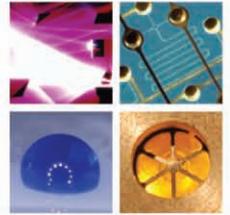


Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik  
am Karlsruher Institut für Technologie



Band 3

Sven Schüle

# **Modular adaptive mikrooptische Systeme in Kombination mit Mikroaktoren**

Ein mikrooptisches System auf der Basis  
mikrooptischer Bänke



Sven Schüle

**Modular adaptive mikrooptische Systeme  
in Kombination mit Mikroaktoren**

Ein mikrooptisches System auf der Basis mikrooptischer Bänke

Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik  
am Karlsruher Institut für Technologie  
Band 3

Hrsg. Institut für Mikrostrukturtechnik

Eine Übersicht über alle bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen  
Bände finden Sie am Ende des Buchs.

# **Modular adaptive mikrooptische Systeme in Kombination mit Mikroaktoren**

Ein mikrooptisches System auf der Basis mikrooptischer Bänke

von  
Sven Schüle

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie  
Fakultät für Maschinenbau  
Tag der mündlichen Prüfung: 9. Februar 2010  
Hauptreferent: Prof. Dr. V. Saile  
Korreferent: Prof. Dr. J. Leuthold

## Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales  
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz  
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2010  
Print on Demand

ISSN: 1869-5183  
ISBN: 978-3-86644-529-1

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Mikrostrukturtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie. Die ersten Zeilen möchte ich nutzen, um den Personen zu danken, die mit Ihrer Unterstützung maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. V. Saile für die Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Hauptreferates. Ohne Ihn wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Herrn Prof. Dr. J. Leuthold möchte ich herzlich für die Übernahme des Korreferats und für die Betreuung als KSOP Mentor danken sowie für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen, die maßgebend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderen Dank gebührt Herrn Dr. J. Mohr für seine Unterstützung bei allen erdenklichen technologischen und organisatorischen Fragen die es im Rahmen dieser Arbeit zu lösen galt. Herrn Uwe Hollenbach, der in einer Vielzahl von konstruktiven Diskussionen, ausgehend von der Designphase bis hin zur Messtechnik, in der Theorie und Praxis maßgeblich zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, möchte ich ebenfalls herzlich danken.

Stefan Hengsbach danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung der Elektronikkomponenten und bei dem Aufbau verschiedener Demonstratoren. In diesem Zusammenhang möchte ich dem Institut für angewandte Informatik und allen voran Herrn Andreas Hofmann und seinen Mitarbeitern für die Bereitstellung der Montagemaschinen im Rahmen dieses Projekts danken.

Dank gebührt zudem Herrn Dr. S. Schonhardt des IMTEK Instituts der Universität Freiburg für die Bereitstellung des in dieser Arbeit eingesetzten elektromagnetischen Mikroaktors. Herrn Jingshi Li vom Institut für Photonik und Quantenelektronik danke ich insbesondere für die konstruktive Hilfe bei Fragen rund um nachrichtentechnische Anwendungen.

Danken möchte ich auch allen Doktoranden und Mitarbeitern des IMT für Ihre Unterstützung bei Fragen und Problemen jeglicher Art, insbesondere bei der Komponentenherstellung der aktiven modularen mikrooptischen Systeme.

Ebenfalls danken möchte ich der Graduiertenschule KSOP und ihren Mitarbeitern sowie den Partnern des EU-Netzwerkes NEMO für die zahlreichen Veranstaltungen, Workshops und Schulungen auf den Gebieten der Optik, der optischen Messtechnik und im Managementbereich, in denen ich nicht nur im Bereich der Optik unzählige nützliche Kenntnisse erwerben konnte.

Nicht zuletzt möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie bedanken, die mich während meiner gesamten schulischen Ausbildung und meines Studiums in jeder erdenklichen Form unterstützt hat sowie meiner immer aufs Neue verständnisvollen Freundin Nicole, die besonders in den letzten Monaten dieser Arbeit viele Abende und Wochenenden ohne mich verbringen musste.

## **Kurzfassung**

In der modernen Mikrosystemtechnik ist ein eindeutiger Trend hin zu flexiblen Systemen mit geringen Herstell- und Entwicklungskosten zu erkennen. Viele der derzeit verfügbaren Systeme sind für spezielle Anwendungen angepasst und können nur eingeschränkt anderen Bestimmungen zugeführt werden. Speziell im Bereich optischer Sensor- und Analysesysteme mit aktiv veränderlichen optischen Pfaden und den damit verbundenen hohen Anforderungen an mechanischer Präzision und optischer Güte sind adaptierbare Systeme nur unzureichend verfügbar. Aus technischer Sicht bietet die Modularisierung auch in der Mikrosystemtechnik die einzige Möglichkeit, eine kosten- und zeitintensive Entwicklung spezieller anwendungsgebundener Lösungen zu umgehen. Die vorliegende Arbeit zeigt anhand eines modifizierten aktiv einstellbaren Mach-Zehnder Mikrointerferometers in modularer Bauweise die Vorteile dieser aktiven mikrooptischen Technologie von der Konzeptphase bis zur Charakterisierung erster Demonstratoren erfolgreich auf. Neben der Realisierung unterschiedlich konfigurierter modularer Demonstratoren wurde anhand einer exemplarischen Anwendung als Fourier-Transformations-Infrarot-Wellenlängenmessgerät die Funktion des aktiv modularen mikrooptischen Systems in unterschiedlichen Aufbauformen erfolgreich unter Beweis gestellt. Weiterführend schafft sie durch die freie Kombinierbarkeit verschiedener aktiver sowie passiver Module ein breites Feld unterschiedlichster Anwendungsmöglichkeiten und rückt eine mögliche Markteinführung anwendungsorientierter modularer Mikrosysteme mit in unterschiedlichen Anwendungen einsetzbaren Systemen in greifbare Nähe.



## **Abstract**

In the field of modern micro system technology a trend towards flexible systems with low effort in development and fabrication is clearly visible. However, currently available systems are designed and built for a certain purpose and not for fast and easy adaptation to other applications. For optical sensing and analysing applications with tuneable optical paths, such systems are hardly available. This is caused by the mechanical requirements and the optical quality needed of such applications. Based on the technical point of view, a cost and time efficient development of customer oriented solutions can only be avoided by a modular design. The present work shows the advantages of such modular microsystems and proves the feasibility, starting from the design phase and ending with the characterization of the prototypes. The modular approach is demonstrated successfully by a modified Mach-Zehnder microinterferometer with active adjustment. Besides the realization of modular demonstrators with different configurations these active modular micro-optical systems achieved success in an exemplary application of a Fourier transform infrared wavemeter. Subsequent to this, a wide variety of applications can be covered by the manifold possibility of combinations of the active and passive micro modules developed in this work. With this result, a market introduction of active optical micro system is finally within reach.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>5</b>
2.1	Theoretische Grundlagen der Interferometrie.....	5
2.2	Typen interferometrischer Systeme.....	9
2.2.1	Michelson-Interferometer .....	9
2.2.2	Twyman-Green Interferometer .....	11
2.2.3	Sagnac Interferometer .....	12
2.2.4	Fabry-Pérot Interferometer .....	13
2.2.5	Mach-Zehnder Interferometer.....	15
2.3	Mikroaktorprinzipien .....	16
2.3.1	Formgedächtnismikroaktoren .....	18
2.3.2	Magnetostriktive Mikroaktoren .....	20
2.3.3	Elektrostatische Mikroaktoren .....	21
2.3.4	Elektrothermische Mikroaktoren .....	23
2.3.5	Elektromagnetische Mikroaktoren.....	25
2.3.6	Piezoaktoren.....	26
2.3.7	Inchwormaktoren .....	28
<b>3</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>Modulares Konzept.....</b>	<b>39</b>
4.1	Konzept des modularen mikrooptischen Systems .....	39
4.2	Schnittstellendefinitionen.....	43
4.2.1	Schnittstelle zu den Mikroaktoren .....	44
4.2.2	Schnittstelle zur Signalausgabe/Auswerteelektronik.....	46
4.3	Lastenhefte für die Modulkomponenten.....	49
4.3.1	Mikroaktoren.....	49
4.3.2	Optische Komponenten.....	52
4.3.3	LIGA Strukturen und mikrooptische Bänke.....	55
4.3.4	Auswerteelektronik und Photodioden.....	56
<b>5</b>	<b>Simulation und Design des modularen Systems .....</b>	<b>59</b>
5.1	Simulation der optischen Strahlengänge .....	59

5.1.1	LIGA-Interferometer mit Glaskomponenten .....	60
5.1.2	Auskopplung auf die Auswerteelektronik / Glasfasern.....	65
5.2	<i>Optische Beschichtungen</i> .....	67
5.3	<i>CAD Design</i> .....	80
5.3.1	Mikrooptische Bänke und Glaskomponenten.....	80
5.3.2	Das Gesamtsystem.....	84
5.4	<i>Entwicklung der Auswerteelektronik</i> .....	89
<b>6</b>	<b>Fertigung und Aufbau der Mikrointerferometer</b> .....	<b>95</b>
6.1	<i>Mikrooptische Bänke</i> .....	95
6.2	<i>Bestückung der mikrooptischen Bänke</i> .....	101
6.3	<i>Aufbau der Aktormodule</i> .....	104
6.3.1	Elektromagnetischer Mikroaktor.....	104
6.3.2	Piezoaktor.....	106
6.3.3	Inchwormaktor .....	108
6.4	<i>Justierung und Montage des Gesamtaufbaus</i> .....	110
6.5	<i>Realisierung der Signalausgabe</i> .....	111
6.5.1	Fasergebundene Signalauskopplung .....	111
6.5.2	Auskopplung auf die Auswerteelektronik .....	114
<b>7</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b> .....	<b>119</b>
7.1	<i>Charakterisierung der Einzelkomponenten</i> .....	119
7.2	<i>Aufbau mit optischer Signalausgabe</i> .....	131
7.3	<i>Aufbau mit Auskopplung auf die Auswerteelektronik</i> .....	140
7.4	<i>Exemplarische Anwendungsmöglichkeiten</i> .....	146
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung / Ausblick</b> .....	<b>155</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>161</b>
A.1	<i>LIGA-Interferometer</i> .....	161
A.2	<i>CAD-Design der mikrooptischen Bank für das LIGA-Interferometer</i> .....	164
A.3	<i>Die mikrooptischen Bänke des LIGA-Interferometers</i> .....	165
<b>B</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>167</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Moderne hochintegrierte Sensorsysteme, wie sie beispielsweise in der Automatisierungstechnik zu finden sind, erfüllen eine Vielzahl von Aufgaben. Längst ist die Detektion einer Kenngröße selbst nur noch ein kleiner Teil eines komplexen Sensorsystems, welches sich in einem Verbund von Einzelsensorsystemen und Aktoren befindet. Für den interaktiven Informationsaustausch zwischen Teilsystemen, zu denen auch die Sensorsysteme zählen, gewinnen standardisierte Kommunikationsschnittstellen wie Bussysteme immer mehr an Bedeutung. Bekannte Vertreter sind beispielsweise der Feldbus, der Ethernetbus sowie auch der USB-Bus [1]. Neben dem eigentlichen Sensor ist für mess- und automatisierungstechnische Anwendungen die Integration einer geeigneten Signalaufbereitung, Signalverstärkung und Signalwandlung unabdingbar [2]. Die Entwicklung neuer Sensorsysteme bedarf somit weitaus mehr als nur die reine Erfassung von Messsignalen.

Hinzu kommt der immer größer werdende Variantenreichtum an verfügbaren Sensorsystemen, der bei geringen Stückzahlen den Entwicklungsaufwand und somit die Kosten einzelner Sensorsysteme beträchtlich ansteigen lässt. Einen Lösungsansatz bietet hier die modulare Mikrosystemtechnik. Sie erlaubt Kleinserienprodukte kostengünstig aus hybrid integrierten Mikromodulen zu realisieren [2]. Die Minimierung bietet hierbei gleich mehrere Vorzüge. So sind in technischen Systemen der verfügbare Bauraum und damit die geometrischen Abmessungen eines Systems direkt mit den Herstellungs- und Betriebskosten verbunden. Zum anderen ist es möglich, durch eine Erhöhung der Integrationsdichte die Systemverluste und die Störgrößeneinflüsse zu verringern. Ziel der Modularisierung ist die Herstellung von Modulen, die über klar definierte Schnittstellen in einer breiten Palette verschiedener Systeme einsetzbar sind. Auf diese Weise lassen sich die Entwicklungskosten einer breit gefächerten Produktpalette geringer Stückzahlen deutlich senken. Gleichzeitig wird durch Einführung modularer Systeme die Mehrfachentwicklung und Herstellung spezieller applikationsgebundener Hardware umgangen. Die deutsche Sensorindustrie hat diesen Trend bereits vor geraumer Zeit erkannt und Ihre Produktentwicklung in

Richtung modularer Systeme ausgerichtet [2] [3]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieser Trend mit den Vorzügen der Miniaturisierung vereint, um neue zukunftsorientierte Ansätze für die Entwicklung von Sensor- und Detektionssystemen zu schaffen.

Auf dem Gebiet der polymeren Mikrotechnologie hat die LIGA-Technik in naher Vergangenheit ihre Stärke als Technologie für die Herstellung einzelner Sensoren bereits mehrfach unter Beweis gestellt. Sie schafft die Möglichkeit, Strukturen mit hoher Genauigkeit im Submikrometerbereich und großem Aspektverhältnis auf einem Substrat zu realisieren. Weiterführend bietet sie den Vorteil der Reduktion des Montageaufwands, indem mehrere Bauteile direkt auf einem Substrat montagefrei realisiert werden können. So sind z.B. mit LIGA-Technik hergestellte Mikrospektrometer kommerziell verfügbar. Auch die Modularisierung hybrider LIGA-basierter Systeme und deren automatisierte Fertigung in Kleinserie wurde bereits aufgezeigt [4]. Die Möglichkeiten der Anpassung der bis dato realisierten Systeme ist hingegen sehr gering. Zudem sind die entwickelten Mikrosysteme meist nur für sehr eng abgegrenzte Aufgabenbereiche optimiert. Neue Applikationen erfordern meist aufwendige Anpassungen oder Redesigns. Der zeit- und kostenbedingte Entwicklungsaufwand LIGA-basierter Systeme hat die Kommerzialisierung dieser Systeme in der Vergangenheit häufig gehemmt. Der ausschlaggebende Aspekt für eine breitbandige kommerzielle Anwendung LIGA-basierter Systeme im Bereich der Sensorik, liegt in der Reduzierung dieses Entwicklungsaufwands bei gleichzeitiger Maximierung der Flexibilität. Dem aktuellen Trend der Mikrosystemtechnik und Mechatronik folgend, bietet die Modularisierung die Chance, den kommerziellen Einsatz der LIGA-Technologie voranzutreiben. Die Basis hierfür bildet ein neuartiges mikrooptisches Modulkonzept, das ausgehend von den optischen und mechanischen Komponenten bis hin zur Datenübertragung flexibel und individuell kombinierbar und an verschiedenste Aufgaben anpassbar ist.

### **1.2 Zielsetzung**

Im Rahmen dieser Arbeit ist das Konzept zur Herstellung hybrider mikrooptischer Systeme basierend auf LIGA-optischen Komponenten dahingehend zu erweitern, dass eine Integration handelsüblicher Mikroaktoren möglich ist. Neben dem Einsatz verschiedener Mikroaktoren, soll weiterführend die Möglichkeit einer flexiblen

Signalverarbeitung geschaffen werden. Diese soll, zum Zweck der externen Signalweiterverarbeitung sowohl faseroptisch als auch direkt über integrierte Detektoren, welche Signale in aufbereiteter Form elektronisch übertragen, modular realisierbar sein. Basierend auf diesem Ansatz ist die Möglichkeit zu schaffen, modulare Mikrosysteme zu entwickeln, die durch eine Auswahl geeigneter Komponenten kosteneffizient und flexibel an verschiedene Aufgabenstellungen anpassbar sind. Als Funktionsnachweis ist im Rahmen dieser Arbeit ein modulares Mach-Zehnder Mikrointerferometer zu realisieren. Insbesondere sind dabei die folgenden Aufgabenstellungen zu bearbeiten:

- Entwicklung eines modularen Konzepts zur Integration von Mikroaktoren und mikrooptischen Bänken.
- Erarbeitung geeigneter Schnittstellen für die Integration verschiedener Aktormodule.
- Design eines optischen Systems in Form eines Mach-Zehnder Mikrointerferometers mittels LIGA-Technik zur Validierung der Funktionsweise.
- Entwicklung einer elektronischen Platine zur Signalauswertung.
- Aufbau verschiedener Demonstratoren nach dem neu zu entwickelnden modularen Konzept.
- Charakterisierung der verschiedenen modularen Systeme.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit ist in insgesamt acht Kapitel gegliedert. Im Anschluss an das einführende Kapitel, folgen im zweiten Kapitel die Grundlagen der Interferometrie, mit der Beschreibung technisch bedeutender Interferometersysteme sowie eine Einführung in die Mikroaktorik. Das Kapitel drei spiegelt den Stand der Technik zum Zeitpunkt der Arbeit wieder. Es gibt einen Überblick über modulare Mikrosysteme, Mikrosysteme in Kombination mit Mikroaktoren und interferometerbasierte Mikrosysteme. Das Konzept und die Funktionsweise des in der vorliegenden Arbeit entwickelten modularen aktiven mikrooptischen Systems wird in Kapitel vier ausführlich beschrieben. Des Weiteren sind in diesem Kapitel die Spezifikationen für die erforderlichen Mikrobauerteile erfasst. In Kapitel fünf werden anhand der in Kapitel

vier erarbeiteten Vorgaben die Simulation der optischen Strahlengänge und die Auslegung der optischen Schichten erläutert. Darauf aufbauend folgt die Umsetzung der Simulationsergebnisse in ein CAD-Layout bis hin zum Design des kompletten modularen aktiven mikrooptischen Systems. Kapitel sechs beschreibt den Aufbau und die Montage der einzelnen Komponenten zu Modulen und schließlich zu gesamten Mikrosystemen mit unterschiedlichen Modulkombinationen. Die Ergebnisse der Charakterisierung modularer aktiver mikrooptischer Systeme werden in Kapitel sieben aufgezeigt. Zunächst folgen die Ergebnisse der Charakterisierung der Einzelkomponenten und im weiteren Verlauf die Charakterisierung ganzer Systeme. Abschließend werden potentielle Anwendungen der modular aktiven mikrooptischen Systeme auf Basis eines Mach-Zehnder Delay Interferometers exemplarisch dargestellt, bevor Kapitel acht eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit liefert und einem Ausblick auf weiterführende Tätigkeiten gibt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Theoretische Grundlagen der Interferometrie

Die Interferometrie gilt als eines der Grundphänomene der modernen und klassischen Optik [6]. Häufig dienen interferometrische Systeme zur Messung von überlagerten Lichtwellen, die innerhalb des Systems unterschiedliche optische Wege durchlaufen. Im Punkt der Überlagerung, der auch als Interferenzpunkt bezeichnet wird, entsteht ein Bild mit hellen und dunklen Bereichen, die je nach Form als Interferenzstreifen oder Interferenzringe bezeichnet werden. Diese entstehen aufgrund der Phasenunterschiede der überlagerten Wellenfronten beider Teilstrahlen, die auf die unterschiedlichen Laufzeiten des Lichtes von der Quelle bis zum Interferenzpunkt zurück zu führen sind. Als Lichtquellen für interferometrische Systeme werden aufgrund ihrer Eigenschaften meist Laser eingesetzt. Das interferierende Licht einer Quelle wird nach dem aufspalten in Teilstrahlen über unterschiedliche Lichtwege geleitet und durch Überlagern zur Interferenz gebracht. Um stabile Interferenzmuster zu erzeugen dürfen die interferierenden Teilstrahlen keine signifikanten Wellenlängenunterschiede aufweisen, da sich aufgrund von zeitabhängigen Phasenunterschieden die Interferenzerscheinungen sonst über den Erfassungszeitraum ausmitteln würden [5]. Die beiden interferierenden Teilstrahlen sollten nahezu gleiche Amplituden aufweisen, um einen guten Kontrast und ein gutes Auslöschungsverhältnis zu erzielen und um einen Signaloffset bei der Interferenzerscheinung zu vermeiden. Eine wichtige Bedingung für das Entstehen von Interferenzmustern ist die Konstanz der Phasenbeziehung zwischen den interferierenden Teilstrahlen. Diese, allgemein als Kohärenz bezeichnete Bedingung wird in der Literatur in eine räumliche und zeitliche Kohärenz unterteilt (siehe Abbildung 2.1). Die zeitliche Kohärenz beschreibt das Intervall der Zeitachse, in dem sich das Licht zwischen zwei Phasensprüngen als Sinuswelle ausbreitet. Die räumliche Kohärenz hingegen beschreibt die räumliche Ausdehnung zwischen zwei Phasensprüngen. Die Entfernung, die das Licht innerhalb der Kohärenzzeit zurücklegt, wird als Kohärenzlänge bezeichnet. Eine weitere bedeutsame Rolle für die Entstehung von Interferenzen spielt die Polarisation. Die hierfür geltenden Bedingungen sind durch die Fresnel-Arago-Gesetze beschrieben [5],

welche besagen, dass nur parallele Polarisationszustände zweier Lichtvektoren miteinander interferieren. Zwischen orthogonalen Polarisationszuständen tritt keine Interferenz auf. Eine Interferenz beider Polarisierungen eines Lichtvektors kann auch durch das Drehen einer Polarisationskomponente nicht herbeigeführt werden, da die beiden Polarisationszustände zueinander nicht kohärent sind.

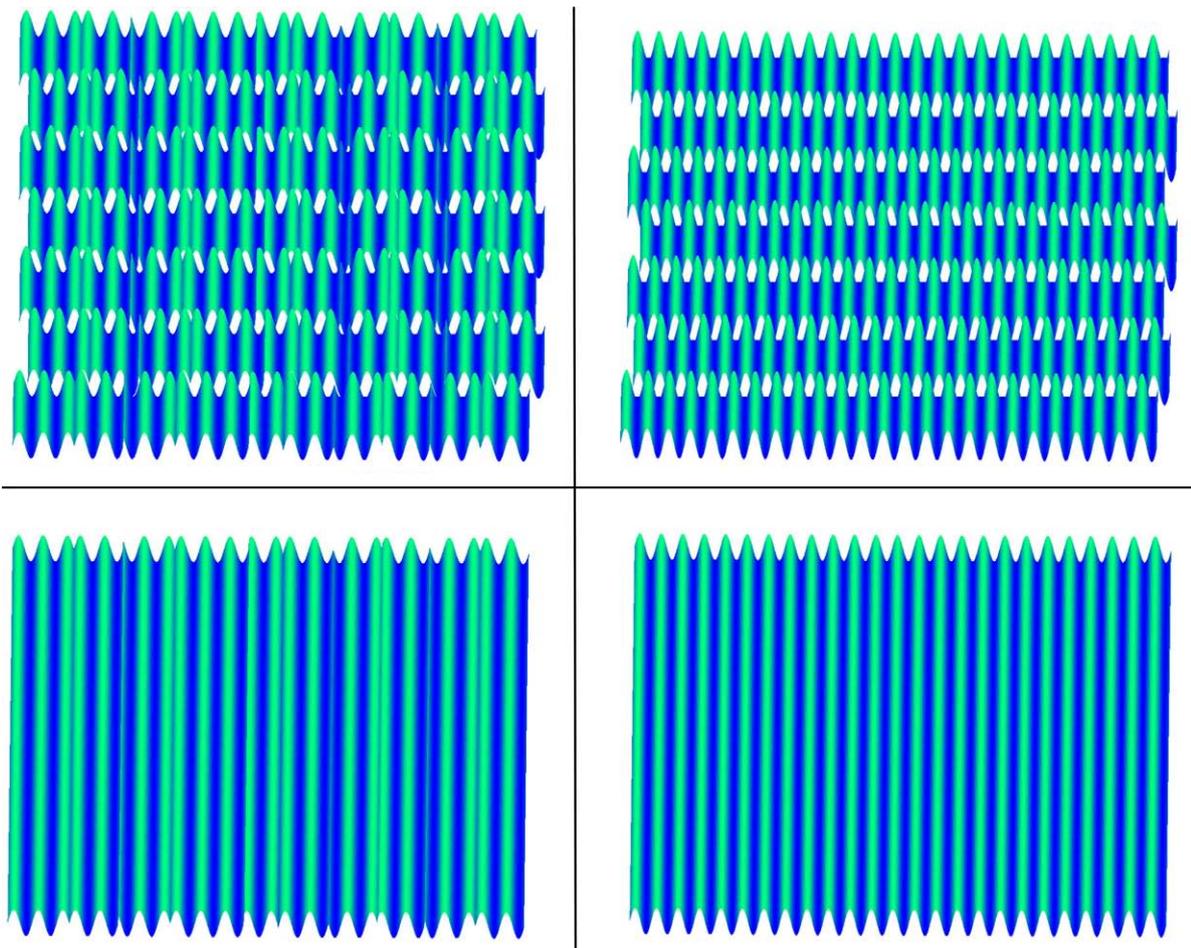


Abbildung 2.1: Kohärenz von Lichtwellen. Oben links räumlich und zeitlich inkohärentes Licht. Oben rechts zeitlich kohärentes, jedoch räumlich inkohärentes Licht. Unten links räumlich kohärentes jedoch zeitlich inkohärentes Licht, der Abstand zwischen zwei Phasensprüngen wird hier als Kohärenzlänge bezeichnet. Unten rechts zeitlich und räumlich völlig kohärentes Licht.

Für die Aufspaltung des Lichtes einer Quelle in zwei oder mehrere Teilstrahlen, kann prinzipiell in Interferometer mit Wellenaufspaltung und Interferometer mit Amplitudenaufspaltung unterschieden werden. Bei Interferometern mit Wellenfrontenaufspaltung wird die räumliche Kohärenz des Lichtes genutzt, um mit Hilfe eines

Doppelspalt aus einem kohärenten Lichtstrahl zwei kohärente Teilstrahlen zu erzeugen. Bei Interferometern mit Amplitudenaufspaltung kommen halbdurchlässige Spiegel zum Einsatz.

Um die Ausbreitung des Lichtes innerhalb eines Interferometers in allgemeiner Form zu verdeutlichen, ist es erforderlich, das Licht in vektorieller Schreibweise als elektromagnetische Welle zu beschreiben, wie es nachfolgend am Beispiel linear polarisierten Lichts beschrieben ist. Der eingekoppelte Lichtvektor  $E$  am Ort  $r$  zur Zeit  $t$  mit der Eingangsphase  $\varepsilon$  und der Bestrahlungsstärke  $E_0$

$$E(r, t) = E_0 \cdot \cos(k \cdot r - \omega \cdot t + \varepsilon) \quad (2.1)$$

wird zunächst in die zwei Teilstrahlen

$$E_1(r_1, t) = E_{01} \cdot \cos(k_1 \cdot r_1 - \omega \cdot t + \varepsilon_1), \quad E_2(r_2, t) = E_{02} \cdot \cos(k_2 \cdot r_2 - \omega \cdot t + \varepsilon_2) \quad (2.2)$$

zerlegt und über zwei unterschiedliche Lichtpfade geschickt. Nach Durchlaufen der beiden Teilarme des Interferometers treffen diese im Punkt P, dem Interferenzpunkt, wieder zusammen und werden überlagert. Nach [5] kann die Bestrahlungsstärke in P als zeitlicher Mittelwert des Quadrates der elektrischen Feldstärke beschrieben werden. Somit gilt:

$$I = \langle E^2 \rangle_T = \langle (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) \rangle_T = \langle E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \rangle_T \quad (2.3)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2.4)$$

Weiterhin gilt mit trigonometrischer Umformung:

$$\begin{aligned} E_1 \cdot E_2 &= E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos(k_1 \cdot r_1 - \omega \cdot t + \varepsilon_1) \times \cos(k_2 \cdot r_2 - \omega \cdot t + \varepsilon_2) \\ &= E_{01} \cdot E_{02} \cdot \left[ \cos(k_1 \cdot r_1 + \varepsilon_1) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \sin(k_1 \cdot r_1 + \varepsilon_1) \cdot \sin(\omega \cdot t) \right] \\ &\quad \times \left[ \cos(k_2 \cdot r_2 + \varepsilon_2) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \sin(k_2 \cdot r_2 + \varepsilon_2) \cdot \sin(\omega \cdot t) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Nach ausmultiplizieren von Gleichung 2.5 und unter Berücksichtigung folgender Mittelwerte über die Zeit

$$\langle \sin^2(\omega \cdot t) \rangle_T = \langle \cos^2(\omega \cdot t) \rangle_T = \frac{1}{2}, \quad \langle \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \rangle_T = 0$$

gilt:

$$\begin{aligned} I_{12} &= 2 \cdot \langle E_1 \cdot E_2 \rangle_T = 2 \left\langle \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos(k_1 \cdot r_1 + \varepsilon_1 - k_2 \cdot r_2 - \varepsilon_2) \right\rangle_T \\ &= E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos \delta \quad \text{mit } \delta = (k_1 \cdot r_1 + \varepsilon_1 - k_2 \cdot r_2 - \varepsilon_2) \end{aligned}$$

Mit den quadratischen Mittelwerten für  $I_1$  und  $I_2$

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle_T = \frac{E_{01}^2}{2} \quad \text{bzw.} \quad I_2 = \langle E_2^2 \rangle_T = \frac{E_{02}^2}{2}$$

ergibt sich die Gesamtbestrahlungsstärke durch Einsetzen in Gleichung 2.4 zu:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.6)$$

Mit Gleichung 2.6 kann die Bestrahlungsstärke zweier interferierender Teilstrahlen nach durchlaufen der Wegstrecken  $r_1$  und  $r_2$  bestimmt werden. Der letzte Term in Gleichung 2.6 wird auch als Interferenzterm bezeichnet. Sind die beiden interferierenden Lichtwellen in Phase d.h.  $\cos \delta = 1$  liegt völlig konstruktive Interferenz vor. Im Falle  $\cos \delta = -1$  sind beide interferierenden Lichtwellen um  $\pi$  phasenverschoben, was zur vollständigen Auslöschung führt und somit eine völlig destruktive Interferenz vorliegt [5]. Für den Sonderfall, dass die beiden interferierenden Teilstrahlen gleiche Beleuchtungsstärke besitzen, d.h.  $I_1 = I_2 = I_0$ , folgt aus Gleichung 2.6 unmittelbar

$$I_{Min} = 0 \quad \text{und} \quad I_{Max} = 4I_0$$

was in der Theorie einem idealen Interferometer entspricht. Für reale Interferometer ist das Verhältnis von konstruktiver und destruktiver Interferenz ein Gütemaß,

welches sich in Kennzahlen wie dem Auslöschungsverhältnis (ER) und der Michelson Kontrast ( $K_M$ ) widerspiegelt.

$$ER = 10 \cdot \log\left(\frac{I_{Max}}{I_{Min}}\right), \quad K_M = \frac{I_{Max} - I_{Min}}{I_{Max} + I_{Min}} \quad (2.7)$$

Letzteres bildet zusammen mit der mittleren Intensität

$$j = \frac{I_{Max} + I_{Min}}{2}$$

ein Maß für die Helligkeit eines Interferogrammes [6]. Weitere Kenngrößen die die Eigenschaften von interferometrischen Systemen charakterisieren, werden bei der Auslegung der optischen Beschichtungen in Kapitel 5.2 eingeführt und angewendet.

## 2.2 Typen interferometrischer Systeme

Mit Aufkommen der Laserlichtquellen im Jahre 1960 und damit der Entwicklung kohärenter Lichtquellen wurden im Laufe der Zeit unterschiedliche Typen interferometrischer Systeme entwickelt, die für verschiedenste Anwendungen eingesetzt werden können. Bekannte Anwendungen sind z.B. die optische Vermessung reflektierender oder transparenter Oberflächen in der Qualitätsprüfung, die Analyse chemischer Stoffe, die hochgenaue Positionsmessung, wie sie bei Positioniersystemen z.B. für die Elektronenstrahlitografie eingesetzt werden, die Spektrometrie oder die Messung von Phasenverschiebungen modulierten Lichtes. Eine Auswahl verschiedener Interferometertypen wird in ihrer Funktionsweise in den folgenden Kapiteln kurz erläutert.

### 2.2.1 Michelson-Interferometer

Das nach dem amerikanischen Physiker M. Michelson (1852-1932) benannte Michelson-Interferometer [12] gilt heute als eines der bedeutendsten Interferometersysteme und diente als Basis für die Entwicklung vieler weiterer Interferometeranordnungen. Es besteht in seiner Grundform aus zwei Spiegeln  $M_1$  und  $M_2$  sowie einem halbdurchlässigen Spiegel oder Strahlteilerwürfel  $BS_1$ , wie in

Abbildung 2.2 dargestellt. Wird kohärentes Licht in das Michelson-Interferometer eingekoppelt, wird dieses an der Strahlteilerfläche von  $BS_1$  in zwei Teilstrahlen aufgeteilt, die im weiteren Verlauf auf die Spiegel  $M_1$  und  $M_2$  treffen. Von dort zurück reflektiert treffen die beiden Teilstrahlen erneut auf die Strahlteilerfläche von  $BS_1$ , wo es schließlich zur Interferenz der beiden Teilstrahlen kommt. Bei einem Michelson Interferometer liegen somit der Punkt für die Strahlaufspaltung und der Interferenzpunkt auf derselben Strahlteilerfläche. Das entstehende Interferogramm kann auf einem Schirm oder Detektor an der Position  $D_1$  beobachtet werden. Soll die Phasenlage des Interferogrammes veränderbar sein, besteht die Möglichkeit einen der beiden Teilarme des Interferometers in seiner Weglänge, durch Verschieben des Spiegels parallel zum einfallenden Lichtstrahl, zu verändern. In der beschriebenen Grundkonfiguration besitzt das Michelson Interferometer einen Signalausgang an der Position  $D_1$ . Für bestimmte Anwendungen ist jedoch die Kenntnis des komplementären Interferometersignals von Vorteil, welches in der Grundkonfiguration des Michelson-Interferometers in Richtung der Lichtquelle zurückreflektiert wird.

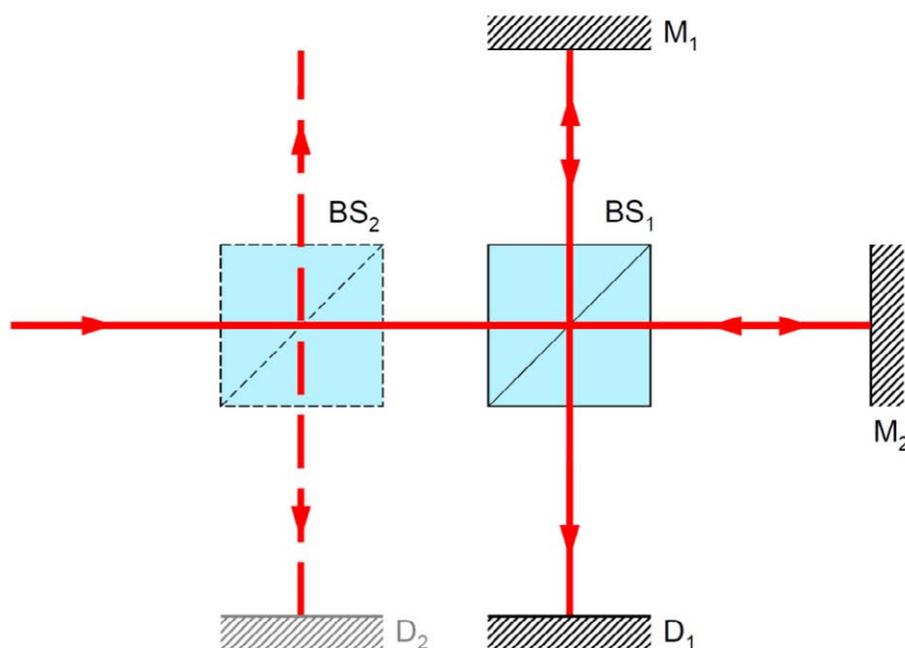


Abbildung 2.2: Michelson Interferometer mit Erweiterung um einen zweiten Ausgang (gestrichelt).

wird. Durch Einsetzen eines zweiten Strahlteilerwürfels  $BS_2$  zwischen Lichtquelle und  $BS_1$  kann dieses Signal auf einen Schirm oder Detektor an der Position  $D_2$

ausgekoppelt werden. Auf diese Weise ist es zwar möglich ein komplementäres Interferenzsignal zu erhalten, jedoch geht dies zur Lasten der Effizienz des Systems, da an  $BS_2$  ein Teil des eingekoppelten Lichtes ohne Funktion das System verlässt.

### 2.2.2 Twyman-Green Interferometer

Das Twyman-Green Interferometer basiert aufbautechnisch auf dem Michelson-Interferometer. Sein Hauptanwendungsgebiet befindet sich in der Charakterisierung und Prüfung optischer Komponenten wie z.B. Linsen oder Prismen. In der optischen Messtechnik kommt dem Twyman-Green Interferometer daher eine bedeutende Rolle

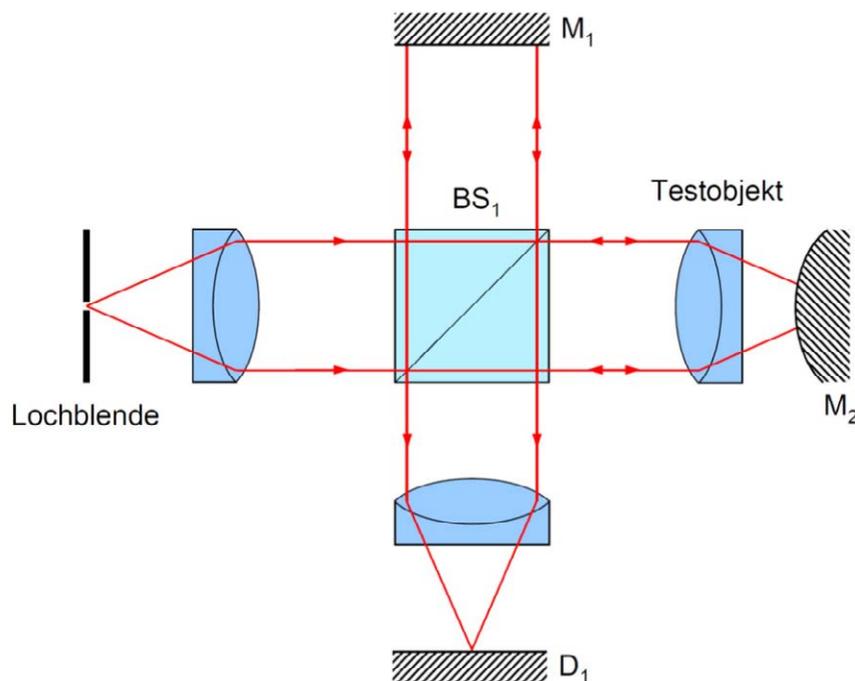


Abbildung 2.3: Twyman-Green Interferometer für die Charakterisierung von Linsen.

zu [5]. Die Unterschiede zu dem Michelson-Interferometer liegen in einer monochromatischen Punktquelle sowie einer Linse am Interferometereingang, die dafür sorgt, dass ebene Wellenfronten in das Interferometer eingeleitet werden. Am Ausgang des Interferometers ist ebenfalls eine zusätzliche Linse integriert, die das erzeugte Interferenzmuster fokussiert und so für den Betrachter als Ganzes sichtbar macht. Einer der beiden Interferometerarme ist vergleichbar mit dem Michelson-Interferometer mit einem ebenen Spiegel versehen. Der zweite Arm ist mit einem

Spiegel abhängig vom Prüfobjekt ausgestattet. Ziel hierbei ist, die ebenen Wellenfronten, die das Testobjekt treffen, vom Spiegel so zurück zu leiten, dass die vom Testobjekt wieder in Richtung Strahlteiler zurücklaufenden Wellenfronten, im Falle eines idealen fehlerfreien Testobjektes, wiederum ebene Wellenfronten darstellen. Je nach Testobjekt kommen hier ebene, konkave, konvexe oder parabolische Spiegel zum Einsatz. Eine Auswahl von unterschiedlichen Konfigurationen ist in [7] dargestellt. Abbildung 2.3 zeigt den Aufbau eines Twyman-Green Interferometers wie er für die Charakterisierung von Linsen eingesetzt werden kann.

Aufgrund seiner Bedeutung für die optische Messtechnik wurden im Laufe der Zeit einige Variationen des Twyman-Green Interferometers entwickelt, wie z.B. das Martin-Watt-Weinstein Interferometer [8] oder das Williams Interferometer [7], auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

### 2.2.3 Sagnac Interferometer

Für die Messung rotatorischer Bewegungen in einem Inertialsystem [10] wird im Sagnac Interferometer eingekoppeltes Licht in zwei Teilstrahlen aufgeteilt, die ein und denselben optischen Pfad in unterschiedliche Richtungen durchlaufen. Der von Georges Sagnac im Jahre 1913 entdeckte Effekt beschreibt den, von der Winkelgeschwindigkeit abhängigen Phasenunterschied, welchen zwei Lichtstrahlen erfahren, von denen einer ein rotierendes System im Uhrzeigersinn und der Andere das System gegen den Uhrzeigersinn durchläuft. Dieser kommt zu Stande, da sich die zur Lichtein- und Auskopplung verwendete Strahlteilerfläche während des Lichtumlaufs um ein Weginkrement entsprechend der Winkelgeschwindigkeit weiter bewegt, wodurch sich der Lichtweg in eine Richtung um dieses Weginkrement erhöht und in der Anderen verringert. Eine Herleitung dieser Zusammenhänge ist in [9] zu finden. Abbildung 2.4 zeigt den Aufbau eines solchen Sagnac Interferometers. Das Licht einer kohärenten Lichtquelle  $S_1$  wird am Strahlteilerwürfel  $BS_1$  in zwei Teilstrahlen zerlegt, die das System in unterschiedliche Richtungen über die Spiegel  $M_1$ - $M_3$  durchlaufen, bevor sie schließlich am Strahlteilerwürfel  $BS_1$  erneut zusammentreffen und interferieren. Das interferierende Lichtsignal kann auf dem Detektor  $D_1$  detektiert werden. Befindet sich das System in Ruhe, sind beide Lichtpfade gleich lang, wodurch am Detektor destruktive Interferenz der nullten Ordnung zu erkennen ist, die

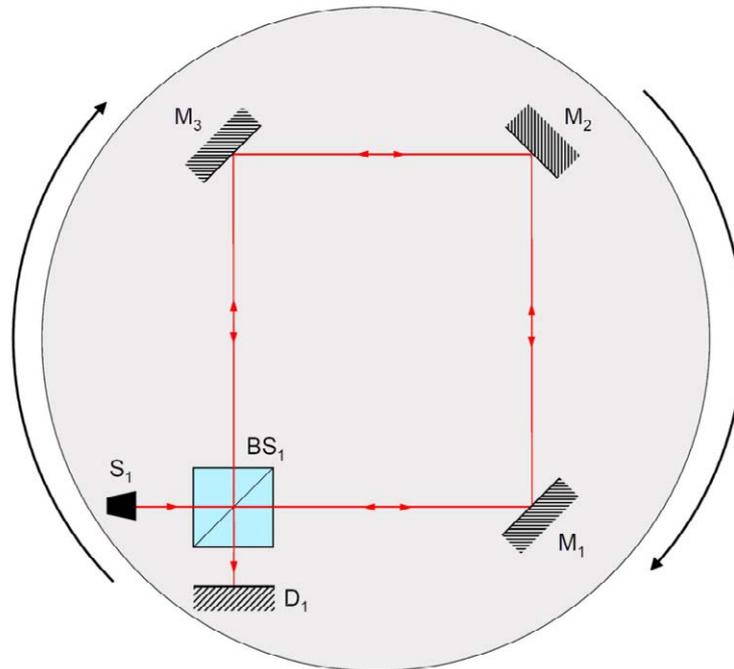


Abbildung 2.4: Sagnac Interferometer für die absolute Rotationsmessung.

sich aufgrund der Phasenverschiebungen anhand der unterschiedlichen Anzahl an Reflexionen und Transmissionen der beiden Lichtpfade am Strahlteilerwürfel ergibt. Wird das System in Rotation versetzt, ändert sich das Interferenzmuster ausgehend von dieser Ruhelage. Von besonderem Interesse für die Messtechnik ist dabei das beim Sagnac Interferometer typische Mitrotieren der Lichtquelle und des Beobachters im Bezugskordinatensystem.

### 2.2.4 Fabry-Pérot Interferometer

Bei allen bisher behandelten Interferometersystemen handelte es sich um Systeme, bei denen zwei Lichtstrahlen miteinander interferieren. Neben diesen, auch als Zweistrahlinterferometer genannten Systemen, existieren in der Physik des Weiteren Mehrstrahlinterferometersysteme, bei welchen eine größere Anzahl von Lichtstrahlen zur Interferenz gebracht wird. Einer der bekanntesten und bis heute bedeutendsten Mehrstrahlinterferometer ist das Fabry-Pérot Interferometer [5]. Zentraler Bestandteil eines Fabry-Pérot Interferometers sind zwei teildurchlässige Spiegel, die in einem definierten Abstand parallel zueinander positioniert sind. Ist dieser Abstand fest vorgegeben, wird diese Anordnung nach Fabry und Pérot (1897) als Etalon oder nach

Rayleigh (1906) als „interference gauge“ [11] bezeichnet. Im Falle eines einstellbaren Abstandes zwischen den beiden teildurchlässigen Spiegeln, wird der Aufbau als Interferometer im eigentlichen Sinne bezeichnet [5]. Um Mehrfachreflexionen und die daraus resultierenden Ringstrukturen nicht mit der eigentlichen interferometrischen Struktur zu überlagern, sind Vorder- und Rückseite der beiden Spiegel nicht völlig parallel zueinander [7] [8]. Eingangsseitig in das Fabry-Pérot Interferometer eingekoppeltes diffuses Licht einer ausgedehnten Lichtquelle wird zunächst über eine Linse  $L_1$  kollimiert und fällt anschließend auf die beiden teildurchlässigen Spiegel  $M_1$  und  $M_2$ , die zusammen das eigentliche Interferometer bilden. Für die genauere Betrachtung der Funktionsweise werden zwei Strahlen  $B_1$  und  $B_2$  der ausgedehnten Lichtquelle herausgegriffen. Das Licht des Lichtstrahls  $B_1$  trifft auf das Interferometer und wird dort mehrfach zwischen den Spiegeloberflächen hin und her reflektiert (siehe Abbildung 2.5). Dabei geht an jeder Spiegelfläche ein Teil des Lichtstrahls in

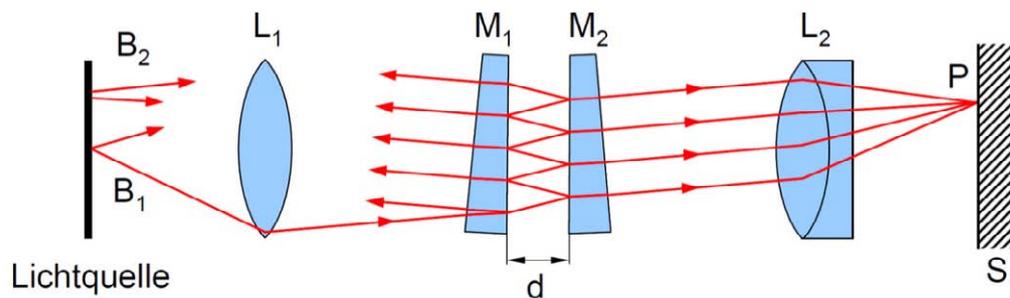


Abbildung 2.5: Fabry-Pérot Interferometer.

Transmission durch den Spiegel und wird über eine zweite Linse  $L_2$  auf einen Schirm  $S_1$  projiziert. Alle Teilstrahlen von  $B_1$  treffen im Punkt  $P$  zusammen und interferieren, d.h. alle Teilstrahlen von  $B_1$  sind kohärent zueinander und bilden einen Punkt des Interferenzmusters. Wohingegen die Teilstrahlen von  $B_2$  zu den Teilstrahlen von  $B_1$  nicht kohärent sind und daher nicht miteinander interferieren. Der Winkel unter dem ein Strahl auf das Interferometer trifft bestimmt dabei den Phasenunterschied der einzelnen Teilstrahlen zueinander und gibt damit im Punkt  $P$  eine konstruktive oder destruktive Interferenz vor. Eine Ringstruktur erzeugt durch einen Fabry-Pérot Interferometer wird somit durch die Lichtstrahlen der diffusen Lichtquelle beschrieben, die unter dem gleichen Winkel auf das Interferometer fallen. Der Abstand  $d$  (siehe

Abbildung 2.5) zwischen den teildurchlässigen Spiegeln hat nach [5] einen Einfluss auf den Abstand der Interferenzringe, der mit zunehmendem  $d$  abnimmt.

### 2.2.5 Mach-Zehnder Interferometer

Das Mach-Zehnder Interferometer, das parallel von dem österreichischen Physiker Mach und dem schweizer Physiker Zehnder entwickelt wurde, ist ebenfalls eine Weiterentwicklung des Michelson Interferometers und ähnelt vom Aufbau her stark dem Jamin Interferometer [8], auf das hier nicht weiter eingegangen werden soll. Sein bedeutendster Unterschied im Vergleich zum Michelson-Interferometer liegt in der Aufteilung der Strahlteilung und Strahlüberlagerung auf zwei getrennte Strahlteilerflächen [7], in dem durch Neigen der beiden Spiegel des Michelson Interferometers in Abbildung 2.2 um jeweils  $45^\circ$  nach rechts bzw. nach oben die Strahlüberlagerung an einen anderen Ort verlagert wird. Wie in Abbildung 2.6 dargestellt, wird einfallendes kohärentes Licht am Strahlteilerwürfel  $BS_1$  in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Diese laufen über zwei getrennte optische Pfade bis sie am zweiten Strahlteilerwürfel  $BS_2$  überlagern. Die Teilstrahlen werden auf ihrem Weg zu  $BS_2$  von zwei Spiegeln  $M_1$  und  $M_2$  umgelenkt, wodurch sich die Justage des Interferometers im Vergleich zu anderen Interferometern als eher schwierig gestaltet. Der Interferenzpunkt des Mach-Zehnder Interferometers liegt auf der Strahlteilerfläche von  $BS_2$ . Anschließend werden die beiden um  $\pi$  phasenverschobenen Interferenzmuster auf die Detektoren  $D_1$  und  $D_2$  ausgegeben. Die Phasenverschiebung beider Interferometerausgänge ist dabei auf die unterschiedlichen Phaseneinflüsse der Reflektionen und Transmissionen an den Strahlteilerflächen zurückzuführen. Über den lichtaufspaltenden Strahlteilerwürfel  $BS_1$  bietet das Mach-Zehnder Interferometer zusätzlich die Möglichkeit, eine zweite Lichtquelle in das Interferometer einzuspeisen, die z.B. als Referenzlichtquelle für bestimmte Messungen eingesetzt werden kann. Bei gleichzeitigem Einsatz optischer Filter vor den Interferometerausgängen, können diese gleichzeitig in das Interferometer eingespeist und detektiert werden. Die zwei getrennten Arme eröffnen dem Mach-Zehnder Interferometer eine weitere Anzahl von möglichen Anwendungen. Durch Einführen einer Probe  $P$  in einen der beiden Messarme wie in Abbildung 2.6 dargestellt, kann diese auf ihren Brechungsindex vermessen werden. Auch die Messung von Dichteschwankungen in der Luft aufgrund von Druckänderungen in Windkanälen ist möglich [13] und zeigt, wie empfindlich optische Interferometersysteme reagieren. Weitere Einsatzgebiete des

Mach-Zehnder Interferometers werden im Rahmen dieser Arbeit in den Folgekapiteln aufgezeigt. Soll ein Arm eines Mach-Zehnder Interferometers über einen Aktor in seiner Länge variierbar sein um optische Gangunterschiede zu erzielen, ist dessen Anordnung der optischen Komponenten z.B. wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben zu modifizieren. Für miniaturisierte Interferometersysteme finden sich in der Mikrosystemtechnik eine Vielzahl verschiedener Mikroaktoren.

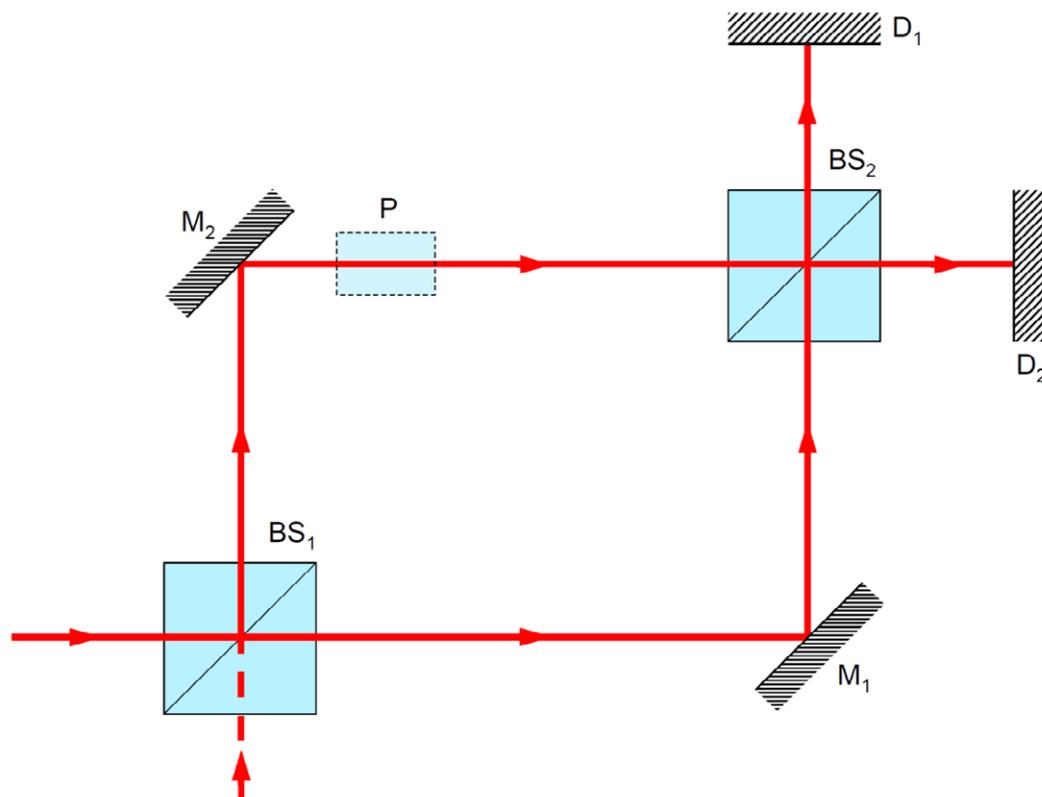


Abbildung 2.6: Mach-Zehnder Interferometer mit optionalem Referenzeingang ( $BS_1$  gestrichelt) und optionaler Probe  $P$  deren Brechungseigenschaften charakterisiert werden können.

### 2.3 Mikroaktorprinzipien

Für die Herstellung von Mikroaktoren werden unterschiedliche Aktorprinzipien eingesetzt, die teilweise aus der makroskopischen Welt abstammen oder speziell für die Anwendung im mikroskopischen Maßstab entwickelt wurden. Aktorprinzipien, die aus der makroskopischen Welt auf Mikrometermaßstäbe herunterskaliert wurden (Top Down Prinzip), sind meist aufgrund der hohen Komplexität und dem damit

verbundenen Herstellungsaufwand sehr teuer. Die mit ihnen zu erreichenden Auflösungen und Positioniergenauigkeiten sind aufgrund ihrer fertigungsbedingten Toleranzen, im Vergleich zu Mikroaktoren auf Basis speziell entwickelter Prinzipien, meist unterlegen. Beispiele für diese Aktoren sind Motoren der Smoovy®-Serie der Faulhaber Group [14], welche optional mit Planetengetrieben kombinierbar sind oder Mikroreluktanzaktoren [15] [16] [17], deren Aufbau dem handelsüblicher Schrittmotoren ähnelt.

Weiterführend existieren aus der makroskopischen Welt abgeleitete pneumatisch und hydraulisch betriebene Mikroaktoren [18]. Diese sind für das in der vorliegenden Arbeit behandelte Anwendungsgebiet nicht geeignet, auf sie wird im Folgenden nicht näher eingegangen. Ihre Anwendungsgebiete liegen hauptsächlich im Bereich der Greif- und Positioniertechnik in Verbindung mit mechanischen Anschlägen.

Ein gemeinsames Problem aller miniaturisierter Aktoren ist neben der äußerst schwer einzustellenden Spielfreiheit die Reibung und Adhäsion zwischen den zueinander beweglichen Teilen. Die Positioniergenauigkeit liegt bei diesen Aktoren meist nur im zweistelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich. Abhilfe bieten Aktorprinzipien, die speziell für die Anwendung im Mikrometerbereich entwickelt wurden. Diese haben weniger mit den Pro-

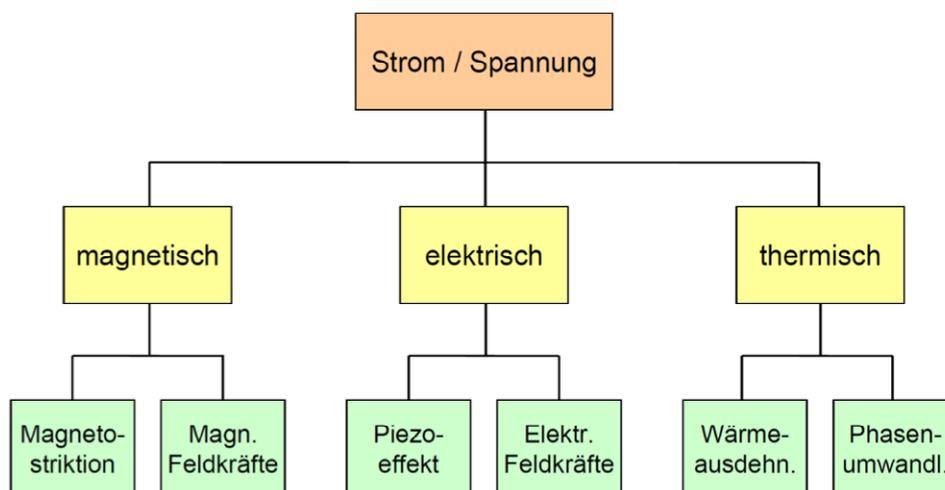


Abbildung 2.7: Einteilung elektromechanischer Aktorprinzipien nach [19].

blemen der makroskopischen Welt zu kämpfen. Viel mehr spielen hier physikalische Effekte, wie die Adhäsion zwischen den Mikrobauteilen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Für den Aufbau von Mikrointerferometersystemen und den damit erforder-

lichen Positioniergenauigkeiten herab bis in den nm-Bereich, spielen diese Mikroaktorprinzipien die weitaus bedeutendere Rolle. In den folgenden Teilkapiteln werden die Funktionsprinzipien der am weitesten verbreiteten Mikroaktoren die allesamt auf elektromechanischen Prinzipien beruhen kurz vorgestellt. Eine Klassifizierung dieser Mikroaktoren ist nach Abbildung 2.7 in Anlehnung an [19] möglich.

### 2.3.1 Formgedächtnismikroaktoren

Der Formgedächtniseffekt basiert auf einer temperaturabhängigen Gitterumwandlung eines Polymers, einer Keramik oder einer metallischen Legierung die im Allgemeinen als Formgedächtnislegierungen bezeichnet werden. Bei niedrigen Temperaturen geht die Legierung in den martensitischen Gitterzustand über, in der Hochtemperaturphase, sprich beim Erwärmen, wird die Kristallstruktur in ein austenitisches Gitter umgewandelt. Eine wichtige Eigenschaft für das Auftreten von Formgedächtniseffekten ist das Vorhandensein von gleichberechtigten Schersystemen, die sich aus den Symmetrien der Elementarzelle des entsprechenden Materials ergibt. Liegt eine Gleichverteilung dieser Schersysteme vor, ist von außen kein Formgedächtniseffekt zu erkennen. Dies ist z.B. bei Stahl der Fall, der trotz Martensit-Austenit-Umwandlung keinen, von außen erkennbaren Formgedächtniseffekt aufweist. Um einen Formgedächtniseffekt hervorzurufen bedarf es zum Beispiel einer metallischen Legierung, bei dessen Verformung bestimmte Scherebenen bevorzugt werden. Eine der bekanntesten Formgedächtnislegierungen ist NiTi. Ein wichtiger Aspekt für den Einsatz einer Formgedächtnislegierung als Aktor ist die Einteilung der, zur Verfügung stehenden Formgedächtnismaterialien, bezüglich ihrer Umwandlungsmöglichkeiten in Legierungen mit Einweg- und Zweiweg-Formgedächtniseffekt. Materialien mit Einwegeffekt können nach einer plastischen Verformung im martensitischen Zustand durch Erwärmen in ihren ursprünglichen Zustand zurückverformt werden (Martensit-Austenit-Umwandlung). Bei der Abkühlung (Austenit-Martensit-Umwandlung) wird dieser Zustand beibehalten (siehe Abbildung 2.8 links, Reihenfolge B-C-A-B). Bei dem Zweiwegeffekt kann sich die Legierung an zwei Zustände erinnern (siehe Abbildung 2.8 links, Reihenfolge A-C-A). Es findet eine Formumwandlung beim Erwärmen und erneut eine Formumwandlung beim Abkühlen statt. Dieser Effekt wird auch als intrinsischer Zweiwegeffekt bezeichnet. Um einen Zustand dieser Art in einem Material hervorzurufen, ist die Legierung zu trainieren und damit das

Ausbilden einer bevorzugten Martensitvariante zu fördern. Für den Einsatz als Aktor bietet dieser Typ von Formgedächtnislegierungen den Vorteil, dass sich der Aktor in zwei Raumrichtungen bewegen kann. Im Falle einer Einweglegierung muss die Rückstellung des Aktors von außen über anliegende Kräfte erfolgen. Dies kann beispielsweise bei ferromagnetischen Formgedächtnislegierungen wie NiTi durch einen Permanentmagneten erfolgen. Unterhalb der Curietemperatur ist die Formgedächtnislegierung ferromagnetisch und kann durch die Kräfte des Permanentmagneten verformt werden, oberhalb der Curietemperatur geht die ferromagnetische Eigenschaft verloren und die Legierung kann sich in ihren Ursprungszustand verformen. Arbeiten zwei Einweglegierung gegeneinander wird dies als äußerer Zweivegeeffekt bezeichnet.

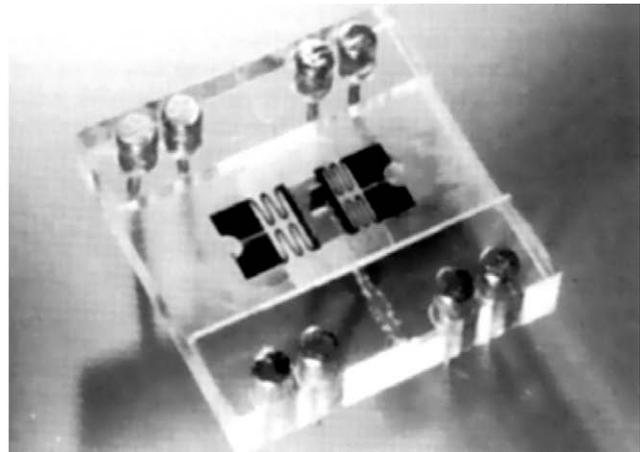
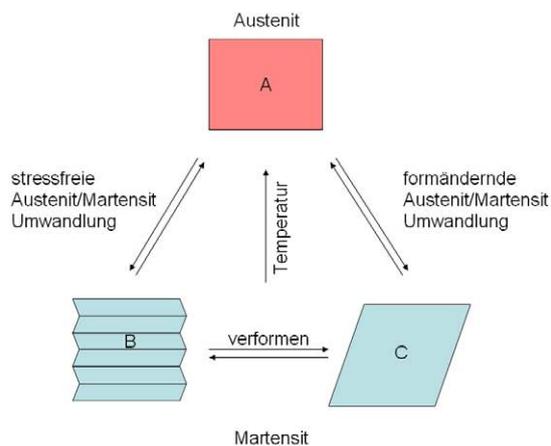


Abbildung 2.8: Links Gitterumwandlung nach der Verformung einer Formgedächtnislegierung unter Temperatureinfluss von der Austenit- in die Martensitphase und umgekehrt in Anlehnung an [20]. Rechts ein Linearaktor auf Basis von Formgedächtnislegierungen mit einem Verstellbereich von bis zu 50  $\mu\text{m}$  und einer Positioniergenauigkeit von bis zu 0,4  $\mu\text{m}$  [20].

Abbildung 2.8 rechts zeigt einen Formgedächtnislinearaktor bestehend aus zwei gegeneinander wirkenden Einwegformgedächtnisaktoren, die über einen Steg miteinander verbunden sind. In Tabelle 2.1 sind die Eigenschaften der Formgedächtnismikroaktoren bezüglich ihrer Anwendbarkeit in mikroiinterferometrischen Systemen in Vor- und Nachteile gegliedert dargestellt. Typische Anwendungen von Formgedächtnismikroaktoren sind beispielsweise Mikrogreifer [22], optische Mikroscanner [23] oder Mikroventile [24].

Typ	Vorteile	Nachteile
Formgedächtnismikroaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Kräfte</li> <li>• große Verstellwege (&gt; 1 mm)</li> <li>• sehr einfaches Funktionsprinzip</li> <li>• preiswert</li> <li>• kleine Bauform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für interferometrische Anwendungen zu geringe Positioniergenauigkeit</li> <li>• Aktor erfordert zum Betrieb systembedingt wechselnde Temperaturen von einigen °K</li> <li>• Auflösungen im Bereich von ca. 0,4 µm möglich</li> <li>• träge</li> <li>• Energiezufuhr zum Halten einer Position</li> </ul>

Tabelle 2.1: Eigenschaften von Formgedächtnismikroaktoren bezogen auf eine Anwendung in mikrointerferometrischen Systemen.

