



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7234

Mikrooptische Sensoren nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip

P. Lücke, A. Last, J. Mohr
Institut für Mikrostrukturtechnik

Juli 2006

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7234

**Mikrooptische Sensoren
nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip**

Peter Lücke^{*)}, Arndt Last, Jürgen Mohr

Institut für Mikrostrukturtechnik

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2006

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-072343

Mikrooptische Sensoren nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip

Zur Erlangung des akademischen Grads eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Diplom-Ingenieur Peter Lücke
geboren am 19.06.1976 in Hannover

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Mai 2006

Hauptreferent: Prof. Dr. Volker Saile

Korreferent: Prof. Dr. Hans Zappe

KURZFASSUNG

Eine zuverlässige und prozessnahe Vermessung von Präzisionsbauteilen mit Fertigungstoleranzen im Submikrometerbereich gewinnt in der Messtechnik zunehmend an Bedeutung. Insbesondere Messaufgaben an schwer zugänglichen Stellen, z.B. Form- und Rauheitsmessungen in tiefen Bohrungen mit kleinen Durchmessern stellen extreme Anforderungen an die Messtechnik und können mit heutigen taktilen und optischen Messsystemen nur eingeschränkt gelöst werden.

Ziel dieser Arbeit war es, miniaturisierte geradeaus und seitlich messende Abstandssensoren zu entwickeln, die zur prozessnahen Überwachung von Fertigungstoleranzen von kleinen mechanischen und optischen Präzisionsbauteilen geeignet sind. Hierzu wurde das chromatisch konfokale Messverfahren ausgewählt, das auf einer chromatischen Kodierung der Abstandsinformation basiert. Dieses optische Prinzip ermöglicht im Vergleich zu taktilen Verfahren eine deutlich schnellere und kräftefreie Abtastung von Objekten und zeichnet sich gegenüber anderen optischen Messverfahren insbesondere durch Longitudinalauflösungen im Nanometerbereich, große numerische Aperturen und kleine Messfleckdurchmesser aus.

Chromatisch konfokale Sensoren bestehen aus drei wesentlichen Komponenten: einer Lichtquelle, einem Sensorkopf und einer spektralen Detektoreinheit. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nach einer Evaluation fasergekoppelte Superlumineszenzdiode als Lichtquelle ausgewählt. Um die Sensorsysteme anschließend in Koordinatenmessmaschinen integrieren zu können wurde ein an die Anforderungen des Sensorsystems angepasstes LIGA-Mikrospektrometer neu entwickelt, mit dem hohe Messgenauigkeiten und Messraten von bis zu 1 kHz möglich sind.

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit bestand in der Entwicklung der beiden Sensorköpfe. Eine Miniaturisierung der Sensorköpfe gelang durch die Kombination von refraktiven und diffraktiven mikrooptischen Elementen. Unter anderem mit Hilfe der LIGA-Technik wurden verschiedene freistrahloptische und integriert-optische Designkonzepte und Fertigungsverfahren anhand von Demonstratoren experimentell untersucht.

Am geeignetsten erwies sich ein integriert-optischer Aufbau auf Basis von Gradientenindex-Linsen. Realisiert wurden ein seitlich messender Sensorkopf mit einem Durchmesser von 1,2 mm sowie ein geradeaus messender Sensorkopf mit einem Außendurchmesser von 2,8 mm. Im Rahmen der Charakterisierung des Gesamtsystems gelang der Nachweis von Höhenauflösungen des seitlich messenden Sensors von unter 20 nm und des geradeaus messenden Sensorkopfs im Bereich von 10 nm.

Die Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts Nr. OD2001-038 „Hybride mikrooptische Sensoren (HymoSens)“ zusammen mit dem Institut für Technische Optik (ITO) der Universität Stuttgart sowie den Firmen Mahr GmbH in Göttingen und Boehringer Ingelheim microParts GmbH aus Dortmund.

Chromatic Confocal Microoptical Distance Sensors

ABSTRACT

Reliable and near process measurements of high precision components with sub micrometer tolerances are becoming increasingly important in modern production metrology. Especially measuring tasks of parts difficult to access, for example form and surface measurements of deep drilled holes with small diameters place high demands on today's tactile and optical measurement systems and can not be solved completely.

This work focuses on the development of miniaturized straight and perpendicular measuring distance sensors, suitable for near process monitoring tight tolerances of small optical and mechanical high precision parts. The chromatic confocal principle was selected, which is based on a chromatic coding of the distance information. Compared to tactile measurement techniques this optical principle allows faster and contactless object scanning. In regard to other optical measurement techniques this optical principle features longitudinal resolution in the nanometer scale, large numerical apertures and small measurement spot diameters.

Chromatic confocal sensors consist of three main elements: a light source, a sensor head and a spectral detection unit. After evaluation, fibre coupled superluminescent diodes were selected as light sources. For the following integration of the sensor systems in coordinate measurement systems a specially adapted LIGA micro spectrometer was developed. This spectrometer enables high measurement accuracies and measurement rates up to 1 kHz.

The central task of this work was the development of perpendicular and straight measuring sensor heads. Miniaturization of the sensor heads succeeded in combining refractive and diffractive micro optical elements. Additionally, LIGA-technology was used to experimentally verify a range of free-space and integrated optical design concepts.

An integrated optical design based on gradient index lenses proved to be the most suitable for miniaturized chromatic confocal sensors. A perpendicular measuring sensor head with a diameter of 1.2 mm and a straight measuring sensor with an outside diameter of 2.8 mm were fabricated. Within the characterization of the entire sensor system height resolutions of about 20 nm of the perpendicular measuring and 10 nm of the straight measuring sensor head have been demonstrated.

This work was supported by the German Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), project number OD2001-038 „Hybride microoptical sensors (HymoSens) “. The Institute of Applied Optics (ITO) of the University of Stuttgart and the companies Mahr GmbH, Göttingen and Boehringer Ingelheim microParts GmbH, Dortmund participated in this joint research project.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts HymoSens. Ich möchte mich bei allen bedanken, die mir diese Doktorarbeit ermöglicht haben:

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Volker Saile, der mich bereits im Studium bei meiner Diplomarbeit an der University of Washington in Seattle unterstützte, danke ich ganz herzlich für seine Förderung meiner Arbeit und für die Übernahme des Hauptreferats. Bei Herrn Prof. Dr. Hans Zappe bedanke ich mich ebenfalls ganz herzlich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Herrn Dr. Jürgen Mohr und Herrn Dr. Arndt Last für die vielen Diskussionen, Anmerkungen und die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts. Insbesondere Herr Dr. Last hat mit seiner unkonventionellen Kreativität entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Peter Lehmann von der Firma Mahr GmbH für seine angenehme und unkomplizierte Art, das Projekt HymoSens zu koordinieren und bei Herrn Aiko Ruprecht und Herrn Christof Pruss sowie den beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Technische Optik (ITO) der Universität Stuttgart. Mein Dank gilt auch Herrn Dr. Joachim Fuchs vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA-PFT) sowie Herrn Thorsten Zilch und Herrn Sven Schönfelder von der Firma Boehringer Ingelheim microParts GmbH.

Großen Dank schulde ich allen Mitarbeitern des IMT für die spannende und lehrreiche Zeit sowie für die engagierte Mitarbeit an dieser Promotion, insbesondere Dr. Pascal Meyer, Dr. Martin Börner, Eva-Maria Lessle, Dr. Lothar Hahn, Andreas Bacher, Doris Goldacker, Dr. Herbert Hein, Sandra Wilson, Barbara Matthis, Timo Emmert, Rolf Ehnes, Richard Thelen, Giuseppe Papagno, Dr. Berthold Krevet, Ulrich und Karin Klein, Rudi Wittemann, Alexandra Moritz, Marie Nowotny, Dagmar Felkel, Hermann Hellriegel und Nina Giraud.

Besonders bedanken möchte ich mich für die tolle, unterstützende und motivierende Arbeitsatmosphäre in der Optikgruppe, die entscheidend von Dr. Patric Henzi, Dr. Dominik Rabus, Dr. Christian Solf, Dr. Carlos Moran-Iglesias, Prof. Dr. Ulrike Wallrabe, Dr. Timo Mappes, Jeanine Chrobak-Kando, Mathias Bründel, Yasuhisa Ichihashi, Michael Schlagenhof und Wolfgang Kaboth geprägt wurde.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Andreas Hofmann vom Institut für Angewandte Informatik (IAI) und Dr. Oliver Baldus vom Institut für Materialforschung (IMF-I) für ihre Hilfe und Unterstützung, sowie bei den Studenten Philip Weinzierl, Benjamin Ross und Johann Töws, die mit ihrem Einsatz und Engagement wesentlich am Aufbau des Messstandes und den Messungen beteiligt waren.

Karlsruhe, im April 2006

Peter Lücke

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen.....	4
2.1	Konfokales und chromatisch konfokales Messverfahren.....	4
2.1.1	Konfokales Messverfahren	4
2.1.2	Chromatisch konfokales Messverfahren.....	5
2.2	Übersicht über das LIGA-Verfahren	6
3	Allgemeiner Sensoraufbau	9
3.1	Lichtquelle.....	10
3.1.1	Xenon-Bogenlampen	10
3.1.2	Superlumineszenzdioden	10
3.2	Diffraktive optische Elemente	11
3.2.1	Herstellung über Lithographie und Trockenätzen.....	12
3.2.2	Herstellung mittels Laserablation.....	12
3.3	LIGA-Mikrospektrometer.....	14
3.4	Übersicht über die chromatisch konfokalen Sensorköpfe.....	16
4	Seitlich messender Sensorkopf.....	17
4.1	Freistrahloptisches Sensordesign basierend auf einer LIGA-Bank	18
4.1.1	Design der mikrooptischen LIGA-Bank.....	19
4.1.2	LIGA-Maskendesign	21
4.1.3	Fertigung der mikrooptischen LIGA-Bank.....	22
4.1.4	Montage der Sensorköpfe	23
4.1.5	Charakterisierung der freistrahloptischen Sensorköpfe	25
4.1.5.1	Aufbau des Messstands.....	25
4.1.5.2	Ergebnisse mit Weißlichtquelle	26
4.1.5.3	Ergebnisse mit Superlumineszenzdioden	28
4.2	Integriert-optisches Sensordesign mit gelaserten diffraktiven Elementen	30
4.2.1	Design des integriert-optischen Sensorkopfs	31
5	Geradeaus messender Sensorkopf.....	33
5.1	Integriert-optisches Sensordesign	34
5.1.1	Justage mit LIGA-Klemmstrukturen	35
5.1.1.1	Fertigung und Montage	37
5.1.2	Justage mit rund vereinzelt diffraktiven Elementen	37
6	Mikrospektrometer für die Signalauswertung	39
6.1	Auslegung des Mikrospektrometers	39
6.2	Design des Mikrospektrometers	41
6.3	Herstellung des Mikrospektrometers mit Hilfe des LIGA-Verfahrens	42
6.4	Charakterisierung des Mikrospektrometers	43
7	Charakterisierung des Gesamtsystems	46
7.1	Messauswertung von chromatisch konfokalen Sensorssystemen	46
7.2	Ergebnisse des seitlich messenden Sensorsystems.....	47

7.3	Ergebnisse des geradeaus messenden Sensorsystems.....	50
7.3.1	Sensorkopf mit LIGA-Justagestrukturen.....	50
7.3.2	Sensorkopf mit rund vereinzelt diffraaktiven Elementen.....	53
8	Zusammenfassung und Ausblick	55
Anhang A	Literaturverzeichnis.....	59

*Wer bei der Verfolgung der Wissenschaften nach unmittelbarem Nutzen jagt,
kann ziemlich sicher sein, dass er vergebens jagen wird.*

Hermann von Helmholtz (1821 – 1894)

1 Einleitung

Eine zuverlässige und prozessnahe Vermessung von Präzisionsbauteilen, die kleine, schwer zugängliche Strukturelemente mit geringen Toleranzen aufweisen, gewinnt in der Automobil-, Elektro- und Halbleiterindustrie sowie in der Mikrosystemtechnik zunehmend an Bedeutung [1]. Als Beispiele für solche Bauteile lassen sich aus dem Bereich der Optik Glasfasersteckersysteme, asphärische Linsen und mikrostrukturierte Strahlführungssysteme (z.B. Kfz-Scheinwerfer, Rückleuchten und Reflektoren) anführen. Auf dem Gebiet der Kfz-Einspritztechnik existieren hohe Forderungen an die Einhaltung von Fertigungstoleranzen im Submikrometerbereich von Vertiefungen mit Durchmessern von wenigen Millimetern [2]. Diese geforderten Fertigungsgenauigkeiten können nur mittels geeigneter Mess- und Prüfverfahren gewährleistet werden, allerdings sind hierzu heutige taktile und optische Messsysteme nur eingeschränkt in der Lage.

Taktile Messgeräte geraten insbesondere bei Strukturen mit großen Aspektverhältnissen, d.h. bei Strukturen mit im Verhältnis zur Breite hohen Strukturteilen, an ihre physikalischen Grenzen. Die Messkraft, mit der ein Tastelement auf das Messobjekt gedrückt wird, muss einerseits sehr gering sein, um Deformationen an der Oberfläche des Objektes und andererseits Durchbiegungen des Tastelementes zu vermeiden. Bei ungünstigen Geometrieverhältnissen, wie z.B. in tiefen Bohrungen mit kleinen Durchmessern, kann eine Durchbiegung des Taststiftes und eine daraus resultierende Erhöhung der Messunsicherheit kaum vermieden werden. Taktile Präzisionsmessungen werden deswegen bei niedrigen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen Messobjekt und Tastelement durchgeführt, um die Antastkräfte so gering wie möglich zu halten [2].

Eine deutlich schnellere und kräftefreie Abtastung von Objekten erlauben optische Messsysteme. Diese sind aber ebenfalls Störeffekten unterworfen, z.B. durch Beugung an Kanten und Speckle-Effekten aufgrund von Oberflächenrauigkeiten. Auch die Oberflächenneigung eines Messobjektes gegenüber der optischen Achse des Sensors kann bei optischen Messverfahren nur begrenzt toleriert werden. Insbesondere bei Messungen an stark geneigten Flächen treten Probleme auf, da das reflektierte Licht in diesen Fällen nicht mehr durch die Apertur des Messsystems erfasst wird [2].

Für optische Geometriebestimmungen stehen prinzipiell interferometrische Verfahren, Triangulations- und Autofokus- sowie konfokale Messverfahren in vielfältigen Ausführungsformen zur Verfügung. Allerdings scheiden Triangulationsverfahren für Präzisionsmessungen aufgrund ihrer unzureichenden Auflösung aus [3]. Auf Interferometrie basierende miniaturisierte Punktsensoren wurden in der Vergangenheit bereits vorgeschlagen und realisiert: beispielsweise auf Basis der Heterodyntechnik [4], bei der eine Frequenzverschiebung zwischen Mess- und Referenzstrahl erzeugt wird oder basierend auf phasenverschiebenden Verfahren [5]. Ein Nachteil dieser Methode besteht aufgrund der benötigten Tiefenschärfe des Fokuspunktes auf dem Messobjekt, die sich über den gesamten Messbereich erstrecken muss.

Daraus resultiert entweder ein kleiner Messbereich oder eine geringe numerische Apertur. Weitere Nachteile bestehen aufgrund des erheblichen gerätetechnischen Aufwands, den damit verbundenen hohen Kosten sowie der hohen Störanfälligkeit [2].

Für die vorliegende Arbeit wurde das chromatisch konfokale Messprinzip ausgewählt. Dieses erlaubt Longitudinalauflösungen im Nanometerbereich, ist robust gegenüber Störlicht und große numerische Aperturen dieser Sensoren erlauben Messungen auch auf geneigten Oberflächen. Beim chromatisch konfokalen Messverfahren wird eine polychromatische Punktlichtquelle über eine Optik so auf die Messoberfläche abgebildet, dass mit steigendem Abstand von dem Sensor jeweils eine andere Farbe auf der Messoberfläche im Fokus ist. Das vom zu messenden Objekt reflektierte Licht wird über eine Lochblende auf eine Glasfaser abgebildet und in ein Spektrometer eingekoppelt. Durch die Lochblende gelangt nur Licht aus dem Zentrum des Messflecks in das Spektrometer. Aus dem spektralen Intensitätsmaximum des reflektierten Signals lässt sich dann auf den Abstand des Objekts schließen [6]. Nach diesem Prinzip arbeitende Punktsensoren, die mit konventionellen (refraktiven) optischen Elementen realisiert wurden, sind kommerziell erhältlich [7], [8].

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zwei miniaturisierte Sensorsysteme zu entwickeln, die auf dem chromatisch konfokalen Messprinzip basieren: Ein Sensor mit 90° -Winkelumlenkung und einen geradeaus messenden Abstandssensor. Die Herausforderung bestand darin, eine passende Lichtquelle auszuwählen und die beiden Sensorköpfe sowie ein für diese Anwendung optimiertes Mikrospektrometer neu zu entwickeln. Die zentrale Aufgabe war die Entwicklung der beiden Sensorköpfe, die sich jeweils durch wenige Millimeter große Messkopfdurchmesser kombiniert mit einer großen numerischen Apertur und einer Longitudinalauflösung im Submikrometerbereich auszeichnen mussten. Hierzu war es erforderlich, jeweils verschiedene mikrooptische Designkonzepte und Fertigungsverfahren für die Sensorköpfe anhand von Demonstratoren experimentell zu evaluieren. Für die anschließende Integration der Sensorköpfe in ein Messsystem musste ein an die Anforderungen des Sensorsystems angepasstes Mikrospektrometer neu entwickelt werden, um eine möglichst hohe Messgeschwindigkeit und -genauigkeit erzielen zu können.

Neben einer allgemeinen Übersicht über das chromatisch konfokale Messverfahren wird im Kapitel 2 das im Rahmen dieser Arbeit verwendete LIGA-Verfahren (**L**ithographie, **G**alvanik, **A**bformung) kurz vorgestellt. Im darauf folgenden Kapitel wird der allgemeine Aufbau des Sensorsystems beschrieben. Die wesentlichen Komponenten des Systems, Lichtquelle, diffraktive optische Elemente und LIGA-Mikrospektrometer, werden näher erläutert.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensoraufbau mit 90° -Winkelumlenkung. Vorgestellt werden ein freistrahloptischer sowie ein integriert-optischer Ansatz. Neben dem Design und der Herstellung werden die Ergebnisse der Charakterisierung präsentiert.

Für einen geradeaus messenden Sensorkopf wurden zwei integriert-optische Designvarianten entwickelt. Die beiden Varianten unterscheiden sich im Ansatz zur Justage der diffraktiven optischen Elemente. Das Design sowie die Herstellung der Sensorköpfe werden in Kapitel 5 diskutiert.

Auf Basis der Ergebnisse aus den Kapiteln 4 und 5 wurden die Anforderungen an das LIGA-Mikrospektrometer festgelegt. Im Kapitel 6 werden das Design und die Entwicklung des Spektrometers sowie die optische Charakterisierung dargestellt.

Der Aufbau und die Charakterisierung des Sensorsystems bestehend aus Lichtquelle, Sensorkopf und Mikrospektrometer werden in Kapitel 7 beschrieben. Zusammenfassung und ein Ausblick finden sich in Kapitel 8.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt Nr. OD2001-038 „Hybride mikrooptische Sensoren (HymoSens)“. An diesem sind neben dem Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) das Institut für Technische Optik (ITO) der Universität Stuttgart sowie die Firmen Mahr GmbH in Göttingen und Boehringer Ingelheim microParts GmbH aus Dortmund beteiligt.

I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely in your thoughts advanced to the state of Science, whatever the matter may be.

Lord Kelvin (1824 – 1907)

2 Grundlagen

Die beiden im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensorköpfe (siehe Kapitel 4 und 5) basieren auf dem chromatisch konfokalen Messprinzip. Zum Verständnis dieser Arbeit wird dieses Messverfahren im folgenden Abschnitt kurz beschrieben. Zur Herstellung der Sensorköpfe und eines zur Erfassung der Messsignale eingesetzten Mikrospektrometers wurde das LIGA-Verfahren verwendet. Das LIGA-Verfahren eignet sich insbesondere zur Herstellung von Mikrostrukturen mit großer Strukturhöhe (im Millimeterbereich). Die wesentlichen Prozessschritte dieses Verfahrens werden im zweiten Abschnitt dieses Kapitels kurz dargestellt.

2.1 Konfokales und chromatisch konfokales Messverfahren

Um das in dieser Arbeit verwendete chromatisch konfokale Messprinzip besser erklären zu können, wird zunächst das konfokale Messverfahren erklärt und anschließend darauf aufbauend das chromatisch konfokale Verfahren.

2.1.1 Konfokales Messverfahren

Die konfokale Messtechnik hat sich als ein äußerst robustes und zuverlässiges Verfahren zur Vermessung von technischen Oberflächen erwiesen [9], [10]. Konfokale Abstandssensoren wurden in der Vergangenheit überwiegend als Punktsensoren realisiert.

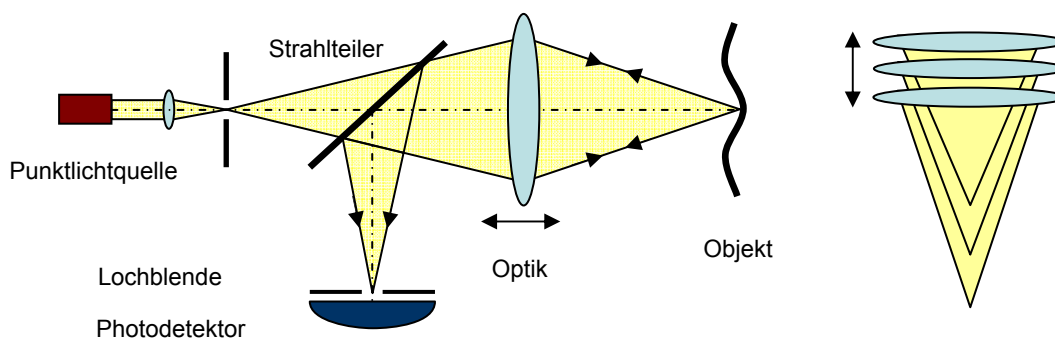


Abb. 2-1 Konfokales Messprinzip mit mechanischem Tiefenscan

Hierzu wird eine Punktlichtquelle auf eine zu vermessende Oberfläche abgebildet. Der Fokuspunkt auf der Oberfläche wird zurückreflektiert und durch eine Lochblende auf einen Detektor abgebildet [11]. Befindet sich die Oberfläche in der Fokusebene, wird die Punktlichtquelle scharf auf den Detektor abgebildet, wodurch auf dem Detektor eine hohe Intensität gemessen wird (siehe Abb. 2-1). Befindet sich die Fläche außerhalb des Fokus, ist die Abbildung der Lichtquelle sowohl auf der Oberfläche als auch auf dem Detektor unscharf und die detektierte Intensität ist geringer. Eine Abstandsmessung mit einem konfokalen Sensor erfolgt deswegen über einen Tiefenscan (siehe Abb. 2-1). Die sich mit dem Abstand z von der

Fokusebene ändernde Intensität auf dem Detektor kann mit Hilfe der Point-Spread-Funktion (Punkt-Spreizungs-Funktion - PSF) (2.1) beschrieben werden [6], [12].

$$I(z) = \left[\frac{\sin(u)}{u} \right]^2 = \text{sinc}^2(u), \quad \text{mit } u = \frac{1}{2} k NA^2 z \quad \text{und} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.1)$$

Dabei ist λ die Wellenlänge, NA die numerische Apertur der abbildenden Linse und k die Kreiswellenzahl. Die Breite der Intensität (Full Width at Half Maximum - FWHM - Halbwertsbreite) dieses Signals hängt ebenfalls von der Wellenlänge λ und der numerischen Apertur der abbildenden Linse ($NA = \sin(\alpha)$) ab und kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\text{FWHM} = \frac{0,443 \lambda}{1 - \cos(\alpha)} \quad (2.2)$$

Bei der Konzeption eines konfokalen Sensors spielt die Wahl der numerischen Apertur (NA) in mehrfacher Hinsicht eine wichtige Rolle. Bei glatten Oberflächen verhält sich der maximal zulässige Neigungswinkel eines Messobjektes gegenüber der optischen Achse des Sensors proportional zu der numerischen Apertur der Sensoroptik. Außerdem bestimmt die NA die Größe des Messflecks: Je größer die numerische Apertur gewählt wird, desto kleiner wird der realisierbare Messfleck. Kleine Messfleckdurchmesser ermöglichen den Einsatz des Sensors sowohl in der Form- als auch in der Oberflächenmesstechnik [2]. Ebenso ist die Messunsicherheit Δ_z mit der numerischen Apertur des Sensors verknüpft [1]:

$$\Delta_z \sim \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 \quad (2.3)$$

mit α_1 und α_2 als den Öffnungswinkeln der Sende- bzw. Empfangsoptik. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Aufbau (siehe Abb. 2-2) wird für die Beleuchtung und den Empfang die gleiche Optik verwendet, d.h. die Winkel sind identisch: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Mit der Wahl eines großen Öffnungswinkels α bzw. einer großen numerischen Apertur des Sensors verringert sich die Messunsicherheit.

Ein miniaturisierter konfokaler Punktsensor mit äußeren Abmessungen von 1,2 mm × 2,5 mm, der mit einem mechanischen Tiefenscan arbeitet, wird in [13] beschrieben. Der mechanische Tiefenscan erfordert jedoch bewegliche Bauteile, die eine weitere Miniaturisierung des Sensorkopfes erschweren.

2.1.2 Chromatisch konfokales Messverfahren

Weiteres Miniaturisierungspotential ergibt sich durch das Anwenden des chromatisch konfokalen Messprinzips. Nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip arbeitende Abstandssensoren kommen ohne Tiefenscan aus und benötigen deswegen keine beweglichen Bauteile [14], [15], [16], [17], [18]. Bei diesem Prinzip wird polychromatisches Licht abhängig von der Wellenlänge in unterschiedlichen Abständen fokussiert, d.h. der Abstand wird im Messbereich chromatisch kodiert (siehe Abb. 2-2). Je nach Abstand der zu messenden Oberfläche ist damit nur das Licht eines sehr schmalen Wellenlängenbereichs auf der Oberfläche fokussiert. Das übrige Licht verteilt sich konzentrisch zu diesem Fokuspunkt auf eine größere Fläche. Das von der Oberfläche reflektierte Licht wird über eine Lochblende auf einen wel-

lenlängensensitiven Detektor abgebildet. Durch die Blende gelangt fast ausschließlich Licht aus dem fokussierten Wellenlängenbereich auf den Detektor. Aus dem spektralen Intensitätsmaximum des reflektierten Signals lässt sich dann über eine Kalibrierung die Distanz zur Oberfläche ermitteln.

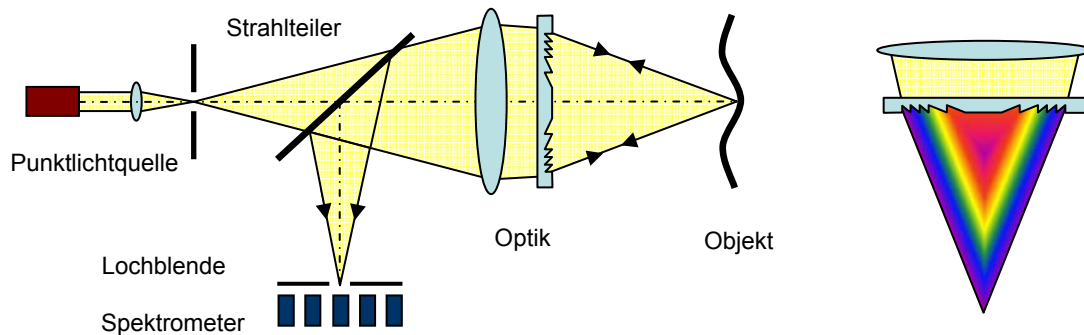


Abb. 2-2 Konfokales Messprinzip mit chromatischen Tiefenscan

Beim chromatisch kodierten Messverfahren lässt sich die Intensitätsverteilung und Halbwertsbreite analog zu den Formeln (2.1) und (2.2) ermitteln [19]. Allerdings verteilt sich die Intensität in Abhängigkeit der Wellenlänge λ um die zugehörige Position z_λ . Die Intensitätsverteilung für einen beliebigen Abstand z ergibt sich daher wie folgt [20]:

$$I(z) = \left[\frac{\sin(u)}{u} \right]^2 = \text{sinc}^2(u), \quad \text{mit } u = \frac{1}{2} k \text{NA}^2 (z - z_\lambda) \text{ und } k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.4)$$

Ein weiterer Vorteil des chromatischen Prinzips besteht darin, dass der Sensor in seinem Messbereich ohne Scannen die gesuchte Abstandsinformation ermitteln kann und dadurch wesentlich höhere Messraten möglich sind.

Zur Herstellung von miniaturisierten Sensorköpfen, die auf dem chromatisch konfokalen Messprinzip basieren, werden Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen und mit geringen Oberflächenrauigkeiten benötigt.

2.2 Übersicht über das LIGA-Verfahren

Um derartige Mikrostrukturen mit senkrechten Seitenwänden und Strukturhöhen bis zu mehreren Millimetern zu fertigen, wurde am IMT das LIGA-Verfahren entwickelt. Dieses Verfahren besteht im Wesentlichen aus drei Prozessschritten, nach denen es benannt ist: **L**ithographie, **G**alvanik und **A**bformung [21].

Im ersten Schritt des LIGA-Verfahrens wird Synchrotronstrahlung als Lichtquelle zur Lithographie (Röntgentiefenlithographie - RTL) eingesetzt (Abb. 2-3). Die hierzu benötigte Röntgenarbeitsmaske besteht aus Absorberstrukturen und einer für Röntgenlicht möglichst transparenten Membran. Aktuell werden am IMT als Material für die Maskenmembran entweder 2,7 μm dicke Titanfolien oder ca. 500 μm dicke Berylliumwafer verwendet. Der für die Strukturierung von mehreren hundert Mikrometern hohen Strukturen erforderliche Röntgenkontrast wird über 20 μm bis 40 μm dicke, galvanisch abgeschiedene Goldabsorber erreicht. Die

Herstellung einer derartigen Arbeitsmaske gelingt aufgrund der erforderlichen Strukturhöhe der Goldabsorber nicht in einem Schritt, sondern mit Hilfe der Röntgentiefenlithographie durch Umkopieren einer Zwischenmaske auf die Arbeitsmaske.

Die Herstellung der Röntgenzwischenmaske erfolgt über Belichtung eines $3,5\ \mu\text{m}$ starken Resists mit einem Elektronenstrahlschreiber. Anschließend werden die entwickelten Strukturbereiche etwa $2,2\ \mu\text{m}$ hoch galvanisch mit Gold aufgefüllt. Mit Hilfe der Arbeitsmaske können direktlithografische Bauteile durch die Röntgentiefenlithographie hergestellt werden. Dabei werden die Goldabsorber mittels der parallelen Synchrotronstrahlung durch „Schattenwurf“ in einen bis zu mehrere hundert Mikrometer dicken Röntgenresist (Polymethylmethacrylat - PMMA) übertragen. Aufgrund der sehr kleinen Wellenlänge ($0,2\ \text{nm} - 2\ \text{nm}$) der Synchrotronstrahlung und der großen Strahlparallelität ($\leq 1\ \text{mrad}$) treten bei der Kopie einer Maske in das Resistsystem kaum Abbildungsfehler auf. Die Röntgenstrahlung führt in dem Polymer zu Kettenbrüchen und damit zu einer Verringerung des Molekulargewichts in den bestrahlten Bereichen. Diese Bereiche können anschließend mit einem geeigneten Lösungsmittel („GG-Entwickler“) herausgelöst werden [21].

