

Schriftenreihe des Instituts für  
Angewandte Informatik / Automatisierungstechnik  
Universität Karlsruhe (TH)  
Band 10

---

Manfred Bär (Hrsg.)

**$\mu$ FEMOS**  
**Mikro-Fertigungstechniken für  
hybride mikrooptische Sensoren**





Manfred Bär (Hrsg.)

**μFEMOS**

**Mikro-Fertigungstechniken für hybride mikrooptische Sensoren**

Schriftenreihe des Instituts für  
Angewandte Informatik / Automatisierungstechnik  
Universität Karlsruhe (TH)  
Band 10

# **$\mu$ FEMOS**

## **Mikro-Fertigungstechniken für hybride mikrooptische Sensoren**

von  
Manfred Bär (Hrsg.)



---

universitätsverlag karlsruhe

## **Impressum**

Universitätsverlag Karlsruhe  
c/o Universitätsbibliothek  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
[www.uvka.de](http://www.uvka.de)



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz  
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2006  
Print on Demand

ISSN 1614-5267  
ISBN 3-937300-95-3

## Kurzbeschreibung

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts MikroFEMOS wurde eine Fertigungs-Infrastruktur für einen mikrooptischen Abstandssensor entwickelt, die einen deutlichen Schritt nach Vorn in Richtung „Small Equipment for small Parts“ darstellt. Im vorliegenden Beitrag wird dieses System vorgestellt und es werden die erforderlichen Prozesse zur Herstellung des hybrid aufgebauten Sensors beschrieben.

Die MikroFEMOS-Technologie zeichnet sich durch ausgesprochene Serientauglichkeit aus. Es wurde eine Mikro-Heißprägemaschine und ein kartesisches Montagesystem mit vier Achsen, drei Linear- und einer Rotationsachse erarbeitet

Bauteile werden auf DIN-Werkstückträgern in der Größe 2-Zoll zugeführt. Die Handhabung der Bauteile erfolgt mit Sauggreifern. Die einzelnen Komponenten werden mit Klebstoff gefügt. Im vorliegenden Artikel wird zusätzlich das auf passiver Justage basierende Montagekonzept beschrieben und die im ersten Schritt erreichten Montageergebnisse dargestellt.

Die Arbeit stellt einen Beitrag zur Realisierung einer verketteten Mikrosystemfertigung bei geringstem Platzbedarf (Tischfabrik) dar.

## Abstract

The joint project BMBF MikroFEMOS developed a production infrastructure for a micro-optic distance sensor which demonstrates a clear step into the “small equipment for small parts” direction. The present article introduces the system and describes the necessary process for mounting the hybrid configured sensors.

The MikroFEMOS technology is suitable for an outstanding serial production. A micro-heat stamping machine and a cartesian mounting system equipped with 4 axis, 3 linear- and one rotation axis, was manufactured.

The components are inserted by the use of a 2 inch DIN-carrier, furthermore, the components are handled with suction grippers. Single components are assembled with glue.

The enclosed article describes additionally the mounting concept based on passive adjustment and it shows the first mounting results.

This development archives a large contribute to realise a connected Micro System Production on smallest required space (table factory).





## Vorwort

Neue Sensorsysteme werden bei der Markteinführung vor allem durch die fehlende Fertigungstechnik aufgehalten. Eine Laborfertigung lässt sich nicht direkt in eine robuste und wirtschaftliche Produktion überführen. Um eine Höherintegration mikrooptischer Sensorsysteme und eine damit verbundene Reduktion der Fertigungskosten und Verkleinerung der Außenabmessungen zu erzielen, wird bei zukünftigen Sensorsystemen ein modularer Aufbau aus mikrooptischer Aufbauplatte mit integrierten Strahlformungselementen und elektrooptischer Platine sowie einer adäquaten Gehäusetechnik angestrebt. Bei einem modularen Aufbau ist es möglich, kleine und mittlere Unternehmen in die Wertschöpfungskette der Sensorherstellung einzubinden, indem sich diese Firmen für die Herstellung der Module auf der Basis einer speziellen Fertigungstechnik spezialisieren und qualifizieren. Die Systemhersteller können auf die geeignete Fertigungstechnik ohne hohe Investitionskosten zurück greifen und damit funktions- und kostenoptimierte Sensorsysteme realisieren.