### 2.3.2 Magnetostruktive Mikroaktoren

Magnetostruktive Mikroaktoren nutzen den Joule-Effekt, der die Längenänderung eines ferromagnetischen Körpers in Magnetisierungsrichtung bei konstantem Volumen beschreibt. Je nach Material sind Längenänderungen  $dl/l$  von 0,15-0,2 % möglich. Als eines derzeit am Häufigsten eingesetzten Materialien gilt das hochmagnetostruktive Terfenol-D (eine Tb-Dy-Fe Verbindung) eingesetzt. Derzeit befinden sich diese Aktoren noch im Entwicklungsstadium und stehen für industrielle

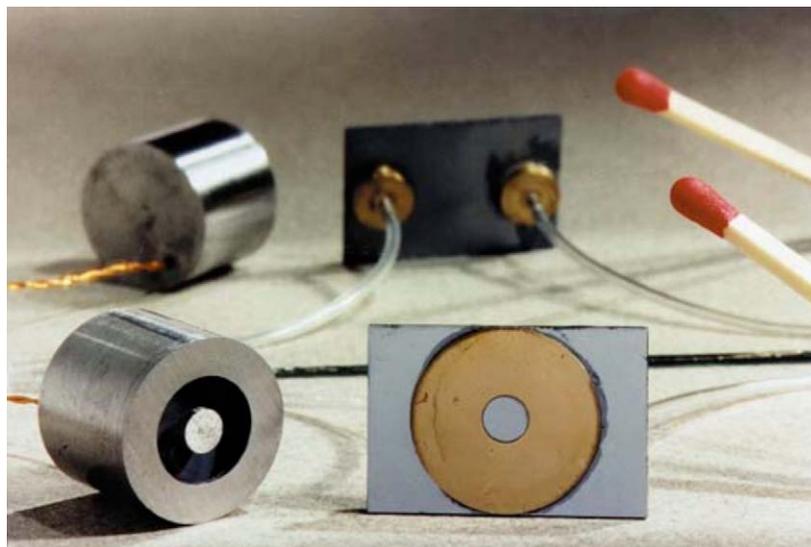


Abbildung 2.9: Magnetostruktive Mikroaktoren [21].

Aktoranwendungen nicht zur Verfügung. Eigenschaften dieser Aktoren sind sehr hohe Kräfte bei hoher Dynamik und kurzen Stellwegen mit hoher Positioniergenauigkeit. Um große Verstellwege zu erreichen, können magnetostruktive Mikroaktoren auch nach dem Inchwormprinzip, das in Kapitel 2.3.7 näher erläutert wird, betrieben werden. In Abbildung 2.9 sind verschiedene Aufbauformen magnetostruktiver Mikroaktoren des Instituts für Materialforschung am Forschungszentrum Karlsruhe GmbH dargestellt. Tabelle 2.2 zeigt die Eigenschaften magnetostruktiver Mikroaktoren bezüglich ihrer Anwendbarkeit in mikrointerferometrischen Systemen.

Typ	Vorteile	Nachteile
Magnetostruktive Mikroaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Kräfte (einige N)</li> <li>• große Verstellwege (über Inchwormprinzip)</li> <li>• sehr einfaches Funktionsprinzip</li> <li>• hohe Positioniergenauigkeit und Auflösung (wie Piezoaktoren)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• teuer im Vergleich zu Piezoaktoren</li> <li>• Feldspule mit ständiger Erregung erforderlich (magnetische Vorspannung)</li> <li>• magnetische Erregung zum Halten einer Position erforderlich</li> <li>• mechanische Vorspannung nötig</li> <li>• hoher Leistungsbedarf &amp; Ohmsche Verluste → Erwärmung</li> <li>• stark nichtlinear &amp; hysteresebefahet</li> <li>• mangelnde Verfügbarkeit</li> </ul>

Tabelle 2.2: Eigenschaften von magnetostruktiven Mikroaktoren bezogen auf eine Anwendung in mikrointerferometrischen Systemen.

### 2.3.3 Elektrostatische Mikroaktoren

Elektrostatische Mikroaktoren basieren auf dem Prinzip des Plattenkondensators. Durch Anlegen einer Spannung  $U$  an die Kondensatorplatten entsteht zwischen den Platten eine anziehende Kraft entlang der Feldgradienten. In Form eines an Balkenfedern aufgehängten Plattenkondensators kann diese Kraft in eine Wegänderung  $\Delta l$  überführt und das Funktionsprinzip als Mikroaktor eingesetzt werden. Die resultierende Kraft des Mikroaktors ist dabei proportional zum Quadrat der Spannung und zur Fläche der Kondensatorplatten. Aus Gründen der Effektverstärkung werden elektrostatische Mikroaktoren meist als Kammstrukturen ausgebildet, die eine größere Kondensatorplattenoberfläche darstellen und daraus resultierend höhere Stellkräfte des Mikroaktors erzielen. In Abbildung 2.10 ist ein, nach diesem Prinzip aufgebauter elektrostatischer Mikroaktor dargestellt [25]. Der lineare Bewegungsfreiheitsgrad des Mikroaktors ist durch einen Pfeil gekennzeichnet. Die Rückstellung des Ankers in die

Ruhelage erfolgt durch Balkenfedern, die dem Wirkprinzip des Mikroaktors entgegenwirken. Die maximale Auslenkung des Mikroaktors wird hierbei maßgeblich durch den Plattenabstand des Kondensators vorgegeben, der quadratisch umgekehrt proportional in die Kräftebilanz eingeht. Ein zu geringer Abstand der Kondensatorplatten hingegen führt zum Kurzschluss und damit zum Versagen des Mikroaktors.

Um den maximalen Verstellweg des Aktors zu erhöhen kann alternativ eine, um  $90^\circ$  relativ zu den Balkenfedern gedrehte Aktorgeometrie aufgebaut werden. In diesem Fall kommt der Effekt zum tragen, dass sich versetzte Kondensatorplatten so lange gegenseitig anziehen, bis sich die Kondensatorplatten komplett überdecken. Die Auslenkung des Mikroaktors wird bei diesem Prinzip ebenfalls durch den Kondensatorplattenabstand begrenzt, bei dem die Kondensatorkraft gerade so groß ist, wie die Rückholkraft der Federn. Um den physikalischen Effekt zu verstärken, werden auch bei diesem Anordnungsprinzip die Kondensatorplatten in Form von Kammstrukturen ausgeführt [28].

Elektrostatische Mikroaktoren eignen sich z.B. für optische Ablenkssysteme in Verbindung mit Spiegeln, z. B. um Strahlengänge in optischen Systemen zu justieren. Ihre Herstellung erfolgt meist in Siliziumtechnik [26] [27]. Aufgrund der geringen

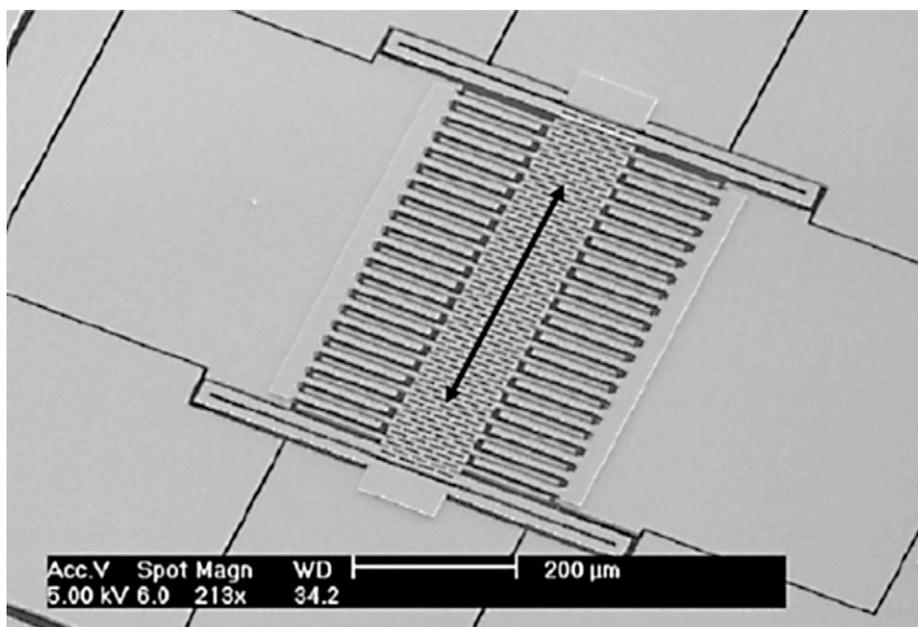


Abbildung 2.10: Elektrostatischer Mikroaktor mit Kammstrukturen [25]. Die Bewegungsrichtung des linearen Mikroaktors ist durch einen Pfeil gekennzeichnet.

Traglasten sind die Spiegel meist in das Design des Mikroaktors integriert und ebenfalls aus Silizium gefertigt. Tabelle 2.3 stellt die Eigenschaften elektromagnetischer Mikroaktoren im Bezug auf eine Anwendung in mikrointerferometrischen Systemen gegenüber.

Typ	Vorteile	Nachteile
Elektrostatische Mikroaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Herstellung mittels Si- oder LIGA-Technik</li> <li>• montagefreie parallelisierte Fertigung</li> <li>• bei lateralen Prinzip ist Kondensatorkraft wegunabhängig</li> <li>• keine Energiezufuhr im statischen Betrieb (Ladung konstant halten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nichtlinearer Kraft-Weg Verlauf (senkrechttes Prinzip)</li> <li>• nur geringe Verstellwege (wenige <math>\mu\text{m}</math> bei senkrechtem Prinzip, wenige <math>100\ \mu\text{m}</math> bei lateralem Prinzip)</li> <li>• sehr geringe Kräfte (laterales Prinzip)</li> <li>• Kontakt der Kondensatorplatten muss vermieden werden</li> <li>• möglichst geringer Plattenabstand</li> <li>• Stellweg des lateralen Aktors wird durch Federkraft begrenzt</li> <li>• wegen Spannungsüberschlägen ist Betriebsspannung begrenzt</li> </ul>

Tabelle 2.3: Eigenschaften elektrostatischer Mikroaktoren mit Bewertung bezüglich einer Anwendung in mikrointerferometrischen Systemen.

### 2.3.4 Elektrothermische Mikroaktoren

Elektrothermische Mikroaktoren werden hauptsächlich in Form von Biegeaktoren realisiert. Ähnlich einem Bimetallstreifen werden zwei elektrisch leitende Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten fest miteinander verbunden. Durch Anlegen einer Spannung und dem damit verbundenen Stromfluss wird der Leiter, bestehend aus den zwei Metallschichten, auf elektrischem Wege erwärmt. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Metallschichten führen dabei zu einem wärmeinduzierten Längenunterschied beider Metallschichten. Die, fest miteinander verbunden, zu einer Verbiegung des Mikroaktors aufgrund der erzeugten Spannungen zwischen den Metallschichten und somit zur Auslenkung des Aktorelements führen. Diese Biegeaktoren lassen sich beispielsweise gut als „out of plane“ Biegeaktoren [29] unter Verwendung der Siliziumtechnik realisieren (Abbildung 2.11 links). Ein interessantes Konzept für einen planaren elektrothermischen Mikroaktor wurde von der Universität Cambridge in Kooperation mit der Universität Southampton entwickelt [30]. Durch geschickte Anordnung mehrerer Biegeaktoren wird die Biegebewegung dieser Aktoren in eine Linearbewegung

überführt. Verbindungsstege erzwingen dabei eine Auslenkung der Gesamtstruktur in nur eine Richtung (Abbildung 2.11 rechts). In Tabelle 2.4 sind die Eigenschaften elektrothermischer Mikroaktoren aufgelistet.

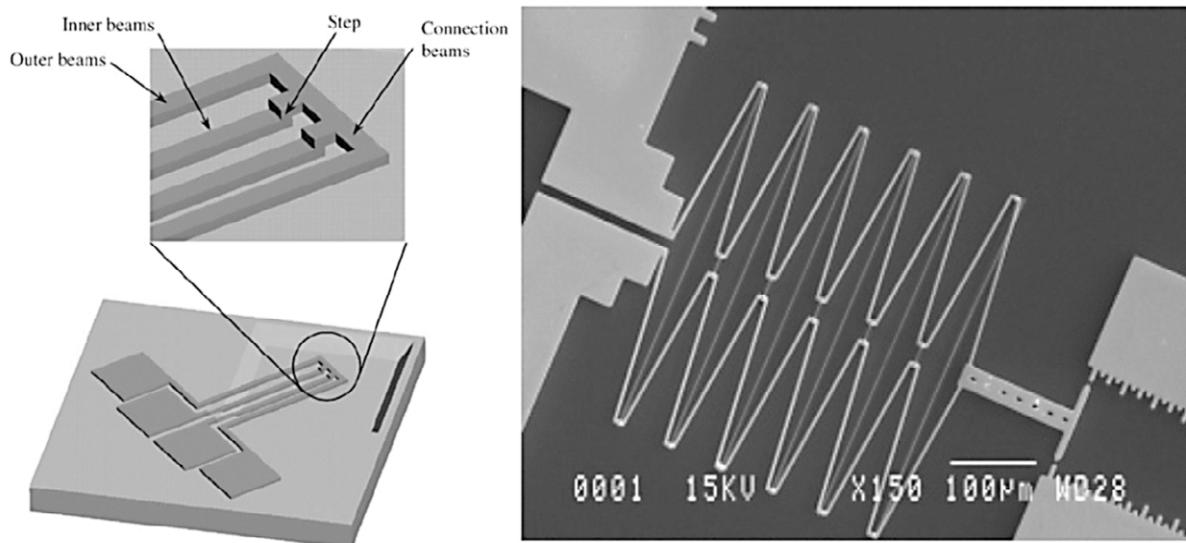


Abbildung 2.11: Links elektrothermischer „out of plane“ Biegeaktor [29], rechts planarer elektrothermischer Aktor [30].

Typ	Vorteile	Nachteile
Elektrothermische Mikroaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>montagefrei in Si Technik herstellbar</li> <li>sehr kleine Aktoren möglich</li> <li>5-10 V Betriebsspannung bereits ausreichend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>max. Verstellwege der Linearaktoren von 40-100 µm, durch Federkraft begrenzt</li> <li>Biegeaktoren Verstellwege &lt; 40 µm (max. 10% der Armlänge)</li> <li>hohe Temperaturen 1000 -1200° K</li> <li>schlechte Positioniergenauigkeit, (Temperaturschwankung, Luftzug)</li> <li>Positioniergenauigkeit ±0,3 µm [31]</li> <li>Energiezufuhr im statischen Betrieb notwendig (Abwärmeverluste)</li> <li>geringe Kräfte, und Traglasten</li> </ul>

Tabelle 2.4: Eigenschaften elektrothermischer Mikroaktoren mit Bewertung bezüglich einer Anwendung in mikrointerferometrischen Systemen.

### 2.3.5 Elektromagnetische Mikroaktoren

Die Funktionsweise elektromagnetischer Mikroaktoren basiert auf dem Induktionsprinzip. Über eine Spule wird ein magnetisches Feld  $B$  erzeugt, sobald diese von einem Strom  $I$  durchflossen wird. Der auf diese Weise erzeugte magnetische Fluss wirkt auf den Anker des Aktors, der wiederum eine, dem magnetischen Feld proportionale Kraft  $F$  erzeugt, die in der Literatur als Lorentz-Kraft bekannt ist. Diese Kraft lenkt den Anker des elektromagnetischen Mikroaktors um einen Weg  $\Delta l$  aus. Die magnetischen Kräfte wirken jedoch nur einseitig und ziehen den Anker an die Polschuhe des Elektromagneten heran, weshalb sie nur zur Auslenkung des Mikroaktors aus seiner Ruhelage eingesetzt werden können. Ähnlich dem Aufbauprinzip der elektrostatischen Mikroaktoren erfolgt das Rückholen des Ankers in die Ruhelage durch Federn, an denen der Anker frei schwebend aufgehängt ist. Im Vergleich zu elektrostatischen Mikroaktoren bieten elektromagnetische Mikroaktoren eine deutlich höhere Energiedichte und können bei größeren Luftspalten zwischen den Polschuhen und dem Anker betrieben werden, wodurch größere Stellwege dieser Aktoren resultieren [34]. Die Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzung ist geringer als bei den elektromagnetischen Aktoren. Die maximal zu erreichenden Aktorkräfte werden hauptsächlich durch zwei Faktoren bestimmt, dies ist zum einen die magnetische Sättigung des verwendeten Mikroaktormaterials und zum anderen der Spulenstrom, der andererseits nachteilig zum Erwärmen der Spule führt. Zusätzlich bestimmt die Polschuhgeometrie den maximalen Stellweg des Mikroaktors und hat gleichzeitig einen Einfluss auf die Steuercharakteristik des Aktors [33]. Häufig werden aus diesem Grund Polschuhe mit Kammstrukturen eingesetzt [32] [33]. Eine Übersicht unterschiedlicher Polschuhprinzipien ist in [33] zu finden. Im Vergleich zu elektrostatischen Mikroaktoren sind die erforderlichen Steu-

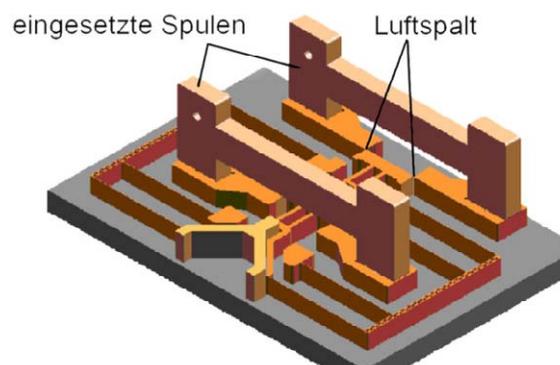


Abbildung 2.12: Aufbau eines elektromagnetischen Mikroaktors [32].

Typ	Vorteile	Nachteile
Elektro-magnetische Mikroaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflösung von ca. 5 nm</li> <li>• Positioniergenauigkeit 10 nm</li> <li>• Verstellwege 500 µm - 1 mm</li> <li>• reibungsfrei</li> <li>• niedrige Spannung &lt; 10 V</li> <li>• einfache Aktorstuerung</li> <li>• Auslenkung, Strom und Kraft sind linear</li> <li>• indirekte induktive Positionsmessung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Energiebedarf (Ströme ca. 50-100 mA)</li> <li>• sehr genaue Spannungsregelung erforderlich (µV Bereich)</li> <li>• Sollposition nur unter ständiger Energiezufuhr haltbar (ca. 20-25 mW)</li> <li>• gute Positionsregelung erforderlich</li> <li>• starke Erwärmung des Aktors bei großen Verstellwegen</li> </ul>

Tabelle 2.5: Eigenschaften von elektromagnetischen Mikroaktoren bezogen auf eine Anwendung in mikroiinterferometrischen Systemen.

erspannungen gering. Die Ströme liegen meist im Bereich bis ca. 100 mA. Durch Stapeln mehrerer dieser Mikroaktoren kann die erzielbare Aktorkraft sowie die Empfindlichkeit erhöht werden [35]. Über die Messung der Selbstinduktion besteht zusätzlich die Möglichkeit, eine induktive Positionserfassung mit in diese Art von Mikroaktoren zu integrieren [36]. Die Herstellung erfolgt häufig in LIGA-Technik [32] [33] [35] [36]. Der schematische Aufbau eines elektromagnetischen Mikroaktors ist in Abbildung 2.12 dargestellt. In Tabelle 2.5 finden sich die Eigenschaften elektromagnetischer Mikroaktoren im Hinblick auf interferometrische Anwendungen.

### 2.3.6 Piezoaktoren

Piezoaktoren bestehen meist aus künstlich hergestellten keramischen Werkstoffen wie Bariumtitanat, Strontiumtitanat oder Mischsystemen wie Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) [37] und stehen in verschiedenen Bauformen kommerziell zur Verfügung. Der Piezoeffekt tritt zudem bei Kristallen wie Lithiumniobat, Zinkoxid oder Quarz auf [38]. Durch das Ausüben einer Kraft auf einen Piezoquarzkristall baut sich an diesem eine elektrische Ladung auf. Der Effekt wurde von den Entdeckern Jacques und Pierre Curie als Piezoeffekt bezeichnet. Umgekehrt besteht die Möglichkeit, durch Anlegen einer Spannung an einen Piezokristall eine Ladungsänderung herbeizuführen, welche wiederum eine Längenänderung des Piezokristalls zur Folge hat. In der Piezotechnik kommen zwei wesentliche Effekte der Piezokeramiken, der Longitudinal- und der Transversaleffekt zum Einsatz, um eine Aktorfunktion zu realisieren. Beim Longitudinaleffekt oder auch Längseffekt wirkt die mechanische Kraft und damit die

Längenänderung in Richtung des angelegten Feldes, beim Transversaleffekt oder auch Quereffekt wirkt die mechanische Kraft und damit die Längenänderung senkrecht zum angelegten Feld [37]. Piezoaktoren sind somit elektro-mechanische Wandler und sind aus elektrischer Sicht als Kapazitäten anzusehen, wodurch eine Energiezufuhr nur im aktiven Betrieb erforderlich ist [38]. Ein, unter Verwendung von Piezokristallen zu berücksichtigender Nachteil ist, dass die Arbeitstemperatur im Umfeld des Piezos unterhalb der Curietemperatur für das entsprechende Piezomaterial liegen muss. Oberhalb der Curietemperatur gehen die Piezoeigenschaften des Quarzkristalls verloren, es liegt eine kubische Perowskit Struktur vor. Unterhalb der Curietemperatur können z.B. bei PZT im Phasendiagramm drei unterschiedliche Phasen entstehen, von denen eine antiferroelektrisch und zwei ferroelektrisch sind. Bei ausgewogenen Mischverhältnissen herrschen nur die ferroelektrischen Phasen vor, die auf der Ti-reichen Seite tetragonaler Struktur und auf der Zr-reichen Seite rhomboedrischer Struktur sind. An den Phasenübergängen liegen somit beide Strukturen parallel nebeneinander vor und können durch Anlegen äußerer Felder zum Wechsel der Struktur und damit zur Formänderung angeregt werden [37]. Piezoantriebe sind in den verschiedensten Bauformen sehr gut verfügbar und erreichen mit den von den Herstellern mitgelieferten Steuergeräten, die unter anderem zum Ausgleichen von Nichtlinearitäten und Hystereseschleifen dienen, höchste Positioniergenauigkeiten bis herab in den nm Bereich. In Abbildung 2.13 sind die

Genutzter Piezoeffekt	Longitudinal		Transversal			
Standard-Bauformen						
	Stapelaktor	Stapel mit Hebel	Streifen-Aktor	Zylinder-Aktor	Biege-wandler	Biege-scheibe

Abbildung 2.13: Übersicht wichtiger Bauformen von Piezoaktoren und ihrer Zuordnung zum genutzten Piezoeffekt [37].

technisch bedeutendsten Bauformen von Piezoaktoren dargestellt. Häufig werden einzelne Piezokristalle zur Effektverstärkung zu Stapel- oder Streifenaktoren verbunden. Biegeaktoren bestehen entweder unimorph aus einer piezoelektrischen und einer nicht piezoelektrischen Schicht oder bimorph aus zwei piezoelektrischen Schichten, die miteinander verbunden sind [37]. Je nach Anwendungsfall können Hochvolt- (ca. 1000 V) oder Niedervoltpiezokeramiken (ca. 100 - 120 V) eingesetzt werden. Die Anwendungsgebiete für Piezoaktoren sind vielfältig. Neben dem Einsatz von handelsüblichen Bauformen wie z.B. in Positioniersystemen, existieren Anwendungsfelder z.B. in Festplattenlaufwerken [39] [41], mikrofluidischen und mikrohydraulischen Anwendungen [40] oder auch als Scanner in Form von AFM Cantilevern [41] sowie Membranaktoren in Mikropumpen [41]. In Tabelle 2.6 sind die Eigenschaften von Piezoaktoren gegenüber gestellt.

Typ	Vorteile	Nachteile
Piezo-mikroaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Positioniergenauigkeiten im Sub nm Bereich</li> <li>• sehr steif (mehrere 100 N/μm) → hohe Resonanzfrequenzen</li> <li>• hohe Kräfte (N-Bereich)</li> <li>• statischer Betrieb ohne Energiezufuhr</li> <li>• kommerziell Verfügbar</li> <li>• ausgereift Technik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Spannungen</li> <li>• Regelung erforderlich, da sonst Hysterese auftritt</li> <li>• Längenänderung von ca. 0,2% → geringe Verstellwege</li> <li>• nur unterhalb der Curietemperatur einsetzbar</li> </ul>

Tabelle 2.6: Eigenschaften von Piezoaktoren bezogen auf eine Anwendung in mikrointerferometrischen Systemen.

### 2.3.7 Inchwormaktoren

Der Name Inchworm<sup>®</sup> ist ein eingetragener Handelsname der Burleigh Instruments Inc. [44], der häufig als Synonym für lineare Schrittmotoren, die nach dem im Folgenden beschriebenen Prinzip arbeiten, verwendet wird. Diese Antriebe wurden von der Firma Burleigh im Jahre 1974 patentiert [42] [43] und werden häufig durch Kombination mehrerer Piezoaktoren realisiert, die sich durch ihre hohe Präzision, jedoch auch durch geringe Verstellwege kennzeichnen. Alternativ zu Piezoaktoren ist unter anderem der Einsatz von magnetostriktiven Mikroaktoren [45], elektrostatischen Mikroaktoren [46] möglich. Eine geschickte Anordnung mehrerer Aktoren ermöglicht es, den Vorteil von Aktoren mit hoher Präzision z.B. der Piezoaktoren auf eine

größere Wegstrecke zu übertragen. Dabei bewegt sich der Inchwormaktor, in Anlehnung an die Tierwelt, vom Prinzip her ähnlich wie eine Raupe. Das ursprüngliche Inchwormprinzip basiert auf einer Anordnung mit drei Aktoren, von denen zwei zum Klemmen der beweglichen Achse und einer zur Realisation der Vorwärtsbewegung dienen. Alternative Konzepte setzen für die Vorwärtsbewegung auch andere Aktortypen wie z. B. Biegeaktoren ein. Abbildung 2.14 zeigt schematisch das Aufbauprinzip eines, auf drei linear arbeitenden Piezoaktoren basierenden Inchwormaktors [47].

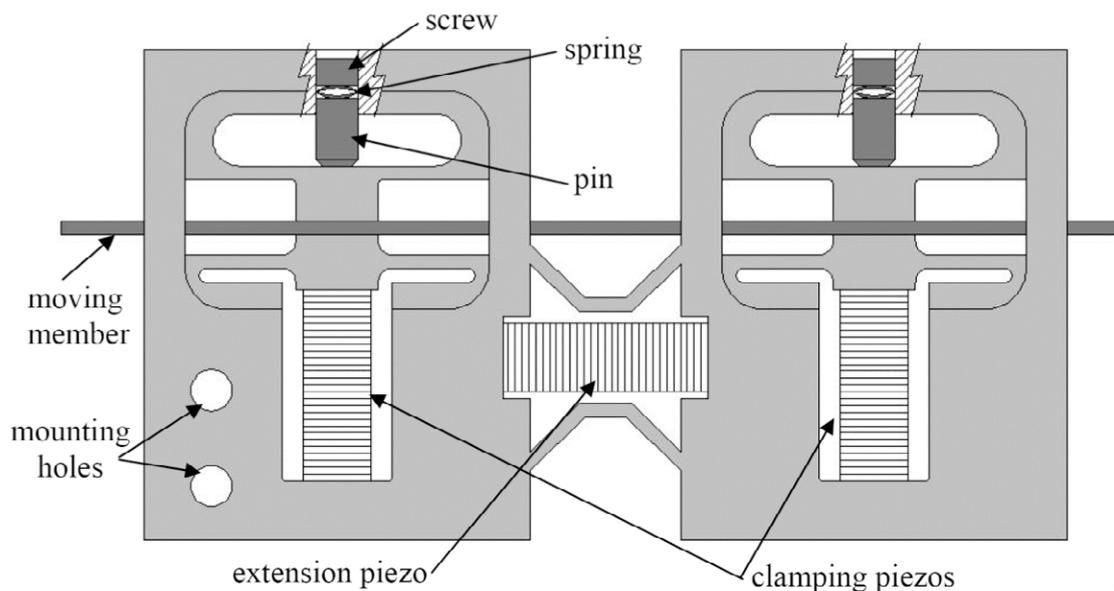


Abbildung 2.14: Prinzipskizze eines Inchworm Mikroaktors mit zwei piezobasierten Klemmelementen und einem Piezokristall für die Längsbewegung [47].

Zu Beginn sind alle drei Piezoaktoren spannungslos. Um die in Abbildung 2.14 dunkelgrau dargestellte Linearachse z.B. nach rechts zu bewegen, müssen die Aktoren nach folgender Schrittfolge angesteuert werden. Der linke Klemmpiezo bleibt gelöst, der Rechte wird durch Anlegen einer Spannung ausgedehnt und mit der Linearachse durch Klemmen verbunden. Durch Anlegen einer Spannung an den an den mittleren Piezokristall dehnt sich dieser ebenfalls aus und bewegt das lineare Achsenelement nach rechts. Anschließend wird durch Aktivieren des linken Klemmpiezoes das zu bewegende lineare Achsenelement festgehalten. Der rechte Klemmpiezo wird gelöst und anschließend die Spannung des mittleren Piezokristalls reduziert. Durch das Abfließen der Ladung aus dem mittleren Piezokristall, wird die Längenänderung

aufgehoben. Das zu bewegende lineare Achsenelement hat sich somit um ein definiertes Wegstück nach rechts bewegt. Durch mehrfaches Wiederholen dieses Vorganges kann der Inchwormaktor mit hoher Präzision und hohen Kräften große Wege zurücklegen. Werden beide Klemmpiezoes im beschriebenen Ablauf vertauscht, läuft das lineare Achsenelement nach links.

Eine weitere Realisierungsmöglichkeit für Inchwormantriebe ist das Verwenden mehrerer senkrecht stehender Biegeelemente, die immer paarweise entgegengerichtet arbeiten und somit z. B. einen, auf Ihnen aufgelegten Keramikanker förmlich wie auf Händen tragen. Zum Verfahren der Linearachse wird jedes zweite Biegeelement ausgelenkt und mit dem Läufer verbunden. Anschließend werden diese Biegeelemente in die entgegengesetzte Richtung ausgelenkt und übergeben dort den Keramikanker an ihre Nachbarn. Der darauf folgende Bewegungsschritt unter Verwendung der zweiten Hälfte der Biegeelemente verläuft identisch. Die Schrittweite wird bei dieser Bewegungsform durch die Auslenkespannung der Bewegungselemente bestimmt. Als Biegeelemente kommen meist Piezoelemente zum Einsatz.

Typ	Vorteile	Nachteile
Inchworm-aktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr große Stellwege (typisch einige mm)</li> <li>• positionsstabil</li> <li>• hohe Kräfte</li> <li>• hohe Positioniergenauigkeit (&lt;10 nm)</li> <li>• hohe Verfahrensgeschwindigkeiten (5mm/s)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr komplexer Aufbau</li> <li>• aufwendige Steuerung</li> <li>• schwingende Achse während der Bewegungsphase</li> </ul>

Tabelle 2.7: Eigenschaften von Inchwormaktoren hinsichtlich der Eignung zum Einsatz in mikroiinterferometrischen Systemen.

Inchwormaktoren sind je nach Anwendungsfall in den verschiedensten Bauformen realisierbar. Neben der beschriebenen Varianten, bei denen ein Läufer durch Biegeaktoren oder Linearaktoren bewegt und geklemmt wird, wie in Abbildung 2.14 dargestellt, existieren Inchwormaktoren mit mechanischer Verkeilung des Läufers [48] [49]. Diese Aktoren eignen sich gut für Anwendungen mit hohen Kraftanforderungen. Andere Bauformen, bieten wiederum höhere Genauigkeit bei geringen Kräften und kleiner Bauform. Aktoren dieser Bauart verwenden z.B. einen Piezoaktor für die Linearbewegung. Zur Fixation eines aufgelegten Läufers kommen beispielsweise Elektroden zur Erzeugung elektrostatischer Kräfte zum Einsatz [50] [51].

Für die Realisierung eines aktiv modularen mikrooptischen Systems ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Auswahl geeigneter Mikroaktoren zu treffen. Anhand der Randbedingungen für ein mikrointerferometrisches System, ist diese Auswahl in Kapitel 4.3.1 dargestellt.



### 3 Stand der Technik

Das in dieser Arbeit entwickelte optische System vereint mehrere Gebiete der Wissenschaft. Es nutzt zur Realisierung die Technologien der Mikrosystemtechnik und kann modular an unterschiedliche Aufgabenstellungen angepasst werden. Mikroaktoren spielen für die Systemabstimmung und für gewisse Messanwendungen eine ebenso bedeutende Rolle wie die Signalverarbeitung über eine Datenelektronik und die anschließende Datenverarbeitung am PC. Der aktuelle Stand der Technik ist aus diesem Grund unter verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten, wobei das Hauptaugenmerk auf den Gebieten der modularen Mikrosysteme, der aktiven Mikrosysteme mit Aktorik und Datenerfassung sowie auf dem Gebiet der mikrointerferometrischen Systeme liegt.

Modulare Mikrosysteme kennzeichnen sich im Allgemeinen dadurch, dass sie nicht auf einem einzelnen Substrat als Komplettsystem aufgebaut sind, sondern entsprechend ihrer Funktion in zwei oder mehrere Teilmodule aufgeteilt und getrennt hergestellt werden können. Jedes dieser Teilmodule übernimmt dabei eine Teilfunktion des Gesamtsystems. Die Teilmodule können vom selben Modultyp sein, z.B. beide aus optischen Systemen bestehen, oder auch unterschiedliche Aufgaben oder Funktionen übernehmen. Erste modulare optische Mikrosysteme verfolgten den Ansatz, die einzelnen optischen Funktionen eines Systems, wie z.B. die Teilung von Lichtstrahlen in einzelne Module aufzuteilen [52] [53]. Solche Module, die z. B. aus mechanisch hergestellten Vertiefungen oder aus Lithographisch hergestellten Strukturen bestehen, können als Haltestrukturen für optische Fasern und Spiegel dienen. Das Design der Module ist dabei so zu wählen, dass die einzelnen Module durch einfaches Aneinanderreihen, ähnlich einem Schachbrettmuster, zu beliebig komplexen optischen Systemen kombiniert werden können. Ebenso sind mehrschichtige Systeme möglich, indem die Module nicht nur nebeneinander angeordnet, sondern auch übereinander geschichtet werden. Die Lichtführung über die Modulschnittstellen kann faserbasiert über, in das Substrat integrierte, Wellenleiter oder freistrahloptisch erfolgen.

In [54] [55] und [56] wird ein modulares Mikrosystem namens Match-X beschrieben, welches den Aufbau mikrooptofluidischer Systeme ermöglicht. Die Module bestehen aus kleinen Boxen quadratischer Grundfläche, in der sich das jeweilige Mikrosystem

befindet. Auf der Boden- und Deckelfläche befinden sich die optischen, fluidischen und elektronischen Modulschnittstellen in definierter Anordnung. Je nach Bedarf stehen Module in unterschiedlichen Größen zur Verfügung, die im Inneren je nach Aufgabenstellung mit Sensorik und Elektronik ausgestattet sind. Selbst die Integration von Mikroaktoren z. B. zur Ventilsteuerung ist möglich. Das Verbinden der einzelnen Module zu einem Komplettsystem geschieht durch Stapeln und Verlöten der elektronischen Kontakte und Abdichten der fluidischen Kanäle mittels Dichtringen. Als Basismaterial für die Module können neben Keramiken und Gläsern auch Metalle und Kunststoffe eingesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit modulare Mikrosysteme zu realisieren sind z.B. optische Stecksysteme, auf Basis einer Grundplatine mit Einsteckmodulen zur optischen Datenübertragung mittels Wellenleiterstrukturen [57]. Besonderes Augenmerk gilt hier der Schnittstelle zwischen den Modulen und der Grundplatine, die aufgrund der zu verbindenden Wellenleiter geringste Toleranzen aufweisen muss, um eine möglichst dämpfungsarme Signalkopplung zu gewährleisten. In [57] werden hierzu spezielle Koppellemente zwischen den verwendeten elektrooptischen Modulplatinen eingesetzt.

Eine alternative Technologie zur Herstellung modularer mikrooptischer Systeme wird in [58] [59] [60] erläutert. Bei Systemen dieser Art wird das optische Bauteil als ein komplettes Modul aufgefasst. Der Modulcharakter dieser Systeme bezieht sich vielmehr auf die umgebende Peripherie, wie z.B. der elektrooptischen Platine sowie die Signaleinkopplung und –auskopplung als weitere Module. Abbildung 3.1 zeigt einen, nach diesem modularen Konzept realisierten Abstandssensor, dessen Funktionsweise auf dem Triangulationsprinzip beruht. Basis dieser Systeme bildet eine mikrooptische Bank, die entweder direktlithographisch oder mittels Heißprägen [76] auf Basis LIGA-Technik (siehe Kapitel 6.1) hergestellt wird. Die LIGA Strukturen dienen hierbei selbst in verspiegelter Form als optische Elemente oder stellen Haltestrukturen für die Positionierung von Fasern oder Linsen dar. Über Auskoppelstrukturen werden optischen Signale von der mikrooptischen Bank freistrahloptisch auf die elektrooptische Platine, die als elektronisches Modul dient, ein- bzw. ausgekoppelt. Die Justage der einzelnen Module zueinander erfolgt beispielsweise über Zentrierkugeln aus Glas, die geätzte V-Gruben in Silizium relativ zu entsprechenden Kugelaufnahmen in der mikrooptischen Bank positionieren. Das modulare Konzept ist so weit ausgereift und dahingehend optimiert, dass eine automatisierte Fertigung möglich ist [4].

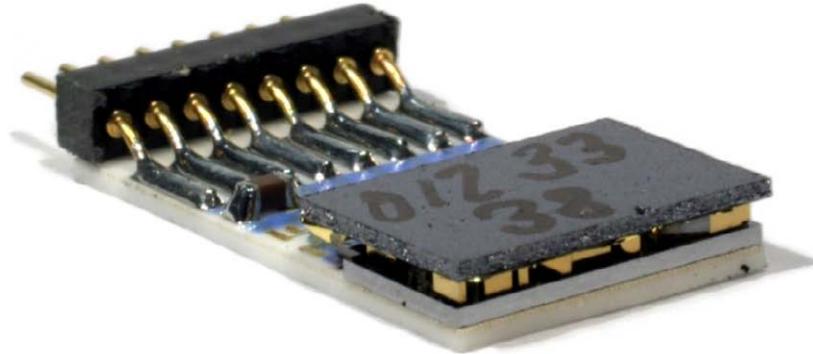


Abbildung 3.1: Modularer Abstandssensor nach dem Triangulationsprinzip.

Für gewisse Anwendungen ist ein modulares Mikrosystem basierend auf elektronischen, optischen und fluidischen Komponenten alleine nicht ausreichend. Viel mehr ist eine aktive Justierung des Systems oder eine Modulation eines systeminternen Signals notwendig, um den gewünschten Messeffekt zu erzielen oder effizient detektieren zu können. Diese Systeme erfordern neben der Integration obiger Komponenten, eine zusätzliche mechanische Einstellbarkeit über einen integrierten Mikroaktor. In den meisten Fällen werden die hierfür eingesetzten Mikroaktoren speziell für die Anwendung in einem Mikrosystem entwickelt und fest in das Mikrosystem integriert, wodurch ihr Einsatz an diese spezielle Anwendung gebunden ist. Im Bereich optischer Mikrosysteme handelt es sich meist um Systeme zur Strahl- ablenkung, Strahlumlenkung oder –fokussierung. Die Mikroaktoren sind häufig mit hochreflektierenden Spiegelflächen ausgestattet oder tragen Mikrolinsen. Beispiele hierfür sind mikrooptische Scanner in Form von optischen Schaltern oder Sensoren [63] sowie mikrooptische Systeme zur Strahlumlenkung in verschiedene optische Pfade in Form vom Mikrolinsen- oder Mikrospiegelarrays [64] [65]. Häufig dienen diese Systeme der Signalumschaltung in der Nachrichtentechnik, bei der ein oder mehrere Systemeingänge auf unterschiedliche Ausgänge geleitet werden müssen oder als Umlenkensysteme in Projektionstechnik. Als Mikroaktoren eignen sich für diese Anwendungen besonders die Mikroaktorprinzipien, die monolithisch integrierbar

sind, also ohne Montage auf einem Substrat in großer Stückzahl prozessiert werden können, wie dies z.B. bei elektrothermischen oder elektrostatischen Mikroaktoren der Fall ist. Eine interessante Arbeit auf diesem Gebiet ist in [66] beschrieben, in der eine  $2 \times 2$  Schaltmatrix auf der Basis von Wobblemotoren realisiert wurde. Jeder Wobblemotor ist mit einem Umlenkspiegelement ausgestattet und lenkt je nach Position das eingekoppelte Licht auf verschiedene Ausgänge. In [32] wurde ein miniaturisierter Fourier-Transformations-Spektrometer in Verbindung mit einem elektromagnetischen Mikroaktor auf einem gemeinsamen Substrat realisiert, der es ermöglicht, einen Arm eines interferometrischen Systems durch eine Linearbewegung zu verfahren, um einen Wechsel der Interferenzsignale herbei zu führen. Mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich kann ein solches System beispielsweise für die Wellenlängendetektion eingesetzt werden. Das System basiert auf einem Keramiksubstrat, auf dem sich mittels LIGA-Technik hergestellte Strukturen aus Nickel-Eisen für den Aufbau des elektromagnetischen Mikroaktors befinden. Die optischen Komponenten wie Linsen, Fasern und der Strahlteilerwürfel sowie die Spulen des Mikroaktors sind hybrid in den Aufbau integriert.

An der Universität Neuchâtel wurde ein mikrointerferometrisches System in Siliziumtechnik realisiert. Das System basiert auf einem Michelson Interferometer, in das ein Strahlteilerplättchen sowie Glasfasern hybrid eingesetzt werden. Die Halte- und Aktorstrukturen des Systems werden durch reaktives Ionenätzen von Silicon on Insulator Wafern hergestellt [68] und beinhalten auf einem Substrat neben einem elektrostatischen Mikroaktor die Spiegel und Haltestrukturen für die hybrid eingesetzten Komponenten. Bei dem realisierten Aufbau handelt es sich um ein Michelson Interferometer dessen Messsignale mittels Fourier-Transformation für Spektrometeranwendungen im sichtbaren Bereich einsetzbar sind [67] [68] [69]. Das komplette Spektrometer hat eine Größe von  $5 \times 5 \times 0,5$  mm. Alternativ wurde auf diesem Konzept unter Verwendung des gleichen Mikroaktors ein binäres Gitterinterferometer realisiert [26], dessen Gittertiefe über den integrierten elektrostatischen Mikroaktor veränderbar ist. In der Anwendung als FT-Spektrometer ist der Gitterinterferometer für einen Wellenlängenbereich von 380 – 1100 nm mit einer Auflösung von 0.5 nm einsetzbar.

Eine weitere Möglichkeit interferometrische Systeme in Siliziumtechnik herzustellen wird in [70] beschrieben. In dieser Arbeit werden auf einem Siliziumsubstrat optische Elemente wie Spiegel mittels Opferschichttechnik in einem photolithographischen

Prozess hergestellt. Die Spiegelstrukturen können anschließend aus der Ebene heraus zu einem Michelson-Interferometer aufgestellt werden.

Als Beispiele für mehrstrahlinterferometrische Systeme seien exemplarisch die Arbeiten [71] [72] genannt. In diesen Arbeiten wurden zwei unterschiedliche Typen von Fabry-Perot Interferometern in Siliziumtechnik unter Anwendung entsprechender Schichttechnologien hergestellt. Im Falle von [71] wurden wabenförmige Spiegelstrukturen in Kombination mit elektrostatischen Mikroaktoren in Arrayanordnung hergestellt. In [72] wurde ein mehrschichtiges Spiegelsystem für eine Anwendung als Fabry-Perot Interferometer realisiert, um die spektrale Bandbreite des Systems sowie die Auflösung zu erhöhen.

Neben der Möglichkeit, interferometrische Systeme freistrahloptisch zu realisieren, existieren alternative Lösungen in optisch integrierter Form. Sie liegen jedoch außerhalb dem Gebiet dieser Arbeit. Auf sie wird hier nicht näher eingegangen. Im makroskopischen Bereich sind freistrahloptische interferometrische Systeme für Mess- [75] und Kommunikationsanwendungen [74] kommerziell erhältlich, auf diese soll hier ebenfalls nicht näher eingegangen werden.

Auf dem Gebiet der mikrointerferometrischen Systeme ist die fehlende Modularität der derzeit bekannten Systeme anzumerken. Zwar gibt es elegante Lösungen, interferometrische und andere aktive optische Systeme mittels unterschiedlicher Verfahren der Mikrosystemtechnik zu realisieren, jedoch sind alle existierenden Systeme in Ihrer Adaptionfähigkeit an unterschiedliche Applikationen stark eingeschränkt. Sowohl Mikroaktorseitig sowie im Hinblick auf die optischen Ein- und Ausgänge sehen diese keine Anpassungsmöglichkeiten vor. Derzeit verfügbare modulare Mikrosysteme besitzen keine optische Schnittstelle zur modularen Anbindung verschiedener Mikroaktoren, die den Anforderungen interferometrischer Systeme genügen. Durchstimmbare interferometerbasierte Anwendungen in modularer Form sind mit Ihnen bis dato nicht zu realisieren. In dieser Hinsicht geht die vorliegende Arbeit neue Wege auf dem Gebiet der Modularisierung aktiv einstellbarer optischer Mikrosysteme.



## **4 Modulares Konzept**

Im Rahmen dieser Arbeit ist das in [58] [59] [60] beschriebene modulare Konzept für optische Sensorsysteme in Hinblick auf neue Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern. Den Ausgangspunkt der Arbeit bildet der in Abbildung 3.1 dargestellte modulare Abstandssensor auf Basis des Triangulationsprinzips. Ähnlich dem Aufbau des nach dem identischen Prinzip realisierten Mikrospektrometers [58] besteht der Aufbau aus zwei Modulen. Einer mikrooptischen Bank, die Licht freistrahloptisch im System führt und einer elektronischen Platine als zweites Modul, die neben einer Detektorzeile, im Falle des Abstandssensors, über eine Laserdiode und über weitere elektronische Bauteile verfügt.

Eine Vergütung der in die LIGA-Haltestrukturen hybrid eingesetzten, ebenfalls im Polymer hergestellten optischen Linsen mit antireflektiven Schichten zur Verbesserung der optischen Eigenschaften ist möglich. In Abbildung 3.1 ist auf der Platine aus Keramik ein Siliziumbauteil aufgebracht, welches zur Justage der über Kopf montierten mikrooptischen Bank relativ zu der Laserdiode und der Detektorzeile dient und somit die Schnittstelle zwischen den beiden Modulen darstellt. Im Falle des Mikrospektrometers ist die Schnittstelle zwischen der mikrooptischen Bank und der Platine auf dieselbe Art und Weise realisiert. Neben der Lichteinkopplung über integrierte Laserdioden besteht die Möglichkeit, Licht über Fasern in das System einzuleiten.

Basierend auf der modularen Technologie, wie sie an passiven Systemen demonstriert wurde, wird in dieser Arbeit das bestehende Konzept um einen Mikroaktor modular erweitert. Dieser ist durch eine geeignete Adaption des Konzeptes ebenfalls modular in das mikrooptische System integrierbar und ermöglicht somit eine aktive Veränderung des optischen Systems.

### **4.1 Konzept des modularen mikrooptischen Systems**

Das zu realisierende modulare mikrooptische System basiert auf einer mikrooptischen Bank, die in LIGA-Technik realisiert wird. Das gesamte modulare System ist im Gegensatz zu den bisherigen Arbeiten jedoch nicht für den Einsatz in einer speziellen,

präzise vordefinierten Anwendung optimiert, sondern vielmehr so ausgelegt, dass es durch eine geeignete Wahl der kombinierbaren Module auf die Anforderungen einer speziellen Applikation anpassbar ist. Das modulare aktive mikrooptische Konzept soll aus diesem Grund die Möglichkeit schaffen, verschiedene Modulkomponenten mit der mikrooptischen Bank zu kombinieren, ohne diese neu anpassen zu müssen. Genauer betrachtet bedeutet dies, dass neben neu entwickelten Mikroaktoren aus der Forschung auch handelsübliche Mikroaktoren mit unterschiedlichen Eigenschaften in das System integrierbar sind. Seitens der Signalführung soll neben der fasergekoppelten Variante eine Möglichkeit der integrierten Datenverarbeitung über, in das System integrierte Photo- und Laserdioden vorgesehen werden. Insgesamt ist das modulare aktive mikrooptische Konzept hierfür mit zwei modularen Schnittstellen auszustatten. In Abbildung 4. ist eine Auswahl an möglichen Variationen dargestellt, die sich aus diesem Konzept ergeben. Für das Verständnis der folgenden Kapitel wird

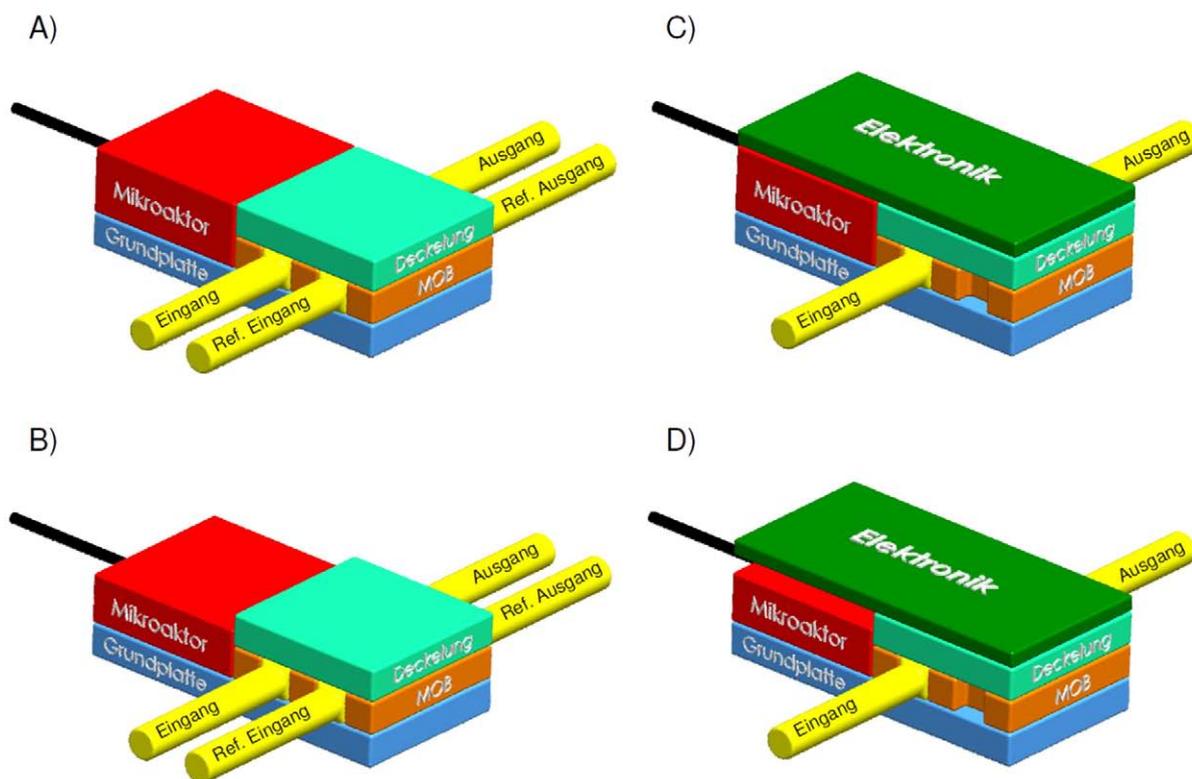


Abbildung 4.1: Konzept für ein modulares mikrooptisches System mit der Möglichkeit zur Anbindung verschiedener Mikroaktoren sowie einer optionalen Datenelektronik mit interner Signalführung.

anhand dieser Auswahl an Kombinationsmöglichkeiten das Konzept des modularen aktiven mikrooptischen Systems erläutert. Die zentrale Komponente des Systems stellt die mikrooptische Bank (orange) dar. An dieser sind in den Varianten A und B vier faseroptische Ein- und Ausgänge zu erkennen. Variante C und D verfügen hingegen nur über einen faseroptischen Ein- bzw. Ausgang. Es wird erkennbar, dass das Design der mikrooptischen Bank über ein flexibles Lichtführungskonzept verfügt. Oberhalb der mikrooptischen Bank befindet sich eine Deckelung (hellgrün), die in den Varianten A und B das System vor Umgebungslicht schützt. Diese beiden Systeme verfügen über eine rein faseroptische Signalführung, wobei das System über mindestens einen Eingang und einen Ausgang verfügen muss. Je nach mikrooptischem System sind weitere Ein- und Ausgänge möglich. Im Falle einer, im System integrierten Signalführung wie in den Varianten C und D dargestellt, ist die Deckelung mit Durchgangsöffnungen versehen, um das Licht in Richtung Platine zu führen. Eine mögliche Integration von Laser- und Photodioden auf einer elektronischen Platine sollte die Einbindung des Systems z. B. in miniaturisierte Messsysteme ermöglichen.

Neben der Schnittstelle der Signalausgabe verfügt das System über eine weitere Schnittstelle, die es ermöglicht, einen, nicht mit auf dem selben Substrat wie die mikrooptische Bank befindlichen Mikroaktor in das System zu integrieren. In Abbildung 4. ist in den Varianten A und C ein Mikroaktor modular mit der mikrooptischen Bank kombiniert. Über eine Grundplatte werden beide Module verbunden und dabei relativ zueinander positioniert. Bei einem System, das für verschiedene Anwendungen einsetzbar sein soll, muss dieser Mikroaktor verschiedensten Anforderungen genügen, die nur in begrenztem Maße von einem einzigen Mikroaktor abgedeckt werden können. Daher sieht das modulare aktive mikrooptische Konzept vor, verschiedene Mikroaktoren je nach Anforderung modular in das System zu integrieren. Dies ist in den Varianten B und D dargestellt, die schematisch angedeutet im Vergleich zu den Varianten A und C über einen alternativen Mikroaktor verfügen.

Die Funktionsweise des modularen aktiven mikrooptischen Systems ist anhand einer mikrooptischen Bank mit optischen Glaskomponenten in Form eines Interferometers zu evaluieren. Ist dieses Konzept erfolgreich, können in naher Zukunft verschiedene mikrooptische Bänke für unterschiedliche Applikationen in das mikrooptische System integriert werden.

Abbildung 4.2 zeigt eine Prinzipdarstellung des optischen Pfades für das modulare aktive mikrooptische System in vereinfachter Form, aufgebaut mit einer mikrooptischen Bank, die ein interferometrisches System enthält. Für die Realisierung des Aufbaus wurde aus den, in Kapitel 2.2 vorgestellten, Interferometersystemen das Mach-Zehnder Interferometer ausgewählt. Im Vergleich zum Michelson-Interferometer verfügt es über zwei gleichwertige um  $180^\circ$  Phasenverschobene Ausgänge und bietet zudem die Möglichkeit der zusätzlichen Signaleinspeisung über einen zweiten Eingang. Das Mach-Zehnder Interferometer wurde in seiner Anordnung leicht

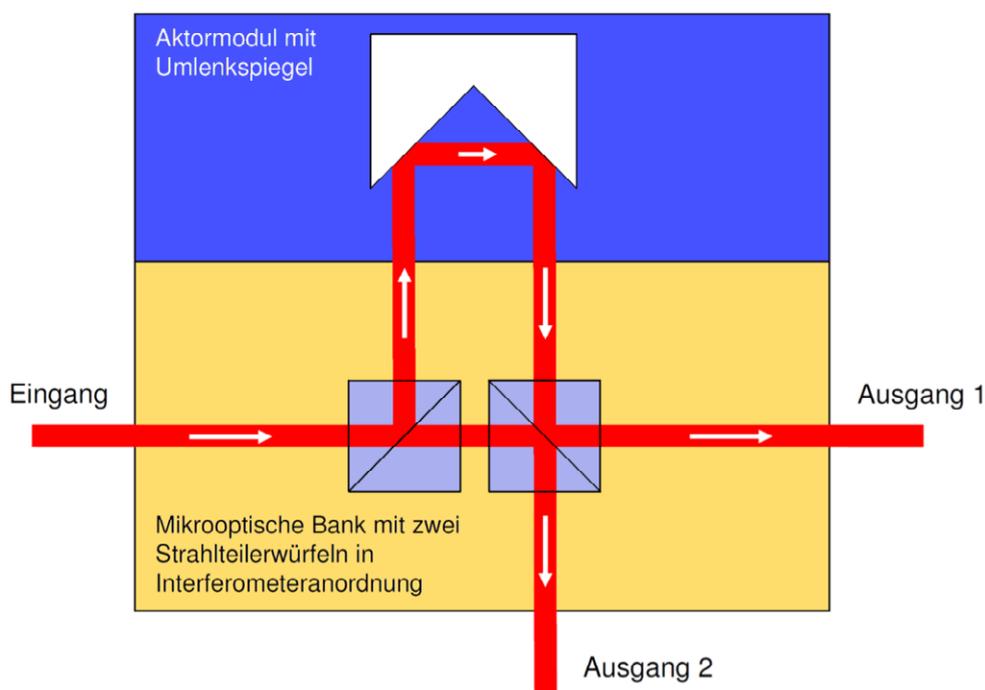


Abbildung 4.2: Skizze des optischen Pfades für das modulare aktive mikrooptische System mit interferometrischem Aufbau.

modifiziert, um eine einfache Integration des Mikroaktors zu ermöglichen. Das, in das System eingeleitete Licht, wird am ersten Strahlteilerwürfel durch Amplitudenaufspaltung in zwei Teilstrahlen zerlegt. Ein Teilstrahl verlässt den Strahlteilerwürfel und daraufhin die mikrooptische Bank in Richtung Mikroaktor, wird dort an zwei Spiegelflächen eines Spiegelements um insgesamt  $180^\circ$  umgelenkt und kehrt zurück auf die mikrooptische Bank. Im zweiten Strahlteilerwürfel trifft der zurückkehrende Teilstrahl auf den zweiten Teilstrahl, der direkt ohne Umlenkung vom ersten Strahl-

teilerwürfel kommend den zweiten Strahlteilerwürfel erreicht. Auf der Strahlteilerfläche von Strahlteiler zwei liegt der Interferenzpunkt, von dem aus die beiden gegenphasigen Interferenzmuster auf die Systemausgänge gelangen und zur weiteren Verarbeitung bereit stehen.

## 4.2 Schnittstellendefinitionen

Für die erfolgreiche Realisierung modularer Systeme sind klar definierte, flexible Schnittstellen mit einfacher Handhabbarkeit von elementarer Bedeutung. Ein modulares System verarbeitet ihm zur Verfügung gestellte Energie-, Stoff- und Informationsströme und gibt diese in verarbeiteter Form wiederum als Ergebnis aus [77] [78]. In den einzelnen Modulen eines Systems werden diese Energie-, Stoff- und Informationsströme als Ganzes oder in Teilen verarbeitet, umgewandelt und über die Schnittstellen an andere Module weitergegeben. Um möglichst einfache und gut handhabbare Schnittstellen zwischen den Modulen zu schaffen, ist daher eine geeignete Wahl der Modulgrenzen unabdingbar.

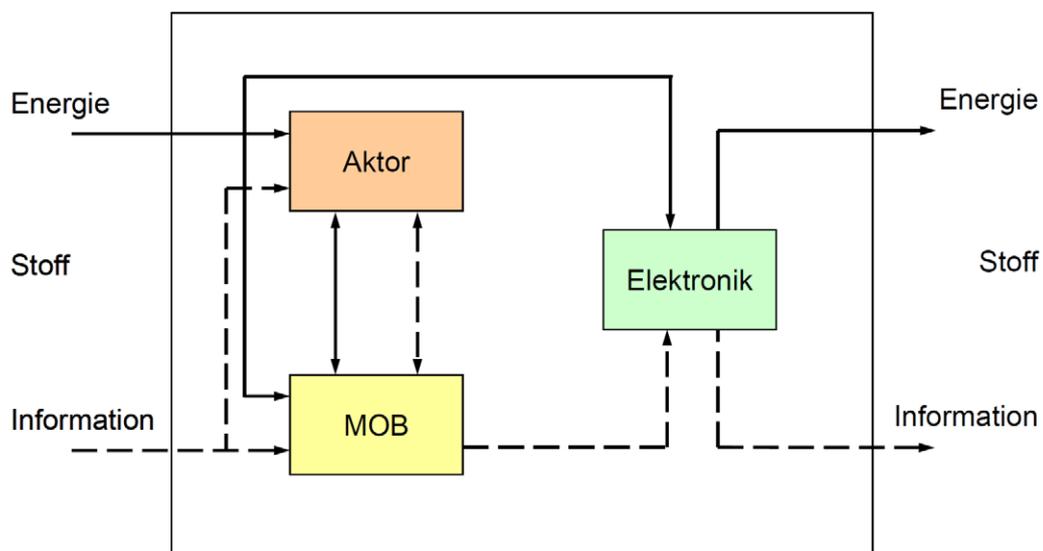


Abbildung 4.3: Modulare Systeme und der Austausch von Energie-, Stoff- und Informationsströmen zwischen Modulen in Anlehnung an [77].

In Abbildung 4.3 ist als Beispiel ein modulares System abgebildet, dessen Grenzen durch einen Rahmen gekennzeichnet sind. Innerhalb des Systems befinden sich drei

Module, aus denen das gesamte System aufgebaut ist. Da es sich in der vorliegenden Arbeit um ein optisches System, bestehend aus einer mikrooptischen Bank (MOB), einem Aktor und einer Elektronik handelt, werden im vorliegenden Fall keine Stoffströme übertragen. Über die Modulgrenzen werden lediglich Informations- und Energieströme in Form von elektrischen und optischen Signalen übergeben.

Neben der Übertragung der Energie- und Informationsströme spielt bei der Auslegung der Modulschnittstellen die räumliche Anordnung und die mechanische Konzeption der Schnittstellen eine bedeutende Rolle. Sie legt fest, wie die Module zueinander zu platzieren sind, damit eine koordinierte Übergabe der Modulsignale ermöglicht wird.

Für das in dieser Arbeit zu realisierende modulare mikrooptische System wurden insgesamt drei Einzelmodule zu einem Gesamtsystem kombiniert. Eine Auswahl zwischen verschiedenen Varianten der Einzelmodule ist möglich. Das hierfür entwickelte Schnittstellenkonzept ist in den folgenden Unterkapiteln, ausgehend von der mikrooptischen Bank, beschrieben.

### **4.2.1 Schnittstelle zu den Mikroaktoren**

Die Schnittstelle zwischen mikrooptischer Bank und Mikroaktor ist für die Funktion des in dieser Arbeit zu entwickelnden modularen aktiven mikrooptischen Systems von besonderer Bedeutung. Sie ist zentraler Bestandteil des optischen Pfades und hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtfunktion des Systems. Die Schnittstelle sollte in punkto Form und Lage so beschaffen sein, dass eine Kombinationsmöglichkeit mehrerer Mikroaktoren unterschiedlichen Typs und Größe mit unterschiedlichen mikrooptischen Bänken möglich ist. Darüber hinaus sollten beide Module über ein geeignetes Justagekonzept zueinander ausrichtbar sein, um fertigungsbedingte Systemtoleranzen auszugleichen.

Im Falle der Schnittstelle zwischen mikrooptischer Bank und Mikroaktor werden freistrahloptische Signale übertragen. Die Anforderungen an die Schnittstelle sind daher rein mechanischer Natur, um gegenüberliegende optische Elemente auf beiden Modulen relativ zueinander zu positionieren.

In Abbildung 4.4 ist das für diese Zwecke erarbeitete Schnittstellenkonzept dargestellt. Zur Anbindung verschiedener Mikroaktoren unterschiedlicher Dimension an die mikrooptische Bank kommt eine, in Abbildung 4.4 blau dargestellte

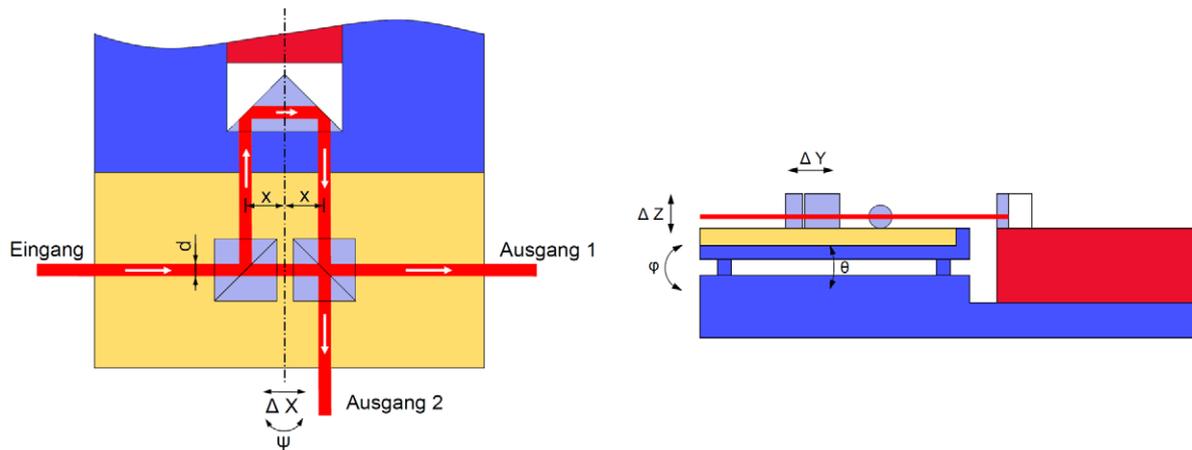


Abbildung 4.4: Schnittstelle zwischen mikrooptischer Bank und Mikroaktor. Darstellung in der Draufsicht und in der Seitenansicht von rechts.

Grundplatte zum Einsatz, welche an die Dimensionen des jeweiligen Mikroaktors angepasst ist. Sie hat unter anderem zur Aufgabe, einen Niveausgleich zwischen der mikrooptischen Bank und dem beweglichen Teil des Mikroaktors zu schaffen, auf dem das Umlenkprisma oder der Umlenkspiegel für die Strahlumlenkung montiert ist. Aus Gründen der einfacheren und präziseren Herstellbarkeit von verspiegelten miniaturisierten Umlenkprismen im Vergleich zu zwei unter  $90^\circ$  zueinander stehenden miniaturisierten Umlenkspiegeln, kommt in dieser Arbeit ein aktorseitiges Umlenkprisma zum Einsatz.