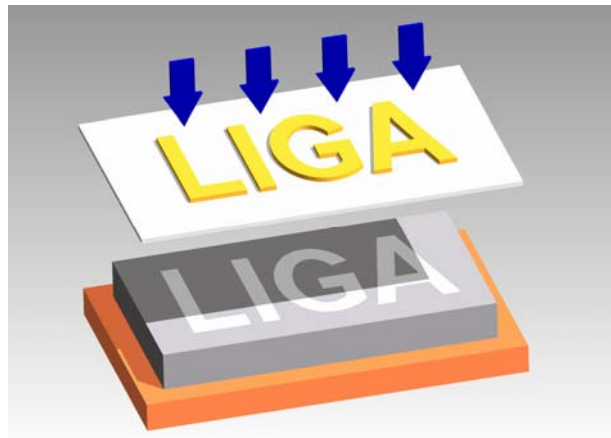


Abb. 2-3 Röntgenlithografische Herstellung von Mikrostrukturen mit Hilfe einer Röntgenarbeitsmaske [22]

Den zweiten Schritt des LIGA-Verfahrens bildet die Herstellung eines Abformwerkzeugs mittels Galvanik (Abb. 2-4). Hierzu wird mit Hilfe der Arbeitsmaske ein direktlithografisches Bauteil auf einer Kupfergrundplatte strukturiert. Diese Strukturen werden mit Nickel galvanisch aufgefüllt und einige Millimeter stark übergalvanisiert. Die Nickelschicht wird anschließend vom Substrat getrennt und mechanisch nachbearbeitet. Die so entstandenen Komplementärstrukturen dienen anschließend als Abform- oder Spritzgusswerkzeug zur kostengünstigen Massenreplikation von weiteren Mikrobauanteilen [23].

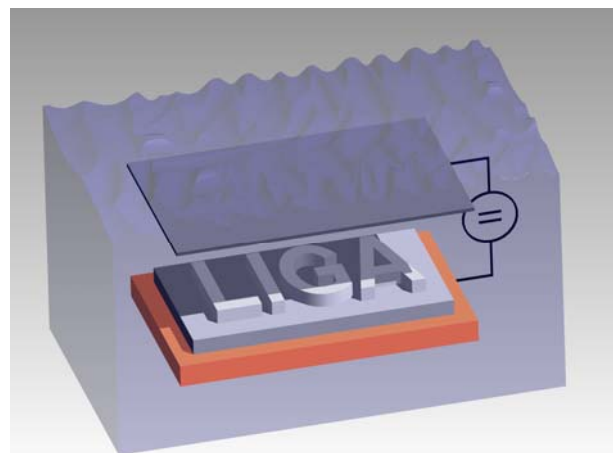


Abb. 2-4 Herstellung des Abformwerkzeugs [22]

Im dritten Schritt des LIGA-Verfahrens wird mit dem hergestellten Werkzeug (Abb. 2-5) abgeformt. Dazu wird das Abformwerkzeug unter Druck in einen Thermoplast (z.B. PMMA oder Polycarbonat) gedrückt. Das beheizte Abformwerkzeug erwärmt dabei den Kunststoff über seine Glasübergangstemperatur. Nach einer Haltezeit und einer teilweisen Abkühlung des Werkzeuges kann das Abformteil entformt werden [24].

Am IMT wird das LIGA-Verfahren in den Bereichen Fluidik, Mikromechanik sowie für optische Anwendungen eingesetzt. Für LIGA-Mikrostrukturen, die in optischen Anwendungen Einsatz finden, ist die geringe Rauigkeit und die hohe Vertikalität der Strukturseitenwände, sowie die hohe Präzision der Strukturen selbst, aber auch die hohe Positioniergenauigkeit der Strukturen zueinander von besonderem Vorteil. Aufgrund dieser Eigenschaften lassen sich so genannte mikrooptische Bänke realisieren, die als Führungsstrukturen und Halteelemente für hybride Bauteile dienen. Die optische Transparenz der Werkstoffe im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich erlaubt es, optische Elemente wie Zylinderlinsen, Mikroprismen und wellenleitende Module herzustellen [25].

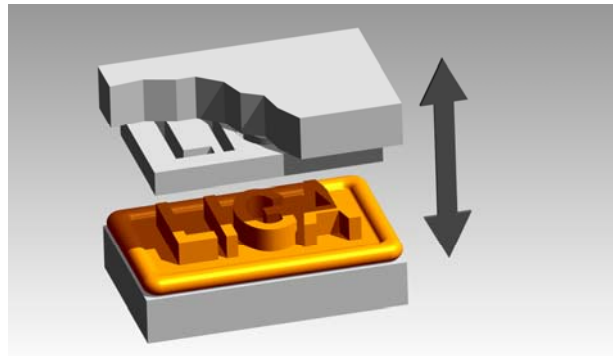


Abb. 2-5 Abformung (Vakuum-Heißprägen) von Mikrostrukturen in Kunststoff [22]

Obwohl die eigentliche Stärke des LIGA-Verfahrens in der Fertigung von Mikrostrukturkomponenten durch Abformung in großen Stückzahlen liegt, stellt die Röntgentiefenlithographie allein bereits ein wichtiges Werkzeug dar, wenn es z.B. um die Herstellung von Kleinserien oder Prototypen geht [25]. Die in dieser Arbeit vorgestellten Demonstratoren wurden direktlithografisch hergestellt, d.h. auf die Herstellung von Abformwerkzeugen wurde aufgrund der vorerst geringen Stückzahlen verzichtet. Insbesondere durch die Verfügbarkeit der Synchrotronquelle ANKA am FZK und die weitestgehende Standardisierung aller erforderlichen Prozessschritte und Parameter kann das LIGA-Verfahren am IMT als Technologie auf industriellem Niveau eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich die am IMT etablierten Standardprozesse genutzt, die in der Literatur ausführlich beschrieben sind [21], [26].

Probleme kann man niemals mit der gleichen Denkweise lösen durch die sie entstanden sind.

Albert Einstein (1879 - 1955)

3 Allgemeiner Sensoraufbau

Die wesentlichen drei Komponenten eines nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip arbeitenden Sensorsystems (siehe Kapitel 2.1) sind die Lichtquelle, der Sensorkopf mit einer entsprechenden Optik und eine spektrale Analyseeinheit, z.B. ein Spektrometer. Eine große Herausforderung dieser Arbeit war es, diese drei Komponenten zu konzipieren und so aufeinander abzustimmen, dass die geforderten Eigenschaften erfüllt werden und gleichzeitig das Sensorsystem mit diesen Komponenten unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten als Serienprodukt realisierbar ist.

Um das Miniaturisierungspotential des Sensorkopfes weitestgehend auszuschöpfen, sollte das Messsystem modular aufgebaut werden, d.h. der Sensorkopf sollte von der Lichtquelle und dem Detektor getrennt sein. Eine einfache Lösung stellt die Verbindung der einzelnen Module mit Glasfasern und einem Y-Koppler dar (siehe Abb. 3-1) [27], [28]. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Anordnung gewählt, in der die Stirnfläche der Glasfaser im Sensorkopf gleichzeitig als Punktlichtquelle und als Lochblende für den Detektor fungiert. Dies gelang durch Verwendung von Singlemodedfasern mit Kerndurchmessern $\leq 10 \mu\text{m}$. Dadurch wird die Anzahl der Komponenten des Sensors auf eine minimale Anzahl reduziert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Lichtquellen evaluiert, die im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt werden. Um die geforderte Auflösung und Miniaturisierung der Sensoren erzielen zu können, wurden im Sensorkopf diffraktive optische Elemente (DOE) eingesetzt. Das Design und die verwendeten Herstellungsverfahren der diffraktiven Strukturen werden im Abschnitt 3.2 beschrieben. Zur Auswertung der Sensorsignale wurde ein neues LIGA-Mikrospektrometer entwickelt (siehe Kapitel 6). Der prinzipielle Aufbau und die Funktion von LIGA-Spektrometern werden im dritten Abschnitt dieses Kapitels vorgestellt. Ein Überblick über die entwickelten chromatisch konfokalen Sensorköpfe wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels gegeben.

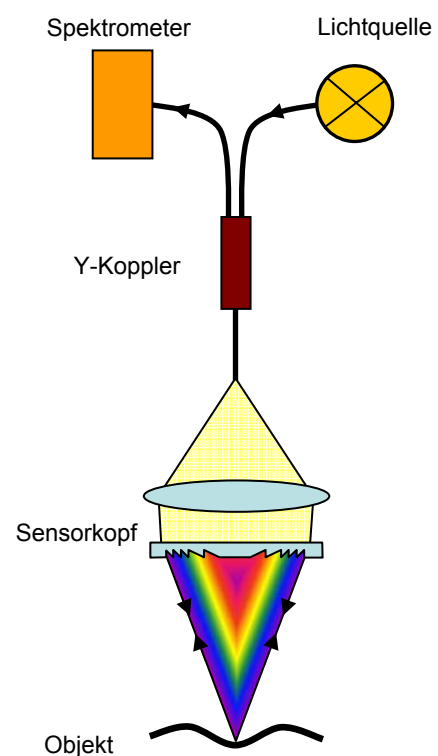


Abb. 3-1 Aufbau eines chromatisch konfokalen Abstandssensors

3.1 Lichtquelle

Die Herausforderung bei der Auswahl der Lichtquelle bestand darin, eine Quelle mit den im Folgenden angeführten Eigenschaften zu finden. Die Lichtquelle sollte in einem Teilbereich des Spektrums zwischen 500 nm und 1000 nm emittieren. Das Spektrum sollte eine möglichst große Bandbreite aufweisen, idealerweise > 100 nm, um einen großen Messbereich zu ermöglichen. Aufgrund der Abhängigkeit zwischen den gemessenen chromatisch konfokalen Intensitätsmaxima und der spektralen Intensitätsverteilung der Lichtquelle sollte die Lichtquelle ein möglichst kontinuierliches Spektrum aufweisen, um eine hohe Dynamik des Sensors zu ermöglichen. Zudem sollte die Lichtquelle fasergekoppelt sein, um den Sensor miniaturisieren zu können. Um die geforderte Messrate des Sensors von > 1 kHz zu erreichen, wird am Detektormodul eine hinreichende Signalintensität benötigt, d.h. es wird in der Glasfaser eine möglichst hohe Lichtintensität benötigt. Des Weiteren sollte die Lichtquelle inkohärent sein, um störende Speckle-Effekte an den zu vermessenden technischen Oberflächen zu vermeiden.

Im Hinblick auf die geplante Kommerzialisierung des Sensorsystems kamen die Forderungen nach einer kleinen Baugröße, geringen Anschaffungs- und Betriebskosten sowie einer kommerziellen Verfügbarkeit der Lichtquelle hinzu. Eine Lichtquelle, die alle geforderten Eigenschaften erfüllt, ist aktuell nicht verfügbar. Die im Rahmen dieser Arbeit ausgewählten Lichtquellen werden im Folgenden vorgestellt.

3.1.1 Xenon-Bogenlampen

Um einen Spektralbereich von 400 nm – 750 nm nutzen zu können, wurde eine Xenon-Bogenlampen (PerkinElmer, Cemax XL2000) mit einer Leistung von 300 W verwendet. Das Lampensystem benutzt einen elliptischen Spiegel zur Fokussierung. Der Lichtbogen der Lampe befindet sich in einem Brennpunkt des Halbellipsoids. Zur Einkopplung wird eine Glasfaser mit einem Verschiebesystem in den zweiten Brennpunkt gebracht. Allerdings ist der Lichtbogen der Lampe deutlich größer als der Kerndurchmesser der verwendeten Singlemodelfaser. Hinzu kommt die geringe räumliche Kohärenz von Xenon-Bogenlampen, so dass eine effiziente Faserkopplung nicht möglich ist. Entsprechend konnten nur wenige μW an Intensität in die Faser eingekoppelt werden. Die typische Lebensdauer des Lampenmoduls wird vom Hersteller mit 1000 Stunden angegeben [29].

3.1.2 Superlumineszenzdiolen

Die Lichterzeugung in Superlumineszenzdiolen beruht auf verstärkter spontaner Emission (Amplified Spontaneous Emission - ASE). Die Diode ist wie eine Halbleiterlaserdiole aufgebaut, nur sind die Endflächen des Resonators nicht verspiegelt. Im aktiven Medium entstehen Photonen durch spontane Emission, die beim Durchlauf bis zur Endfläche durch stimulierte Emission verstärkt werden. Superlumineszenzdiolen bieten den Vorteil eines relativ breiten Spektrums (bis 100 nm Halbwertsbreite), einer geringen räumlichen Kohärenz von 10 μm bis 20 μm bei einer gleichzeitig gut in Fasern einkoppelbaren hohen optischen Leistung von derzeit bis 20 mW [30].

Superlumineszenzdiolen sind in den Wellenlängenbereichen von 670 nm bis 1610 nm kommerziell verfügbar. Die Lebensdauer wird von Herstellern mit bis zu 100.000 Stunden Medium Time To Failure (MTTF) angegeben [30]. Weitere Vorteile sind die geringe Leis-

tungsaufnahme und damit geringe Abwärme sowie die kleine Baugröße und damit die leichte Integrierbarkeit in Messmaschinen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Superlumineszenzdiolen (SLD) mit den Spektralbereichen $820 \text{ nm} \pm 12,5 \text{ nm}$ und $930 \text{ nm} \pm 35 \text{ nm}$ mit mindestens 3 mW in die Faser gekoppelter Intensität verwendet.

3.2 Diffraktive optische Elemente

Das chromatisch konfokale Messprinzip basiert auf der chromatischen Variation der Fokusslängen. Zur Erzeugung dieser wellenlängenabhängigen Verschiebung der Brennpunkte eignen sich diffraktive optische Elemente [31], [32]. Der Vorteil von diffraktiven Strukturen im Vergleich zu rein refraktiven optischen Elementen liegt in der wesentlich stärkeren chromatischen Aufspaltung. Nachteile von DOEs sind ihre begrenzte Beugungseffizienz und das Auftreten von höheren Beugungsordnungen. Typische diffraktive optische Elemente zeichnen sich durch konzentrische Ringstrukturen aus und werden allgemein auch als Fresnel-Zonenlinsen bezeichnet. Die Abb. 3-2 zeigt einen radialen Querschnitt durch eine diffraktive Linse.



Abb. 3-2 Schematischer Querschnitt durch eine diffraktive Linse

Die in den verschiedenen Zonen erzeugte unterschiedliche Phasenverschiebung der Strahlung führt zu konstruktiver Interferenz in den Brennpunkten. Dazu werden die konzentrischen Ringstrukturen so gestaltet, dass sich die optische Weglänge von an benachbarten Strukturen gebeugtem Licht in Bezug auf einen gemeinsamen Fokus durch ganzzahlige Vielfache der Design-Wellenlänge λ_D unterscheidet. Für den Radius r_j des j^{ten} Rings und der zugehörigen Fokusslänge f gilt [33]:

$$r_j^2 + f^2 = (f + j\lambda_D)^2 \quad (3.1)$$

Unter der Annahme dass $f \gg j_{\text{max}} \lambda$ können die Radien r_j bzw. der Brennweite f wie folgt genähert werden:

$$r_j \approx \sqrt{2j\lambda_D f} \quad (3.2)$$

$$f \approx \frac{r_j^2}{2j\lambda_D} \quad (3.3)$$

Die Formel (3.1) beschreibt die monochromatischen Eigenschaften einer diffraktiven mikrooptischen Linse. Beim Einsatz von diffraktiven optischen Elementen in einem chromatisch konfokalen Sensor wird die starke chromatische Dispersion genutzt. Die Abhängigkeit zwischen Wellenlänge und Brennweite lässt sich in Anlehnung an Formel (3.3) wie folgt beschreiben [33]:

$$\frac{\partial f}{\partial \lambda} = -\frac{f}{\lambda} \quad (3.4)$$

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten diffraktiven Strukturen wurden am Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart simuliert und entwickelt [34].

3.2.1 Herstellung über Lithographie und Trockenätzen

Die in dieser Arbeit im Wesentlichen verwendeten diffraktiven Strukturen wurden am Institut für Technische Optik (ITO) über Grautonlithographie gefolgt von einem Trockenätzschritt (Reactive Ion Etching, RIE) hergestellt (siehe Abb. 3-3). Die Grautonbelichtung der am Computer generierten DOEs geschieht mit einem Lasersystem (HTK, Polarkoordinaten-System CLWS 300). Dieses System arbeitet bei der Wellenlänge 458 nm und wurde speziell für die Herstellung von diffraktiven optischen Elementen entwickelt [35], [36].

Die Strukturen werden mit 16 verschiedenen Graustufen und einer Auflösung von 0,5 µm in einen Positivresist (Rohm and Haas, Microposit S1828) geschrieben. Zusätzlich zu den diffraktiven Strukturen werden binäre Justagemarkierungen für den folgenden LIGA-Prozess in den Resist geschrieben. Das entwickelte Resistprofil wird anschließend mittels RIE in 300 µm dicke Quarzglas-Substrat übertragen.

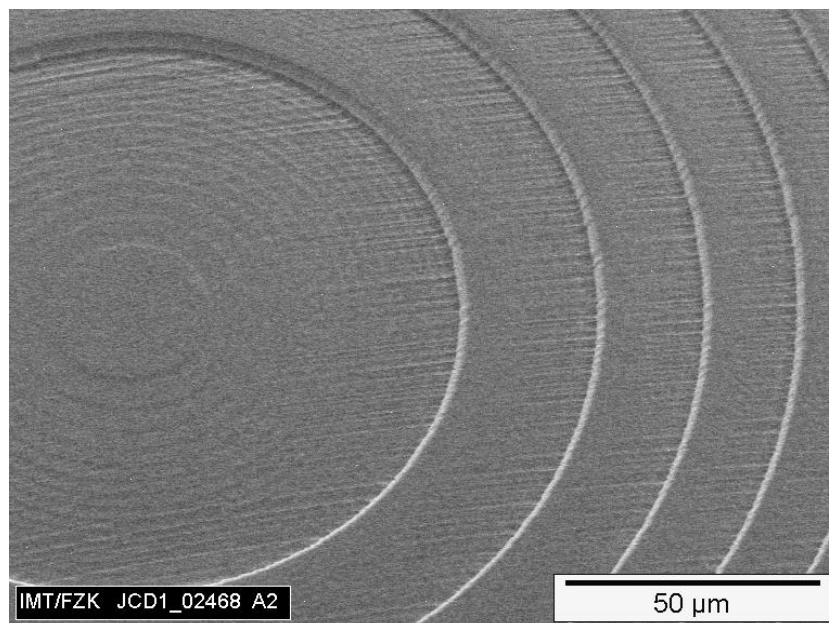


Abb. 3-3 REM-Aufnahme eines durch Lithographie und Trockenätzen hergestellten diffraktiven Elements

3.2.2 Herstellung mittels Laserablation

Eine weitere flexible Methode zur Herstellung von diffraktiven optischen Elementen, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, stellt die Laserablation dar. Mit Hilfe der Laserablation können Kunststoffe, Keramiken, Metalle oder biologische Materialien durch einen fein fokussierten und gepulsten Laserstrahl mit einer Präzision im sub-Mikrometerbereich abgetragen werden [37].

Die Herstellung von diffraktiven Elementen mittels Laserablation ist aufgrund der hohen Transparenz des verwendeten Quarzglases bis weit in den UV-Bereich schwierig. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten und mit der Laserablation hergestellten Strukturen (siehe Kapitel 4.2) wurden am Laserlaboratorium Göttingen hergestellt. Die Herstellung erfolgte mit Hilfe eines Fluor-Lasers (F_2) bei 157 nm in Kombination mit einer Schwarzschild-Optik zur Maskenprojektion. Der Einsatz von Masken ermöglicht die Erzeugung von Oberflächenreliefstrukturen mit sub-Mikrometer-Auflösung.

Der Vorteil der Laserablation im Vergleich zu dem im vorhergehenden Absatz beschriebenen Trockenätzverfahren besteht in der Möglichkeit, dass die diffraktiven Strukturen nicht auf einem separaten Substrat hergestellt werden, sondern sich direkt in refraktive optische Elemente oder optische Komponenten integrieren lassen (siehe Kapitel 4.2). Die Qualität der Strukturen ist allerdings im Vergleich zu den geätzten Strukturen schlechter (siehe Abb. 3-4).

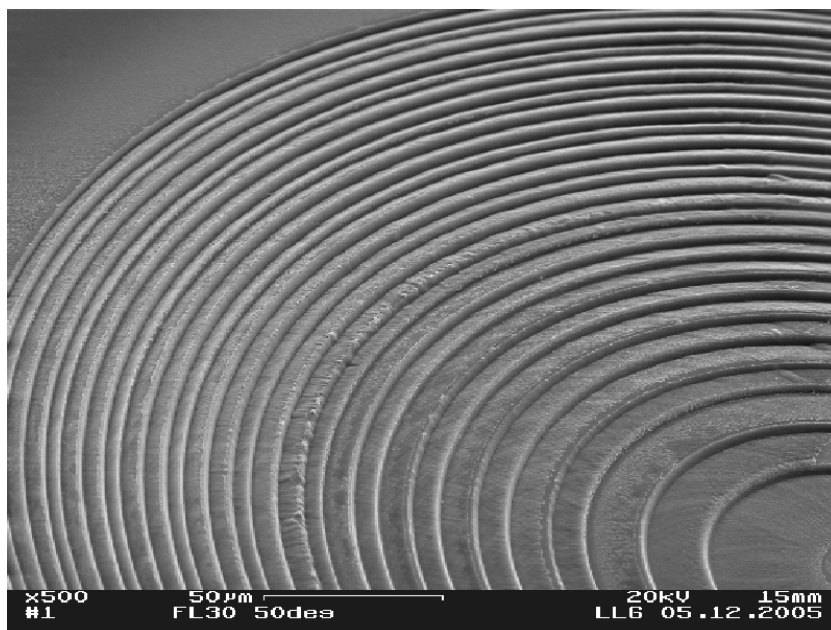


Abb. 3-4 REM-Aufnahme eines mit Laserablation hergestellten diffraktiven Elements (Aufnahme Laserlaboratorium Göttingen)

3.3 LIGA-Mikrospektrometer

Am IMT werden seit 1987 Mikrospektrometer mit Hilfe des LIGA-Verfahrens (siehe Kapitel 2.2) für unterschiedliche Wellenlängenbereiche entwickelt, die von der Firma Boehringer Ingelheim microParts GmbH, Dortmund, erfolgreich vermarktet werden [38]. Aufgrund der Anforderungen an die Sensorsysteme hinsichtlich Messgenauigkeit und -geschwindigkeit war die Entwicklung eines speziell an die Sensorsysteme angepassten Spektrometers erforderlich. Als Referenz für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und in Kapitel 6 vorgestellte Spektrometer wird das UV/VIS-Spektrometer (Layout-Nr. 0603) für den Wellenlängenbereich von 350-850 nm angeführt und an diesem Funktion und Aufbau von LIGA-Mikrospektrometern beispielhaft erklärt.

LIGA-Mikrospektrometer bestehen aus einer Einkopffaser, einem Lichteintrittsspalt, einem Hohlspiegel mit Beugungsgitter, einem Auskoppelspiegel, einem Detektor sowie Stützstrukturen, die einen Deckel halten (siehe Abb. 3-5). Das zu analysierende Licht wird über eine Lichtleitfaser und einen 50 μm breiten Eintrittsspalt in das Spektrometer eingekoppelt. Das UV/VIS-Spektrometer wird gewöhnlich mit einer Glasfaser mit einem Kerndurchmesser von 300 μm (330 μm Manteldurchmesser) und einer numerischen Apertur $NA = 0,22$ konfektioniert. Im Spektrometer wird das Licht durch Fresnelreflexionen zwischen dem verspiegelten Spektrometerboden und dem ebenfalls verspiegelten Deckel geführt. Durch diesen Hohlwellenleiter gelangt das Licht zum Gitter und wird dort durch Beugung in seine spektralen Bestandteile zerlegt. Das konkav gekrümmte Gitter (Gitterkonstante 4,7 μm) fokussiert das gebeugte Licht über einen um 40° gekippten Auskoppelspiegel auf einen Detektor. Als Detektor wird die Hamamatsu Detektorzeile S8378-256N eingesetzt.

Diese besteht aus 256 einzelnen Photodioden (oder Pixeln), die jeweils 25 μm breit und 500 μm hoch sind. Die mit dem 0603er Layout und dieser Detektorzeile erreichbare spektrale Auflösung liegt bei etwa 8 nm und die Dispersion bei 3,5 nm pro Pixel bzw. 0,14 nm / μm . Die mit dem LIGA-Verfahren hergestellten Strukturen (Eintrittsspalt, Gitter, Spiegel, Stützstrukturen) haben eine Höhe von 340 μm und äußere Abmaße von 20 mm \times 45 mm. Ein Vorteil dieses Aufbaus besteht darin, dass die notwendigen Komponenten Eintrittsspalt, Gitter und Auskoppelspiegel auf einem Bauteil integriert sind und durch Abformung bzw. direktlithografisch in einem Fertigungsschritt hergestellt werden können und nicht mehr zueinander justiert werden müssen [39].

Die entscheidende Komponente eines LIGA-Spektrometers ist das Gitter. Am Gitter wird das einfallende Licht abhängig von der Wellenlänge unter verschiedenen Winkeln gebeugt. Der

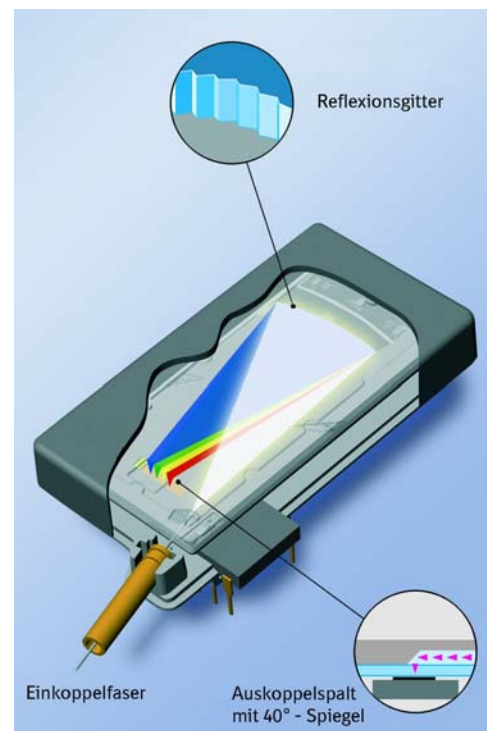


Abb. 3-5 Lichtweg innerhalb eines LIGA-Mikrospektrometers [38]

Beugungswinkel, unter dem das Licht den Detektor trifft, lässt sich mathematisch durch die so genannte Gittergleichung beschreiben:

$$\sin\alpha - \sin\beta = \frac{n\lambda}{d} \quad (3.5)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann für jede Wellenlänge λ , die auf ein Beugungsgitter mit der Gitterkonstante d unter einem Winkel α einfällt, der Lichtausfallwinkel β bestimmt werden, unter dem das Licht in der Ordnung n gebeugt wird.

Die am IMT entwickelten LIGA-Spektrometer basieren auf der so genannten Rowland-Kreisordnung [40]. In dieser Anordnung ist das Beugungsgitter konkav gekrümmt und verhält sich wie ein Hohlspiegel (siehe Abb. 3-6). Der Eintrittsspalt wird unabhängig von der Wellenlänge und Beugungsordnung über diesen Spiegel auf Punkte des Rowlandkreises abgebildet, auf dem der Detektor liegt, so dass keine weiteren optischen Elemente, wie z.B. Linsen erforderlich sind. Diese Anordnung hat sich aufgrund ihrer Unempfindlichkeit gegenüber thermischen Einflüssen bewährt.

Zur Steigerung der Beugungseffizienz werden die Gitter geblazt, d.h. die Gitterzahnflanken werden als einzelne Spiegel betrachtet und jeweils so ausgerichtet, dass das Licht in Richtung der gewünschten Beugungsordnung reflektiert wird [41]. Durch geschickte Wahl der Blazewellenlänge, für die das Gitter optimiert wird, kann die Empfindlichkeit des Spektrometers in einem Wellenlängenbereich verbessert werden. Die UV/VIS-Spektrometer werden z.B. auf 420 nm geblazt, um im kurzwelligen Spektralbereich Absorptionseffekte im Hohlwellenleiter und die geringe Empfindlichkeit des Detektors in diesem Wellenlängenbereich auszugleichen.

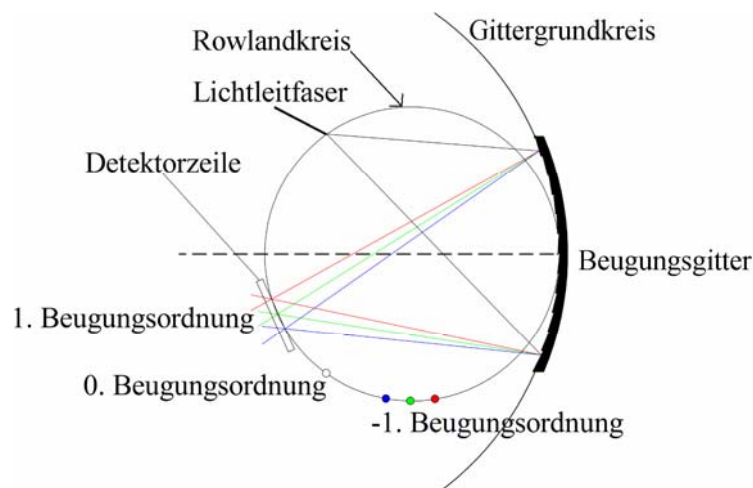


Abb. 3-6 Skizze eines Spektrometersystems in Rowland-Kreisordnung [22]

3.4 Übersicht über die chromatisch konfokalen Sensorköpfe

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auf Basis des chromatisch konfokalen Messprinzips ein seitlich und ein geradeaus messender Sensorkopf entwickelt. Der seitlich messende Sensor zeichnet sich durch eine 90° Strahlumlenkung aus, die ein seitliches Messen in Bohrungen mit Durchmessern von minimal 2 mm ermöglicht. Der geradeaus messende Sensor zeichnet sich durch eine hohe Messauflösung von circa 10 nm aus.

Von beiden Sensorköpfen wurden jeweils verschiedene Design- und Herstellungsvarianten realisiert und gegenübergestellt. Das folgende Diagramm gibt einen Überblick über die verschiedenen Sensorkopfvarianten, die in den beiden folgenden Kapiteln detailliert vorgestellt werden.