Im Verbundprojekt MikroFEMOS wurde für die Herstellung mikrooptischer Bauteile die notwendige modulare Fertigungs-, Montage- und Automatisierungstechnik am Beispiel eines Abstandssensors entwickelt. Die Serienfertigungstauglichkeit wurde durch eine Modellfertigung eines Distanzsensors erprobt. Eine Heißprägemaschine für die Herstellung von geprägten Kunststoff-Mikroteilen auf großflächigen Substraten bis 200 mm Durchmesser wurde gebaut. In Verbindung mit einer neuartigen Heiz- und Kühlstrategie des in LIGA-Technik hergestellten Abform- Werkzeuges, sowie einer automatischen Be- und Entladung kann die Maschine gegenüber heute am Markt verfügbaren Heißprägemaschinen die Ausbringung verzehnfachen. Mit Hilfe dieser Maschine ist es möglich, geprägte Mikroteile zu etwa einem Fünftel der heute üblichen Herstellungskosten herzustellen. Dadurch kann bei vielen Produkten und Anwendungsideen der Punkt einer marktwirtschaftlichen Rentabilität erreicht werden. Die entwickelte Montagemaschine zum präzisen Zusammenfügen der mikrooptischen und optoelektronischen Komponenten zu komplexen Systemen ist universell geeignet für kleinste Bauteile, bei denen höchste Montagepräzision gefordert ist. Auf einer Grundfläche von nur 410 x 280 mm konnte ein 4-Achs-System mit den Hübten X 240 mm, Y 100 mm, Z 30 mm, sowie eine Drehachse um die Vertikalachse realisiert werden. Mit diesen 4 Achsen können erfahrungsgemäß 95 % aller Montageaufgaben ab-

gedeckt werden, so dass eine hohe Flexibilität für verschiedene Montageanforderungen vorhanden ist. Es wird eine Reproduzierbarkeit der Einzelachse von  $\pm 0,4 \mu\text{m}$  erreicht.

Die Projektergebnisse sind somit automatisierte Geräte und eine erprobte und optimierte Prozesstechnik im Rahmen eines modularen Fertigungskonzepts. Weitere interessierte Maschinenherstellern und Anwender können in öffentlichen Veranstaltungen und Seminaren von den erreichten Ergebnissen profitieren. Die Partner in diesem Verbundprojekt wurden im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Allen sei an dieser Stelle gedankt, die mit ihrem Wissen, Engagement und ihren Erfahrungen an dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeit mitgewirkt haben.

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Projekträger Forschungszentrum Karlsruhe

Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT)

Stefan Scherr

Februar 2005

## **Danksagung**

Die Projektpartner bedanken sich an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung durch das BMBF sowie die kompetente und stets konstruktive Begleitung des Vorhabens durch den Projektträger PTKA-PFT.



---

## Autorenverzeichnis (alphabetisch)

- Bär, M.                    Manfred Bär
- IEF Werner GmbH  
Wendelhofstr. 6  
78120 Furtwangen
- Tel.: 07723/925-120  
Fax: 07723/925-185  
eMail: manfred.baer@ief-werner.de
- 
- Dittrich, H.                Dr. Harald Dittrich
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Mikrostrukturtechnik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- Tel: 07247/ 82-6845  
Fax: 07247/82-4331  
eMail: info@imt.fzk.de
- 
- Gengenbach, U.         Dr. Ulrich Gengenbach
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Angewandte Informatik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- Tel: 07247/82-3769  
Fax: 07247/82-2602  
eMail: ulrich.gengenbach@iai.fzk.de
- 
- Heckele, M.                Dr. Mathias Heckele
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Mikrostrukturtechnik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- Tel: 07247/ 82-2512  
Fax: 07247/82-4331  
eMail: Mathias.Heckele@imt.fzk.de

Herzinger, S.      Dipl.-Wirt.-Ing. Stefan Herzinger

Wickert Maschinenbau GmbH  
Wollmesheimer Höhe 2  
76829 Landau

Tel.: 06341/9343-31  
Fax: 06341/9343-30  
eMail: info@wickert-presstech.de

Hofmann, A.      Andreas Hofmann

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Angewandte Informatik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Tel: 07247/ 82-5764  
Fax: 07247/82-2602  
eMail: andreas.hofmann@iai.fzk.de

Hollenbach, U      Dipl.-Phys. Uwe Hollenbach

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Mikrostrukturtechnik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Tel: 07247/ 82-3856  
Fax: 07247/82-4331  
eMail: uwe.hollenbach@imt.fzk.de