Der optische Pfad des Systems wird durch die Verwendung dieses Prismas im Bereich der Schnittstelle bereits teilweise vorgegeben. Für die Definition der Schnittstelle wurde festgelegt, dass ein ausgehender Strahl die mikrooptische Bank in einem Abstand  $x$  linksseitig von der Mittellinie in Blickrichtung Mikroaktor verlässt. Umgekehrt verlässt ein ausgehender Strahl des Mikroaktormoduls in Blickrichtung zur mikrooptischen Bank den Mikroaktor ebenfalls linksseitig im Abstand  $x$  zu dieser gedachten Mittellinie. Der zu definierende Abstand  $x$  hängt dabei maßgeblich von der Dimension der verwendeten optischen Komponenten ab, deren Eigenschaften in Kapitel 4.3.3 näher spezifiziert werden. Unabhängig von den letztendlichen Abmaßen ist zu erkennen, dass sich zwei beliebig miteinander kombinierte Module nach dieser Schnittstellendefinition immer jeweils mit zwei Eingangs- und Ausgangspaarungen gegenüberstehen. Genauer betrachtet wäre auch eine Kombination zweier mikrooptischer Bänke über diese Schnittstelle möglich.

Fertigungsbedingt sind bei der Herstellung aller optischen und mechanischen Komponenten Toleranzen zu erwarten, die eine komplette Montage und Justierung der mikrooptischen Bank und des Mikroaktors über passive Anschlagstrukturen nahezu unmöglich erscheinen lassen. Zusätzlich zu diesen Toleranzen ist mit montagebedingten Abweichungen der einzelnen Module zu rechnen. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Prototypen, die im Rahmen dieser Arbeit realisiert wurden, scheidet eine statistische Tolerierung der Module mit anschließender Auswahl geeigneter Modulpaare, die über geeigneten Toleranzen für ein interferometrisches System verfügen, aus. Eine adäquate Lösung dieser Problematik für kleine Stückzahlen ist die aktive Justage der beiden Module zueinander. Die Grundplatte wird hierfür mit einer neigbaren Plattform versehen, die Kipp- und Winkelfehler in den Raumrichtungen  $\varphi$  und  $\theta$  ausgleichen lässt. Ein Verdrehen der mikrooptischen Bank oder des Mikroaktoraufbaus um  $\psi$  wird vom Umlenkprisma des Mikroaktors ausgeglichen, welches den eingekoppelten Lichtstrahl auch bei Winkelfehlern um  $180^\circ$  umgelenkt an die mikrooptische Bank zurückliefert. Toleranzabweichungen in Y-Richtung können durch Verfahren des Mikroaktors im Betrieb kompensiert werden. Abweichungen in Z-Richtung werden durch die Höhe der verwendeten optischen Komponenten ausgeglichen, deren Höhe ein Vielfaches im Vergleich zum Strahldurchmesser im System ist. Somit müssen bei der aktiven Justage lediglich die Ausrichtung der mikrooptischen Bank in X-Richtung sowie der Ausgleich von Winkelfehlern in der  $\varphi$  und  $\theta$  Drehrichtung ausgeglichen werden.

### 4.2.2 Schnittstelle zur Signalausgabe/Auswerteelektronik

Für die Ausgabe der optischen Signale des modularen mikrooptischen Systems sollen je nach Anwendungsfall drei Möglichkeiten existieren, von denen die freistrahl-optische Ausgabe den trivialsten Fall darstellt. Neben dieser Variante soll zudem die Möglichkeit bestehen, die optischen Signale mittels Faseranbindung aus dem System auszukoppeln oder über Photodioden zu detektieren und über eine optionale Datenerfassungselektronik aufbereitet auszugeben. Wobei in diesem Fall die Flexibilität des Systems eine Auskopplung auf Photodioden mit unterschiedlichen aktiven Flächen ermöglichen soll. Die mikrooptische Bank selbst ist von der Beschaffenheit so zu konstruieren, dass alle dieser drei Optionen mit einem Design der mikrooptischen Bank realisierbar sind.

In Abbildung 4.5 sind schematische Schnittzeichnungen des gesamten Systems für die drei Varianten dargestellt. Im Falle der freistrahloptischen Signalauskopplung können die Lichtsignale geradewegs vom Strahlteilerwürfel ausgehend die mikrooptische Bank verlassen, ohne in Wechselwirkung mit optischen Elementen oder LIGA-Haltestrukturen zu kommen. Für die Signalauskopplung auf Fasern hat sich die Variante einer gepigtailten Gradientenindexlinse (GRIN-Linse) als eine gute Alternative zum Einsatz der in vorhergehenden Arbeiten [32] [73] verwendeten Kugellinsen erwiesen, die das Signal für die Einkopplung in den Kern einer Faser fokussieren. Zudem bieten diese Pigtails den Vorteil einer einfacheren Montage, da sie fertig montiert direkt vom Hersteller bezogen werden können. Wie in Abbildung 4.5 Mitte dargestellt, ist zwischen GRIN-Linse und Faser ein Glasspacer verbaut, der zur Aufgabe hat, den vorfokussierten Strahl der GRIN-Linse bis zum Fokuspunkt zu führen, wo er letztlich in die Faser eingekoppelt wird. Auf diese Weise kann ein kollimierter und aufgeweiteter Strahl mit großem Durchmesser durch das System geleitet werden, der das System gegen Toleranzen unempfindlicher erscheinen lässt. In den ersten beiden Varianten ist das System mit einer Deckelung versehen, die zur Aufgabe hat, das System vor der Rückkopplung von Streulicht und Umgebungslicht zu schützen. Erfolgt eine Auskopplung der Signale auf Photodioden, wie in der unteren Abbildung dargestellt, ist die Deckelung mit Durchlassöffnungen versehen, über die das Licht auf Photodioden ausgekoppelt werden kann. In die mikrooptische Bank werden für die Fokussierung der ausgangsseitigen Lichtsignale auf die Photodioden ebenfalls GRIN-Linsen eingesetzt, jedoch sind diese alternativ zu der Variante mit fasergebundener Signalauskopplung mit Umlenkprismen kombiniert, die das Licht um  $90^\circ$  nach oben auf die aktive Fläche der Photodioden leiten. Der Spotdurchmesser des ausgekoppelten Lichtstrahles ist dabei auf den Durchmesser der Photodiode anzupassen. Je nach verwendeter Photodiode variiert aus diesem Grund die Länge der GRIN Linse in einem Bereich von ca.  $150 \mu\text{m}$ , wodurch das Prisma und der Spot für die Photodiode bezüglich ihrer Position ebenfalls variieren. Um dies ausgleichen zu können, werden die entsprechenden Öffnungen in der Deckelung, die LIGA-Haltestrukturen und die Submounts der Photodioden entsprechend ausgelegt. Für eine direkte Datenverarbeitung im System, ist auf der Deckelung eine Platine montierbar, die die Daten der Photodioden erfasst und aufbereitet. Diese ist an den Stellen der Submounts ebenfalls mit Öffnungen versehen, um einen platz sparende Montage mit kurzen Signalwegen für hohe Datenraten zu ermöglichen.

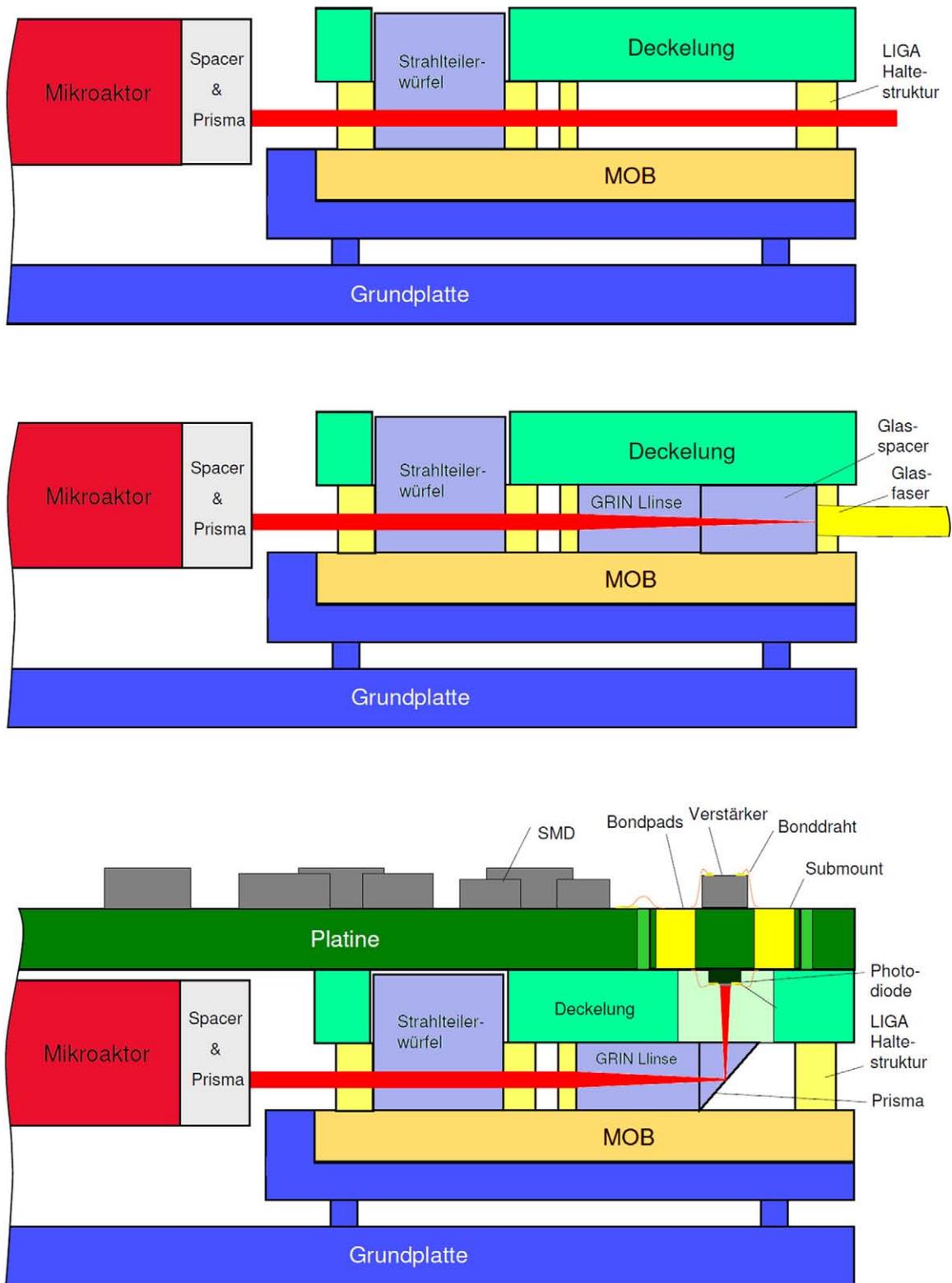


Abbildung 4.5: Schnittstelle der Signalausgabe. Oben freistrahloptisch, in der Mitte fasergebunden über GRIN-Faser-Pigtails und unten Ausgabe auf Photodioden.

Auf dieselbe Weise wie die Signalauskopplung auf Photodioden ist es andererseits möglich, Licht von einer Laserdiode über ein Umlenkprisma in Kombination mit einer GRIN-Linse in das System einzuleiten.

### **4.3 Lastenhefte für die Modulkomponenten**

Bei technischen Systemen hat es sich als äußerst hilfreich erwiesen, vor Beginn der Design- und Entwicklungsphase Lastenhefte zu erstellen, um externen Lieferanten sowie auch der eigenen Fertigungsabteilung sämtliche Anforderungsspezifikationen für ein Bauteil in schriftlicher Form zu dokumentieren. Lastenhefte sind im Allgemeinen für den Kunden oder Auftraggeber bestimmt, der Auftragnehmer erhält das Pflichtenheft, in dem neben den Spezifikationen konkrete Lösungsansätze seitens des Lieferanten beschrieben sind. In den folgenden Unterkapiteln werden alle erforderlichen Spezifikationen der Zukaufteile für das modulare aktive mikrooptische System erfasst, die für den Aufbau des Systems erforderlich sind. Die Herstellung der mikrooptischen Bänke erfolgt nach dem LIGA-Prozess. Für ihre Spezifikationen wird ebenfalls ein Lastenheft erstellt. Lediglich für die Spezifikationen der optischen Beschichtungen sei auf das Kapitel 5.2 verwiesen, da diese erst im späteren Verlauf, nach der genauen Festlegung des optischen Pfades und der Lichteinfallswinkel in die optischen Elemente exakt zu bestimmen sind.

#### **4.3.1 Mikroaktoren**

In Kapitel 2.3 wurden verschiedene Mikroaktorprinzipien vorgestellt. Für den Aufbau mikrointerferometrischer Systeme sind aus dieser Vorauswahl die Mikroaktorprinzipien herauszuarbeiten, die für einen zweckmäßigen Einsatz in einem mikrointerferometrischen System einsetzbar sind. Tabelle 4.1 zeigt eine Anforderungsliste, die ein Mikroaktor für die Anwendung in einem stabil arbeitendem Interferometersystem erfüllen sollte.

Im Rahmen des modularen mikrointerferometrischen Systems sollen verschiedene Mikroaktoren für unterschiedlichste Anwendungen zum Einsatz kommen, die applikationsabhängig unterschiedliche Stellwege erfordern. Während ein einstellbarer Mikrointerferometer nur in einen Arbeitspunkt geregelt werden muss und höchstens

Anforderung	Zielgröße
Stellweg	einstellbarer Interferometer: $\geq 10 \mu\text{m}$ Analyseinterferometer: $> 200 \mu\text{m}$ Messinterferometer / Demodulator: $> 10 \text{mm}$
Schrittweite	$< 20 \text{nm}$
Positioniergenauigkeit	$< 10 \text{nm}$
Traglast / Tragkraft	ca. 2,6 mg / 25,5 mN ohne Spacer ca. 10 mg / 98,1 mN mit Spacer
Nachschwingzeit nach Verfahren	$< 0,1 \text{s}$
Bauraum	30 x 25 x 15 mm <sup>3</sup> (LxBxH)
Energiezufuhr in Verweilposition	$< 20 \text{mW}$
Temperaturänderung im Betrieb	$< 5^\circ \text{K/h}$

Tabelle 4.1: Anforderungsliste für Mikroaktoren in Verbindung mit einer Anwendung in interferometrischen Systemen.

für das Durchfahren weniger Ordnungen eingesetzt wird, wofür Stellwege von einigen Mikrometern mehr als ausreichend sind, müssen hingegen bei Interferometern zur Wegmessung oder für frequenzabstimmbare Datensignaldemodulatoren Stellwege von einigen Millimetern möglich sein.

Die Schrittweite und die Positioniergenauigkeit der Mikroaktoren sollte möglichst im unteren Nanometerbereich liegen, um reproduzierbare und fein aufgelöste Messungen durchführen zu können. Dies ist im Hinblick auf eine Wellenlänge von 1310 - 1550 nm für Applikationen in der Nachrichtentechnik und ca. 400 – 800 nm für Anwendungen im sichtbaren Bereich zwingend erforderlich.

Aus mechanischen Gesichtspunkten muss der Mikroaktor in der Lage sein, das Umlenkprisma, beziehungsweise je nach Mikroaktorbauform das Umlenkprisma und einen Keramikspacer zu tragen, ohne durch diese Last eine zu große Massenträgheit sowie ein zu großes Nachschwingverhalten aufzuweisen. Der Bauraum des Mikroaktors sollte das, für ein Mikrosystem akzeptable Maß nicht überschreiten.

Ein kritischer Punkt für interferometrische Systeme sind funktionsbedingte Temperaturänderungen. Schwankungen in der Systemtemperatur führen bekannterweise unumgänglich zu Längenausdehnungen und somit zu temperaturbedingten Drifts in den Messgrößen. Aus diesem Grund sollten die eingesetzten Mikroaktoren während dem Verfahren als auch beim Verweilen in einer Ruheposition eine möglichst geringe Energieaufnahme besitzen und das System über längere Zeit hinweg nicht zu sehr erwärmen.

Für die Realisierung erster, nach diesem modularen Konzept arbeitenden Demonstratoren, wurde die Auswahl der geeigneten Mikroaktoren auf drei Mikroaktorprinzipien reduziert. Zum Einsatz kommen neben handelsüblichen Piezoaktoren, ein elektromagnetischer Mikroaktor und ein Inchwormaktor, die nach den Spezifikationen aus Tabelle 4.1 ausgewählt wurden. Abbildung 4.6 zeigt die drei, für das modulare aktive mikrooptische System ausgewählte Mikroaktoren. Links dargestellt ein Niedervolt-Piezostapelaktor mit einer Größe von  $2 \times 3 \times 13,5 \text{ mm}^3$  und einem Stellweg von  $11 \mu\text{m}$ , der für einstellbare Systeme und einfache Analysen eingesetzt wird. In der rechten Abbildung ein elektromagnetischer Mikroaktor für Analyseanwendungen mit einem Stellweg von bis zu  $200 \mu\text{m}$  und in der Mitte ein Inchwormaktor auf Basis von Piezoaktoren für Messanwendungen und Demodulatoren. Sein maximaler Stellweg liegt bei  $20 \text{ mm}$  mit einer Positioniergenauigkeit im Bereich weniger Nanometer. Der Piezostapelaktor und der Inchwormaktor sind kommerziell erhältlich. Der elektromagnetische Mikroaktor wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Universität Freiburg entwickelt [33].



Abbildung 4.6: Ausgewählte Mikroaktoren für den Aufbau der Prototypen des modularen aktiven mikrooptischen Systems. Links ein Niedervolt-Piezostapelaktor, in der Mitte ein Inchwormaktor auf Piezobasis und rechts ein elektromagnetischer Mikroaktor [33].

### 4.3.2 Optische Komponenten

Die optischen Komponenten werden aus Glas hergestellt und hybrid in die mikrooptische Bank eingesetzt. Die Komponenten selbst werden speziell für diese Anwendung optimiert und als externes Zukaufteil von zwei Spezialherstellern bezogen. Die Strahlteilerwürfel sowie die benötigten Einkoppel- und Umlenkprismen zur Strahlführung werden von einem Hersteller bezogen. Der zweite Hersteller liefert alle optischen Komponenten in Verbindung mit GRIN-Linsen. Dies bezieht sich auf

Anforderung	Zielgröße
Maßtoleranz	Nennmaß $X \pm 50 \mu\text{m}$
Winkeltoleranz	Nennmaß $X \pm 0,1^\circ$
Parallelität opt. Flächen	$30 \mu\text{m}$
Oberflächeneigenschaften	optische Oberflächen: P3, Rq 0,007 (0,01/1) matte Oberflächen: G2
Wellenlängenbereich	1520 – 1580 nm
Glas	Schott N-PK51 (529770.386) mit $n=1,51665$ bei $\lambda = 1550 \text{ nm}$
Material für optische Beschichtungen	MgF als niedrigbrechendes Material ZnS als hochbrechendes Material
AR-Coating	Transmission $\geq 95\%$ bei vorgegebenem Strahl-einfallswinkel (dielektrisch, polarisationsneutral), Reflexionsanteil $< 0,5 \%$
BS-Coating	Transmission $50\% \pm 5\%$ bei vorgegebenem Strahl-einfallswinkel (dielektrisch, polarisationsneutral)
MIR-Coating	Reflexion $\geq 95\%$ bei vorgegebenem Strahl-einfallswinkel (dielektrisch, polarisationsneutral)
Erlaubter Haltebereich	$150 \mu\text{m}$ im Randbereich

Tabelle 4.2: Anforderungsliste für die mikrooptischen Glaskomponenten des interferometrischen Systems.

die Faserpigtaills für die Signalein- und Signalauskopplung sowie die GRIN-Linsen in Kombination mit Prismen für die Strahlauskopplung auf die Datenerfassungsplatinen. Da die optischen Komponenten der Signalein- und Signalauskopplung nach einem anderen Konzept wie die Prismen und Strahlteilerwürfel in der mikrooptischen Bank durch Haltestrukturen fixiert werden, sind hierfür teilweise abweichende Spezifikationen erforderlich.

In Tabelle 4.2 sind die geforderten mechanischen und optischen Spezifikationen aufgeführt, die vom Hersteller der Umlenkprismen und der Strahlteilerwürfel einzuhalten sind. Derzeit gelten Strahlteilerwürfel mit einer minimalen Kantenlänge von einem Millimeter als gerade noch zuverlässig herstellbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Maß als Mindestmaß für einen einfachen Strahlteilerwürfel verwendet, um in den folgenden Schritten die Dimensionen des optischen Aufbaus festzulegen. Alle anderen Komponenten werden in der Dimension an diese Größe angepasst. Die Maß- und Winkeltoleranzen sowie die Lagetoleranzen wurden für alle Elemente gleich festgelegt. Die Oberflächentoleranzen wurden nach DIN 10110 spezifiziert. Optische Oberflächen dürfen demnach zwischen drei und 16 Fehlstellen auf einer Messlänge von zehn Millimetern aufweisen. Der quadratische Mittenrauhwert darf maximal sieben Nanometer betragen. Die Oberfläche ist somit optisch glatt und darf heruntergerechnet auf ein Längenmaß von einem Millimeter Seitenlänge maximal 1,6 Fehlstellen aufweisen. Nicht für die Funktion erforderliche Flächen, wie die Ober- und Unterseite, sind optisch matt und haben einen quadratischen Mittenrauhwert von zwei Mikrometern. Für die Halterung der optischen Elemente in Schleif- und Beschichtungsprozessen, dürfen diese in einem Randbereich von 150  $\mu\text{m}$  aufgenommen werden. Die Dicke der optischen Beschichtungen hängt bei jedem Bauteil vom jeweiligen Strahleinfallswinkel ab und wird im Anschluss an die Simulation des Strahlengangs und der Berechnung der optischen Beschichtungen in Kapitel 5.2 vollständig spezifiziert.

Für die Fokussierung und Kollimation im Falle der Signalein- und Signalauskopplung, wurde eine GRIN-Linse mit einem Durchmesser von 500  $\mu\text{m}$  gewählt, die für alle Fokussierungszwecke in dieser Arbeit eingesetzt wird. Der Strahldurchmesser des kollimierten Strahls ist im System per Definition auf 66  $\mu\text{m}$  festgelegt. Dieser ergibt sich indirekt durch die Geometrie der GRIN-Faser Pigtaills unter Verwendung eines strahlaufweitenden Glaszylinders von 10 mm Länge, der zwischen Glasfaser und GRIN-Linse montiert ist. Einkoppelseitig wird als Faser eine

SMF28 des Herstellers Corning eingesetzt. Um Auskoppelseitig einen größeren Akzeptanzbereich des Lichtes zu erreichen, kommt eine multimode Gradientenindexfaser mit einem Kerndurchmesser von  $50\ \mu\text{m}$  zum Einsatz. Zur Optimierung des Abstrahlverhaltens der Pigtails werden diese bei der Montage vom Hersteller aktiv justiert, um z.B. ein auftretendes Schielverhalten der Pigtails zu vermeiden. Die Pig-

Anforderung	Zielgröße
GRIN-Faser Pigtails	
Durchmesser / Länge der GRIN Linse.	$\varnothing 500\ \mu\text{m} - 5 + 0 / 1,17\ \text{mm}$ (0,25 Pitch)
Durchmesser / Länge des Glaszylinders.	$\varnothing 500\ \mu\text{m} \pm 5 / 10\ \text{mm}$ (kollimiert)
Numerische Apertur (NA)	0,5
Wellenlänge	1550 nm
AR-Coating	Alle planaren Linsenflächen für 1310 - 1550 nm
Fasern	SMF 28, Länge 1 m, FC/PC Stecker MMF $50\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser, 1 m, FC/PC Stecker
Justagegenauigkeit gegen Schielverhalten	$\pm 1\ \mu\text{m}$
GRIN-Prisma Kombination	
Durchmesser / Länge der GRIN Linse.	$\varnothing 500\ \mu\text{m} - 5 + 0 /$ Länge entsprechend Simulation in Kapitel 5.1.2, Toleranz $\pm 20\ \mu\text{m}$
Prisma	$0,5\ \text{mm} \pm 5 \times 90^\circ$ , Hypotenuse mit dielektrischem MIR-Coating, Material BK7
Wellenlänge	1550 nm
AR-Coating	alle planaren Linsenflächen für 1310 – 1550 nm

Tabelle 4.3: Anforderungsliste für die strahlein- und strahlauskoppelden optischen Komponenten.

tails selbst besitzen eine Faser der Länge von einem Meter und sind für den Anschluss an optische Systeme mit FC/PC Steckverbindern ausgestattet. Für die Signalauskopplung auf Photodioden werden GRIN-Linsen des gleichen Typs wie bei den Fasern eingesetzt. Sie sind jedoch in der Länge entsprechend dem gewünschten Strahldurchmesser an der Detektorfläche der Photodioden angepasst. An die Linse wird das Auskoppelprisma, welches hypotenusenseitig mit einer dielektrischen Verspiegelung versehen ist, kathetenseitig mittels UV-Epoxy durch Kleben an der GRIN-Linse fixiert. In Tabelle 4.3 sind die Anforderungen an die GRIN-Linsen sowie an alle Pigtaills und an die GRIN-Prisma Kombinationen zusammengefasst.

### **4.3.3 LIGA Strukturen und mikrooptische Bänke**

Die mikrooptischen Bänke werden am Institut für Mikrostrukturtechnik nach dem LIGA-Prozess, der in Kapitel 6.1 näher erläutert wird, hergestellt. Als Substratmaterial wird aus Gründen der Ebenheit Silizium in Waferform eingesetzt, das speziell für diese Anwendung eine der Ebenheit von 10  $\mu\text{m}$  aufweisen sollte. Eine zu große Durchbiegung könnte zu unbeabsichtigten Abweichungen im optischen Pfad führen. Die Durchbiegung des Wafers sollte dabei auf der polierten Resistseite konvex sein, damit ein aufgebracht, im Herstellprozess schrumpfender Resist der Durchbiegung entgegenwirkt und diese möglichst kompensiert. Optional kann zur Haftverbesserung und zur Reduktion der Reflektionen von Licht an der Substratoberfläche das Substrat mit einer Titanschicht versehen werden, die vor Beginn des LIGA-Prozesses einem Oxidationsschritt unterzogen wird. Der Resist wird im Falle großer Strukturhöhen, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, in Form von PMMA Plättchen mittels Kleben auf das Substrat aufgebracht. Dabei darf die daraus resultierende Materialdicke, die der späteren Strukturhöhe entspricht, vom Nennmaß inklusive Klebeschicht nicht mehr als  $\pm 20 \mu\text{m}$  abweichen. Im Anschluss an den LIGA Prozess werden die mikrooptischen Bänke mittels Laserritzen und durch gezieltes Brechen entlang der somit vorgeschwächten Kanten vereinzelt. Die erlaubte Toleranz der LIGA Strukturen liegt im Bereich von unter zwei Mikrometern, da einige Komponenten, wie z.B. die GRIN-Linsen, möglichst spielfrei in die zu realisierenden Haltestrukturen eingefügt werden. Die Anforderungen an die mikrooptischen Bänke sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

Anforderung	Zielgröße
Substratmaterial	SI-Wafer poliert, N-Dotiert, Orientierung 100
Waferdicke	525 $\mu\text{m}$ $\pm$ 25 $\mu\text{m}$ , optional mit gesputterter Ti-Schicht 2,5 $\mu\text{m}$ $\pm$ 10%
Ebenheit Wafer	$\pm$ 10 $\mu\text{m}$
Resistmaterial	GS-Folie (PMMA) als Klebeplättchen 30 x 75 mm, Toleranz: - 0 + 10 $\mu\text{m}$
Resisthöhe inkl. Klebeschicht	500 $\mu\text{m}$ $\pm$ 20 $\mu\text{m}$
Toleranz LIGA Strukturen	$\pm$ 1 $\mu\text{m}$
Dimension mikrooptische Bank	11 x 8 mm
Vereinzeln durch	Laserritzen

Tabelle 4.4: Anforderungsliste der mikrooptischen Bänke und LIGA Strukturen.

#### 4.3.4 Auswertelektronik und Photodioden

Im Rahmen des modularen aktiven mikrooptischen Systems soll die Möglichkeit einer, in das System integrierten, elektronischen Datenerfassung mit optionaler Ausgabe auf einen Rechner gegeben sein. Entsprechend dem, in Kapitel 4.2.2 erläuterten Konzept wird die dafür notwendige Platine systemnah über der mikrooptischen Bank positioniert. In der ersten Ausbaustufe soll diese Platine die Aufbereitung und Übertragung der Photodiodensignale ermöglichen. Die einzelnen Teilfunktionen der zu entwickelnden Datenerfassung sind in Abbildung 4.7 übersichtlich dargestellt. An den beiden Ausgängen des Mikrointerferometers sind die optischen Signale über Photodioden zu erfassen, die die detektierte Lichtleistung in einen, proportional zur Einstrahlung erzeugten, Strom wandelt. Die als Stromquelle fungierende Photodiode ist jedoch nicht belastbar. Aus diesem Grund wird der Diodenstrom zur weiteren Verarbeitung über einen Strom-Spannungswandler in eine Spannung transformiert. Ein nachgeschalteter Tiefpassfilter hat zur Aufgabe, das halbleiterbedingte hochfrequente Rauschen der Photodioden zu unterdrücken. Zur optimalen Aussteuerung eines Analog-Digitalwandlers passt ein zusätzlicher Verstär-

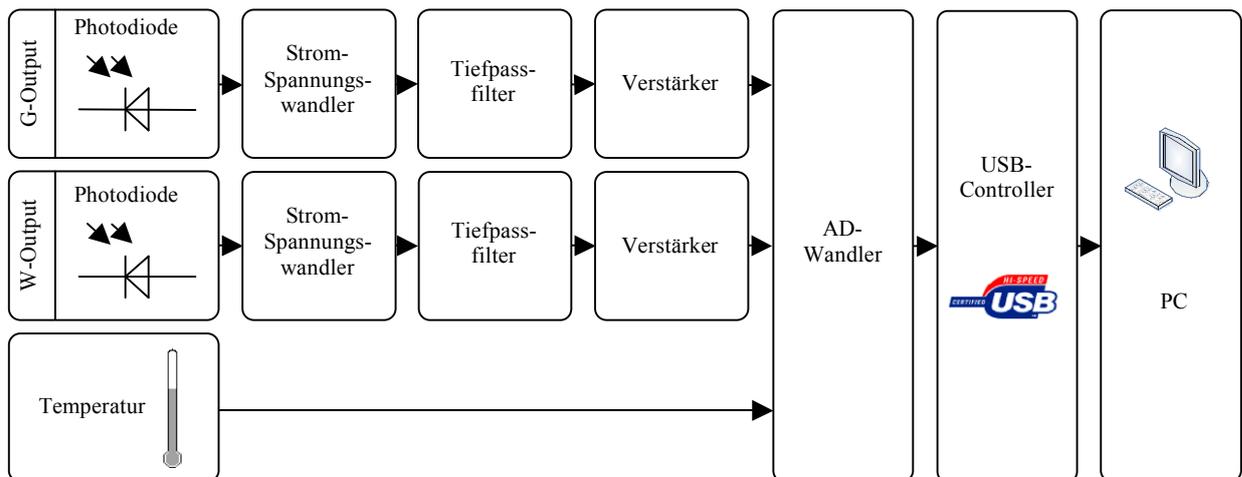


Abbildung 4.7: Notwendige Teilfunktionen der Auswerteelektronik.

Anforderung	Zielgröße
Platinenmaterial	Keramik, 2-seitig
Platinendicke	1 mm $\pm$ 10%
Dimension	20 mm x 11 mm incl. Öffnungen für Submounts
Datenrate Analog	50 kHz
Datenrate Digital	> 150 Hz
Energieversorgung	5 V, < 500 mA (über USB)
Photodioden	justierbar über Submounts
Funktionen	siehe Abbildung 4.7
Maße Photodioden	max 500 x 500 x 500 $\mu\text{m}^3$
Aktive Fläche Photodiode	$\varnothing \leq 80 \mu\text{m}$
Diodenstrom	$\leq 30 \mu\text{A}$

Tabelle 4.5: Anforderungsliste für die Photodioden und die Datenelektronik

ker das Signal entsprechend an einen Pegel von null bis zwei Volt an. Zusätzlich ist ein Temperatursensor auf der Platine installiert, der Temperatureinflüsse im Hinblick auf die Photodioden und dem Interferenzsignal überwacht um eventuelle Drifts zu detektieren. Der Temperatursensor wird ebenfalls über einen Analog-Digitalwandler eingelesen. Per USB-Schnittstelle findet eine Datenübertragung an den PC statt. In Tabelle 4.5 sind die Anforderungen an die Auswerteelektronik und an die Photodioden zusammengefasst.

Die einzusetzenden Photodioden in Chipform auf Siliziumbasis werden auf Submounts montiert und kontaktiert, um ein Justieren der Photodioden relativ zum optischen Pfad zu ermöglichen. Dabei ist die Größe der Photodiode entsprechend dem zur Verfügung stehenden Bauraum zu wählen. Für spätere Anwendungen mit Übertragungsfrequenzen im GHz Bereich sollen bereits in den ersten Prototypen entsprechende Photodioden zum Einsatz kommen, um die Positionierung kleinster aktiver Photodiodenbereiche zu verifizieren.

## **5 Simulation und Design des modularen Systems**

Die zeitnahe, am Markt orientierte Entwicklung technischer Systeme fordert immer kürzer werdende Produktentwicklungsphasen. Einen wesentlichen Bestandteil in der heutigen Entwicklung technischer Systeme spielen die Werkzeuge der Simulation. Sie bieten die Möglichkeit, Fehler bereits im Vorfeld der Herstellungs- und Testphase zu erkennen und Optimierungen bereits am noch nicht real existierenden System durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Simulationen bilden im Anschluss die Grundlage für das Design einzelner Komponenten bis hin zu kompletten Systemen. Eine ausgeprägte Design- und Entwicklungsphase hilft bei der Entwicklung des modularen aktiven mikrooptischen Systems Fehler zu vermeiden.

### **5.1 Simulation der optischen Strahlengänge**

Der erste Schritt bei der Herstellung optischer Systeme ist das Festlegen der optischen Pfade, welche das Licht später im realen System nehmen wird. Hierfür stehen leistungsstarke Raytracing Simulationsprogramme zur Verfügung, die den Verlauf einzelner Lichtstrahlen durch das System, unter Berücksichtigung der optischen Elemente, berechnen. Die Ergebnisse der Simulationen erlauben dem Entwickler sofortige Rückschlüsse auf die Güte des Systems zu schließen und schaffen so die Möglichkeit, vorhandene Fehler im virtuellen System zu beheben und bereits in dieser Phase Systemoptimierungen durchzuführen.

Bei der Simulation des modularen aktiven mikrooptischen Systems auf Basis der Funktion eines Mach-Zehnder Delay Interferometers erfolgt die Auswahl und Anordnung der optischen Elemente streng an den, in Kapitel 4.2 und 4.3 entwickelten Schnittstellenkonzepten und Vorgaben.

Neben der Entwicklung eines optisch hochwertigen Mikrointerferometers unter hybrider Montage optischer Komponenten aus Glas, wird im Anhang A.1 ein Interferometrisches System vorgestellt, das monolithisch integriert in LIGA-Technik herstellbar ist und rein auf Totalreflexion basiert.



isationsneutral, wodurch jede Interaktion wiederum einen negativen Einfluss auf den Polarisationskontrast ausübt. Davon abgesehen steigt durch die Menge der verbauten optischen Komponenten zwangsläufig der Justageaufwand und die damit verbundenen Systemtoleranzen. Nicht zuletzt spielen die Kosten eine bedeutende Rolle, die durch die Anzahl der optischen Elemente als eher hoch einzustufen ist.

Aus diesen Gründen wurde das Layout, wie in Abbildung 5.1 rechts dargestellt, weitgehend auf die wesentlichen Komponenten vereinfacht. Charakteristisches Merkmal der Anordnung ist der doppelte Strahlteilerwürfel, der aus einem großen und zwei kleinen Prismen zusammengesetzt ist. Dank der Verschmelzung beider Strahlteilerwürfel zu einem Bauteil, bleibt der gerade durch die mikrooptische Bank laufende Interferometerarm innerhalb des doppelten Strahlteilerwürfels und wird nicht durch überflüssige Glas-Luft-Übergänge abgeschwächt. Ein weiterer Vorteil der Kombination beider Strahlteilerwürfel ist der Wegfall der beiden, im Aktorarm des Mikrointerferometers befindlichen Umlenkprismen. Auskoppelseitig wird an Ausgang zwei auf das Umlenkprisma verzichtet und das Licht ohne Umlenkung nach unten ausgekoppelt. Um Störeinflüsse in Form von Streulicht auf den zweiten Ausgang, durch ein Ein- und Auskoppeln über dieselbe Strahlteilerfläche, zu vermeiden, bleibt das eingangsseitige Umlenkprisma erhalten. Ein Heranziehen des Bauteils an den Strahlteiler bietet neben dem optischen Abschotten der Rückreflexionen beim Einkoppeln über die Strahlteilerunterseite den Vorteil, den doppelten Strahlteilerwürfel als Anlagestruktur nutzen zu können.

Auf Basis dieser Anordnung wurde ein Modell für die Raytracing-Simulation in ZEMAX<sup>®</sup> erstellt. Dieses sequenzielle Modell ist in Abbildung 5.2 veranschaulicht. Im Gegensatz zu nicht sequenziellen Modellen, wie sie häufig für abbildende Systeme zum Einsatz kommen, bieten diese den Vorteil, den optischen Pfad über eine fest vorgegebene Abfolge optischer Flächen zu leiten. Die Simulation im erstellten Modell beginnt mit der Austrittsfläche der Glasfaser, von der aus das Licht auf die eingangseitigen Kugellinsen fällt. In der Simulation zeigen sich hier bereits erste Probleme auf. Ist die Faser relativ zur Linse nicht exakt positioniert, treten signifikante Abweichungen vom geplanten Strahlengang auf. Wird die Linse nicht zentrisch bestrahlt, neigt diese zum Schielen. Bei einem Kugellinsendurchmesser von 250  $\mu\text{m}$  sind hier bereits Abweichungen weniger Mikrometer nicht mehr tolerierbar. Ein weiteres, ebenfalls signifikantes Problem stellt der Abstand zwischen Faserauskopplfläche und Kugellinse dar. Dieser ist für die Kollimation des Lichts im

System verantwortlich. Liegt die Faser nicht sauber im Fokus der Linse, wird der Strahlengang im System nicht vollständig kollimiert oder ist, wie in Abbildung 5.2 zu erkennen, leicht divergent was im weiteren Verlauf des Lichts über die beiden opti-

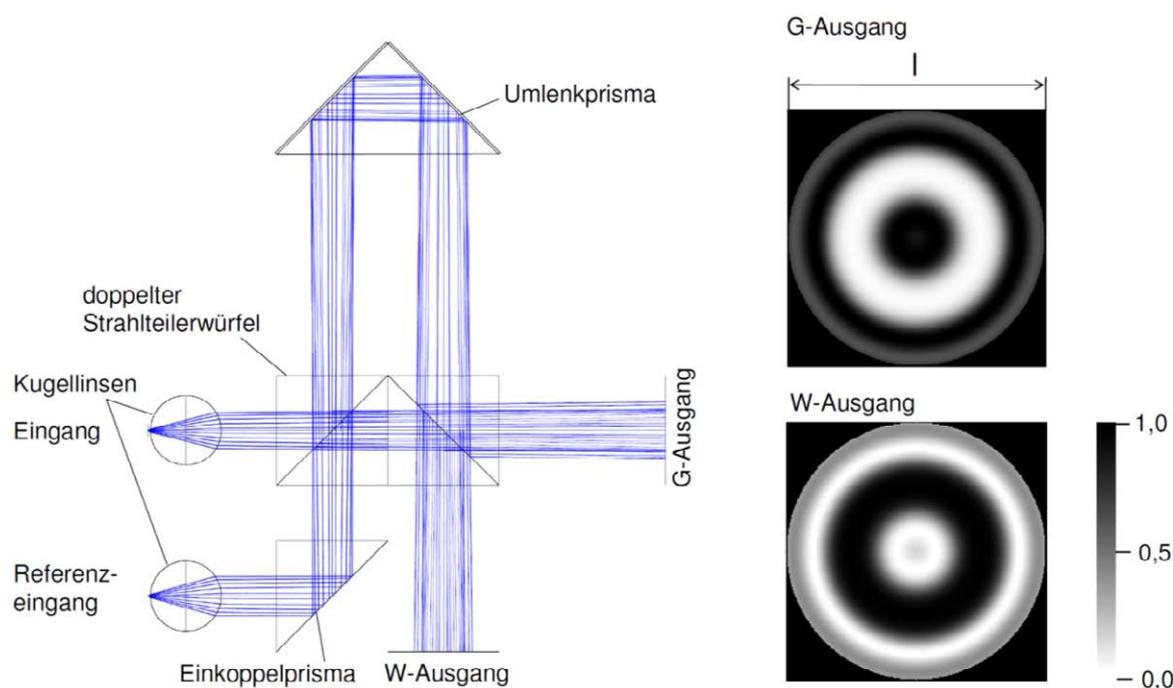


Abbildung 5.2: Ausgangsmodell der Raytracing-Simulationen für den LIGA-Interferometer mit Glaskomponenten sowie zugehörige Interferogramme.

schen Pfade unterschiedlicher Länge zu ungleichen Spotdurchmessern am Interferenzpunkt auf der zweiten Strahlteilerfläche führt. Als Folge entsteht ein offsetbehaftetes Interferenzmuster, worunter der Michelson-Kontrast des Systems sowie das Auslöschungsverhältnis leiden. Ein möglichst gut kollimierter Lichtstrahl ist daher von nicht unerheblichem Interesse.

Ein weiterer kritischer Punkt im Aufbau sind parallel zueinander stehende optische Grenzflächen, die z.B. zwischen dem Einkoppelprisma und dem doppelten Strahlteilerwürfel, wie auch zwischen doppeltem Strahlteilerwürfel und Umlenkprisma zu Mehrfachreflexionen führen, die dem eigentlichen Signal überlagert werden und sich z.B. in Form von Schwebungen im detektierten Signal bemerkbar machen. In Abbildung 5.3 sind die polarisationsabhängigen Reflektions- und Transmissionskur-

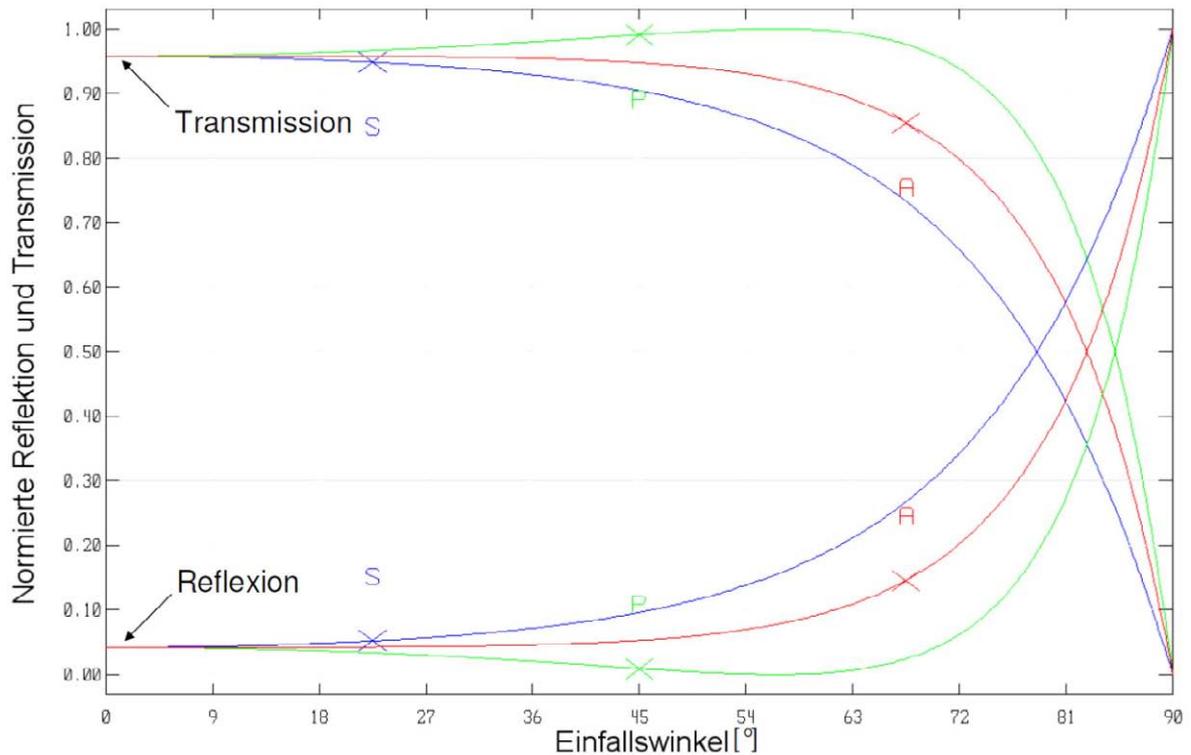


Abbildung 5.3: Normierte Reflexion und Transmission vom Übergang von Luft an Glas (Schott N-PK51) für s- und p-polarisiertes Licht sowie der daraus resultierende Mittelwert.

-ven von Luft in Glas für das verwendete Schott N-PK51 Glas bei einer Wellenlänge von 1550 nm dargestellt. Für kleine Winkel liegt der Reflektionsanteil bei ungefähr vier Prozent. In gleichem Maße kritisch sind die parallelen Flächen der optischen Elemente selbst, im Falle eines Übergangs von Glas an Luft beträgt der Reflektionsanteil für kleine Winkel ebenfalls ungefähr vier Prozent an jeder Grenzfläche. Als mögliche Lösung können hier zwei Maßnahmen getroffen werden. Zur Vermeidung von Mehrfachreflektionen können die optischen Elemente zueinander leicht verkippt werden. Der in Reflexion gehende Lichtanteil wird dann folglich nicht in den optischen Pfad des Systems zurückgekoppelt sondern, entsprechend dem Snelliusschen Brechungsgesetz aus dem optischen Pfad und damit aus dem System reflektiert. Eine zusätzliche und weitaus bedeutendere Rolle zur Reduktion von Reflexionen spielen optische Beschichtungen, mit Hilfe derer der Reflektionsanteil deutlich, auf unter ein Prozent reduzierbar ist. Dabei wird die Dicke der optischen Schichten im Falle einer Antirefleksionsbeschichtung so gewählt, dass die Reflektionsanteile jeder Schicht einen entsprechenden Gangunterschied aufweisen, um sich im Gesamten gerade auszulöschen.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit zeigt sich unter Beobachtung der beiden Interferometerausgänge in Abbildung 5.2. Für ein gut detektierbares Signal sollte die nullte Ordnung möglichst groß und möglichst nicht von höheren Ordnungen umgeben sein. Unter Verwendung der dargestellten Kugellinsen kommt es im Interferometer jedoch zur Überlagerung von Kugelwellen und damit unweigerlich zu Interferogrammen mit höheren Ordnungen.

Als Abhilfe für die auftretenden Problematiken wurde der Interferometeraufbau in sich gedreht. Dabei erwies sich aufgrund der geometrischen Vorgaben für die mikrooptische Bank ein Winkel von acht Grad als geeignet, um Mehrfachreflexionen zu vermeiden ohne dabei in polarisationskritische Bereiche auf den Reflexions- und Transmissionskurven in Richtung zu großer Winkel zu rutschen. Als weiterer Optimierungsschritt wurden die Kugellinsen durch GRIN-Linsen ersetzt, die zudem in Form von Pigtails vom Hersteller fertig konfektioniert bezogen werden können. Diese Modifikation vereinfacht die Toleranzproblematik zur Lichteinkopplung deutlich und bietet im Hinblick auf die Modularisierung der Schnittstelle eindeutige Vorteile. Das überarbeitete Simulationsmodell ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Unter Verwendung der, vom Hersteller der GRIN-Linsen angebotenen Linsenmodelle, ist eine zufrieden-

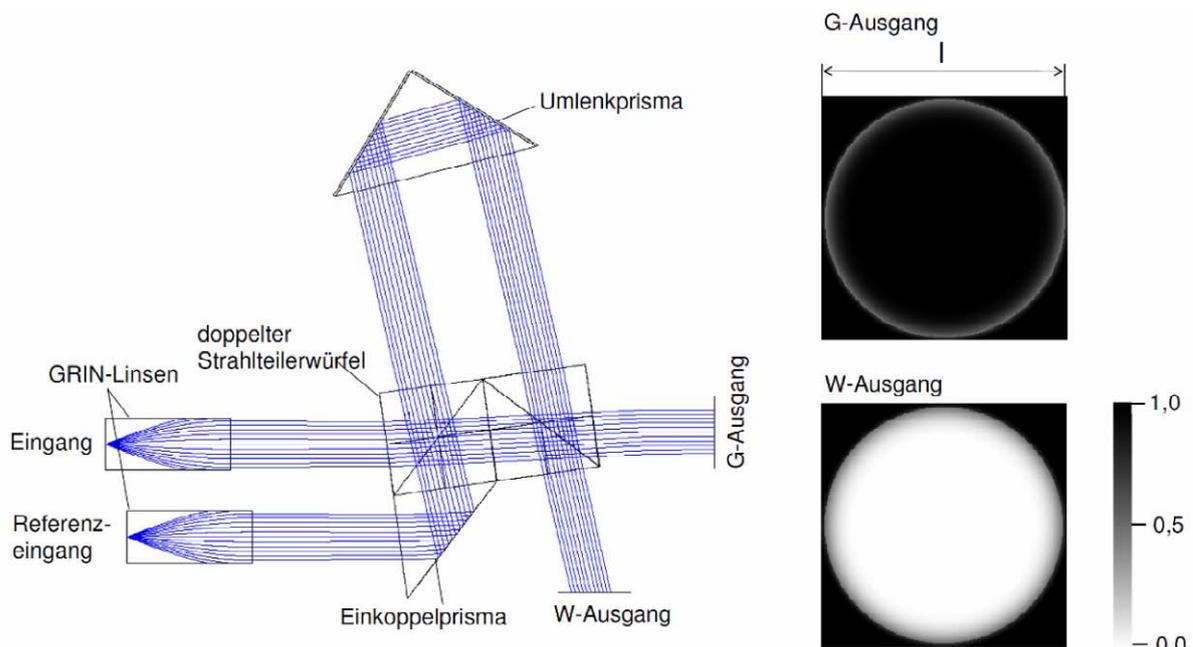


Abbildung 5.4: Optimierte Simulationsmodell des LIGA-Interferometers mit Glaskomponenten sowie zugehörige Interferogramme.

stellende Kollimation des Lichtstrahls möglich. Mehrfachreflektionen zwischen den Bauteilen sind unterbunden. Auch führt die Überlagerung ebenerer Wellenfronten durch Einsetzen von GRIN-Linsen zu deutlich aufgeweiteten nullten Ordnungen in den Interferenzmustern. Ein weiterer Schritt zur Optimierung der Systemeigenschaften ist das bereits erwähnte Beschichten der optischen Komponenten, das gesondert in Kapitel 5.2 beschrieben ist. Weiterhin werden die Simulationsergebnisse in Kapitel 5.3.1 für das Erstellen des CAD-Layouts der mikrooptischen Bank mit eingesetzt.

### 5.1.2 Auskopplung auf die Auswerteelektronik / Glasfasern

Neben der Freistrahlauskopplung der interferometrischen Signale besteht über die modulare Schnittstelle zur Signalauskopplung des Weiteren die Möglichkeit, die Ausgangssignale fasergebunden zur externen Weiterverarbeitung aus dem System zu leiten oder direkt über Photodioden zu detektieren. Für die Freistrahlauskopplung sind im Anschluss an den Strahlteilerwürfel keine weiteren optischen Komponenten erforderlich. Im Falle der Faserauskopplung kommen, wie für die Signaleinkopplung standardisierte GRIN-Faser-Pigtails mit einem Durchmesser von  $500\ \mu\text{m} +0\ \mu\text{m} -5\ \mu\text{m}$  zum Einsatz, die einen kollimierten Strahl auf den Kern einer Faser fokussieren. Da diese nach Spezifikation zur Verfügung stehen, sind hierfür keine weiteren Simulationen notwendig. Der schematische Aufbau eines GRIN-Faser-Pigtails ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Es besteht je nach Anwendungsfall aus einer Singlemode-

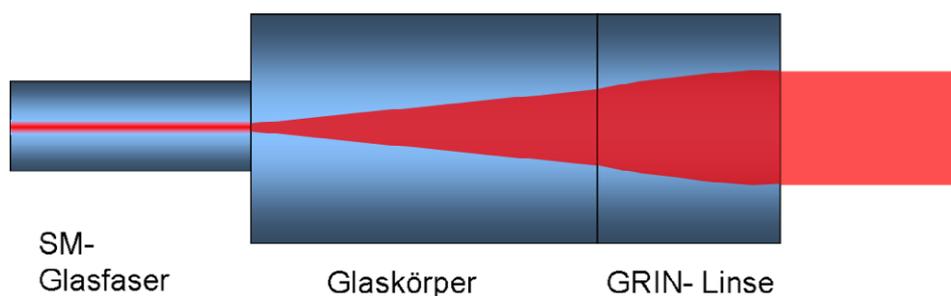


Abbildung 5.5: Aufbau eines GRIN-Faser-Pigtails für die fasergebundene Signaleinkopplung und –auskopplung bestehend aus Glasfaser, Glaszylinder zur Strahlauflösung sowie GRIN-Linse.

oder Multimodeglasfaser, einem Glaskörper, der rein zur Strahlaufweitung im System dient und einer GRIN-Linse, um das Licht einer Faser zu kollimieren oder umgekehrt kollimiertes Licht in den Kern einer Faser einzukoppeln.

Im Falle der freistrahlbasierten Signalauskopplung auf Photodioden sind hingegen speziell anzufertigende GRIN-Prisma Kombinationen erforderlich, um das Interferenzsignal auf die sensitive Fläche einer Photodioden in eine definierte Position oberhalb der mikrooptischen Bank zu fokussieren. Im Hinblick auf die Modularisierung der Schnittstelle kommen hier GRIN-Linsen mit demselben Außendurchmesser von  $500\ \mu\text{m} +0\ \mu\text{m} -5\ \mu\text{m}$ , wie bei den fasergebundenen Pigtails zum Einsatz. An der GRIN-Linse wird mittels UV-Epoxy ein Umlenkprisma mit einer Kantenlänge identisch dem GRIN-Linsen Durchmesser von  $500\ \mu\text{m}$  befestigt, welches zur  $90^\circ$  Strahlumlenkung in Richtung der Photodioden dient. Auf diese Weise können die GRIN-Prisma Kombinationen, modular und ohne Anpassungen seitens der mikrooptischen Bank, in dieselben Haltestrukturen wie die fasergebundenen Pigtails eingelegt werden. Als mögliche Photodioden für die Signaldetektion wurden die Diodentypen PDCS12T [80] und PDCS32T [81] des Herstellers Enablence ausgewählt, für die im Folgenden die Fokuslänge der GRIN-Linsen unter Berücksichtigung der geometrischen Maße für das optische System vorzusehen sind.

Unter Betrachtung von Abbildung 4.5 ist erkennbar, dass die Lichtaustrittsfläche des, an der GRIN-Linse montierten Umlenkprismas einen gewissen Abstand von der aktiven Fläche der Photodiode hat. Dieser ist unter Kenntnis der Dicke der Deckelung und der Photodiodenhöhe bestimmbar. Die Deckelung wird aus demselben Material wie das Substrat der mikrooptischen Bänke, einem polierten Siliziumwafer mit  $525\ \mu\text{m} \pm 25\ \mu\text{m}$  Dicke, hergestellt. Die Photodioden haben in beiden Fällen laut Hersteller eine Höhe von  $150\ \mu\text{m} \pm 5\ \mu\text{m}$ . Der daraus resultierende Abstand zwischen der Lichtaustrittsfläche des Prismas und der Photodiode beträgt im Mittel  $375\ \mu\text{m}$ . Die aktiven Flächen der Photodioden haben einen Durchmesser von  $12\ \mu\text{m}$  bzw.  $32\ \mu\text{m}$ . Aus den Simulationsergebnissen der optischen Pfade in Kapitel 5.1.1 und A.1 sowie aus den zugehörigen Interferogrammen sind unter Verwendung von GRIN-Linsen am Rande der Interferenzmuster der nullten Ordnung phasenverschobene Bereiche zu erwarten, die einen negativen Einfluss auf den Kontrast und das Auslöschungsverhältnis des Interferometers haben. Unter Inkaufnahme von Signalverlusten und zur Schaffung ausreichender Justagetoleranzen wurde entschieden, die Photodioden leicht zu überstrahlen. In Abbildung 5.6 sind die Ergebnisse der Simulationen beider

Kombinationen dargestellt. Für eine Photodiode mit  $12\ \mu\text{m}$  aktivem Spot wird das Licht auf einen Spotdurchmesser  $16\ \mu\text{m}$  fokussiert, im Falle einer Photodiode mit  $32\ \mu\text{m}$  beträgt der Fokusbereich  $42\ \mu\text{m}$ . Die daraus resultierenden Längen der GRIN-Linsen betragen  $525\ \mu\text{m}$  und  $660\ \mu\text{m}$ .

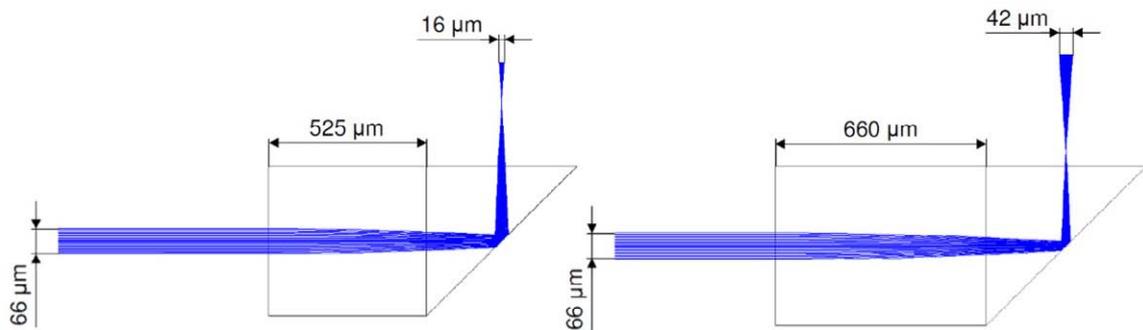


Abbildung 5.6: GRIN-Prisma Kombinationen für die Signalauskopplung auf Photodioden mit einem Spotdurchmesser von  $12\ \mu\text{m}$  bzw.  $32\ \mu\text{m}$  mit Überstrahlung der aktiven Flächen.

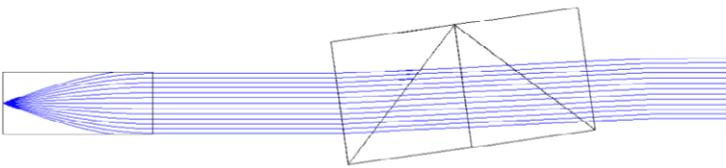
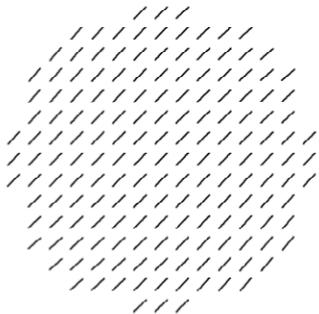
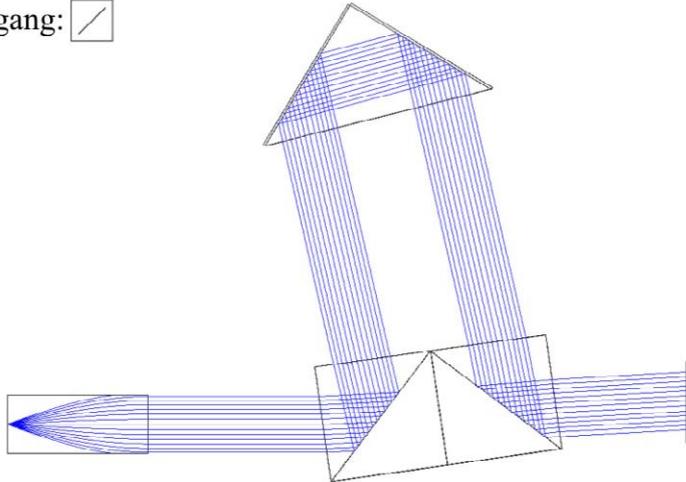
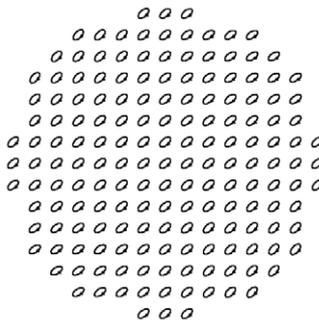
## 5.2 Optische Beschichtungen

Für die Verbesserung der Eigenschaften optischer Systeme hat sich das Beschichten optischer Bauteile als ein äußerst hilfreiches Werkzeug erwiesen und wird in vielen derzeit auf dem Markt befindlichen optischen Instrumenten eingesetzt. Neben der Reduktion von Reflektionen und damit der Reduktion des Streulichts bietet eine optische Beschichtung die Möglichkeit, das Polarisationsverhalten des Bauteils zu beeinflussen, welches im Falle eines interferometrischen Systems von besonderem Interesse ist. Für die Herstellung optischer Schichten stehen unterschiedliche Materialien zur Verfügung, die in die Gruppen der metallischen und dielektrischen Schichten unterteilbar sind. Metallische Beschichtungen bestehen meist aus Materialien wie Silber, Chrom oder Gold. Dielektrische Beschichtungen hingegen sind Mehrschichtsysteme, die aus einer bestimmten Anzahl von Folgen hoch- und niedrigbrechender Schichten bestehen. Als Materialien kommen meist Oxide, Fluoride wie z.B.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$  oder Sulfide wie z.B.  $\text{ZnS}$  zum Einsatz [82] [6]. Je nach Anwendungsfall werden quarter-wave und half-wave Schichten unterschieden [82]. Bei quarter-wave Schichten besitzen reflektierte Lichtstrahlen der unterschiedlichen Schichten einen relativen Gangunterschied von  $\pi$ , wodurch sich diese gegenseitig auslöschen. Derartige Schichten werden für Antirefleksbeschich-

tungen eingesetzt. Half-wave Schichten hingegen erzeugen einen relativen Gangunterschied von  $2\pi$  zwischen den einzelnen Schichten und somit eine konstruktive Überlagerung reflektierter Lichtstrahlen. Werden nur wenige dieser Schichten kombiniert, entstehen teildurchlässige Spiegel, die ihre Anwendung in Form von Strahlteilerflächen finden. Werden hingegen viele Schichten aufgetragen, ist die Beschichtung optisch dicht und erfüllt den Zweck einer dielektrischen Verspiegelung.

Für die optischen Komponenten des mikroiinterferometrischen Systems werden drei unterschiedliche Beschichtungen mit den Aufgaben der Strahlteilung, Strahlumlenkung und Reflektionsvermeidung dimensioniert. Die Sichten sollen so beschaffen sein, dass das System ein möglichst polarisationsneutrales Verhalten aufweist.

In Tabelle 5.1 ist das bisherige Polarisationsverhalten der vier optischen Pfade für das unvergütete System entsprechend der Simulationen aus Kapitel 5.1.1 dargestellt. In das System wird linear polarisiertes Licht unter einem Winkel von  $45^\circ$  eingekoppelt.

Optischer Pfad im System	Ausgangspolarisation
Eingang:  	
Eingang:  	

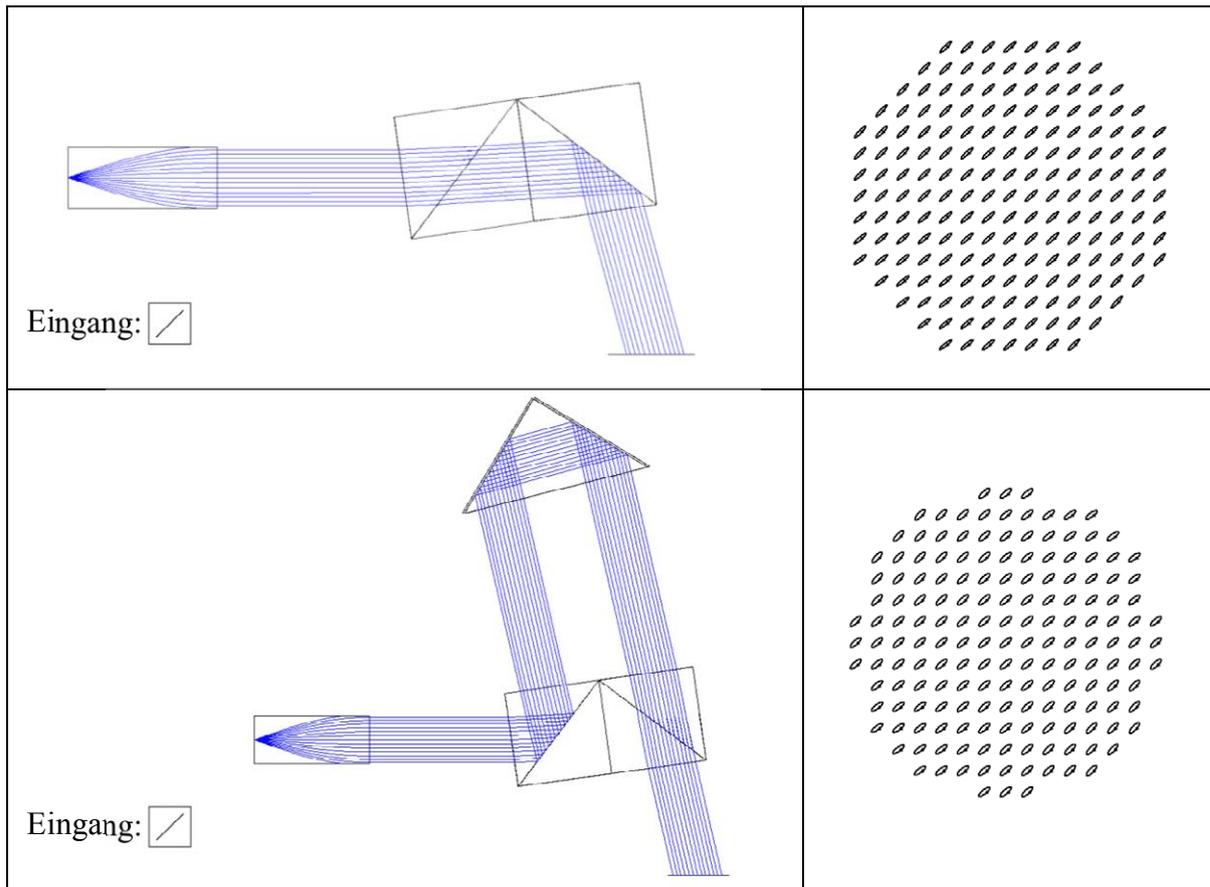


Tabelle 5.1: Polarisationszustände nach Durchlauf der vier optischen Pfade im System.