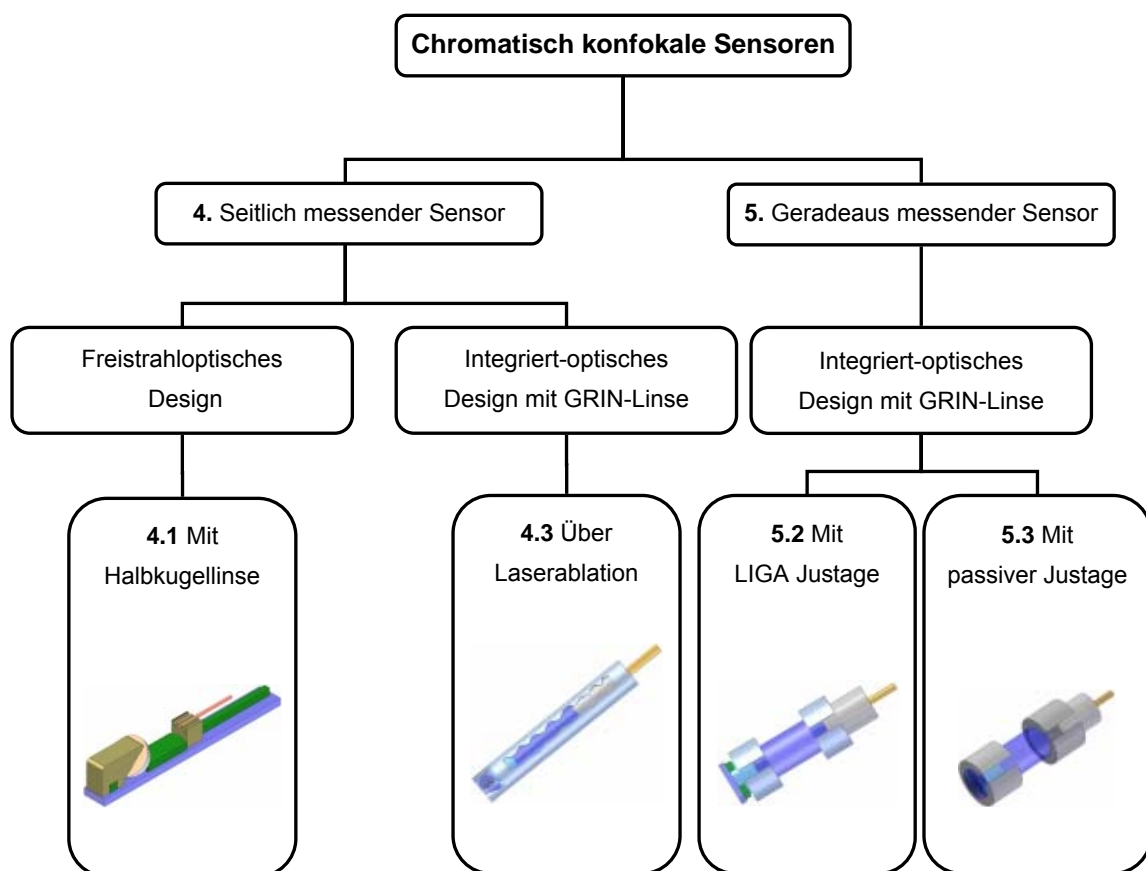


Abb. 3-7 Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensorköpfe

The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not "Eureka!" (I found it) but "That's funny..."

Isaac Asimov (1920 – 1992)

4 Seitlich messender Sensorkopf

In diesem Kapitel werden die Design- und Herstellungsvarianten des seitlich messenden Sensorkopfes beschrieben. Dieser Sensor zeichnet sich durch eine 90° Strahlumlenkung aus, die ein seitliches Messen in Bohrungen mit Durchmessern von minimal 2 mm ermöglicht. Auf Basis der am ITO durchgeführten Simulationen und der im Lastenheft (siehe Tab. 4-1) definierten Spezifikationen wurde der optische Aufbau des Sensorkopfes festgelegt.

Gesamtsystem	
Auflösung longitudinal	$\leq 20 \text{ nm}$
Messkopf	
Messkopfgröße	$\leq 2 \text{ mm}$ (Außendurchmesser)
Messbereich	$50 \text{ }\mu\text{m}$
Fokusedurchmesser	$\leq 6 \text{ }\mu\text{m}$
Numerische Apertur der Optik	$\geq 0,4$
Wellenlängenintervall	$> 100 \text{ nm}$
Durchmesser Faserkern	$10 \text{ }\mu\text{m}$
Numerische Apertur der Faser	0,10

Tab. 4-1 Lastenheft des seitlich messenden Sensorkopfs

Um die geforderte Miniaturisierung sowie die geforderten optischen Eigenschaften des Sensorkopfes erfüllen zu können, wurden ein refraktives und ein diffraktives mikrooptisches Element (siehe Kapitel 3.2) miteinander kombiniert. Das freie Faserende, aus dem das eingekoppelte Licht austritt, übernimmt im Sensorkopf die Funktion der Lichtquelle und der Lochblende. Das divergent aus der Faser austretende Licht wird von einem refraktiven optischen Element kollimiert und in Richtung der Objektfläche vorkollimiert. Das diffraktive Element fokussiert den Strahl weiter und erzeugt die chromatische Variation der Fokusslängen (Abb. 4-1).

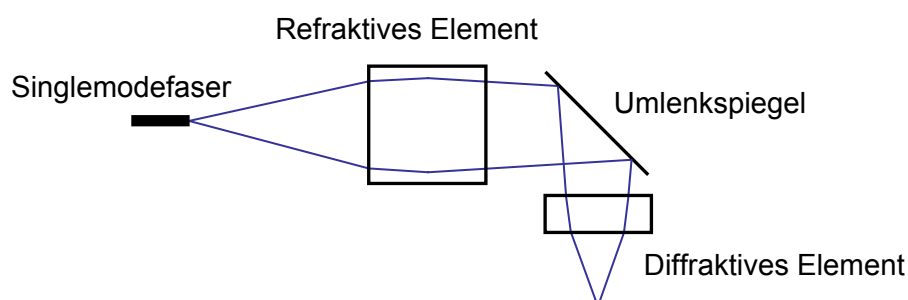


Abb. 4-1 Schematischer Aufbau des seitlich messenden Sensorkopfs

Simulationen am ITO ergaben, dass aus optischen Gründen das diffraktive Element als letztes optisches Element im Strahlengang angeordnet sein sollte, d.h. der zur 90° Strahlumlenkung erforderliche Umlenkspiegel und das refraktive Element sollten sich vor dem diffraktiven Element befinden [34]. Aufgrund dieser Bedingung und der geforderten Miniaturisierung muss der Umlenkspiegel im Strahlengang zwischen refraktiven und diffraktiven Element angeordnet werden.

Realisiert wurden ein freistrahloptisches Konzept auf Basis einer mikrooptischen LIGA-Bank, sowie ein integriert-optischer Ansatz mit einer GRIN-Linse.

4.1 Freistrahloptisches Sensordesign basierend auf einer LIGA-Bank

Eine mikrooptische LIGA-Bank dient dazu, die optischen Funktionselemente zu tragen und zueinander zu justieren. Die Herausforderung beim Design der mikrooptischen Bank für den seitlich messenden Sensor bestand darin, die refraktiven optischen Elemente mit den diffraktiven Strukturen zu kombinieren. Um die diffraktiven Elemente mit Durchmessern von 320 μm und 440 μm nicht mit hoher Präzision vereinzeln zu müssen, wurde das Quarzglas-Substrat mit den hineingeätzten diffraktiven Strukturen gleichzeitig als Substrat für die LIGA-Strukturen verwendet. Dadurch werden die Anzahl der Bauteile sowie der Montageaufwand des Sensorkopfes so gering wie möglich gehalten und ein maximaler Sensorkopfdurchmesser von 2 mm ermöglicht. Die Ausrichtung der LIGA-Strukturen relativ zu den diffraktiven Elementen erfolgte mit Hilfe von ebenfalls in das Quarzglas-Substrat geätzten Justagemarken. Die Justagetoleranzen zwischen den diffraktiven Strukturen und den refraktiven Elementen auf der mikrooptischen LIGA-Bank werden so durch die Genauigkeit der Ausrichtung der LIGA-Maske zu den diffraktiven Strukturen bestimmt. Anschließend werden die mit den diffraktiven Elementen kombinierten mikrooptischen LIGA-Bänke mit einer Wafer-Säge vereinzelt. Dabei sind die Toleranzen der Schnittlinien nicht funktionsrelevant und können entsprechend größer gewählt werden ($\pm 100 \mu\text{m}$).

Als refraktives Element wurde eine Kugellinse aus Quarzglas ausgewählt und entsprechende LIGA-Haltestrukturen konzipiert. Der zur Erfüllung der optischen Eigenschaften benötigte, minimale Durchmesser der Kugellinse von 1,5 mm wurde am ITO durch Simulationen ermittelt. Mit einem Linsendurchmesser von 1,5 mm lässt sich jedoch kein mikrooptischer Sensor mit dem geforderten Durchmesser von unter 2 mm konstruieren. Zur Strahlkollimierung und Fokussierung muss der Lichtstrahl eine ganze Kugellinse durchlaufen. Dies konnte folgendermaßen gelöst werden: Durch Reduzierung auf eine um 45° geneigte Halbkugellinse mit einer verspiegelten Planfläche, die den Strahl in der Halbkugellinse umlenkt, durchläuft das Licht quasi eine vollständige Kugellinse (siehe Abb. 4-2). Bei gleichem Durchmesser ändern sich die optischen Eigenschaften im Vergleich zur vollständigen Kugellinse nicht und es lässt sich ein Sensorkopf mit einem Durchmesser von 2 mm konstruieren. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass kein zusätzlicher Umlenkspiegel benötigt wird.

Das Konzept wurde am ITO mit Hilfe der Raytracing-Software Zemax simuliert (siehe Abb. 4-2) [34]. Die Abb. 4-3 zeigt die zugehörigen Simulationsergebnisse der Fokussdurchmesser.

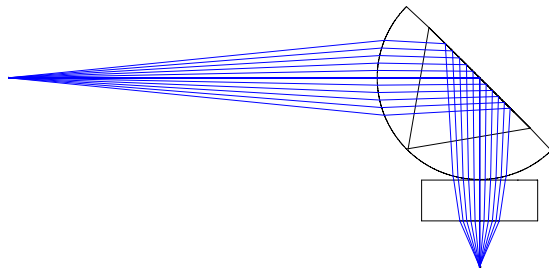


Abb. 4-2 Raytracing-Simulation des Konzepts mit Halbkugellinse und diffraktiven Element (ITO)

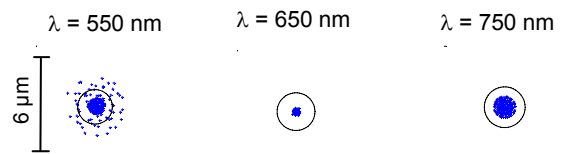


Abb. 4-3 Raytracing-Simulation der Fokusbildung für unterschiedliche Wellenlängen

Die auf geometrischer Optik basierenden Zemax Simulationen berücksichtigen allerdings keine Beugungseffekte. Der Kreisdurchmesser in der Mitte der jeweiligen Simulation entspricht dem Durchmesser des Airy-Scheibchens, d.h. dem durch Beugung begrenzten minimal möglichen Fokusbereich. Bei den simulierten Fokusbereichen, die deutlich kleiner als die Airy-Scheibchen ausfallen, werden die Abbildungen durch Beugung begrenzt, d.h. die Fokusbereiche entsprechen annähernd dem Airy-Scheibchen. Eine im Rahmen dieser Simulationen durchgeführte Toleranzanalyse ergab, dass die Glasfaser, das refraktive und diffraktive Element sowie der Umlenkspiegel zur Erfüllung der optischen Eigenschaften mit einer Genauigkeit von $\leq \pm 10 \mu\text{m}$ zueinander positioniert werden müssen [34], [42].

4.1.1 Design der mikrooptischen LIGA-Bank

Um die erforderlichen Justagegenauigkeiten der einzelnen Komponenten zueinander erreichen zu können, wurde die mikrooptische LIGA-Bank um ein selbstjustierendes Schienen-Reiter-Konzept erweitert (siehe Abb. 4-4). Die Strukturierung der Schienen-Strukturen erfolgte mit dem LIGA-Verfahren. Auf diese Schienen wurden separat strukturierte Halteelemente gesetzt und über Anschläge exakt positioniert. Mit Hilfe der Haltestrukturen werden die Glasfasern und die Halbkugellinse arretiert.

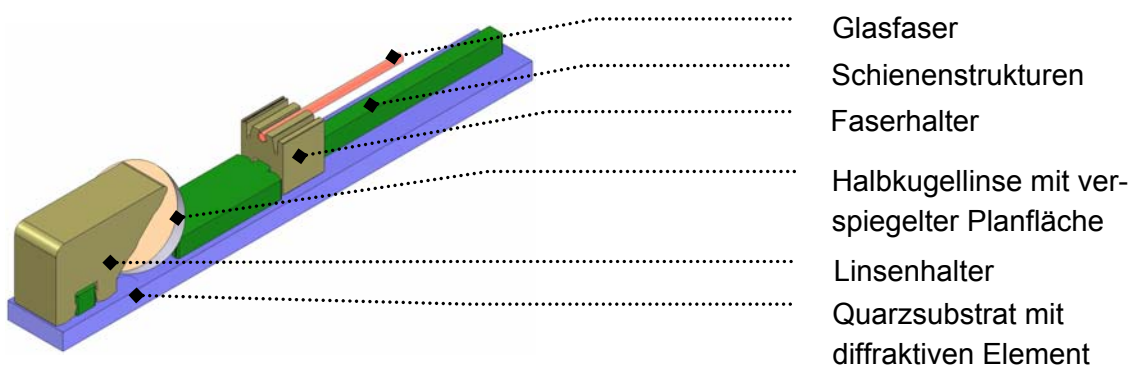


Abb. 4-4 Sensoraufbau mit rückseitig verspiegelter Halbkugellinse

Die jeweils relevanten Lagetoleranzen sind durch die Seitenwände der Schienen bzw. durch Anschlüsse an der Schiene definiert. Dieses Konzept ermöglicht eine flexible Anpassung des Sensoraufbaus, insbesondere des Abstandes zwischen der Faserstirnfläche und dem diffraktiven Element. Dieser Abstand ist abhängig vom Spektrum der verwendeten Lichtquelle.

4. Seitlich messender Sensorkopf

le. Das Aufbaukonzept mit der Halbkugellinse wurde für eine Weißlichtquelle sowie für eine SLD als Lichtquelle ausgelegt (siehe Kapitel 3.1).

Mit Hilfe von Faserhaltern wird eine exakte Positionierung, sowie eine stabile Halterung der Faser gewährleistet. Bisherige am IMT entwickelte Faserhalter basieren auf V- oder U-Gruben, in denen die Faser zwischen zwei bzw. drei Ebenen gelagert wird [43]. Um eine genauere Positionierung zu erzielen, sowie um montagebedingte Verkippungen der Faser entlang ihrer Längsachse zu vermeiden, wurde ein neues Faserhalter-Konzept mit zusätzlicher Klemmfunktion entwickelt (siehe Abb. 4-5).

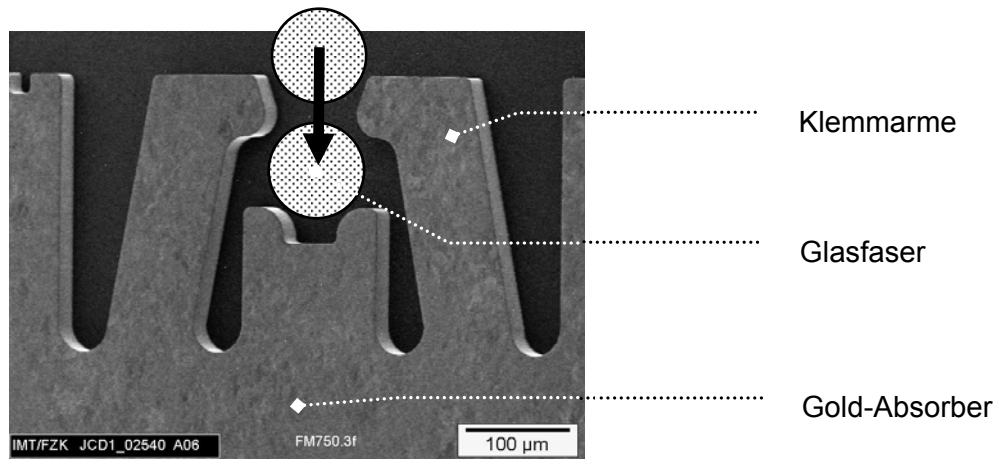


Abb. 4-5 Gold-Absorber von Faserhaltern auf der LIGA-Arbeitsmaske

Zur Montage wird die Faser auf die Klemmvorrichtung gelegt und dadurch vorjustiert. Die Höhe der Klemmarme ist so ausgelegt, dass von oben flächig auf die Faser gedrückt werden kann und die Faser dann zwischen den zwei Klemmarmen einrastet (siehe Abb. 4-5). Es wurden drei verschiedene Faserhalter mit unterschiedlich starken Klemmarmen entworfen. Die Konzeptionen basieren auf mit ANSYS durchgeführten FEM-Simulationen. Die Auslegung erfolgt unter den Gesichtspunkten, Spannungsspitzen zu vermeiden und Verformungen nur im elastischen Bereich zuzulassen. Die Breite der Klemmarme beträgt bei Variante a) 300 μm, bei Faserhalter b) 130 μm und bei den flexiblen Klemmarmen c) 100 μm (siehe Abb. 4-6). Zur Halterung und Justage der Halbkugellinsen wurden zwei Ansätze verfolgt, zum einen mit rückseitigem Anschlag (Abb. 4-7 a), der andere mit zwei Klemmarmen (Abb. 4-7 b).

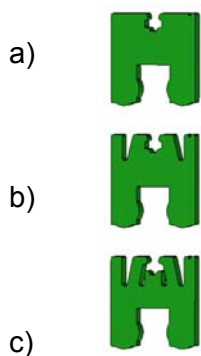


Abb. 4-6 Faserhalter-Varianten

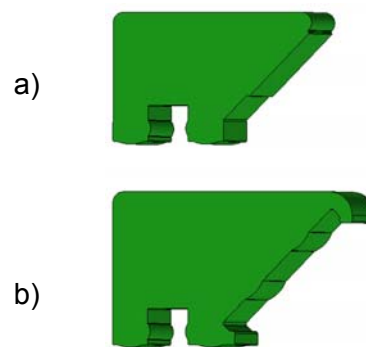


Abb. 4-7 Linsenhalter-Varianten

Die Fertigungstoleranzen des vollständigen Sensorkopfaufbaus wurden in einer Toleranzanalyse unter den folgenden Annahmen abgeschätzt: Die mit dem LIGA-Verfahren und der Laserplotter-Lithographie hergestellten Strukturen verfügen über eine absolute Toleranz von $\pm 0,5 \mu\text{m}$. Die Genauigkeit der Ausrichtung von der LIGA-Maske zu den diffraktiven Strukturen beträgt maximal $\pm 5 \mu\text{m}$. Die Halbkugellinsen werden mit einer Durchmesser-toleranz von $1500 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, einer Mittentoleranz von $750 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ und einer Rauigkeit der Planfläche von $\lambda/10$ gefertigt. Unter diesen Annahmen können die zur optischen Funktionserfüllung vorgegebenen Toleranzen in Höhe von $\pm 10 \mu\text{m}$ eingehalten werden.

Im Hinblick auf eine spätere automatisierte Fertigung des Sensorkopfes wurden bereits in der Designphase fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt, wie z.B. die Handhabung und Montage der Bauteile mit automatisierten Greifsystemen. Die gerade hochgezogenen äußeren Seitenwände der Halter (siehe Abb. 4-6) sollen die Handhabung der Faserhalter, z. B. beim Greifen vereinfachen.

4.1.2 LIGA-Maskendesign

Zur Herstellung der Schienen- und der Haltestrukturen wurden zwei separate Titan-Arbeitsmasken konzipiert: eine Maske für die $300 \mu\text{m}$ hohen Schienenstrukturen der optischen Bank (Layout-Nr. 0724-00-A0, Los-Nr. 02437) und eine Maske für die $750 \mu\text{m}$ hohen Haltestrukturen (Layout-Nr. 0725-00-A0, Los-Nr. 02540).

Bei der Auslegung des Maskendesigns ist auf eine fertigungsgerechte Gestaltung zu achten. Die berücksichtigten Gestaltungsrichtlinien orientieren sich an den Regeln des IMT bzw. sind [44] entnommen. Im Wesentlichen wurde auf eine symmetrische und gleichmäßig verteilte Anordnung der Absorberstrukturen auf der Maske geachtet, um während des LIGA-Prozess entstehende, innere Spannungen zu minimieren.

Um eventuell auftretende Fertigungstoleranzen des LIGA-Verfahrens ausgleichen zu können, sind die mehrfach auf den jeweiligen Masken vorhandenen Strukturen mit Maßvorhalten versehen. Diese betragen neben dem eigentlichen Soll-Maß plus und minus $2 \mu\text{m}$.

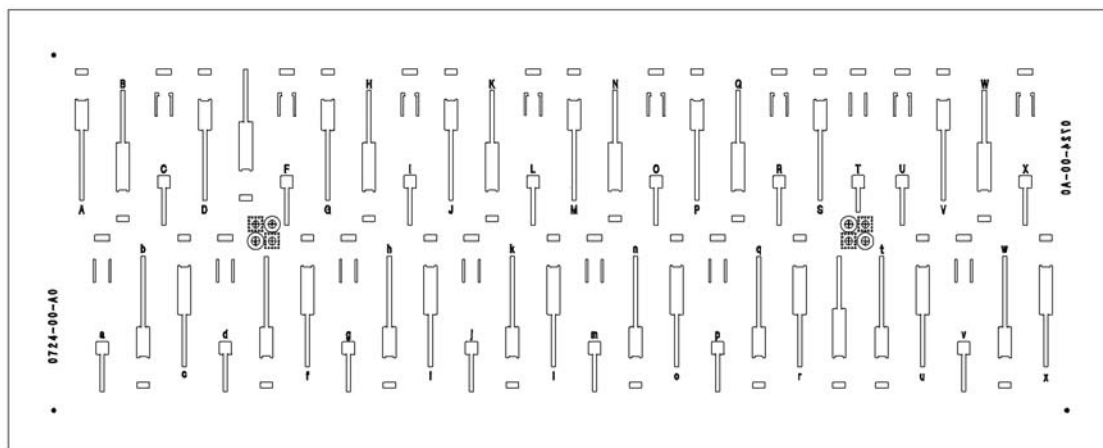


Abb. 4-8 Maskenlayout mit Schienenstrukturen und Justagekreuzen, Layout-Nr. 0724-00-A0

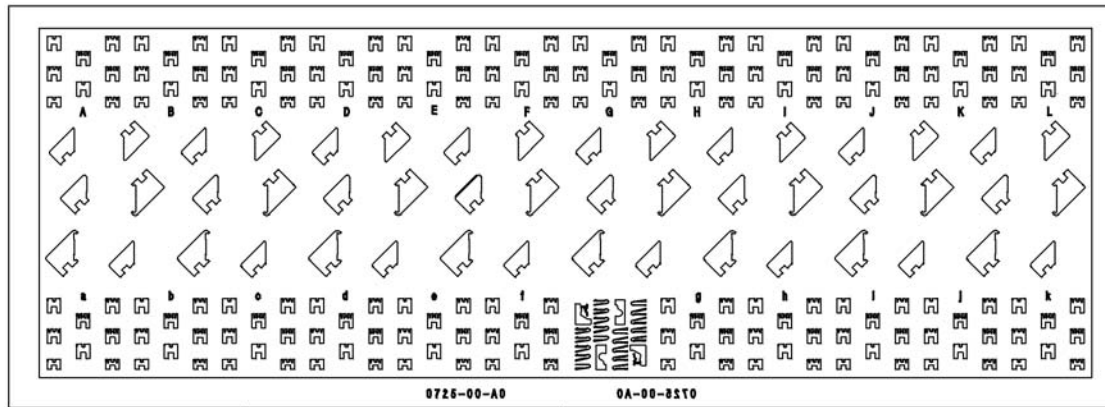


Abb. 4-9 Maskenlayout mit Haltestrukturen, Layout-Nr. 0725-00-A0

Neben der fertigungsgerechten Gestaltung der Maske ist auf eine prüfgerechte Gestaltung zu achten. Die einzelnen Strukturen weisen gerade Kanten auf, die eine einfache lichtmikroskopische Vermessung ermöglichen. Zusätzlich besitzen die verschiedenen Maßvariationen Markierungen, die ein leichtes Unterscheiden ermöglichen. Zur Orientierung auf der Maske und zur eindeutigen Zuordnung eines jeden Elements sind beide Masken in Segmente unterteilt bzw. die Strukturen direkt alphabetisch gekennzeichnet.

4.1.3 Fertigung der mikrooptischen LIGA-Bank

Für die Fertigung der mikrooptischen LIGA-Bank kamen im Wesentlichen die am IMT standardisierten Fertigungsverfahren zum Einsatz (siehe Kapitel 2.2). Daher wird im Folgenden die Fertigung nur kurz dargestellt, bzw. die Fertigungsschritte detaillierter beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit modifiziert oder neu entwickelt wurden:

Zuerst wurden die diffraktiven Strukturen zusammen mit Justierkreuzen am ITO mittels Laserplotter-Lithographie und RIE in die Rückseite von 300 μm dicken Quarzglas-Substraten geätzt (siehe Kapitel 3.2). Anschließend erfolgte am IMT auf der Vorderseite die Strukturierung der 300 μm hohen PMMA-Schienenelemente (siehe Abb. 4-10) mittels Röntgentiefenlithographie. Hierzu wurden 300 μm dicke PMMA-Plättchen auf die Vorderseite des Quarzglassubstrats geklebt. Die Ausrichtung der Justagekreuze der LIGA-Maske zu den geätzten Kreuzen erfolgte unter einem Lichtmikroskop. Die im Anschluss an die Strukturierung gemessenen Dejustierungen der LIGA-Strukturen zu den geätzten Strukturen entsprachen den im Vorfeld angenommenen Toleranzen von $\pm 5 \mu\text{m}$. Die Quarzglas-Wafer selbst ließen sich wie die ansonsten verwendeten Siliziumsubstrate handhaben, lediglich aufgrund der geringen Dicken war ein noch vorsichtigerer Umgang erforderlich. Die anschließende Vereinzelung der Quarzsubstrate mit den Schienenstrukturen war ebenfalls unproblematisch. Die Wafer wurden hierzu auf eine Adhäsionsfolie geklebt und mit einer Wafer-Säge vereinzelt (Mitsubishi, Silicon Dicing Wheel, Typ 4645100).

Zur Herstellung der Haltestrukturen (siehe Abb. 4-11) wurden 750 μm dicke PMMA-Plättchen auf polierte Siliziumsubstrate geklebt und mittels Röntgentiefenlithographie strukturiert.

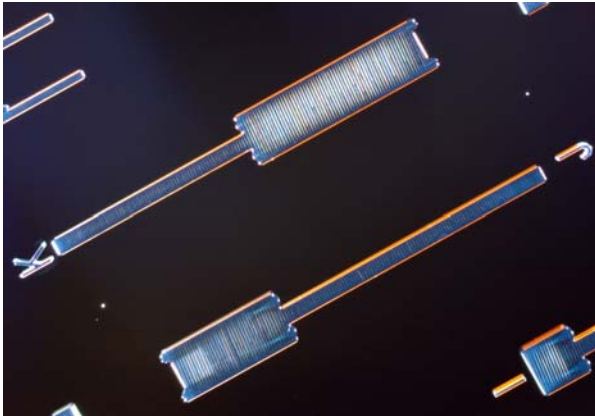


Abb. 4-10 300 µm hohe Schienen

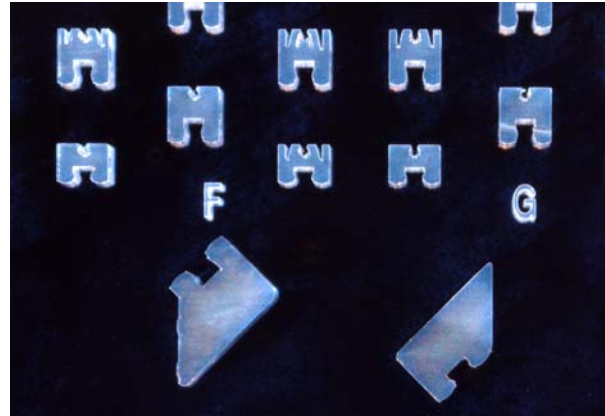


Abb. 4-11 750 µm hohe Haltestrukturen

Um zur Montage die Strukturen möglichst ohne Beschädigungen und spannungsfrei vom Substrat lösen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Ansatz erprobt: Der beim Kleben mit Plexidon M 727 verwendete Vernetzer und Haftvermittler Methacryloxypropyltrimethoxysilan (MEMO) wurde reduziert bzw. ganz weggelassen. Abhängig von der Größe der Strukturoberfläche wird dadurch die Haftung der Strukturen deutlich vermindert. Standardmäßig wird am IMT ein MEMO-Anteil von 3 % verwendet. Bei diesem Anteil ist ein Ablösen von Strukturen vom Substrat nur mit einem erhöhten Kraftaufwand und nicht beschädigungsfrei möglich. Bei einer Reduzierung auf 0,5 % ließen sich die Haltestrukturen für die Fasern sehr gut und beschädigungsfrei vom Substrat abheben (Oberfläche der Faserhalter ca. $750 \times 850 \mu\text{m}^2$). Durch völliges Weglassen des MEMO-Anteils ließen sich auch die deutlich größeren Haltestrukturen für die Linsen problemlos vom Substrat lösen (Oberfläche der Linsenhalter ca. $1250 \times 2000 \mu\text{m}^2$). Allerdings lösten sich in diesem Fall die kleineren Haltestrukturen für die Fasern bereits während der Entwicklung vollständig vom Substrat ab.

Lichtmikroskopische Vermessungen an den 300 µm hohen Justagestrukturen ergaben keine feststellbaren Abweichungen zum Soll-Maß. Vermessungen der 750 µm hohen PMMA-Haltestrukturen ergaben im Bereich der Klemmarme Abweichungen zum Soll-Maß von Durchschnittlich $2,1 \mu\text{m}$ (Los-Nr. 02545). Diese Abweichungen resultieren aus Eigenschaften von Titanmasken bei Bestrahlungen von Resistdicken $> 500 \mu\text{m}$ [26]. Die Abweichungen konnten jedoch durch die Maßvorhalte gut abgefangen werden.

Die Halbkugellinsen wurden bei der Firma Nolte & Grzeszik GmbH, Göttingen bezogen. Die Verspiegelung der Rückseiten der Linsen gelang, indem diese auf einen mit Photoresist beschichteten Wafer geklebt und mit ca. 200 nm Aluminium bedampft wurden.

4.1.4 Montage der Sensorköpfe

Die Montage der Sensorköpfe erfolgte im Rahmen dieser Arbeit unter einer Stereolupe und mit Hilfe von Pinzetten. Die Halteelemente ließen sich sehr einfach auf den Schienen positionieren und an die Anschläge schieben (siehe Abb. 4-12).

