniersystems,
- Frau S. Pschibl für die tatkräftige Unterstützung und vielen guten Ratschläge bei der Montage der optischen Komponenten,
- Herrn C. Ford und damit British Telecom für die Bereitstellung von Laserdioden,
- Herrn O. Krömer für die Entwicklung einer Temperaturregelung,
- Herrn L. Berger und Herrn F. Königer für die SMD-Auswerteschaltung,
- Herrn Dr. D. Schäfer (Fa. Quarterwave) für optische Simulationen und die Herstellung der optischen Schichten,
- Herrn Dr. M. Blaser (Fa. OptoSpeed) für Hinweise bezüglich der Designgestaltung von Photodioden,
- Herrn R. Wittemann für die CAD-Arbeiten,
- Frau U. Rothweiler für das unbürokratische Management der Probenbestrahlung,
- Frau B. Matthis für die Galvanikarbeiten,
- Herrn G. Schüler, Herrn P. Abaffy und Herrn T. Heneka für die REM-Bilder.

Schließlich möchte ich der mechanischen Werkstatt und allen weiteren Mitarbeitern des IMT danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