Kadel, K.      Dr. Klaus Kadel

Boehringer Ingelheim microParts GmbH  
Hauert 7  
44227 Dortmund

Tel.: 0231/9799-130  
Fax: 0231/9799-100  
eMail: klaus.kadel@microparts.de

- Mehne, C.                      Christian Mehne
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Mikrostrukturtechnik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- Tel: 07247/ 82-6845  
Fax: 07247/82-4331  
eMail: Christian.Mehne@imt.fzk.de
- 
- Mohr, J.                         Dr. Jürgen Mohr
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Mikrostrukturtechnik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- Tel: 07247/ 82-4433  
Fax: 07247/82-4331  
eMail: Juergen.Mohr@imt.fzk.de
- 
- Scharnowell, R.;             Rudolf Scharnowell
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Angewandte Informatik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- Tel: 07247/ 82-2409  
Fax: 07247/82-2602  
eMail: rudolf.scharnowell@iai.fzk.de
- 
- Skupin H.                      Henrik Skupin
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Angewandte Informatik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- Tel: 07247/ 82-2409  
Fax: 07247/82-2602  
eMail: henrik.skupin@iai.fzk.de

Stautmeister, T.    Torsten Stautmeister

MICRO-OPTRONIC MESSTECHNIK GmbH  
Lessingstr. 14  
01465 Langebrück

Tel.: 035201/729-0

Fax: 035201/729-90

eMail: [torsten.stautmeister@micro-optronic.de](mailto:torsten.stautmeister@micro-optronic.de)

Wissmann, M.    Markus Wissmann

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Mikrostrukturtechnik  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Tel: 07247/ 82-6843

Fax: 07247/82-4331

eMail: [Markus.Wissmann@imt.fzk.de](mailto:Markus.Wissmann@imt.fzk.de)



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangs- und Problemlage	1
1.2	Gesamtzielstellung	3
1.3	Projektorganisation	5
1.3.1	Projektpartner	5
1.3.2	Organisation	5
1.3.3	Prototypische Umsetzung	6
1.4	Literatur	7
<b>2</b>	<b>Fertigungsgerechtes Design für einen mikrooptischen Abstandssensor</b>	<b>9</b>
2.1	Ausgangssituation	9
2.2	Vorgaben für das optische Design	10
2.3	Optisches Design	12
2.3.1	Optimierung für den Sendestrahilverlauf	12
2.3.2	Optimierung für den Empfängerstrahlverlauf	14
2.3.3	Gesamtstrahlmodell	14
2.4	Designgestaltung unter kunststoffabformtechnischen Aspekten	16
2.4.1	Gestaltung in Kunststoff	16
2.4.2	LIGA - Strukturen	17
2.4.3	Formeinsätze	17
2.4.4	Abgeformte Strukturen	18
2.5	Montage-/fertigungsgerechte Gestaltung des Gesamtsystems	18
2.5.1	Transfer der Flächenbeschreibungen in ein CAD-Modell	19
2.5.2	Erstellung eines fertigungsgerechten Modells	19
2.5.3	Integration mechanischer Hilfsstrukturen zur Zuführung der MOB	21
2.5.4	CAD-Modell des Gesamtsystems	22
2.6	Simulation am Volumenmodell	22
2.7	Zusammenfassung	24
2.8	Veröffentlichungen	25