Verwendet wurden bei den Schienen die Strukturen ohne die Maßvorhalte, bei den Halteelemente, wie oben erwähnt, die Strukturen mit den Maßvariationen von $-2 \mu\text{m}$. Zur Befesti-

4. Seitlich messender Sensorkopf

gung wurde mit Hilfe der Spitze einer Glasfaser ein Tropfen Dymax 191-M-Gel-Klebstoff an die einzelnen Strukturen und Linsen gebracht und mit UV-Licht ausgehärtet (siehe Abb. 4-13).

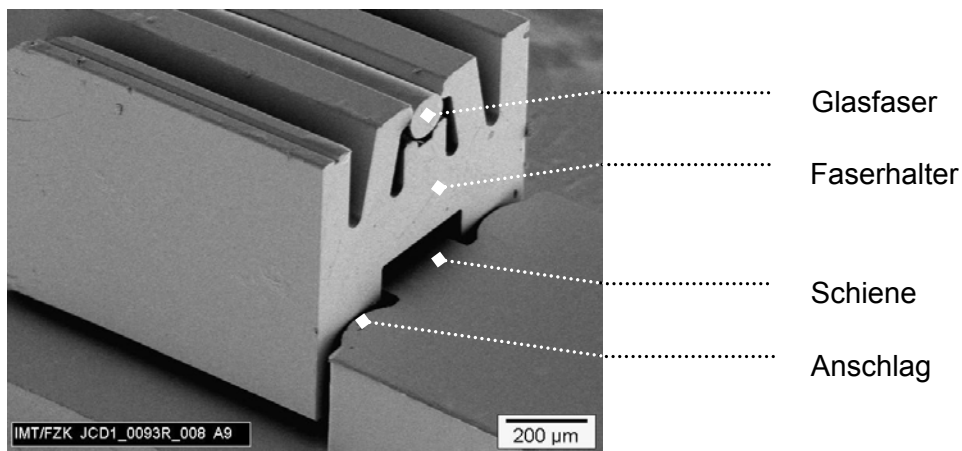


Abb. 4-12 REM-Aufnahme des positionierten Faserhalters mit Faser

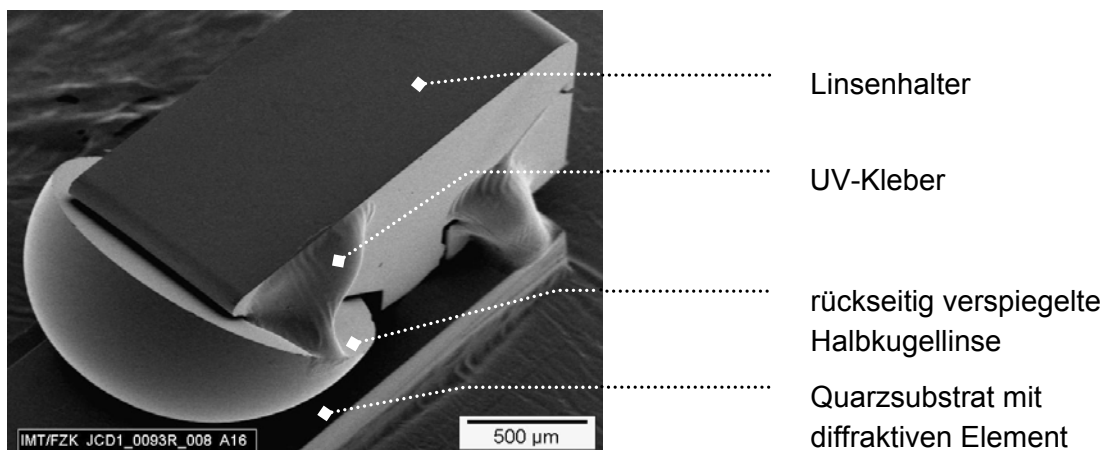


Abb. 4-13 REM-Aufnahme des Linsenhalters mit verklebter Halbkugellinse

Zur Montage der Halbkugellinsen erwiesen sich die Linsenhalter ohne Klemmarme (siehe Abb. 4-7 a) als geeigneter. Bei dieser Variante rutschten die Linsen praktisch von selbst in die vordefinierte Position. Bei den Faserhaltern erwies sich die Variante mit den flexiblen Klemmarmen (siehe Abb. 4-6 c) als optimal. Die verwendete Singlemode-Faser (Corning SMF-28, Kerndurchmesser 9 µm, NA = 0,1) mit einem Manteldurchmesser von 125 µm konnte bei dieser Variante grob auf dem Halter vorpositioniert werden und schnappte bei leichtem Druck von oben in den Klemmarmen ein (siehe Abb. 4-12). Bei den beiden anderen Varianten war ein deutlich höherer Druck erforderlich, der teilweise zu Beschädigungen im unteren Bereich des Halters führte. Unter der Stereolupe wurde anschließend das freie Faserende soweit zurückgezogen, bis es bündig mit dem Faserhalter abschloss und dann mit UV-Kleber befestigt. Anschließende Vermessungen unter dem Mikroskop ergaben, dass der Versatz der Faserstirnfläche entlang der Faserachse zur Soll-Position, der äußeren Kante des Faserhalters, zwischen 10 µm bis 20 µm lag. Dies genügte den an dieser Stelle zulässigen Toleranzen in Höhe von $\pm 30 \mu\text{m}$ [45].

4.1.5 Charakterisierung der freistrahloptischen Sensorköpfe

Die Charakterisierung der aufgebauten Sensoren erfolgte an einem eigens dafür aufgebauten Messstand, der im Folgenden beschrieben wird. Anschließend werden die Ergebnisse in Abhängigkeit der verwendeten Lichtquelle diskutiert.

4.1.5.1 Aufbau des Messstands

Zur Charakterisierung der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Sensorköpfe wurde der in Abb. 4-14 dargestellte Messaufbau verwendet.

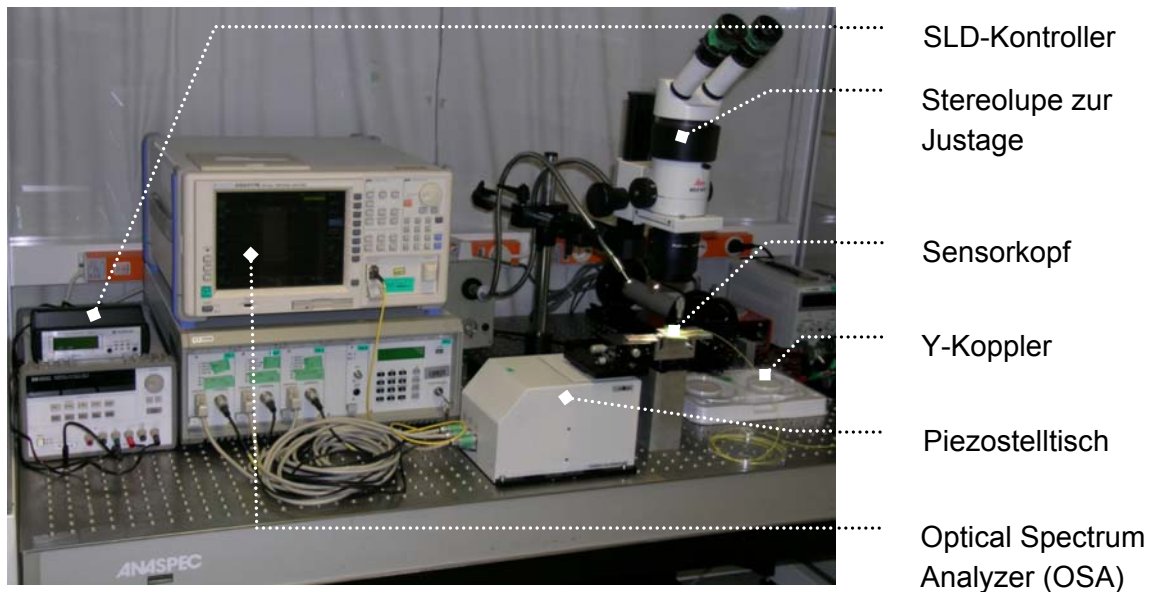


Abb. 4-14 Aufbau des Messstandes zur Charakterisierung der Sensorköpfe

Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus einer Lichtquelle, dem Sensorkopf und einer Detektoreinheit. Um das Verhalten des Sensors charakterisieren zu können, wurde ein Piezostelltisch (Profile, POCO 4000) verwendet, mit dem sich der Abstand zwischen einer Oberfläche und den Sensorköpfen in kleinen definierten Schritten (Arbeitsbereich 4 mm, Auflösung 0,1 μm) verändern lässt. Als Oberflächen diente bei der Charakterisierung ein mit Gold bedampfter Siliziumwafer. Als Lichtquelle wurde eine fasergekoppelte SLD (900 nm – 970 nm, Superlum Diodes, SLD-471-HP1) verwendet. Zur Ansteuerung der SLD wird ein Controller (Superlum, Pilot4-DC Controller) sowie ein externes Netzteil benötigt. Ebenfalls verwendet wurden eine Xenon-Bogenlampen (PerkinElmer, Cermax XL2000) mit einem Spektrum von 400 nm – 750 nm (siehe Kapitel 3.1). In Abhängigkeit von der Lichtquelle wurden zur Charakterisierung als Detektoreinheit ein Optical Spectrum Analyzer (OSA, ANDO, AQ6317B) in Verbindung mit den SLDs eingesetzt, bzw. bei Versuchen mit der Weißlichtquelle ein Standard Mikrospektrometer vom IMT-Typ 0603.

Als Y-Koppler wurde ein Singlemode-Schmelzkoppler der Firma SIFAM (Typ 01008590) verwendet. Zur Verbindung der einzelnen Komponenten kamen FC/APC Stecker zum Einsatz. Diese zeichnen sich durch einen 8° Schrägschliff aus, wodurch störende Rückreflexionen an den Faserverbindungen vermieden werden bzw. die auf Rückreflexionen empfindlich reagierende SLD geschützt wird.

Um die Charakterisierung der Sensorköpfe weitestgehend zu automatisieren, erfolgte die Ansteuerung des Piezostelltisches und des OSA mit Hilfe eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten LabView-Programms. Dieses ermöglicht ein abwechselndes Verstellen des Tisches in $0,5\ \mu\text{m}$ oder $1,0\ \mu\text{m}$ Schritten gefolgt von einem Messvorgang am OSA. Die während einer Messung aufgenommenen, spektralen Intensitätsmaxima werden von dem Programm hintereinander in einer Exceltabelle abgelegt.

Die Charakterisierung der Sensorköpfe mit Halbkugellinse erfolgte mit den im Kapitel 3.1 beschriebenen Xenon-Bogenlampe. Zunächst werden die Ergebnisse mit der Weißlichtquelle vorgestellt und im nächsten Abschnitt die Charakterisierung mit einer Superlumineszenzdiode beschrieben.

4.1.5.2 Ergebnisse mit Weißlichtquelle

Am freien Faserende entstehen beim Übergang zur Luft und einer senkrechten Faserstirnfläche Rückreflexionen, so dass circa 4% von der Intensität zurück in die Faser reflektiert werden und zum Spektrometer gelangen [46]. Dieser Rückreflex überlagert sich derartig stark mit dem eigentlichen Sensorsignal, dass das mit Spektrometer aufgezeichnete Signal im Wesentlichen der spektralen Verteilung der Lichtquelle entspricht. Zur Vermeidung dieses Effekts war es erforderlich, das freie Faserende mit einem 4° bis 8° Schrägschliff zu versehen. Dadurch überschreitet das zurückreflektierte Licht den Akzeptanzwinkel der Faser und wird im Mantel stark gedämpft. Das Diagramm (siehe Abb. 4-15) zeigt die aufgezeichneten spektralen Intensitätsmaxima jeder fünften Messung, d.h. der Abstand zwischen den dargestellten Spektren beträgt jeweils $5\ \mu\text{m}$.

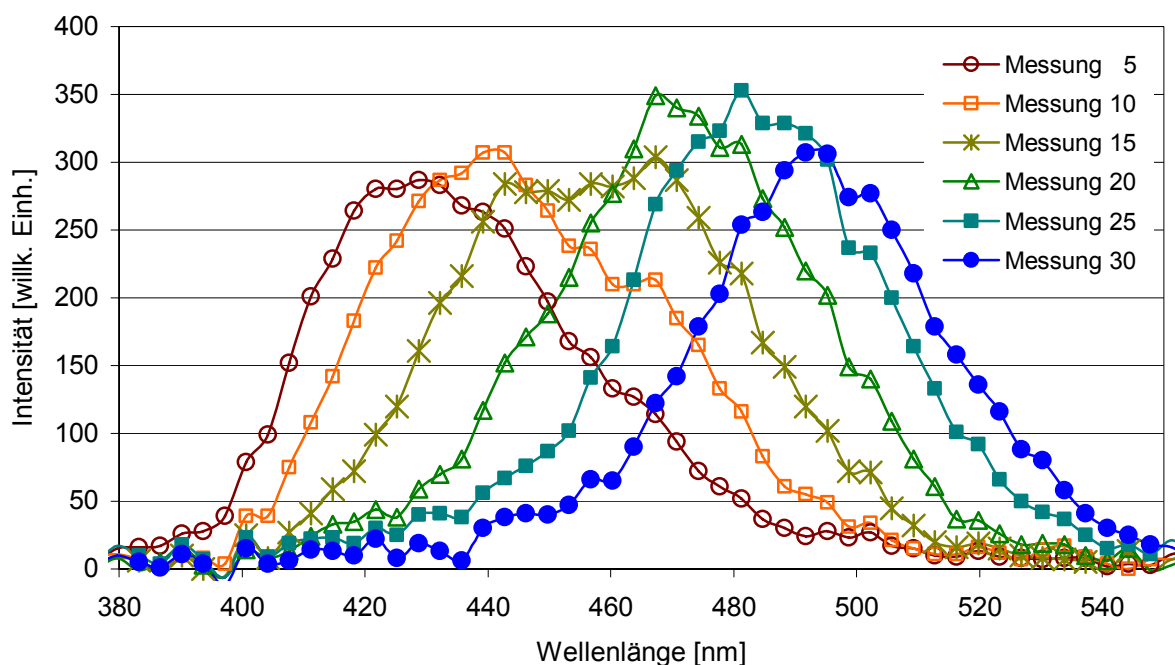


Abb. 4-15 Spektrale Intensitätsmaxima für unterschiedliche Fokusslängen, die Abstandsdifferenz zwischen den Intensitätsmaxima beträgt jeweils $5\ \mu\text{m}$ (Detektor: UV/VIS-Mikrospektrometer, Lichtquelle: Cermax XL2000)

Die mit Hilfe des Piezostellisches kontrollierte Abstandsänderung zwischen dem Sensorkopf und dem mit Gold verspiegelten Siliziumwafer betrug zwischen den einzelnen Messungen jeweils 1 μm . Mit Hilfe einer vom ITO programmierten Schwerpunkt-Auswertung basierend auf Formel (4.1) und einer Gewichtung mit der spektralen Verteilung der Lichtquelle wurde die Lage des jeweiligen spektralen Intensitätsmaximums ermittelt und abhängig von der Abstandsänderung in Höhenwerte umgerechnet (siehe Abb. 4-16) [34].

$$S = \frac{\sum z I(z)}{\sum I(z)} \quad (4.1)$$

Dabei entspricht S dem bestimmten Schwerpunkt, I der gemessenen Intensität und z dem Abstand zwischen Fokus und Objekt.

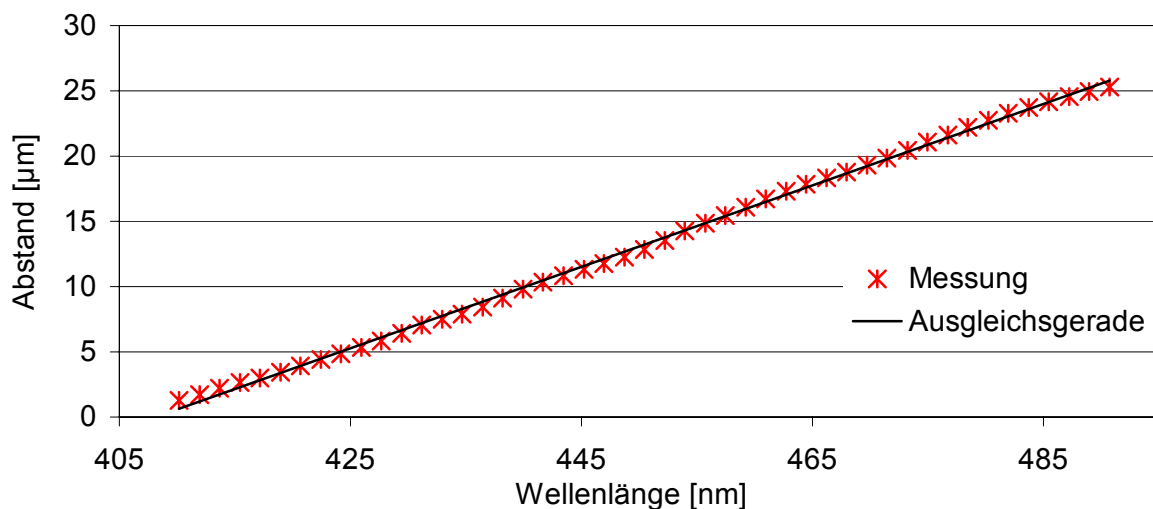


Abb. 4-16 Schwerpunktauswertung der spektralen Intensitätsmaxima in Abhängigkeit von der Abstandsveränderung, Abstand der Messpunkte 1 μm (Detektor: UV/VIS-Mikrospektrometer, Lichtquelle: Cermax XL2000)

Im Mittel beträgt das Verhältnis zwischen der Abstandsänderung und der spektralen Schwerpunktverschiebung 0,3 μm pro nm. Daraus ergibt sich bei einer spektralen Bandbreite von circa 80 nm ein Arbeitsbereich von 25 μm . Die in Abb. 4-15 gezeigten Signale weisen allerdings nicht wie erwartet einen symmetrisch und gleichmäßigen Verlauf auf. Dies erschwert die eindeutige Ermittlung der jeweiligen spektralen Intensitätsmaxima und trägt zu der starken Abweichungen der einzelnen Messpunkte von der Ausgleichsgeraden bei (siehe Abb. 4-17). Die Abweichung der spektralen Intensitätswerte von der Ausgleichsgeraden beträgt zwischen 0,66 μm und $-0,5 \mu\text{m}$, die Standardabweichung beträgt 0,27 μm . Aufgrund von Nichtlinearitäten der optischen Elemente wurde eine Abweichung von der Ausgleichsgeraden erwartet, allerdings systematischer als Abb. 4-17 zeigt. Dies ist unter anderem auf den Schrägschliff am Faserende zurückzuführen, der zu einer unsymmetrischen Beleuchtung der Halbkugellinse und damit zu einer nicht unerheblichen Beeinträchtigung der optischen Eigenschaften des Sensorkopfes führt. Hinzu kamen sehr lange Integrationszeiten des Spektrometers bei der Signalerfassung. Diese extrem langen Integrationszeiten wurden aufgrund der geringen optischen Leistung benötigt, die von der Lichtquelle in die Faser eingekoppelt werden konnte.

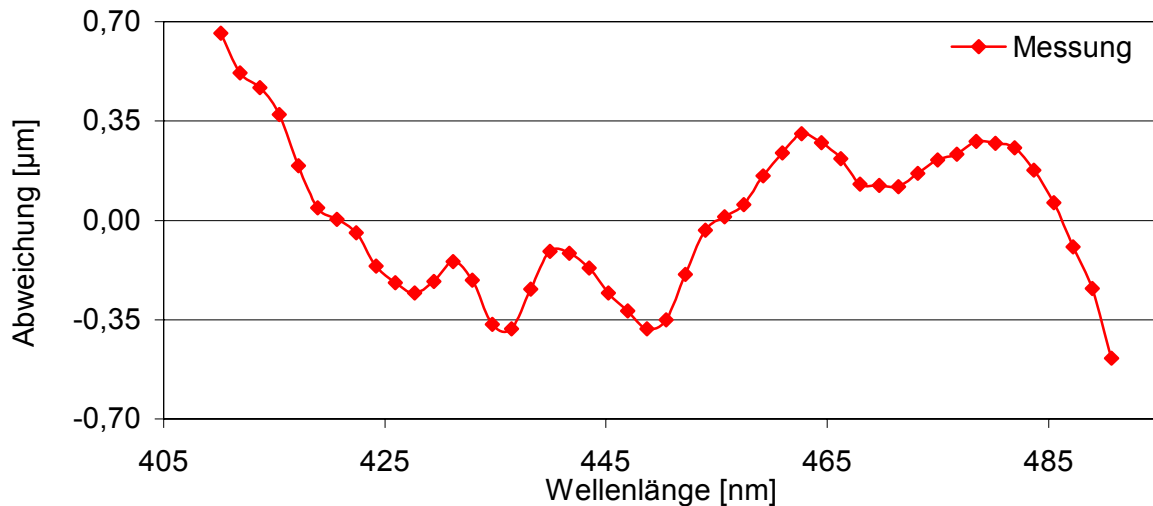


Abb. 4-17 Abweichung der ermittelten Abstandswerte von der Ausgleichsgeraden (Detektor: UV/VIS-Mikrospektrometer, Lichtquelle: Cemax XL2000)

Basierend auf diesen Ergebnissen und insbesondere aufgrund der geringen Signalintensität wurde die Xenon-Bogenlampe als Lichtquelle verworfen.

4.1.5.3 Ergebnisse mit Superlumineszenzdiolen

Durch die Verwendung von fasergekoppelten Superlumineszenzdiolen mit einer Ausgangsleistung > 3 mW konnte die im Sensorkopf zur Verfügung stehende optische Leistung im Vergleich zur Xenon-Bogenlampe deutlich erhöht werden.

Das für die SLD optimierte Sensorkopfdesign mit Halbkugellinse unterscheidet sich im Vergleich zum Weißlicht-Design im Wesentlichen durch den Abstand zwischen Faseraustritt und Halbkugellinse. Wie bei der Charakterisierung mit der Weißlichtquelle traten auch bei der Charakterisierung mit einer SLD Rückreflexionen an der Einkopffaser auf. Diese ließen sich ebenfalls nur unzureichend durch einen 4° Schrägschliff am Faserende beheben und führten zu einer Überlagerung mit dem eigentlichen Messsignal. Die Abb. 4-18 zeigt die gemessenen spektralen Intensitätsmaxima nach einer Gewichtung mit dem Spektrum der SLD und anschließender Normierung. Erst nach diesen beiden Umrechnungen konnten die spektralen Intensitätswerte mit Hilfe einer Schwerpunktauswertung in Höhenwerte umgerechnet werden. Die etwas gleichmäßigeren Signale ermöglichten eine bessere Ermittlung der spektralen Intensitätsmaxima.

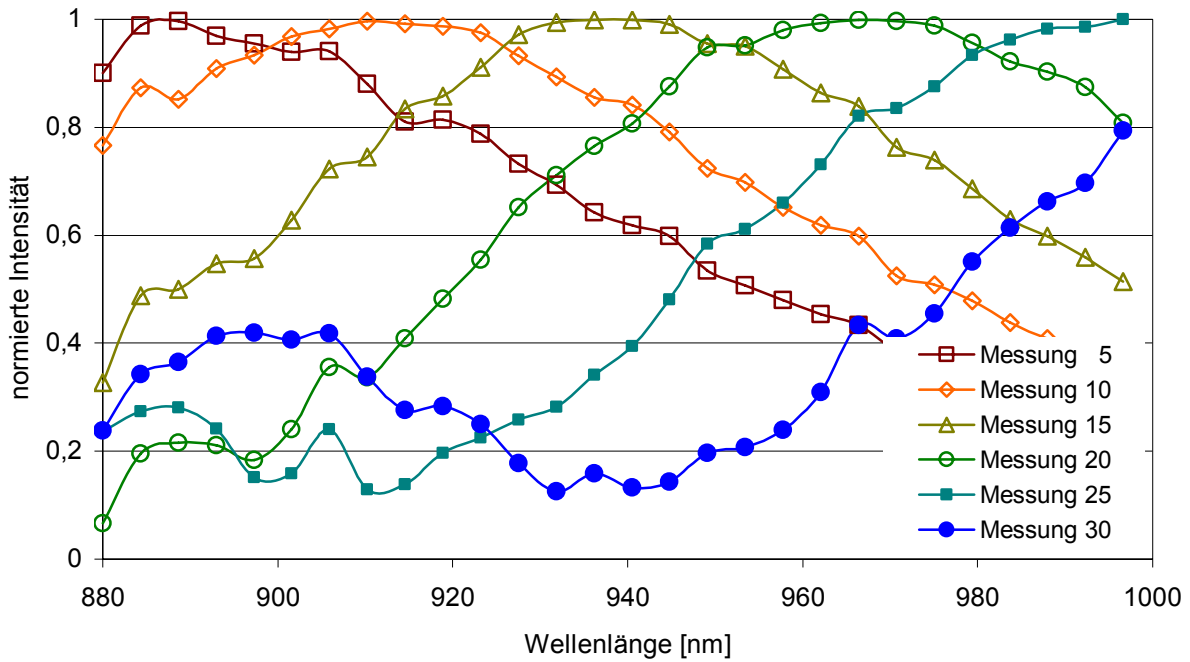


Abb. 4-18 Normierte spektrale Intensitätsmaxima für unterschiedliche Fokallängen, die Abstanddifferenz zwischen den Intensitätsmaxima beträgt jeweils 5 μm (Detektor: OSA ANDO AQ6317B, Lichtquelle: Superlum SLD-471-HP1)

Im Mittel beträgt das Verhältnis zwischen der Abstandsänderung und den zugehörigen Schwerpunkten 0,2 μm pro nm (siehe Abb. 4-19). Dies ermöglicht bei der spektralen Bandbreite der SLD von circa 70 nm einen Arbeitsbereich von knapp 20 μm .

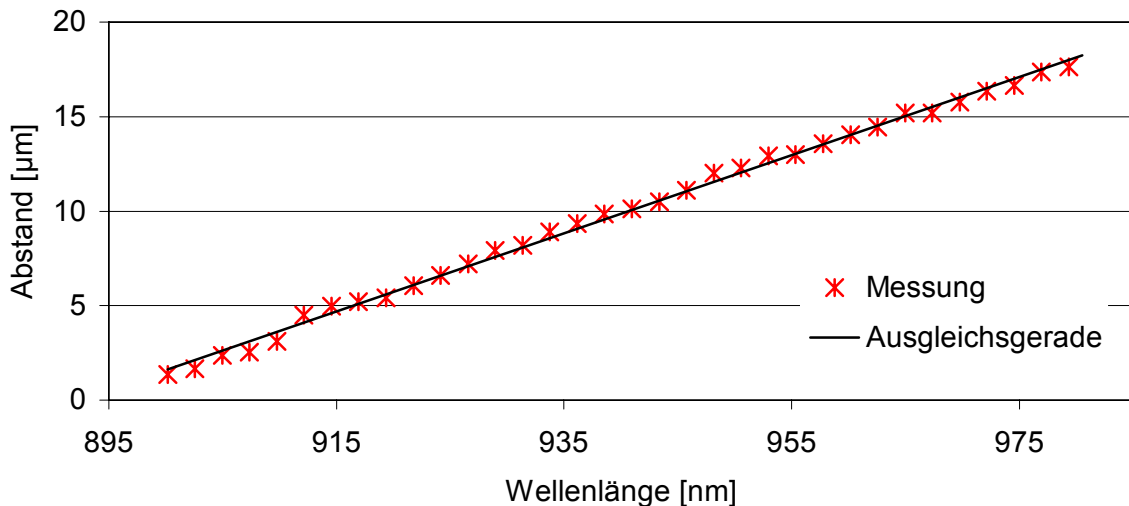


Abb. 4-19 Schwerpunktauswertung der spektralen Intensitätsmaxima in Abhängigkeit der Abstandsveränderung, Abstand der Messpunkte 1 μm (Detektor: OSA ANDO AQ6317B, Lichtquelle: Superlum SLD-471-HP1)

Die Abweichungen der spektralen Intensitätswerte von der Ausgleichsgeraden liegen zwischen 0,45 μm und -0,58 μm und weisen wie bei der Charakterisierung mit der Weißlicht-

quelle einen unsystematischen Verlauf auf, die Standardabweichung beträgt $0,28 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 4-20).

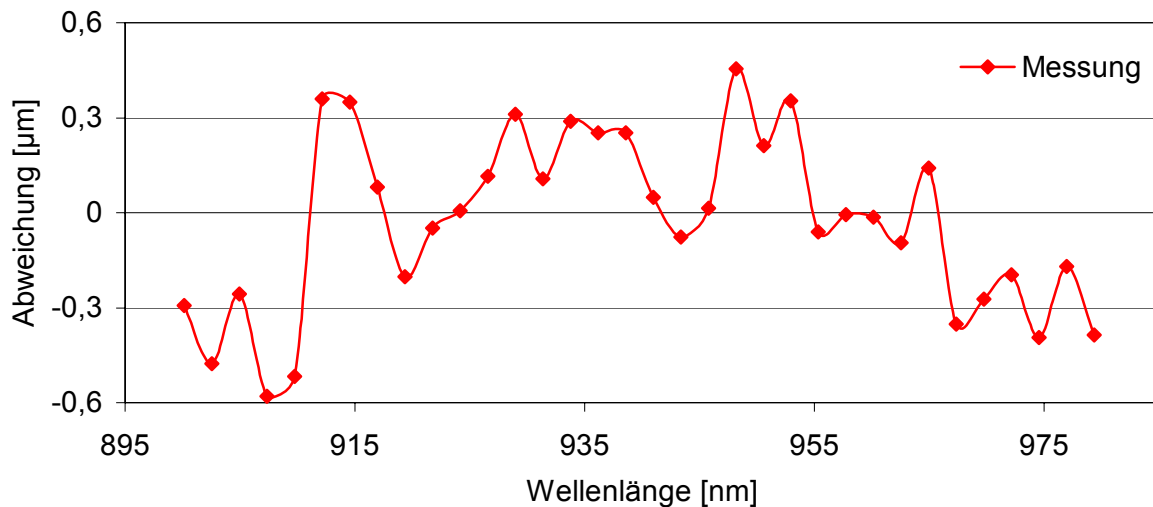


Abb. 4-20 Abweichung der Abstandswerte vom Soll-Messwert (Detektor: OSA ANDO AQ6317B, Lichtquelle: Superlum SLD-471-HP1)

Diese gemessenen Signale entsprachen nicht den gewünschten und vorher simulierten Signalen. Insbesondere die Messungenauigkeit von knapp $1 \mu\text{m}$ bei einem Messbereich von nur $20 \mu\text{m}$ entsprach nicht den Anforderungen. Als eine mögliche Ursache wurden Justagefehler zwischen den einzelnen optischen Komponenten untersucht. Aufgrund der Größe des Sensorkopfes und der komplexen Geometrie ist eine Vermessung des gesamten Sensorkopfes, z.B. mit Hilfe eines Mikroskops nicht möglich. Aus diesem Grund wurde der optische Aufbau indirekt mit Hilfe von Infrarot-Indikatorpapier überprüft, mit dem das vom Sensor abgestrahlte Infrarotlicht sichtbar gemacht werden konnte. In einem Abstand von mehreren Zentimetern unterhalb des Sensorkopfes wurden die Ringstrukturen der diffraktiven Elemente auf dem Fluoreszenzpapier abgebildet. Bei leichten Veränderungen an der Position der Linse kam es zu unsymmetrischen Verzerrungen dieser Abbildungen. Ebenso kam es beim Einsatz der schräg angeschliffenen Fasern zu unsymmetrischen Abbildungen bzw. ungleichmäßigen Intensitätsverteilungen der abgebildeten Ringstrukturen. Aus diesen Beobachtungen wurde geschlossen, dass sich die Justagegenauigkeit der Komponenten indirekt anhand der Symmetrie dieser Abbildungen bestimmen lässt. Da diese Abbildungen bei den charakterisierten Sensoren kreissymmetrisch waren, wurden Justagefehler der mikrooptischen Bank als Ursache für die ungenügende Signalqualität ausgeschlossen.