Dieses bietet den Vorteil, beide Polarisationsrichtungen gleichermaßen zu enthalten. Beide Polarisationsanteile schwingen dabei in Phase. In der rechten Spalte ist die jeweilige Polarisation der ausgehenden Lichtstrahlen dargestellt. Der Vergleich der jeweils miteinander interferierenden optischen Pfade, die auf denselben Systemausgang führen, zeigt eine eindeutige Polarisationsabhängigkeit des Aufbaus. Treten wie in den Strahlengängen zwei bis vier zirkuläre Polarisationen auf, werden die beiden Polarisationsrichtungen in ihrer Phase zueinander verschoben.

Zur Verbesserung der optischen Eigenschaften und zur Reduktion der Polarisationsinflüsse werden die optischen Elemente mit entsprechenden Beschichtungen versehen. Hierfür kann eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien in Kombination zum Einsatz kommen. Ein mögliche Kombination für die Beschichtung der beschriebenen Anordnung ist ein Spiegelbeschichtung aus Silber mit einer Schutzschicht gegen Oxidation aus  $\text{MgF}_2$ , eine zweischichtige Antirefleksionsbeschichtung bestehend aus  $\text{MgF}_2$  und  $\text{ZnS}$  sowie eine vierschichtige Strahlteilerbeschichtung, die

ebenfalls aus Materialien  $\text{MgF}_2$  und  $\text{ZnS}$  besteht. Nachfolgend wird die Berechnung der genannten Beschichtungen in Anlehnung an [5] [6] durchgeführt [83].

Einfallendes polarisiertes Licht in der X-Y-Ebene kann als Jones-Vektor wie folgt geschrieben werden:

$$\tilde{E} = \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Die Definition, des in der Optik üblichen Koordinatensystems, ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Ein Lichtvektor trifft beim Durchlaufen eines optischen Systems entlang der Z-Achse auf unterschiedliche optische Grenzflächen, die diesen entsprechend ihrer Beschaffenheit beeinflussen. Formal wird dies durch die Transformationsmatrix B berücksichtigt. Der einfallende Lichtvektor trägt den Index “i”, der das System verlassende Lichtvektor den Index “o”.

$$\tilde{E}_o = B \tilde{E}_i \quad \text{oder} \quad \begin{pmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

In den folgenden Schritten der Berechnung werden die Transformationsmatrizen, aller verwendeten optischen Beschichtungen, mathematisch beschrieben und die Matrizen für Transmission, äußere Reflektion und innere Reflektion bestimmt. Die Vorgehensweise bei der Berechnung der einzelnen Beschichtungen ist iterativ und vom Prinzip für alle eingesetzten Beschichtungen identisch. Der vollständige mathematische Ablauf wird hier am Beispiel der Antireflektionsbeschichtungen erläutert und ist auf die Beschichtung der Strahlteilerflächen und der Spiegelflächen übertragbar.

Die dielektrische Antireflektionsbeschichtung besteht aus einer niedrigbrechenden  $\text{MgF}_2$  Schicht ( $n_L = 1,38$ ) [85] und einer hochbrechenden  $\text{ZnS}$  Schicht ( $n_H = 2,34 (1+0,002i)$ ) [85] für eine Wellenlänge von 1550 nm. Als Trägerglas kommt entsprechend der Spezifikation ein N-PK51 Glas von Schott zum Einsatz. Abbildung 5.7 zeigt den Schichtaufbau der Antireflektionsbeschichtung. Bei guten Antireflektionsbeschichtungen löschen sich nahezu alle reflektierten Anteile der einzelnen Schichten gegenseitig aus. Unter Berücksichtigung des Einfallswinkels auf die Beschichtung handelt es sich somit um eine quarter-wave Beschichtung, bei der die

rückreflektierten Anteile einer Schicht eine Phasenverschiebung von einer halben Wellenlänge gegenüber der Rückreflektionen der benachbarten Schichten aufweisen.

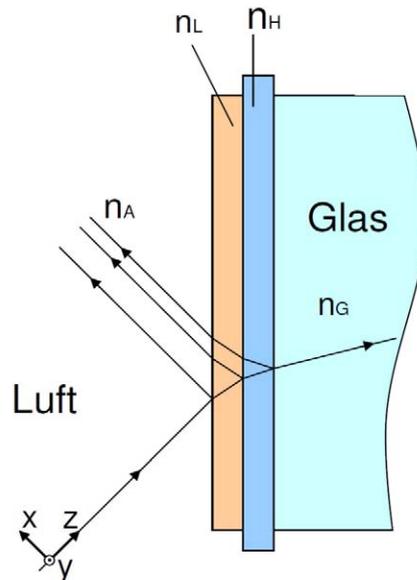


Abbildung 5.7: Zweisechichtige Antireflektionsbeschichtung aus niedrig- und hochbrechendem Material am Beispiel eines Lichtstrahls am Übergang von einem niedrigbrechenden Medium (Luft) zu einem hochbrechenden Material (Glas).

Der erste Schritt zur Bestimmung der Transformationsmatritzen ist die Berechnung der Einfallswinkel einer jeden Schicht der Antireflektionsbeschichtung. Der Einfallswinkel sei definiert als  $\theta_{0j}$  mit dem Index  $j = 0 - \pi$ . Die Winkel der Schichten  $m$  sind im Falle der Antireflektionsbeschichtung indiziert mit 1 und 2, das Glas hat folglich den Index 3. In den folgenden Gleichungen reicht der Schichtindex  $m$  somit von 0 bis 3. Unter Verwendung des komplexen Brechungsgesetzes zur Berücksichtigung der Absorption, das sich mittels Umformung mit dem Satz des Pythagoras in das Snelliussche Brechungsgesetz überführen lässt, gilt für die  $m+1$  Schicht die Gleichung:

$$\theta_{m+1,j} = a \cos \left( \sqrt{1 - \frac{n_m^2 \cdot \sin^2(\theta_{m,j})}{n_{m+1}^2}} \right) \quad (5.3)$$

Wie bereits erwähnt, sollte der Gangunterschied an jeder Schicht der Antireflektionsbeschichtung jeweils ein Viertel der Wellenlänge betragen. Unter Berücksichtigung des Brechwinkels gilt folglich für die Schichtdicke:

$$d_m = \frac{\lambda}{4 \cdot \left( n_m \cdot \cos(\theta_{m_j}) \right)} \quad (5.4)$$

Für die Wechselwirkung eines Lichtvektors mit einer optischen Oberfläche können die folgenden Winkelmatrizen mit  $i$  für einfallendes Licht,  $r$  für reflektiertes Licht und  $t$  für transmittiertes Licht definiert werden. Mit  $u$  als Spiegelmatrix.

$$w_{i_j} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{0j}) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad w_{r_j} = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_{0j}) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad w_{t_j} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1j}) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

In Anlehnung an die Fresnelschen Formeln mit den Transmissions- und Reflektionsfaktoren für nicht magnetische Materialien, können nach den Definitionen von K. Leonhardt [6] die Matrizen für reflektiertes und transmittiertes Licht in der  $p$  und  $s$  Polarisationsrichtung wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned} r_{s_{m,m+1_j}} &= \frac{\left( n_m \cdot \cos(\theta_{m_j}) \cdot (W_{t_j})^2 - n_{m+1} \cdot \cos(\theta_{m+1_j}) \cdot (W_{i_j})^2 \right) \cdot u}{n_m \cdot \cos(\theta_{m_j}) \cdot (W_{t_j})^2 + n_{m+1} \cdot \cos(\theta_{m+1_j}) \cdot (W_{i_j})^2}, \\ r_{p_{m,m+1_j}} &= \frac{\left( n_m \cdot \cos(\theta_{m_j})^{-1} \cdot (W_{t_j})^2 - n_{m+1} \cdot \cos(\theta_{m+1_j})^{-1} \cdot (W_{i_j})^2 \right) \cdot u}{n_m \cdot \cos(\theta_{m_j})^{-1} \cdot (W_{t_j})^2 + n_{m+1} \cdot \cos(\theta_{m+1_j})^{-1} \cdot (W_{i_j})^2}, \\ t_{s_{m,m+1_j}} &= \frac{2 \cdot \left( n_m \cdot \cos(\theta_{m_j}) \cdot (W_{i_j}) \cdot (W_{t_j}) \right)}{n_m \cdot \cos(\theta_{m_j}) \cdot (W_{t_j})^2 + n_{m+1} \cdot \cos(\theta_{m+1_j}) \cdot (W_{i_j})^2}, \\ t_{p_{m,m+1_j}} &= \frac{2 \cdot \left( n_m \cdot \cos(\theta_{m_j})^{-1} \cdot (W_{i_j}) \cdot (W_{t_j}) \right)}{n_m \cdot \cos(\theta_{m_j})^{-1} \cdot (W_{t_j})^2 + n_{m+1} \cdot \cos(\theta_{m+1_j})^{-1} \cdot (W_{i_j})^2} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Diese Formeln müssen für jede Schicht der Antireflektionsbeschichtung berechnet werden. Insgesamt sind dies im Falle der Antireflektionsbeschichtung 18 Reflexions- und Transmissionsformeln, die insgesamt das Verhalten beim Übergang des Lichtes von Schicht zu Schicht beschreiben. Nach folgendem Formalismus ist es möglich, die einzelnen Schichten iterativ zu einer kompletten Beschichtung zusammenzufügen.

$$rS_{m_j} = \frac{rS_{m,m+1_j} + r_{m+1,m+2_j} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \beta_{m_j}}}{I + rS_{m,m+1_j} \cdot r_{m+1,m+2_j} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \beta_{m_j}}}, \quad tS_{m_j} = \frac{tS_{m,m+1_j} \cdot t_{m+1,m+2_j} \cdot e^{i \cdot \beta_{m_j}}}{I + rS_{m,m+1_j} \cdot rS_{m+1,m+2_j} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \beta_{m_j}}},$$

$$rS_{T_{m_j}} = \frac{rS_{m+2,m+1_j} + r_{m+1,m_j} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \beta_{m_j}}}{I + rS_{m+2,m+1_j} \cdot r_{m+1,m_j} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \beta_{m_j}}}$$

$$\text{mit: } \beta_{m_j} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{\lambda} \cdot d_m \cdot \cos(\theta_{m_j})$$

Die Gleichungen für s polarisiertes Licht müssen in gleicher Weise ebenfalls für p polarisiertes Licht aufgestellt werden, worauf an dieser Stelle jedoch verzichtet wird. Mit den Ergebnissen können anschließend die Transformationsmatrizen für Transmission  $t_j$ , externe Reflexion  $r_j$  und interne Reflexion  $r_{Tj}$  der jeweiligen Beschichtung wie folgt aufgestellt werden.

$$r_j = \begin{pmatrix} rp_{m_j} & 0 \\ 0 & rS_{m_j} \end{pmatrix}, \quad t_j = \begin{pmatrix} tp_{m_j} & 0 \\ 0 & tS_{m_j} \end{pmatrix}, \quad r_{Tj} = \begin{pmatrix} rp_{T_{m_j}} & 0 \\ 0 & rS_{T_{m_j}} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Im aufzubauenden Interferometersystem wird die Antireflektionsbeschichtung je nach Anordnung des optischen Elements unter einem Winkel von  $0^\circ$  und  $8^\circ$  von einfallenden Lichtvektoren getroffen. Die Dicken der einzelnen Schichten wurden für kleine Winkel ( $<10^\circ$ ) auf hohe Transmission und geringe Reflexion optimiert. Die Berechnung der Strahlteiler- und der Spiegelschichten erfolgt analog nach dem beschriebenen Formalismus. In Abbildung 5.8 ist das Transmissions- und Reflexionsverhalten aller drei berechneten optischen Beschichtungen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel dargestellt. Im Falle der Antireflektionsbeschichtung ist der Transmissionsanteil für kleine Winkel größer 99 %, der Reflexionsanteil damit folglich kleiner 1 %. Im Falle der Spiegelbeschichtung ist der Transmissionsanteil nahezu null und der Reflexionsanteil geht wie gewünscht gegen 100 %. Für die Beschichtung des Strahlteilerwürfels wurde eine Beschichtung aus vier Schichten gewählt, die aus den identischen Materialien wie die Antireflektionsbeschichtung besteht, jedoch als half-wave Schichten dimensioniert wurden. Die Reflexions- und Transmissionsanteile liegen im Bereich von 50 %. Die Abweichung vom Sollwert ist polarisationsabhängig und liegt je nach Polarisationszustand zwischen 2,5 % und 9,8 %.

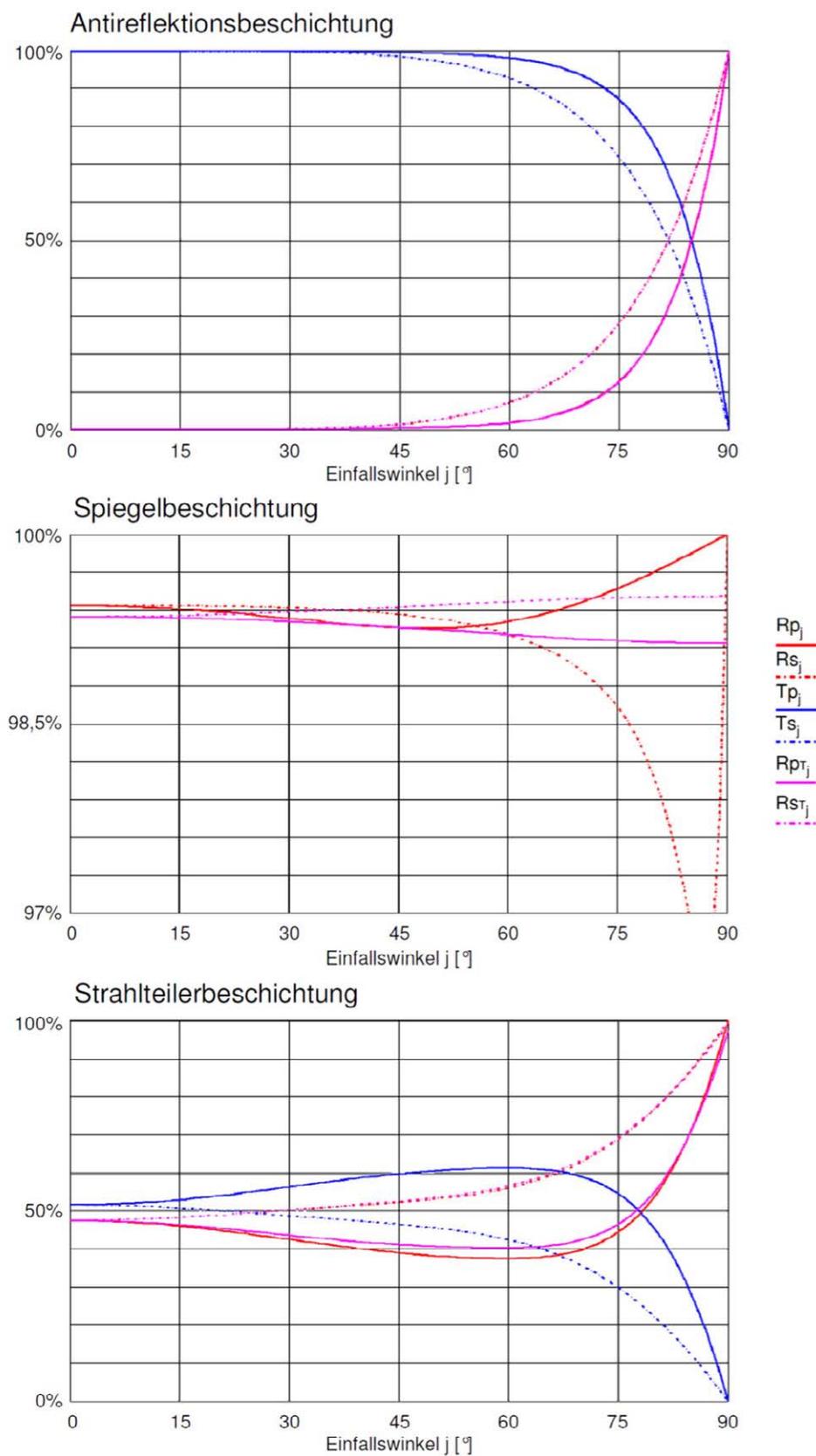


Abbildung 5.8: Normierte Reflektions- und Transmissionsgraphen für die dimensionierten Beschichtungen als Funktion des Einfallswinkels.

Nach erfolgreicher Dimensionierung aller, im System erforderlichen optischen Beschichtungen, ist für die endgültige Optimierung dieser optischen Schichtsysteme die Modellierung des gesamten Mikrointerferometersystems entlang der verschiedenen optischen Pfade notwendig. In Abbildung 5.9 sind die vier Lichtpfade des Mikrointerferometers in nummerierter Reihenfolge dargestellt.

In Abbildung 5.9 ist der allgemeine Fall einer ungekippten Anordnung dargestellt. Für den gekippten Fall müssen die Einfallswinkel  $j$  in Gleichung 5.7 des Systems entsprechend angepasst werden. Dabei werden manche Einfallswinkel größer, kleiner oder bleiben gleich. In Gleichung 5.8 sind die Winkel an das verkippte System angepasst. Entsprechend der Rechenregeln für Matrizen sind die Gleichungen von rechts nach links aufgestellt. Der Index „ar“ steht jeweils für eine Interaktion des Lichts mit der Antireflektionsbeschichtung, der Index „bs“ für eine Interaktion mit der Beschichtung der Strahlteilerflächen und der Index „mir“ für eine Interaktion mit einer der Spiegelschichten. Mit diesen Ergebnissen ist es möglich Transformationsma-

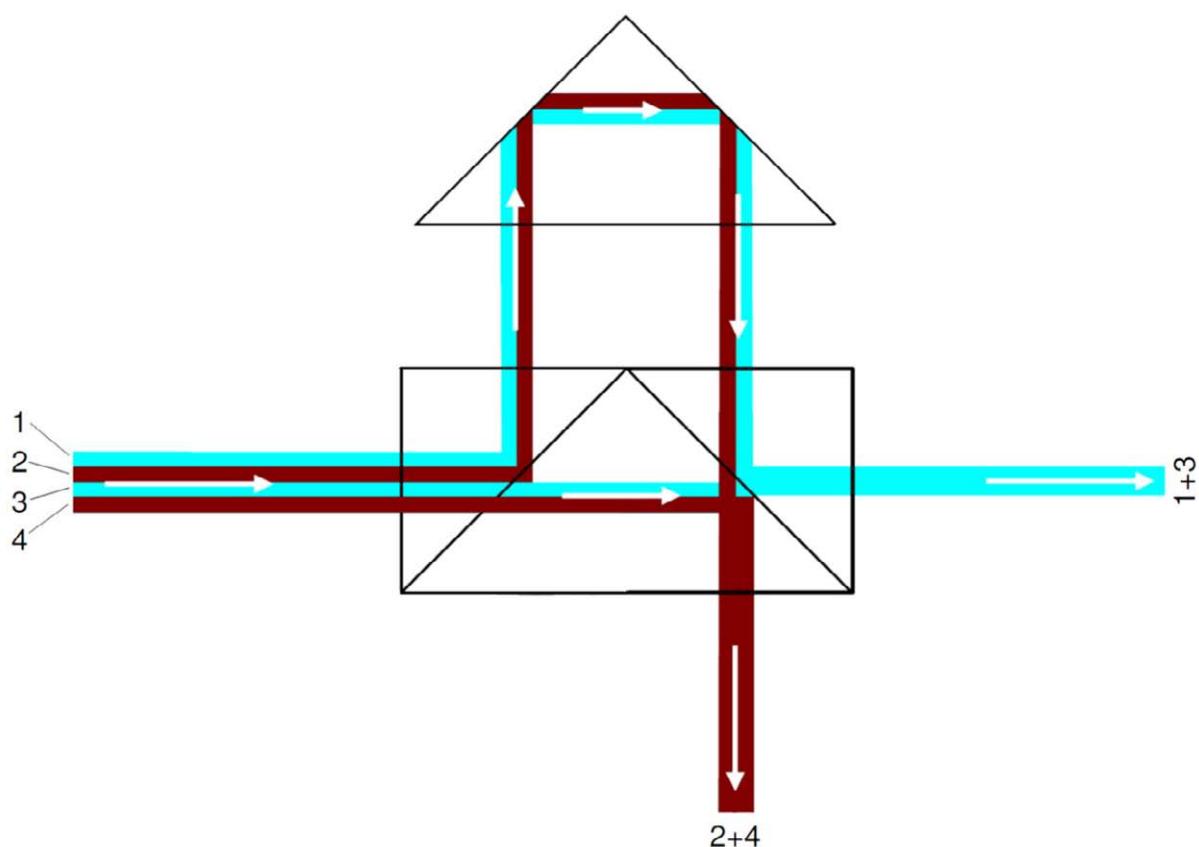


Abbildung 5.9: Optische Pfade des modularen Mach-Zehnder Mikrointerferometers. Pfad eins und drei interferieren im G-Ausgang, Pfad zwei und vier im W-Ausgang.

$$\begin{aligned}
 M_1 &= t_{ar_j} \cdot r_{T,bs_j} \cdot t_{ar_j} \cdot t_{ar_j} \cdot r_{T,mir_j} \cdot r_{T,mir_j} \cdot t_{ar_j} \cdot t_{ar_j} \cdot r_{T,bs_j} \cdot t_{ar_j} \\
 M_2 &= t_{ar_j} \cdot t_{bs_j} \cdot t_{ar_j} \cdot t_{ar_j} \cdot r_{T,mir_j} \cdot r_{T,mir_j} \cdot t_{ar_j} \cdot t_{ar_j} \cdot r_{T,bs_j} \cdot t_{ar_j} \\
 M_3 &= t_{ar_j} \cdot t_{bs_j} \cdot t_{bs_j} \cdot t_{ar_j} \\
 M_4 &= t_{ar_j} \cdot r_{T,bs_j} \cdot t_{bs_j} \cdot t_{ar_j}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

$$\begin{aligned}
 M_1 &= t_{ar_8} \cdot r_{T,bs_{39,7}} \cdot t_{ar_8} \cdot t_{ar_0} \cdot r_{T,mir_{45}} \cdot r_{T,mir_{45}} \cdot t_{ar_0} \cdot t_{ar_8} \cdot r_{T,bs_{50,3}} \cdot t_{ar_8} \\
 M_2 &= t_{ar_8} \cdot t_{bs_{39,7}} \cdot t_{ar_8} \cdot t_{ar_0} \cdot r_{T,mir_{45}} \cdot r_{T,mir_{45}} \cdot t_{ar_0} \cdot t_{ar_8} \cdot r_{T,bs_{50,3}} \cdot t_{ar_8} \\
 M_3 &= t_{ar_8} \cdot t_{bs_{39,7}} \cdot t_{bs_{50,3}} \cdot t_{ar_8} \\
 M_4 &= t_{ar_8} \cdot r_{T,bs_{39,7}} \cdot t_{bs_{50,3}} \cdot t_{ar_8}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

trizen für die vier optischen Pfade zu ermitteln und Aussagen über das optische Verhalten des Gesamtsystems zu treffen. Zwei wichtige Kenngrößen eines interferometrischen Systems sind die mittlere Intensität  $j$  und die absolute Modulation  $m$  beider Ausgänge, die über folgende Formeln definiert sind.

$$\begin{aligned}
 j_{w_\psi} &= \left( \overline{\tilde{E}_\psi} \right)^T \cdot \left[ \left( \overline{M_2} \cdot M_2 \right) + \left( \overline{M_4} \cdot M_4 \right) \right] \cdot \tilde{E}_\psi, \\
 m_{w_\psi} &= \left| 2 \cdot \left( \overline{\tilde{E}_\psi} \right)^T \cdot \overline{M_2} \right) \cdot \left( M_4 \cdot \tilde{E}_\psi \right) \right|
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

mit  $\tilde{E}_\psi$  als einfallender Lichtvektor und  $\psi = 0..2\pi$  als Polarisationswinkel.

Diese, hier für den W-Ausgang aufgestellten Gleichungen, sind in gleicher Weise für den G-Ausgang zu lösen. Die mittlere Intensität ist ein Maß für die zeitlich gemittelte Lichtleistung eines jeden Interferometerausgangs. Für ein verlustfreies ideales Interferometer ist diese für alle Polarisationsrichtungen bei beiden Ausgängen bei 50% der Gesamtleistung. Die absolute Modulation ist ein Maß für das Auslöschungsverhalten, das per Definition für ein ideales Interferometer ebenfalls bei 50% liegt, diesen Wert im Gegensatz zur mittleren Intensität jedoch nicht überschreiten kann.

Mit den erhaltenen Ergebnissen für die mittlere Intensität und absolute Modulation kann der Intensitätskontrast  $K_I$ , der Polarisationskontrast  $K_p$  sowie der komplexe Kontrast  $S$  als Funktion des Polarisationswinkels wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{aligned}
K_{IW_\psi} &= 2 \cdot \frac{\sqrt{\left(\overline{\tilde{E}}_\psi\right)^T \overline{M}_2 \cdot M_2 \cdot \tilde{E}_\psi \cdot \left(\overline{\tilde{E}}_\psi\right)^T \overline{M}_4 \cdot M_4 \cdot \tilde{E}_\psi}}{j_{W_\psi}}, \\
K_{PW_\psi} &= \frac{m_{W_\psi}}{2 \cdot \sqrt{\left(\overline{\tilde{E}}_\psi\right)^T \overline{M}_2 \cdot M_2 \cdot \tilde{E}_\psi \cdot \left(\overline{\tilde{E}}_\psi\right)^T \overline{M}_4 \cdot M_4 \cdot \tilde{E}_\psi}}, \\
S_{W_\psi} &= \frac{\left(\left(\overline{\tilde{E}}_\psi\right)^T \cdot \overline{M}_2\right) \cdot \left(M_4 \cdot \tilde{E}_\psi\right)}{\sqrt{\left(\overline{\tilde{E}}_\psi\right)^T \overline{M}_2 \cdot M_2 \cdot \tilde{E}_\psi \cdot \left(\overline{\tilde{E}}_\psi\right)^T \overline{M}_4 \cdot M_4 \cdot \tilde{E}_\psi}}
\end{aligned} \tag{5.10}$$

Die Gleichungen wurden ebenfalls in identischer Weise für den G-Ausgang ermittelt. Mit dem Intensitätskontrast  $K_I$  und dem Polarisationskontrast  $K_p$  kann der Gesamtkontrast nach Michelson  $K_G$  für beide Ausgänge des Systems bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
K_{GW_\psi} &= K_{IW_\psi} \cdot K_{PW_\psi} \\
K_{GG_\psi} &= K_{IG_\psi} \cdot K_{PG_\psi}
\end{aligned} \tag{5.11}$$

Sind alle diese mathematischen Beziehungen gelöst, können unter Verwendung der Gleichungen 5.8 – 5.11 die charakteristischen Diagramme des betrachteten Mikrointerferometersystems gezeichnet werden. Abbildung 5.10 zeigt die Ergebnisse für den um  $8^\circ$  gekippten Aufbau unter Verwendung der oben beschriebenen Antirefleksionsbeschichtung, einer vierschichtigen Beschichtung aus  $\text{MgF}_2$  und  $\text{ZnS}$  als Strahlteilerschicht und einer Spiegelbeschichtung aus Silber und einer  $\text{MgF}_2$  Schutzschicht. Im oberen Diagramm ist der normalisierte komplexe Phasenkontrast im S-Diagramm dargestellt. Die Polarisationsellipsen auf der Poincaré Kugel, die durch den Polarisationswinkel beschrieben werden, sind hier auf zwei Linien zusammengestaucht. Das Diagramm zeigt die Phasenverschiebung des zentralen Maxima  $\alpha$  beider Ausgänge als Funktion des Polarisationswinkels  $\psi$ . In das System eingekoppeltes Licht hat eine Phase von  $0^\circ$ . Der Phasenunterschied beider Ausgänge relativ zueinander beträgt ungefähr  $180^\circ$  Grad. Im Falle konstruktiver Interferenz am einen Ausgang ist am anderen Ausgang destruktive Interferenz zu erkennen. Bezogen auf das Eingangssignal sind die Ausgangssignale der beiden Ausgänge um  $150^\circ$  bzw.  $330^\circ$  phasenverschoben. Beide Linien im normierten S-Diagramm liegen nahe des

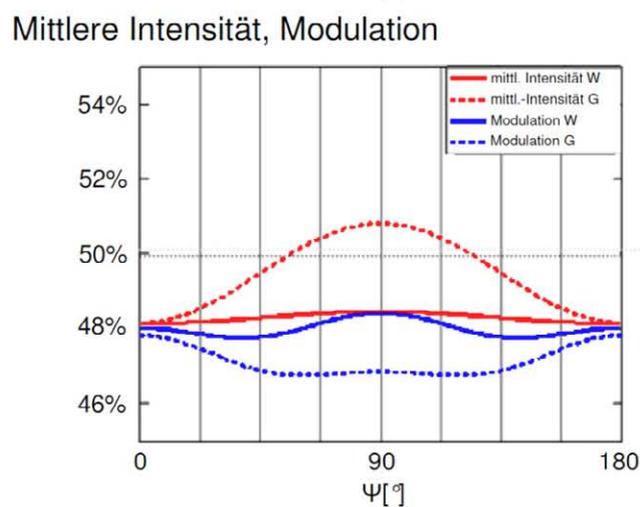
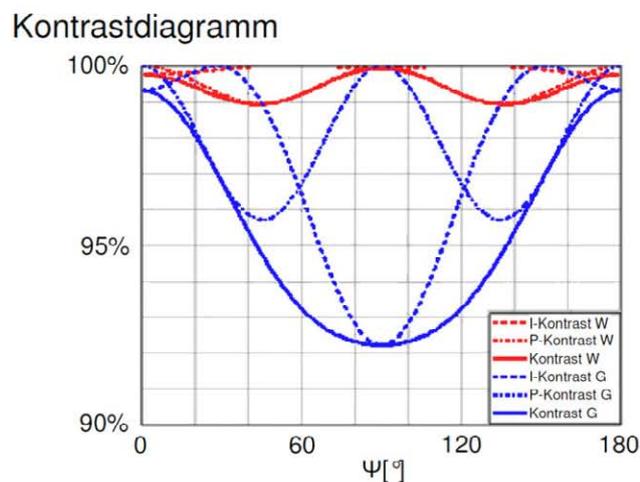
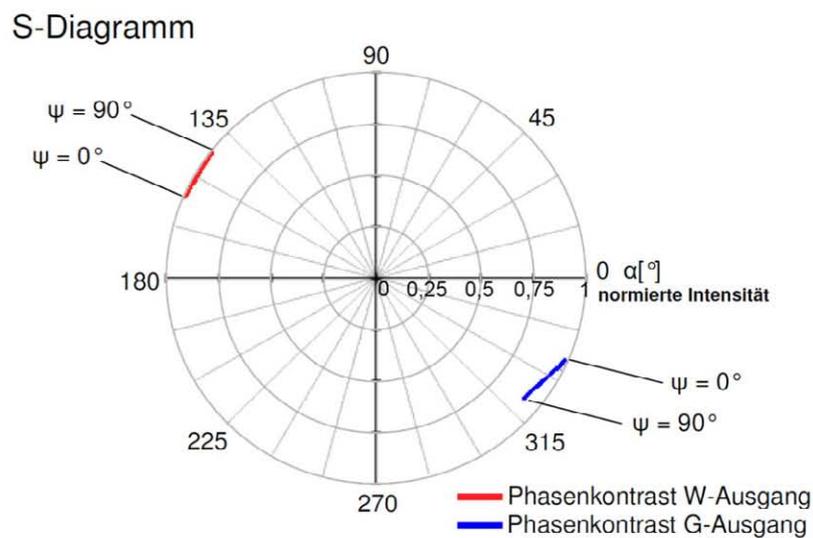


Abbildung 5.10: Diagramme mit normierten Größen als Funktion des Polarisationswinkels  $\psi$ . Oben die komplexen Phasenkontraste im S-Diagramm für beide Ausgänge, in der Mitte der Intensitäts- und Polarisationskontrast sowie der Gesamtkontrast und unten die mittlere Intensität sowie die absolute Modulation für den G- und W-Ausgang.

maximal möglichen Wertes von eins, woraus sich auf eine gute Kontrastgüte schließen lässt. Das mittlere Diagramm zeigt den normierten Intensitäts-, Polarisations- und Gesamtkontrast. Für kleine Abweichungen von  $\psi$  ist der Polarisationskontrast für die s-Polarisation größer 99%; im Falle der p-Polarisation liegt der Gesamtkontrast für den schlechteren G-Ausgang immer noch über 92%. Im unteren Diagramm der mittleren Intensität und der absoluten Modulation liegen die Ergebnisse nahe dem Optimalwert von 0,5 auf der Y-Achse. Für s-polarisiertes Licht fallen alle Werte mit geringen Verlusten nahezu auf denselben Punkt. Für p-polarisiertes Licht variieren die Werte des schlechteren G-Ausganges um ca. +0,8% -3,5%. Das zu erwartende Auslöschungsverhältnis des G-Ausgangs liegt bei 13,9 dB und des W-Ausgangs bei 22,6 dB.

Für die Beschichtungen der optischen Komponenten wurden aus der Simulation die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Beschichtungskennwerte als eine Möglichkeit zur Beschichtung für das, in dieser Arbeit entwickelte Interferometersystem ermittelt. Leider war es nicht möglich, einen Hersteller für optische Komponenten zu finden, der sich dazu bereit erklärte, von seinen Standardprozessen abweichend, die optischen Beschichtungen nach den Vorgaben in Tabelle 5.2 für kleinste Stückzahlen zu fertigen. Für die Herstellung der Demonstratoren kommen aus diesem Grund optische Komponenten rein nach den Spezifikationen aus Kapitel 4.3.2 zum Einsatz, die der Hersteller nach seinen hausinternen Prozessen entsprechend beschichtet.

Beschichtung	Anzahl Schichten	Material 1	Material 2	Schichtdicke Material 1	Schichtdicke Material 2
Antireflektions-Coating	2	MgF <sub>2</sub> $n_L = 1,38$	ZnS $n_H = 2,34(1+0,002i)$	370 nm	30 nm
Strahlteiler-Coating	4	MgF <sub>2</sub> $n_L = 1,38$	ZnS $n_H = 2,34(1+0,002i)$	327 nm	174 nm
Spiegel-Coating	2	MgF <sub>2</sub> $n_H = 1,38$	Ag $n_H = 11,3(0,0124+i)$	200 nm	400 nm

Tabelle 5.2: Mögliche Schichtdicken für die Beschichtung der optischen Komponenten für das modular aktive mikrooptische System.

### 5.3 CAD Design

Nach Abschluss der Simulationen und Berechnung der optischen Beschichtungen, kann das vollständige Design des Systems erstellt werden, um darauf basierend die Einzelkomponenten des modularen Systems herzustellen und die speziell anzufertigenden Zukaufkomponenten zu beschaffen. Basierend auf den Simulationsergebnissen, beginnt das CAD-Design des Gesamtsystems mit der Konstruktion der mikrooptischen Bänke, in deren CAD-Layout die Ergebnisse des vorhergehenden Kapitels direkt einfließen. Das CAD-Design der mikrooptischen Bank für das LIGA-Interferometer ist im Anhang A.2 zu finden. Anschließend werden, unter Berücksichtigung der Spezifikationen aus Kapitel 4.3 alle Bauteile, die die mikrooptische Bank umgeben bis hin zum Komplettsystem entworfen.

#### 5.3.1 Mikrooptische Bänke und Glaskomponenten

Das Design der mikrooptischen Bänke wird in Anlehnung an das Kapitel 5.1.1 durchgeführt und beinhaltet neben der Konstruktion der mikrooptischen Bänke die Dimensionierung der optischen Glaskomponenten.

Das optische System der mikrooptischen Bank besteht bei diesem Entwurf aus Glaskomponenten, die hybrid in die mikrooptische Bank integriert werden. Die Aufgaben der mikrooptischen Bank belaufen sich in diesem Fall hauptsächlich auf die Halterung vergüteter mikrooptischer Glaselemente und der Auskopplung auftretender Reflektionsanteile aus dem System über definiert angeordnete LIGA-Strukturen. In Abbildung 5.11 ist das CAD-Layout der mikrooptischen Bank dargestellt. Sie verfügt in der Mitte über drei Haltestrukturen für den, in diesem Design eingesetzten, doppelten Strahlteilerwürfel. Die hohe Präzision der LIGA-Strukturen mit einer Toleranz von weniger als einem Mikrometer, ermöglichen eine passive Justage durch einfaches Anlegen des Strahlteilerwürfels an diese Haltestrukturen. In die Haltestrukturen eingelassene Kleberreservoirs dienen dem einfachen Fixieren der, in die Haltestrukturen eingesetzten optischen Komponenten, um diese mittels UV-Klebstoff zu fixieren. Die Lage der Reservoirs ist dabei so gewählt, dass der beim Aushärten schrumpfende UV-Klebstoff die optischen Elemente an die gewünschten Flächen der Haltestrukturen heranzieht. Für den, optional zur Verfügung stehenden, zweiten

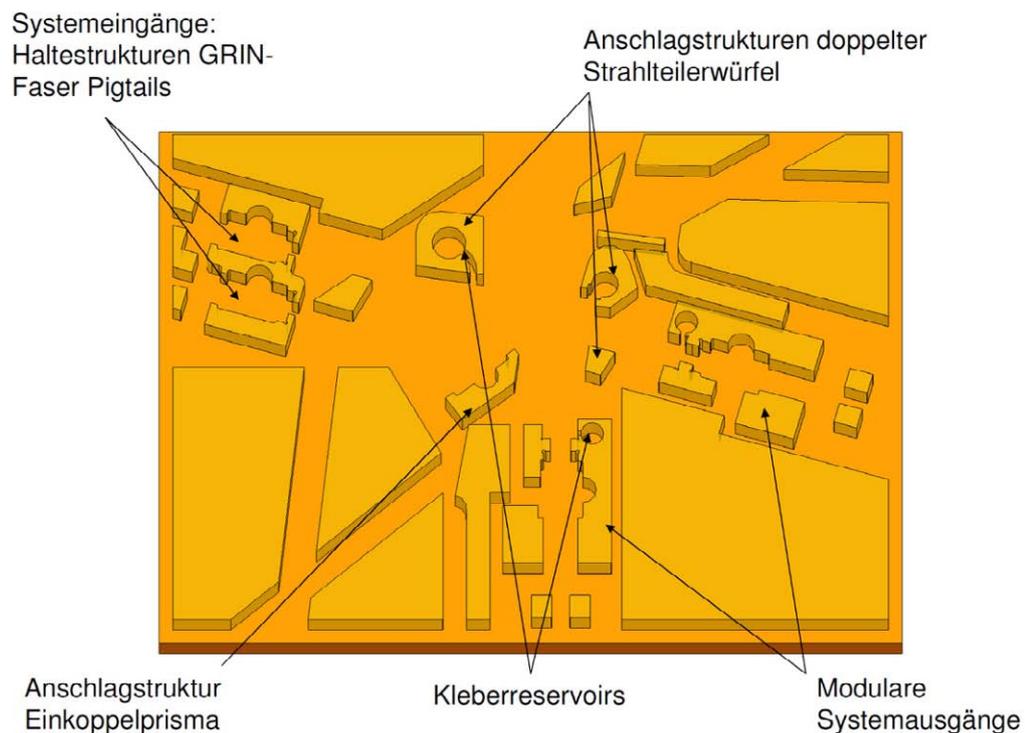


Abbildung 5.11: CAD-Zeichnung der mikrooptischen Bank für den LIGA-Interferometer mit Glaskomponenten mit Kennzeichnung der Haltestrukturen.

Eingang wird das Einkoppelprisma ebenfalls über eine geeignete Anschlagstruktur positioniert und fixiert, die die Lage des Prismas jedoch alleine nicht eindeutig definiert. Als zweite Anschlagstruktur dient die Unterseite des doppelten Strahlteilerwürfels, der aus diesem Grund vor der Montage des Einkoppelprismas eingesetzt und fixiert wird. Für die Lichteinkopplung und -auskopplung wurde gegenüber vorhergehender Arbeiten [32] [66] ein neuartiges Konzept eingesetzt. Zur Lichteinkopplung und -auskopplung kommen GRIN-Linsen zum Einsatz, die durch einfaches Einstecken von oben in geeignete Haltestrukturen montiert und gleichzeitig ausgerichtet sind. Die zylindrische Form der Linsen sorgt dabei für eine einfache Montage. In Richtung der Strahlachse wird die GRIN-Linse ebenfalls durch Anschlagstrukturen an eine definierte Position gebracht und mittels UV-Klebstoff über Kleberreservoirs fixiert. Ausgangsseitig sind die Haltestrukturen bezüglich ihrer Formgebung dahingehend dimensioniert, dass die GRIN-Linse im Verbund als Faserpigtail oder als Kombination mit einem  $90^\circ$  Umlenkprisma für die „Out of Plane“ Kopplung eingesetzt werden kann. An der Vorderseite der Haltestrukturen für die Lichtauskop-

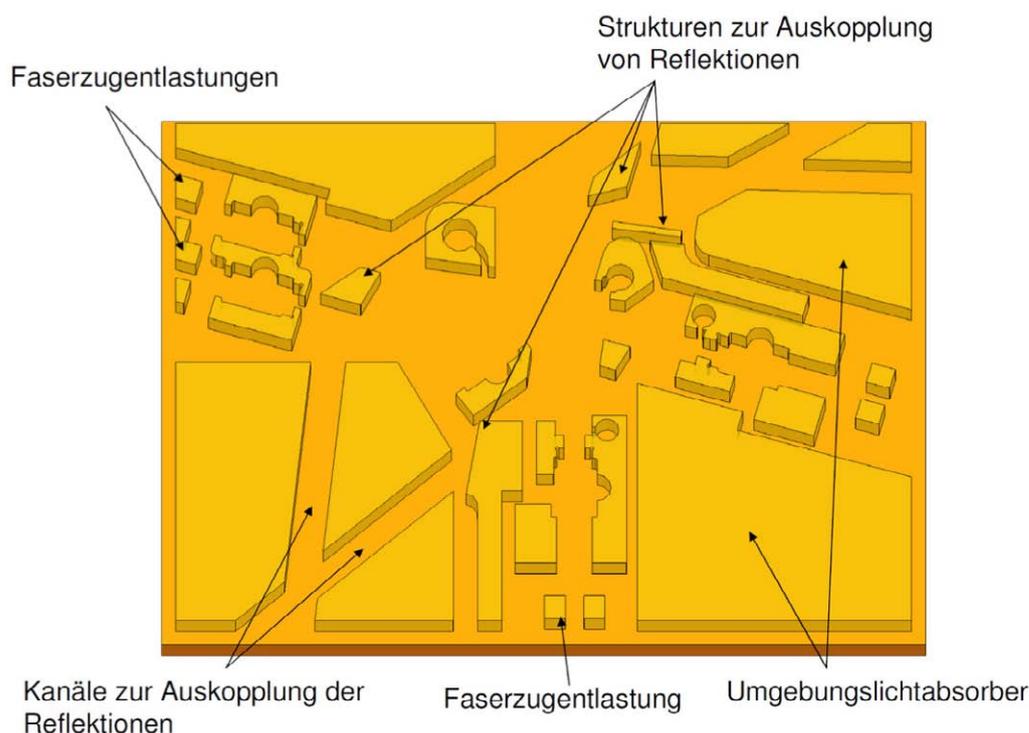


Abbildung 5.12: CAD-Zeichnung der mikrooptischen Bank für den LIGA-Interferometer mit Glaskomponenten mit Kennzeichnung der Funktionsstrukturen.

-plung befinden sich rechteckige Aussparungen und Kleberreservoirs, die optional eine zusätzliche Möglichkeit bieten, auf Submounts montierte Photodioden oder Filterelemente direkt in den kollimierten Strahlengang einzubringen. Für den Einsatz nicht gepigtailter Glasfasern stehen an den Systemeingängen und -ausgängen zusätzliche Faserzugentlastungen zur Verfügung, die bei Verwendung von GRIN-Faser Pigtails einfach durch herausbrechen entfernt werden können. Der komplette optische Aufbau ist von Absorberstrukturen umgeben, die eine Einkopplung von Umgebungslicht in das interferometrische System, insbesondere auf die optischen Ausgänge reduzieren. Unterbrechungen der Absorberstrukturen in Form von Kanälen, dienen zur Auskopplung der, wenn auch geringen Reflektionsanteile der mit der Antirefleksionsbeschichtung versehenen optischen Komponenten. Diese Anteile werden durch eine Kombination innerer und äußerer Reflektionen an speziellen Strukturen zur Auskopplung von Reflektionen, über die genannten Kanäle aus dem System geleitet. Die Positionen der Haltestrukturen sind entsprechend der Vorgaben der jeweils einzusetzenden optischen Elemente toleriert und wurden unter Berücksichtigung der vorgegebenen Maße aus den Simulationen erstellt.

Für die Lichteinkopplung und -auskopplung kommen die, bereits in Kapitel 4.3.2 und Kapitel 5.1.2 beschriebenen und spezifizierten Pigtails und Kombinationen mit GRIN-Linsen zum Einsatz. Für die optischen Komponenten wie der doppelte Strahlteilerwürfel, das Einkoppelprisma und das aktorseitige Umlenkprisma sind diese Spezifikationen abgesehen von den, in Kapitel 4.3.2 vorgegebenen Angaben und der in Kapitel 5.2 bestimmten optischen Beschichtungen noch zu vervollständigen.

In Absprache mit mehreren Herstellern optischer Komponenten stellte sich aufgrund der Möglichkeiten des Herstellprozesses heraus, dass eine Kantenlänge von einem Millimeter das derzeit kleinste, zuverlässig realisierbare Maß für die Herstellung eines Strahlteilerwürfels ist. Dieses Maß wurde als Grundmaß für die Herstellung der optischen Komponenten verwendet. Die daraus resultierenden Maße für den doppelten Strahlteilerwürfel sowie beider Prismen sind in Abbildung 5.13 dargestellt und dienen zum Vervollständigen der Spezifikationen aus Kapitel 4.3.2. Als Höhe aller optischen Komponenten wurde ein Maß von einem Millimeter gewählt, wodurch das System gegen herstellungsbedingte Höhentoleranzen weitgehend unempfindlich wird und diese ausgleichen kann. Das Umlenkprisma ist in der Größe an den doppelten Strahlteilerwürfel angepasst und hat ein Hypotenusenmaß von zwei Millimetern. Das Einkoppelprisma wurde ebenfalls entsprechend seiner Funktion im Aufbau und in Anlehnung an die Maße des Strahlteilerwürfels dimensioniert, die Kathetenlänge beträgt ein Millimeter. Alle Prismen sind rechtwinkelig und gleichseitig.

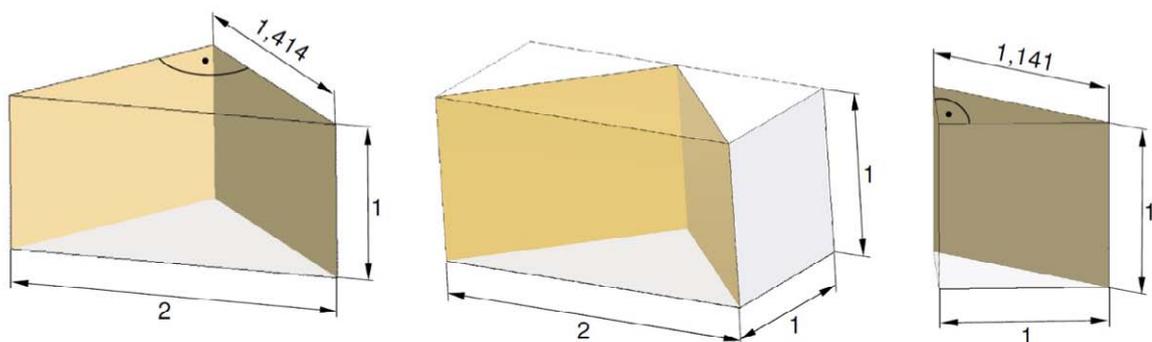


Abbildung 5.13: Maße der optischen Komponenten, die im Zuge des Designs der mikrooptischen Bänke festgelegt wurden. Links das Umlenkprisma, in der Mitte der doppelte Strahlteilerwürfel und rechts das Einkoppelprisma.

### 5.3.2 Das Gesamtsystem

Auf dem Design der mikrooptischen Bänke aufbauend ist es möglich, die restlichen Komponenten des Systems zu gestalten. Besonderes Augenmerk fällt hierbei auf die Komponenten, die an die umgebenden Schnittstellen der mikrooptischen Bank andocken, wie beispielsweise die Grundplatte und die Auswertelektronik. Am Ende dieses Kapitels stehen die kompletten CAD Modelle aller, derzeit möglichen Modulkombinationen.

#### Die Grundplatten, die Verbindung von Mikroaktor und mikrooptischer Bank

Für die Verbindung von Mikroaktor und mikrooptischer Bank ist die Grundplatte das entscheidende Element. Sie ermöglicht die Kombination mikrooptischer Bänke, die über eine standardisierte Schnittstelle verfügen, mit verschiedensten Mikroaktoren und schafft somit eine geometrische Ausrichtung der Module zueinander. Die Mikroaktoraufnahme der Grundplatte ist speziell für einen bestimmten Mikroaktor angepasst. Dieser wird je nach Mikroaktortyp auf der Grundplatte durch Kleben, wie im Falle des Piezoaktors oder des elektromagnetischen Aktors oder durch Schrauben, wie im Falle des Inchwormaktors, fixiert. Zur Ausrichtung der Mikroaktoren sind auf der Grundplatte an den Mikroaktor angepasste Anschlagstrukturen vorhanden. Seitens der mikrooptischen Bank verfügt die Grundplatte über ein neigbares Tableau, welches seinerseits über eine Anschlagstruktur zur Ausrichtung der mikrooptischen Bank verfügt. Das Tableau ist bei allen Varianten der Grundplatte vom Prinzip gleich aufgebaut und wird zusammen mit der Grundplatte durch zerspannende Fertigungs-

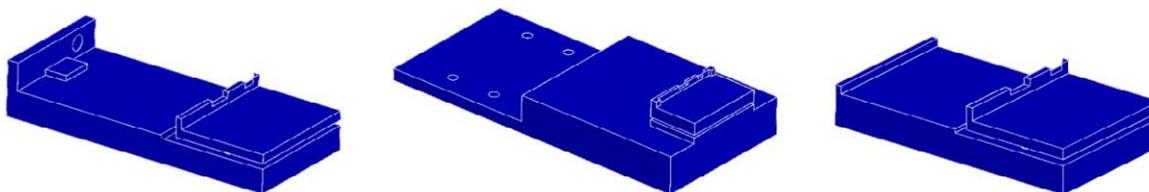


Abbildung 5.14: Unterschiedliche Grundplatten des modularen mikrooptischen Systems. Von links nach rechts für den Piezoaktor, den Inchwormaktor und den elektromagnetischen Mikroaktor.

verfahren an einem Stück hergestellt. Ein zentraler Steg der Größe eines Quadratmillimeters verbindet das Tableau beweglich mit der Grundplatte. Vier, unterhalb des Tableaus befindliche Madenschrauben in der Grundplatte ermöglichen ein gezieltes Neigen der aufgelegten mikrooptischen Bank relativ zum Mikroaktor in zwei, voneinander entkoppelten, Raumrichtungen. Auf diese Weise kann mittels Lichteinkopplung in einem aktiven Montageprozess und gleichzeitiger Detektion der Systemausgänge ein Ausgleich der herstellungs- und montagebedingten Toleranzen erfolgen. Die Grundplatten werden für alle Mikroaktorvarianten aus Messing gefertigt. Ihre CAD-Modelle sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

### Der Keramikspacer

Die Montage des Umlenkprismas ohne Hilfsstrukturen gestaltet sich an der Vorderseite des Mikroaktors, mit parallel zur Aktorvorderfläche ausgerichteter Hypotenuse, als eher schwierig. Im Falle des Piezoaktors und des Inchwormaktors erleichtert ein entsprechend geformter Keramikspacer, in den das Umlenkprisma eingeklebt wird, die Montage deutlich. Im Falle des elektromagnetischen Aktors würde dieser Spacer das dynamische Eigenschwingverhalten des Mikroaktors negativ beeinflussen. Aus diesem Grund wird das Prisma direkt und ohne Verwendung eines Spacers auf dem

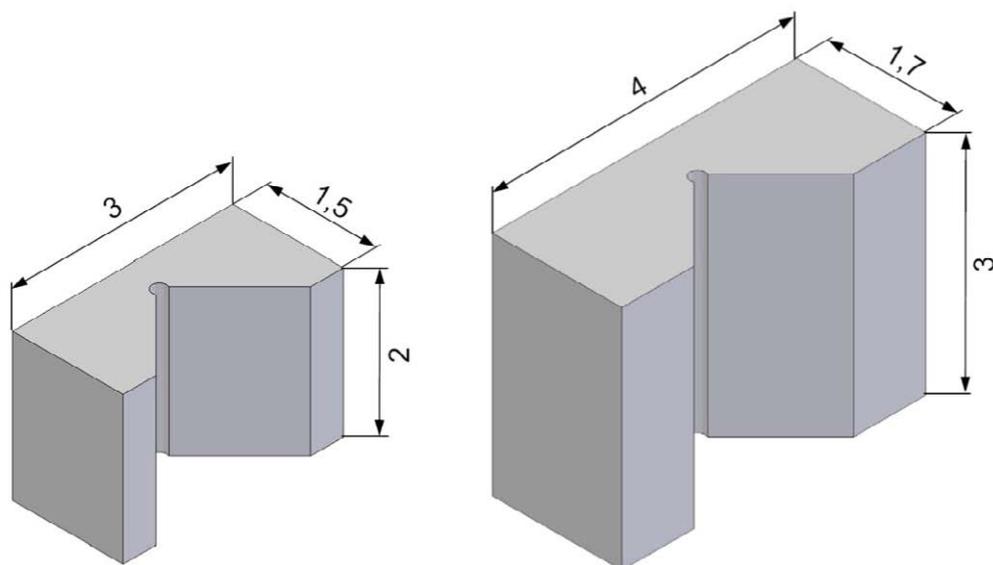


Abbildung 5.15: Keramikspacer für den Piezoaktor (links) und den Inchwormaktor (rechts).

Mikroaktor montiert und ausgerichtet. Die Maße der Keramikspacer hängen von den vorgegebenen Maßen der Mikroaktoren und des Umlenkprismas ab. Abbildung 5.15 zeigt die beiden Keramikspacer für den Piezoaktor und Inchwormaktor mit den zugehörigen Abmaßen unter Berücksichtigung der konstruktiven Vorgaben.

### Die Deckelung

Um das System vor äußeren Einflüssen wie Umgebungslicht oder Verschmutzung zu schützen, ist es erforderlich die mikrooptische Bank zu deckeln. Die Höhe der optischen Komponenten von einem Millimeter bietet im Vergleich zu den LIGA-Strukturen, die eine Höhe von ca. 500  $\mu\text{m}$  aufweisen den Vorteil einer Erhabenheit von ca. 500  $\mu\text{m}$ . Diese freistehende Höhe der optischen Komponenten, muss aus der Deckelung zwar herausgeschnitten werden, damit diese auf die mikrooptischen Bank aufgesetzt werden kann, bietet andererseits zugleich den Vorteil der einfachen Ausrichtung der Deckelung zu den optischen Komponenten. Im Falle einer fasergekoppelten Signalausgabe ist die Deckelung ansonsten geschlossen. Für den Fall einer freistrahloptischen Signalausgabe auf Photodioden, ist die Deckelung an den Positionen für die Photodioden mit rechteckigen Öffnungen von 1 x 1,15 mm versehen. Die Größe der Öffnungen wurde dabei so gewählt, dass unterschiedlich große Photodioden mit verschiedenen aktiven Flächen einsetzbar sind. Dabei wurde die variable Lage der Photodioden, die aufgrund unterschiedlicher, eingesetzter GRIN-Prisma Kombinationen zur Strahlfokussierung entstehen, mit berücksichtigt. In Verbindung mit den Photodioden ist die Dicke der Deckelung aus Gründen der

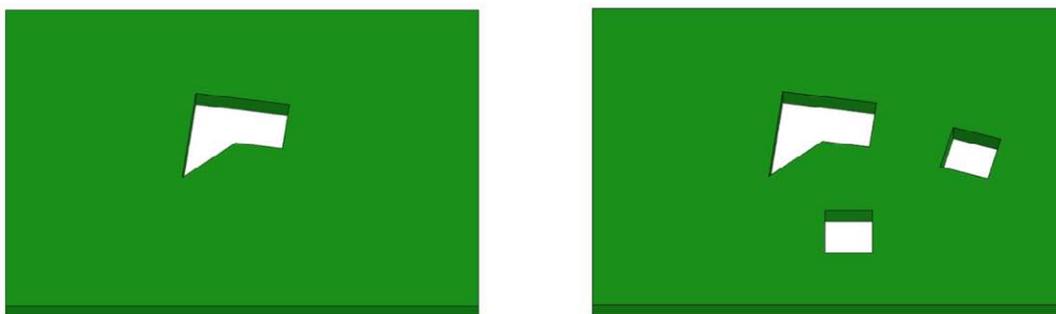


Abbildung 5.16: Deckelung für die fasergebundene Signalausgabe (links) und für die Ausgabe auf Photodioden (rechts).

Fokussierung mit 525  $\mu\text{m}$  fest vorgegeben. Die Deckelung wird in diesem Falle mittels Laserschneiden aus einem Siliziumwafer vom selben Typ, wie der der mikrooptischen Bank gefertigt. Findet keine Auskopplung auf Photodioden oberhalb der mikrooptischen Bank statt, kann die Deckelung alternativ aus Keramik oder anderen Materialien variabler Dicke von bis zu einem Millimeter hergestellt werden. In Abbildung 5.16 sind beide Varianten der Deckelung dargestellt. Die Maße der Deckelung entsprechen denen der mikrooptischen Bank von jeweils 11 x 8 mm.

### **Die Auswertelektronik und Submounts**

Der Einsatz der Auswertelektronik soll modular bei allen derzeit eingesetzten Mikroaktoren möglich sein. Basierend auf den Abmaßen des derzeit kleinsten Komplettsystems in Verbindung mit dem elektromagnetischen Mikroaktor, wurde die maximale Größe der Auswertelektronik auf 20 x 11 mm festgelegt. Die Platine selbst ist aus Gründen der Ebenheit und in Hinblick auf Hochfrequenzanwendungen mit hohen Datenraten aus Keramik mit einer maximalen Dicke von einem Millimeter gefertigt. Die Photodioden zur Detektion der optischen Signale werden auf Submounts montiert und bei der Montage in vorgesehene Aussparungen eingelassen. Dies ermöglicht den Einsatz verschiedener Photodioden mit unterschiedlichen aktiven Durchmessern im System. Die Aussparungen in der Platine für das Einsetzen der Submounts beträgt 1,9 x 1,9 mm, so dass die zum Einsatz kommenden Submounts mit einer Größe von 1,5 x 1,5 mm genügend Spielraum für das Ausrichten der Photodiode relativ zum optischen Pfad besitzen. Die Höhe der Submounts sollte dabei aus Gründen der elektronischen Kontaktierung der Höhe der Platine von einem Millimeter entsprechen.

### **Das Gesamtsystem**

Unter Zuhilfenahme der Zukaufteile, wie der optischen Komponenten, Pigtails und der Mikroaktoren sowie der Photodioden können aus den, in diesem Kapitel beschriebenen Komponenten alle CAD-Modelle der möglichen modularen aktiven mikrooptischen Systeme erzeugt werden. Als Beispiele sind in Abbildung 5.17 drei möglichen Kombinationen aufgezeigt [84]. Ein Aufbau in Kombination mit einem Piezoaktor und Auswertelektronik, ein Aufbau mit Inchwormaktor, ebenfalls mit Auswertelektronik sowie ein Aufbau mit elektromagnetischem Mikroaktor in

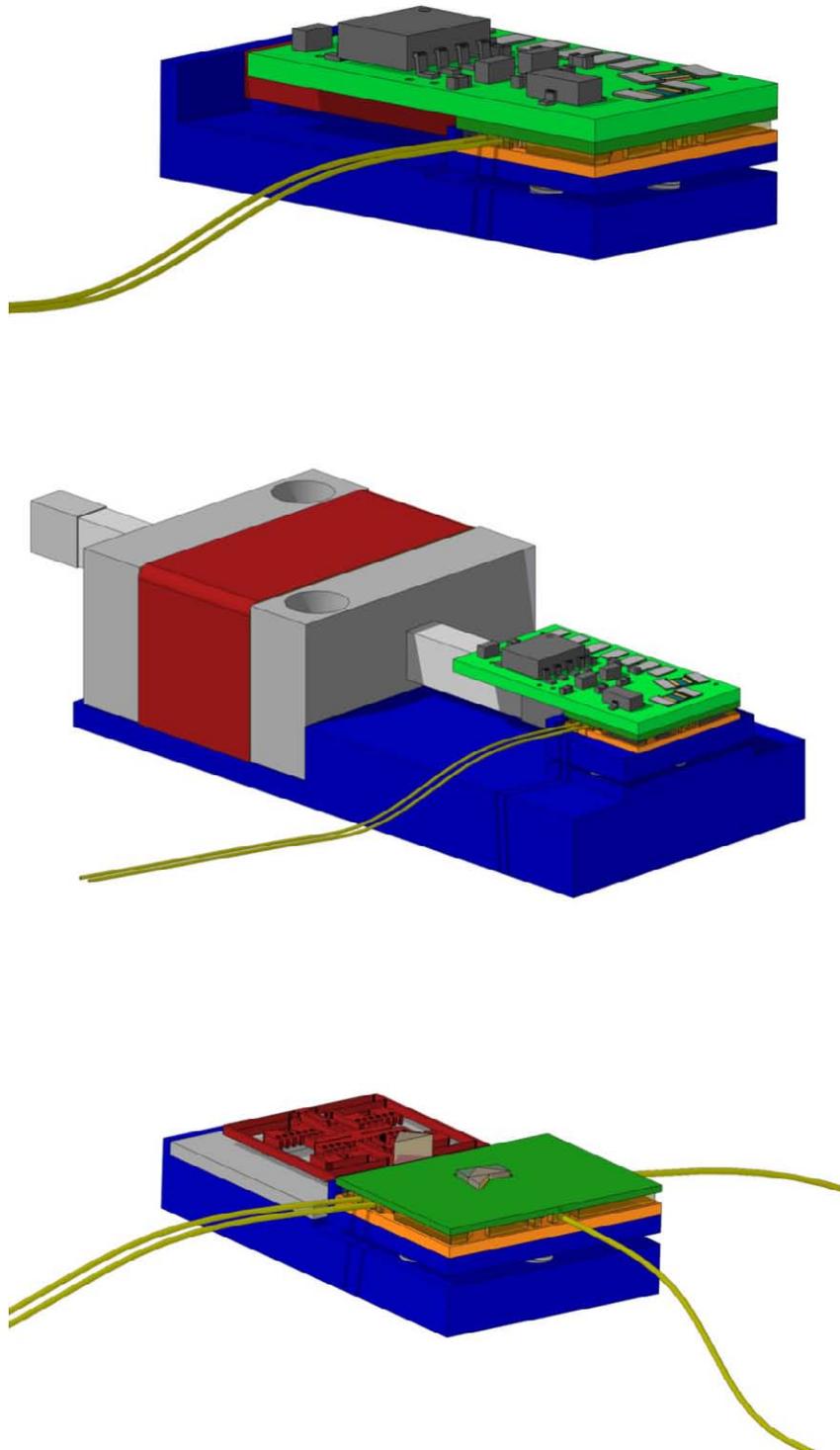


Abbildung 5.17: Drei exemplarische Modellvarianten des modularen mikrooptischen Systems. Oben mit Piezoaktor und in der Mitte mit Inchwormaktor, beide mit elektronischer Signalausgabe. Unten elektromagnetischer Mikroaktor und fasergebundener Singlausgabe.

Verbindung mit einer fasergebundenen Signalausgabe. Alle weiteren denkbaren Kombinationen sind ebenfalls uneingeschränkt realisierbar.

## **5.4 Entwicklung der Auswerteelektronik**

Nachdem alle elektronischen und mechanischen Anforderungen sowie Randbedingungen für die Auswerteelektronik festgelegt sind, wurde entsprechend der Vorgaben eine geeignete elektronische Schaltung entwickelt und das zugehörige Platinendesign entworfen. Eine ausführliche und detaillierte Beschreibung der Platine und ihrer Entwicklung ist in [86] zu finden.

### **Dimensionierung der Schaltung**

Zur Realisierung der Schaltung steht laut Spezifikation in Kapitel 4.3.4 eine Grundfläche von 20 x 11 mm zur Verfügung. Erste Überlegungen zeigten, dass die Fülle an Teilfunktionen, wie sie in Abbildung 4.7 dargestellt sind, nicht auf der, zur Verfügung stehenden Fläche unterzubringen ist. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Datenübertragung von der Elektronik zur Datenerfassung und Datenaufbereitung räumlich zu trennen. Lediglich die Wandlung der Photoströme beider Photodioden in Spannungen und deren Aufbereitung erfolgt auf der Elektronik oberhalb des Aufbaus, da sich im Gegensatz zum Photostrom die daraus gewandelten und verstärkten Spannungssignale ohne den Einfluss von Leitungsbelägen übertragen lassen [87].

Für die Digitalisierung der Messsignale und deren Übertragung an einen Rechner, wird auf eine kommerziell verfügbare Platine zurückgegriffen. Diese Platine zur Datenübertragung verfügt über Abmessungen von 53 x 43 mm. Sie kann bis zu acht analoge Kanäle mit einer maximalen Auflösung von 10 Bit einlesen und über eine USB-Schnittstelle an einen Rechner übertragen. Ein Mikrocontroller wandelt die analogen Signale in digitale Signale um. Die gewandelten Signale werden an einen USB-Controller Baustein weitergegeben, der im Auswerterechner eine virtuelle serielle Schnittstelle emuliert, auf der die digitalen Signale ausgelesen werden können. Die Platine zur Datenübertragung wird über die USB-Schnittstelle mit einer Spannung von 5V versorgt. Ihre Eingänge für analoge Messsignale erlauben ein maximales Spannungssignal von 2047 mV. Angepasst auf diesen Wert, wurde die Ausgangsspannung der Datenerfassungs- und Datenaufbereitungselektronik ausgelegt. Ihre

Versorgungsspannung beträgt ebenfalls 5 V, die sie wie die Datenübertragungsplatine über die USB-Schnittstelle erhält.