<b>3</b>	<b>Heißpräganlage für Mikrostrukturen</b>	<b>27</b>
3.1	Die genaueste 100 Tonnen Presse der Welt	27
3.2	Vorteile gegenüber der Spritztechnik	28
3.3	Vom Labormaßstab zur industriellen Fertigung	28
3.3.1	Presse	28
3.3.2	Werkzeugaufnahme mit Positioniereinheit	29
3.3.3	Vakuumkammer	29
3.3.4	Heiz- und Kühlsystem	30
3.3.5	Steuerung	30
3.3.6	Intelligentes Werkzeugkonzept	30
3.4	Ausblick	31
<b>4</b>	<b>Heißprägen von mikrooptischen Komponenten in großen Stückzahlen</b>	<b>33</b>
4.1	Ausgangssituation und Problemstellung	33
4.1.1	Technologische Situation zu Projektbeginn	33
4.1.2	Voraussetzung für das Vorhaben	34
4.1.3	Vorarbeiten	35
4.1.4	Prozessuntersuchungen	35
4.2	Ergebnisse	38
4.3	Ausblick	39
<b>5</b>	<b>Montagekonzept für einen mikrooptischen Abstandssensor</b>	<b>41</b>
5.1	Montage von Mikrosystemen mit niedrigen Stückzahlen	41
5.1.1	Strategien bei der Montage von mikrooptischen Systemen	42
5.1.2	Montagestrategie für den Abstandssensor	42
5.2	Montageprozesse bei der Montage des Abstandssensors	42
5.2.1	Montage der Zylinderlinsen in die mikrooptische Bank	43
5.2.2	Montage der Justierkugeln in die elektronisch-optische Platine	44
5.2.3	Zusammenbau der MOB und der EOP zum elektronisch-optischen Subsystem	45
5.2.4	Identifikation der benötigten Prozesse und Werkzeuge	45
5.3	Beschreibung des Montagekonzepts und der zugehörigen Werkzeuge und Module	46

---

5.3.1	Zuführung der Bauteile	46
5.3.2	Handhabung der Bauteile	51
5.3.3	Fügen der Bauteile	52
5.3.4	Beschreibung weiterer Module des Montagesystems	53
5.4	Umsetzung der Montageaufgaben	55
5.5	Betrachtung des Einflusses der Bauteiltoleranzen auf das Montagekonzept	57
5.6	Ausblick	59
5.7	Literatur	59
<b>6</b>	<b>Modulare Montagemaschine – Tischfabrik</b>	<b>61</b>
6.1	Ausgangssituation	61
6.2	Stand der Technik zu Projektbeginn	61
6.3	Ziel des Teilprojekts	63
6.4	Modulares Mikromontagekonzept	63
6.4.1	Systemtechnik	63
6.4.2	4-Achs-Montagemaschine	63
6.4.3	Steuerungskonzept der modularen Tischfabrik	65
6.5	Zusammenfassung zur Tischfabrik	66
6.6	Ausblick	66
<b>7</b>	<b>Mikrooptisches Sensorsystem</b>	<b>69</b>
7.1	Ausgangssituation	69
7.2	Entwicklung eines Miniaturtriangulators	70
7.2.1	Zieldaten für den Miniaturtriangulator	70
7.2.2	Konzept für die Signalverarbeitung des Mikrotriangulators	71
7.2.3	Entwicklung der Subsysteme	72
7.2.4	Ergebnisse	77
7.3	Verwertung	81
7.4	Literatur	81
<b>8</b>	<b>Modulare Fertigung</b>	<b>83</b>
8.1	Anforderung an die Produktion wettbewerbsfähiger, mikrooptischer Produkte	83

8.2	Entwicklung einer durchgängigen Fertigungslinie	84
8.3	Fertigungsablauf	86
8.4	Kennzahlen der Fertigung	87
8.5	Ausblick	88
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Resümee</b>	<b>89</b>
9.1	Projektrückblick	89
9.2	Nutzen für KMUs	89
9.3	Technisches Resümee	90
9.4	Förderpolitisches Resümee	91

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangs- und Problemlage

Mohr, J.

Im Zuge einer ständigen Miniaturisierung und einer Steigerung der Leistung und der Funktionalität optischer Systeme (zum Beispiel in der Telekommunikation oder der Sensorik) gewinnen mikrooptische Lösungen eine immer stärkere Bedeutung. Durch den Einsatz von Mikrooptik werden ganz neue Anwendungen erschlossen. Beispiele sind miniaturisierte Kamerasysteme im Massenprodukt „Handy“ genannt, die inzwischen auch für Beobachtungssysteme z.B. im Automobil, in der Endoskopie oder in der Laserbearbeitung von Interesse sind und vermehrt eingesetzt werden.