Als Ursache wurde deswegen der freistrahloptische Ansatz des Sensorkopfes angesehen. Durch die insgesamt zehn Übergänge an Grenzflächen beim Faseraus- sowie Eintritt, an der Halbkugellinse sowie an den diffraktiven optischen Element auf dem optischen Hin- und Rückweg werden Verluste und Reflexionen verursacht, die sich negativ auf die Signalqualität und -intensität auswirken.

4.2 Integriert-optisches Sensordesign mit gelaserten diffraktiven Elementen

Alternativ zum freistrahloptischen Ansatz wurde ein integriert-optischer Ansatz für den seitlich messenden Sensorkopf konzipiert. Bei diesem Ansatz werden die Übergänge an den

optischen Grenzflächen vermieden bzw. reduziert, um die Verluste und Reflexionen zu minimieren.

4.2.1 Design des integriert-optischen Sensorkopfs

Der Aufbau des entwickelten, integriert-optischen Sensors besteht aus einer Justageröhre zur Faserzentrierung, einem Glaszylinder zur Strahlausbreitung, einer GRIN-Linse zur Kollimation und Fokussierung sowie einem Prisma zur 90° Strahlumlenkung (siehe Abb. 4-23).

Das optische Design, basierend auf Simulationsergebnissen des ITO, wurde zusammen mit der Firma Grintech GmbH, Jena, entwickelt (siehe Abb. 4-21) [34]. Die Abb. 4-22 zeigt die zugehörigen Simulationsergebnisse für den Fokusbereich in Abhängigkeit der Wellenlänge.

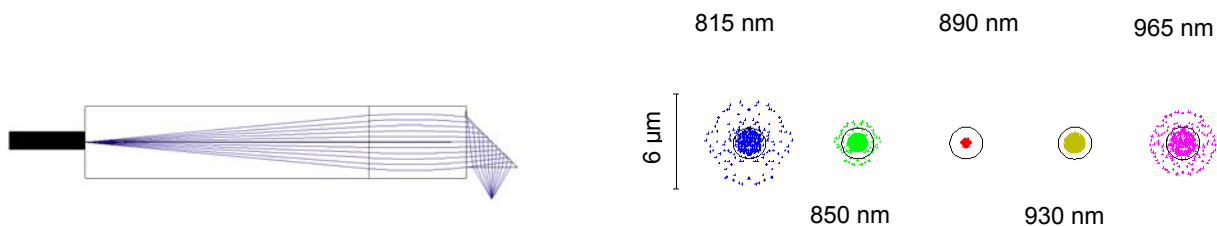


Abb. 4-21 Raytracing-Simulation des integriert-optischen Konzepts mit GRIN-Linse (ITO)

Abb. 4-22 Raytracing-Simulation der Fokusbereiche für unterschiedliche Wellenlängen

Diese Komponenten und die Glasfaser weisen ähnliche Brechungsindizes auf und sind direkt miteinander verklebt. Dadurch werden die Reflexionen und Verluste vermieden, die beim freistrahloptischen Aufbau an den Grenzflächen der einzelnen Komponenten entstehen. Die für die chromatische Variation der Fokusbereiche benötigte diffraktive Linse ist bei diesem Aufbau direkt in das Umlenkprisma mittels Laserablation (siehe Kapitel 3.2.2) integriert.

Die Integration der diffraktiven Elemente in die Umlenkprismen (Kantenlänge 700 µm) erfolgte am Laserlaboratorium Göttingen. Die Konfektionierung der GRIN-Linsen (Durchmesser 1 mm) mit Glaszylinder und Glasfaser geschah bei Grintech. Dort wurden ebenfalls die Prismen mit den diffraktiven Elementen an die GRIN-Linsen gesprengt, d.h. die Komponenten haften aufgrund von Adhäsionskräften aneinander. Durch diesen hybriden und integriert-optischen Aufbau gelang die weitere Miniaturisierung des Sensorkopfes. Die Zentrierung von Justageröhren, Glaszylinder und GRIN-Linse zueinander geschieht mit einem Metall-Justageröhren, das gleichzeitig als Gehäuse den Sensorkopf schützt. Der Sensorkopfdurchmesser beträgt beim Aufbau mit dem Justageröhren mit einer Wandstärke von 100 µm etwa 1200 µm. Ausgelegt wurde der Sensorkopf für den Einsatz mit Superlumineszenzdiolen mit einer Zentralwellenlänge von 890 nm.

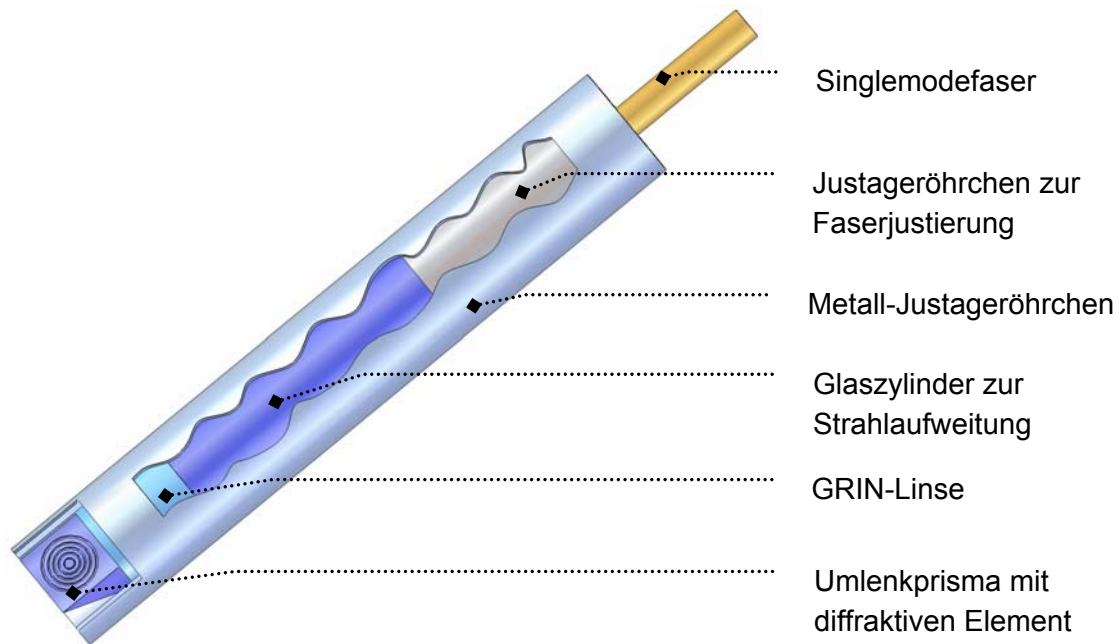


Abb. 4-23 Integriert-optisches Sensorkopfdesign mit GRIN-Linse und Umlenkprisma

Die Ergebnisse mit diesem Sensorkopf werden in Verbindung mit dem neu entwickelten Spektrometer im Kapitel 7.2 vorgestellt.

Die beste Konstruktion ist die einfachste die funktioniert.

Albert Einstein (1879 – 1955)

5 Geradeaus messender Sensorkopf

In diesem Kapitel werden die Konzeption und die Fertigung des geradeaus messenden Sensorkopfes vorgestellt. Ziel war es, einen geradeaus messenden Sensorkopf zu entwickeln, der sich im Vergleich zu dem im vorherigen Kapitel beschriebenen, insbesondere durch eine höhere Abstandsauflösung von circa 10 nm auszeichnet (siehe Tab. 5-1).

Gesamtsystem	
Auflösung longitudinal	$\leq 10 \text{ nm}$
Messkopf	
Messkopfgröße	$\leq 2,8 \text{ mm}$ (Außendurchmesser)
Messbereich	20 - 30 μm
Fokusbereich	$\leq 3 \text{ }\mu\text{m}$
Numerische Apertur der Optik	$\geq 0,5$
Wellenlängenintervall	$\geq 20 \text{ nm}$
Durchmesser Faserkern	6 μm
Numerische Apertur der Faser	0,14

Tab. 5-1 Lastenheft des geradeaus messenden Sensorkopfs

Um mit dem chromatisch konfokalen Messprinzip hohe Messgenauigkeiten zu erreichen, muss der Sensor eine große numerische Apertur aufweisen. In Verbindung mit der angestrebten Miniaturisierung bedeutet dies, dass der Arbeitsabstand sowie der Messbereich gering sind. Um mit einem solchen Sensorkopf trotzdem einen großen Höhenbereich abdecken zu können, wie er beispielsweise bei der Messung von asphärischen Linsen oder Freiformflächen erforderlich ist, soll dieser miniaturisierte Punktsensor anschließend an eine hochgenaue Nachführeinheit gekoppelt werden. Dieses Konzept der dynamischen Nachführung ermöglicht es, mit einem berührungslosen Sensor, der einen nur wenige Mikrometer großen Messbereich aufweist, einen Höhenmessbereich von mehreren Millimetern mit höchster Auflösung zu erfassen.

Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel beschriebenen Erfahrungen, wurde für diesen Sensorkopf kein freistrahloptischer Ansatz verfolgt, sondern zur Vermeidung von Rückreflexionen und Verlusten nur ein integriert-optischer Ansatz entwickelt. Die zwei in diesem Kapitel vorgestellten Sensorkopfvarianten unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Art der Justage der diffraktiven Elemente. Im folgenden Abschnitt wird zunächst das allgemeine optische Design des geradeaus messenden Sensorkopfs vorgestellt, gefolgt vom Aufbau und der Herstellung der beiden Varianten. Die Ergebnisse der Charakterisierung der beiden Sensorköpfe werden im Rahmen der Charakterisierung des Gesamtsystems im Kapitel 7 vorgestellt.

5.1 Integriert-optisches Sensordesign

Das optische Design für den geradeaus messenden Sensor wurde basierend auf Simulationsergebnissen des ITO zusammen mit der Firma Grintech GmbH, Jena, entwickelt (siehe Abb. 5-1) [34]. Die Abb. 5-2 zeigt die zugehörigen Simulationsergebnisse für den Fokusbereich in Abhängigkeit der Wellenlänge.

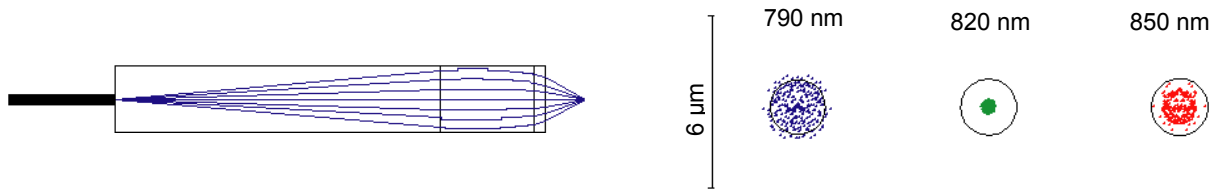


Abb. 5-1 Raytracing-Simulation des integriert-optischen Konzepts mit GRIN-Linse (ITO)

Abb. 5-2 Raytracing-Simulation der Fokusbereiche für unterschiedliche Wellenlängen

Der Aufbau des Sensorkopfs besteht aus einer Justageröhre zur Halterung und Zentrierung des Lichtleiters. Als Glasfaser wurde eine mit FC/APC Steckern konfektionierte Corning HI 1060 Singlemodefaser mit einem Kerndurchmesser von 6 µm und einer numerischen Apertur $NA = 0,14$ verwendet. Mit Hilfe einer Justagehülse wird das Justageröhrchen mit einem Glaszylinder präzise zentriert verbunden. In diesem Glaszylinder weitet sich der Lichtstrahl auf, der divergent aus der Glasfaser austritt. Der Zylinder ist wiederum mit Hilfe einer Justagehülse mit einer GRIN-Linse verbunden. In der GRIN-Linse wird der Strahl kollimiert und in Richtung der Oberfläche vorkonvergiert. Im Anschluss an die GRIN-Linse kommt das diffraktive Element, das den Strahl weiter fokussiert und die chromatische Variation der Fokusbereiche verursacht (siehe Abb. 5-3 und Abb. 5-8). Ausgelegt wurde der Sensorkopf für den Einsatz mit Superlumineszenzdiode mit einer Zentralwellenlänge von 820 nm.

Die Glasfaser, der Glaszylinder und die GRIN-Linse weisen ähnliche Brechungsindizes auf und sind mit einem Kleber, der einen ebenfalls ähnlichen Brechungsindex besitzt, ohne Luftspalt miteinander verbunden. Wie beim integriert-optischen Ansatz des seitlich messenden Sensorkopfs (siehe Kapitel 4.2) werden dadurch Verluste und Reflexionen an den optischen Grenzflächen der einzelnen Komponenten vermieden.

Im Gegensatz zum seitlich messenden Sensorkopf wurden die diffraktiven Elemente für diesen Sensorkopf so ausgelegt, dass sich die geätzten Ringstrukturen auf der Seite der GRIN-Linse befinden. Dadurch sollen die geätzten Strukturen vor eventuellen Beschädigungen bei einem ungewollten Kontakt mit Messobjekten geschützt werden. Außerdem ermöglicht dies eine einfache Reinigung des Sensorkopfs. Die Herstellung der diffraktiven optischen Elemente mit einem Durchmesser von 1400 µm erfolgte am ITO mittels Laserplotter-Lithographie und RIE auf 300 µm dicken Quarzglas-Substraten. Am ITO durchgeführte Toleranzanalysen ergaben, dass zur Erfüllung der optischen Eigenschaften die Mitte der diffraktiven optischen Elemente mit einer Toleranz von $\pm 5 \mu\text{m}$ zur optischen Achse der GRIN-Linse justiert werden müssen. Es wurden zwei Sensorvarianten konzipiert und realisiert, die im Folgenden vorgestellt werden.

5.1.1 Justage mit LIGA-Klemmstrukturen

Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel beschriebenen Erfahrungen bei der Herstellung des freistrahloptischen Designs, wurde ein passives Justagekonzept mit Klemmstrukturen entwickelt: Die Ausrichtung der diffraktiven Elemente zur optischen Achse der GRIN-Linse erfolgt mit Klemmarmen, die am Außenrand der GRIN-Linse angreifen. Die 300 µm hohen PMMA-Klemmstrukturen werden auf dem Quarzglas-Substrat relativ zu den diffraktiven Elementen mit Hilfe des LIGA-Verfahrens strukturiert (siehe Abb. 5-3).

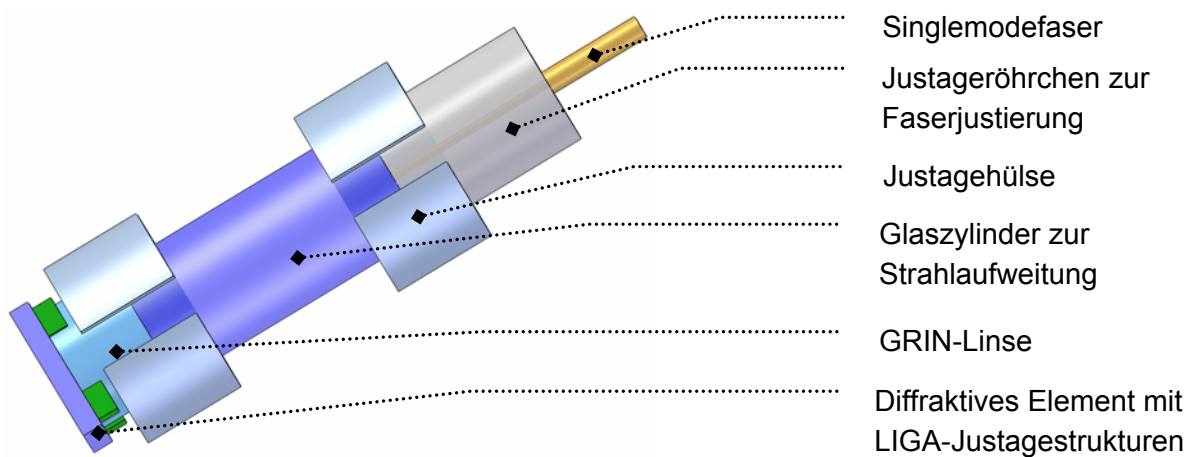


Abb. 5-3 Integriert-optisches Design mit LIGA-Justagestrukturen

Die ideale Halterung eines runden Zylinders besteht aus einer Dreipunktlagerung unter Winkeln von jeweils 120°. Eine derartige Halterung wäre jedoch nur durch eine formschlüssige Verbindung zu realisieren. Bei einer formschlüssigen Verbindung wären zur Montage entsprechende Fasen entweder an der GRIN-Linse oder den LIGA-Strukturen anzubringen. Dies ist jedoch in beiden Fällen sehr aufwändig. Zudem können mit einer derartigen Halterung die Durchmesser-toleranzen der GRIN-Linse nicht ausgeglichen werden. Deshalb wurden Dreipunkt- und Vierpunkt-Halterungen mit Federelementen konzipiert. Die Dreipunkt-Halterung besteht aus zwei festen Elementen und einem Federelement. Das Federelement drückt in diesem Fall von einer Seite die GRIN-Linse gegen die beiden feststehenden Punktkontakte. Die Vierpunkt-Halterung verfügt über zwei Federelemente und ein Element mit zwei festen Punktkontakten, an das die GRIN-Linse gedrückt wird. Konzipiert wurden Federelemente mit offenen und geschlossenen Klemmarmen. Die offenen Klemmarme sind auf einer Seite fest mit der Haltestruktur verbunden und auf der anderen Seite offen, die geschlossenen Arme sind auf beiden Seiten fest verbunden (siehe Abb. 5-4). Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Haftung unter den 30 µm und 50 µm breiten Armen so gering ist, dass sich die Klemmarme bei der Montage der GRIN-Linse vom Quarzsubstrat lokal lösen und so zum Federelement werden und die GRIN-Linse festklemmen. Für den Fall, dass diese Varianten mit den Federelementen nicht funktionieren, wurde eine Zweipunkt-Halterung konzipiert.

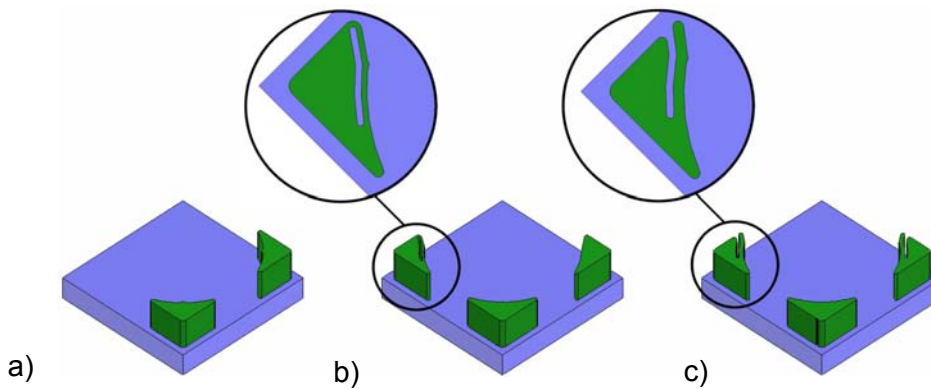


Abb. 5-4 LIGA-Justagestrukturen mit a) Zweipunkt-, b) Dreipunkthalterung mit einem geschlossen Klemmarm und c) Vierpunkt-Halterung mit offenen Klemmarmen

Die Einhaltung der geforderten Toleranzen zwischen der optischen Achse der GRIN-Linse und den diffraktiven Elementen in Höhen von $\pm 5 \mu\text{m}$ wurde in einer Toleranzanalyse abgeschätzt. Dabei wurde von folgenden Toleranzen ausgegangen: Die Ausrichtung der LIGA-Maske zu den diffraktiven Strukturen gelingt mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$. Die Toleranzen des LIGA-Verfahrens und der Laserplotter-Lithographie betragen bei diesen Strukturdimensionen von circa 2 mm jeweils $\pm 0,5 \mu\text{m}$. Der Radius der GRIN-Linse ist mit $900 \mu\text{m}^{+0}_{-2,5}$ toleriert und die optische Achse zur geometrischen Achse der Linse mit $\pm 1,5 \mu\text{m}$. Die Klemmstrukturen wurden deshalb auf den mittleren Radius der GRIN-Linsen von $898,75 \mu\text{m}$ ausgelegt. Zum Abfangen der Durchmesser- sowie der Fertigungstoleranzen des LIGA-Verfahrens und der Laserplotter-Lithographie wurden die Klemmstrukturen neben dem eigentlichen Soll-Maß mit einem Maßvorhalt von plus und minus $1,25 \mu\text{m}$ versehen. Im Extremfall beträgt die Abweichung zwischen der Linsenmitte und der optischen Achse der GRIN-Linse $7,5 \mu\text{m}$. In diesem Fall kann durch Drehen des diffraktiven Elements um die GRIN-Linse, aufgrund der außermittigen optischen Achse, die geforderte Toleranz in Höhe von $\pm 5 \mu\text{m}$ eingehalten werden.

Die Ausrichtung der diffraktiven optischen Elemente zu den LIGA-Klemmstrukturen erfolgte, wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, über geätzte Justagekreuze auf dem Quarzglas-Wafer und analoge Kreuze auf der LIGA-Maske. Aufgrund der erforderlichen Justagekreuze und einer benötigten Strukturhöhe von $300 \mu\text{m}$ wurde eine Titan-Arbeitsmaske konzipiert (Layout-Nr. 0737-01-A1, Los-Nr. 02739) (siehe Abb. 5-5).

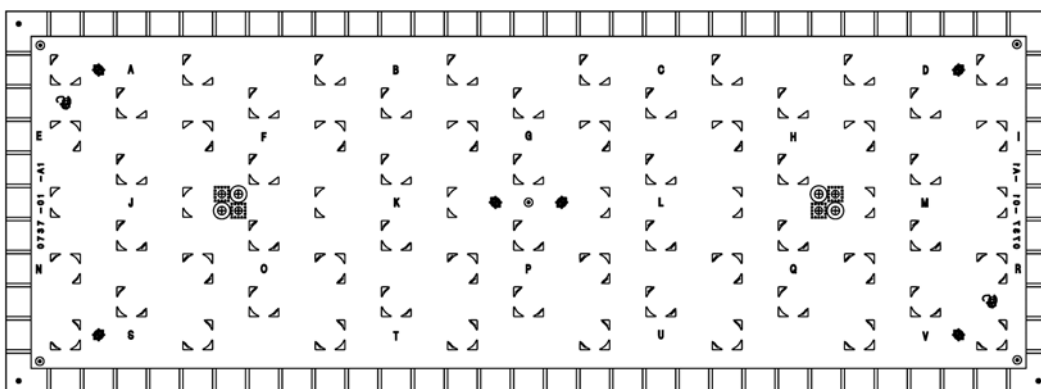


Abb. 5-5 Maskenlayout mit Justagestrukturen für GRIN-Linsen, Layout-Nr. 0737-00-A1

Dabei wurde wieder eine fertigungsgerechte sowie prüfgerechte Gestaltung auf Basis der IMT-Richtlinien beachtet. Im Wesentlichen sind die Goldabsorber symmetrisch und gleichmäßig verteilt über die Maske angeordnet. Im Umkreis von vier Klemmstrukturen befindet sich jeweils ein Buchstabe, der eine eindeutige Zuordnung der Strukturen und eine Orientierung auf der Maske ermöglicht. Der das Strukturfeld umgebende LIGA-Rahmen wurde derartig unterbrochen, dass die Unterbrechungen beim anschließenden Vereinzeln zum präzisen Ausrichten der Wafer-Säge dienen. Des Weiteren wird das ansonsten erforderliche Durchtrennen des Rahmens umgangen und dadurch ein Verkleben des feinen Sägeblattes mit PMMA vermieden.

5.1.1.1 Fertigung und Montage

Zur Fertigung der Klemmstrukturen wurden 300 μm dicke PMMA-Plättchen auf die Quarzglassubstrate geklebt und anschließend mittels Röntgentiefenlithographie strukturiert. Anschließend erfolgte die Vereinzlung der Strukturen mit Hilfe einer Wafer-Säge in quadratische Plättchen mit Kantenlängen von 1950 μm . Die vereinzelt Plättchen ließen sich problemlos an die GRIN-Linsen klemmen. Dazu wurden die Plättchen mit einer Pinzette seitlich an die GRIN-Linse heran geschoben und die Klemmarme schnappten nach leichtem Druck ein. Die Klemmkraften waren ausreichend, so dass ein Verkleben mit der GRIN-Linse für Laborversuche nicht erforderlich war. Abb. 5-6 und Abb. 5-7 zeigen REM-Aufnahmen der GRIN-Linsen mit verschiedenen Klemmstrukturen.

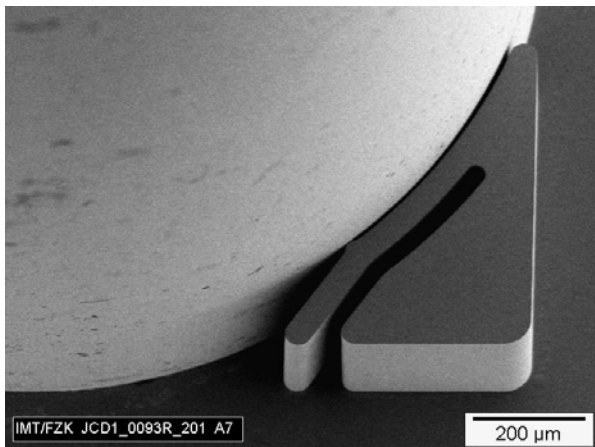


Abb. 5-6 Offene Klemmstruktur

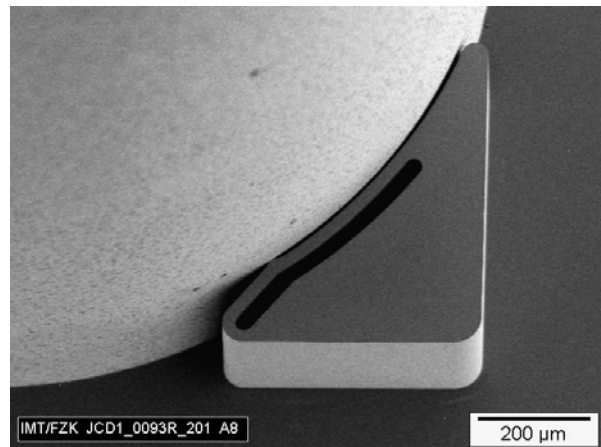


Abb. 5-7 Geschlossene Klemmstruktur

Unterschiede zwischen den Dreipunkt- und Vierpunkt-Halterungen konnten bei ersten Charakterisierungen der Sensorköpfe nicht festgestellt werden. Die Zweipunkt-Halterungen wurden aufgrund der funktionierenden Klemmstrukturen nicht verwendet.

5.1.2 Justage mit rund vereinzelt diffraaktiven Elementen

Während beim vorherigen Ansatz der Außenrand der GRIN-Linse zur Justage diente, wird bei diesem Konzept die Innenwand der Justagehülse zur Ausrichtung der diffraaktiven Elemente verwendet. Dazu ragte die Justagehülse zwischen Glaszylinder und GRIN-Linse um circa 200 μm über den Rand der GRIN-Linse hinaus (siehe Abb. 5-8).

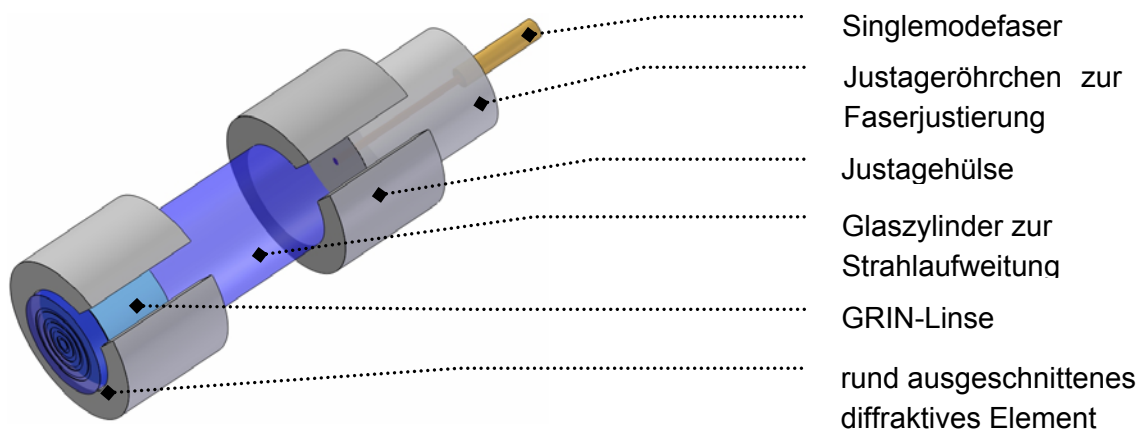


Abb. 5-8 Integriert-optisches Design mit rund ausgeschnittenen diffraktiven Element

Am Institut für Materialforschung I (IMF I / FZK) erfolgte die Vereinzelung der diffraktiven Elemente mit Hilfe eines CO₂-Lasers (Synrad, Firestar V40, Wellenlänge 10,6 μm , Fokussdurchmesser 50 μm), mit dem die Linsen aus dem 300 μm dicken Quarzglas-Substrat rund ausgeschnitten wurden. Die Positionierung des Laserstrahls erfolgte mit Hilfe eines Lichtmikroskops relativ zur Mitte der diffraktiven Strukturen. Bei der Erstellung des Schneidprogramms wurde darauf geachtet, dass der Laser zu Beginn und am Ende des Schneidvorgangs keinen Steg hinterlässt (siehe Abb. 5-9). Anschließend wurden die Strukturen kurz in einem Ultraschallbad gereinigt, um den während des Laserschneidens entstehenden Niederschlag zu entfernen.