Ein erster Entwurf der Elektronik sah vor, mehrere Operationsverstärker hintereinander zu schalten. Ein integrierter Transimpedanzverstärker für die Strom-Spannungswandlung wurde für einen maximalen Photostrom von 30  $\mu\text{A}$  ausgelegt. Hieraus ergibt sich ein Widerstand von 100 k $\Omega$  [86]. Um den Verstärker bei minimaler Beleuchtungsstärke nicht in die Begrenzung zu treiben, sind die Photodioden über einen Spannungsteiler mit einer Spannung von 0,2 V vorgespannt. Ein Tiefpass zur Unterdrückung hochfrequenter Rauschsignale der Photodioden wurde auf eine Grenzfrequenz von 50 Khz ausgelegt [86].

Für die Überwachung der Systemtemperatur wird zusätzlich ein, in einem IC-Gehäuse integrierter Temperatursensor eingesetzt. Dieser verfügt über einen Messbereich von 0-90 °C und liefert abhängig von der Temperatur ein für die Datenübertragungsplatine geeignetes Ausgangssignal zwischen 0 V und 2 V.

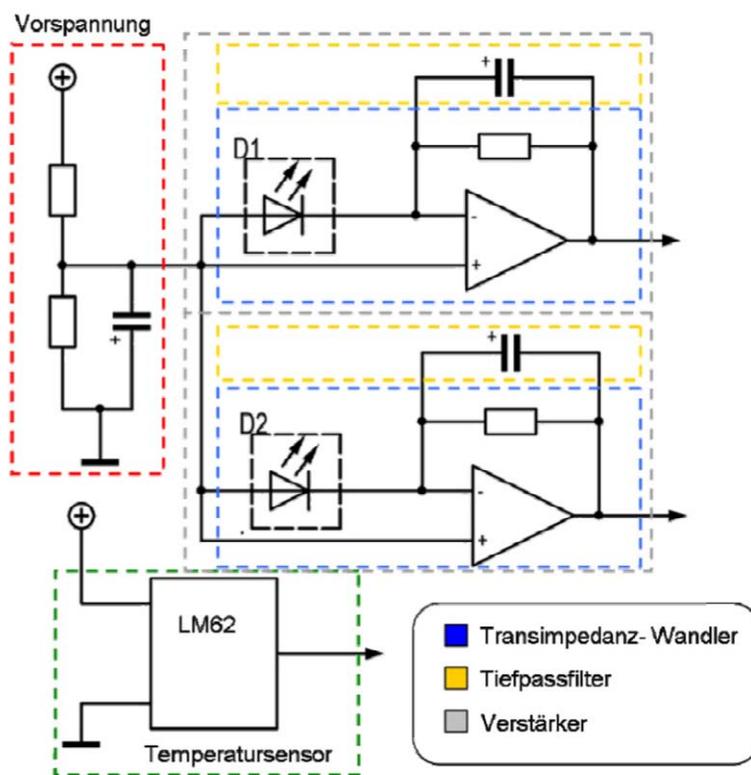


Abbildung 5.18: Beschaltung des Operationsverstärkers zur Signalaufbereitung der Photodiodensignale [86].

Durch die große Ähnlichkeit vieler Schaltungselemente war es möglich, die drei eingesetzten Operationsverstärkergrundschaltungen zu einer Schaltung zusammen zu fassen (siehe Abbildung 5.18). Deutlich wird dies am Beispiel des Transimpedanzwandlers, welcher die Spannung direkt auf den gewünschten Wert verstärkt. Zur Integration des Tiefpassfilters wird ein Kondensator in den Rückkopplungszweig des Operationsverstärkers geschaltet. Bei der Dimensionierung der Schaltung ändern sich die Werte der Widerstände und Kondensatoren nicht. Als Operationsverstärker kommt der Rail-to-Rail-Verstärker AD8602 zum Einsatz. Diese Art von Verstärker ist in der Lage, ein Eingangssignal verzerrungsfrei im Bereich seiner Versorgungsspannung zu verstärken. Bei normalen Operationsverstärkern kommt es bei Eingangsspannungen, die im Bereich ihrer Versorgungsspannung liegen zu nicht linearen Effekten. Ein weiterer Vorteil liegt in der Versorgungsspannung des AD8602 selbst. Benötigen normale Operationsverstärker eine positive und eine negative Versorgungsspannung, ist dieser, für mobile Anwendungen entworfene Verstärker in der Lage, mit einer Spannung von 0-5 V zu arbeiten. Im Hinblick auf die USB Spannungsversorgung erweist sich dies als vorteilhaft. Idealerweise enthält das Gehäuse des AD8602 zwei voneinander unabhängige Operationsverstärker, weshalb beide Photodiodenströme unter Verwendung eines einzigen Bausteins gewandelt werden können. Zudem ist er dank seines niedrigen Eingangsstroms von 200 fA für diese Anwendung bestens geeignet.

### **Simulation und Platinenlayout**

Zur Verifizierung der dimensionierten Bauteile wurde die entwickelte Schaltung mit der kommerziellen Software PSpice Capture der Firma Cadence simuliert. Als mathematisches Modell für die Simulation des Operationsverstärker AD8602 diente ein Modell des Herstellers. Das Ersatzschaltbild der Photodioden besteht aus einer Stromquelle mit hohem Innenwiderstand. Alle weiteren Standardbauteile sind in PSpice bereits vorhanden und können direkt eingesetzt werden. Wie in [86] beschrieben, ist das Verhalten der Photodiode zwischen 0  $\mu$ A und 30  $\mu$ A streng linear und liegt in einem Spannungsbereich von 0,2 V bis 1,8 V.

Die Ergebnisse der dynamischen Simulation in [86] zeigen bei einem konstanten Diodenstrom von 30  $\mu$ A, was einer maximalen Ausleuchtung der Photodiode entspricht, einen Abfall der Signalamplitude bei einer Frequenz von 50 Khz um 3 dB.

Entsprechend der Spezifikationen ist die Datenaufbereitungsplatine somit zufrieden stellend dimensioniert.

Nach erfolgreicher Simulation der entworfenen Schaltung, kann diese in ein Platinenlayout umgesetzt werden. Aus Gründen des zur Verfügung stehenden Bauraumes ist es erforderlich hierfür die SMD-Technik (= Surface Mounted Device) einzusetzen. Die Erstellung des Designs erfolgte mittels der am Markt etablierten Software Target 3001!. Die Platine besitzt an den vordefinierten Positionen Aussparungen für die Montage der Submounts. Die Öffnungen haben wie vorgegeben eine Größe von 1,9 x 1,9 mm. Neben den Aussparungen befinden sich die Kontaktpads für die Verbindung der Platine mit den Submounts. Zur Verbindung der Datenerfassungsplatine mit der Datenübertragungsplatine befinden sich zudem seit-

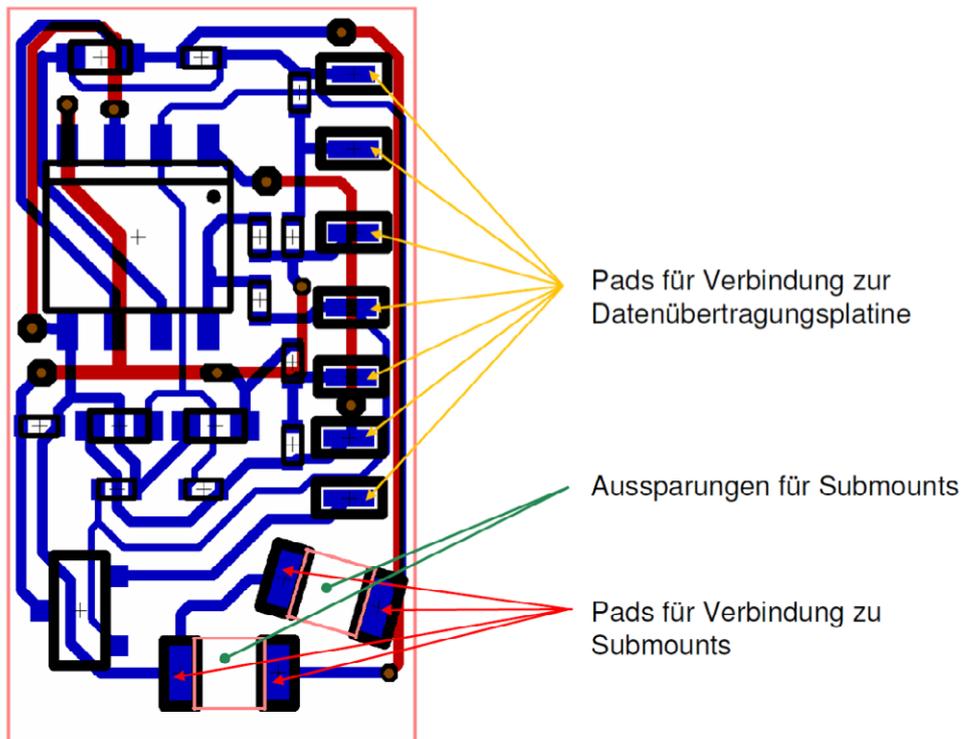


Abbildung 5.19: Platinenlayout für die Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine, erstellt mit Target 3001! [86].

lich angeordnet Kontaktpads für den Anschluss über ein Flachbandkabel. Als Platinenmaterial kommt wegen der bereits beschriebenen Gründe, ein Keramiksubstrat Namens Rogers 4003 zum Einsatz [86]. Die Platine wird zur leichteren

Unterbringung aller Leiterbahnen auf dem geringen, zur Verfügung stehenden Bauraum, als Dual-Layer Platine hergestellt. Das entwickelte Platinendesign, wie es zur Platinenherstellung und -bestückung an einen externen Zulieferer weitergeleitet wurde, ist in Abbildung 5.19 zu sehen.



## 6 Fertigung und Aufbau der Mikrointerferometer

Nach Dimensionierung und Simulation aller Einzelkomponenten des modularen aktiven mikrooptischen Systems, kann mit der Vergabe von Fertigungsaufträge und der Beschaffung der Zukaufteile fortgefahren werden. Die Herstellung der optischen Komponenten, der Platinen und der Submounts erfolgt bei Zulieferfirmen anhand der zuvor erarbeiteten Spezifikationen. Auf ihre Herstellung wird im Folgenden nicht näher eingegangen. Ebenso wird bei den verwendeten, kommerziell verfügbaren Mikroaktoren und bei den Photodioden auf die jeweiligen Hersteller verwiesen. Der eingesetzte elektromagnetische Mikroaktor entstand im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit am IMTEK Institut der Universität Freiburg. Für die Beschreibung dessen Herstellung sei auf [33] [88] verwiesen. Nach Charakterisierung der zugelieferten Komponenten, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, erfolgt im Anschluss an die hausinterne Herstellung der mikrooptischen Bänke sowie diverser mechanisch bearbeiteter Teile, die Montage der einzelnen Module und des Gesamtsystems. Die Herstellung der mikrooptischen Bänke erfolgt nach dem im Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) verfolgten LIGA-Prozess, auf den in Teilkapitel 6.1 noch näher eingegangen wird.

### 6.1 Mikrooptische Bänke

Für die hochpräzise Positionierung von Mikrobauanteilen hat sich die LIGA-Technik als ein geeignetes Werkzeug erwiesen. Mit ihrer Hilfe lassen sich unter Anderem hochpräzise passive Haltestrukturen für optische Anwendungen und optische Elemente in Polymer herstellen. Die Genauigkeit der LIGA-Haltestrukturen liegt im Bereich von bis zu 200 nm. Für die Herstellung mikrooptischer Bankmodule ist das Verfahren aus diesem Grund besonders geeignet.

Das LIGA-Verfahren selbst ist ein Verfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen von größer 100 auf Basis der Röntgentiefenlithographie [93] [100]. Das Aspektverhältnis beschreibt dabei die Relation einer Strukturhöhe zur kleinstmöglichen Strukturbreite. Der Name des LIGA-Verfahrens steht für die drei Hauptverfahrensschritte der Lithographie, der Galvanik und der Abformung, die es je

nach Anwendungsfall erlauben, direktlithographische Mikrostrukturen in Polymer zu erzeugen, diese galvanisch in metallische Strukturen umzukopieren oder metallische Formeinsätze für eine anschließende Replikation der Mikrostrukturen in Polymer zu erzeugen. Die wichtigsten Prozessschritte des LIGA-Verfahrens sind in Abbildung 6.1 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert. Eine ausführlichere Beschreibung des LIGA-Verfahrens sowie weitere aktuelle Anwendungsgebiete sind in [76] [91] [93] [94] zu finden.

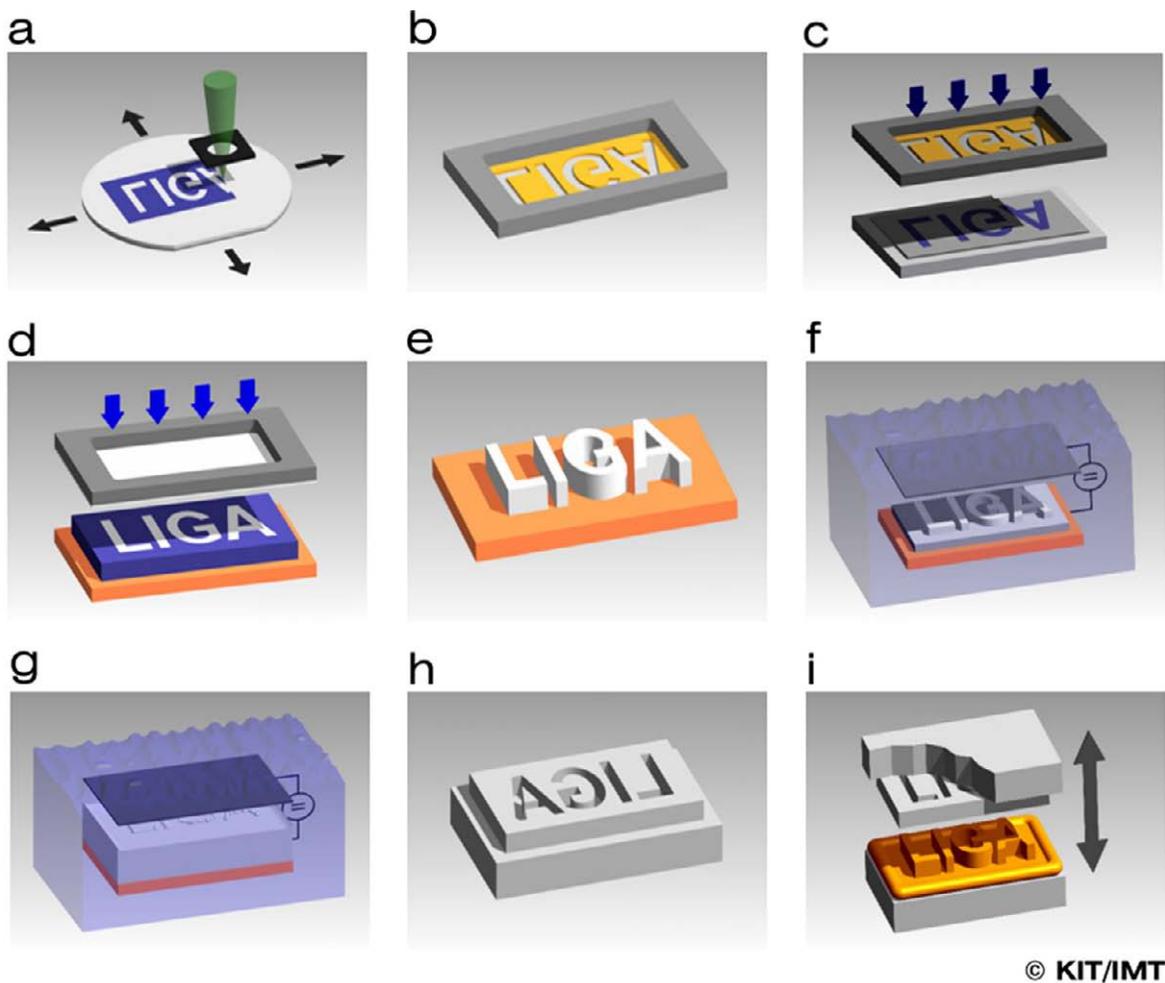


Abbildung 6.1: Prozessschritte des LIGA-Verfahrens.

Der erste Schritt zur Erzeugung von Strukturen mittels des LIGA-Verfahrens besteht in der Herstellung einer Zwischenmaske für die Röntgenlithographie. Die gewünschten Strukturen werden dabei mittels Elektronenstrahlolithographie in einen Resist geschrieben. In der vorliegenden Arbeit wird hierfür der Positivresist PMMA

eingesetzt. In den Bereichen, in denen das PMMA zu entfernen ist, wird der Resist mit dem Elektronenstrahlschreiber bestrahlt und damit die Molekülketten des PMMA durchbrochen (Abbildung 6.1 a). Unterhalb des Resists ist eine 2,5  $\mu\text{m}$  dünne Titanschicht aufgesputtert, die im Folgenden als Maskenmembran dient und sich aufgrund einer darunter liegenden Kohlenstoffschicht vom Wafer lösen lässt. Dazu wird nach dem Entwickeln des bestrahlten Resists und einer darauf folgenden Gold-Galvanik, ein Invar-Rahmen auf die Titanfolie geklebt und diese vom Substrat getrennt (Abbildung 6.1 b). Anschließend wird die Zwischenmaske mit ca. 3  $\mu\text{m}$  hohen Goldabsorbern röntgenlithographisch umkopiert, um eine Maske mit höherem Röntgenkontrast zu erhalten. Auf einem Invar-Substrat wird hierzu eine Titanschicht aufgebracht und diese mit einem PMMA Resist von ca. 60  $\mu\text{m}$  Höhe versehen. Dieser wird mit der Zwischenmaske bestrahlt (Abbildung 6.1 c) und anschließend entwickelt. Nach einer erneuten Goldgalvanik zur Herstellung von ca. 30  $\mu\text{m}$  hohen Goldabsorbern, wird das Invar-Substrat von der Rückseite selektiv geätzt, bis die Titanfolie frei liegt. Mittels dieser Arbeitsmaske ist es möglich, die eigentlichen Strukturen zu erstellen. Für die mikrooptischen Bänke der vorliegenden Arbeit werden hierzu 500  $\mu\text{m}$  dicke PMMA-Plättchen auf ein Siliziumwafer geklebt und röntgenlithographisch durch die Arbeitsmaske bestrahlt (Abbildung 6.1 d) und entwickelt. Übrig bleiben direktlithographische LIGA-Strukturen, wie sie im Folgenden als mikrooptische Bank eingesetzt werden (Abbildung 6.1 e). Für die Herstellung metallischer Mikrostrukturen, wie im Falle des verwendeten elektromagnetischen Mikroaktors, ist es möglich die PMMA Strukturen galvanisch in metallische Strukturen umzukopieren (Abbildung 6.1 f), oder auch die metallischen Strukturen überwachsen zu lassen (Abbildung 6.1 g), um aus ihnen, durch mechanisches Nachbearbeiten, Formeinsätze für die Kunststoffreplikation von Mikrostrukturen in großer Stückzahl zu erzeugen (Abbildung 6.1 h). Für die Herstellung metallischer Strukturen muss jedoch zuvor eine Galvanikstartschicht (z.B. aus Gold) unter dem Substrat aufgebracht werden. Abbildung 6.1 i zeigt die Herstellung einer polymeren Mikrostruktur durch Heißprägen mittels eines, auf diese Weise hergestellten Formeinsatzes.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit hergestellten mikrooptischen Bänken handelt es sich um direktlithographische Bauteile. Das bedeutet, die mittels Röntgenlithographie hergestellten Strukturen werden nicht galvanisch in einen Formeinsatz umkopiert und über Abformung hergestellt, sondern direkt als Bauteile eingesetzt. Diese verkürzte Version des LIGA-Prozesses wird auch als „direkt LIGA“ bezeichnet. Im Falle einer

größtechnischen Herstellung des modularen mikrooptischen Systems, können die benötigten Formeinsätze nachträglich hergestellt werden.

Bei der direktlithographischen Herstellung der mikrooptischen Bänke wird auf einem handelsüblichen Siliziumwafer der Dicke 525  $\mu\text{m}$  ein gegossenes PMMA Plättchen der Größe 30 x 75 mm mit einer Höhe von 500  $\mu\text{m}$  aufgeklebt. Optional kann ein, mit einer 2,5  $\mu\text{m}$  dicken Titanschicht versehener und oxidiertes Wafer eingesetzt werden. Die Titanoxidschicht bietet hierbei den Vorteil einer höheren Absorption der im optischen System auftretenden Reflektionen und führt zugleich zu einer verbesserten Haftung der Strukturen auf dem Substrat. Anschließend wird das Substrat mittels der nach dem LIGA-Prozess gefertigten Arbeitsmaske mit Synchrotronstrahlung bestrahlt. Die dafür eingesetzten Arbeitsmasken für die beiden entwickelten Layouts sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Arbeitsmaske für die LIGA-Interferometer basierend auf Totalreflektion enthält neben den eigentlichen Strukturen des interferometrischen Aufbaus weiterführend Teststrukturen für das Montieren und Verkleben von Gradientenindexlinsen (obere Strukturen in Abbildung 6.2 rechts).



Abbildung 6.2: LIGA-Arbeitsmasken für das LIGA-Interferometer mit Glaskomponenten (links) und das LIGA-Interferometer basierend auf Totalreflektion (rechts).

Nach der Bestrahlung wird der Resist mittels eines organischen Entwicklers [89] selektiv bei Raumtemperatur entwickelt [90]. Der Prozess dauert ca. 16 Stunden, wodurch sich die bestrahlten Bereiche des Resists lösen. Die vollständig strukturierten LIGA-Strukturen sind nach anschließenden Reinigungsschritten in Abbildung 6.3 dargestellt. Im abschließenden Herstellungsschritt werden die mikrooptischen Bänke vereinzelt. Dies geschieht mittels Laserritzen. Dabei wird der Wafer, um die

Strukturen nicht zu verunreinigen, von hinten mittels eines NdYAG-Lasers geritzt, jedoch nicht völlig durchgeschnitten. Die mittlere Leistung des Lasers beträgt 20 W bei einer Wellenlänge von 1064 nm. Auf diese Weise wird verhindert, dass sich der durch den Schneideprozess entstehende Auswurf auf den Strukturen niederschlägt. Das Trennen der mikrooptischen Bänke aus dem Waferverbund erfolgt durch gezieltes Brechen entlang der geritzten Strukturen über eine scharfe Kante. Als Hilfswerkzeug kommt bei kleineren Bruchkanten, ein Skalpell zum Einsatz. Zum leichteren Vereinzeln der Waferstücke, werden diese auf eine nachgebende Unterlage, wie z.B. eine Gummimatte gelegt. In Abbildung 6.4 sind zwei auf diese Weise vereinzelt mikrooptische Bänke beider Varianten dargestellt. Erste Untersuchungen



Abbildung 6.3: Fertige mikrooptische Bänke beider Designs nach der Bestrahlung, Entwicklung und nach dem Strippen.

der mikrooptischen Bänke zeigten, dass diese in Bezug auf Maßhaltigkeit innerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegen. Die Strukturen wurden hierfür stichprobenweise unter einem kalibrierten Lichtmikroskop optisch vermessen. Abbildung 6.5 zeigt eine mikrooptische Bank unter einem Lichtmikroskop zur Kontrolle der Maßhaltigkeit. An einigen Stellen im Bereich der Randstrukturen traten kleine Fehler, wie z.B. Resistreste, Fehlstellen von Resist an den einstrukturierten Firmenlogos oder Einschlüsse auf. Diese waren bei den hergestellten mikrooptischen Bänken jedoch in Bereichen, die für die Funktion des Systems nicht von Bedeutung sind. Die hergestellten mikrooptischen Bänke können zu 100% für den Aufbau der Komplettsysteme ein-

gesetzt werden. Wichtige Maße wie z.B. die Breite der Aufnahme für die GRIN-Linsen sowie die äußeren Abmaße der mikrooptischen Bank sind in der Abbildung zu erkennen. Erste Erkenntnisse aus den Funktionstests der LIGA-Interferometer basierend auf Totalreflektion sind in Anhang A.3 zu finden.

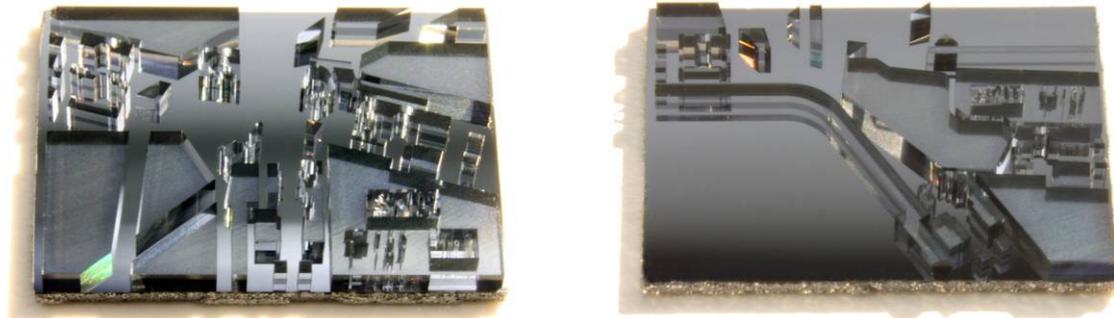


Abbildung 6.4: Vereinzelte mikrooptische Bänke beider Designs.

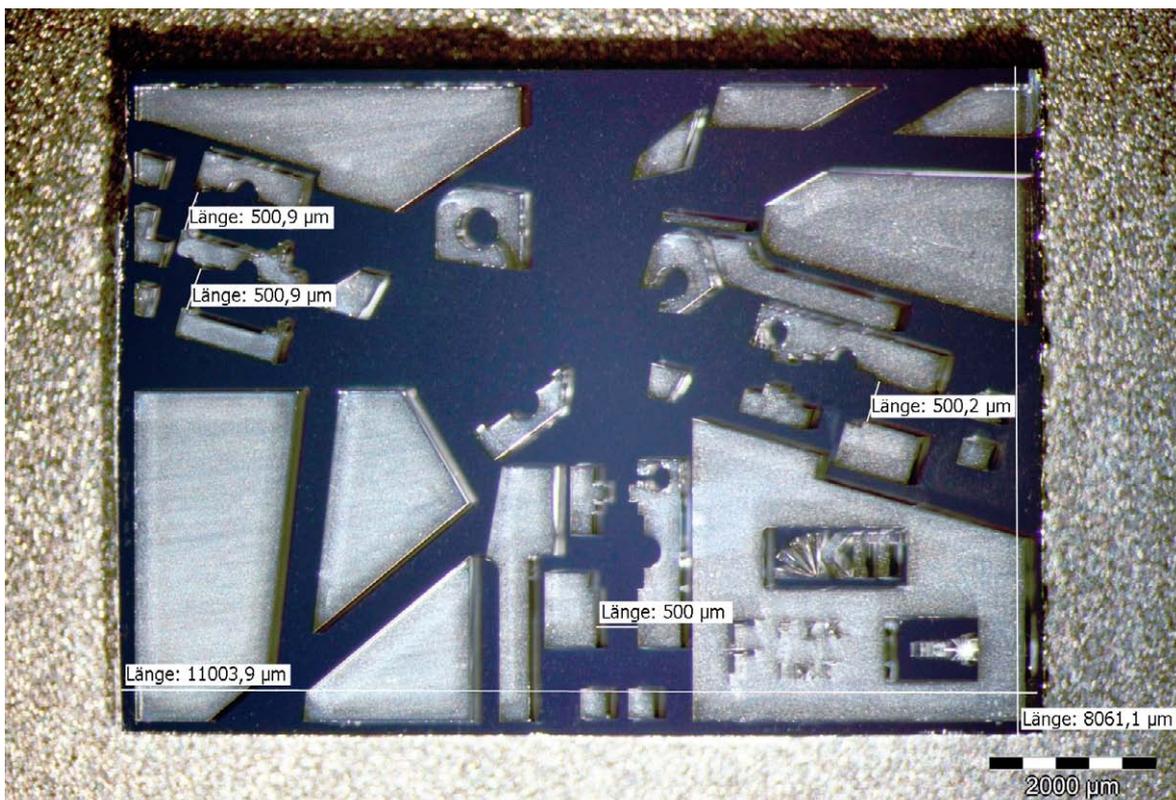


Abbildung 6.5: Mikrooptische Bank mit Kontrolle der GRIN-Linsen Haltestrukturen und der Außenabmaße auf Maßhaltigkeit unter einem Lichtmikroskop.

## 6.2 Bestückung der mikrooptischen Bänke

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der Variante des hybrid aufgebauten Mikrointerferometers mit Glaskomponenten, dessen Montage der mikrooptischen Bank im Folgenden näher beschrieben wird. Nach Herstellung und Lieferung aller, für das aktiv modulare mikrooptische Interferometersystem benötigten optischen Komponenten und deren Charakterisierung, kann die mikrooptische Bank zum mikrooptischen Modul bestückt werden. Dank der hochpräzisen LIGA-Strukturen, die diese mikrooptische Bank bietet, wäre es theoretisch möglich, alle optischen Komponenten unter Verwendung einer Pinzette mit Hilfe der Anschlagstrukturen auszurichten und mittels UV-Klebstoff an den jeweiligen Positionen zu fixieren. Um ein unbeabsichtigtes Bewegen der optischen Komponenten aufgrund der Fließ- und der Schrumpfeigenschaften des Klebstoffs während der Aushärtephase zu vermeiden, ist es von Vorteil, die optischen Komponenten während der Aushärtephase des Klebstoffes mittels einer Pinzette leicht an die Haltestrukturen anzudrücken. Eine weitaus zuverlässigere, sauberere und reproduzierbarere Montagevariante liegt in der Verwendung einer, speziell für Mikrokomponenten entwickelten Montagemaschine [92]. Die hierfür eingesetzte Montagemaschine verfügt über vier Freiheitsgrade und ist mit einem Vakuumdispenser zum Aufnehmen, Positionieren und Halten von mikrooptischen Komponenten ausgestattet. Verschieden geformte Vakuumgreifer ermöglichen dabei die Aufnahme ebener optischer Komponenten wie Strahlteilerwürfel und Prismen. Speziell gerundete Greifer hingegen ermöglichen die Aufnahme von Gradientenindexlinsen. Die optischen Elemente sowie die mikrooptischen Bänke werden über geeignete Vorratssysteme der Maschine zur Verfügung gestellt. Um die montierten optischen Komponenten zu fixieren steht ein Dispensersystem für Klebstoffe zur Verfügung. In Abbildung 6.6 ist die verwendete Montagemaschine sowie das verwendete Greifersystem und ein zwei Zoll Bevorratungssystem, welches in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, dargestellt. Die Maschine montiert in Abbildung 6.6 einen doppelten Strahlteilerwürfel in einer mikrooptischen Bank. Der Montageprozess für ein optisches Element stellt sich dabei wie folgt dar; Zu Beginn ist der Montagearm der Montagemaschine mit einer Dispensereinheit für das dosierte Aufbringen von Klebstoffen bestückt. Diese ist abhängig davon, ob der Aufbau fest verbaut oder wieder gelöst werden soll, mit dem wasserfesten optischen UV-Klebstoff DYMAX OP 21 oder dem wasserlöslichen optischen UV-Klebstoff OP 19 der Firma

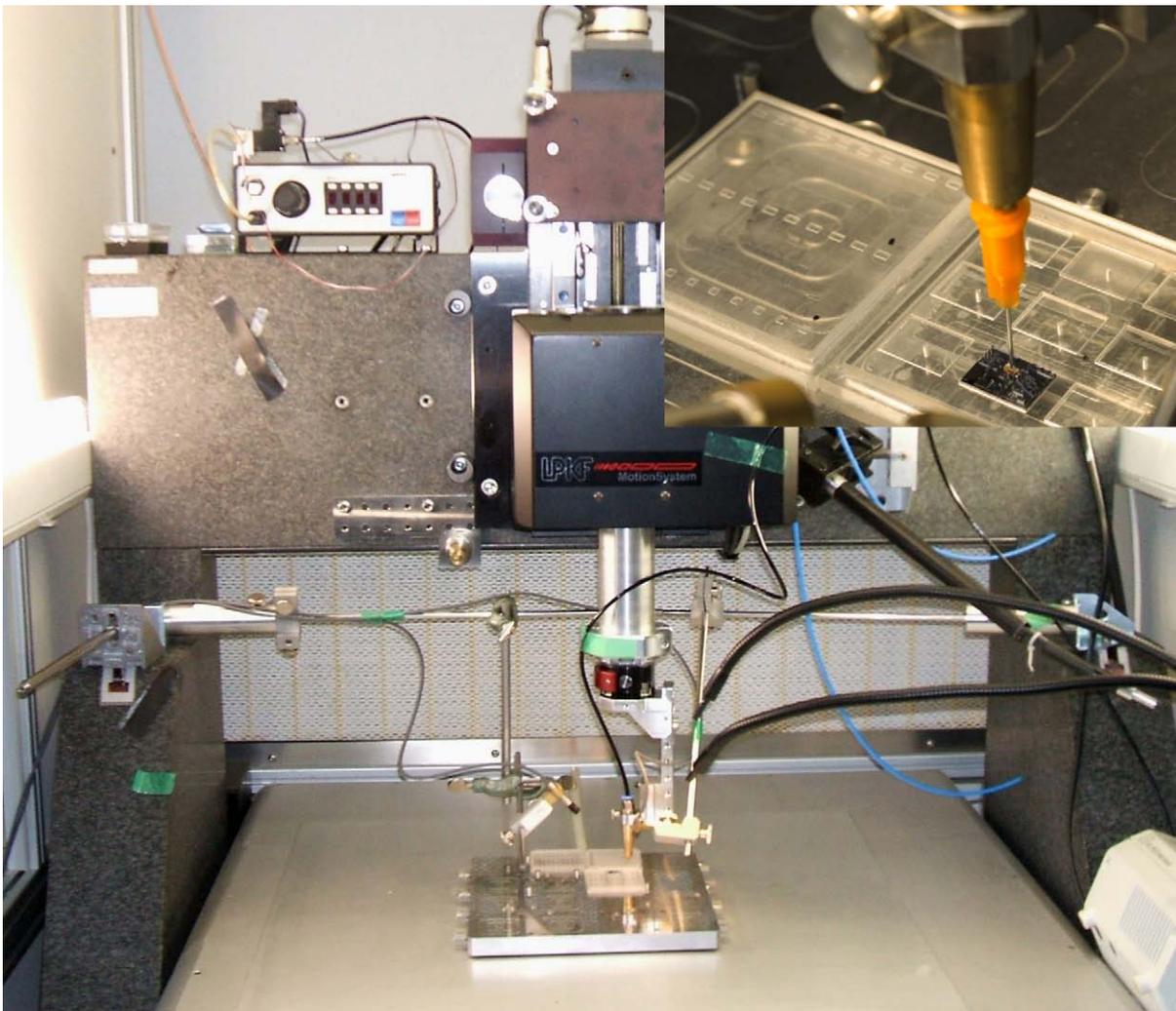


Abbildung 6.6: Mikromontagemaschine bei der Montage einer mikrooptischen Bank mit Vakuumgreifer und Bevorratungssystem.

DYMAX [95] [96] befüllt. Diese Klebstoffe wurden in einem Charakterisierungsprozess mehrerer in Frage kommender Klebstoffe ermittelt. Insgesamt wurden dabei 16 Klebstoffe auf ihre Eigenschaften bezüglich der Viskosität, der Haftkraft sowie ihrer Beständigkeit gegenüber unterschiedlichen Lösungsmitteln untersucht und die zugehörigen Dispenserwerte bezüglich Druck und Zeit für eine geeignete Kanüle ermittelt. Mittels des verwendeten Dispensers wird eine genau dosierte Menge an Klebstoff an der Stelle auf das Substrat der mikrooptischen Bank aufgebracht, an der das optische Element zu fixieren ist. Anschließend findet ein Werkzeugwechsel auf den Vakuumgreifer für planare Objekte statt. Der eingesetzte Vakuumgreifer holt ein optisches Element aus dem Magazin ab, in dem er sich bis auf wenige Mikrometer an

dessen Oberfläche nähert und durch Einschalten des Vakuums dieses angesaugt wird. Das optische Element wird anschließend auf den exakt dosierten Klebetropfen der mikrooptischen Bank aufgesetzt und kann auf dem Flüssigkeitsfilm des Klebstoffs, welcher ähnlich einem Schmierfilm wirkt, präzise an die LIGA-Anschlagstrukturen angelegt werden. Zum Verkleben drückt der Vakuumgreifer das optische Element leicht auf dem Substrat der mikrooptischen Bank an, wodurch dieses in Bezug auf das Substrat der mikrooptischen Bank präzise ausgerichtet ist. In diesem Zustand wird das optische Element durch Aushärten des UV-Klebstoffs mittels einer UV-Lampe verklebt. Anschließend wird das Vakuum des Vakuumgreifers abgeschaltet und der Dispenser vom Bauteil entfernt. Die Montage des optischen Elementes in der mikrooptischen Bank ist nach diesem Schritt abgeschlossen und findet auf gleiche Weise für alle weiteren optischen Komponenten statt. Abbildung 6.7 links zeigt eine montierte mikrooptische Bank. Eine ausführliche Beschreibung des Montageprozesses ist in [98] zu finden.

Die Montage selbst erfolgt rechnergesteuert und kann mittels PC programmiert und über ein Kamerasystem bestehend aus drei Einzelkameras überwacht werden. Einzig der Werkzeugwechsel ist von Hand durch den Benutzer durchzuführen. Im Anschluss an die Montage der optischen Komponenten, wie des doppelte Strahlteilerwürfels und des Einkoppelprismas, können die eingangsseitigen GRIN-Faser Pigtails in die mikrooptische Bank eingelegt werden. Hierfür steht der Montagemaschine ein entsprechender Vakuumgreifer zur Verfügung. Das GRIN-Faser Pigtail wird mittels Vakuumgreifer an der GRIN-Linse aufgenommen und von oben in die Faserhalterung eingelegt. Dabei ist zu beachten, dass die GRIN-Linse an der vorderen Anschlagstruktur der Linsenhalterung anliegt. Gegebenenfalls ist sie durch verfahren des Greifers auf Kontakt mit der vorderen Anschlagstruktur zu bringen. Anschließend wird die GRIN-Linse und der Glaszylinder des Pigtails, mit Hilfe der UV-Klebstoffe, die in die Kleberreservoirs der Linsenhalterungen eingefüllt werden, fixiert. Die Aushärtung der UV-Klebstoffe erfolgt, wie bei den vorhergehenden Montageschritten mit einer UV-Lampe.

Im Rahmen der Montagearbeiten stellte sich heraus, dass das Montieren der GRIN-Faser Pigtails über die entwickelten Haltestrukturen aufgrund der Form sehr leicht und zuverlässig von Hand möglich ist. Im Weiteren Verlauf der Arbeit wurde in Folge dessen auf ein Einlegen der Pigtails von Hand übergegangen. Das Verkleben erfolgt weiterhin über die Kleberreservoirs mittels Dispenser. In Abbildung 6.7 rechts ist

eine, für die weitere Montage vollständig bestückte mikrooptische Bank mit den optischen Komponenten und den Einkoppelseitigen GRIN-Faser Pigtails dargestellt.

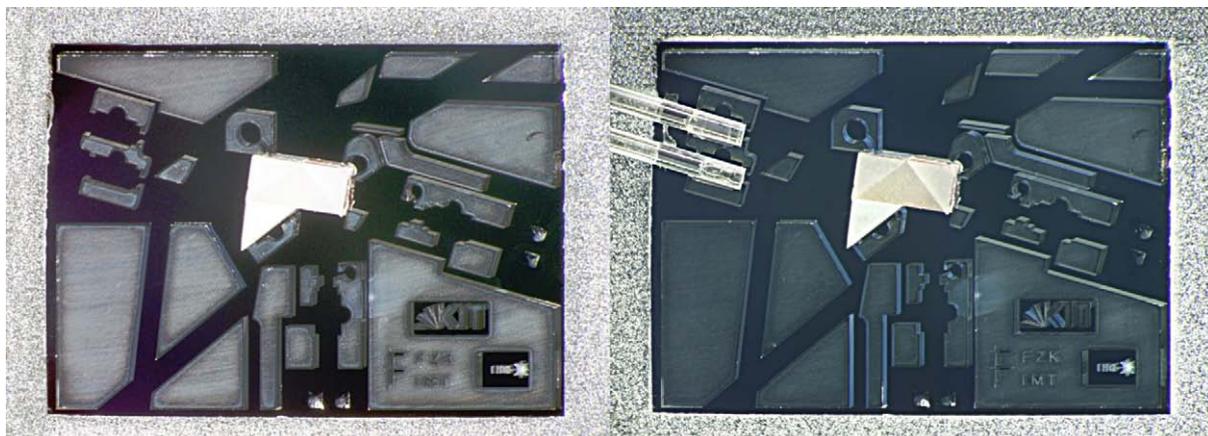


Abbildung 6.7: Mikrooptische Bank. Links bestückt mit den optischen Komponenten wie Strahlteiler und Einkoppelprisma, rechts mit eingelegten GRIN-Faser Pigtails für die Signaleinkopplung.

### 6.3 Aufbau der Aktormodule

Nachdem die mikrooptische Bank für die weitere Montage im Gesamtsystem vollständig montiert ist, kann im nachfolgenden Schritt das Aktormodul für das Aufnehmen einer solchen mikrooptischen Bank vorbereitet werden. Das Aktormodul selbst besteht aus der Grundplatte, die speziell für jeden der einzusetzenden Mikroaktoren entwickelt wurde, dem Mikroaktor selbst und dem Umlenkprisma. Je nach Mikroaktor unterscheiden sich die Montageschritte deutlich voneinander und hängen letztlich vom Auslieferungszustand des jeweiligen Mikroaktors ab. Weitere Details zur Montage der Aktormodule sind neben den folgenden Kapitel in [98] zu finden.

#### 6.3.1 Elektromagnetischer Mikroaktor

Der Aufbau dieses Aktormoduls erfordert im Vergleich zu den Aktormodulen mit Inchwormaktor oder Piezoaktor den höchsten Arbeitsaufwand. Der elektromagnetische Mikroaktor wird zerlegt in zwei Einzelteile vom IMTEK Institut der Universität Freiburg zur Verfügung gestellt und muss für den Einsatz im modularen mikro-

optischen System zunächst vollständig montiert werden. Der Mikroaktor ist in Form einer freitragenden Struktur aufgebaut, die an vier Stellen, an denen sich die Spulen für die Erzeugung des elektromagnetischen Feldes befinden, aufliegt. Über vier Biegefedern sind die beweglichen Strukturen des Aktors mit diesen Haltestrukturen verbunden. Für die Integration in das modulare mikrooptische System muss der Mikroaktor frei schwebend auf eine eigens angefertigte Aktorplattform mit vier kleinen Säulen gestellt werden, damit sich der freitragende Läufer des Mikroaktors bewegen kann und nicht auf dem Untergrund schleift. Er wird auf ihr parallel ausgerichtet sowie mittels UV-Klebstoff fixiert. Anschließend kann die Spule zur Erzeugung des elektromagnetischen Feldes in die dafür vorgesehenen Öffnungen des Aktors eingesetzt werden. Hierfür bietet der Aktor zwei Möglichkeiten, die über Kammstrukturen verschiedener Anzahl unterschiedliche Aktorhübe ermöglichen. Für die Anwendung in dieser Arbeit soll ein möglichst großer Stellweg erreicht werden, daher erfolgt die Montage der Spule auf der Seite mit der höheren Anzahl an Kammstrukturen. Nach diesem Arbeitsschritt ist der Aktor so weit funktionsfähig und

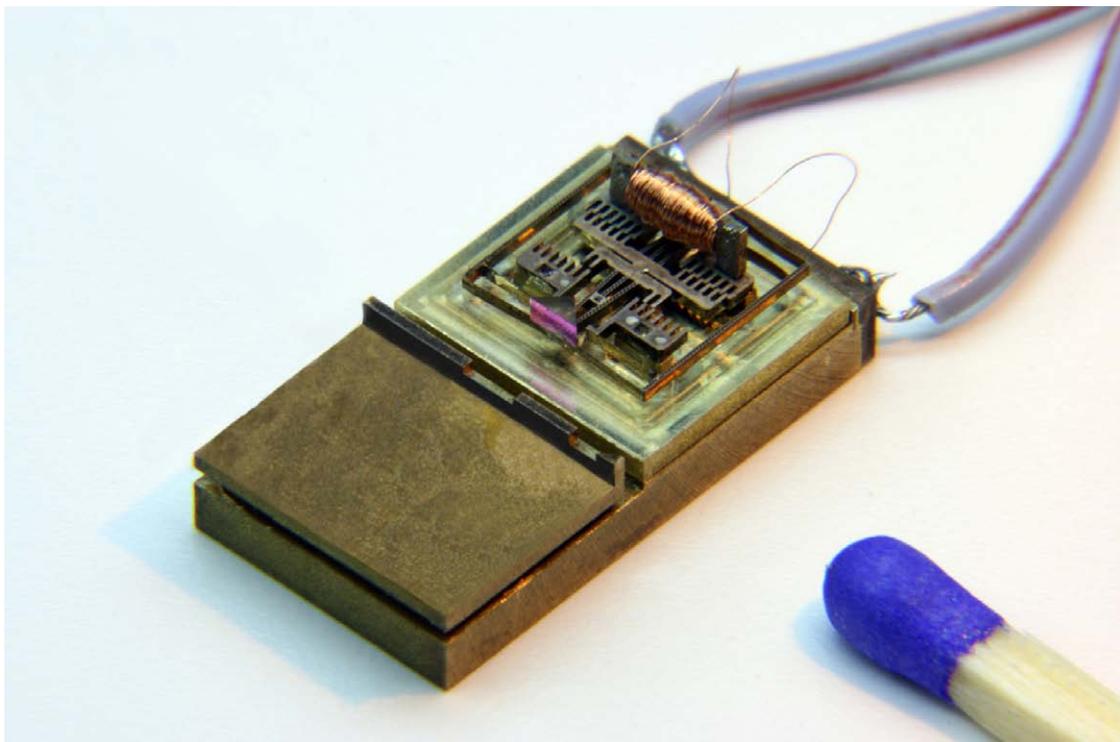


Abbildung 6.8: Aktormodul mit elektromagnetischem Mikroaktor, vollständig aufgebaut mit Grundplatte, Aktorplattform, Aktor und Umlenkprisma.

es kann mit der Montage des Aktormoduls, wie es in Abbildung 6.8 dargestellt ist begonnen werden.

Hierzu wird beginnend das Umlenkprisma auf dem Aktor fixiert. Aufgrund der geringen Belastbarkeit des Aktors durch zusätzliche Massen, die den Aktor in seinem dynamischen Verhalten negativ beeinflussen, wird im Falle des elektromagnetischen Mikroaktors auf den Keramikspacer zur einfacheren Montage und Ausrichtung des Umlenkprismas verzichtet. Im Gegensatz zu den, in den folgenden Kapiteln beschriebenen Aktoren wird das Umlenkprisma direkt auf dem Mikroaktor aufgesetzt montiert. Bei der Ausrichtung ist darauf zu achten, dass die Hypotenuse des Prismas parallel zur Vorderkante des Mikroaktors liegt, bevor dieses mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX 191M [97] fixiert wird. Danach folgt die Montage des Mikroaktors auf der Grundplatte. Durch Ausrichten der Aktorplattform gegenüber der Grundplatte, wird das Umlenkprisma in Flucht mit der entsprechenden Aussparung in der Justageplattform gebracht, durch die später das Licht von und zu der mikrooptischen Bank geleitet wird. Anschließend wird die Aktorplattform in dieser Position mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX 191M [97] fixiert. Abschließend wird die Aktorspule elektrisch kontaktiert. Auf der Rückseite der Grundplatte wird zu diesem Zweck eine kleine, mit Kontaktpads versehene Keramikplatine angebracht, an die die Anschlussleitungen der Spule angelötet werden. Von ihr ausgehend kann der Aktor für die Ansteuerung mit einer Konstantstromquelle problemlos kontaktiert werden.

### 6.3.2 Piezoaktor

Der am Häufigsten im modularen mikrooptischen System eingesetzte und somit als Standard geltende Mikroaktor ist der Piezoaktor. Er bietet die Vorteile eines kostengünstigen mikrointerferometrischen Systems, das sehr präzise in einen Arbeitspunkt eingestellt werden kann. Für viele Anwendungen wie analytische Messungen oder spektrometrische Anwendung ist der Einsatz des Piezoaktors vollkommen ausreichend.

Im Vergleich zum Aktormodul mit dem elektromagnetischen Mikroaktor ist der Zeit- und Montageaufwand für das Aktormodul mit Piezoaktor relativ gering. Um eine parallele Ausrichtung des Umlenkprismas und des Piezoaktors sicherzustellen, findet die Montage auf einer ebenen Unterlage statt. Hierzu dient z.B. ein Siliziumwafer der frei von Staubkörnern oder Verunreinigungen ist. Diese würden zur Verkipfung einzelner Komponenten bei der Montage führen. Im ersten Montageschritt wird der,

speziell auf die Maße des Umlenkprismas und des Piezoaktors angepasste Keramikspacer, an der Vorderseite des Mikroaktors ausgerichtet und durch Kleben mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX 191M [97] fixiert. Beide Teile werden hierfür auf den Siliziumwafer gelegt und dahingehend ausgerichtet, dass sie nach dem Fixieren in einer Flucht liegen. Anschließend wird das Umlenkprisma in den Keramikspacer eingesetzt und durch diesen passiv ausgerichtet. Als Montageunterlage dient weiterhin der Siliziumwafer, wodurch das Prisma ebenfalls mit dem Piezoaktor in einer Flucht liegt. Vor dem Fixieren mit UV-Klebstoff wird in jedem Montageschritt unter dem Lichtmikroskop überprüft, ob die montierten Teile korrekt zueinander positioniert sind. Im ungünstigsten Fall können die Oberflächenspannungen des aufgetragenen UV-Klebstoffes eine Korrektur der Ausrichtung erfordern. Ist das Umlenkprisma korrekt montiert, kann der Piezoaktor seinerseits auf der Grundplatte montiert werden. Dabei wird der Piezoaktor im hinteren Bereich auf einem Sockel fixiert und ist im

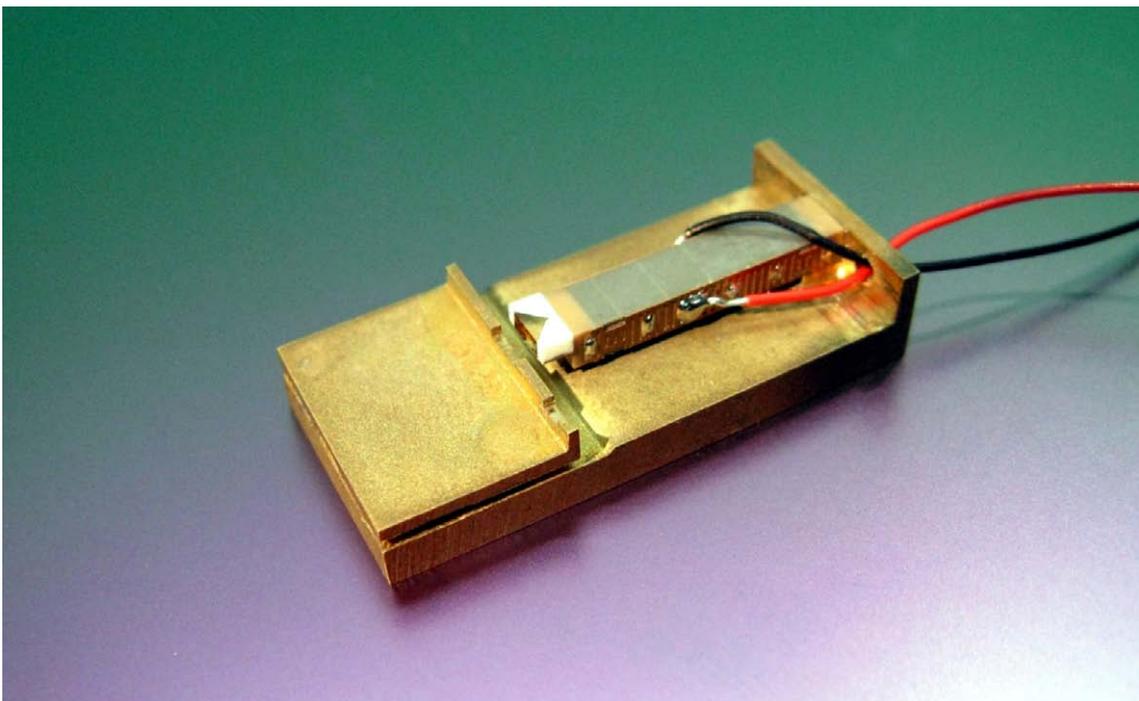


Abbildung 6.9: Aktormodul mit Piezoaktor, vollständig aufgebaut mit Grundplatte, Aktorplattform, Aktor und Umlenkprisma.

vorderen Teil in Richtung Prisma freitragend. Eine parallele Höhenausrichtung des Piezoaktors relativ zur Grundplatte gestaltet sich ohne Montagehilfsmittel schwierig.

Zur einfachen Montage wurde die Höhe des Sockels im hinteren Bereich so gewählt, dass sie der Dicke eines handelsüblichen vier Zoll Siliziumwafers entspricht. Für die Montage wurde ein entsprechend großes Stück aus einem Siliziumwafer herausgetrennt, das als Stützstruktur zwischen Grundplatte und Piezoaktor dient. Auf diese Weise kann der Piezoaktor unter einem Lichtmikroskop schnell und einfach ausgerichtet und mittels UV-Klebstoff fixiert werden. Vor dem Aushärten des Klebstoffes wird die Flucht des Umlenkprismas mit der entsprechenden Aussparung in der Justageplattform überprüft und nach dem Aushärten das untergelegte Siliziumdistanzstück zwischen Grundplatte und Piezoaktor entfernt. Abschließend können die Anschlussleitungen des Piezoaktors durch die vorgesehene Kabeldurchführung gefädelt werden. Danach ist das Piezoaktormodul, wie in Abbildung 6.9 dargestellt, vollständig montiert und steht für die folgenden Montageschritte zur Verfügung.

### 6.3.3 Inchwormaktor

Der Inchwormaktor ist für Anwendungen konzipiert, die einen möglichst großen Aktorhub erfordern. Ein Beispiel für eine solche Anwendung wäre ein, an verschiedene Datenraten anpassbarer Phasendemulator für optisch phasenmodulierte Datensignale [109]. Bei einer solchen Anwendung stellt der verstellbare Arm des Mikrointerferometers ein optisches Delay von exakt einem Bit dar. Über den großen Verstellbereich des Inchwormaktors kann das Interferometer für die Demodulation verschiedener Übertragungsraten konfiguriert und eingesetzt werden. Der Aufwand für die Montage des Mikroaktormoduls mit Inchwormaktor liegt in der Größenordnung des Moduls mit Piezoaktor und gliedert sich in folgende Montageschritte. Für die Montage des Umlenkprismas wird der Aktor kopfüber auf die Oberseite des Läufers gelegt, unter welchem für die einfachere Montage des Umlenkprismas ein ebener Siliziumwafer positioniert ist. Anschließend kann wie bei der Montage des Piezoaktors, der speziell an den Inchwormaktor angepasste Keramikspacer zur Aufnahme des Umlenkprismas, an der Vorderseite des Läufers ausgerichtet und mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX 191M [97] fixiert werden. Die exakte Ausrichtung findet unter dem Mikroskop statt, bevor der Keramikspacer mittels UV-Klebstoff fixiert wird. Nach Aufbringen des Klebstoffs mittels Dispenser, ist unter dem Mikroskop vor dem Aushärten die Ausrichtung des Bauteils zu verifizieren. Analog zur Montage des Piezoaktormoduls, findet das Einsetzen des Umlenkprismas statt. Anschließend kann der Inchwormaktor von dem, zur Montage-

hilfe untergelegten Siliziumwafer abgehoben und um  $180^\circ$  gedreht auf die Unterseite gestellt werden. Die Montage des Inchwormaktors auf der entsprechend angepassten Grundplatte erfolgt im Gegensatz zu den beiden anderen Mikroaktoren nicht durch Kleben, sondern durch Schrauben. Hierfür wird der Inchwormaktor über, vom Hersteller bereits vorgesehene, M 1,5 Gewindebohrungen mit der Grundplatte verschraubt. Die Schrauben werden dabei erst vollständig festgezogen, nachdem die Flucht des Umlenkprismas bezüglich der entsprechenden Aussparung in der Justageplattform überprüft wurde. Ein komplett montiertes Mikroaktormodul mit Inchwormaktor ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Die Schraubverbindung bietet gegenüber der Klebeverbindung den Vorteil, dass eine eventuell fehlerhafte Justage durch einfaches Lösen der Schrauben und erneutes Ausrichten zu beheben ist. Im Falle eines fehlerhaft justierten und durch Kleben fixierten Mikroaktormoduls, kann dieses nur durch entsprechendes Lösen der Klebeverbindung mittels Aceton als Lösungsmittel korrigiert werden.



Abbildung 6.10: Inchwormaktor vollständig montiert und auf Grundplatte justiert.

## 6.4 Justierung und Montage des Gesamtaufbaus

Nach Aufbau der miteinander zu kombinierenden mikrooptischen Bank und des Aktormoduls, kann mit der Endmontage des Gesamtsystems begonnen werden. Das Ziel dieses Montageschrittes besteht darin, das aktorseitige Umlenkprisma vollständig zum Strahlengang der mikrooptischen Bank zu justieren, so dass es zur Überlagerung beider Teilstrahlen des Mikrointerferometers in Form ringförmiger Interferenzmuster kommt. Das Einrichten des Systems erfolgt aktiv unter Einkopplung von Laserlicht in die mikrooptische Bank. Für die grobe Vorausrichtung wird zunächst für das menschliche Auge sichtbares Licht der Wellenlänge 635 nm in das System eingekoppelt. Durch Neigen der Justageplattform über die, in der Grundplatte befindlichen Madenschrauben sowie durch Lageausgleich der mikrooptischen Bank, können die beiden Teilstrahlen grob zur Deckung gebracht werden. Als Justagehilfe dient eine Mikromontagemaschine mit sieben Freiheitsgraden, von denen drei für das Einjustieren der mikrooptischen Bank zum Einsatz kommen. Sind beide Module auf diese Weise grob zueinander vorjustiert, wird die Laserlichtquelle gegen eine mit der Arbeitswellenlänge des Systems von 1550 nm ausgetauscht. An den beiden Systemausgängen werden entsprechende, für die Arbeitswellenlänge empfindliche, Kamerasysteme zur Detektion der Interferenzsignale und Anzeige auf einem Monitor positioniert. Unter ständiger Überwachung der Signalausgänge über die Monitoranzeige erfolgt die Feinjustage des Mikrointerferometersystems. Die lineare Ausrichtung wird über die Mikromontagemaschine vorgenommen. Der Ausgleich rotatorischer Toleranzen erfolgt mittels der Justageschrauben in der Grundplatte. Die Dauer der Justage hängt dabei stark von der Erfahrung des Monteurs ab. Mit etwas Übung ist die Justageprozedur in ca. 30 Minuten zu erledigen. Ist die ideale Position der mikrooptischen Bank gefunden, sind die, nicht für die Justage benötigten Madenschrauben durch vorsichtiges Anziehen an die Justageplattform anzulegen. Auf diese Weise ist es möglich, die Stabilität des justierten Systems zu erhöhen. Nach erneuter Kontrolle der ringförmigen Interferenzmuster beider Systemausgänge und einer Verifizierung der jeweiligen Aktorfunktion über die visuelle Kontrolle der wechselnden Interferenzsignale über den Monitor, kann die mikrooptische Bank in ihrer Position durch Kleben mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX 191M [97] mit der Grundplatte verbunden werden. Für den nächsten Arbeitsschritt bei dem die Signalausgabe implementiert wird, verbleibt der Aufbau in der Mikromontagemaschine. In Abbildung 6.11 ist der, bis zu diesem Schritt, so weit fortgeschrittene

Montagezustand eines justierten und fixierten modularen Mikrointerferometers in Kombination mit einem Piezoaktor und einem Inchwormaktor dargestellt.

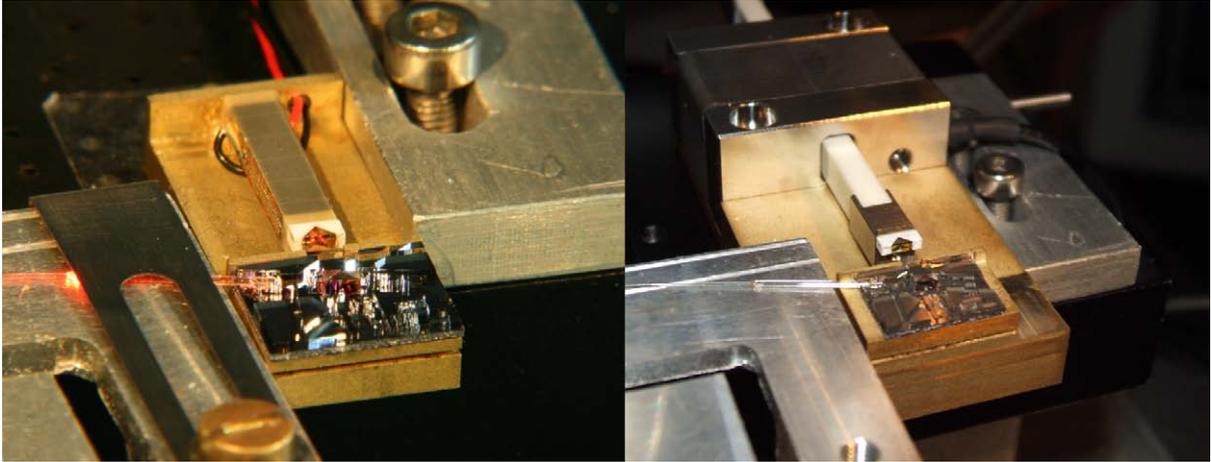


Abbildung 6.11: Justierter und fixierter modularer Mikrointerferometer in der dafür eingesetzten Mikromontagemaschine. Links mit Piezoaktor, recht in Kombination mit Inchwormaktor.

## 6.5 Realisierung der Signalausgabe

Die bis zu diesem Montageschritt realisierten mikrooptischen Systeme verfügen in allen Varianten über eine freistrahloptische Signalausgabe, die für ausgewählte Anwendungen bereits hinreichend ist. Für viele messtechnische und diagnostische Anwendungen ist es hingegen notwendig, die Systemsignale in geeigneter Form optisch an Detektionsgeräte weiter zu geben oder die Signale direkt in elektronische Signale zu Wandeln. Das modulare mikrooptische System sieht im Rahmen der vorliegenden Arbeit zwei unterschiedliche Varianten für die weiterführende Signalverarbeitung vor, deren Realisierung in den zwei Folgekapiteln näher erläutert wird.

### 6.5.1 Fasergebundene Signalauskopplung

Die mikrooptische Bank ist ausgangsseitig mit Strukturen ausgestattet, die eine einfache Auskopplung der Interferometersignale auf Glasfasern erlauben. In der mikrooptischen Bank breitet sich kollimiertes Licht mit einem Strahldurchmesser von  $66\ \mu\text{m}$  aus, das über ein ausgangsseitiges GRIN-Faser Pigtail in den Kern einer Faser ausgekoppelt werden kann. Die eingesetzten GRIN-Faser Pigtails entsprechen den

Spezifikationen in Kapitel 4.3.2 und sind entsprechend der Beschreibung in Kapitel 5.1.2 aufgebaut. Als Fasern kommen dabei hauptsächlich Multimodefasern zum Einsatz, da hier im Vergleich zu Singlemodefasern die Einkoppeleffizienz wesentlich höher ist. Prinzipiell ist die Auskopplung auf Singlemodefasern ebenfalls möglich, ist jedoch aufgrund des geringeren Kerndurchmessers der Faser deutlich verlustbehafteter.

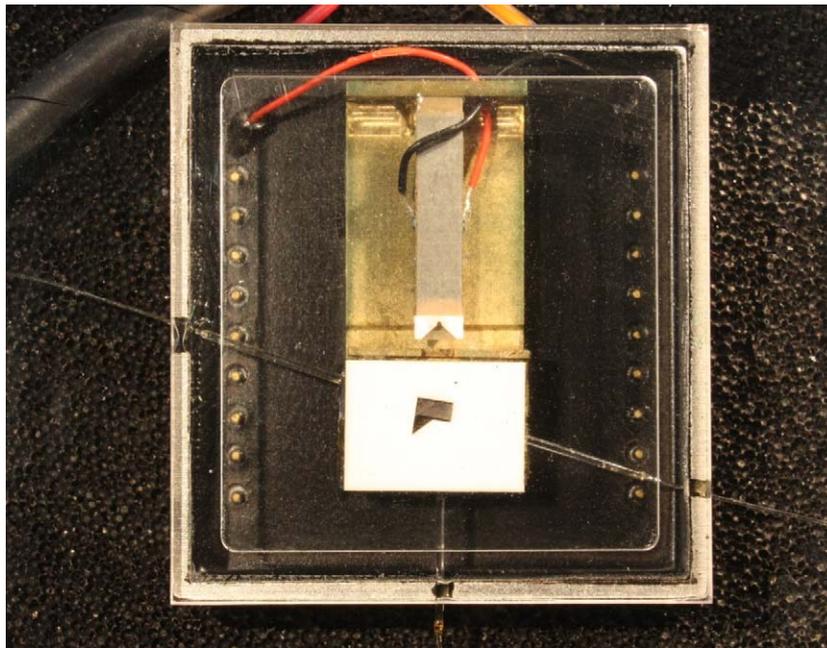


Abbildung 6.12: Aufbau eines modularen Mikrointerferometers mit Signalausgabe auf Glasfasern verbaut in einem DIL-Gehäuse.

Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund geringerer Verluste die Auskopplung auf Multimodefasern favorisiert. Die mit GRIN-Linsen ausgestatteten Multimodefasern können nach erfolgreicher Durchführung aller vorhergehenden Montageschritte einfach von oben in die dafür vorgesehenen Haltestrukturen eingelegt und bis zum Anschlag nach vorne in die Haltestrukturen geschoben werden. Nach anschließender Kontrolle der in die Fasern ausgekoppelten Interferenzsignale mit einem Powermeter können diese mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX OP 21 [95] fixiert werden. Für das Verkleben stehen in den Haltestrukturen Kleberreservoirs zur Verfügung. Nach erfolgreicher Montage werden an allen fasergebundenen Ein- und Ausgängen die Glaszylinder der GRIN-Faser Pigtails mit UV-Klebstoff DYMAX OP 21 [95] an den Haltestrukturen der mikrooptischen Bank fixiert. Dieser Schritt dient als Zugent-

lastung der, gegen mechanische Beanspruchung sehr empfindlichen Verklebung zwischen GRIN-Linse und Glaszylinder (vergl. Abbildung 5.5). Als letzter Ferti-

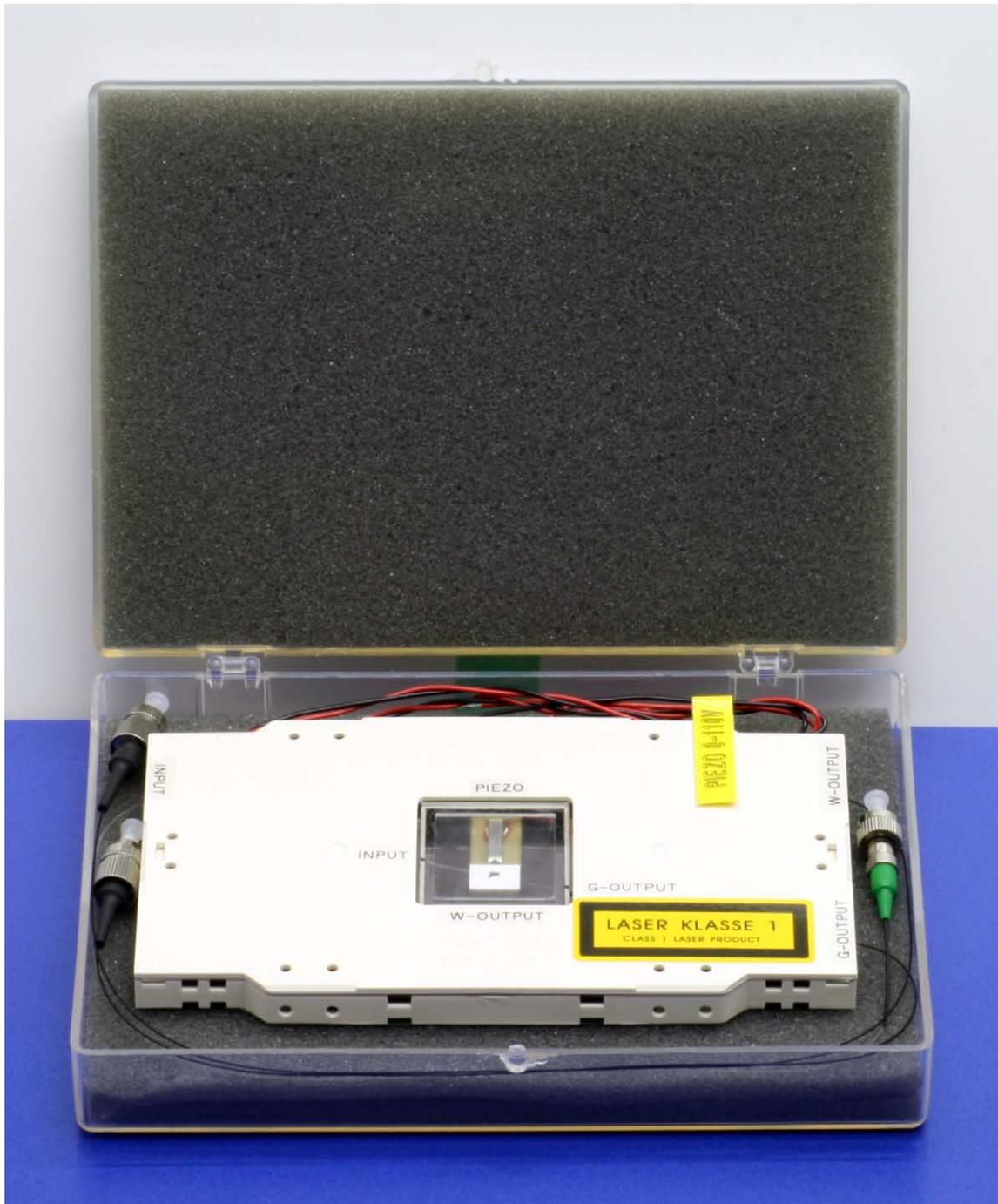


Abbildung 6.13: Aufbau eines modularen Mikrointerferometers mit Signalausgabe auf Glasfasern, komplett gehäust in einer Nachrichtentechnikassette.

gungsschritt wird die mikrooptische Bank zum Schutz vor Umgebungslicht sowie vor Verunreinigungen mit einer Deckelung versehen und mittels UV-Klebstoff auf der mikrooptischen Bank befestigt. In Abbildung 6.12 ist der fertige Aufbau eines modularen Mikrointerferometers mit Signalausgabe auf Glasfasern dargestellt. Je nach Einsatzgebiet kann der Aufbau zum Schutz und zur besseren Handhabung in ein Gehäuse verbaut werden. Abbildung 6.13 zeigt den Aufbau als Beispiel in einer genormten Spleißkassette (z.B. Typ TS 0004/96 des Herstellers TKM GmbH).

### 6.5.2 Auskopplung auf die Auswerteelektronik

Der Aufbau eines aktiven modularen mikrooptischen Systems mit integrierter Signalauswertung gestaltet sich im Vergleich zu dem Aufbau mit fasergebundener Signalauskopplung deutlich aufwendiger. In Verbindung mit der Signalauswertung wird das aktive modulare mikrooptische System um eine zusätzliche Modulkomponente, der Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine erweitert. Die Montage der Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine findet in der, bereits in Kapitel 6.4 eingesetzten Montagemaschine statt, die zur Montage der Photodiodensubmounts über ein Vakuumgreifersystem mit gleichzeitiger Kontaktierung der Submounts verfügt. Dieser Vakuumgreifer ist unabhängig von dem darunterliegenden mikrooptischen System in drei Translationsrichtungen und rotatorisch um seine eigene Achse frei beweglich. Vor Beginn der Montage der elektronischen Komponenten werden, falls nicht bereits bei der Montage der mikrooptischen Bank geschehen, die in Kapitel 5.1.2 dimensionierten optischen Komponenten bestehend aus einer GRIN-Linse und einem Umlenkprisma für die „Out of Plane“ Kopplung der optischen Signale in die auskoppelseiteigen Aufnahmestrukturen der mikrooptischen Bank eingesetzt. Anschließend werden diese mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX OP 21 [95] über die vorgesehenen Klebstoffreservoirs fixiert. Die Hypotenuse des, mit der GRIN-Linse verklebten Umlenkprismas dient dabei als Spiegelfläche am Übergang von Glas zum dünneren Medium Luft. Ist dieses Bauteil richtig in die mikrooptische Bank eingesetzt, zeigt die Kathete des Umlenkprismas nach oben und liegt parallel zur Oberfläche der LIGA-Strukturen in einer Ebene. Die parallele Ausrichtung wird dabei durch die geometrischen Vorgaben der LIGA-Haltestrukturen beim Einsetzen quasiautomatisch eingestellt. Anschließend wird das System mit der, in Abbildung 5.16 links dargestellten Deckelung aus Silizium mit einer Dicke 525  $\mu\text{m}$  von gedeckelt und verklebt.

Im Anschluss daran gilt es die Photodioden relativ zum optischen Pfad auszurichten. Für eine einfachere Handhabung der in [80] und [81] beschriebenen Photodioden, werden diese auf Submounts montiert. Bei den Submounts handelt es sich wie im Falle der Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine um Zukaufteile, deren Herstellung in [86] detailliert beschrieben ist. Die Submounts bestehen aus demselben Keramikwerkstoff wie auch die Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine und wurden vom selben Hersteller wie diese gefertigt. Abbildung 6.14 zeigt die Datenerfassungsplatine sowie zwei Submounts ohne Photodioden. Die Photodioden werden mit einer kleinstmengen thermisch aushärtbaren Epoxidharzklebstoff vom Typ EPO-TEK<sup>®</sup> 302-3M mittig auf der Unterseite der Submounts verklebt und auf einer Hotplate bei 80°C für 15 Minuten ausgehärtet. Anschließend werden die beiden Kontakte der Photodioden jeweils mit einem Kontaktpad des Submounts ver-

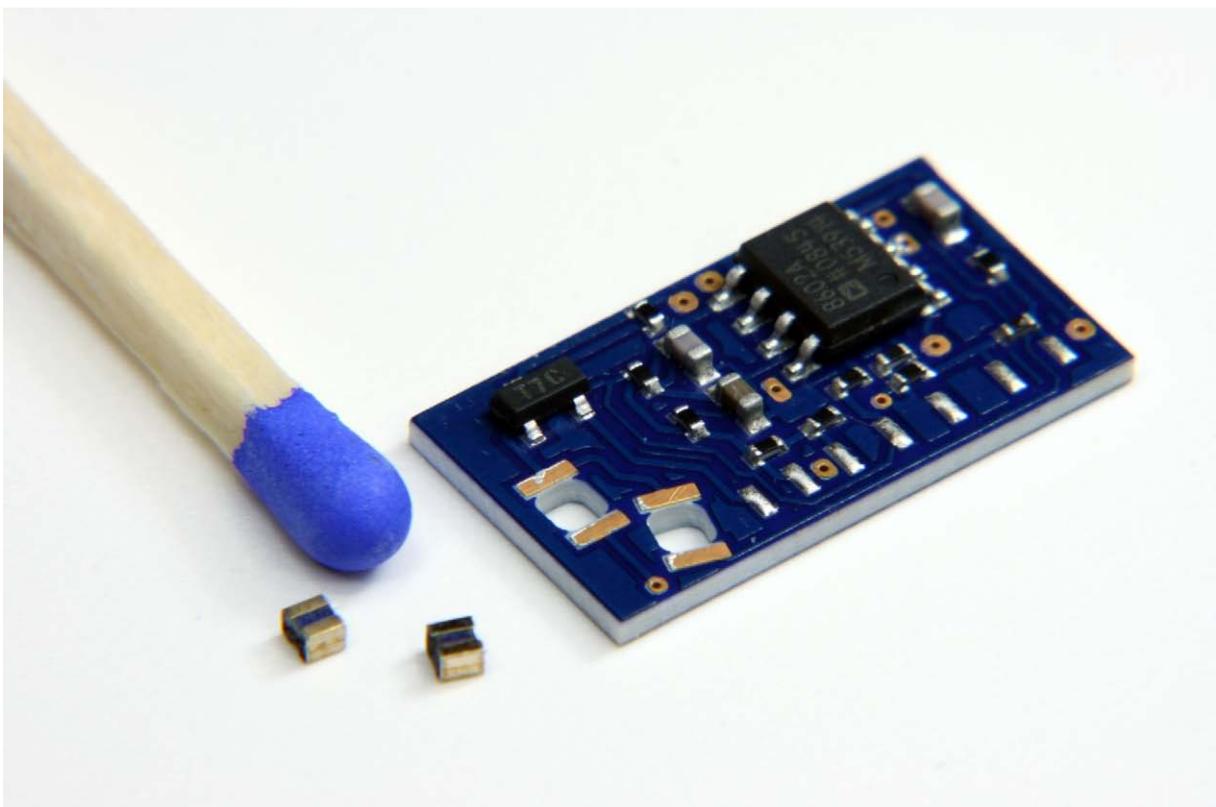


Abbildung 6.14: Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine sowie Submounts für die Montage der Photodioden.

bunden. Neben der Möglichkeit die Kontaktierung mittels Drahtbonden, zum Beispiel durch das Wedge-Wedge Bonden zu realisieren, besteht die Möglichkeit für niedrigere Frequenzen die Photodioden mittels Silberleitkleber zu kontaktieren (Abbildung 6.15 oben links). Im Falle der Kontaktierung durch Silberleitkleber wird ein Epoxidharzklebstoff vom Typ EPO-TEK<sup>®</sup> H20E PFC eingesetzt und bei 50°C 12 Stunden auf der Hotplate ausgehärtet.

Für die Montage der Photodiodensubmounts werden diese über zwei Kupferbonddrähte mittels Silber-Indium-Lot auf der Oberseite kontaktiert. Silber-Indium-Lot bietet den Vorteil eines niedrigen Schmelzpunktes von 140°C und sorgt für eine mechanisch stabilere Verbindung als das Bondverfahren. Die Bonddrähte werden anschließend durch Führungsösen am Vakuumgreifer der Montagemaschine

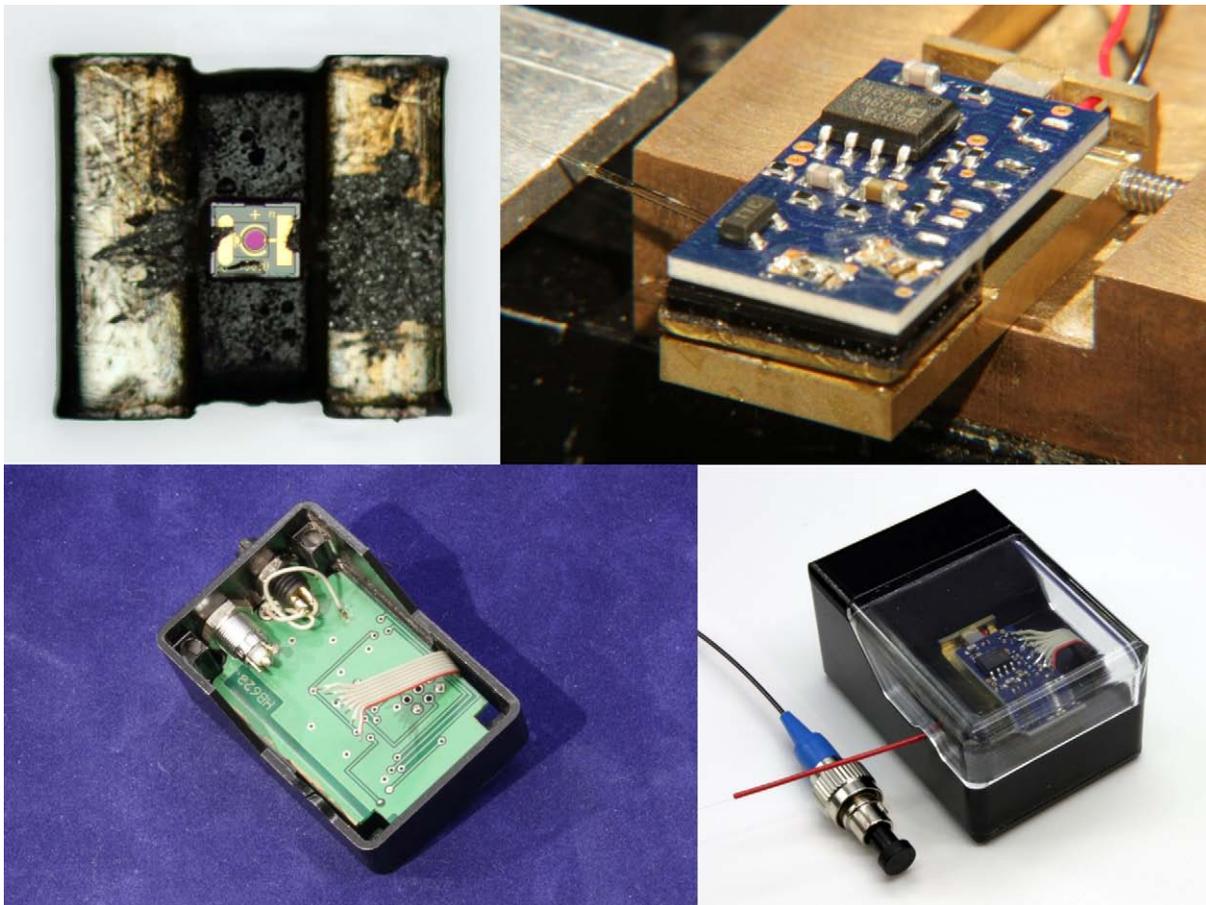


Abbildung 6.15: Submounts mit Photodioden (oben links), ein fertiggestellter Aufbau in der Montagemaschine (oben rechts), die Datenübertragungsplatine im Gehäuse (unten links), ein vollständig aufgebauter und gehäuster Demonstrator (unten rechts).

geführt und mit einer, an der Montagemaschine angebrachten Elektronikplatine verbunden, die mit der späteren Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine baugleich ist. Anschließend wird das Submount aktiv zur nullten Ordnung des Interferometersystems justiert und mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX 191 M [97] an der Deckelung verklebt. Die Bonddrähte werden in einer Länge von ca. 5 mm über dem Submount gekappt und für die Montage der Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine nach oben gebogen. Die Montage des zweiten Submounts mit Photodiode erfolgt auf dieselbe Weise, wobei bei den Photodioden jeweils auf die korrekte Polung zu achten ist. Anschließend wird die Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine auf der Deckelung befestigt. Dabei werden die Bonddrähte der Submounts durch die für die Submounts vorgesehenen Öffnungen geführt und die Platine über die Submounts gesteckt sowie mittels UV-Klebstoff vom Typ DYMAX



Abbildung 6.16: Prototyp mit Inchwormaktor und elektronischer Singalausgabe. Die Abmessungen des Gesamtsystems betragen 95 mm x 55 mm x 37,5 mm.

191 M [97] fixiert. Abschließend werden die Bonddrähte der Submounts unter Verwendung von Silber-Indium-Lot mit der Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine verbunden. Der somit weitgehend abgeschlossene Aufbau eines modularen mikrointerferometrischen Systems mit Auswerteelektronik ist in Abbildung 6.15 oben rechts dargestellt. Je nach Anwendung kann das aktive modulare mikrointerferometrische System in ein Gehäuse verbaut und über ein Flachbandkabel mit der Datenübertragungsplatine verbunden werden (Abbildung 6.15 unten links), die die komplette Elektronik über die USB-Versorgungsspannung speist. In Abbildung 6.15 unten rechts ist ein komplett aufgebautes modulares mikrooptisches System mit Auswerteelektronik in einem Gehäuse mit den Abmessungen 50 mm x 35 mm x 27 mm dargestellt, welches über einen faseroptischen Eingang mit FC/PC Stecker verfügt. Über die rückseitigen Anschlüsse ist die Ansteuerung des Piezoaktors möglich. Zudem können die interferometrischen Signale sowie die Systemtemperatur entweder direkt analog oder über die USB-Schnittstelle ausgelesen werden. Abbildung 6.16 zeigt einen Demonstrator analoger Bauart, jedoch in Kombination mit einem Inchwormaktor. Der optische Faserstecker dient dabei als Größenvergleich. An der linken Gehäusesseite erkennbar (Pfeil), der USB-Anschluss für die Datenübertragung an den Messrechner.

## **7 Experimentelle Ergebnisse**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden neben der, in Kapitel 6 beschriebenen Prototypen, weitere Demonstratoren mit unterschiedlichen Mikroaktoren gemäß dem modularen mikrooptischen Aufbau realisiert, die für verschiedenste Anwendungen eingesetzt werden können. Um die potentiellen Einsatzgebiete dieser Systeme zu erörtern ist es hilfreich, die Systeme hinsichtlich ausgewählter Eigenschaften zu charakterisieren und zugehörige Kenngrößen zu ermitteln. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften werden die Systeme mit fasergebundener Signalauskopplung und die Systeme mit Auswerteelektronik getrennt voneinander untersucht. Um die Eigenschaften der Gesamtsysteme besser deuten zu können wurden die optischen Komponenten vor Beginn der Montage einzeln charakterisiert.

### **7.1 Charakterisierung der Einzelkomponenten**

Für die Charakterisierung eines Gesamtsystems ist es hilfreich, die Eigenschaften der einzelnen, im System verbauten Komponenten zu kennen. Vor der Montage wurden aus diesem Grund die einzelnen Komponenten auf Ihre Eigenschaften untersucht.

#### **Die optischen Komponenten**

Die optischen Komponenten wie der doppelte Strahlteilerwürfel, das Einkoppelprisma und das aktorseitige Umlenkprisma wurden hinsichtlich der Einhaltung der geometrischen Maße charakterisiert und einer optischen Sichtprüfung auf Beschädigung unterzogen. Für die Bestimmung der optischen Eigenschaften wurde eine Leistungsmessung aller Ein- und Austrittsflächen der optischen Komponenten durchgeführt, um ein eventuelles Dämpfungsverhalten der optischen Komponenten sowie die Teilverhältnisse der Strahlteilerwürfel zu ermitteln. Eine Einschätzung des Polarisationsverhaltens einzelner Komponenten wurde zur späteren Deutung der Gesamtsystemgüte durchgeführt.

Für optimale interferometrische Eigenschaften sollten die optischen Komponenten mechanisch und optisch gute Eigenschaften aufweisen. Bereits kleine Kratzer oder Beschädigungen der optischen Beschichtungen führen zu negativen Einflüssen auf die

Interferenzmuster, da diese das Licht streuen und es in den beschädigten Bereichen zu Reflektionen kommt. Für die optische Inspektion wurde ein kalibriertes Mikroskop eingesetzt, das gleichzeitig zur Vermessung der optischen Komponenten diente. Die Messgenauigkeit des kalibrierten Mikroskops betrug  $\pm 4 \mu\text{m}$ . Die Vermessungen wurden mit einer 50-fachen, im Falle des Einkoppelprismas mit einer 100-fachen Vergrößerung durchgeführt. Die Mikroskopaufnahmen in Abbildung 7.1 zeigen einen

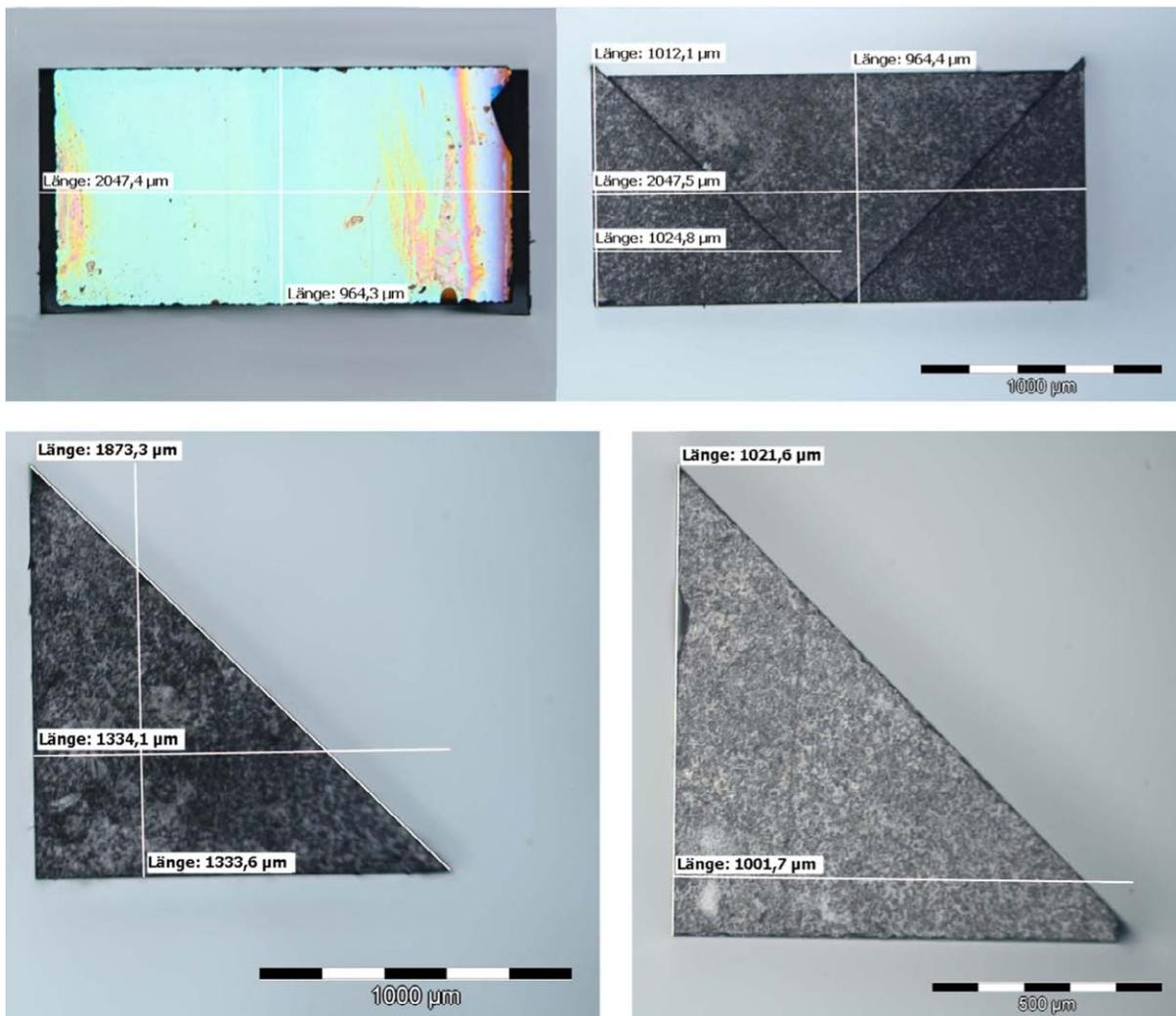


Abbildung 7.1: Lichtmikroskopaufnahmen der optischen Komponenten. Oben der doppelte Strahlteilerwürfel, unten links das Umlenkprisma und unten rechts das Einkoppelprisma.

doppelten Strahlteilerwürfel durchschnittlicher Güte, ein Umlenkprisma und ein Einkoppelprisma. Dabei sind deutliche Beschädigungen in Form von Ausbrüchen zu erkennen. Diese sind bei nahezu allen, zur Verfügung stehenden optischen Kompo-

nenten vorhanden. Meist befinden sich diese jedoch außerhalb der, für die Anwendung kritischen Bereiche, so dass die Bauteile trotz Beschädigung eingesetzt werden können. Die optischen Beschichtungen sind wie oben dargestellt bei der Anlieferung verschmutzt und werden deshalb vor der Verwendung mit einem Gemisch aus Isopropanol und destilliertem Wasser gereinigt. Weitaus schwerwiegender sind Beschädigungen der optischen Beschichtungen, die in einigen Fällen auftraten. Bei der Montage der optischen Komponenten ist dieses Problem teilweise durch vorheriges Festlegen einer Vorzugsrichtung lösbar. Andernfalls ist die Komponente unbrauchbar. Im Falle der Strahlteilerwürfel ist in allen Fällen zu erkennen, dass die verkitteten Prismen unterschiedliche Höhen besitzen. Die durch das Verkitten entstehende nahezu ebene Seite des Strahlteilerwürfels, die zum Beispiel in Abbildung 7.1 oben links nach oben zeigt, muss bei der Montage als Unterseite eingesetzt werden, um einen Schiefstand des doppelten Strahlteilerwürfels auf dem Substrat zu vermeiden. Zudem stehen, wie in Abbildung 7.1 oben rechts dargestellt, auf der Rückseite des doppelten

#### doppelter Strahlteilerwürfel

	Sollmaß	Toleranzwert	durchschnittliche Abweichung	min. Maß	max. Maß
Länge [ $\mu\text{m}$ ]	2000	$\pm 50$	53,1	2031,7	2073,3
Breite [ $\mu\text{m}$ ]	1000	$\pm 50$	-19,2	957,4	1012,1
Höhe [ $\mu\text{m}$ ]	1000	$\pm 50$	-29,9	954,0	998,0
Winkel zwischen Strahlteilerflächen [°]	90	$\pm 0,1$	0,0	89,8	90,3
Winkel Kante [°]	90	$\pm 0,1$	0,1	89,9	90,3

#### Umlenkprisma

	Sollmaß	Toleranzwert	durchschnittliche Abweichung	min. Maß	max. Maß
Kathete 1 [ $\mu\text{m}$ ]	1414,2	$\pm 50$	-66,1	1331,8	1378,5
Kathete 2 [ $\mu\text{m}$ ]	1414,2	$\pm 50$	-65,7	1331,9	1380,0
Hypotenuse [ $\mu\text{m}$ ]	2000	$\pm 50$	-100,0	1873,3	1950,5
Höhe [ $\mu\text{m}$ ]	1000	$\pm 50$	-32,1	951,0	984,9
Winkel zw. Katheten [°]	90	$\pm 0,1$	-0,2	89,6	90

#### Einkoppelprisma

	Sollmaß	Toleranzwert	durchschnittliche Abweichung	min. Maß	max. Maß
Kathete 1 [ $\mu\text{m}$ ]	1000	$\pm 50$	36,8	1024,0	1050,2
Kathete 2 [ $\mu\text{m}$ ]	1000	$\pm 50$	37,3	1029,0	1046,3
Hypotenuse [ $\mu\text{m}$ ]	1414,2	$\pm 50$	52,0	1452,0	1482,0
Höhe [ $\mu\text{m}$ ]	1000	$\pm 50$	-8,1	965,0	1006,5
Winkel zw. Katheten [°]	90	$\pm 0,1$	0,0	89,6	90,3

Tabelle 7.1: Maßabweichungen der optischen Komponenten doppelter Strahlteilerwürfel, Umlenkprisma und Einkoppelprisma.

Strahlteilerwürfels die Ecken zwischen 50  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  über, wodurch die optische Funktion der Strahlteilerwürfel selbst nicht beeinflusst wird, jedoch die Funktion der mechanischen Anschlagkante für das Einkoppelprisma nahezu verloren geht.

Vor der Montage wurden die optischen Komponenten auf ihre Maßhaltigkeit hin überprüft. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 7.1 getrennt dargestellt. Wie zu erkennen ist, befinden sich nicht alle optischen Komponenten innerhalb der geforderten Toleranzen bezüglich der Längenausdehnung. Bezüglich der Winkelgenauigkeit liegen alle Werte unterhalb einer Abweichung von  $\pm 0,5^\circ$ . Zieht man zu den gemessenen Winkelgrößen die Messtoleranz des Lichtmikroskops unter Betracht, liegen alle Komponenten innerhalb der geforderten Winkeltoleranz.

Für ein gutes interferometrisches System sind neben den geometrischen Eigenschaften des Systems die optischen Eigenschaften von zentraler Bedeutung. Einen großen Einfluss auf diese Eigenschaften haben beispielsweise die optischen Verluste, die aufgrund von ungewollten Reflektionen, Absorption im Material und in den Beschichtungen entstehen. Um die optischen Komponenten in dieser Hinsicht zu charakterisieren, wurden die, in Abbildung 7.2 dargestellten Messungen durchgeführt. Zur Schaffung realer Umgebungsbedingungen wird Licht der Wellenlänge 1550 nm in ein identisches, wie auch im modularen mikrooptischen System eingesetztes, GRIN-Faser Pigtail eingekoppelt und mit Hilfe eines Powermeters die Ausgangsleistung der GRIN-Linse auf 1 mW (0 dBm) eingestellt. Anschließend wird die zu vermessende optische Komponente, wie in Abbildung 7.2 dargestellt in den optischen Pfad eingebracht und die ausgangsseitige Leistung gemessen. Im Falle der doppelten Strahlteilerwürfel können unter Kenntnis der eingekoppelten Leistung und der Ausgangsleistungen an den drei Ausgängen, neben der Verlustleistung auch die Teilverhältnisse der beiden Strahlteilerflächen bestimmt werden. An der ersten Strahlteilerfläche beträgt die Reflektion durchschnittlich 46,9 % und die Transmission 53,1 %, während hingegen an der zweiten Strahlteilerfläche die Reflektion durchschnittlich 47,3 % und die Transmission 52,7 % beträgt. Die Standardabweichung liegt bei 3,3 %. Im Vergleich zu den idealen, in Abbildung 7.2 eingetragenen Teilverhältnissen, gehen aufgrund der realen Teilverhältnisse an der ersten Teilerfläche durchschnittlich 53,1 % in Transmission und werden in einen Reflektionsanteil an der zweiten Strahlteilerfläche von 25,1 % und einen Transmissionsanteil von 28 % aufgeteilt. Insgesamt liegen die vermessenen Strahlteilerwürfel alle innerhalb der vorgegebenen Spezifikation von  $\pm 5\%$ . Die optischen Verluste am

Strahlteilerwürfel ergeben sich durchschnittlich zu 0,44 dB mit einer Standardabweichung von 0,48 dB, die eine Kombination aus der Messungenauigkeit des Aufbaus und der fertigungsbedingten Streuung der Komponenten in Kombination mit einer kleinen Losgröße ist.

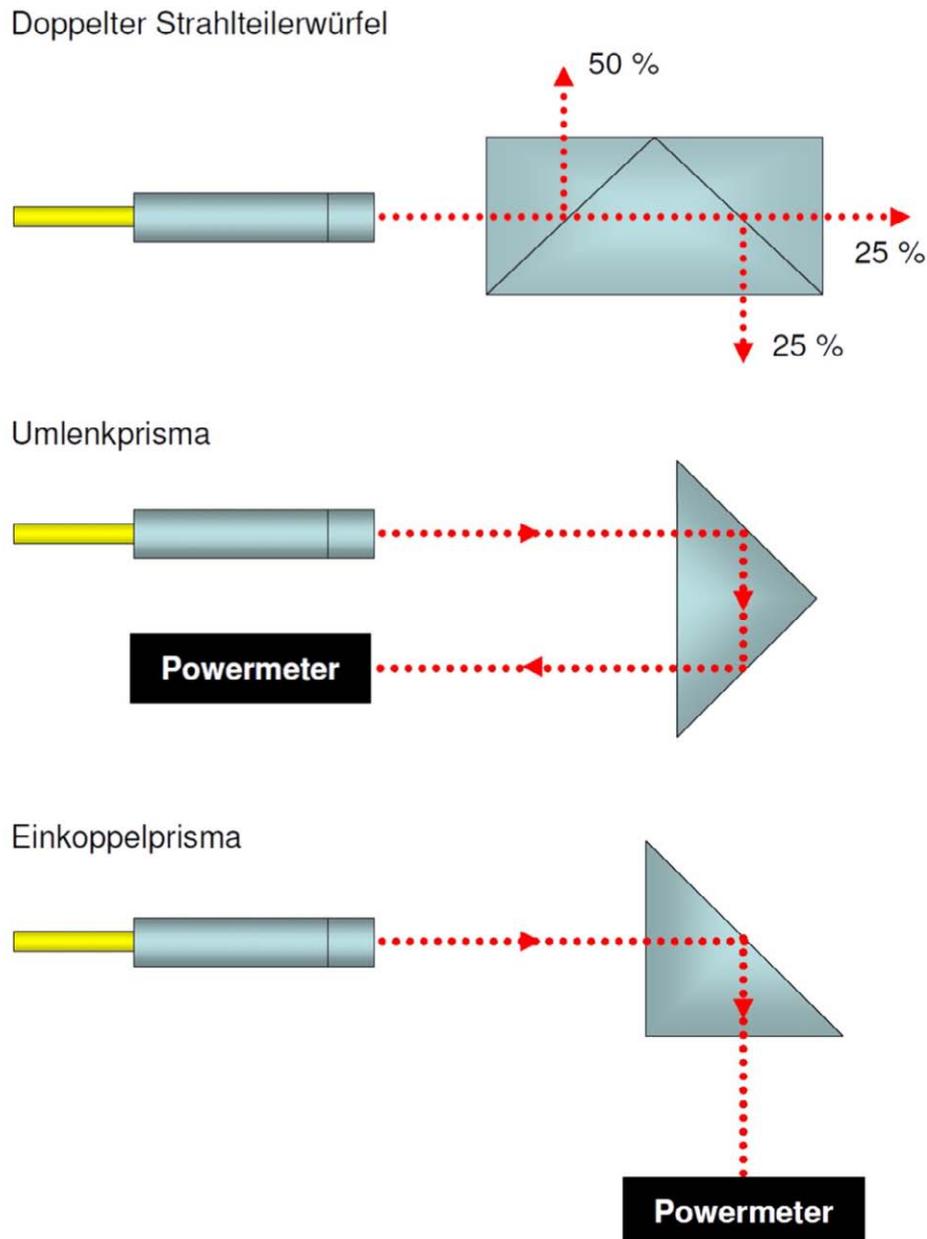


Abbildung 7.2: Messaufbauten zur Ermittlung der Teilverhältnisse der doppelten Strahlteilerwürfel und der Leistungsverluste der verwendeten optischen Komponenten.

Für das Umlenkprisma liegen die, entsprechend der nach Abbildung 7.2 durchgeführten Messungen der Verlustleistung bei 0,62 dB mit einer Standardabweichung von 0,54 dB. Wodurch am Umlenkprisma durchschnittlich 13,3 % der Leistung verloren gehen. Dieser Verlust schlägt sich in den Demonstratoren nieder und sorgt für offsetbehaftete Signale an den Interferometerausgängen, welche zusätzlich durch das nachteilige Teilverhältnis des Strahlteilerwürfels verstärkt werden.

Das Einkoppelprisma erzielt eine durchschnittliche Verlustleistung von 0,26 dB bei einer Standardabweichung von 0,15 dB und ist mit den ermittelten Verlusten im Bereich von 6 % ohne Einschränkungen im System einsetzbar.

Eine Charakterisierung der Antireflektionsbeschichtung ergab einen Rückreflektionsanteil von durchschnittlich 0,28 % des eingekoppelten Lichtes mit einer Standardabweichung von 0,16 % für einen Lichteinfallswinkel von acht Grad auf die Antireflektionsbeschichtung.

Neben den optischen Verlusten und den Teilverhältnissen spielt bei Interferometersystemen die Polarisierung des Lichtes eine weitere bedeutende Rolle. Wie in den Fresnel-Arago-Gesetzen beschrieben, können nur Lichtwellen gleicher Polarisierung miteinander interferieren. Sind zwei, sich überlagernde Lichtstrahlen in der Polarisierung verschieden, tragen nur die vektoriell gleichen Anteile zur Interferenz bei. Orthogonal stehende Anteile belasten die Systemsignale mit einem Offset. Ist ein vektorieller Anteil betragsmäßig größer, als der Andere, so trägt dieser ebenfalls nicht zur Interferenz bei und ist wiederum als Offset dem eigentlichen Interferenzsignal überlagert. Für die genaue Bestimmung der Polarisierungseigenschaften optischer Komponenten und Systeme werden üblicherweise Messplätze bestehend aus einem Polarisationscontroller und einem Polarisationsanalysator eingesetzt. Sie geben die Polarisierungseigenschaften einer vermessenen Komponente in Form von Stokes Parametern aus und stellen diese anschaulich auf der Poincaré-Kugel dar [5] [99]. Im Rahmen dieser Arbeit stand ein Messsystem dieser Art nicht zur Verfügung. Um die Polarisierungseigenschaften der optischen Komponenten trotzdem abschätzen zu können, wurde der, in Abbildung 7.3 dargestellte Messaufbau erstellt. Einkoppeltes Licht der Arbeitswellenlänge von 1550 nm wird mittels eines Y-Kopplers in zwei Teile aufgeteilt. Ein Teil wird direkt über ein Powermeter detektiert und dient zur Kompensation der Leistungsschwankungen der Laserlichtquelle. Der zweite Teil wird über ein GRIN-Faser Pigtail, dessen Faser in einen Polarisationssteller eingelegt ist, freistrahloptisch ausgekoppelt. Als Polarisator und Analysator wird jeweils ein Glan-

Thompson Polarisator [5] mit Präzisionsdrehtisch eingesetzt. Zur Durchführung einer Messung befindet sich zu Beginn hinter dem GRIN-Faser Pigtail nur der Polarisator direkt gefolgt von Powermeter 2. Der Polarisator wird auf die gewünschte Polarisation, unter der die optische Komponente untersucht werden soll eingestellt. Anschließend wird durch drehen der drei Faserschlaufen des Polarisationsstellers die Polarisation in der Faser so lange verändert, bis mit Hilfe des Powermeter 2 das Leistungsmaximum gefunden ist. Im nächsten Schritt werden die zu vermessende Probe sowie der Analysator in den Strahlengang gestellt. Durch Drehen des Analysators wird dabei erneut das Leistungsmaximum ermittelt und anschließend die Polarisationsdrehung am Analysator abgelesen und mit der des Polarisators verglichen. Die auftretende Winkeldifferenz zwischen Polarisator und Analysator entspricht dabei der Polarisationsdrehung durch im Strahlengang befindliche optische Elemente. Da das Messsystem sehr empfindlich reagiert, sind die Messungen mit äußerster Akkuranz durchzuführen.

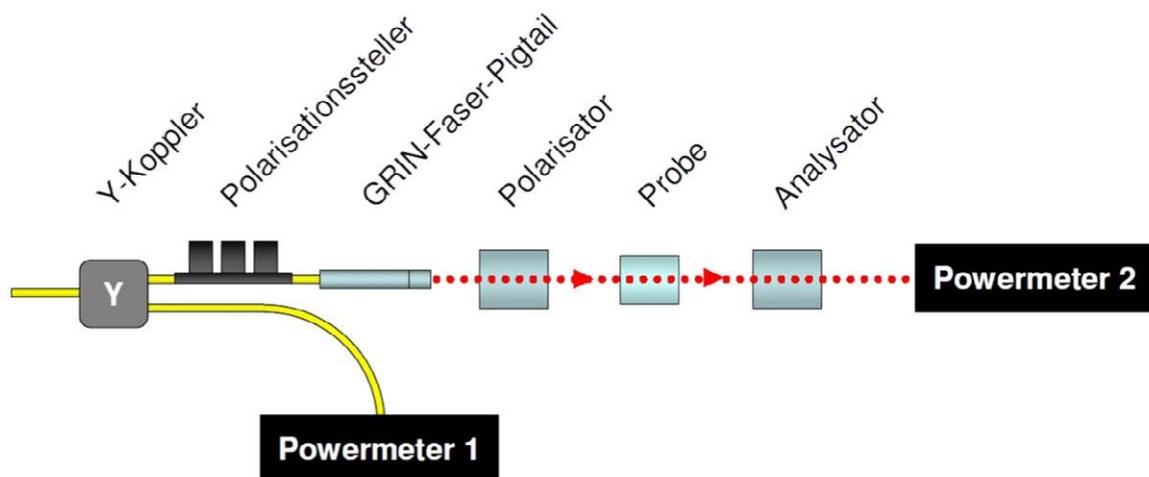


Abbildung 7.3: Messaufbau zur Bestimmung der Polarisations-eigenschaften der optischen Komponenten.

In Abbildung 7.4 ist das Ergebnis einer Polarisationsmessung dargestellt. Vermessen wurde ein doppelter Strahlteilerwürfel in Transmission unter einem Polarisationswinkel von  $90^\circ$ , wobei eine Polarisationsrichtung senkrecht zur Tischebene als null Grad definiert wurde. Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, beträgt die Polarisationsdrehung dieser Messung ca.  $-4,7^\circ$ . Im Falle einer Reflexion an der ersten Strahlteiler-

schicht wurde eine durchschnittliche Drehung der Polarisation von ca.  $-10,5^\circ$  gemessen. Aus den Messungen lässt sich somit eine relative Polarisationsdrehung von ca.  $-6^\circ$  zwischen Reflektions- und Transmissionsanteil schließen. Dieses Verhältnis zwischen Reflektion- und Transmission konnte ebenfalls unter anderen Polarisations-

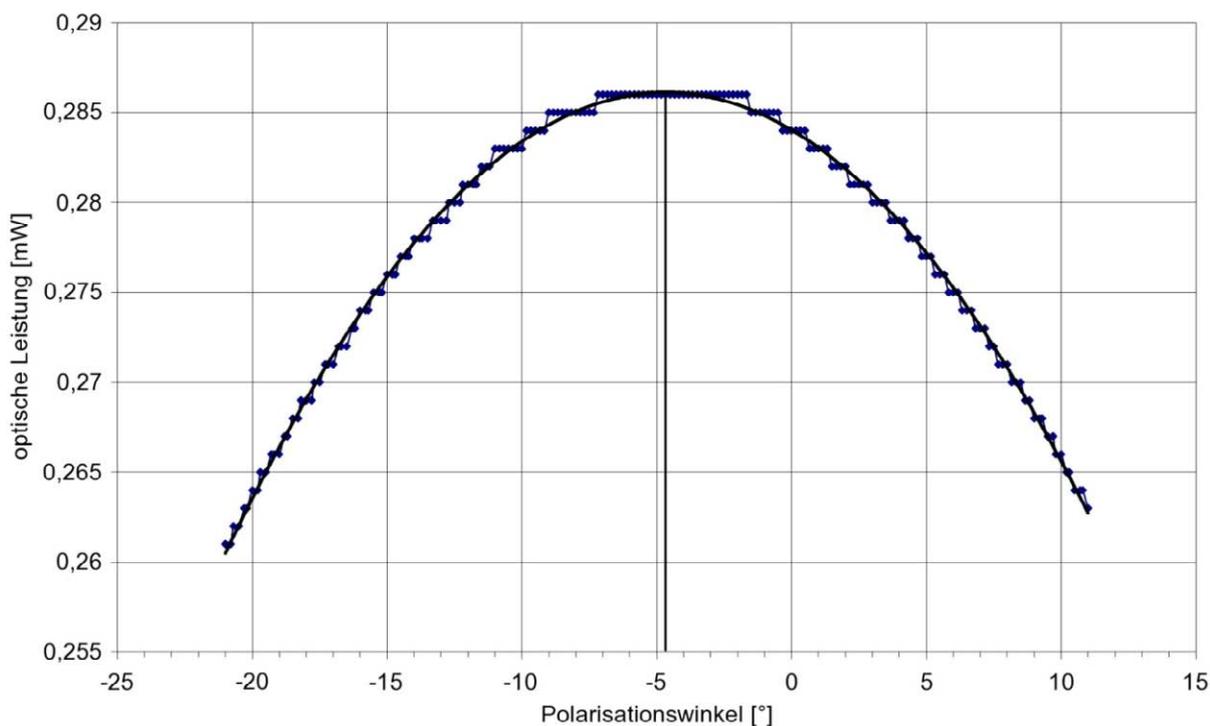


Abbildung 7.4: Polarisationsmessung des doppelten Strahlteilerwürfels unter einem Polarisationswinkel von  $90^\circ$  in Transmission durch beide Teilerschichten.

winkeln beobachtet werden. Unter einem Polarisationswinkel von  $0^\circ$  betrug die Polarisationsdrehung in Transmission ca.  $-4^\circ$  und unter einem Polarisationswinkel von  $45^\circ$  wurde eine Polarisationsdrehung von ca.  $20^\circ$  gemessen.

Polarisationsmessungen für das Umlenkprisma ergaben eine Polarisationsdrehung von ca.  $-6^\circ$  für einen Polarisationswinkel von  $0^\circ$  und ca.  $-3^\circ$  bei einem Polarisationswinkel von  $90^\circ$ . Unter einem Polarisationswinkel von  $45^\circ$  ergeben sich, wie in Abbildung 7.5 zu sehen ist, an den zur Verfügung stehenden Umlenkprismen Polarisationsdrehungen von ca.  $33,5^\circ$  und mehr. Daraus resultierend sind im interferometrischen System, abhängig von der Polarisationsrichtung deutliche, in den Interferogrammen erkennbare, Offsets zu erwarten.

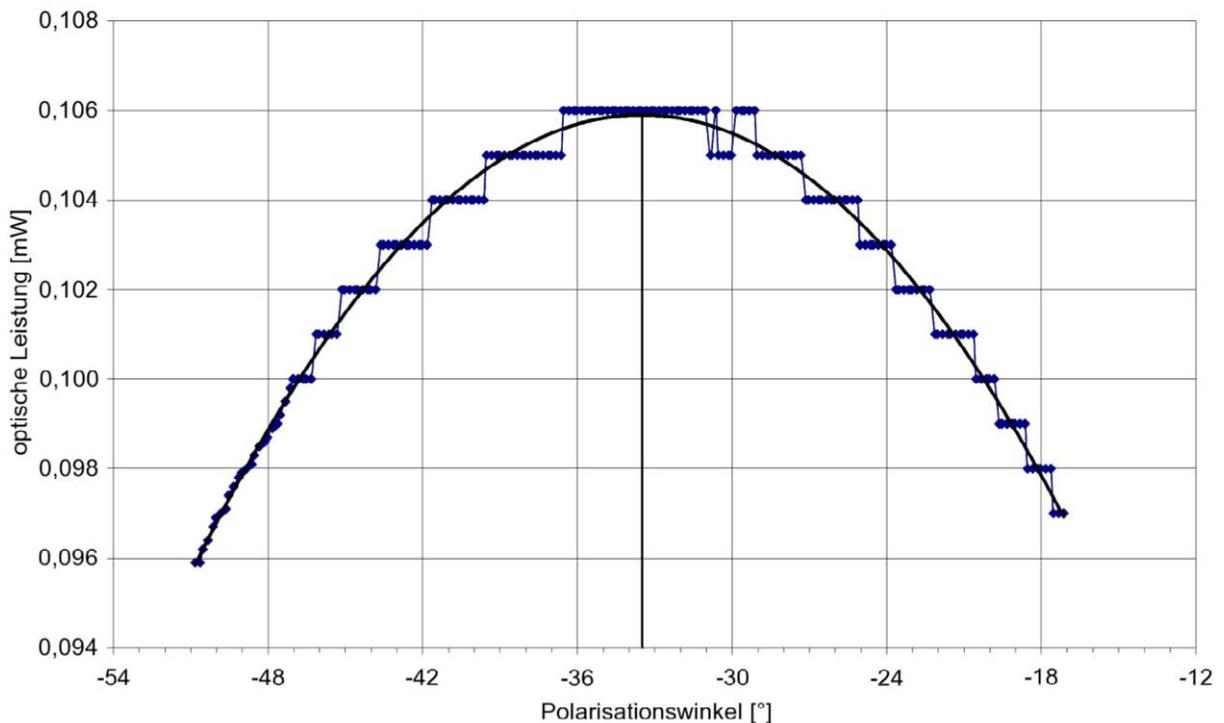


Abbildung 7.5: Polarisationsmessung des Umlenkprismas unter einem Polarisationswinkel von  $45^\circ$  in Transmission mit einer Polarisationsdrehung von ca.  $33,5^\circ$ .

Im Falle des Einkoppelprismas sind Polarisationsdrehungen von weitaus geringerer Bedeutung wie im Falle des doppelten Strahlteilerwürfels und des Umlenkprismas, da die Drehung der Polarisation hier vor der Aufspaltung des Lichtes in zwei Teilstrahlen geschieht. Für eine Polarisationsrichtung von  $0^\circ$  wurde für das Einkoppelprisma durchschnittlich eine Polarisationsdrehung von ca.  $2,7^\circ$  gemessen. Generell ist bei diesen Messungen anzumerken, dass die Ergebnisse aufgrund der eingesetzten Messmethode nur Tendenzen wiedergeben und von weiteren, nicht exakt kontrollierbaren Größen abhängen.

Aufgrund der hohen Kosten, musste für die Herstellung erster Demonstratoren der aktiven modularen mikrointerferometrischen Systeme auf die vorhandenen optischen Komponenten zurückgegriffen werden. Unter Berücksichtigung der, in diesem Kapitel ermittelten Eigenschaften ist deutlich zu erkennen, dass einzig durch Ersetzen des mikroaktorseitig verbauten Umlenkprismas durch ein optimiertes Bauteil eine deutliche Verbesserung der optischen Eigenschaften möglich wäre.

### Die GRIN-Faser Pigtails und GRIN-Prisma Kombinationen

Bei den zur Lichteinkopplung eingesetzten GRIN-Faser Pigtails ist das Abstahlverhalten von besonderer Bedeutung. Für den Einsatz im aktiv modularen mikrooptischen System, sollte die optische Achse des Pigtails möglichst genau mit der Achse der GRIN-Linse und des verwendeten Glasspacers übereinstimmen, damit die Strahlausbreitung innerhalb der mikrooptischen Bank entlang der berechneten optischen Pfade verläuft. Ist dies nicht der Fall, läuft das eingekoppelte Licht der durch die Haltestrukturen der mikrooptischen Bank ausgerichteten GRIN-Linse nicht

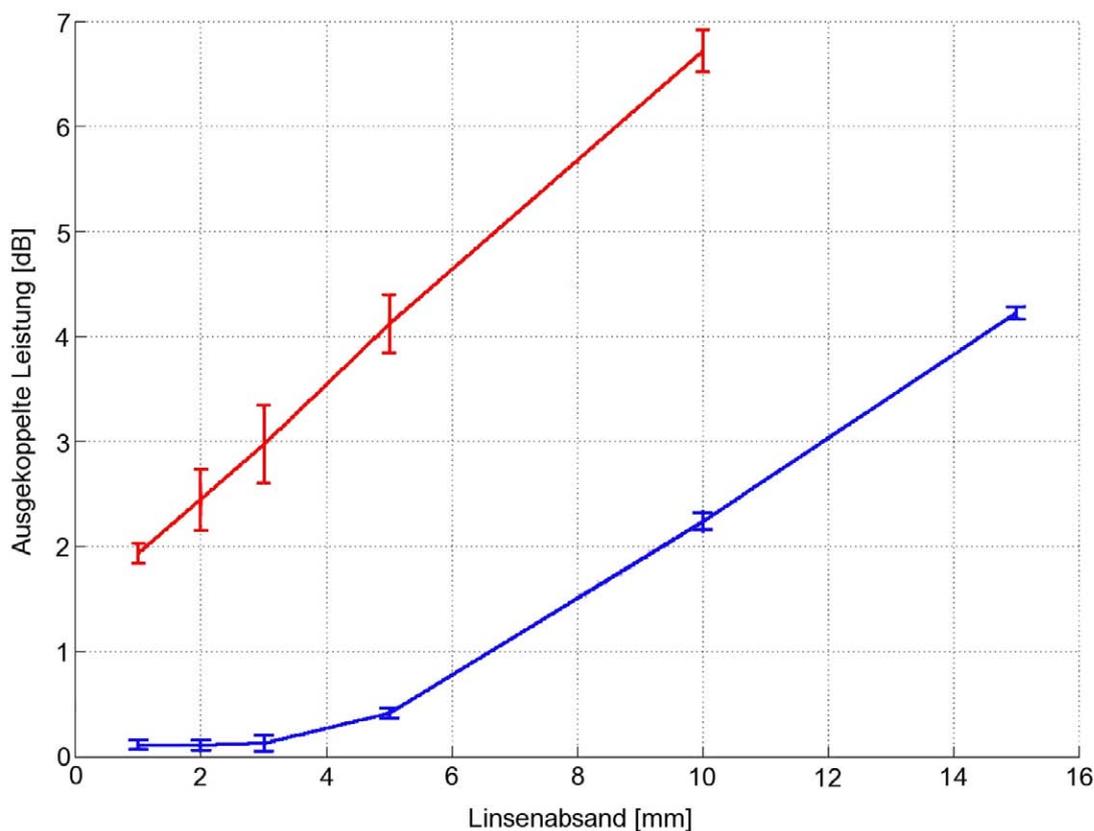


Abbildung 7.6: Koppelverluste bei der freistrahloptischen Pigtail-Pigtail Kopplung unter Veränderung des Pigtailabstands. Die obere Kurve zeigt die Koppelverluste unter ausgangsseitiger Verwendung eines Singlemodefaserpigtails, die Untere bei ausgangsseitiger Verwendung eines Multimodefaserpigtails.

parallel durch das mikrooptische System. In einer ersten Lieferung von Pigtails wurde bei der Charakterisierung ein Schielverhalten von bis zu fünf Grad festgestellt, was auf eine exzentrische Montage der Glasfaser am Glasspacer zurückzuführen war.

Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurden bei neuen Pigtails die Fasern aktiv justiert und verklebt. Das Abstrahlverhalten wurde durch diese Maßnahme deutlich verbessert. Im Falle der ersten exzentrisch verklebten Pigtails war es nicht möglich, durch gegenüberliegende Ausrichtung, das abgestrahlte Licht eines Pigtails freistrahloptisch in das zweite Pigtail einzukoppeln. Wie die Messergebnisse in Abbildung 7.6 zeigen, wurde diese Problematik durch die aktive Justage deutlich entschärft. Im Falle einer Auskopplung des Lichts auf eine Singlemodefaser vom Typ SMF28, können nach einer freistrahloptischen Wegstrecke von ca. 3 mm noch 50 % der in das erste Pigtail eingespeisten Lichtleistung am Detektor eines Powermeters detektiert werden. In einem Abstand von ca. 8,5 mm sind noch 25 % detektierbar. Die inneren Verluste im Pigtail und die Steckerverluste ergeben sich bei der Stoß-Kopplung beider Singlemodepigtails am Schnittpunkt mit der Ordinate im Diagramm zu ca. 1,4 dB. Für die zweite Messung wird das ausgangsseitige Pigtail durch ein Pigtail mit einer Multimodefaser ersetzt, welche einen Kerndurchmesser von 50  $\mu\text{m}$  besitzt. Die inneren Verluste bei der Stoß-Kopplung liegen hier im Bereich von 0,1 dB. Bei Vergrößerung des Abstands auf unterhalb drei Millimeter sind keine nennenswerten Veränderungen der Dämpfungswerte zu beobachten. Für größere Abstände ist ein Zunehmen der Dämpfung zu erkennen. Bei einem Abstand von 12 mm zwischen den Vorderseiten beider Pigtails beträgt der Dämpfung 3 dB, die detektierte Eingangsleistung ist an dieser Position auf einen Wert von 50 % abgefallen.

Aus den Ergebnissen der Messungen ist zu folgern, dass das ausgekoppelte Licht der GRIN-Faser Pigtails nicht vollständig kollimiert ist und in Folge dessen eine Überstrahlung des auskoppelseitigen Faserkerns auftritt. Diese Überstrahlung setzt im Falle der Auskopplung auf eine Multimodefaser in einem Abstand von ca. 3 mm ein. Im Falle der Auskopplung auf eine Singlemodefaser identischen Typs, ist dieser Effekt bereits bei der Stoß-Kopplung zu beobachten.

Neben der Ausbreitung des Lichtes im mikrooptischen System, ist bei den GRIN-Faser Pigtails die Intensitätsverteilung auf der Linsenaustrittsfläche von Interesse. Sie sollte möglichst einer Gaußschen Normalverteilung entsprechen und keine Moden höherer Ordnung enthalten. Die Messung der Intensitätsverteilung kann mit einem Nahfeldmessplatz erfolgen, bei dem es sich im Prinzip um ein, parallel zur Tischoberfläche geneigtes Mikroskop mit Abbildung der Fokusebene auf eine CCD-Kamera handelt. Die Vermessung der Pigtails am Nahfeldmessplatz bietet des Weiteren die Möglichkeit, den Strahldurchmesser am Ende des Pigtails zu ermitteln,

der laut Spezifikation bei  $66 \mu\text{m}$  an der  $1/e^2$  Breite des Gaußprofils liegen sollte. Abbildung 7.7 zeigt die Falschfarbdarstellung einer, mit der CCD-Kamera des

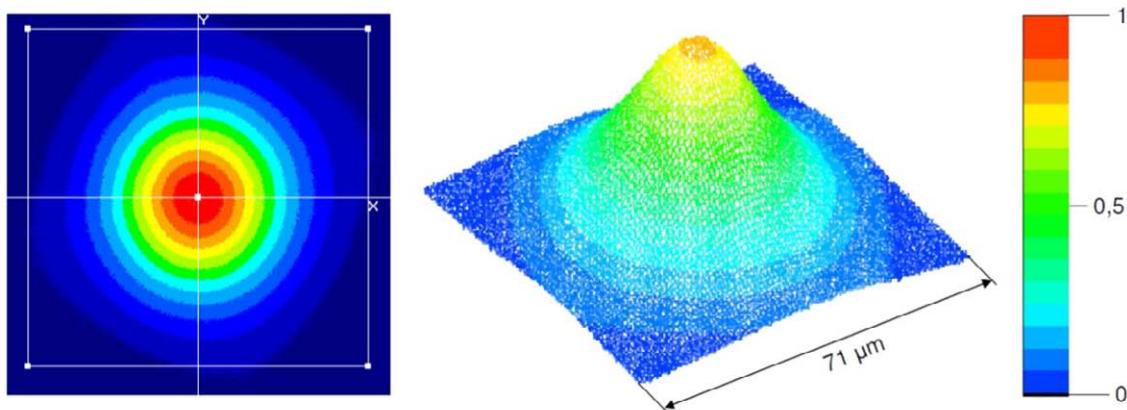


Abbildung 7.7: Nahfeldmessung der Intensitätsverteilung eines GRIN-Faser Pigtails an der Linsenaustrittsfläche.

Nahfeldmessplatzes aufgezeichneten Intensitätsverteilung an der Linsenaustrittsfläche eines GRIN-Faser Pigtails. In der 3D-Darstellung ist das gaußförmige Intensitätsprofil des vermessenen Pigtails bei einer Wellenlänge von  $1550 \text{ nm}$  gut zu erkennen. Der gemessene Linsenspot ist leicht oval und besitzt nach dem  $1/e^2$  Abfall der

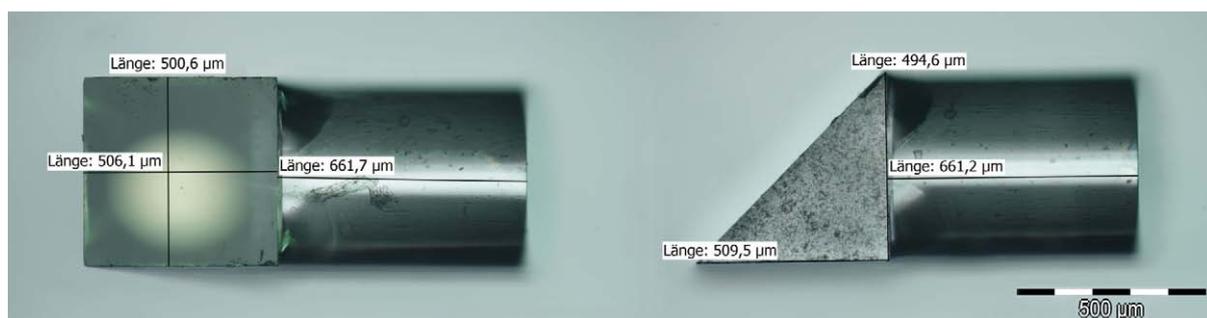


Abbildung 7.8: Draufsicht und Seitenansicht einer GRIN-Linse-Prisma Kombination unter dem Lichtmikroskop.

Intensität einen Strahl durchmesser in X-Richtung von  $63,2 \mu\text{m}$  und in Y-Richtung von  $65,6 \mu\text{m}$ . Damit liegt das Pigtail nahe an dem in der Spezifikation geforderten Strahldurchmesser.

Vor Beginn der Montage wurden abschließend die GRIN-Linse-Prisma Kombinationen nach derselben Vorgehensweise wie die optischen Komponenten visuell mittels Lichtmikroskop überprüft und auf ihre Maßhaltigkeit untersucht. Abbildung 7.8 zeigt eine GRIN-Linse-Prisma Kombination für eine Photodiode mit einem Durchmesser der aktiven Detektorfläche von 32  $\mu\text{m}$  in der Seitenansicht und Draufsicht. In Tabelle 7.2 sind die Maßabweichungen der GRIN-Linse-Prisma Kombinationen für Photodioden mit einem Durchmesser der aktiven Detektorfläche von 32  $\mu\text{m}$  und 12  $\mu\text{m}$  erfasst. Im Vergleich zu den optischen Komponenten, wie die Strahlteiler und Prismen, ist die Maßhaltigkeit dieser Komponenten sehr gut und liegt bis auf einen Ausreißer innerhalb der vorgegebenen Spezifikationen. Eine optische Charakterisierung war aufgrund der Bauteilgröße mit ausreichender Genauigkeit nicht möglich. Auf sie wurde an dieser Stelle verzichtet.

#### GRIN-Linse-Prisma Kombinationen 660 $\mu\text{m}$

	Sollmaß	Toleranzwert	durchschnittliche Abweichung	min. Maß	max. Maß
Linsenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	660	$\pm 20$	-8,2	640,8	661,7
Linsendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	500	+0 / -5	-3,1	494,4	499,1
Prismenhöhe [ $\mu\text{m}$ ]	500	$\pm 5$	1,7	497,6	506,0
Kathetenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	500	$\pm 20$	13,5	506,1	520,5
Hypotenusenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	707,1	$\pm 20$	15,6	703,7	736,1

#### GRIN-Linse-Prisma Kombinationen 525 $\mu\text{m}$

	Sollmaß	Toleranzwert	durchschnittliche Abweichung	min. Maß	max. Maß
Linsenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	660	$\pm 20$	-11,3	509,5	517,9
Linsendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	500	+0 / -5	-2,5	496,2	498,8
Prismenhöhe [ $\mu\text{m}$ ]	500	$\pm 5$	4,8	503,0	506,5
Kathetenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	500	$\pm 20$	6,3	503,5	509,0
Hypotenusenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	707,1	$\pm 20$	4,7	703,7	719,8

Tabelle 7.2: Maßabweichungen der GRIN-Linse-Prisma Kombinationen für Photodioden mit 32  $\mu\text{m}$  und 12  $\mu\text{m}$  Durchmesser der aktiven Detektorfläche.