Während sich für Massenprodukte die Neuentwicklung mikrooptischer Lösungen schnell rechnet, fällt der Einsatz in Märkten mittlere Stückzahl wie z.B. der Industrieautomation deutlich schwerer. Dieses Phänomen ist typisch für die gesamte Mikrosystemtechnik. Während Sensoren (Beschleunigungssensoren, Drehratensensoren, Drucksensoren) für den Automobilbereich heute ausschließlich mit mikrosystemtechnischen Methoden hergestellt werden und sich hier auch große Firmen wie z.B. Bosch engagieren, findet man z.B. im Maschinenbau und der industriellen Automatisierung nur dann mikrosystemtechnische Lösungen, wenn Komponenten aus den Massenmärkten eingesetzt werden können. Diese Bereiche werden eher von klein- und mittelständischen Firmen dominiert, die dem Problem gegenüber stehen, dass sich für die Märkte mittlerer Stückzahlen Investitionen in innovative, individuelle Design- und Produktionslösungen nicht rechnen. Die Notwendigkeit der Entwicklung angepasster neuer Technologien, die Erschließung neuer Märkte und der Aufbau neuer Produktionseinrichtungen sind gleich drei Hemmnisse die einer Anwendung mikrosystemtechnischer und insbesondere mikrooptischer Lösungen entgegenstehen.

Individuelle Design- und Produktionslösungen sind immer mit hohen Kosten verbunden, die auf mittlere Stückzahl der Produkte übertragen werden muss und diese damit teuer macht. Die Bereitschaft, mikrooptische Systeme in technischen Lösungen einzusetzen, ist aber nur gegeben, wenn neben der Leistungsfähigkeit der Systeme diese auch zu einem akzeptablen Preis hergestellt werden können. Einen Beitrag zur Kostenreduktion ergibt sich durch die Herstellung mikrooptischer Komponenten in Polymeren mit Hilfe kostengünstiger Abformtechniken. Bei mittleren Stückzahlen haben mikrotechnische Lösungen allerdings das Problem, dass die Kosten für Fertigungseinrichtungen eine dominierende Rolle beim Preis spielen, da aufgrund von speziellen individuellen Lösungen die Fertigungsmittel nur teilweise ausgelastet werden können. Dieses Problem lässt sich nur lösen, wenn verschiedene Systeme mit dem gleichen oder mit nur geringfügig modifiziertem Equipment hergestellt werden können. Bei der Komplexität mikrooptischer Sensorsysteme ist dies nur möglich, wenn die Systeme modular aufgebaut werden.

Der modulare Aufbau mikrooptischer Sensorsysteme geht von einer Aufteilung der verschiedenen Funktionalitäten (strahlformende – optische, Licht erzeugende und detektierende – elektrooptische und elektrische, strahlmodulierende – mechanische oder optoelektronische) auf verschiedene Module aus. Das mikrooptische Modul enthält Strukturen wie Spiegel, Linsen, Prismen oder Gitter und exakt positionierte Haltestrukturen für die hybride Montage passiver optischer Komponenten. Es stellt eine

präzise mikrooptische Bank dar und kann durch Abformtechniken wie z.B. Spritzguss oder Heißprägen in Kunststoff hergestellt werden. Auf einem zweiten – dem elektrisch-optischen – Modul werden Lichtquellen (Laserdioden) und Empfangselemente (Detektorarrays, Dioden) sowie ggf. entsprechende Ansteuer- und Auswertelektronik aufgebaut. Hierbei sollte es möglich sein, nach entsprechender Anpassung Methoden der Elektronikmontage einzusetzen. Weitere Module können z.B. Aktorelemente enthalten. Voraussetzung für eine erfolgreiche und spezifikationsgerechte Fertigung mikro-optischer Sensoren ist, dass das Design der Einzelmodule so aufeinander abgestimmt ist, dass durch einfache Montage der Module die gewünschte Funktionalität sichergestellt werden kann.