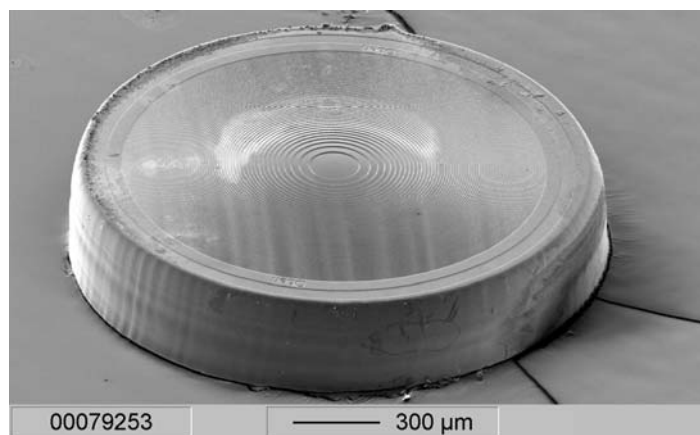


Abb. 5-9 Mit Laser rund ausgeschnittenes diffraktives Element

Der Innendurchmesser der Justagehülsen beträgt 1800 μm . Für erste Versuche zur Vereinzelung der diffraktiven Elemente wurde ein Durchmesser von 1750 μm gewählt. Anschließende lichtmikroskopische Vermessungen ergaben, dass dieser Radius mit einer Toleranz von $\pm 5 \mu\text{m}$ eingehalten werden konnte. Die Abweichung des Mittelpunkts der diffraktiven Linse zum geometrischen Mittelpunkt betrug allerdings durchschnittlich $\pm 10 \mu\text{m}$. Daraus ergeben sich bei der Montage der vereinzelt diffraktiven Linse in der Justagehülse mögliche Abweichungen von bis zu 40 μm zur Idealposition.

Die Charakterisierungen dieser beiden geradeaus messenden Sensorkopfvarianten erfolgte in Verbindung mit dem neu entwickelten LIGA-Mikrospektrometer und werden im Kapitel 7.3 vorgestellt.

The Colour of the World is changing day by day.

Les Misérables, Victor Hugo (1802 – 1885)

6 Mikrospektrometer für die Signalauswertung

Um das vollständige Sensorsystem anschließend leicht in Messmaschinen integrieren zu können, wird ein Spektrometer mit möglichst kleinen Außenmaßen benötigt. In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines LIGA-Mikrospektrometers auf Basis eines Hohlwellenleiters (siehe Kapitel 3.3) beschrieben, das im spektralen Arbeitsbereich des Sensors mit möglichst hoher Auflösung und einer möglichst hohen Messrate arbeitet.

6.1 Auslegung des Mikrospektrometers

Das Auflösungsvermögen eines chromatisch konfokalen Sensors hängt neben der Stärke der chromatischen Längsaufspaltung und der konfokalen Tiefendiskriminierung davon ab, wie genau das spektral kodierte Höhensignal bestimmt wird. Die Genauigkeit hängt dabei von der Anzahl der gemessenen spektralen Intensitätswerte im Bereich der Halbwertsbreite des konfokalen Signals ab. Voruntersuchungen des ITO ergaben, dass 30 Stützstellen innerhalb der FWHM des Signals erforderlich sind, um eine bestmögliche Auflösung zu erzielen [47]. Die FWHM der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensoren beträgt etwa 10 nm. Als Kompromiss zwischen Auflösung, maximaler Datenrate und Flexibilität hinsichtlich SLD-basierter Lichtquellen mit unterschiedlichen Schwerpunktwellenlängen, wurde die Dispersion des Spektrometers auf mindestens 1 nm pro Detektorpixel festgelegt. Dadurch kann das konfokale Signal mit mindestens 10 spektralen Intensitätswerten im Bereich der Halbwertsbreite erfasst werden.

Der voll zugängliche Wellenlängenbereich des Spektrometers sollte zwischen 750 nm und 950 nm liegen, um verschiedene SLDs mit unterschiedlichen Schwerpunktwellenlängen und Halbwertsbreiten als Lichtquelle nutzen zu können. Als Einkoppelfaser sollte die gleiche, wie bereits im Sensorkopf verwendete, Corning HI 1060 Singlemodefaser mit einem Kerndurchmesser von 6 μm und einer numerischen Apertur $NA = 0,14$ zum Einsatz kommen.

Die spektrale Auflösung von Spektrometern wird grundsätzlich durch die Breite des Eintrittspaltes, die Dispersion, das Abbildungsverhältnis zwischen Eintrittsspalt und Spaltbildbreite auf dem Detektor sowie durch die Breite der Detektorpixel bestimmt. Das Auflösungsvermögen eines Spektrometers wird als Halbwertsbreite bei monochromatischer Einkopplung angegeben. Eine Herausforderung bei der Entwicklung des Spektrometers bestand darin, eine geforderte Dispersion von mindestens 1 nm pro Detektorpixel (bei 25 μm Pixelbreite) zu erreichen.

Von der Breite des Eintrittspaltes hängt sowohl das Auflösungsvermögen eines Spektrometers, als auch dessen Empfindlichkeit ab. Mit engeren Eintrittspalten verbessert sich zwar die Auflösung, allerdings nimmt die Empfindlichkeit deutlich ab. Als Kompromiss wurde bei den UV/VIS-Spektrometern (0603er Layout) eine Spaltbreite von 50 μm gewählt. Die als Einkoppelfaser ausgewählte Singlemodefaser besitzt allerdings lediglich einem Kerndurchmesser von 6 μm . Dieser ist bereits so gering, dass er nicht noch durch einen zusätzlichen Eintritts-

spalt verringert werden sollte. Aus diesem Grund wird am freien Faserende lediglich ein mechanischer Anschlag benötigt, an den die Faser geschoben wird (siehe Abb. 6-4).

Den größten Einfluss auf das spektrale Auflösungsvermögen hat die Dispersion des Beugungsgitters, d.h. mit einer höheren Dispersion verbessert sich die Auflösung. Die Dispersion lässt sich durch eine Verringerung der Gitterkonstanten beziehungsweise durch eine Vergrößerung des optischen Weges im Spektrometer erhöhen. Eine Verringerung der Gitterkonstante wird von fertigungstechnischen Aspekten des LIGA-Verfahrens begrenzt. In der Vergangenheit wurden am IMT Mikrospektrometer mit Gitterkonstanten zwischen $1,5\ \mu\text{m}$ und $6,5\ \mu\text{m}$ mit Stufenhöhen zwischen $0,18\ \mu\text{m}$ und $1,2\ \mu\text{m}$ entwickelt [22].

Durch eine Vergrößerung des Rowland-Kreis-Radius und einer daraus resultierenden Vergrößerung des optischen Weges im Spektrometer lässt sich die Dispersion weiter erhöhen. Allerdings geht eine Vergrößerung des Rowland-Kreises mit größeren Außenabmaßen des Spektrometers einher. Die maximalen äußeren Abmaße eines LIGA-Mikrospektrometers werden durch den LIGA-Prozess definiert. Der am IMT aktuell mit einer Standard-Titan-Maske strukturierbare Bereich beträgt $20\ \text{mm} \times 60\ \text{mm}$. Bei Schrägbestrahlungen wird dieser Bereich, abhängig vom Verkippwinkel, anlagebedingt durch den Schattenwurf eines Kühlrings im Synchrotronstrahlrohr eingeschränkt. Bei der für einen 40° Auskoppelspiegel erforderlichen 50° Schrägbestrahlung verkürzt sich der strukturierbare Bereich auf der zum Strahl gekippten Hälfte des LIGA-Fensters um $8\ \text{mm}$. Daraus ergibt sich bei 50° Schrägbestrahlungen ein strukturierbarer Bereich von $20\ \text{mm} \times 52\ \text{mm}$. Für das Design des Spektrometers bedeutete dies, dass sich die schräge Kante des Auskoppelspiegels in dem noch strukturierbaren Bereich befinden muss. Die übrigen senkrechten Strukturen sind von diesem Effekt nicht betroffen. Dieser zur Verfügung stehende Bereich sollte ausgeschöpft werden. Zum Vergleich betragen beim UV/VIS-Spektrometer die äußeren Abmaße $20\ \text{mm} \times 45\ \text{mm}$.

Bei einer Vergrößerung des optischen Weges müssen die innerhalb des Hohlwellenleiters entstehenden Verluste durch Fresnel-Reflexionen beachtet werden. Die maximale Anzahl der Reflexionen $N = \tan(\alpha_{\text{max}}) \cdot L / H$ ist abhängig von den in der Einkoppelfaser geführten Winkeln ($\alpha_{\text{max}} = \arcsin(\text{NA})$), d.h. von der numerischen Apertur der Faser, der Länge L des optischen Gesamtwegs im Hohlwellenleiter und der Strukturhöhe H . Bei den UV/VIS-Spektrometern beträgt die Anzahl der Reflexionen ca. 40 ($L = 60\ \text{mm}$, $H = 340\ \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0,22$) [22]. Bei einer gleichen Strukturhöhe von $340\ \mu\text{m}$, bleibt aufgrund der geringeren numerischen Apertur, der im Rahmen dieser Arbeit zur Einkopplung verwendeten Single-modefaser ($\text{NA} = 0,14$), die maximale Anzahl der Reflexionen bei einer Vergrößerung des optischen Wegs auf $L \approx 100\ \text{mm}$ mit ca. 42 Reflexionen etwa gleich groß.

Von der Breite der Detektorpixel wird die spektrale Auflösung nur beeinflusst, wenn der „Pitch“ (Abstand der Mitten benachbarter Photodioden) nicht deutlich kleiner ist als die Breite der Abbildung des Eintrittsspalt auf dem Detektor. Zunächst wurde das Spektrometer auf die Verwendung einer in den UV/VIS-Spektrometern eingesetzten Hamamatsu Detektorzeile (Typ S8378-256N) ausgelegt, auch um die bestehende Elektronik für diese Detektorzeile nutzen zu können. Diese Zeilen bestehen aus 256 Photodioden, die jeweils $25\ \mu\text{m}$ breit und $500\ \mu\text{m}$ hoch sind. Die minimale Integrationszeit von diesen Zeilen beträgt allerdings nur $4\ \text{ms}$. Damit Messraten von mindestens $1\ \text{kHz}$ erreichbar sind, ist eine Integrationszeit von

≤ 1 ms erforderlich. Um diese Integrationszeiten erzielen zu können, wurden im Verlauf der Entwicklung, die um den Faktor vier empfindlichere Detektorzeile (Hamamatsu, S9227) von der Firma microParts ausgewählt und entsprechende Anpassungen an der Ausleseelektronik vorgenommen. Diese Detektorzeile besteht aus 512 Pixeln, mit einer Breite von jeweils $12,5 \mu\text{m}$ und einer Tiefe von $500 \mu\text{m}$.

Um der im langwelligen Bereich des sichtbaren Lichts nachlassenden Empfindlichkeit von siliziumbasierten Detektorzeilen entgegen zu wirken, wurde die Blazewellenlänge des Spektrometers auf 950 nm gelegt.

Mit diesen beschriebenen Randbedingungen lässt sich das Spektrometerdesign simulieren. Zur Simulation von LIGA-Mikrospektrometern steht am IMT entwickelte Software zur Verfügung, mit der das Spektrometerlayout und insbesondere das Gitter simuliert werden können. Iterative Optimierungen ergaben unter den beschriebenen Vorgaben eine als technologisch sicher bewertete Gitterkonstante von $2 \mu\text{m}$.

6.2 Design des Mikrospektrometers

Mit Hilfe der Simulationen wurde die Lage der Einkoppelfaser, die Position und Form des Gitters und der Zähne sowie die Lage und Abmaße des Auskoppelspiegels ermittelt.

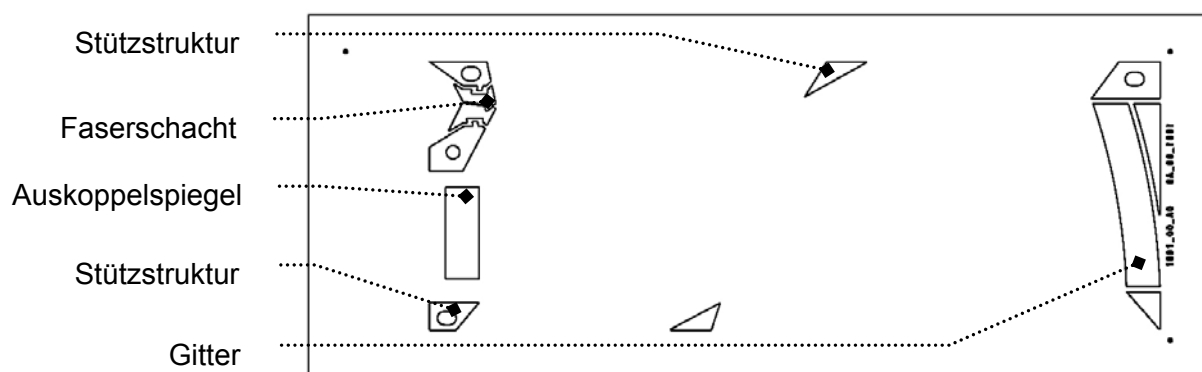


Abb. 6-1 Maskenlayout des Mikrospektrometers mit Faserschacht, Gitter, Auskoppelspiegel und Stützstrukturen, Layout-Nr. 1001-00-A0

Neben diesen optischen Funktionselementen werden zum Aufbau des Spektrometersystems zusätzliche Strukturen benötigt (siehe Abb. 6-1). Zur stabilen Halterung der Einkoppelfaser ist ein Faserschacht mit einem Anschlag erforderlich. Des Weiteren sind Stützstrukturen notwendig, die als mechanische Stützen für den Deckel dienen. Diese Strukturen dürfen den optischen Strahlengang nicht ungünstig beeinflussen und kein Streulicht auf den Detektor reflektieren. Außerdem sollten die Stützstrukturen von den optischen Funktionselementen getrennt sein, um äußere mechanische Einflüsse auf die optischen Eigenschaften zu verhindern.

Um die Form und Lage der Stützstrukturen zu optimieren, so dass diese kein Streulicht in Richtung des Detektors reflektieren, wurde der Lichtweg sowie das Design der Strukturen mit Hilfe von Zemax Raytracing-Simulationen überprüft und iterativ optimiert. In der Abb. 6-2 ist der Lichtweg zum Gitter sowie die 0. Ordnung zu erkennen. Die höheren Beugungsordnungen

gen können mit der auf geometrischer Optik basierenden Software Zemax nicht simuliert werden.

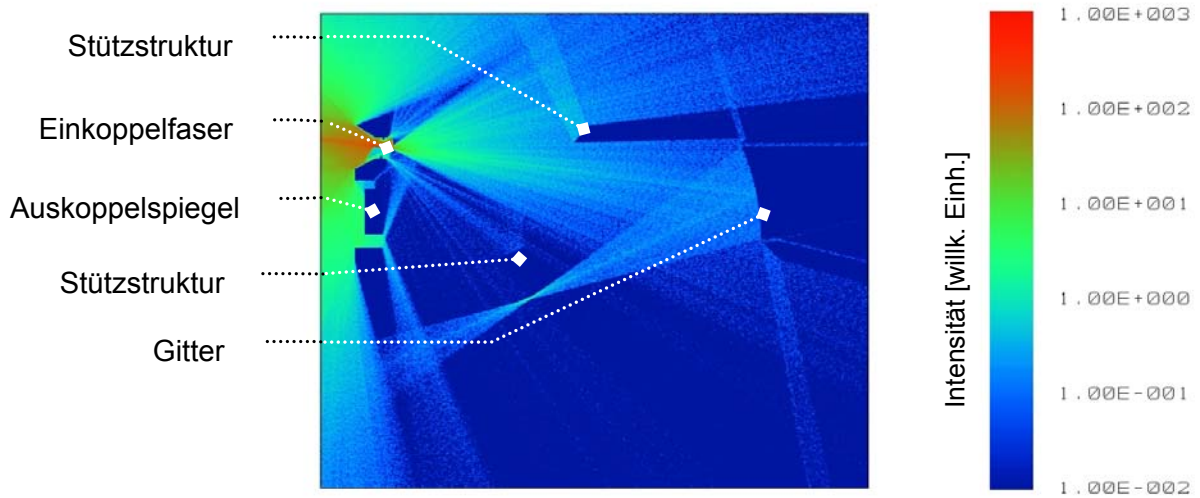


Abb. 6-2 Raytracing-Simulation des Strahlengangs mit Zemax

Die Abb. 6-2 zeigt, dass kein hoher Streulichtanteil von den Stützstrukturen in Richtung des Auskoppelspiegels reflektiert wird.

6.3 Herstellung des Mikrospektrometers mit Hilfe des LIGA-Verfahrens

Die Herstellung der Röntgenmasken sowie die Fertigung von mehreren direktlithografischen Spektrometern erfolgten vollständig nach dem am IMT standardisierten LIGA-Prozess (siehe Kapitel 2.2). Die Abb. 6-3 zeigt den schematischen Aufbau des Mikrospektrometers bestehend aus Siliziumsubstrat, verspiegelten Spektrometerstrukturen aus PMMA und verspiegeltem Siliziumdeckel. Als Deckel wurden 500 μm dicke Siliziumwafer mit geätzten Auskoppelkanten verwendet, die am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg gefertigt wurden.

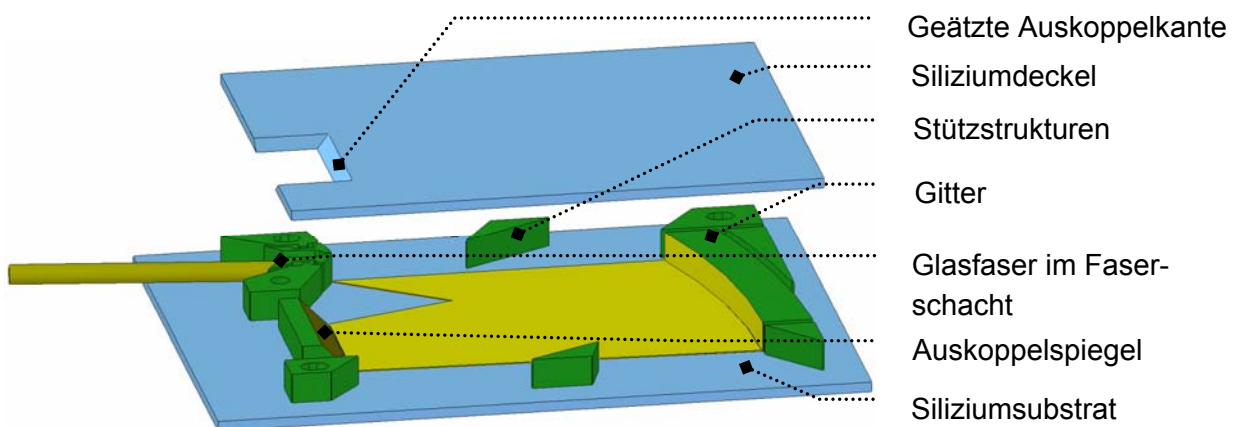


Abb. 6-3 Schematischer Aufbau eines LIGA-Mikrospektrometers

Zur Verspiegelung wurden die Spektrometer bei der Firma Boehringer Ingelheim microParts GmbH in einem etablierten Prozess mit Aluminium bedampft. Abb. 6-4 zeigt den Faserschacht eines direktlithographischen Spektrometers mit eingelegter Faser.

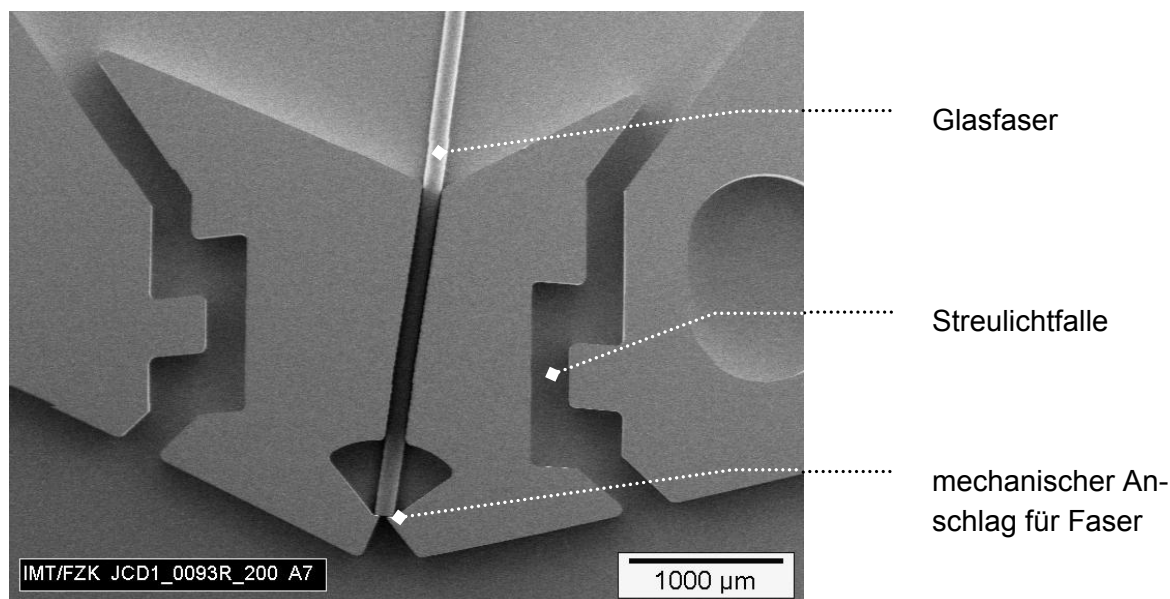


Abb. 6-4 Einkoppelschacht mit eingelegter Singlemodefaser

6.4 Charakterisierung des Mikrospektrometers

Die Charakterisierung erster direktlithografischer Spektrometer erfolgte an dem am IMT bestehenden Spektrometer-Messstand. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem Monochromator der Firma Bentham (Modell M300). Mit Hilfe des Monochromators wurde Licht mit einer Bandbreite von 0,81 nm (Spaltbreite 0,3 mm, Dispersion 2,7 nm pro mm) um einstellbare Zentralwellenlängen in das zu untersuchende Spektrometer eingekoppelt.

Aufgrund des sehr kleinen Kerndurchmessers von 6 µm der als Einkoppelfaser ausgewählten Singlemodefaser konnte nur sehr wenig Lichtintensität vom Monochromator in das Spektrometer eingekoppelt werden. Aus diesem Grunde wurde zur Charakterisierung eine Multimodefaser mit einem Kerndurchmesser von 105 µm und einer $NA = 0,22$ verwendet. Der mechanische Anschlag am Ende des Faserschachts diente dabei als 50 µm breiter Eintrittsspalt.

Als Detektorzeile kommt auf dem Spektrometer-Messstand die auch in den UV/VIS-Spektrometern verwendete Hamamatsu Detektorzeile mit 256 Photodioden zum Einsatz. Abb. 6-5 zeigt die mit dem Spektrometer gemessenen Peakflächen und normierte Peakleistung von Einzellinien bei monochromatischer Einkopplung in 10 nm Schritten zwischen 750 nm bis 1000 nm. Die gemessene Halbwertsbreite beträgt 3,9 nm und die Dispersion bei dieser Detektorzeile, wie konzipiert, 1 nm pro Pixel.

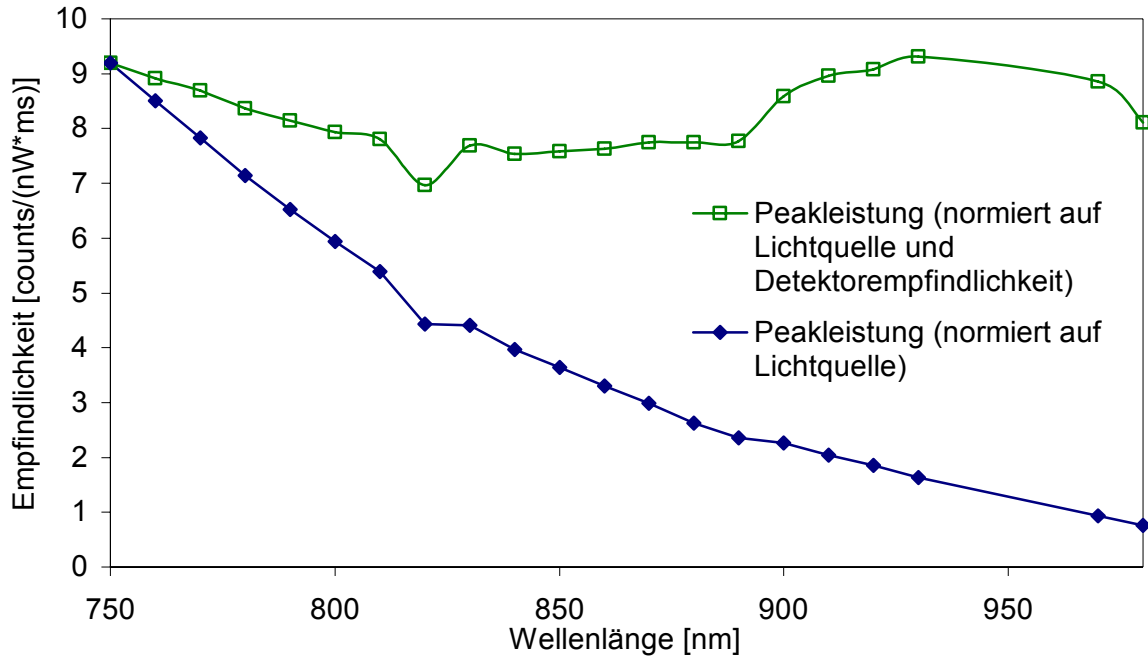


Abb. 6-5 Normierte Peakleistung des HymoSens-Spektrometers (Layout-Nr. 1001-00-A0, Los-Nr. 02922) bei monochromatischer Einkopplung und unter Berücksichtigung der wellenlängenabhängigen Detektorempfindlichkeit

Der Abfall der Empfindlichkeit zum langwelligeren Bereich hin ist auf die in diesem Bereich stark nachlassende Empfindlichkeit der siliziumbasierten Detektorzeile zurückzuführen. Dies kann durch Normierung der Messergebnisse mit der spektralen Empfindlichkeit der verwendeten Detektorzeile gezeigt werden. Die normierte Kurve zeigt eine höhere Empfindlichkeit des Spektrometers im Bereich von 950 nm, der Blaze-Wellenlänge des Spektrometers.

Um die Qualität des Spektrometers und insbesondere die des Gitters beurteilen zu können, wurden die Ergebnisse der Messung des Fehllichtuntergrunds mit dem Mittelwert von sieben sehr guten direktlithografischen UV/VIS-Spektrometern (0603er Layout) verglichen. Um beide Systeme miteinander vergleichen zu können, ist es erforderlich, diese unabhängig von ihren unterschiedlichen Dispersionen zu betrachten. Abb. 6-6 zeigt die auf eine Maximalintensität von 100 Counts normierte logarithmische Darstellung der Einzellinien. Bei einer pixelweisen Betrachtung verhält sich der Fehllichtuntergrund beider Spektrometersysteme ähnlich. Dies zeigt, dass die beiden Systeme und insbesondere die Gitter qualitativ gleichwertig sind. Die asymmetrische Verbreiterung der Graphen auf der langwelligen Seite ist auf die Modenverbreiterung durch die hohe numerische Apertur der zur Charakterisierung verwendeten Einkoppelfaser zurückzuführen, d.h. dieser Effekt wird bei Verwendung mit der Singlemodefaser mit einer $NA = 0,14$ deutlich geringer ausfallen.

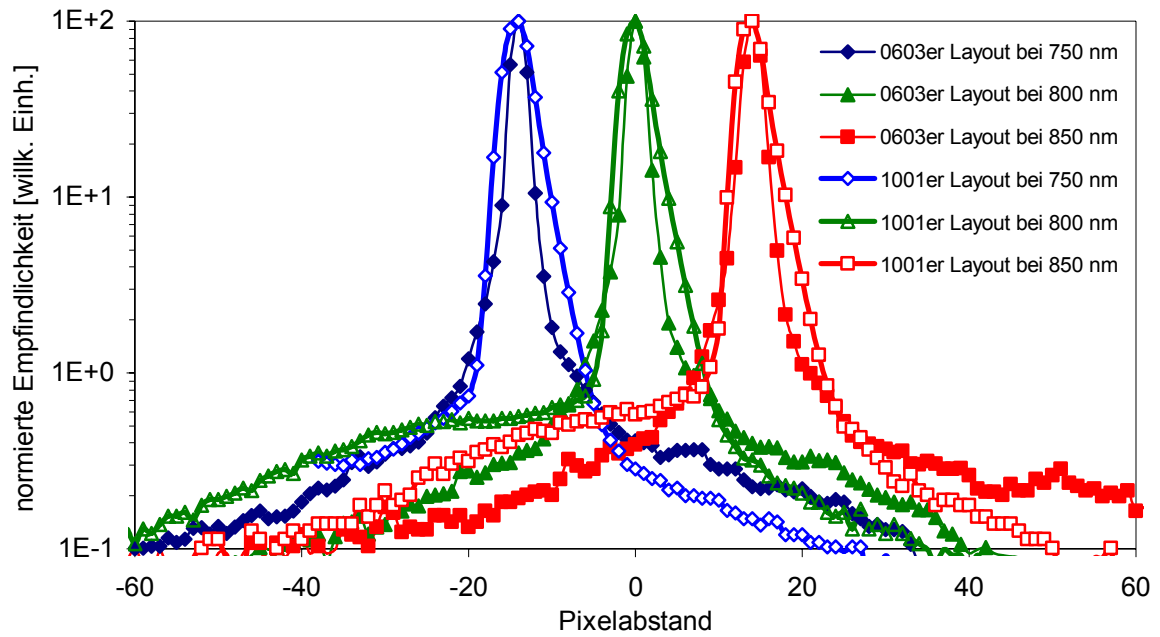


Abb. 6-6 Vergleich des Fehllichtuntergrunds bei monochromatischer Einkopplung und normierter Dispersion ($0,14 \text{ nm}/\mu\text{m}$) zwischen HymoSens-Spektrometer (Layout-Nr. 1001-00-A0, Los-Nr. 02922) und 0603er Layout

*Was ist das Schwerste von allem?
Was dir das Leichteste dünket,
Mit den Augen zu sehen,
Was vor den Augen dir liegt.*

Johann Wolfgang von Goethe (1749 – 1832)

7 Charakterisierung des Gesamtsystems

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Auswahl einer geeigneten Lichtquelle, die Entwicklung von den seitlich und geradeaus messenden Sensorköpfen sowie die Entwicklung eines Mikrospektrometers beschrieben wurde, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Charakterisierung von beiden Gesamtsystemen vorgestellt. Hierzu wird zunächst die prinzipielle Auswertung von mit chromatisch konfokalen Sensoren ermittelten Messwerten beschrieben.

7.1 Messauswertung von chromatisch konfokalen Sensorsystemen

Das Auflösungsvermögen eines chromatisch konfokalen Sensors hängt neben der Stärke der chromatischen Längsaufspaltung und der konfokalen Tiefendiskriminierung davon ab, wie gut das spektral kodierte Höhensignal bestimmt wird. Bei der Detektion eines chromatisch konfokalen Intensitätssignals werden im Messbereich wellenlängenabhängige Intensitätswerte mit einem Spektrometer aufgenommen.

Zur Auswertung der detektierten Messwerte müssen die verschiedenen spektralen Einflüsse berücksichtigt werden, die zu dem chromatisch konfokalen Signal führen: Die gemessenen konfokalen Intensitätsmaxima für die unterschiedlichen Wellenlängen hängen direkt von der spektralen Intensitätsverteilung der Lichtquelle ab. Das gleiche gilt für die spektral abhängige Sensoreffizienz, die sich durch die unterschiedlichen Transmittivitäten der verwendeten refraktiven Komponenten sowie die wellenlängenabhängigen Beugungseffizienzen der eingesetzten diffraktiven Komponenten ergeben. Das spektral kodierte Signal resultiert aus der chromatischen Längsaufspaltung über den Messbereich und die konfokale Tiefendiskriminierung, d.h. durch die Verknüpfung von Wellenlänge und Brennweite. Nichtlinearitäten der spektralen Aufspaltung führen dabei zu einer Verzerrung des Intensitätssignals, die mit Hilfe einer Kalibrierung herausgerechnet werden können [47].