## 7.2 Aufbau mit optischer Signalausgabe

Modulare mikrooptische Systeme mit optischer Signalausgabe verfügen abgesehen von der Mikroaktorsteuerung ausschließlich über optische Ein- und Ausgänge. Für die Ermittlung der Systemeigenschaften des Mikrointerferometers sind aus diesem Grund weitere externe Detektionssysteme erforderlich. Die einfachste Möglichkeit der Charakterisierung bietet ein optisches Leistungsmessgerät wie zum Beispiel ein HP-

Powermeter mit zwei optischen Eingängen, um beide Systemeingänge gleichzeitig zu erfassen. Für die Charakterisierung wird in das modulare Mikrointerferometer Licht der Arbeitswellenlänge von 1550 nm über einen Laser eingekoppelt. Die beiden Mikrointerferometerausgänge sind an das Powermeter angeschlossen und werden direkt über einen Messrechner ausgelesen und aufgezeichnet. Gleichzeitig steuert der Messrechner den, in das Mikrosystem integrierten Mikroaktor an und verfährt diesen während der Messwerterfassung über seinen gesamten Stellweg. In Abbildung 7.9 ist der Messaufbau für die Charakterisierung schematisch dargestellt. Die Ansteuerung des Mikroaktors variiert dabei abhängig vom Aktortyp. Der dargestellte Fall zeigt einen Piezoaktor, dessen Aktorsteuerung mittels einer Spannungsvorgabe im Bereich von 0 – 10 V über ein externes Labornetzteil gesteuert werden kann. Dieses ist vom Messrechner aus präzise ansteuerbar. Im Falle des elektromagnetischen Mikroaktors

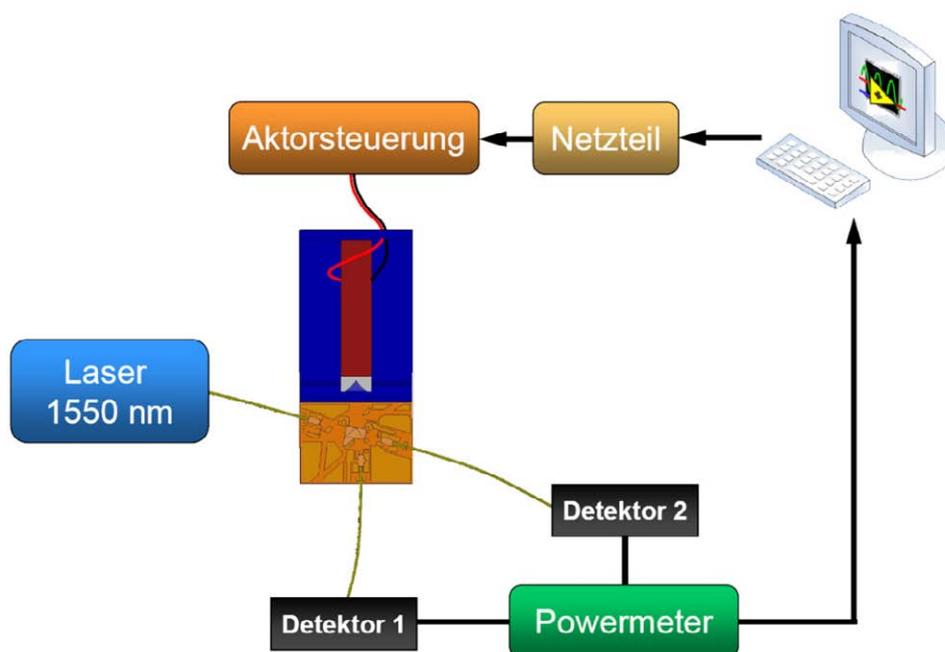


Abbildung 7.9: Aufbau zur Charakterisierung der modularen mikrointerferometrischen Systeme mit optischer Signalausgabe über Glasfasern am Beispiel eines Systems mit Piezoaktor.

erfolgt die Aktoransteuerung über eine Konstantstromquelle, die auf gleiche Weise mittels Spannungsvorgabe über den Messrechner ansteuerbar ist. Der Inchwormaktor

hingegen verfügt über eine, direkt an den Messrechner angeschlossene Aktorelektronik, welche vom Mikroaktorhersteller mitgeliefert wird.

Die mittels eines Messrechners aufgezeichneten Messergebnisse dieser Art zeigt Abbildung 7.10, aus denen die Kenngrößen des vermessenen Mikrointerferometers bestimmt werden können. Zu Beginn der Messung wurde die Laserlichtquelle

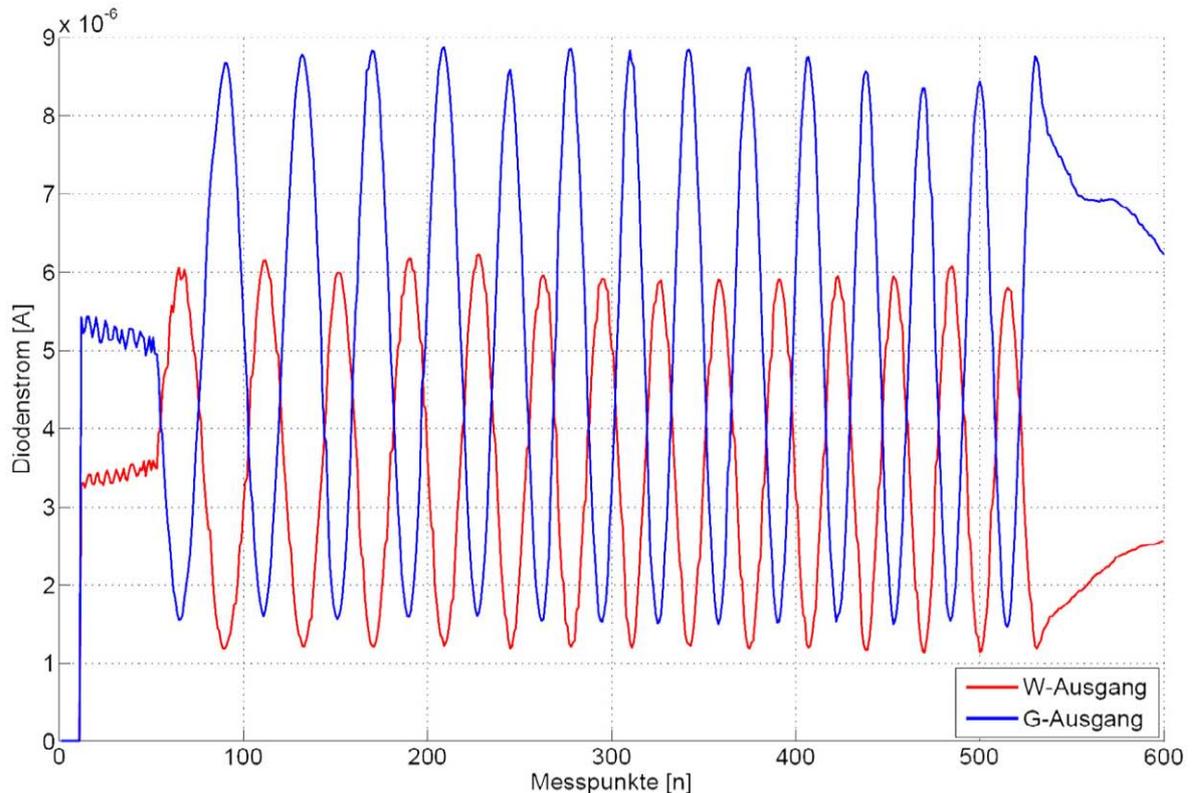


Abbildung 7.10: Mittels eines HP-Powermeter aufgezeichnete Interferenzsignale eines fasergebundenen modularen Mikrointerferometer.

abgeschaltet um zu Referenzzwecken eine Dunkelmessung durchzuführen. Nach kurzem Einschwingen des Lasers wurde der Piezoaktor des Mikrointerferometers über den kompletten Aktorhub verfahren und die auftretenden Intensitätsverläufe an den beiden Systemausgängen aufgezeichnet. Aus den erhaltenen Messergebnissen lassen sich charakteristische Kenngrößen des Mikrointerferometers ermitteln. Hierzu zählen das Auslöschungsverhältnis und der Kontrast nach Michelson. Beide lassen sich nach den Gleichungen 2.7 aus obiger Messung berechnen, indem für die Ausgänge die gemittelten maximalen und minimalen Intensitäten bestimmt werden. Für den in Abbildung 7.10 vermessenen Aufbau liegt das Auslöschungsverhältnis des G-

Ausgangs bei 7,3 dB und das des W-Ausgangs bei 6,8 dB. Die beiden sich daraus ergebenden Kontraste nach Michelson betragen 68,9 % für den G-Ausgang und 65,5 % für den W-Ausgang. Messungen an verschiedenen Prototypen ergaben Auslöschungsverhältnisse zwischen 4,1 dB und 7,8 dB. Die Systemdämpfung liegt im Bereich von  $15 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$ . Aus der Phasenlage beider Interferenzsignale zueinander lässt sich bestimmen, wie gut die beiden Auskoppelfasern die nullten Ordnungen erfassen. Ein von  $180^\circ$  abweichender Versatz der Signale zueinander deutet auf das Erfassen höherer Ordnungen hin. Für die Messung in Abbildung 7.10 ergibt sich eine Abweichung der Phasenverschiebung von ca.  $5^\circ$ . Je nach Anwendung kann diese von Vorteil sein. Für die inkrementelle interferometerbasierte Wegmessung kann anhand des Vor- bzw. Nacheilen eines Interferenzsignals detektiert werden, ob sich das zu vermessende Objekt auf das Mikrointerferometer zu- oder wegbewegt. Eine weitere, aus der Messung in Abbildung 7.10 zu ermittelnde Kenngröße, ist der Aktorhub. Dieser lässt sich, unter Kenntnis der eingekoppelten Wellenlänge, durch das Abzählen der durchlaufenden Interferenzstrukturen über den gesamten verfahrenen Aktorhub rückrechnen. In der Messung durchläuft das System ca. 13,7 Ordnungen. Die Arbeitswellenlänge beträgt 1550 nm. Zusätzlich ist aus der Geometrie des Mikrointerferometers bekannt, dass das Licht die Wegstrecke zum Umlenkprisma auf dem Mikroaktor je einmal auf dem Hin- und Rückweg durchläuft. Daraus ergibt sich ein gemessener Hub für den Piezoaktor von  $10,6 \mu\text{m}$ . Verglichen mit den Herstellerangaben von  $11 \mu\text{m} \pm 20 \%$  [101] für den PI P-882.30 decken sich Werte der Spezifikation und die gemessenen Werte sehr gut.

Eine weitere Möglichkeit der Charakterisierung des gesamten mikrointerferometrischen Systems, ist die Bestimmung der Polarisationsseigenschaften. Bei interferometrischen Systemen haben unterschiedliche Polarisationsseigenschaften entlang der optischen Teilpfade direkten Einfluss auf die Signalgüte der Interferenzerscheinungen. Für die Polarisationsmessung wird polarisiertes Licht in das zu charakterisierende Mikrointerferometer geleitet und die Signalausgänge mit einem Polarisationsanalysator detektiert. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit stand ein entsprechender Polarisationsanalysator jedoch nicht zur Verfügung. Um ohne dieses Gerät eine Abschätzung des Polarisationsverhaltens der aktiven modularen mikrooptischen Systeme zu erhalten, wurde eine alternative Messung durchgeführt. Der hierfür eingesetzte Messaufbau ist in Abbildung 7.11 dargestellt. Als Lichtquelle kommt ein einstellbarer Laser zum Einsatz, der die in das Mikrointerferometer eingespeiste

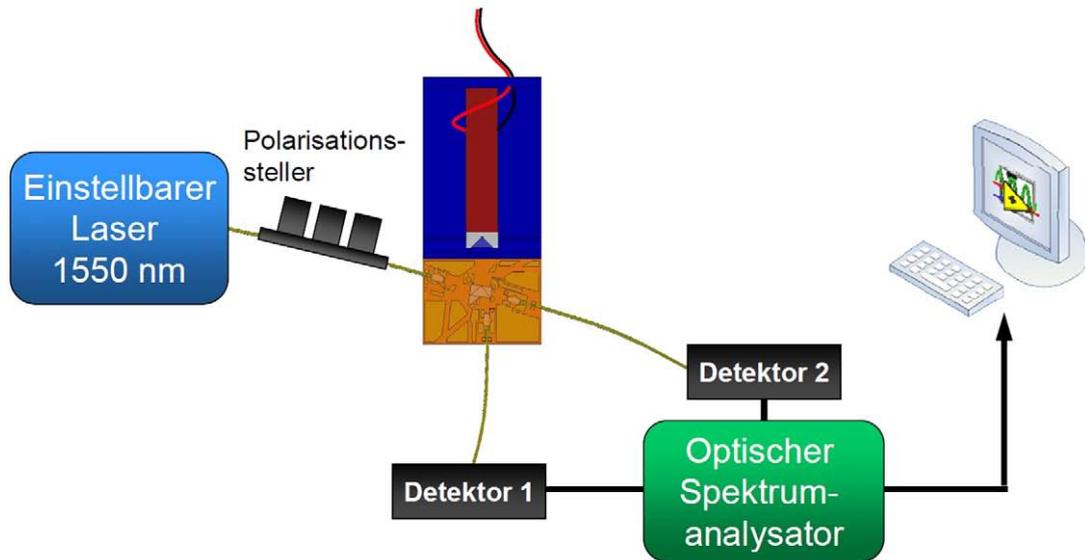


Abbildung 7.11: Aufbau für die Abschätzung der Polarisierungseinflüsse des aktiv modularen mikrooptischen Systems.

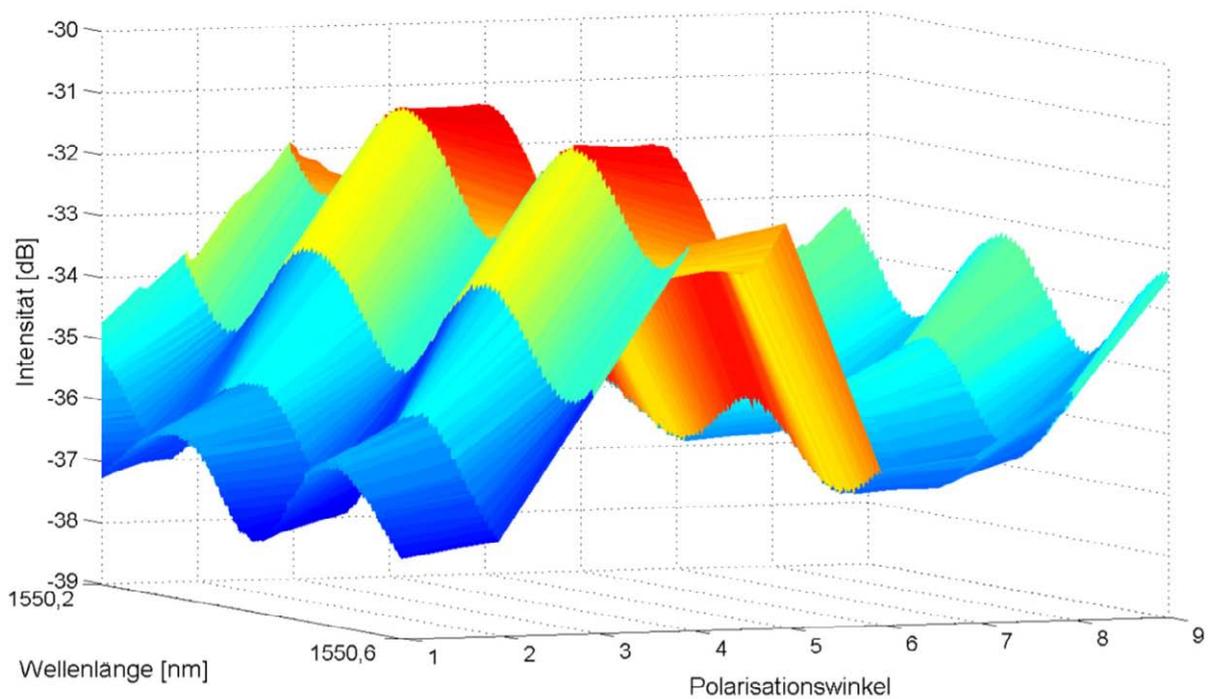


Abbildung 7.12: Ergebnisse der Polarisationsuntersuchung mit eindeutiger Polarisationsabhängigkeit des Mikrointerferometers.

Wellenlänge von 1546 nm bis 1551 nm variiert. Das Licht wird über einen Polarisationssteller in das Mikrointerferometer eingespeist und mittels eines optischen Spektrumsanalysators aufgezeichnet. Anschließend werden die Messdaten an einen Auswerterechner übertragen. Für die Messung unter einem weiteren Polarisationswinkel wird der Polarisationssteller um einen definierten Winkel gedreht und die Messung wiederholt. In dem in Abbildung 7.12 dargestellten Messergebnis

wurde die Polarisation über neun Einzelmessungen variiert und daraus das gezeigte Diagramm erstellt. Es zeigt die Änderung der Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Polarisation, welche in dieser Messung jedoch nicht explizit erfasst werden konnte. Die Messung zeigt jedoch deutlich die Polarisationsabhängigkeit des vermessenen Mikrointerferometers, die sich hauptsächlich in Form eines

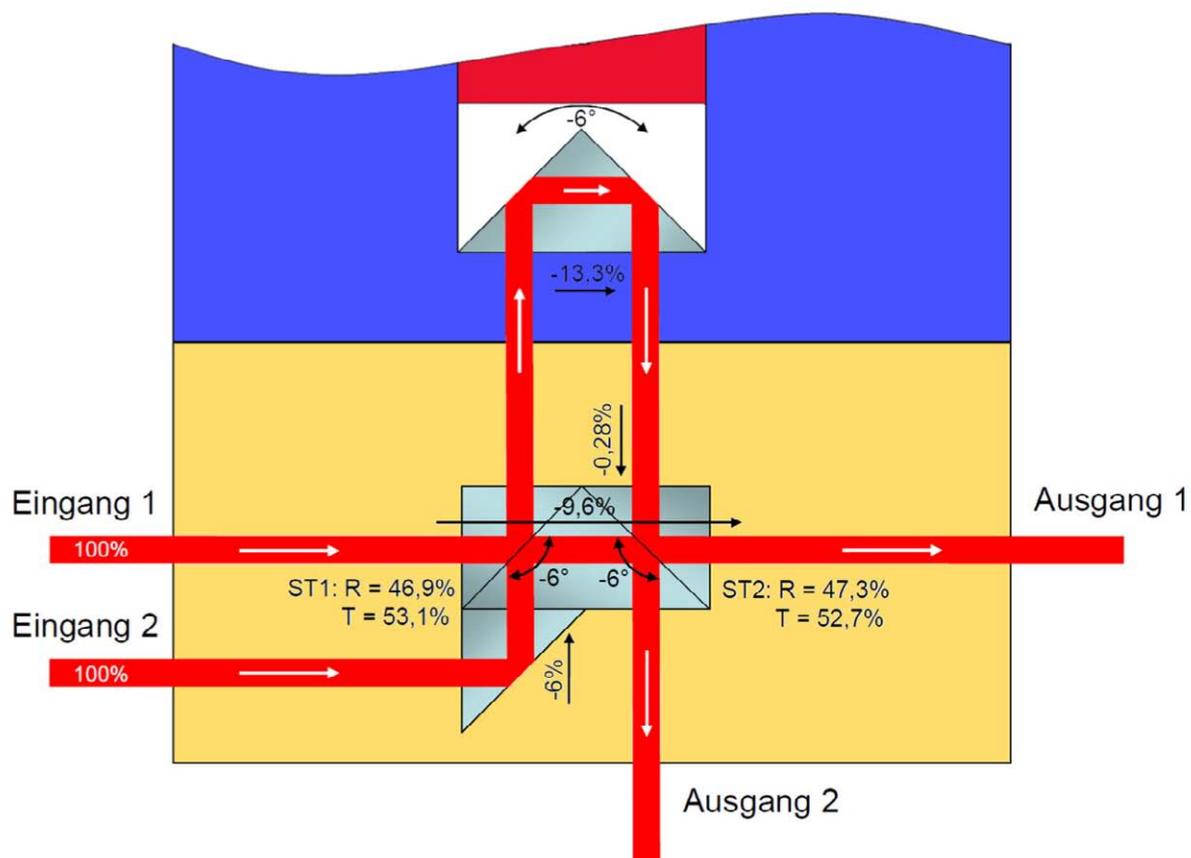


Abbildung 7.13: Leistungsverluste an den optischen Komponenten und relative Polarisationsdrehungen für s-polarisiertes Licht.

signalüberlagernden Offset äußern. Um genauere Aussagen treffen zu können, ist die Messung mit einem Polarisationsanalysator zu wiederholen.

Die bisherigen Charakterisierungsergebnisse des Gesamtsystems sind unter Kenntnis der Ergebnisse aus Kapitel 7.1 nicht all zu überraschend. Unter Betrachtung der dort dargestellten Ergebnisse lassen sich die in Abbildung 7.13 aufgezeigten Intensitätsverluste und Polarisationsdrehungen eines jeden optischen Elementes in das aktive modulare mikrooptische System einzeichnen. Auf den ersten Blick erscheinen die jeweiligen Verluste an den optischen Komponenten und die Polarisationsdrehungen gering. Bei genauerem Betrachten der Zusammenhänge und der Addition aller Verluste entlang der optischen Pfade, die im Mikrointerferometer zur Interferenz gebracht werden, werden die Gründe für die erhaltenen Ergebnisse deutlich. In Abbildung 7.13 sind die Verluste, Strahlteilverhältnisse und die relativen Polarisationsdrehungen der einzelnen optischen Komponenten für einen s-polarisierten einfallenden Lichtvektor eingetragen. Die Verluste beziehen sich jeweils auf die um  $8^\circ$  gedrehten Komponenten, wie sie im realen Aufbau angeordnet sind. Bei den Verlusten der Prismen sind die Rückreflektionsverluste der Antirefleksbeschichtungen bereits mit inbegriffen. Bei dem Strahlteilerwürfel sind diese an jedem Übergang von Glas an Luft mit zu berücksichtigen. Tabelle 7.3 zeigt die, aus den Ergebnissen der Einzelkomponenten entsprechend Abbildung 7.13 abgeschätzten prozentualen optischen Leistungen für Eingang 1, bei einer normierten Eingangsleistung von 100 %, sowie die sich für den jeweiligen optischen Pfad resultierenden

Pfad	opt. Leistung am Interferenzpunkt	Polarisationsdrehung über Pfad	Polarisationsanteile		Interferenzanteil	Offset	ER
			parallel	senkrecht			
	17,34%	$18^\circ$	5,36%	16,49%	33,0%	14,2%	5,2 dB
	25,30%	$0^\circ$	0%	25,30%			
	19,32%	$12^\circ$	4,02%	18,90%	42,5%	5,3%	9,6 dB
	22,71%	$6^\circ$	2,37%	22,59%			

Tabelle 7.3: Aus den Messergebnissen der Einzelkomponenten zu erwartende Leistungen, Polarisationsdrehungen und Auslöschungsverhältnisse (ER) entlang der optischen Pfade ausgehend von Eingang eins.

Polarisationsdrehungen. Entsprechend der, für s-polarisiertes Licht, ermittelten Polarisationsdrehungen der optischen Komponenten ist es möglich, das Licht eines optischen Pfades nach der Interaktion mit einer optischen Komponente vektoriell in seine p- und s-Anteile zu zerlegen. Zur Interferenz kommen dabei nur Anteile, derselben Polarisationsrichtung. Sind die Anteile unterschiedlich groß, äußert sich dies in Form eines Offsets in Überlagerung mit dem Interferenzsignal. In Tabelle 7.3 sind die Anteile der interferierenden Pfade entsprechend zusammengefasst und daraus das zu erwartende Auslöschungsverhältnis berechnet. Aus den Abschätzungen sind deutliche Parallelen zu den Messergebnissen zu erkennen. Wie etwa dem etwas geringeren Offset des W-Ausgangs im Vergleich zum G-Ausgang. Das abgeschätzte Auslöschungsverhältnis beider Ausgänge zeigt ebenfalls, dass die gemessenen Werte mit den eingesetzten optischen Komponenten realistisch und durchaus zu erwarten sind.

Eine weitere Möglichkeit die Güte des optischen Gesamtsystems, der optischen Elemente bzw. deren optische Beschichtung zu überprüfen, ist die Messung der systeminternen Rückreflektionen an den optischen Übergängen unter Verwendung eines High Precision Reflectometers. Für nachrichtentechnische Anwendungen kann unter Kenntnis der systeminternen Rückreflektionen die Rückstreuendämpfung als eine bedeutende Kenngröße bestimmt werden. Darüber hinaus lassen sich anhand der ortsbezogenen Rückreflektionen aber auch Aussagen über eventuelle montagebedingte Beschädigungen an optischen Komponenten treffen. Ein High Precision Reflectometer ist ein präzises Interferometer, das über einen Kalibrierarm verfügt, mit dem der Messabstand zum Messobjekt über vorgegebene Fasern eingestellt werden kann. An den Testarm wird die, zu untersuchende Probe fasergebunden angeschlossen. Als Messergebnis gibt das High Precision Reflectometer ein Diagramm aus, das hochaufgelöst die Rückreflektionsverluste als Funktion der Messwegstrecke widerspiegelt. Bei der Messauswertung ist darauf zu achten, dass das Gerät die Ergebnisse entsprechend des eingestellten Brechungsindex entlang der Messstrecke skaliert. Bei freistrahloptischen Systemen mit Luft-Glas Übergängen sind die entsprechenden Laufwege in Glas nachträglich entsprechend zu skalieren.

Durch Zuordnung der einzelnen Reflektionspeaks entsprechend der geometrischen Abstände im System, lassen sich die Reflektionsverluste an den zugehörigen optischen Grenzflächen bestimmen. Abbildung 7.14 zeigt die Ergebnisse einer Messung dieser Art als Mittelung von 30 Einzelmessungen an einem, zu charak-

terisierenden Demonstrator [102]. Im aktiv modularen mikrooptischen System sind die optischen Grenzflächen gegen Rückreflexionen beschichtet und relativ zueinander verkippt. Die zu messenden Reflektionen an den optischen Grenzflächen sind daher gering und nach einer gewissen Laufstrecke im System nicht mehr vom Rauschen des Reflektometers zu unterscheiden. Setzt man diese Verluste in das Verhältnis zur eingekoppelten Leitung lässt sich der Return-Loss Wert an einer beliebigen Grenzfläche ermitteln.

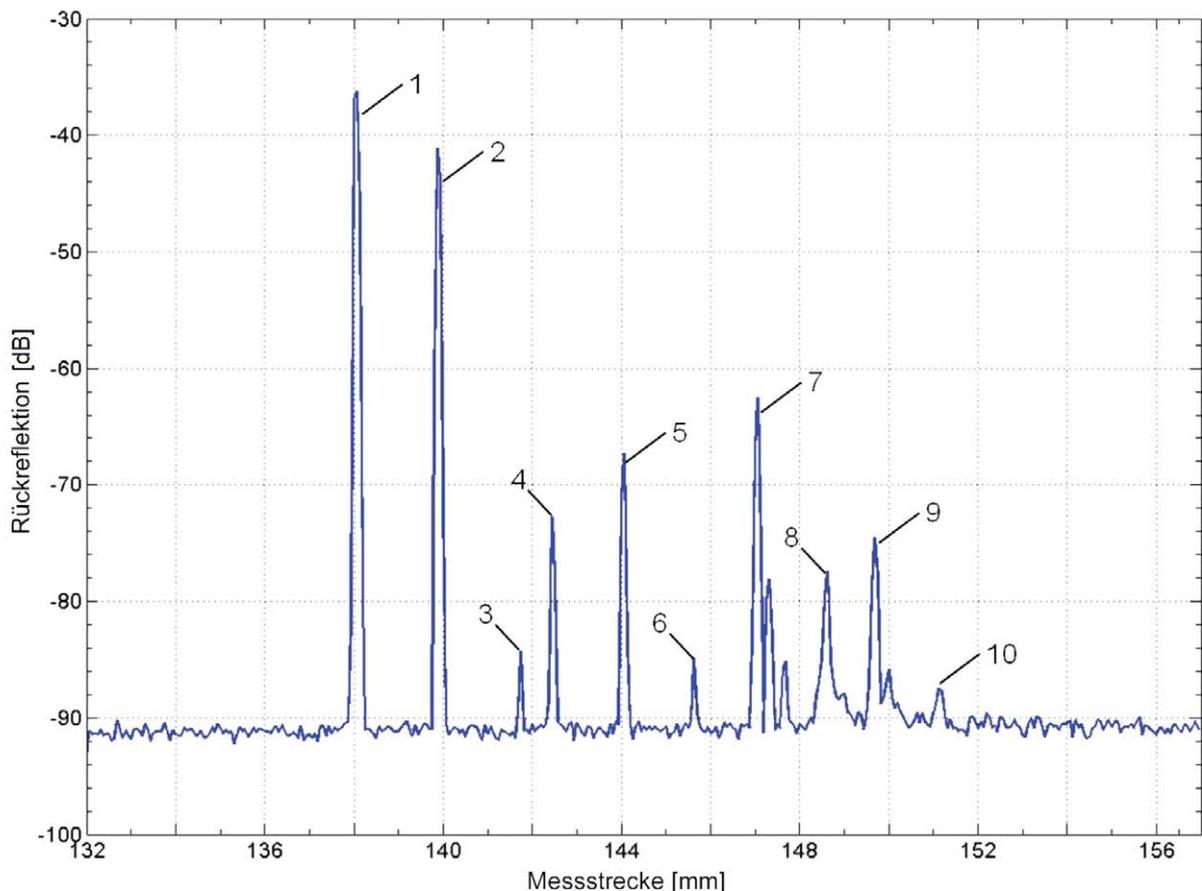


Abbildung 7.14: Ergebnis einer High Precision Reflectometermessung mit einem aktiv modularen mikrooptischen Interferometersystem.

Entsprechend der geometrischen Abmaße des aktiv modularen mikrooptischen Systems lassen sich die in Abbildung 7.14 nummerierten Peaks bestimmten optischen Grenzflächen zuordnen [102]. Als Medium für die Lichtausbreitung wurde am Reflektometer ein Brechungsindex von eins eingestellt. Die ersten beiden Peaks

entstehen an den beiden Grenzflächen der GRIN-Linse, am geklebten Übergang des strahlaufweitenden Glaszylinders zur GRIN-Linse und an der Linsenaustrittsfläche. Sie sind entsprechend dem Brechungsindex der GRIN-Linsen zu skalieren. Die dritte Reflektion ist virtueller Natur und wird ebenfalls durch die GRIN-Linse hervorgerufen. Die Reflektionen vier, fünf und sechs stammen von den optischen Grenzflächen des doppelten Strahlteilerwürfels. Die Reflektionen sieben bis einschließlich zehn werden durch das aktorseitige Umlenkprisma erzeugt. Sie sind von weiteren virtuellen Reflektionen überlagert, die von dem doppelten Strahlteilerwürfel ausgehen.

### 7.3 Aufbau mit Auskopplung auf die Auswertelektronik

Die Charakterisierung eines aktiv modularen mikrooptischen Systems mit Auswertelektronik ist prinzipiell auf dieselbe Art und Weise wie bei Systemen mit optischer Signalausgabe möglich. Messungen bezüglich der Abschätzung der Polarisations-eigenschaften und der Rückreflektionen hängen jedoch nicht direkt von der Art der Detektion im System ab. Auf sie soll an dieser Stelle nicht erneut eingegangen werden. Vielmehr liegt das Hauptaugenmerk auf der Charakterisierung der, mittels der Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine detektierten Systemsignale und deren Auswertbarkeit über die eigens in MATLAB<sup>®</sup> entwickelte Visualisierungs- und Auswertesoftware.

Abbildung 7.15 veranschaulicht schematisch den zur Charakterisierung der aktiv modularen mikrooptischen Systeme mit Auswertelektronik eingesetzten Messaufbau.

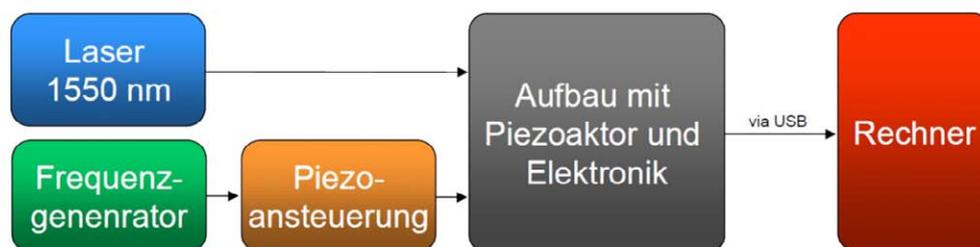


Abbildung 7.15: Messaufbau zur Charakterisierung der aktiv modularen mikrooptischen Systeme mit Auswertelektronik am Beispiel eines Systems mit Piezoaktor.

Über die eingangsseitige Glasfaser wird Licht der Arbeitswellenlänge von 1550 nm einer Laserlichtquelle eingekoppelt. Die Ansteuerung des Piezoaktors geschieht über die zugehörige Piezoansteuerung, die über einen Frequenzgenerator mit verschiedenen Frequenzen getriggert werden kann. Die erfassten Signale des Aufbaus werden über die USB-Schnittstelle an den Rechner übertragen, der seinerseits über die USB-interne Speisespannung von 5 V das gesamte System mit Strom versorgt.

Für die Charakterisierung wird Laserlicht einer Leistung von maximal 0,1 mW in das aktiv modulare mikrooptische System eingekoppelt, um die vorgespannten Photodioden nicht in die Sättigung zu treiben. Die Piezoansteuerung wird über einen Steuereingang von einem Frequenzgenerator aus angesteuert und steuert seinerseits

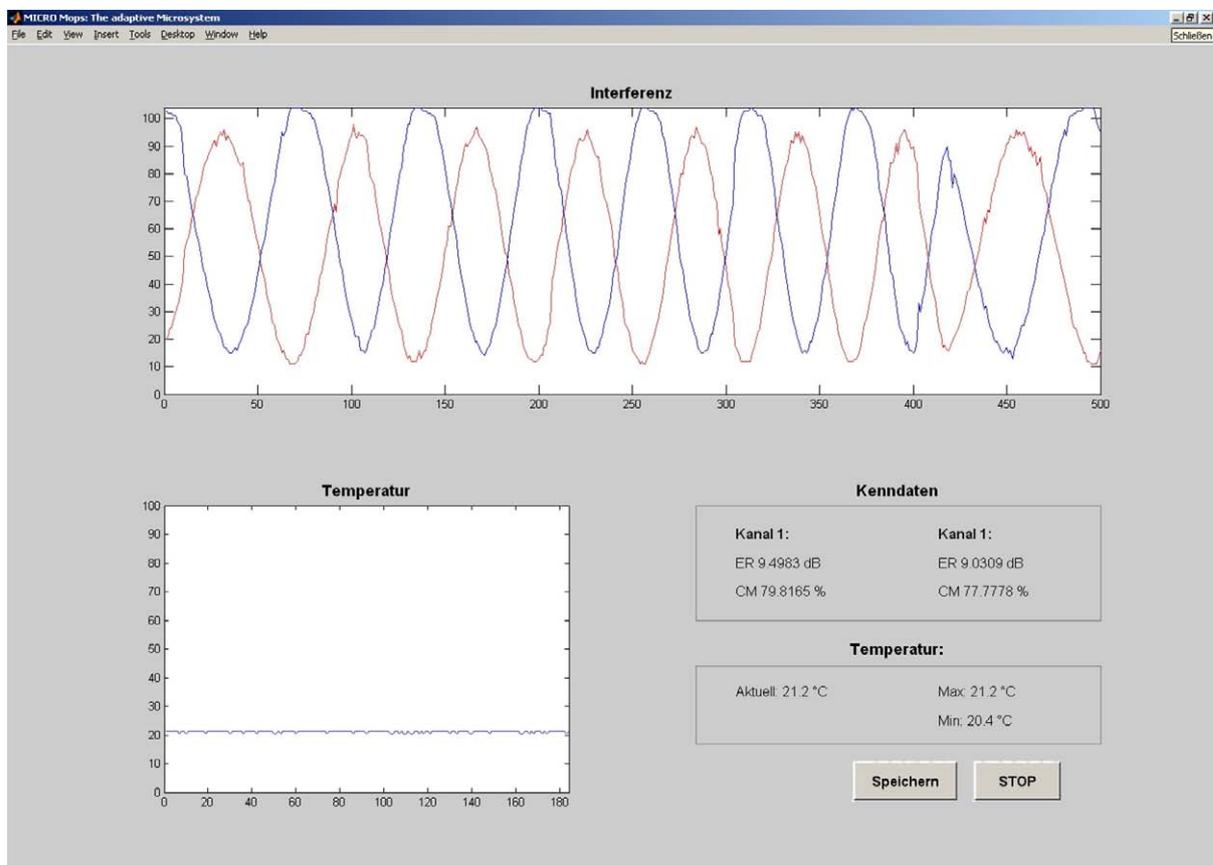


Abbildung 7.16: Graphische Benutzeroberfläche des, für das aktiv modulare mikrooptische System entwickelten Messprogramms.

den Piezoaktor in einem Spannungsbereich von 30,4 – 91,2 V entsprechend der eingestellten Frequenz. Nach dem Aufrufen des Messprogramms am Rechner überträgt der Aufbau kontinuierlich Messdaten. Diese werden in der Auswertesoftware visuell dargestellt (Abbildung 7.16). Als einzige Funktion der Datenaufbereitung verfügt das Programm über eine Offsetreduktion. Die Übertragung der Daten erfolgt mittels eines eigens für das System entwickelten Protokolls in Form geeigneter Datenpakete. Nach einem initialisierenden Startflag sendet die Datenübertragungsplatine einen Temperaturwert, gefolgt von einem Trennzeichen und jeweils wechselweise 100 gepufferten Messwerten für jeden der beiden Kanäle. In der Benutzersoftware werden die Daten gepuffert und jeweils die letzten 500 Messwerte je Kanal angezeigt. Legt der Benutzer eine Datei zum Speichern der Ergebnisse fest, speichert die Software sequentiell die gepufferten Messdaten in eine Datei im Excel-Format ab. Andernfalls werden die Daten nach dem FIFO-Prinzip nach Erreichen der vorgegebenen Speicherbereichsgröße verworfen. Die Software errechnet aus den Daten im Speicher das Auslöschungsverhältnis sowie den Michelson Kontrast für beide Kanäle und gibt neben der aktuellen Temperatur sowie dem Temperaturverlauf

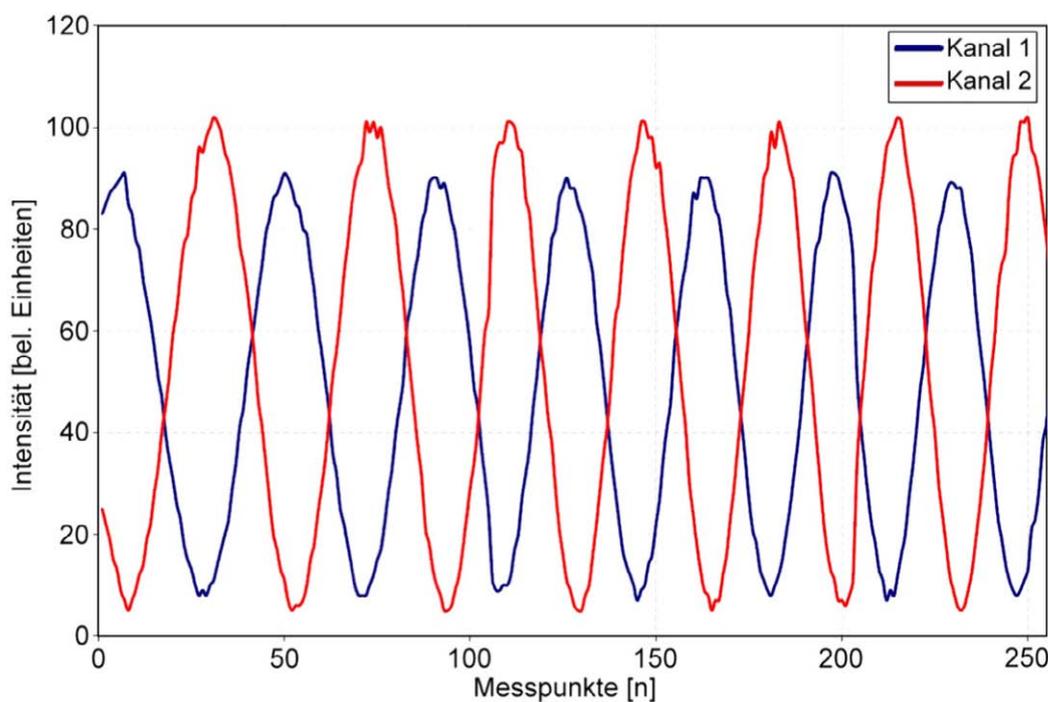


Abbildung 7.17: Aus dem Messprogramm exportierte Messkurve mit einer aktorseitigen Anregung des Systems von 15,7 Hz.

ebenfalls die erreichten Minimal- und Maximalwerte der Temperatur während des gesamten Messvorgangs aus. In Abbildung 7.17 ist eine, mit dem Messprogramm exportierte Messkurve dargestellt. Der Piezoaktor wurde mit einer Frequenz von 1 Hz angeregt. In Folge dessen längt sich der Piezoaktor im angegebenen Spannungsbereich um ca.  $6,08 \mu\text{m}$  aus und kontrahiert anschließend wieder auf seine Ausgangslänge. Der insgesamt verfahrenene Weg liegt somit bei  $12,16 \mu\text{m}$ , was bei Kenntnis der eingekoppelten Lichtwellenlänge und der Systemgeometrie einer ungefähr 15,7-fachen optischen Frequenz der Interferenzerscheinungen entspricht. Das detektierte Interferenzsignal in Abbildung 7.17 hat bei einem Hertz somit eine tatsächliche Frequenz von ca. 15,7 Hz. Die von der Software leicht offsetkorrigierten Signale besitzen in der Messung ein Auslöschungsverhältnis von 11,7 dB für Kanal 1 und 13,9 dB für Kanal 2. Dies entspricht umgerechnet einem Michelson Kontrast von 87 % und 92 %.

Die Phasenbeziehung beider Ausgänge zueinander kann zum Beispiel über die Lissajous-Figur beider Ausgangssignale bestimmt werden. Für die Darstellung einer Lissajous-Figur werden die Messwerte eines Kanals über den Anderen, wie in Abbildung 7.18 dargestellt, aufgetragen. Durch Auslesen der jeweiligen Schnittpunkte der Lissajous-Figur mit der X- und Y-Achse  $X(0)$  und  $Y(0)$  sowie der beiden Amplitudenwerte  $X$  und  $Y$  lässt sich die Phasenverschiebung nach [10] und [103] über die Beziehung

$$\sin \varphi = \frac{X(0)}{X} = \frac{Y(0)}{Y}$$

bestimmen. Unter Berücksichtigung der Streuung der Messpunkte der in Abbildung 7.18 dargestellten Lissajous-Figur ergibt sich eine, für den hier vermessenen Demonstrator, mittlere Phasenverschiebung beider Kanäle zueinander von ca.  $24^\circ$ , welche zu großen Teilen auf eine Dejustage der Photodioden hinsichtlich der nullten Ordnung zurückzuführen ist. Einen weiteren Einfluss auf die Phasenverschiebung hat das technisch bedingte Ausleseverhalten der Datenübertragungselektronik, die jeden Kanal alle fünf Millisekunden mit einem zeitlichen Versatz von 2,5 Millisekunden ausliest.

Abschließend wurde für den modularen Aufbau mit Auswerteelektronik das dynamische Verhalten in Form der maximalen Ausleserate ermittelt. Als Zielsetzung

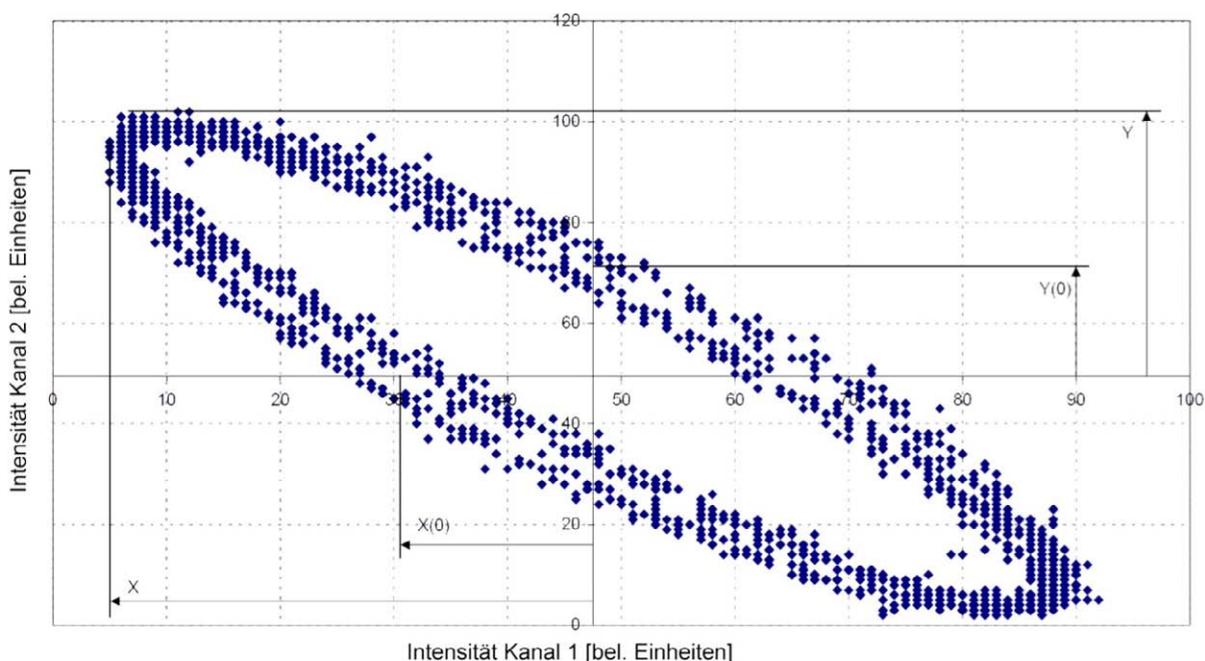


Abbildung 7.18: Lissajous-Figur zur Bestimmung der Phasenverschiebung beider Ausgänge des aktiv modularen mikrooptischen Systems mit Auswerteelektronik.

sollte eine Datenübertragung von 200 Hz pro Kanal ermöglicht werden. Unter der Randbedingung, dass wie oben beschrieben, eine Anregung des Piezoaktors mit einem Herz unter den gegebenen Einstellungen einer Frequenz der optischen Interferenzsignale von 15,7 Hz entspricht, sollte der Aufbau mit den obigen Einstellungen folglich eine Anregefrequenz von mindestens 12,7 Hz erfassen können. Zur Ermittlung der maximalen Datenübertragungsrate, wird die Frequenz so lange erhöht, bis die Stützstellen aus den übertragenen Daten nicht mehr ausreichen, um das eingespeiste Sinussignal verlustfrei zu detektieren und es zu Einbrüchen in der Signalamplitude kommt. Das Ergebnis einer Messung bei geforderten 200 Hz ist in Abbildung 7.19 dargestellt. Wie zu erkennen ist, treten beim Einlesen der gemessenen Interferenzsignale (gestrichelt) bereits Einbrüche der Signalamplituden auf. Ein Maß für die maximale Abtastfrequenz ist das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem [104] [105], welches besagt, dass die Abtastfrequenz  $f_a$  mindestens doppelt so hoch sein muss, als die zu messende Frequenz  $f_m$ :

$$f_a > 2 \cdot f_m \quad \rightarrow \quad T_a > \frac{1}{2 \cdot f_m}$$

Angewendet auf die Messergebnisse aus Abbildung 7.19 ergibt sich ein Verhältnis von:

$$\frac{f_a}{f_m} = 2.9 > 2$$

Damit ist das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem erfüllt und eine Erfassung der Interferometersignale mit einer Frequenz von 200 Hz möglich. Aus den erhaltenen Messdaten kann somit das erfasste Signal rekonstruiert werden. In Abbildung 7.19 sind die, unter Annahme einer konstanten Frequenz rekonstruierten Messsignale als durchgezogene Kurven dargestellt.

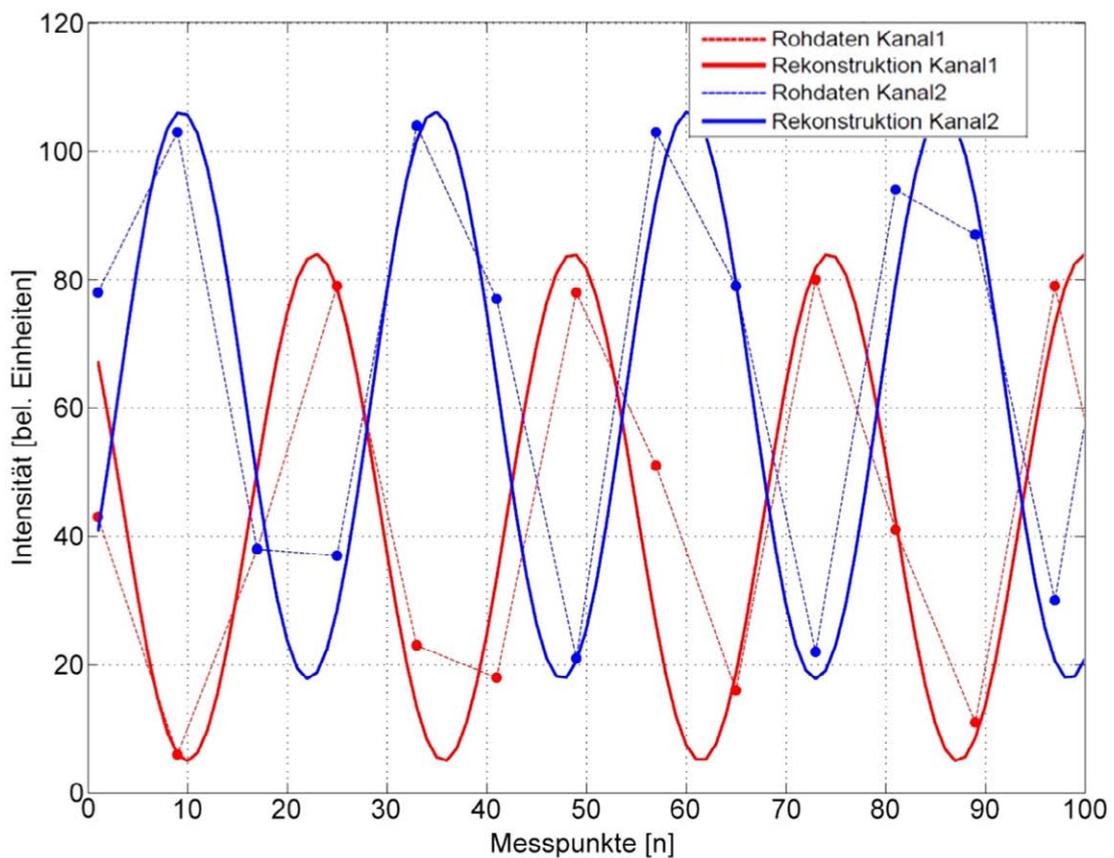


Abbildung 7.19: Messung der Grenzfrequenz nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem mit einer Frequenz von 200 Hz.

## 7.4 Exemplarische Anwendungsmöglichkeiten

Mikrointerferometer der beschriebenen Art können aufgrund ihrer modularen Aufbaustruktur für verschiedenste Anwendungen modular angepasst und optimiert werden. Aufgrund der geringen Abmaße sind modulare mikrointerferometrische Systeme dieser Bauweise in vielen gängigen Normgehäusen einsetzbar. Entsprechend der Grundidee modularer Systeme wurde das, in dieser Arbeit realisierte System an keine bestimmte Anwendung gebunden. Vielmehr soll dieses Kapitel einige mögliche Applikationen aufzeigen, wobei die Anwendungsfelder des Systems nicht auf diese Liste, die bei weitem keinen Anspruch auf Vollständigkeit stellt, beschränkt bleiben.

Eine der denkbar einfachsten Anwendungen dieses Systems wäre die optische Längen- oder Abstandsmessung basierend auf der Genauigkeit interferometrischer Systeme. Sie findet unter anderem Anwendung in der hochgenauen Achspositionierung rechnergesteuerter Systeme, wie CNC-Maschinen für die Herstellung mechanisch präziser Bauteile oder in der Positionsüberwachung von Präzisionsmaschinen, wie zum Beispiel im Falle von Elektronenstrahlschreibern. Anwendungen dieser Art sind nicht unmittelbar auf einen Aktor angewiesen und stellen somit die denkbar einfachsten Applikationen die das modulare mikrooptische System bedienen kann dar. Hier genügt alleine der Einsatz einer bestückten mikrooptischen Bank des modularen Systems. Das Umlenkprisma, welches den kollimierten Lichtstrahl der mikrooptischen Bank umlenkt und wieder auf diese zurück wirft, kann hier direkt in einer Halterung auf der beweglichen Achse fixiert werden. Optional ist, je nach Anwendung, eine Kombination der mikrooptischen Bank für Abstandsmessungen mit der zugehörigen Datenerfassungs- und Datenaufbereitungselektronik möglich. Eine weitere Anwendung dieser Art wäre beispielsweise die Positionsbestimmung der Objektebene in optischen Mikroskopen. Prinzipbedingt ist die Positionsmessung mittels interferometrischer Systeme inkrementell und erfordert eine Referenzierung. Unter Detektion beider Eingänge des Mach-Zehnder Interferometers ist es jedoch durch Differenzieren möglich, die aktuelle Bewegungsrichtung zu ermitteln. Die Genauigkeit eines Systems zur optischen Abstandsmessung konnte auf ca. 1 nm ermittelt werden.

In der Bestimmung von Brechzahlen optisch transparenter Materialien wie z.B. Gläsern, Flüssigkeiten oder Gasen findet das aktiv modulare mikrooptische System eine weitere, wenn auch klassische, optische Anwendung in Form eines mobilen und überall einsetzbaren Messgerätes. Hierzu wird ein Festkörper oder eine mit Fluid

gefüllte Küvette in den Meßarm des Interferometers eingebracht. Die Dicke der Probe ist vor dem Messvorgang genau zu bestimmen. Durch Drehen der Probe um einen bekannten Winkel ändert sich die Länge des optischen Pfads im Messmedium, was zu einem hell-dunkel Wechsel der Interferenzmuster führt. Unter Kenntnis des Kippwinkels und durch Zählen der durchlaufenden Interferenzordnungen lässt sich der Brechungsindex der eingebrachten Probe bestimmen. Bei Gasen kann die Bestimmung der Brechzahl alternativ durch langsames Befüllen einer Kapillare erfolgen, wobei z.B. das Medium Luft durch ein Analyt (z.B. Ammoniak) ersetzt und während dessen die Anzahl der durchlaufenen Ordnungen ermittelt wird [107].

Eine weitere, in der optischen Messtechnik interessante Anwendung ist der Einsatz des aktiv modularen mikrooptischen Systems als Spektrometer für die Bestimmung von Lichtwellenlängen nach dem Prinzip der Fourier-Transformations Spektroskopie. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Anwendung näher betrachtet und das Mikrointerferometer als Spektrometer für den Infrarotbereich (FTIR-Spektrometer) charakterisiert. In einer Anwendung als FTIR-Spektrometer ist für das Mikrointerferometer eine Kalibrierkurve zu erstellen, die einen Zusammenhang zwischen den

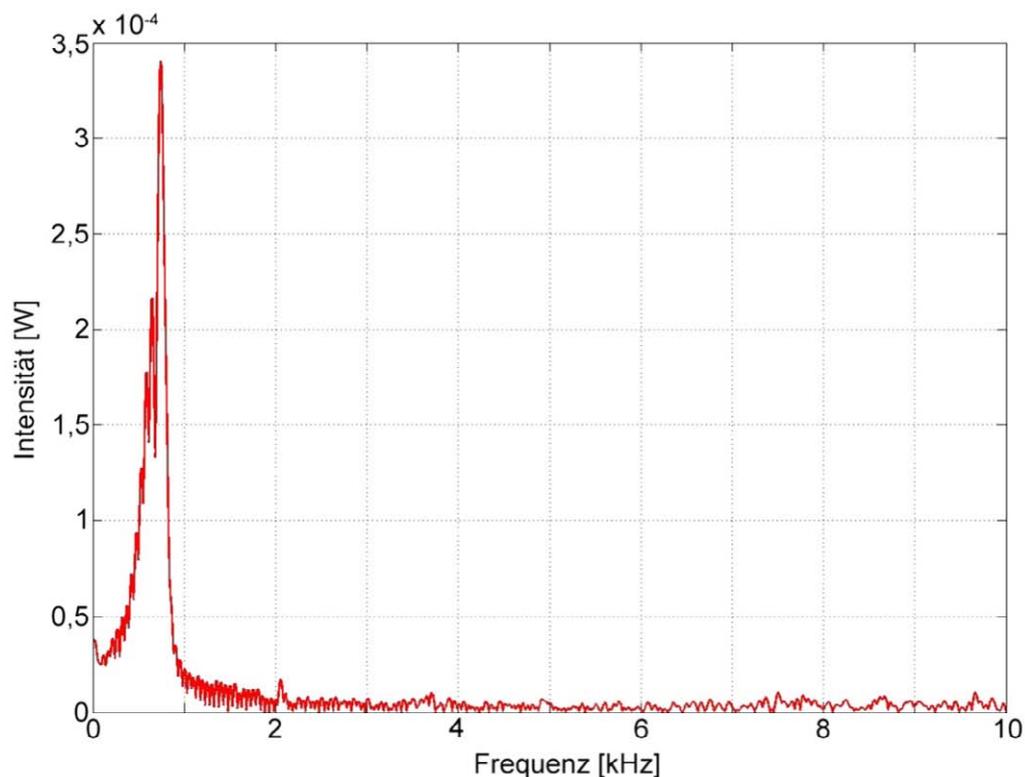


Abbildung 7.20: Fouriertransformation eines Interferenzsignales bei konstant verfahrenem Piezoaktor.

gemessenen Größen und der, in das System eingespeisten, Wellenlänge schafft. Im Falle eines FTIR-Spektrometers wird eine unbekannte Wellenlänge in das Mikrointerferometer eingekoppelt und der Mikroaktor des Systems über einen vorgegebenen Stellweg mit definierter Geschwindigkeit verfahren. Anschließend wird das detektierte sinusförmige Interferenzsignal mittels Fourier-Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt. Im Frequenzbereich entspricht das sinusförmige Signal einem der Frequenz zugrunde liegenden Impuls, der charakteristisch für die Frequenz der wechselnden Interferenzsignale von konstruktiv zu destruktiv und damit unter Einhaltung der obigen Randbedingungen charakteristisch für die eingespeiste Wellenlänge ist. Die Ausgangslage bildet zum Beispiel eine Messung, wie sie in Abbildung 7.10 dargestellt ist. Der im System verbaute Piezoaktor wurde dabei über seinen gesamten Stellweg verfahren. Nach Fouriertransformation der, auf das reine Interferenzsignal zugeschnittenen Signale sieht das transformierte Signal für einen Kanal des Interferometers wie in Abbildung 7.20

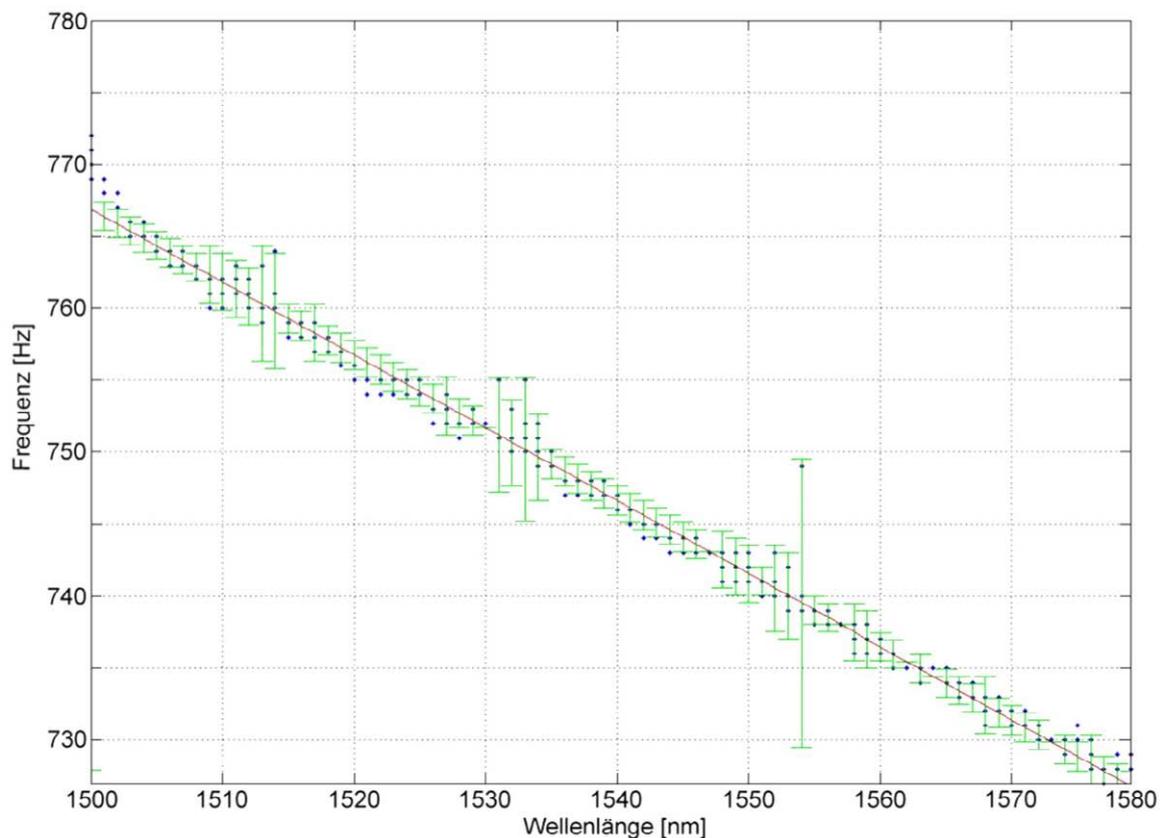


Abbildung 7.21: Kalibrierkurve für die Rückrechnung von einer ermittelten Fourierfrequenz auf die eingespeiste Wellenlänge eines FTIR-Spektrometers.

dargestellt aus. Auf der Abszisse des Diagramms ist die, einer bestimmten Wellenlänge zugehörige charakteristische, Frequenz an der Stelle des Maximalwertes der auf der Ordinate aufgetragenen Amplitude der Schwingung abzulesen. Unter Kenntnis der zugehörigen eingespeisten Wellenlänge lässt sich durch Aufnehmen mehrerer dieser Messungen eine Kalibrierkurve für die Rückrechnung von der charakteristischen Frequenz auf die eingespeiste Wellenlänge ermitteln. In Abbildung 7.21 ist eine Kalibrierkurve dieser Art für das Mikrointerferometer des aktiv modularen mikrooptischen Systems dargestellt. Die Messwerte für die Erstellung der Kalibrierkurve wurden aufgrund von Laserschwankungen auf volle Frequenzwerte gerundet. Die Kalibrierkurve basiert auf insgesamt 800 Einzelmessungen in einem Wellenlängenbereich zwischen 1500 nm - 1580 nm. Jede Messung ist in Form eines Messpunktes im Diagramm erfasst. Gelegentlich sind Ausreißer zu erkennen. Für präzise Wellenlängenmessungen ist in Folge dessen zu empfehlen, die Messung einer Wellenlänge mehrfach zu wiederholen, Ausreißer zu detektieren sowie mehrere Messvorgänge zu mitteln. Auf diese Weise sind bei einer stabilen Lichtquelle Messwerte mit einer Genauigkeit von ca. 1 nm möglich.

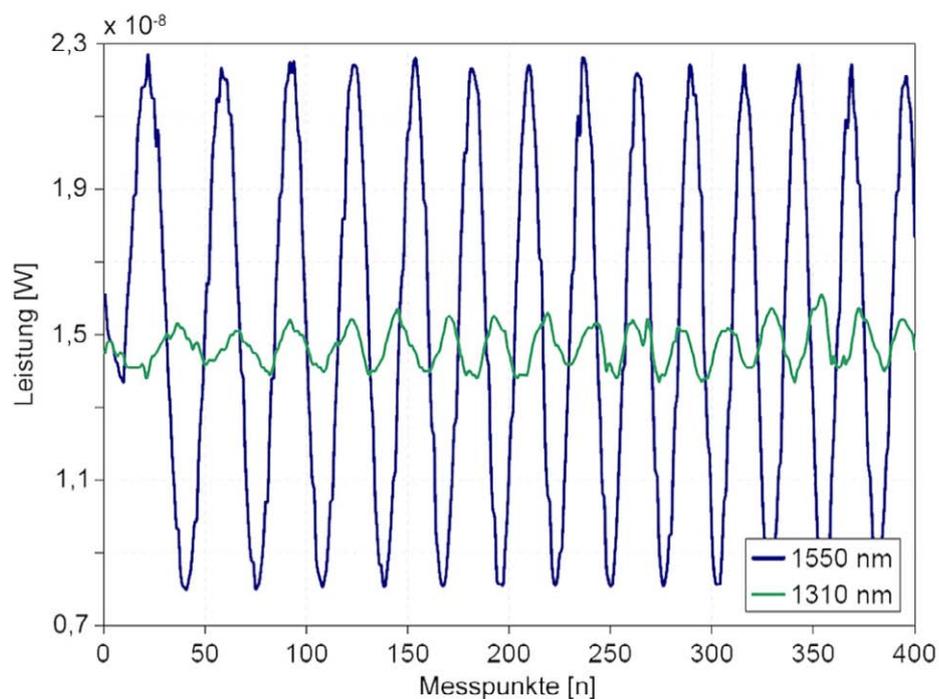


Abbildung 7.22: Messsignale für eine FTIR-Spektrometeranwendung mit Referenzsignal und selektiver Signalerfassung über optische Filter.

Für die Erhöhung der Messzuverlässigkeit kann ein FTIR Spektrometer zusätzlich mit einer Referenzlichtquelle betrieben werden. Der Erfassung der Messsignale kann in diesem Falle auf zwei unterschiedliche Art und Weisen erfolgen. Eine Möglichkeit der Signalerfassung ist, diese selektiv über zwei optische Filter zu erfassen. Der Filter am ersten Ausgang ist nur für das zu vermessende Signal durchlässig. Der Filter vor dem zweiten Ausgang nur für die Referenzwellenlänge. Das Messergebnis einer derartigen Messung ist in Abbildung 7.22 dargestellt. Jede der beiden Messkurven ergibt nach der Fourier-Transformation in den Frequenzbereich einen charakteristischen Peak. Die Lage des Peaks der Referenzwellenlänge (wie in Abbildung 7.22 die 1310 nm Kurve) ist dabei ein Maß für die Güte des Messergebnisses. Der Abstand des Messsignals bezogen auf das Referenzsignal gibt dabei einen zusätzlichen Bezug auf die unbekannte Wellenlänge. In Abbildung 7.22 sind die Leistung und das Auslöschungsverhältnis des Referenzsignals aufgrund der optischen Beschichtungen für einen Wellenlängenbereich von 1520 nm - 1580 nm deutlich abgeschwächt.

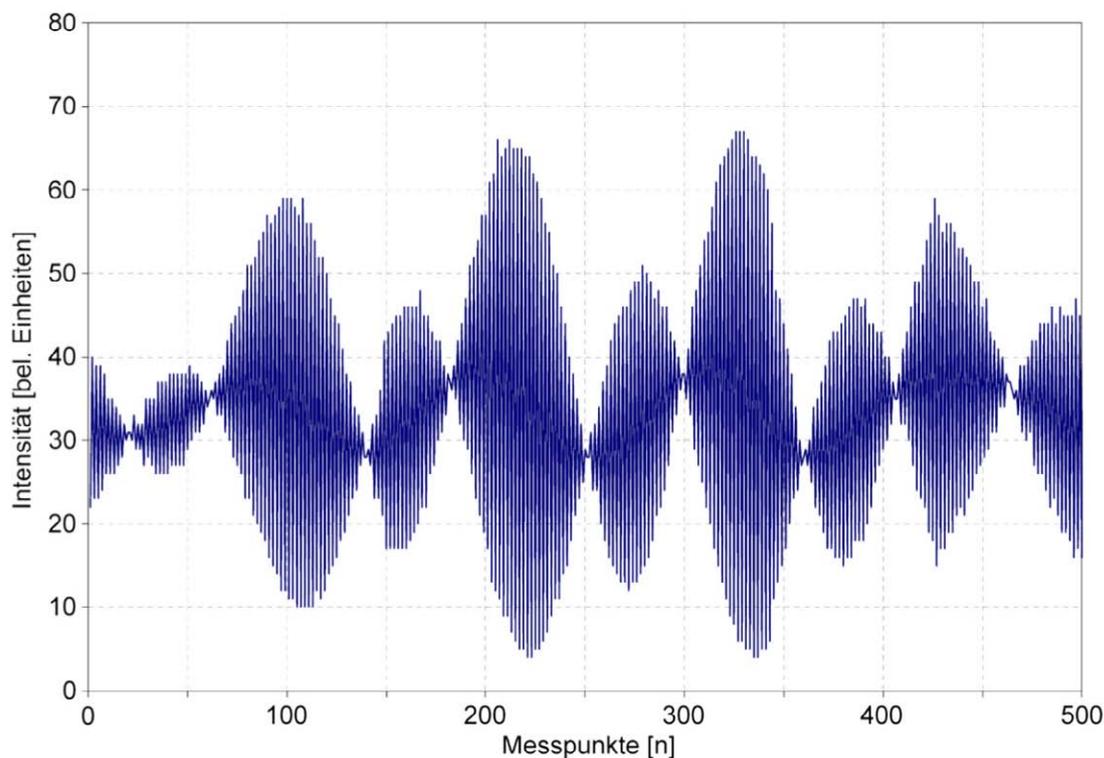


Abbildung 7.23: Messsignale für eine FTIR-Spektrometeranwendung mit Referenzsignal ohne selektive Signalerfassung über Schwebungen.

Alternativ kann die Detektion der zu messenden Wellenlänge und der Referenzwellenlänge ohne zusätzliche optische Filter zur Trennung beider Wellenlängen, über die Messung von Signalschwebungen erfolgen. Eine Messung dieser Art ist in Abbildung 7.23 unter Überlagerung zweier Laserlichtquellen in einem Interferometer dargestellt. Die eingespeisten Signale haben eine Wellenlänge  $f_1$  von 1310 nm und  $f_2$  von 1550 nm. In der Abbildung sind deutlich Schwebungssignale zu erkennen, die dem interferierenden Messsignal mit geringerer Frequenz überlagert sind. Schwebungssignale entstehen, wenn periodische Signale ähnlicher Frequenz nach dem Superpositionsprinzip zur Überlagerung gebracht werden. Das resultierende Interferenzsignal  $f_R$  setzt sich dabei nach folgender Gleichung zusammen [10]:

$$f_R = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Die überlagerte Schwebungsfrequenz  $f_S$  ergibt sich aus der Differenz beider eingekoppelter Signale [10].

$$f_S = f_1 - f_2$$

Aus den sich daraus ergebenden Zusammenhängen ist es möglich, die unbekannt, in das mikrointerferometrische System eingespeiste, Wellenlänge zu ermitteln.

Unter Beachtung der, in Abbildung 7.12 ermittelten Polarisationsergebnisse wäre es möglich, in einer Applikation als Spektrometer neben der Wellenlänge die Polarisation des eingespeisten Signals zu detektieren. Hierfür müsste ein unbeabsichtigtes Drehen der Polarisation beim Einspeisen des Messsignals in das Interferometer vermieden werden. Anhand des polarisationsabhängigen Auslöschungsverhältnisses wäre es möglich, neben der Wellenlänge zusätzlich Rückschlüsse auf die Polarisation zu ziehen.

Ein weiteres, potentiell Anwendungsbereich für das aktiv modulare mikrooptische System findet sich in der Nachrichtentechnik. Hier werden über optische Glasfasernetze modulierte Signale hoher Bandbreite in Bereich von derzeit 10 GHz - 40 GHz übertragen. Zukünftige Datenraten von 100 GHz und mehr sind bereits für die kommenden Jahre angedacht. Für die Datenübertragung werden neben dem einfachen On-Off Keying, bei dem das Trägersignal zur Übertragung binärer Zustände einfach ein und ausgeschaltet wird, weitaus komplexere Modulationsverfahren eingesetzt.

Eines dieser Modulationsverfahren für nachrichtentechnische Hochgeschwindigkeitsnetze ist das Differential-Quadrature-Phase-Shift-Keying (DQPSK). Wie der Name verrät, handelt es sich um ein Phasenmodulationsverfahren mit vier vordefinierten Phasenlagen. Prinzipiell ist die Funktionsweise des DQPSK an das QPSK angelehnt. Der Unterschied beider Verfahren liegt in der Art der Signalreferenzierung. Beim QPSK ist diese mit vorzugeben, wohingegen beim DQPSK die Referenzierung einzig durch die Phasenlage des vorhergehenden Signals erfolgt [106]. Entsprechend der vier Phasenlagen können bei DQPSK mittels einer einzigen Änderung der Phasenlage zwei Bit gleichzeitig übertragen werden.

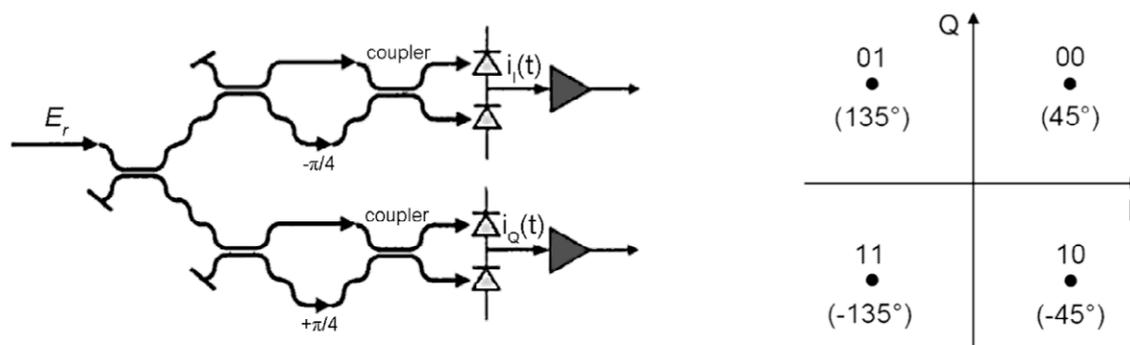


Abbildung 7.24: Links DQPSK-Demodulator bestehend aus zwei Mach-Zehnder Delay Interferometern [108], rechts Konstellationsdiagramm für  $\pi/4$  DQPSK.

In Abbildung 7.24 rechts sind die vier Phasenzustände am Beispiel des  $\pi/4$  DQPSK dargestellt. Entsprechend des, zu übertragenden Dibits (Kombination zweier aufeinander folgender Bits) wird die Phase bei dem Übergang auf den folgenden Signalzustand entsprechend Abbildung 7.24 rechts gedreht. Für die Demodulation eines DQPSK modulierten Signals kommen asymmetrische Mach-Zehnder Interferometer zum Einsatz, deren einer Interferometearm bezogen auf den Anderen ein optisches Delay der Länge eines Signals darstellt [108]. Abbildung 7.24 links zeigt einen derartigen DQPSK-Demodulator. Der Aufbau besteht aus zwei dieser asymmetrischen Mach-Zehnder Delay Interferometer, die relativ zueinander um  $\pi/2$  Phasenverschoben sind [108] und somit eine Detektion der In-Phase und Quadrature-Phase (I und Q) Anteile ermöglichen. Das eingekoppelte Signal wird über einen 3-dB Koppler auf beide Mach-Zehnder Interferometer aufgeteilt und an den Interferometer-

ausgängen über eine Photodiode detektiert. Die jeweiligen Photodioden beider Ausgänge eines Interferometers werden zur Signalerfassung an einen Differenzverstärker angeschlossen. Das aktive modulare mikrooptische System der vorliegenden Arbeit stellt ein solches asymmetrisches Interferometer dar. Durch Kombination zwei dieser Interferometer bestünde die Möglichkeit, einen DQPSK-Demodulator zu realisieren. Das Delay des über den Mikroaktor laufenden Arms beträgt im Falle des Piezoaktors 7,5 mm, was einem optischen Delay passend für eine Datenrate von 40 Gbit entspricht. Ein System in Kombination mit dem Inchworm-aktor könnte hier beispielsweise für DQPSK-Demodulatoren eingesetzt werden, die aufgrund des einstellbaren optischen Delays bei verschiedenen Datenraten einsetzbar sind. Mit zwei aktiven modularen mikrooptischen Delay Interferometern dieser Bauform ließe sich z.B. ein optischer DQPSK Signalanalysator wie in [109] beschrieben miniaturisieren. Einzig wäre für eine Anwendung dieser Art die Güte des optischen Systems durch den Einsatz optimierter optischer Komponenten zu verbessern. Im nicht kommerziellen Rahmen dieser Arbeit war es aufgrund der begrenzten Stückzahlen nicht möglich, speziell für das entwickelte Design optimierte optische Komponenten höherer Qualität zu beziehen. Entsprechen diese den optischen Anforderungen der Nachrichtentechnik, ist ein kommerzieller Einsatz des aktiv modular mikrooptischen Interferometers als DQPSK-Demodulator durchaus denkbar.



## 8 Zusammenfassung / Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Konzept eines modularen mikrooptischen Systems um ein Mikroaktormodul erweitert und bezüglich seiner optischen Schnittstellen vollständig modularisiert. Alle Schnittstellen wurden im Hinblick auf die Auswechselbarkeit einzelner Module optimiert. Auf diese Weise entstand ein modulares Mikrosystem, das nicht an eine feste Anwendung gebunden ist, sondern leicht an verschiedenste Einsatzzwecke individuell angepasst werden kann. Die Vielfalt der möglichen Anwendungsfelder reicht dabei von einfachen Messsystemen, wie z. B. einem optischen Wellenlängenmessgerät, bis hin zu hochkomplexen Systemen wie beispielsweise Demodulatoren für DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) Anwendungen in der Nachrichtentechnik.

Das entwickelte modulare mikrooptische System besteht aus insgesamt drei Submodulen:

Eine mikrooptische Bank, welche in LIGA-Technik gefertigt und mit optischen Komponenten aus Glas vollautomatisch bestückt werden kann, bildet den Kern des Systems. In der Arbeit wurde die mikrooptische Bank für ein Mach-Zehnder Delay Mikrointerferometer entwickelt und vollständig bestückt.

Die zweite Modulkomponente bildet ein Mikroaktor, der bisherige modulare Konzepte um eine aktive Komponente erweitert. Für eine möglichst hohe Flexibilität ist das System so ausgelegt, dass neben verschiedenen kommerziell verfügbaren Mikroaktoren auch neuartige Aktoren aus dem Bereich der Forschung eingesetzt werden können.

Die dritte Modulkomponente bildet die Signalausgabeeinheit. Sie kann wahlweise optisch über gepigtailte Glasfasern oder direkt über eine Detektion mittels Photodioden erfolgen.

Für das gesamte System wurde in dieser Arbeit ein detailliertes Konzept mit ausführlicher Spezifikation der Einzelmodule erarbeitet, das in einem Design für die mikrooptische Bank mündete. Für die Beschaffung und Herstellung der einzelnen, im System verbauten Module und Elemente, wurden die erforderlichen Spezifikationen erarbeitet und in Lastenheften festgehalten. Die Auslegung- und Dimensionierung des optischen Systems erfolgte anhand von Raytracing Simulationen. Im Hinblick auf die

Modularisierung konnten durch diese Simulationen deutliche Verbesserung erzielt werden. Seitens der optischen Schnittstellen erfolgte ein Umstieg von klassischen Kugellinsen auf, mit Glasfasern gepigtailte Gradientenindexlinsen. Neben der nachhaltig vereinfachten Montage der Pigtails in der mikrooptischen Bank werden über diese deutlich ebenere Wellenfronten in das Mikrointerferometer eingekoppelt, als dies bei sphärisch gekrümmten Linsen der Fall ist. Als Resultat dieser Optimierung ist die nullte Ordnung der Interferenzmuster deutlich stärker ausgeprägt und von einer geringeren Anzahl der unerwünschten höheren Ordnungen umgeben. Dies hat eine signifikant verbesserte Qualität des Interferometers zur Folge. Darüber hinaus wurde eine Verkippung aller optischen Komponenten zueinander um jeweils acht Grad eingeführt. Somit werden Mehrfachreflektionen zwischen parallel stehenden optischen Flächen vermieden und das daraus resultierend Risiko überlagerter Interferenzen mit Schwebungssignalen drastisch reduziert. Eine weitere Verbesserung der Systemeigenschaften konnte durch das Beschichten der im System eingesetzten optischen Glaskomponenten erreicht werden. Für die vorliegenden systemspezifischen Anforderungen der gedrehten optischen Komponenten wurde ein optimiertes Schichtsystem dimensioniert. Dabei gelang es durch die Berechnungen, optische Beschichtungen zu dimensionieren, die mit möglichst geringem Herstellungsaufwand sehr gute optische Eigenschaften im Bereich der Arbeitswellenlänge von 1550 nm aufweisen. Neben gering gehaltenen optischen Verlusten, konnte gleichzeitig ein insgesamt möglichst polarisationsneutrales Beschichtungssystem ermittelt werden. Um Reflektionen an den optischen Grenzflächen zu vermeiden, wurde eine einfache dielektrische Antirefleksionsbeschichtung aus  $\text{MgF}_2$  und  $\text{ZnS}$  dimensioniert. Der errechnete Reflektionsanteil liegt für kleine Winkel unter einem Prozent. Für die Aufteilung des eingeleiteten Lichts nach dem Prinzip der Amplitudenaufspaltung, wurde eine entsprechende Beschichtung des Strahlteilers dimensioniert. Sie ist ebenfalls dielektrisch und besteht aus insgesamt vier abwechselnd aufeinanderfolgenden Schichten. Als Materialien wurden hier wie im Falle der Antirefleksionsbeschichtung  $\text{MgF}_2$  und  $\text{ZnS}$  verwendet. Der hauptsächliche Unterschied beider Beschichtungen besteht in dem durch die Schicht erzeugten optischen Gangunterschied. Die Antirefleksionsbeschichtung ist als quarter-wave Schicht dimensioniert und sorgt somit für eine Auslöschung der überlagerten Reflektionsanteile, wohingegen die Strahlteilerbeschichtung als half-wave Schicht ausgelegt ist und zu einer konstruktiven Signalüberlagerung führt. Für die Strahlumlenkung im Falle des Einkoppelprismas und des mikroaktorseitig montierten Umlenkprismas, wurde eine

Spiegelbeschichtung aus Silber mit einer Oxidationsschutzschicht aus  $\text{MgF}_2$  gewählt. Für das gesamte System konnte unter Verwendung der errechneten Beschichtungen ein theoretisches Auslöschungsverhältnis des G-Ausgangs von größer 13,9 dB und des W-Ausgangs von größer 22,6 dB bestimmt werden. Der ermittelte Signaloffset im Falle destruktiver Interferenz beträgt somit je nach Ausgang gerade einmal vier beziehungsweise ein halbes Prozent der detektierten Leistung im Falle einer konstruktiven Interferenz. Dies reicht bei Weitem aus, um die Spezifikationen des Gesamtsystems zu erfüllen. Für die Realisierung erster Demonstratoren musste allerdings aus Kostengründen und wegen Beschaffbarkeitsproblemen bei kleinen Stückzahlen auf verfügbare, nicht speziell angepasste Standardbeschichtungen zurückgegriffen werden, wodurch sich für die zu erwartenden Systemeigenschaften Einschränkungen ergaben.

Für eine elektronische Signalauswertung im Rahmen des modularen mikrointerferometrischen Systems, wie sie in vielen Sensorapplikationen Einsatz findet, wurde eine an das mikrooptische System angepasste Datenerfassungs- und Datenaufbereitungselektronik entwickelt. Aufgrund der geringen Abmaße des aktiv modularen mikrooptischen Systems und im Sinne einer Modularisierung, wurde die elektronische Signalauswertung in eine Datenerfassungs- und Datenaufbereitungs- sowie eine Datenübertragungselektronik aufgeteilt. Die Elektronik wurde in Simulationen validiert und ist für Signalfrequenzen bis 50 kHz einsetzbar. Ausgangsseitig werden die gewandelten Photodiodenströme in Form analoger Spannungen im Bereich von null bis zwei Volt ausgegeben. Eine kommerziell verfügbare Datenübertragungsplatine mit Analog-Digital-Wandler überträgt die gemessenen Spannungen mit einer Genauigkeit von 8 Bit über eine standard USB-Verbindung an einen Rechner. Bei direktem Auslesen der Photodiodenströme sind abhängig von den eingesetzten Photodioden Systemfrequenzen von 10 – 40 GHz detektierbar. Damit steht erstmalig ein modular aufgebautes optisches System zur Verfügung, das auf einfache Art und Weise an einen Rechner angekoppelt werden kann.

Basierend auf den Simulationsergebnissen, den Dimensionen der Mikroaktoren und dem erarbeiteten modularen Schnittstellenkonzept wurde ein CAD-Gesamtmodell erstellt, das als Grundlage für die Komponentenherstellung diente. Unter Beachtung dieses Modells erfolgte die Beurteilung der Einzelkomponenten. So ergab sich, dass Faserpigtaile mit Gradientenindexlinsen nur eingesetzt werden können, wenn beim Aufbau der Pigtailkomponenten durch den Lieferanten eine aktive Justierung

zueinander erfolgt, um ein schielendes Abstrahlverhalten zu vermeiden. Hinsichtlich der Prismen und Strahlteilerwürfel stellen Polarisationsabhängigkeiten der eingesetzten Komponenten bei polarisationssensitiven Anwendungen ein Problem dar. Die Maßhaltigkeit und optische Oberflächengüte erwies sich bei allen Komponenten als ausreichend.

Das modulare Konzept zeichnet sich durch eine flexible Verwendung unterschiedlicher mikrooptischer, aktorischer und elektronischer Module aus. Dies muss außer im Aufbaukonzept auch bei der Montage berücksichtigt werden. Die Montage der Einzelmodule greift dabei auf bekannte Prozesse zurück. So erfolgt der Aufbau der mikrooptischen Bank unter passiver Justierung der Komponenten mit einer etablierten Montagemaschine und angepassten unterschiedlichen Greif- und Montagewerkzeugen. Die Elektronikmontage nutzt die bekannten Methoden der Elektronikfertigung. Einzig und allein die Montage des Aktormoduls musste an die Anforderungen angepasst werden. Um die gewünschte Flexibilität zu gewährleisten wurde eine aktorspezifische Grundplatte eingeführt, die bauartbedingte Höhenunterschiede des auf dem Aktor montierten Umlenkprismas ausgleicht. Zudem ermöglicht sie den Ausgleich von system- und montagebedingten Toleranzen. Diese wurden allerdings durch konsequente Nutzung der Toleranzfreiheitsgrade minimiert. Die Montage von Aktormodul und mikrooptischer Bank ist neben der Montage der Photodiodensubmounts der einzige Schritt, der eine aktive Justierung erfordert. Nach grober Vorausrichtung beider Module werden diese unter optischer Kontrolle der Interferometerausgänge mittels einer CCD-Kamera, präzise zueinander ausgerichtet und bei Auftreten von Interferenzmustern nullter Ordnung an beiden Interferometerausgängen durch UV-Kleben fest miteinander verbunden. Auch die Montage der Signalausgabereinheit erfolgt im Falle der fasergebundenen Signalausgabe durch einlegen kollimierender Gradientenindexlinsen und Fasern passiv. Damit genügt der Montageprozess des gesamten Systems, das z.B. im Falle des Piezoaktors mit kompletter Elektronik und Gehäuse gerade einmal 50 mm x 35 mm x 27 mm groß ist, bereits Fertigungsbedingungen. Somit bestünde die Möglichkeit die gesamte Entwicklung zügig in eine Fertigung über zu führen.

Bei der Charakterisierung des, nach dem in dieser Arbeit entwickelten modularen Konzept aufgebauten modifizierten Michelson-Interferometer, ergaben sich im Falle einer faserbasierten Signalausgabe unter Verwendung der nicht optimalen optischen Komponenten optisch gemessene Auslöschungsverhältnisse von bis zu 7,3 dB. Dabei

werden die Werte im Wesentlichen durch den komponentenbedingten Offset hervorgerufen. Bei Demonstratoren mit elektronischer Signalausgabe können diese Messwerte durch eine intelligente Offsetkorrektur signifikant verbessert werden. Auslöschungsverhältnisse größer 20 dB sind auf diese Weise für designierte Applikationen durchaus realisierbar. Lediglich sind, wie bereits die Charakterisierung der optischen Einzelkomponenten zu erkennen gab, polarisationsbedingte Schwankungen nicht zu vermeiden. Mit der entwickelten Datenerfassungs- und Datenaufbereitungsplatine wurden rauscharm aufbereitete Messsignale innerhalb der vorgegebenen Spezifikationen gewonnen. Die Charakterisierung der Auswerteelektronik ergab bei einer Auslesefrequenz von 200 Hz je Kanal ein Verhältnis von Abtast- zu Auslesefrequenz von 2,9. Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem ist somit erfüllt und das gemessene Signal verlustfrei rekonstruierbar. Die Funktion eines aktiven, modularen mikrooptischen Systems wurde im Rahmen dieser Arbeit somit erstmals an unterschiedlichen Prototypen erfolgreich nachgewiesen. Dabei wurden insbesondere verschieden optische, elektronische und aktive Module frei miteinander kombiniert.

Anhand einer Beispielapplikation als FTIR-Wavemeter wurde das aktiv modulare mikrooptische System für eine mögliche Anwendung als optisches Wellenlängenmessgerät verifiziert. Weitere potentielle Applikationen konnten diskutiert werden. Je nach Anwendung ist das System für das Einbringen von Proben oder Fluidkanälen zu adaptieren. Für Spezialanwendungen mit selektiver Detektion beider Systemausgänge sind optische Mikrofilter denkbar. Für einen kommerziellen Einsatz bedarf das System in seiner derzeitigen Form nur geringer Adaption. Eine automatisierte Montage ist mit dem heutigen Design bereits weitgehend möglich. Die mikrooptische Bank kann nach umkopieren in einen Formeinsatz mittels der Verfahren der Kunststoffreplikation in großen Stückzahlen kosteneffizient hergestellt werden. Mit steigender Stückzahl ist es möglich, die optischen Beschichtungen des Systems spezifisch anzupassen und folglich die optische Signalgüte deutlich zu verbessern. Aus heutiger Sicht ist infolgedessen der kommerzielle Einsatz eines derartig verbesserten Systems als DQPSK Demodulator möglich. Auch wenn die derzeit erreichte Datenrate für eine Vielzahl von Applikationen mehr als ausreichend ist, wäre eine diesbezügliche Optimierung der Datenelektronik für zukünftige Systeme erstrebenswert. Alternativ zu der USB-Datenübertragung ist eine funkbasierte Kommunikation mit Messrechnern, z.B. über Bluetooth für diverse Anwendungen äußerst interessant. Mit einer zusätzlichen, integrierten Spannungsquelle und entsprechenden Funkmodulen ist dies leicht zu bewerkstelligen. Letztendlich kann jedoch das

langfristige Ziel folgender Arbeiten nur darin bestehen, das System um weitere Module zu komplexen multifunktionalen mobilen Analysesystemen zu erweitern, um neue zukunftsorientierte Applikationsmöglichkeiten anzuvisieren. Vorgaben diesbezüglich sind durch die eindeutigen Schnittstellendefinitionen in dieser Arbeit gegeben.

## A Anhang

### A.1 LIGA-Interferometer

Alternativ zu der hybriden Integration qualitativ hochwertiger optischer Komponenten in LIGA mikrooptische Bänke, wurde in dieser Arbeit ein Ansatz zur integrierten Herstellung freistrahloptischer interferometrischer Systeme auf Basis der LIGA-Technologie, ausschließlich unter Anwendung der Totalreflektion erarbeitet. Die interferometrische Funktion des Systems ist dabei ohne optische Beschichtungen zu erreichen. Hintergrund dieser Entwicklung ist die Idee, kostengünstige interferometrische Systeme in wenigen Prozessschritten mit Massenfertigungsverfahren herzustellen. In Abbildung A2 ist das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Design eines freistrahinterferometrischen Systems mit LIGA-optischen Komponenten dargestellt. Als Resist wird für die mikrooptischen Bänke PMMA GS in Form von Klebeplättchen, wie auch im Falle des hybriden Aufbaus eingesetzt. Der Brechungsindex des PMMA GS beträgt  $n_d=1,49$ . Für eine Arbeitswellenlänge von 1550 nm ergibt sich im Material, wie in Abbildung A1 dargestellt, ein Grenzwinkel für die Totalreflektion von ca.  $42^\circ$ , der für die Funktion dieser mikrooptischen Bank von besonderer

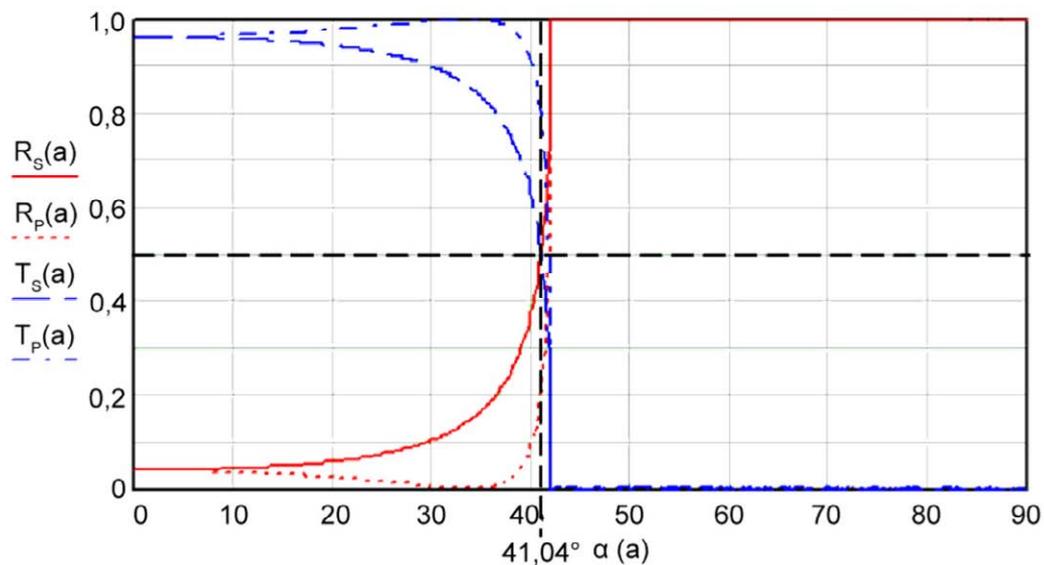


Abbildung A1: Reflektions- und Transmissionskurven für den Phasenübergang von PMMA an Luft.

Bedeutung ist. Bei einem Winkel von  $41,04^\circ$  zwischen Lichtstrahl und Phasengrenze am Übergang zu Luft gehen 50 % des Lichts in Transmission und 50 % in Reflektion. Die Kenntnis dieses Winkels kann für die Realisierung eines Strahlteilers eingesetzt werden. Die zulässigen Winkelfehler liegen bei  $\pm 0,25^\circ$ , falls eine Abweichung des 50:50 Strahlteilers um  $\pm 5\%$  zugelassen wird.

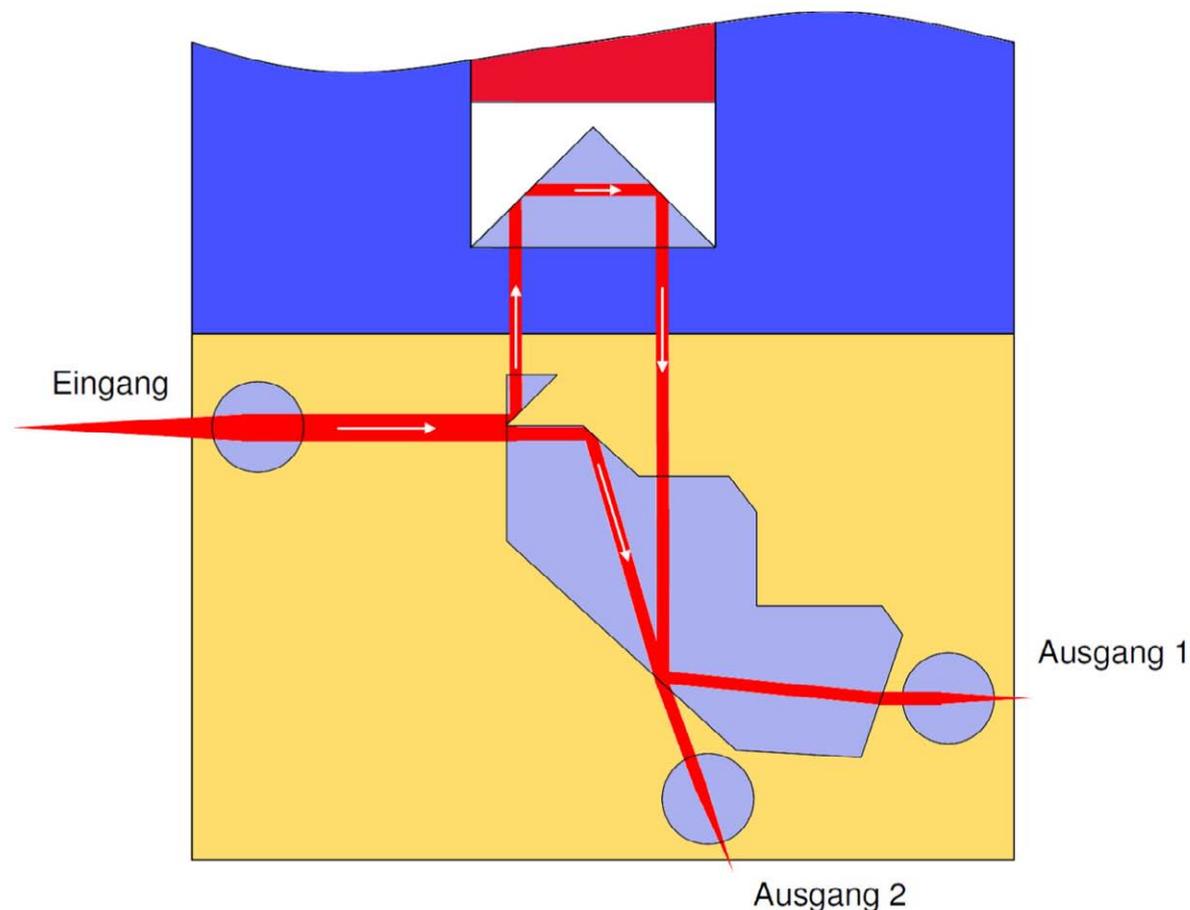


Abbildung A2: Entwurf für ein interferometrisches System basierend auf Totalreflexion.

Das in Abbildung A2 eingekoppelte Licht, wird nach der Kollimation durch eine Linse an einem, wie in [79] beschriebenen, mechanischen Strahlteiler in zwei Teilstrahlen nach dem Prinzip der Wellenfrontenaufspaltung aufgeteilt. Für eine möglichst präzise Aufspaltung des eingekoppelten Lichts in zwei Teilstrahlen gleicher Größe, ist eine möglichst genaue Positionierung des Lichtstrahls vor dem Strahlteiler erforderlich. Auftretende Abweichungen treten im Messsignal unweigerlich als Offset in Erscheinung. Anschließend werden beide Teilstrahlen durch Totalreflexion innerhalb der PMMA-Strukturen umgelenkt. Der obere Teilstrahl verlässt die PMMA-

Struktur über eine Phasengrenze an Luft und wird dort vom Umlenkprisma des Mikroaktors, wie bereits im Falle des LIGA-Interferometers mit Glaskomponenten, in Richtung der mikrooptischen Bank zurück geleitet. Nach einem erneuten Eintritt in die PMMA-Struktur trifft dieser Teilstrahl mit dem, in PMMA verbleibenden Teilstrahl an einer Phasengrenze zu Luft zusammen, es kommt zur Interferenz. Damit

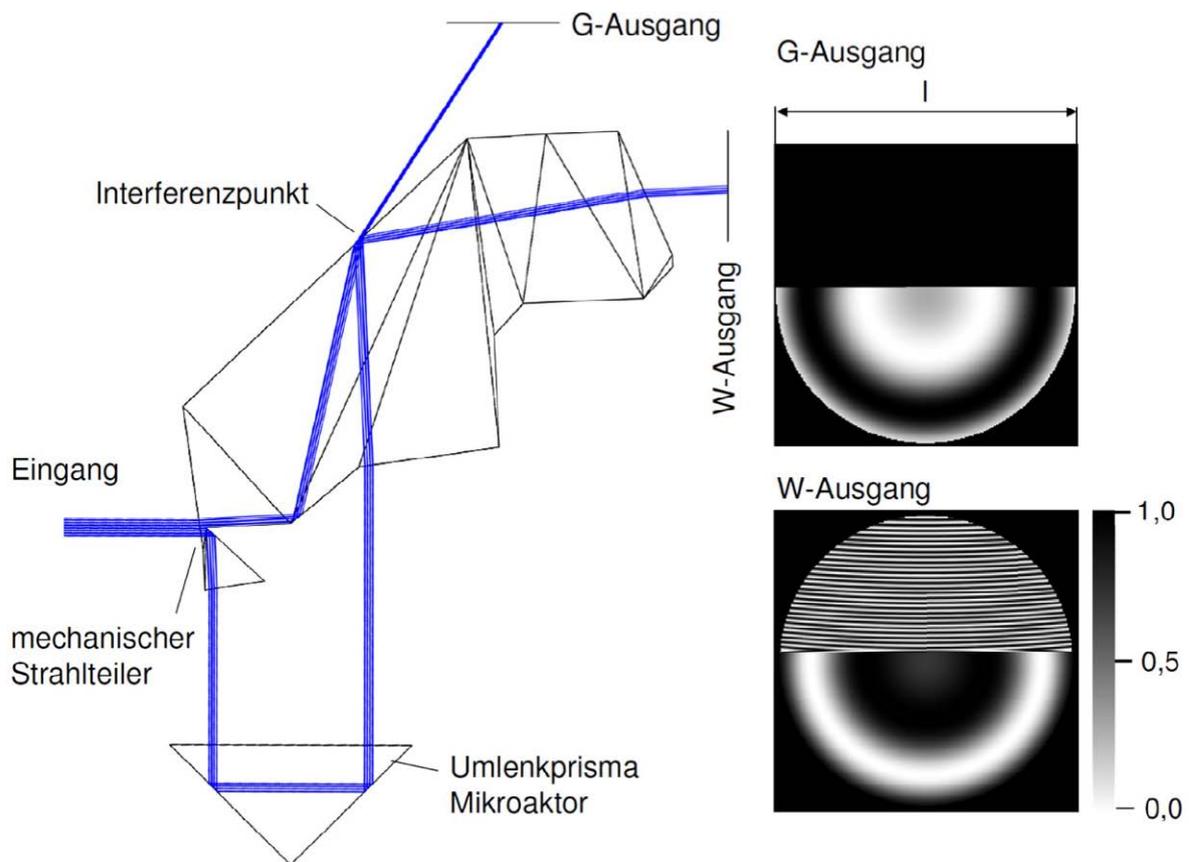


Abbildung A3: Raytracing Simulation eines auf Totalreflektion basierenden LIGA-Interferometers.

die Phasengrenze gleichzeitig als Strahlteiler funktioniert, muss die Sphäre relativ zum einfallenden Lichtstrahl wie beschrieben unter einem Winkel von  $41,04^\circ$  stehen. Das interferierende Licht wird in einen transmittierenden und reflektierenden Anteil aufgespalten und auf die Systemausgänge geleitet.

Unter Berücksichtigung dieser konstruktiven Vorgaben war es möglich, ein Raytracing Simulationsmodell, wie in Abbildung A3 dargestellt, zu erstellen. Die angeschnittenen Interferogramme kommen durch die mechanische Strahlteilung am

Systemeingang zustande. Bei der Simulation werden alle vier möglichen Pfade, die das eingekoppelte Licht nehmen kann, getrennt voneinander beschrieben. Ein Teil der eingekoppelten Lichtstrahlen läuft bei der obigen Simulationsanordnung ins Leere und wird von dem eingesetzten Simulationsprogramm nicht weiter simuliert, falls keine Interaktion mit einer optischen Sphäre errechnet werden kann. Als Resultat treten halbvollständige Interferogramme auf. Diese zeigen jedoch die zu erwartende Funktion des Systems auf. Beide Interferogramme sind um  $180^\circ$  phasenverschoben, wodurch das Design tendenziell von der Strahlführung und seinem Verhalten als Mach-Zehnder Interferometer einzuordnen ist.

### **A.2 CAD-Design der mikrooptischen Bank für das LIGA-Interferometer**

Für das in LIGA-Technik integriert hergestellte Interferometer wurden die, in der Simulation entwickelten, Strukturen ebenfalls in ein Layout der Größe von  $11 \times 8\text{mm}$  überführt. Beide mikrooptischen Bankmodule verfügen über identische Ein- und Ausgabeschnittstellen sowohl für die Lichtein- und Lichtauskopplung, als auch für die Ankopplung auf die Aktormodule gemäß der, in dieser Arbeit vorgegebenen Spezifikationen. Im Falle des LIGA-Interferometers wird aus diesem Grund nicht erneut auf die bereits beschriebenen Schnittstellen eingegangen, vielmehr steht die Beschreibung der funktionalen Strukturen in Vordergrund.

In Abbildung A2 ist das zugehörige CAD-Layout für das LIGA-Interferometer basierend auf Totalreflektion dargestellt. Die eigentliche Funktionsstruktur des LIGA-Interferometers, welche in Bezug auf die Funktionsweise bereits in Anhang A.1 erläutert wurde, wird wie alle anderen Strukturen der mikrooptischen Bank in LIGA-Technik hergestellt. Die Struktur selbst ist so konstruiert, dass keine optischen Flächen parallel zueinander stehen, um Mehrfachreflektionen zwischen parallelen optischen Flächen und den daraus resultierenden Schwebungsinterferenzen zu vermeiden. Zur gezielten Auskopplung von Reflektionen an den optischen Oberflächen werden analog zu dem LIGA-Interferometer mit Glaskomponenten Auskoppelstrukturen eingesetzt, die die auftretenden Reflektionen, zerlegt in einen Transmissions- und Reflektionsanteil, aus dem System leiten. Umgebungslichtabsorber umgeben die optischen Funktionsstrukturen zur Reduzierung der Umgebungs- und Streulichteinflüsse. Sie sind lediglich in den Bereichen der Schnittstelle zu dem

Mikroaktor und für die Auskopplung der Reflektionen unterbrochen. Die Lage der Strukturen auf der mikrooptischen Bank ist an die Schnittstellendefinitionen angepasst. Aus Platzgründen musste auf Strukturen für die direkte Auskopplung der Interferenzsignale auf, im Strahlengang stehende Photodioden verzichtet werden. Die modulare Auskopplung auf Photodioden, integriert in eine Auswerteelektronik oberhalb der mikrooptischen Bank, ist weiterhin möglich.

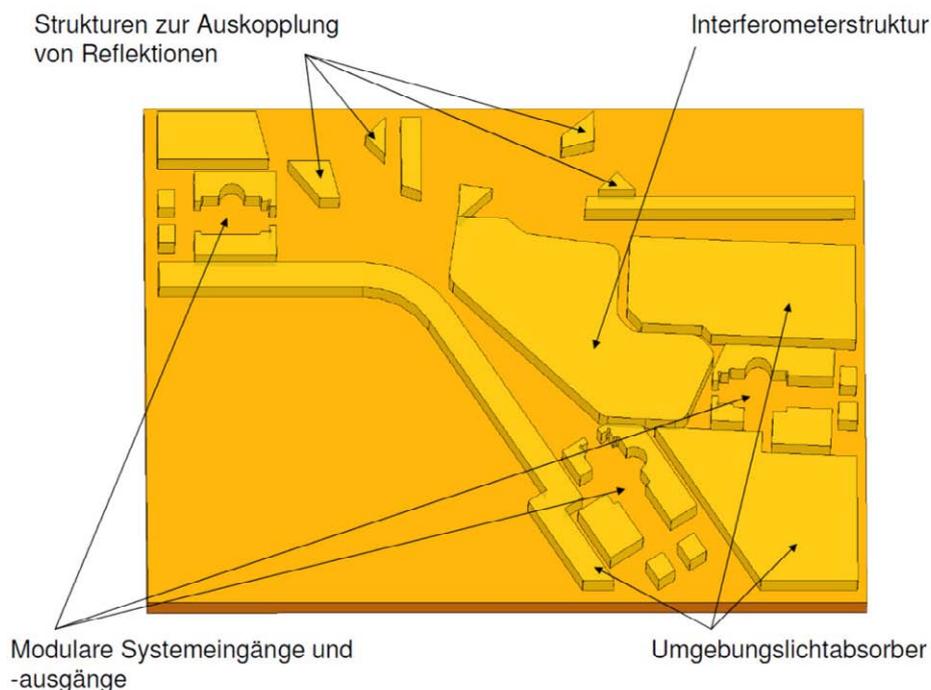


Abbildung A4: CAD-Zeichnung der mikrooptischen Bank mit dem LIGA-Interferometer und gekennzeichneten Funktionsstrukturen.

### A.3 Die mikrooptischen Bänke des LIGA-Interferometers

Ein erster Funktionstest der in Abbildung 6.4 rechts dargestellten mikrooptischen Bänke basierend auf Totalreflektion zeigte, dass das realisierte Design prinzipiell funktionsfähig ist, jedoch keine zufrieden stellenden Interferenzmuster an den Systemausgängen einzustellen sind. Unter Betrachtung der Systemausgänge mit einer Infrarotkamera sind zwar deutlich Interferenzerscheinungen zu erkennen, diese sind aufgrund der Beschaffenheit der Seitenwände streifenförmig und an vielen Stellen durch Phasensprünge unterbrochen. Mittels Photodioden oder über Fasern ist eine rein

Intensitätsbasierte Detektion der ausgangsseitigen Signale nicht möglich. Es liegt nahe, dass zur Lösung dieser Problematik eine prozessbedingte Verbesserung der optischen Eigenschaften der LIGA-Strukturen erforderlich ist. Im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit ist eine Prozessoptimierung dieser Art jedoch nicht realisierbar. Das LIGA-Interferometer auf Basis von Totalreflektion ist zu einem späteren Zeitpunkt neu zu diskutieren.

## B Literaturverzeichnis

- [1] M. Glück. MEMS in der Mikrosystemtechnik, Aufbau Wirkprinzipien, Herstellung und Praxiseinsatz mikroelektromechanischer Schaltungen und Sensorsysteme. *B. G. Teubner Verlag / GVV Fachverlage GmbH. 1. Auflage.* 2005.
- [2] R. Rösemann, W. Wiedemann, G. Tschulena, D. Rein, W. Palke. Modulare Mikrosystemtechnik: Wie weit ist die deutsche Sensorindustrie. *Umfrage des AMA Fachverbandes.* 2001.
- [3] H. Töpfer. Modular aufgebautes Gassensorgerät mit einer Vielzahl polymerbeschichteter Oberflächenwellen (SAW)-Resonatoren. *Europäisches Patent, EP 0 943 917 A2, Bürkert Werke GmbH & Co.* 1999.
- [4] M. Bär, et al..  $\mu$ FEMOS Mikro-Fertigungstechniken für hybride mikrooptische Sensoren. *Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Band 10.* (2006).
- [5] E. Hecht. Optik. Oldenbourg Verlag München Wien. 4. überarbeitete Auflage. 2005.
- [6] K. Leonhardt. Optische Interferenzen. *Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart.* 1981.
- [7] W.H. Steel. Interferometry. *Cambridge University Press, Cambridge.* 2. Auflage 1983.
- [8] M. Françon. Optical Interferometry. *Academic Press Inc., New York and London.* 2. Auflage 1968.
- [9] F. Mohr. Polarisationsprobleme beim faseroptischen Sagnac-Interferometer und ihre Lösung durch Polarisationsregelsysteme. *Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät für Elektrotechnik.* 1984.
- [10] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer. Physik für Ingenieure. *Springer Verlag.* 7. Auflage, 1999.
- [11] G. Hernandez. Fabry-Perot Interferometers. *Cambridge University Press, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney.* 1. Auflage, 1986.

- [12] D. Meschede. Optik, Licht und Laser. *Vieweg+Teubner Verlag*. 3. Auflage, 2008.
- [13] F. Perdotti, L. Perdotti, W. Bausch, H. Schmidt. Optik für Ingenieure. *Springer Verlag Berlin Heidelberg*. 3. Auflage, 2005.
- [14] Bürstenlose DC-Servomotoren der Smoovy®-Serie, Faulhaber Group, Url: <http://www.faulhaber-group.com>. Stand 2008.
- [15] C. Hahn, R. Gehrking, B. Ponick, H.H. Gatzen. Design improvements for a linear hybrid step micro-actuator. *Microsystem Technologies Nr. 12/3 p.646-649*, Springer Verlag. 2006.
- [16] J. Edler, J.-D. Stölting, M. Föhse, H.H. Gatzen. A linear microactuator with enhanced design. *Microsystem Technologies Nr. 7 p.261-264*, Springer Verlag. 2002.
- [17] M. Kallenbach. Entwurf von magnetischen Mini- und Mikroaktoren mit stark nichtlinearem Magnetkreis. *Dissertation Technische Universität Illmenau, Fakultät für Maschinenbau*. 2005.
- [18] S. Bütetfisch, V. Seidemann, S. Büttgenbach. Novel micro-pneumatic actuator for MEMS. *Sensors and Actuators A 97-98 (2002) p.638-645*. 2002.
- [19] W. Steinhilper, B. Sauer. Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2 : Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben. *Springer Verlag Berlin Heidelberg*. 2008.
- [20] M. Kohl. Shape Memory Microactuators. *Springer Verlag Berlin Heidelberg*. 2004.
- [21] Bildquelle: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung (IMF) URL: <http://hikwww9.fzk.de/imf/cd/bilder/imf14b.jpg>, 2007.
- [22] M. Kohl, B. Krevet, E. Just. SMA microgripper system. *Sensors and Actuators A97-98 (2002) p.646-652*. 2002.
- [23] M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka, T. Takagi. A novel actuation mechanism on the basis of ferromagnetic SMA thin films. *Sensors and Actuators 114/2-3 (2004, )p. 445-450*. 2004.
- [24] M. Kohl, Y. Liu, D. Dittmann. A polymer-based microfluidic controller. *Proc. of MEMS 04, p. 288-291*. 2004.

- [25] J. Kim, S. Park, D.-I. Cho. A novel electrostatic vertical Actuator fabricated in one homogeneous silicon wafer using extended SBM technology. *Sensors and Actuators A* 97-98 (2002) p. 653-658. 2002.
- [26] O. Manzardo, R. Michaely, F. Schädelin, W. Noell, T. Overstolz, N. De Rooij, H.P. Herzig. Miniature lamellar grating interferometer based on silicon technology. *Optics Letters*, Vol. 29 No. 13, p. 1437-1439. 2004.
- [27] K. Jourdrey, G.G. Adams, N.E. McGruer. Design, modelling, fabrication and testing of a high aspect ration electrostatic torsional MEMS micromirror. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16, p. 2147-2156. 2006.
- [28] R. Legtenberg, A.W. Groeneveld, M. Elwenspoek. Comb-drive actuators for large displacement. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 6, p. 320-329. 1996.
- [29] W.-C. Chen, C.-C. Chu, et al.. A reliable singel Layer out-of-plane micro-machined thermal Actuator. *Sensors ans Actuators A* 103 (2003) p. 48-58. 2003.
- [30] J.K. Luo, A.J. Flewitt, et al.. Three types of planar structure microscoping electrothermal actuators with insulating beam constraints. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, Institute of Physics Publishing. 2005.
- [31] I. Li, D. Uttamchandani. Modified asymeric microelectrothermal actuator: analysis and experimentation. *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, Institute of Physics Publishing. 2004.
- [32] C. Solf. Entwicklung von miniaturisierten Fourier-Transformations-Spektrometern und ihre Herstellung mit dem LIGA Verfahren. *Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe (FZKA 6964)*. 2004.
- [33] S. Schonhardt, J. G. Korvink, J. Mohr, U. Hollenbach, U. Wallrabe. Magnetic Comb drive Actuator. *Proc. of MEMS 08*, p. 479-482. 2008.
- [34] Z. Nami, C.H. Ahn, M.G. Allen. An Energy Based Design Criterion for Magnetic Microactuators. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 6, p. 337-344. 1996.
- [35] K. Fischer, H. Guckel. Long throw magnetic actuators stackable to one millimeter of structural height. *Microsystem Technologies*, Vol. 4, p. 180-183. 1998.

- [36] H. Guckel, T. Earles, J. Klein, J.D. Zook, T. Ohnstein. Electromagnetic linear actuators with inductive position sensing. *Sensors and Actuators A 53 (1996) p. 386-391*. 1996.
- [37] M.P. Denzler. Lebensdauer und Zuverlässigkeit dynamisch betriebener piezokeramischer Biegeumwandler. Cuvillier Verlag. 2004.
- [38] H. Czichos. Mechatronik Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme. Springer Verlag. 2006.
- [39] Z.W. Zhong, J. Sun. A suspension integrated with a piezoelectric microactuator for dual stage actuation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology 24*, p. 686-692. 2004.
- [40] D.C. Roberts, H. Li, L. Steyn, K.T. Turner, et al.. A high-frequency, high-stiffness piezoelectric actuator for microhydraulic applications. *Sensors and Actuators A 97-98 (2002) p. 620-631*. 2002.
- [41] R. Maeda, J.J. Tsaur, S.H. Lee, M. Ichiki. Piezoelectric Microactuator Devices. *Journal of Electroceramics 12*, p. 89-100. 2004.
- [42] W.G. May, Jr.. Piezoelectric Electromechanical Translation Apparatus. *US Patent No. 3,902,084, Burleigh Instruments Inc.*. 1974.
- [43] R.A. Bizzigotti. Electromechanical Translation Apparatus. *US Patent No. 3,902,085, Burleigh Instruments Inc.*. 1974.
- [44] D.F. Waechter, S. Salisbury, R.B. Mrad, S.E. Prasad, R.G. Blacow, B. Yan. Complementary inchworm<sup>®</sup> actuator for high-force high-precision applications. *Smart Structures and Materials 2004, Proceedings of SPIE Vol. 5390*, p. 13-23. 2004.
- [45] J. Kim, H.-K. Kim, S.-B. Choi. A Hybrid Inchworm Linear Motor. *Mechatronics 12 2004*, Elsevier Science Ltd., p. 525-542. 2002.
- [46] R. Yeh, S. Hollar, K.S.J. Pister. Single Mask, Large Force, and Large Displacement Electrostatic Linear Inchworm Motors. *Journal of Microelectromechanical Systems, Vol 11, No. 4*, p. 330-336. 2002.
- [47] S. Salisbury, D. Waechter, R.B. Mrad, R. Blacow, E. Prasad. Design Tools for Piezoelectric Actuated Inchworm Positioners. *6<sup>th</sup> CanSmart Workshop on Smart Materials and Structures*, p. 169-175. 2003.

- [48] Q. Chen, D.-J. Yao, C.-J. Kim, G.P. Carman. Development of Mesoscale Actuator Device with Microinterlocking Mechanism. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 9, p. 449-457. 1998.
- [49] U. Jungnickel, D. Eicher, H.F. Schlaak. Miniaturised Micro-Positioning System for Large Displacements and Large Forces Based on an Inchworm Platform. *Actuator 2002*.
- [50] S.Konishi, K. Ohno, M. Munechika. Parallel linear actuator system with high accuracy and large stroke. *Sensors and Actuators A 97-98 (2002) p. 610-619*. 2002.
- [51] P. Cusin, T. Sawai, S.Konishi. Compact and precise positioner based on the inchworm principle. *Journal of Micromechanics and Microengineering 10, p. 516-521*. 2000.
- [52] S.R. Schaefer, J.H. Bechtel. Modular micro-optical systems and method of making such systems. *US Patent No. 5,119,448, Tacan corporation*. 1982.
- [53] K.J.A. Vilhelmsson, T.E. Lock. Micro-optical building block system and method of making same. *US Patent No. 4,789,214, Tacan corporation*. 1988.
- [54] V. Grosser, M. Schuenemann, B. Michel, H. Reichel. A Design and Production Framework for Modular Microsystems. *International Symposium on Micromechatronics and Human Science, IEEE, p. 193-198*. 1999.
- [55] K.A. Jam, A. Leutenbauer, V.Großer, H. Reichel. Design Methodology of Modular Microsystems. *Micro System Technologies 2001 7th Int. Conf. on Micro Electro, Opto Mechanical Systems and Components*. 2001.
- [56] K.A. Jam, F. Schindler-Saefkow, V.Großer, B. Michel, H. Reichel. From the draft to manufacturing of a modular microsystem. *MEMSPACK 2002*.
- [57] J. Bauer, F. Ebling, H. Schröder, et al.. Wellenleiter mit innenliegender Optolage – Wellenleitertechnologie und Koppelkonzept. 4. *ITG-Workshop „Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik“*. 2005.
- [58] A. Last. Fehllicht in LIGA Mikrospektrometern. *Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau*. 2002.
- [59] T. Oka, H. Nakajima, M. Tsugai, U. Hollenbach, U. Wallrabe, J. Mohr. Development of a micro-optical distance sensor. *Sensors and Actuators A 102 (2003) p. 261-267*. 2003.

- [60] J. Mohr, A. Last, U. Hollenbach, T. Oka, U. Wallrabe. A Modular Fabrication Concept for Microoptical Systems. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, NO. 3, p. 643-647. 2003.
- [61] P. Krippner, T. Kühner, J. Mohr, V. Saile. Microspectrometer System for the Near Infrared Wavelength Range based on the LIGA Technology. *Proceedings of SPIE*, Vol. 3912, p.141-149. 2000.
- [62] U. Hollenbach, J. Mohr, T. Stautmeister. Micro Optical Distance Sensor – Actual Results from Prototypes. *Sensor 2005, Proc. Vol.1*, p.79-84. 2005.
- [63] M. Sasaki, T. Yamaguchi, J.H. Song, K. Hane, M. Hara, K. Hori. Optical Scanner on a Three-Dimensional Microoptical Bench. *Journal of Lightwave Technology*, Vol.21, No. 3, p.602-608. 2003.
- [64] A. Tuantranot, V.M. Bright, J. Zhang, W. Zhang, J.A. Neff, Y.C. Lee. Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array. *Sensors and Actuators A 91 (2001) p. 367-372*. 2001.
- [65] D. Hah, S.T.-Y. Huang, J.-C. Tsai, H. Toshiyoshi, M.C. Wu. Low-Voltage, Large Scan Angle MEMS Analog Micromirror Arrays With Hidden Vertical Comb-Drive Actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 2, p. 279-289. 2004.
- [66] A.C.M. Ruzzo, U. Wallrabe, J. Mohr. Entwicklung einer opto-elektro-mechanischen 2 x 2 Schaltmatrix in LIGA-Technik für die optische Telekommunikation. *Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik, Wissenschaftliche Berichte (FZKA 6514)*. 2000.
- [67] O. Manzardo, H.P. Herzig, C.R. Marxer, N.F. de Rooij. Miniaturized time-scanning Fourier transform spectrometer based on silicon technology. *Optics Letters*, Vol. 24, No. 23, p. 1705-1707. 1999.
- [68] P.C. Montgomery, D. Montander, O. Manzardo, M. Flury, H.P. Herzig. The metrology of a miniature FT spectrometer MOEMS device using white light scanning interference microscopy. *Thin Solid Films* 450, p. 79-83. 2004.
- [69] O. Manzardo. Micron-Sized Fourier Spectrometers. Dissertation Université de Neuchâtel, UFO Dissertation Band 418, UFO Atelier für Gestaltung & Verlag GbR, Allensbach. 2002.

- [70] D. Reyes, R. Schildkraut, J. Kim. MEMS Michelson Interferometer and Method of Fabrication. *US Patent No 0122383 A1, Block Engineering, LLC*. 2009.
- [71] R. Rubio, N. Sabate, C. Calaza, J. Santander, L. Fonseca, I. Gràcia, C. Cané, M. Moreno, S. Marco. Optical simulation of a MOEMS based tuneable Fabry-Perot interferometer. *IEEE Sensors 2004*, p. 1324-1327. 2004.
- [72] A. Parashar, A. Shah, M. Packirisamy, N. Sivakumar. Three Cavity Tunable MEMS Fabry Perot Interferometer. *Sensors 2007, Vol. 7*, p. 3071-3083. 2004.
- [73] P. Ziegler, J. Wengelink, J. Mohr. Aufbau von optisch-elektrischen Funktionsmodulen mit Hilfe des LIGA-Verfahrens für die optische Übertragungstechnik. *Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe (FZKA 6344)*. 1999.
- [74] A. G. Steffan, M. L. Nielsen, G. Tsianos, A. Umbach, A. Boutin, L. Fulop, F. Verluise. 40 Gb/s DPSK Receiver Module with Integrated Free-Space Delay-Line-Interferometer. *Optical Society of America. 2008, Presented at the OFC 2009*.
- [75] W. Schott, D. Dontsov, W. Pöschel. Mehrkanalige laserinterferometrische Messverfahren mit höchster Genauigkeit. *Photonik Fachzeitschrift für optische Technologien, AT-Fachverlag GmbH, Ausgabe 3/2008*.
- [76] V. Saile, U. Wallrabe, O. Tabata, O. Brand, J.G. Korvink, G.K. Fedder, C. Hierold. LIGA and its Applications, Advanced Micro & Nanosystems. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaa, Vol. 7*. 2009.
- [77] B. Heinrich, P. Döring, L. Klüber, S. Nolte, R. Simon. Mechatronik kompakt. *Friedrich Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage*. 2004.
- [78] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grothe. Pahl/Beitz Konstruktionslehre. *Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 7. Auflage*. 2007.
- [79] H. Neumann, G. Schröder. Bauelemente der Optik, Taschenbuch der technischen Optik. *Carl Hanser Verlag München Wien, 5. Auflage*. 1987.
- [80] Enablence Technologies Inc. *Datenblatt PDCS12T 40Gb/s InGaAs Photodiode*. Stand 29.06.2009.
- [81] Enablence Technologies Inc. *Datenblatt PDCS32T-XS 10Gb/s InGaAs Photodiode*. Stand 29.06.2009.

- [82] R.E. Fischer, B. Tadic-Galeb. Optical System Design. *McGraw-Hill Inc., US, SPIE Press*. 2000.
- [83] S. Schüle, U. Hollenbach, J. Mohr, J. Li, P. Vorreau, A. Efremov, J. Leuthold, S. Schonhardt. Modular Integration of Microactuators and Micro-Optical Benches. *Photonics Europe 2008, SPIE Proceedings 6992-1*. 2008.
- [84] S. Schüle. Modular active micro-optical systems based on LIGA technique. *Micro Technology Innovation Forum, Villingen-Schwenningen*. 21. Januar 2009
- [85] H. Landolt, R. Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik. *Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 6. Auflage, Band 2, Teil 8*. 1976
- [86] S. Hengsbach. Aufbau und Charakterisierung eines miniaturisierten modularen Delay-Interferometersystems für die Mess- und Datentechnik. *Institut für Mikrostrukturtechnik des Forschungszentrum Karlsruhe*. 2009.
- [87] W. Böge, W. Pläßmann. Handbuch Elektrotechnik. Friedrich Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, *4. überarbeitete Auflage*. 2008.
- [88] S. Schonhardt. Electromagnetic Microactuators. *Dissertation des Instituts für Mikrosystemtechnik der Fakultät für Angewandte Wissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau*. 2009.
- [89] A. El-Kholi, P. Bley, J. Göttert, J. Mohr. Examination on the solubility and the molecular weight distribution of PMMA in view of an optimised resist system in deep etch X-ray lithography. *Microelectronic Engineering Vol. 21, p. 271-274*. 1993.
- [90] V. Ghica, W. Glashauser. Verfahren für die spannungsrißfreie Entwicklung von bestrahlten Polymethylmethacrylat-Schichten. *Deutsches Patent Nr. 3 039 110*. 1982.
- [91] J. Goettert, P. Datta, Y. Desta, Y. Jin, Z. Ling, V. Singh. LiGA Research and Service at CAMD. *International MEMS Conference 2006, Journal of Physics: Conference Series 34, S. 912–918*. 2006.
- [92] U. Gengenbach, A. Hofmann, B. Köhler, E. Just, M. Kohl, F. Eberle, F. Engelhardt, R. Scharnowell. Komponenten zum Aufbau modularer Mikrofertigungssysteme. *4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, S. 203-204*. 2000.

- [93] W. Menz, J. Mohr. Mikrosystemtechnik für Ingenieure. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2. erweiterte Auflage*. 1997.
- [94] F. Völklein, T. Zetterer. Praxiswissen Mikrosystemtechnik. Friedrich Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, *2. Auflage*. 2006.
- [95] DYMAX Corporation, Torrington. Product Data Sheet Optical Adhesive, OP-21 & OP-21G. Stand 04/2001.
- [96] DYMAX Corporation, Torrington. Hochleistungsklebstoffe für die Linsenverklebung. Stand 04/2007.
- [97] DYMAX Corporation, Torrington. Product Data Sheet Medical Device Adhesive, 191-M Series. Stand 10/1999.
- [98] S. Schüle, U. Hollenbach, J. Li, J. Leuthold, J. Mohr. Set Up of a Modular Micro-Optical System Based on Free Space Optics. *MOC 2008 Conference, Bruxelles, Belgium, September 25-27, 2008, pp.334-335*. 2008.
- [99] E. Voges, K. Petermann. Optische Kommunikationstechnik. *Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York*. 2002.
- [100] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer. Herstellung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis und großer Strukturhöhe durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung, Galvanoformung und Kunststoffabformung (LIGA-Verfahren). *Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Kernverfahrenstechnik (KfK 3995)*. 1985.
- [101] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. Datenblatt für P-882 P-888 PICMA<sup>®</sup> Multilayer-Piezoaktoren. Stand 02/2009.
- [102] S. Schüle, S. Hengsbach, U. Hollenbach, J. Li, J. Leuthold, S. Schonhardt, U. Wallrabe, J. Mohr. Adaptive Micro-Optical Interferometer for Different Measurement and Network Applications. *OEPT 2009 Conference, Orlando, Florida, USA, July 10-13, 2009, pp.287-291*. 2009.
- [103] P. Dobrinski, G Krakau, A. Vogel. Physik für Ingenieure. *B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 10. Auflage*. 2003.
- [104] J.Lunze. Regelungstechnik 2. *Springer Verlag Berlin Heidelberg*. 2005.
- [105] U. Naundorf. Digitale Elektronik-Theoretische Grundlagen und Schaltungsanalysen. *Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München*. 2004.

- [106] C. Smith. Wireless telecom FAQs. *McGraw-Hill Verlag New York*. 2001.
- [107] D. Kühlke. Optik Grundlagen und Anwendungen. *Harry Deutsch Verlag, Frankfurt am Main*, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. 2007.
- [108] H. Keang-Po. Phase-modulated optical communication systems. *Springer Verlag New York*. 2005.
- [109] J. Li, K. Worms, P. Vorreau, D. Hillerkuss, A. Ludwig, R. Maestle, S. Schüle, U. Hollenbach, J. Mohr, W. Freude, J. Leuthold. Optical Vector Signal Analyzer Based on Differential Direct Detection. *LEOS Annual Meeting Conference, Belek-Antalya, Turkey, October 4-8, 2009*. 2009.

# **Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (ISSN 1869-5183)**

---

Herausgeber: Institut für Mikrostrukturtechnik

Die Bände sind unter [www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu) als PDF frei verfügbar oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1**      Georg Obermaier  
**Research-to-Business Beziehungen: Technologietransfer durch Kommunikation von Werten (Barrieren, Erfolgsfaktoren und Strategien).** 2009  
ISBN 978-3-86644-448-5
- Band 2**      Thomas Grund  
**Entwicklung von Kunststoff-Mikroventilen im Batch-Verfahren.** 2010  
ISBN 978-3-86644-496-6
- Band 3**      Sven Schüle  
**Modular adaptive mikrooptische Systeme in Kombination mit Mikroaktoren.** 2010  
ISBN 978-3-86644-529-1

# Modular adaptive mikrooptische Systeme in Kombination mit Mikroaktoren

Die Modularisierung technischer Systeme bietet im Bereich kleiner und mittlerer Stückzahlen viele Vorteile. Auf dem Gebiet der hochintegrierten Mikrosystemtechnik bietet ein Umdenken hinsichtlich Modularisierung den unverkennbaren Vorzug geringerer Herstell- und Entwicklungskosten durch mehrfache Verwendung einzelner Module in verschiedenen Systemen. Speziell im Bereich optischer Sensor- und Analyse-systeme eröffnet die Modularisierung neue Märkte, die diesen Systemen aus Kostengründen bisher verschlossen blieben. Die vorliegende Arbeit zeigt anhand eines modifizierten, aktiv einstellbaren Mach-Zehnder Mikrointerferometers in modularer Bauweise die Entwicklung, Realisierung und Charakterisierung aktorbasierter mikrooptischer Systeme auf. Als Basis dient die LIGA-Technologie in Kombination mit kommerziell verfügbaren Systemkomponenten.

ISSN 1869-5183

ISBN 978-3-86644-529-1