Entsprechend müssen bei der Auswertung zwei Umrechnungen vorgenommen werden, die zum einen die Intensitätsachse und zum anderen die Spektralachse betreffen. Die spektralen Intensitätswerte werden mit dem Spektrum der Lichtquelle gewichtet, um spektral unabhängige Intensitätswerte zu erhalten, die mit monochromatischen konfokalen Signalen vergleichbar sind. Anschließend müssen die wellenlängenabhängigen Intensitätswerte unter Berücksichtigung der genannten Nichtlinearitäten in Abstände umgerechnet werden.

Zur Umrechnung der Intensitätswerte in Abstände ist es erforderlich, das spektrale Intensitätsmaximum exakt zu bestimmen. Hierzu existieren verschiedene Strategien. Ein Ansatz besteht darin, eine dem erwarteten Signal ähnliche Funktion durch die gemessenen Intensitätswerte zu nähern. Das theoretische chromatisch konfokale Intensitätssignal entspricht nach Formel (2.4) einer sinc^2 -Funktion. Im Bereich des Maximums bis zur halben Maximalin-

intensität lässt sich diese Funktion gut mit einer Parabel nähern. Diese Methode erfordert allerdings einen hohen Rechenaufwand. Alternativ kann zur Bestimmung des Höhenwerts eine Schwerpunktauswertung angewendet werden [47]. Dieser Ansatz erfordert wesentlich weniger Rechenoperationen und ist damit schneller.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden beide Ansätze verwendet und beide lieferten vergleichbare Ergebnisse. Abhängig von den zukünftigen Einsatzgebieten des Sensors sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die optimale Messstrategie zu ermitteln.

7.2 Ergebnisse des seitlich messenden Sensorsystems

Die Messungen mit dem seitlich messenden Sensorkopf (GRIN-Linse mit gelaserten diffraktiven Elementen, siehe Kapitel 4.2) wurden bei der Firma Mahr durchgeführt. Als Lichtquelle diente eine SLD (Exalos, EXS8305-1811) mit einer Schwerpunktwellenlänge von 830 nm, einer Halbwertsbreite von 30 nm und einer Ausgangsleistung von 3 mW. Die Detektierung der chromatisch konfokalen Signale erfolgte mit dem entwickelten LIGA-Mikrospektrometer. Dies war mit einer Detektorzeile mit 512 Photodioden (Hamamatsu, S9227) konfektioniert, so dass die Signale mit einer Dispersion von 0,5 nm pro Pixel bzw. mit circa 20 spektralen Intensitätswerten im Bereich der Halbwertsbreite erfasst wurden.

Gemessen wurde auf einer Aluminiumoberfläche. Die Abstandsänderung erfolgt mit einem Piezostelltisch in 500 nm Schritten. Die Abb. 7-1 zeigt die gemessenen spektralen Intensitätswerte jeder zweiten Messung, d.h. der Abstand zwischen den Spektren beträgt jeweils 1 μm .

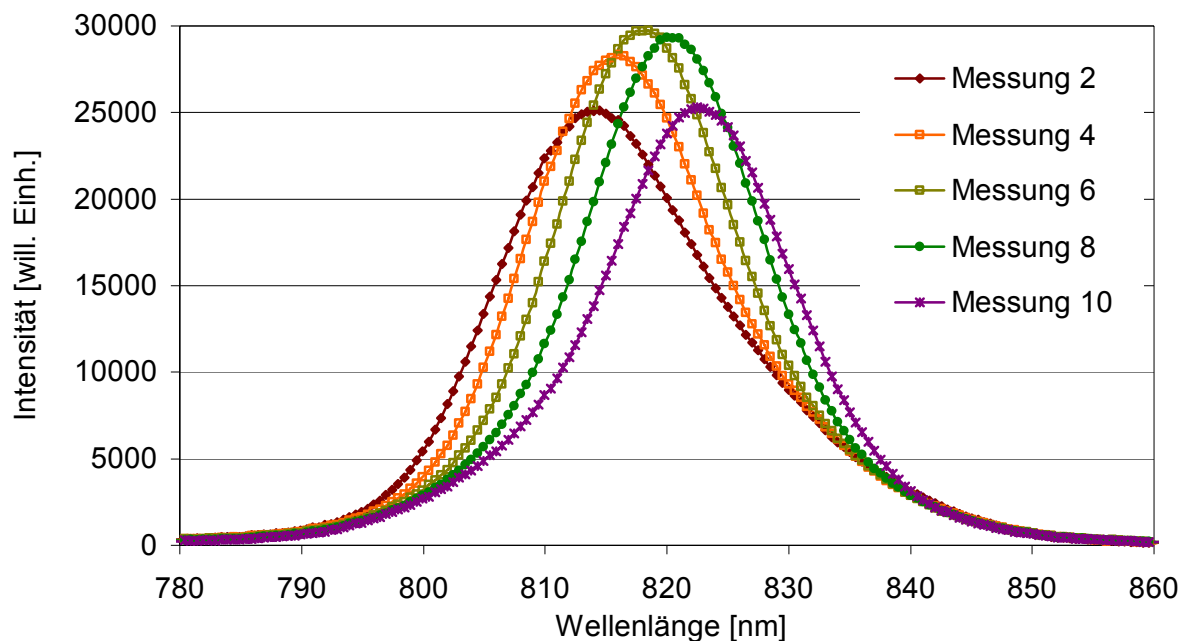


Abb. 7-1 Spektrale Intensitätsmaxima für unterschiedliche Fokusslänge, die Abstandsdifferenz zwischen den Intensitätsmaxima beträgt jeweils 1 μm

Die einzelnen Spektren weisen einen sehr gleichmäßigen und annähernd symmetrischen Verlauf auf und entsprechen in dieser Form den Erwartungen. Die Auswertung der ermittelten Spektralwerte und Umrechnung in Höhenwerte (siehe Abb. 7-2) erfolgte bei diesen Mes-

7. Charakterisierung des Gesamtsystems

sungen durch Näherung mit einem Polynom dritter Ordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (least squares).

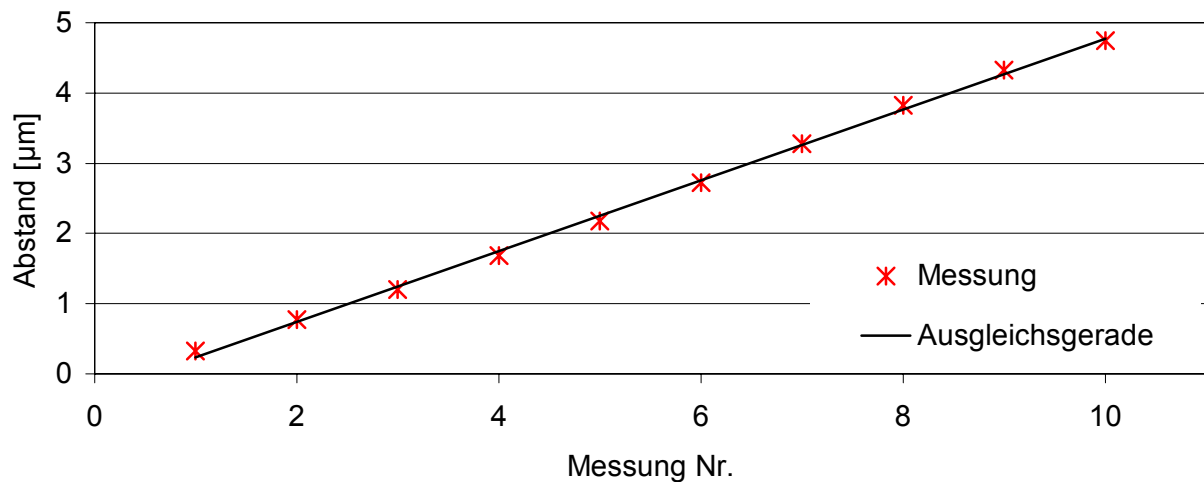


Abb. 7-2 Auswertung der spektralen Intensitätsmaxima in Abhängigkeit von der Abstandsänderung, Abstand der Messpunkte $0,5 \mu\text{m}$

Die Abweichung der Lage der spektralen Intensitätsmaxima von der Ausgleichsgeraden liegt zwischen $0,09 \mu\text{m}$ und $-0,08 \mu\text{m}$, die Standardabweichung beträgt $0,058 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 7-3).

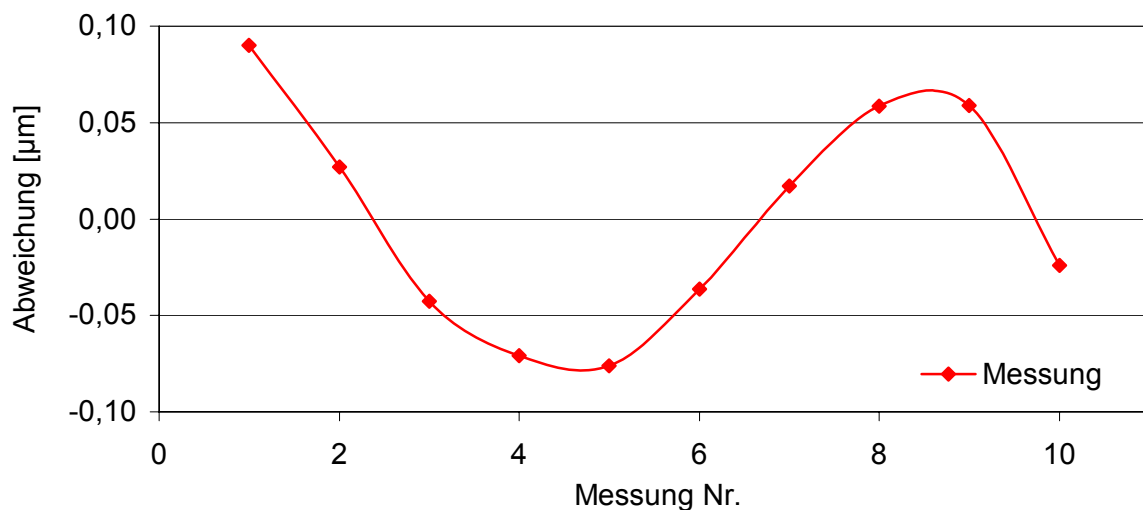


Abb. 7-3 Abweichung der ermittelten Abstandswerte von der Ausgleichsgeraden, Abstand der Messpunkte $0,5 \mu\text{m}$

Allerdings verfügen die vermessenen Sensorköpfe nur über einen eingeschränkten Messbereich von circa $5 \mu\text{m}$ und noch nicht über einen geforderten Bereich von $50 \mu\text{m}$. Dies hängt mit dem Auftreten eines sehr starken Rückreflexes zusammen. Als Ursache für diesen Reflex werden Reflexionen an den gelaserten diffraktiven Elementen vermutet. Die Abb. 7-3 weist trotz des eingeschränkten Messbereichs bereits eine systematische Abweichung von

der Ausgleichsgeraden auf, so dass sich die Messauflösung nach der Beseitigung des Rückreflex und unter Berücksichtigung dieser Abweichung noch weiter verbessern lässt.

Abb. 7-4 zeigt die Auswertung von Spektralwerten, die bei Messungen mit einer Abstandsänderung von 20 nm aufgenommen wurden. Zwischen den Abstandsänderungen wurden jeweils 50 Spektren aufgenommen, die minimalen und maximalen Abweichungen sind im Diagramm durch die Fehlerbalken gekennzeichnet. Die mittlere Standardabweichung der einzelnen Messserien betrug 2,8 nm.

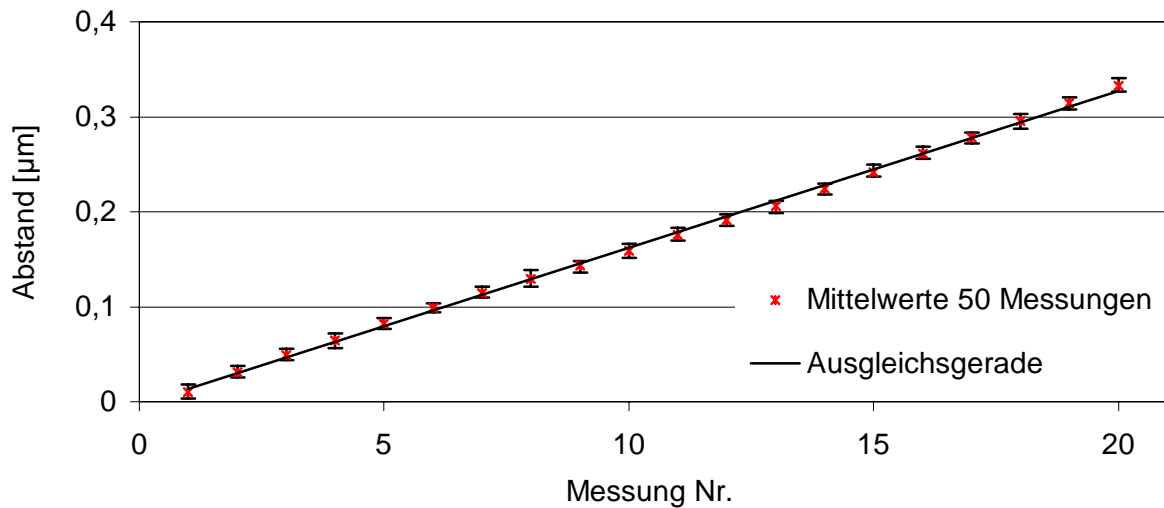


Abb. 7-4 Auswertung der spektralen Intensitätsmaxima in Abhängigkeit von der Abstandsänderung, Abstand der Messpunkte 20 nm

Die Auswertung zeigt deutliche und gleichmäßige Stufen zwischen den verschiedenen Abständen. Dies erlaubt die Aussage, dass dieser Sensorkopf über eine Messauflösung von mindestens 20 nm verfügt. Die Standardabweichung der Lage der spektralen Intensitätsmaxima von der Ausgleichsgeraden betrug bei diesen Messungen 3 nm (siehe Abb. 7-3).

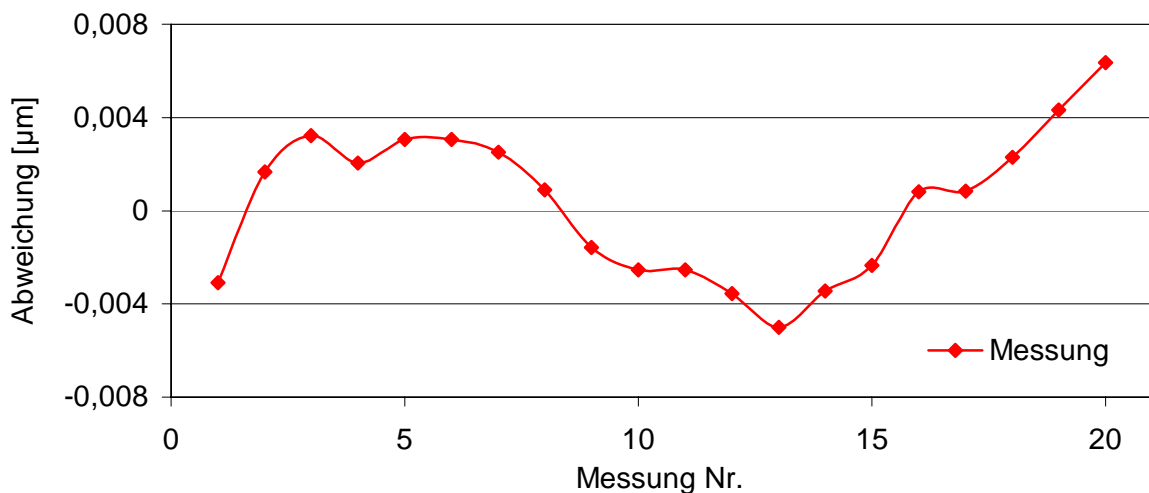


Abb. 7-5 Abweichung der ermittelten Abstandswerte von der Ausgleichsgeraden, Abstand der Messpunkte 20 nm

7.3 Ergebnisse des geradeaus messenden Sensorsystems

Als Lichtquelle beim geradeaus messenden Sensor wurde die gleiche SLD wie bei der Charakterisierung des seitlich messenden Sensors verwendet. Die Detektierung der chromatisch konfokalen Signale erfolgte mit dem entwickelten LIGA-Mikrospektrometer. Dabei war dies mit einer Detektorzeile mit 256 Photodioden (Hamamatsu, S8378-256N) konfektioniert, so dass die Signale mit einer Dispersion von 1 nm pro Pixel bzw. mit circa 10 spektralen Intensitätswerten im Bereich der Halbwertsbreite erfasst wurden.

Gemessen wurde senkrecht auf einem mit Gold verspiegelten Siliziumwafer. Die Abstandsänderung erfolgte mit einem Piezostelltisch (Profile, POCO 4000) in 500 nm Schritten. Zunächst werden die Ergebnisse von den Sensoren vorgestellt, bei denen die Ausrichtung der diffraktiven Elemente mit LIGA-Justagestrukturen erfolgte, anschließend die Ergebnisse von den Sensorköpfen mit den rund vereinzelt diffraktiven Elementen.

7.3.1 Sensorkopf mit LIGA-Justagestrukturen

Abb. 7-6 zeigt die gemessenen spektralen Intensitätswerte jeder fünften Messung, d.h. der Abstand zwischen den Spektren beträgt jeweils 2,5 μm .

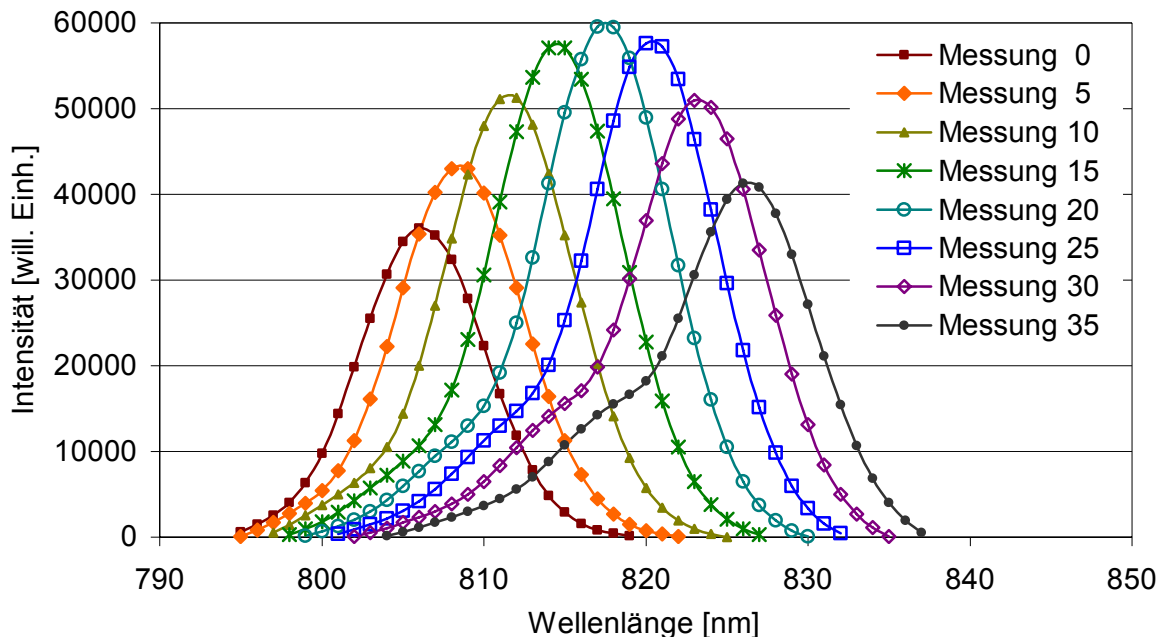


Abb. 7-6 Spektrale Intensitätsmaxima für unterschiedliche Fokusslänge, die Abstandsdifferenz zwischen den Intensitätsmaxima beträgt jeweils 2,5 μm

Die einzelnen Spektren weisen einen gleichmäßigen Verlauf auf und entsprechen im Wesentlichen den Erwartungen. Allerdings werden sie im langwelligeren Bereich zunehmend auf der kurzwelligen Seite unsymmetrisch. Diese Unsymmetrie konnte in diesem Umfang beim seitlich messenden Sensorkopf nicht beobachtet werden (siehe Abb. 7-1). Bei dem im Folgenden vorgestellten geradeaus messenden Sensorkopf wird diese Unsymmetrie noch ausgeprägter beobachtet (siehe Abb. 7-12). Die Justagegenauigkeit der diffraktiven Elemente unterscheidet sich deutlich zwischen diesen beiden Varianten und wird deswegen nicht als Ursache in Erwägung gezogen. Vermutet wird ein leichter Reflex, der durch das diffraktive

Element verursacht wird, dass sich bei dem geradeaus messenden Sensorkopfdesign auf der GRIN-Linsen zugewandten Seite befindet.

Die Auswertung der ermittelten Spektralwerte und die Umrechnung in Höhenwerte (siehe Abb. 7-7) erfolgte mit Hilfe einer vom ITO programmierten MATLAB-Routine auf Basis einer Schwerpunktauswertung (siehe Formel (4.1)). Im Mittel beträgt das Verhältnis zwischen der Abstandsänderung und der spektralen Schwerpunktverschiebung $0,74 \mu\text{m}$ pro nm. Die Halbwertsbreite der verwendeten SLD beträgt 25 nm, genutzt werden konnte eine spektrale Bandbreite von 40 nm, dies ergibt einen Arbeitsbereich von $30 \mu\text{m}$. Dieser Arbeitsbereich erfüllt damit die geforderten $20 \mu\text{m}$ bis $30 \mu\text{m}$ vollkommen.

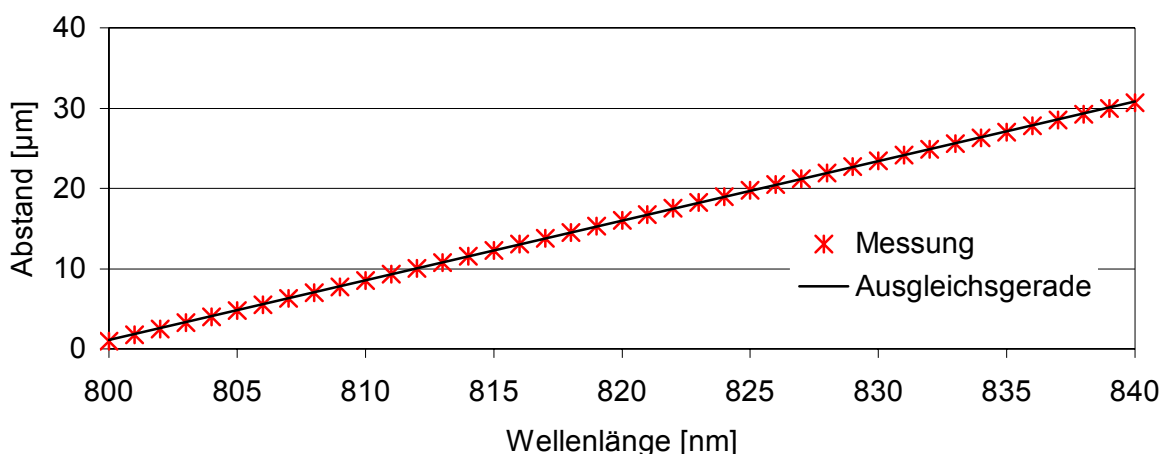


Abb. 7-7 Schwerpunktauswertung der spektralen Intensitätsmaxima in Abhängigkeit von der Abstandsänderung, Abstand der Messpunkte $0,5 \mu\text{m}$

Die Abweichung der Lage der spektralen Intensitätsmaxima von der Ausgleichsgeraden liegt zwischen $0,13 \mu\text{m}$ und $-0,06 \mu\text{m}$, die Standardabweichung beträgt $0,062 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 7-8).

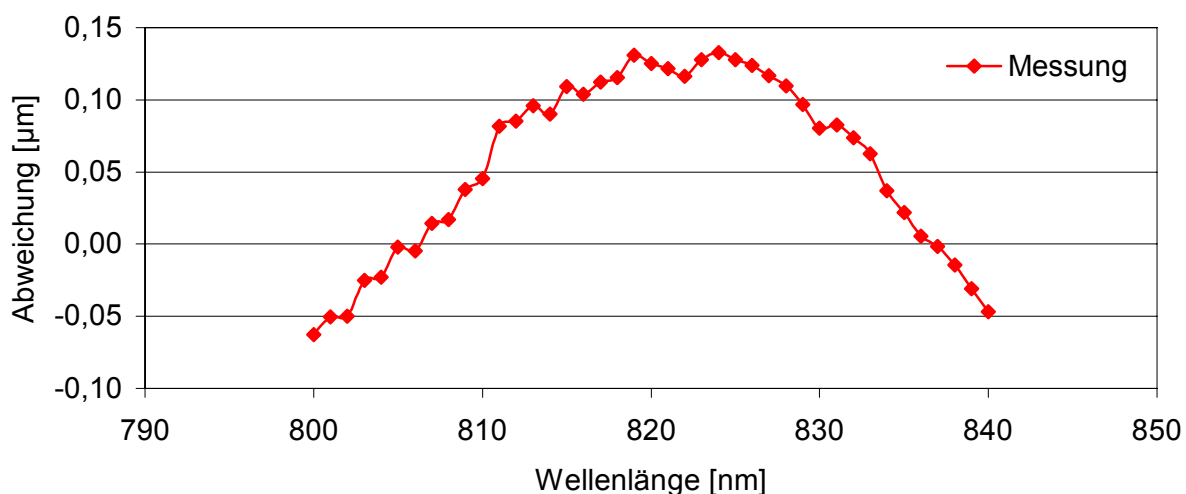


Abb. 7-8 Abweichung der ermittelten Abstandswerte von der Ausgleichsgeraden, Abstand der Messpunkte $0,5 \mu\text{m}$

7. Charakterisierung des Gesamtsystems

Abb. 7-8 zeigt eine systematische und nahezu symmetrische Abweichung von der Ausgleichsgerade mit einem Maximum bei circa 820 nm. Für diese Wellenlänge wurde der Sensorkopf optimiert. Diese Abweichung kann auf Nichtlinearitäten der optischen Komponenten zurückgeführt und bei der Auswertung entsprechend berücksichtigt werden, so dass sich die Messauflösung deutlich verbessert.

Abb. 7-9 zeigt die Auswertung von Spektralwerten, die bei Messungen mit einer Abstandsänderung von 10 nm aufgenommen wurden. Diese Messung wurde bei der Firma Mahr mit der gleichen Lichtquelle und dem gleichen Spektrometer auf einer Aluminiumoberfläche durchgeführt.

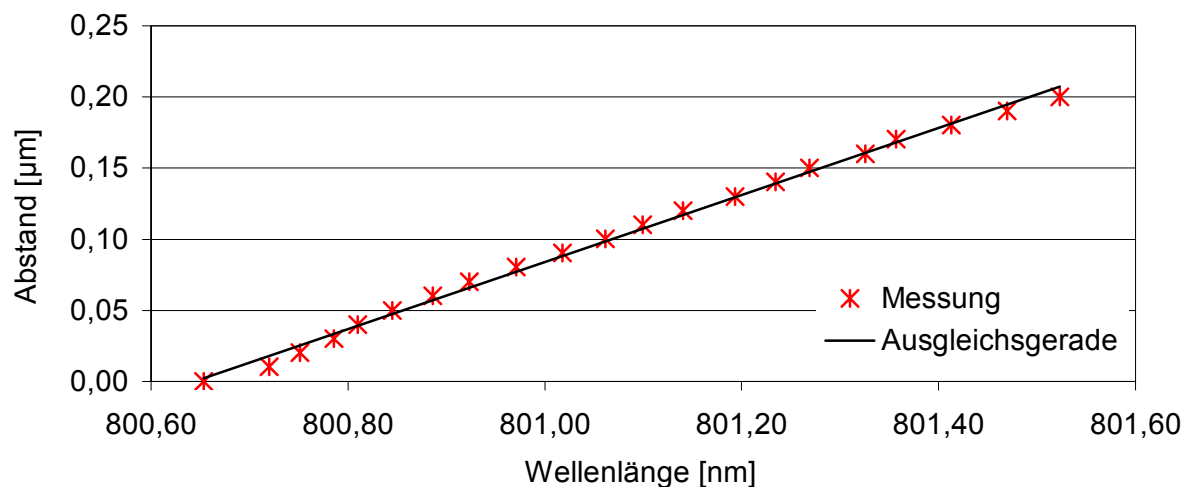


Abb. 7-9 Schwerpunktauswertung der spektralen Intensitätsmaxima in Abhängigkeit von der Abstandsänderung, Abstand der Messpunkte 10 nm

Die Auswertung zeigt deutliche und gleichmäßige Stufen zwischen den verschiedenen Abständen. Dies erlaubt die Aussage, dass dieser Sensorkopf über eine Messauflösung von mindestens 10 nm verfügt.

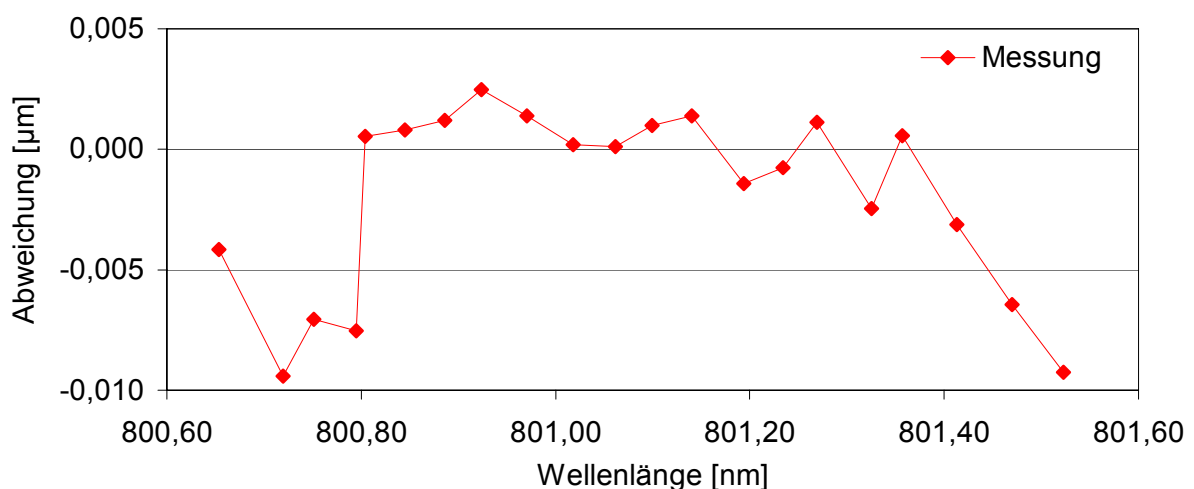


Abb. 7-10 Abweichung der ermittelten Abstandswerte von der Ausgleichsgeraden, Abstand der Messpunkte 10 nm

Die Standardabweichung der Lage der spektralen Intensitätsmaxima von der Ausgleichsgeraden betrug bei diesen Messungen 3,8 nm (siehe Abb. 7-10).

Mit Hilfe einer Dauermessung (siehe Abb. 7-11) wurde die Stabilität des Sensorsystems ermittelt. Die durchschnittliche am Spektrometer gemessene Standardabweichung der Schwerpunktwellenlänge betrug 0,0018 nm bzw. bezogen auf die Abstandsänderung bedeutet dies eine Standardabweichung von 1,37 nm, um die die Abstandsinformation schwankt.

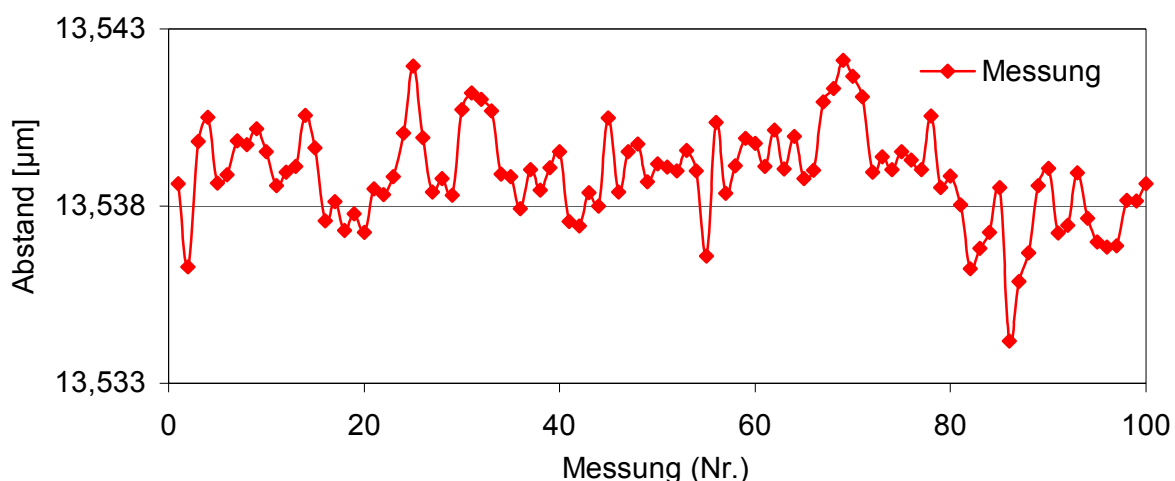


Abb. 7-11 Dauermessung zur Ermittlung der Sensorstabilität

7.3.2 Sensorkopf mit rund vereinzelt diffraaktiven Elementen

Abb. 7-12 zeigt die gemessenen spektralen Intensitätswerte jeder fünften Messung, d.h. der Abstand zwischen den Spektren beträgt jeweils 2,5 μm .

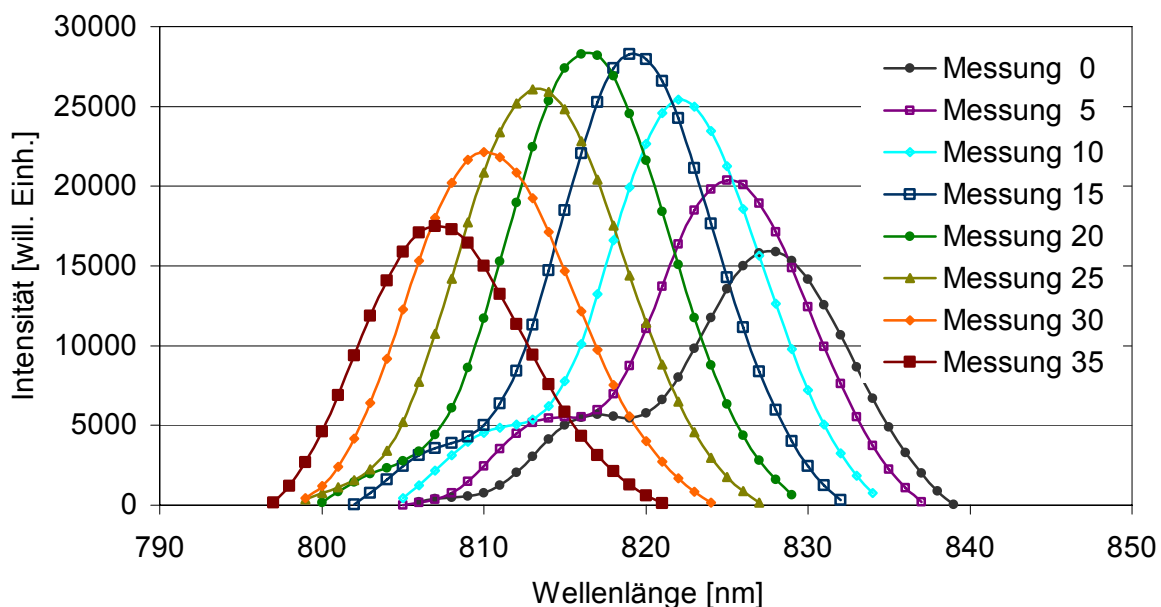


Abb. 7-12 Spektrale Intensitätsmaxima für unterschiedliche Fokusslänge, die Abstandsdifferenz zwischen den Intensitätsmaxima beträgt jeweils 2,5 μm

7. Charakterisierung des Gesamtsystems

Im Vergleich zu den spektralen Intensitätswerten der Sensoren, die im vorherigen Abschnitt charakterisiert wurden (siehe Abb. 7-6), fallen die spektralen Intensitätswerte nur etwa halb so hoch aus. Dies wurde auf die deutlich ungenauere Justage der rund vereinzelt diffraktiven Elemente zurückgeführt. Die Auswertung der ermittelten Spektralwerte und Umrechnung in Höhenwerte erfolgte auf Basis einer Schwerpunktauswertung (Abb. 7-13). Im Mittel beträgt das Verhältnis zwischen der Abstandsänderung und der spektralen Schwerpunktverschiebung $0,672 \mu\text{m pro nm}$. Dies ermöglicht, wie vorher beschrieben, bei einer spektralen Bandbreite von 40 nm einen geforderten Arbeitsbereich von knapp $30 \mu\text{m}$.

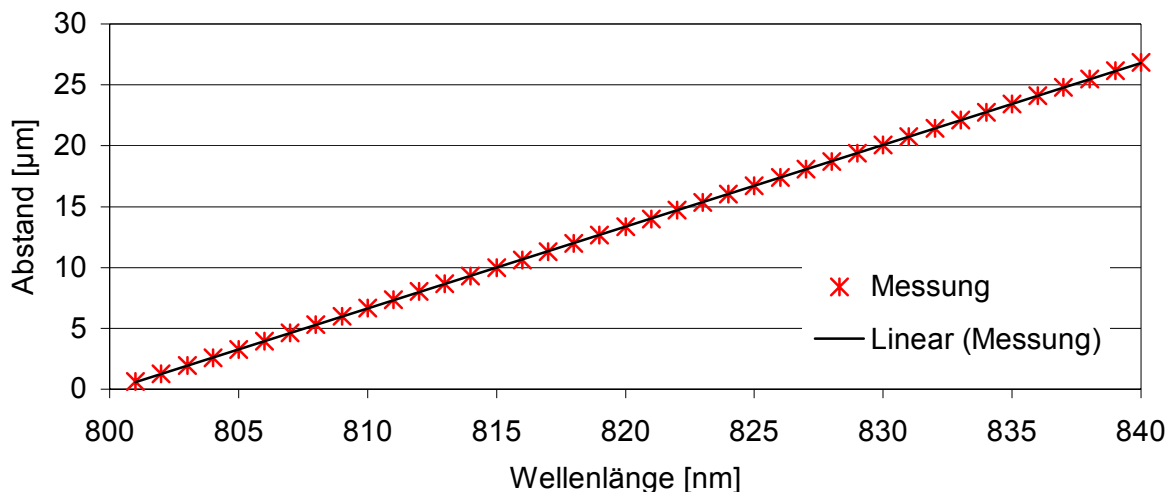


Abb. 7-13 Schwerpunktauswertung der spektralen Intensitätsmaxima in Abhängigkeit von der Abstandsänderung, Abstand der Messpunkte $0,5 \mu\text{m}$

Die Abweichung der spektralen Intensitätsmaxima von der Ausgleichsgeraden liegt zwischen $0,04 \mu\text{m}$ und $-0,05 \mu\text{m}$, die Standardabweichung beträgt $0,026 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 7-14).

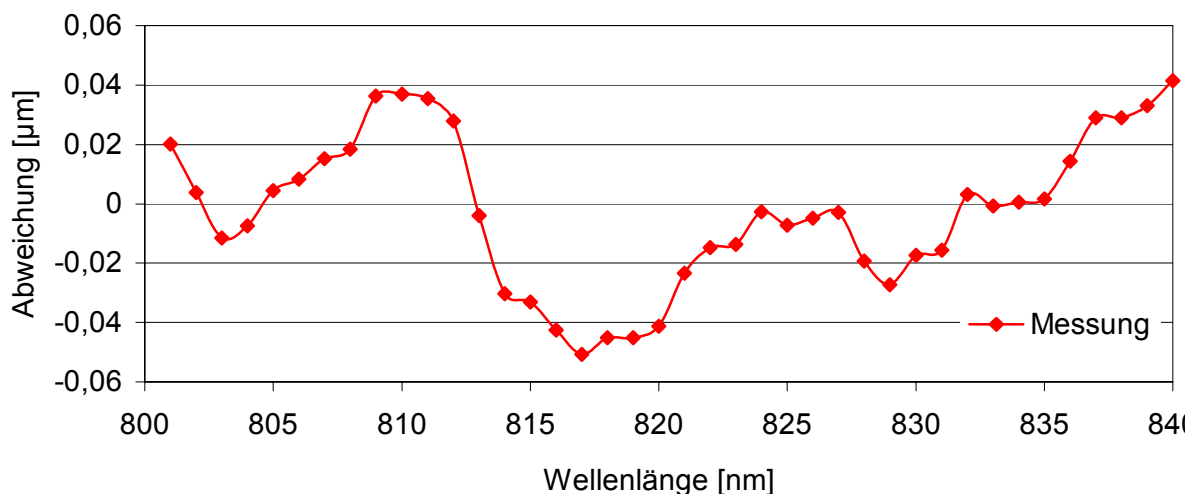


Abb. 7-14 Abweichung der ermittelten Abstandswerte von der Ausgleichsgeraden

Die im Vergleich zu den mit LIGA-Strukturen justierten diffraktiven Elemente deutlich unsymmetrische Abweichung von der Ausgleichsgeraden (siehe Abb. 7-8), wird auf die wesentlich ungenauere Positionierung der rund vereinzelt diffraktiven Elemente zurückgeführt.

I have not failed 700 times. I have not failed once. I have succeeded in proving that those 700 ways will not work. When I have eliminated the ways that will not work, I will find the way that will work.

Thomas A. Edison (1847 – 1931)

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, zwei miniaturisierte Abstandssensoren zu entwickeln, die zur prozessnahen Überwachung von Fertigungstoleranzen von kleinen mechanischen und optischen Präzisionsbauteilen geeignet sind. Der erste Sensor sollte eine Longitudinalauflösung von 20 nm besitzen und sich durch eine 90° Strahlumlenkung auszeichnen, die ein seitliches Messen in Bohrungen mit Durchmessern von minimal 2 mm ermöglicht. Der andere Sensor sollte geradeaus messen und über eine hohe Messauflösung von circa 10 nm verfügen. Um die beiden Sensorsysteme prozessnahe einsetzen zu können, sollten die Messraten der Systeme mindestens 1 kHz betragen.

Als Messprinzip wurde in der vorliegenden Arbeit das chromatisch konfokale Messverfahren ausgewählt, das auf einer chromatischen Kodierung der Abstandsinformation basiert. Dieses optische Prinzip ermöglicht im Vergleich zu taktilen Verfahren eine deutlich schnellere und kräftefreie Abtastung von Objekten. Gegenüber anderen optischen Messverfahren zeichnet sich das ausgewählte Prinzip insbesondere durch Longitudinalauflösungen im Nanometerbereich, große numerische Aperturen, kleine Messfleckdurchmesser sowie durch eine Unempfindlichkeit gegenüber Störlicht aus.

Die drei wesentlichen Module, aus denen ein chromatisch konfokaler Sensor besteht, sind eine Lichtquelle, ein Sensorkopf und ein Spektrometer. Die Herausforderung dieser Arbeit bestand darin, eine optimale Lichtquelle auszuwählen und die Sensorköpfe sowie ein für diese Anwendung optimiertes Mikrospektrometer zu entwickeln. Im Hinblick auf die geplante Vermarktung des Sensorsystems sollte dabei auf eine kommerzielle Verfügbarkeit der Komponenten geachtet, sowie wirtschaftliche und fertigungstechnische Aspekte für eine spätere Serienfertigung berücksichtigt werden.

Als Lichtquelle wurden eine Xenon-Bogenlampe und Superlumineszenzdiolen evaluiert. Insbesondere aufgrund der geringen optischen Leistung, die von der Xenon-Lampe in eine Singlemodefaser eingekoppelt werden konnte, schied die Bogenlampe als Lichtquelle aus.

Als geeignet erwiesen sich fasergekoppelte Superlumineszenzdiolen (SLD) mit Ausgangsleistungen größer 3 mW, die sich durch eine hohe Lebensdauer sowie eine günstige Verfügbarkeit auszeichnen. Mit den in dieser Arbeit verwendeten Superlumineszenzdiolen konnte der geforderte Arbeitsbereich und die Messauflösung der Sensorköpfe erreicht werden. Wesentlich größere Arbeitsbereiche in Kombination mit der hohen Messauflösung lassen sich gegenwärtig mit SLDs nicht erzielen, da diese aktuell nur mit spektralen Bandbreiten von bis zu 100 nm verfügbar sind.

Zukünftig wäre es denkbar, noch größere Messbereiche bei gleichzeitig hoher Auflösung durch den Einsatz von Superkontinuumlichtquellen mit mehreren hundert Nanometern

Bandbreite, d.h. Femtosekundenlaser in Verbindung mit Photonischen Kristallfasern, zu erzielen [20], [48]. Momentan sprechen jedoch die hohen Kosten vor allem für den Femtosekundenlaser gegen einen Einsatz im industriellen Umfeld.

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit war die Entwicklung der miniaturisierten Sensorköpfe. Hierzu wurden ein freistrahloptischer und ein integriert-optischer Ansatz für den seitlich messenden Sensor mit refraktiven und diffraktiven mikrooptischen Elementen konzipiert und experimentell erprobt. Der freistrahloptische Aufbau basiert auf einer mit Hilfe des LIGA-Verfahrens hergestellten mikrooptischen Bank. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, selbstjustierende Schiene-Reiter-System ermöglicht erstmals die präzise Kombination von refraktiven und diffraktiven optischen Elementen auf einer mikrooptischen LIGA-Bank. Allerdings erwies sich der freistrahloptische Ansatz aufgrund von Lichtverlusten und Rückreflexionen an den vielen optischen Grenzflächen für miniaturisierte chromatisch konfokale Sensoren als ungeeignet. Das zweite realisierte Sensorkopfdesign basiert auf einem integriert-optischen Aufbau mit einer GRIN-Linse. Durch die Vermeidung der Grenzflächen zwischen den optischen Komponenten werden bei diesem Aufbau die Lichtverluste und Rückreflexionen minimiert. Eine weitere Miniaturisierung des Sensorkopfs gelang bei diesem Design durch die Integration der diffraktiven Strukturen, die mit Laserablation hergestellt wurden, in das zur 90° Strahlumlenkung erforderliche Prisma. Der Durchmesser des Sensorkopfes beträgt zusammen mit einem Metallgehäuse nur noch 1,2 mm. Dies ist deutlich kleiner als der zu Beginn geforderte Durchmesser von 2 mm. Damit wurden erstmals auf dem chromatisch konfokalen Messprinzip basierende mikrooptische Sensoren realisiert, die zur Vermessung von Innenlöchern mit Durchmessern ab circa 1,5 mm geeignet sind. Erste Charakterisierungen mit diesen Sensoren ergaben Höhenauflösungen von 20 nm. Damit erfüllt dieses Sensorkopfdesign auch die geforderte Spezifikation hinsichtlich Messauflösung.

Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem seitlich messenden Sensor, wurde bei der Entwicklung des geradeaus messenden Sensors nur ein integriert-optischer Ansatz basierend auf einer Kombination aus einer GRIN-Linse mit einem diffraktiven Element verfolgt. Die Herausforderung bei diesem Konzept bestand im Wesentlichen darin, die diffraktiven optischen Elemente mit hoher Präzision vor der GRIN-Linse zu positionieren. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Varianten realisiert, die beide auf einer passiven Justage basieren. Eine präzise Ausrichtung gelang mit neuartigen LIGA-Justagestrukturen. Mit Hilfe von in die Justagestrukturen integrierten Federn konnten die diffraktiven Elemente auf $\pm 5 \mu\text{m}$ genau zur optischen Achse der GRIN-Linse positioniert werden. Der geforderte Sensorkopfdurchmesser von 2,8 mm wurde mit diesem Aufbau eingehalten und es gelang der Nachweis einer Höhenauflösung von mindestens 10 nm in einem Arbeitsbereich von 30 μm . Damit wurden mit diesem geradeaus messenden Sensorkopfdesign die geforderten Spezifikationen hinsichtlich Größe, Auflösung und Arbeitsbereich erreicht. Eine weitere Miniaturisierung des Sensorkopfs auf einen Durchmesser von 2 mm ist durch Verwendung eines Metallgehäuses mit einer Wandstärke von 100 μm problemlos möglich. Eine Miniaturisierung darüber hinaus ist mit Kompromissen hinsichtlich Arbeitsbereich und Höhenauflösung möglich.

Deutlich weniger präzise war die passive Ausrichtung von kreisrund vereinzelt diffraktiven Strukturen mit Hilfe von Justagehülsen. Die Abweichungen zwischen dem Mittelpunkt der diffraktiven Linse und der optischen Achse der GRIN-Linse betragen bis zu 40 μm . Unterschiede zwischen den beiden Varianten konnten während einer ersten Charakterisierung im

Bereich der Signalintensität und der Messauflösung festgestellt werden. Die Intensität fällt im Vergleich mit den mit LIGA-Strukturen justierten Linsen um die Hälfte geringer aus. Dies sollte sich allerdings durch eine präzisere Vereinzelung der diffraktiven Elemente beim Ausschneiden mit einem Laser und der damit verbundenen Verbesserung der Justagegenauigkeit noch deutlich verbessern lassen. Um dabei optimale Ergebnisse zu erzielen, ist es jedoch notwendig, die erforderlichen Justagetoleranzen der diffraktiven Elemente zur optischen Achse der GRIN-Linse experimentell zu ermitteln.

Zur Detektion der chromatisch konfokalen Signale wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues LIGA-Mikrospektrometer entwickelt, um die hohe geforderte Messauflösung erreichen zu können. Dieses Spektrometer zeichnet sich durch eine im Vergleich zu bestehenden LIGA-Spektrometern deutlich größere Dispersion und einen Wellenlängenbereich von 750 nm bis 950 nm aus. Die erreichte Dispersion übertraf die zunächst geforderte und betrug 0,5 nm pro Pixel in Verbindung mit einer Detektorzeile, die aus 512 Photodioden mit einer Breite von 12,5 μm besteht. Dies ermöglicht eine Erfassung der chromatisch konfokalen Signale mit circa 20 Stützstellen im Bereich der Halbwertsbreite. Weiter konnte gezeigt werden, dass trotz einer Verringerung der Gitterkonstante auf 2 μm , der Fehllichtuntergrund und damit die Gitterqualität vergleichbar mit bereits kommerziell verfügbaren UV/VIS-Mikrospektrometern ist.

Mit diesem neu entwickelten LIGA-Mikrospektrometer wurde der Funktionsnachweis des vollständigen Sensorsystems durchgeführt. Die vorgestellte Charakterisierung der Sensorköpfe erfolgte zunächst mit einer herkömmlichen Detektorzeile mit 256 Photodioden und einer von der eingesetzten Elektronik abhängigen minimalen Integrationszeit von 4 ms. Bei Messungen mit den geradeaus messenden Sensorköpfen lag die im Spektrometer ankommende Lichtmenge im Bereich der Vollaussteuerung der Detektorzeile. Beim Einsatz der um einen Faktor vier empfindlicheren Hamamatsu Detektorzeile S9227 reichten weniger als 25% der Leistung der SLD, um bei einer Integrationszeit von 4 ms die Detektorzeile voll auszusteuern. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Reduzierung der Integrationszeit auf unter 1 ms und bei voller Leistung der SLD die Lichtmenge weiterhin für eine Vollaussteuerung der Detektorzeile ausreichend ist. Damit ist die geforderte Messrate von mindestens 1 kHz erreichbar. Hierzu sind noch Anpassungen an der Ausleseelektronik der Detektorzeile erforderlich, die allerdings keine technologischen Herausforderungen darstellen.

Die nächsten Schritte zielen nun auf die Kommerzialisierung der beiden entwickelten Sensorsysteme und die hierfür erforderliche Integration in Koordinatenmessmaschinen zusammen mit dem Projektpartner Mahr GmbH. Schwerpunkte bilden insbesondere das Auslesen und Auswerten der gemessenen Intensitätswerte und eine Maschinenrückkopplung zur Nachführung der Sensorköpfe. Dabei sind weitere Charakterisierungen der Sensorköpfe im Hinblick auf die geplanten Einsatzgebiete erforderlich, z.B. in Bezug auf unterschiedlich bearbeitete und geneigte Oberflächen.

Die Entwicklung der GRIN-Linsen bei der Firma Grintech, Jena ist soweit abgeschlossen, dass mit einer Serienfertigung der Sensorköpfe begonnen werden kann. Im Hinblick auf eine Fertigung mit größeren Stückzahlen ist insbesondere eine kostengünstigere Herstellung der diffraktiven optischen Elemente erforderlich. Der lithographische Prozess gefolgt von Ätz-

schritten bzw. die Laserablation sollten durch einen für höhere Stückzahlen tauglichen Prozess (z.B. Abformung oder Spritzguss) ersetzt werden, womit sich eine deutliche Reduktion der Herstellungskosten realisieren lässt.

Damit können mit den in dieser Arbeit entwickelten Sensorsystemen bisher ungelöste Messaufgaben in der industriellen Serienfertigung bearbeitet werden. Darüber hinaus eröffnet der entwickelte Ansatz zur Kombination von refraktiven und diffraktiven mikrooptischen Komponenten mit LIGA-Klemmstrukturen neue Möglichkeiten für Anwendungen in der Mikrooptik.

Anhang A Literaturverzeichnis

- [1] B. Michelt, J. Schulze, Die Spektralfarben des Nanometers, Mikroproduktion 2/2005, S. 39-41
- [2] Last, A., Lehmann, P., Was verbirgt sich hinter HymoSens?, Inspect, Ausgabe 2, GIT-Verlag, Oktober 2003, S. 64-66
- [3] 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), S. 261-267
- [4] Offenlegungsschrift DE 198 08 273 A1, Deutsches Patent- und Markenamt 1999
- [5] T. Dunn, Optical Metrology Enables New Generation of Fuel Injectors, Optics & Photonics News, 6, June 2003, S. 28-33
- [6] T. Wilson, Confocal Microscopy, Academic Press, London, 1990
- [7] Precitec Optronik GmbH, Rodgau / Dudenhofen, <http://www.precitec.de>
- [8] Mycrona GmbH, Saarwellingen, <http://www.mycrona.de>
- [9] H. J. Tiziani, M. Wegner, D. Steudle, Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis, Opt. Eng. 39 (1), 2000, S. 32-39
- [10] M. Jordan, M. Wegner, H.J. Tiziani, Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy, Measurement Science & Technology 9, 1998, S. 1142-1151
- [11] M. Minsky, Microscopy Apparatus, US-Patent 3.013.467, 19. Dezember 1961 (eingereicht 7. Nov. 1957)
- [12] H.J. Tiziani, R. Achi, R.N. Krämer, L. Wieggers, Theoretical analysis of confocal microscopy with microlenses, Appl. Opt. 35 (1), 1996, S. 120-125
- [13] D.L. Dickensheets, G.S. Kino, Silicon-Micromachined Scanning Confocal Optical Microscope, Journal of Microelectromechanical Systems 7 (1), 1998, S. 38-47
- [14] G. Molesini, G. Pedrini, P. Poggi, F. Quericioli, Focus-wavelength encoded optical profilometer, Opt. Commun. 49, 1984, S. 229-233
- [15] H. J. Tiziani, R. Achi R. N. Krämer, Chromatic confocal microscopy with microlenses, J. of Mod. Opt. 43 (1), 1996, S. 155-163
- [16] S. Cha, P. C. Lin, L. Zhu, P.-C. Sun, Y. Fainman, Nontranslational Three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micromirror scanning, Appl. Opt. 39 (16), 2000, S. 2605-2613
- [17] P. C. Lin, P. C. Sun, L. Zhu, Y. Fainman, Single-shot depth-section imaging through chromatic slit-scan confocal microscope, Appl. Opt. 37, 1998, S. 6764-6770

- [18] G. J. Tearney, R. H. Webb, B. E. Bouma, Spectrally encoded confocal microscopy, *Opt. Lett.* 23 (15), 1998, S. 1152-1154
- [19] A. Ruprecht, W. Osten, H. Tiziani, P. Lücke, A. Last, J. Mohr, P. Lehmann, Confocal Microoptical Distance-Sensor: Principle and Design, *SPIE Conference Proceedings, Optical Metrology*, München, 13.-17. Juni 2005, Vol. 5856, S. 128-135
- [20] J. Garzón R, J. Meneses, G. Tribillon, T. Gharbi, A. Plata, Chromatic confocal microscopy by means of continuum light generated through a standard single-mode fibre, *Institute of Physics Publishing, Journal of Optics* 6, 2004, S. 544-548
- [21] W. Menz, J. Mohr, O. Paul, *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, 3. erweiterte Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 2005
- [22] A. Last, J. Mohr, Fehllicht in LIGA-Mikrospektrometern, *Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6885*, 2003
- [23] W. Bacher, K. Bade, B. Matthis, M. Saumer, R. Schwarz, Fabrication of LIGA mold inserts, *Microsystem Technologies*, 4.1998
- [24] W. Bacher, K. Feit, M. Harmening, A. Michel, J. Mohr, W. Stark, J. Stölting, LIGA-Abformtechnik zur Fertigung von Mikrostrukturen, *Nachrichten, Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrgang 23*, 2-3/1991, S. 84-92
- [25] J. Mohr, S. Achenbach, M. Börner, F.J. Pantenburg, V. Saile, Röntgentiefenlithographie an ANKA, *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrgang 32*, 4/2000, S. 333-340
- [26] S. Achenbach, F.J. Pantenburg, J. Mohr, Optimierung der Prozessbedingungen zur Herstellung von Mikrostrukturen durch ultratiefe Röntgenlithographie (UDXRL). *Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6575*, 2000
- [27] M. Gu, C.J.R. Sheppard, Signal level of the fibre-optical confocal scanning microscope, *J. of Mod. Opt.* 38 (8), 1991, S. 1621-1630
- [28] R. Juskaitis, T. Wilson, Imaging in reciprocal fiber-optic based confocal scanning microscopes, *Opt. Commun.* 92, 1992, S. 315-325
- [29] Datenblatt XL2000 von PerkinElmer (<http://www.perkinelmer.com>)
- [30] V. Shidlovski, Superluminescent Diodes - Short overview of device operation principles and performance parameters, SuperlumDiodes Ltd. 2004, www.superlumdiodes.com
- [31] D. Faklis, G.M. Morris, Spectral properties of multiorde diffraction lenses, *Appl. Opt.* 34, 1995, S. 2462-2468
- [32] S.L. Dobson, P.-C. Sun, Y. Fainman, Diffraction lenses for chromatic confocal imaging, *App. Opt.* 36 (20), 1997, S. 4744-4748
- [33] S. Sinzinger, J. Jahns, *Microoptics*, 2. Auflage, WILEY-VCH, Weinheim, 2002

- [34] A. K. Ruprecht, Konfokale Sensorik zur Hochgeschwindigkeits-Topographiemessung technischer Oberflächen, eingereichte Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2006
- [35] A. G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov, A. A. Kharissov, V. V. Cherkashin, V. P. Kiryanov, A. V. Kiryanov, S. A. Kokarev, and A. G. Verhoglyad. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure. *Applied Optics*, 38(8), 1999, S. 1295-1301
- [36] C. Pruss, S. Reichelt, V. P. Korolkov, W. Osten, and H. J. Tiziani. Performance improvement of CGHs for optical testing, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III*, volume 5144 of *Proceedings of SPIE*, The International Society for Optical Engineering, 2003, S. 460-471
- [37] J. Ihlemann, M. Schulz-Ruhtenberg, T. Fricke-Begemann, UV-Laserablation von Quarzglas zur Herstellung diffraktiver optischer Elemente, *Laser-Laboratorium Göttingen e.V., DGaO-Proceedings 2004*
- [38] Boehringer Ingelheim microParts GmbH, Dortmund,
<http://www.boehringer-ingelheim.de/produkte/mikrosystemtechnik/>
- [39] P. Krippner, Hochempfindliche LIGA-Mikrospektrometersysteme für den Infrarotbereich, *Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6346*, 1999
- [40] H. A. Rowland, Notice of the results accomplished in the manufacture and theory of gratings for optical purposes, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 13, 1882, S. 469-474
- [41] G. W. Stroke, Attainment of high-resolution gratings by ruling under interferometric control, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 51, Nr. 12, 1961, S. 1321-1339
- [42] P. Lücke, A. Last, J. Mohr, A. Ruprecht, W. Osten, H. Tiziani, P. Lehmann, Confocal Microoptical Distance-Sensor for Precision Metrology, *SPIE Conference Proceeding, Photonics Europe, Strasbourg, 26.-30. April 2004*, S. 180-184
- [43] C. Solf, Entwicklung von miniaturisierten Fourier-Transformations-Spektrometern und ihre Herstellung mit dem LIGA-Verfahren, *Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6964*, 2004
- [44] C. Leßmöllmann, Fertigungsgerechte Gestaltung von Mikrostrukturen für die LIGA Technik, *Doktorarbeit, Universität Karlsruhe*, 1992
- [45] P. Lücke, A. Last, J. Mohr, A. Ruprecht, W. Osten, H. Tiziani, P. Lehmann, Confocal Microoptical Distance-Sensor: Realization and Results, *SPIE Conference Proceeding, Optical Metrology, München, 13.-17. Juni 2005*, Vol. 5856, S. 136-142
- [46] D. Eberlein, *Leitfaden der Fiber Optic*, Dr. M. Siebert GmbH, Berlin, 2005
- [47] A.K. Ruprecht, T.F. Wiesendanger, H.J. Tiziani, Signal evaluation for high-speed confocal measurements, *Applied Optics*, Vol. 41, No. 35, 2002
- [48] K. Shi, P. Li, S. Yin, Z. Liu, Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light, *Optical Society of America, Optics Express* Vol. 12, No. 10, 2004