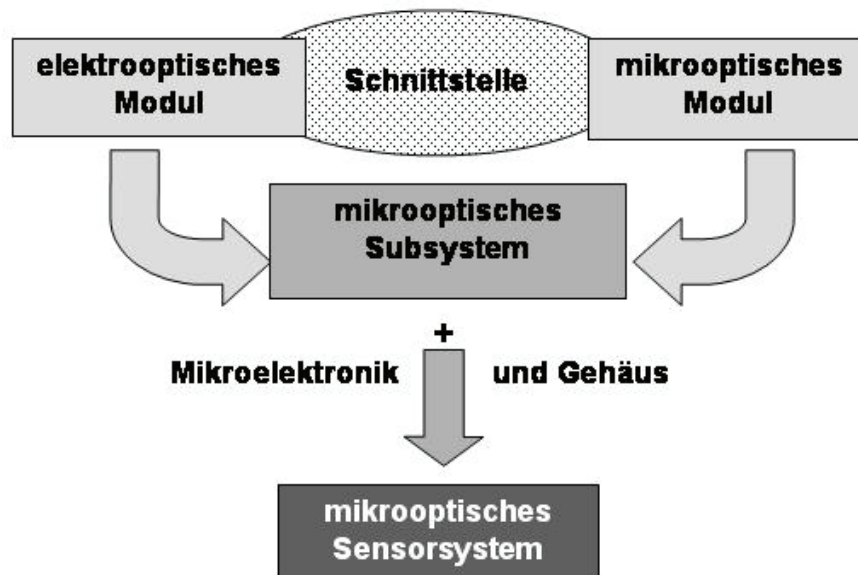


Bild 1-1: modularer Aufbau eines mikrooptischen Sensorsystems

Der modulare Ansatz erlaubt einen hohen Grad an Optimierung der einzelnen Funktionen unabhängig voneinander sowie eine unabhängige Fertigung der Module. Damit können sich für die einzelnen Module spezielle Fertiger qualifizieren und sich somit entsprechendes Detailwissen aneignen. Dies bietet die Möglichkeit, verschiedene Firmen in die Fertigungskette von mikrooptischen Systemen einzubinden, die mit an der Wertschöpfungskette partizipieren. Dieses Konzept bietet insbesondere klein- und mittelständischen Unternehmen Zugang zu mikrooptischen Lösungen. Die Vorgehensweise führt neben einer Kostenreduktion zu einer stabileren Fertigung und damit zu einer höheren Akzeptanz innovativer mikrooptischer Lösungen.

Voraussetzung für eine derart verteilte Fertigung ist, dass bereits im Design die prozesstechnischen Bedürfnisse entlang der Fertigungskette berücksichtigt werden. Sowohl die Komponenten- als auch die Fertigungsschnittstellen müssen klar definiert werden; an den Fertigungsschnittstellen müssen Prüfmethode etabliert werden, aus deren Ergebnisse bereits auf die Funktion des Gesamtsystems geschlossen werden kann. Dies ist gerade bei mikrooptischen Systemen eine nicht immer einfach zu lösende Aufgabe.

Wesentlich für eine kostengünstige Umsetzung eines modularen Aufbaukonzeptes mikrooptischer Sensorsysteme ist die Verfügbarkeit von geeignetem Montageequipment. Gerade bei mittleren Stückzahlen muss dieses Equipment flexibel und leicht anpassbar an geänderte Montageaufgaben sein

Im Verbundprojekt MikroFEMOS wurde der modulare Aufbau mikrooptischer Sensoren am Beispiel eines nach dem Triangulationsprinzip arbeitenden Abstandssensors entwickelt.

Bisher zeichnen sich solche optische Sensoren durch einen hohen Integrationsgrad im Bereich der Mikroelektronik aus, während die optischen Bauelemente nach wie vor durch klassische optische Fertigungstechnologien hergestellt und in der Regel hybrid mit hohem Aufwand verbaut werden. Dadurch ist eine Miniaturisierung der Baugröße auf Abmessungen im Bereich mehrerer Zentimeter begrenzt, was den „Vor-Ort“-Einsatz solcher Sensoren in Fertigungsmaschinen erschwert, wenn nicht ganz unmöglich macht. Eine weitere Miniaturisierung optischer Sensoren und eine Kostenreduktion bei der Herstellung ist nur durch eine Verkleinerung und Höherintegration auch der optischen Komponenten möglich, wie es unter Anwendung mikrosystemtechnischer Methoden möglich ist. Bisher wurden solche mikrooptische Sensorsysteme nur im Labormaßstab in Prototypstückzahlen hergestellt [2]. Eine industrielle Fertigung und damit ein industrieller Einsatz war bisher aufgrund des Fehlens einer im industriellen Maßstab verfügbaren Fertigungskette und der dafür notwendigen Fertigungsmittel nicht möglich.

Zur Umsetzung des modularen Aufbaukonzeptes für mikrooptische Sensorsysteme in industrielle Produkte müssen die Fertigungstechniken zur Herstellung mikrooptischer Module mit integrierten Strahlformungselementen sowie die Montagetechniken zur Kombination der mikrooptischen Subsysteme mit den mit den anderen Modulen bis zur Fertigungstauglichkeit entwickelt werden. Dazu ist die Entwicklung neuer wirtschaftlicher, serientauglicher und zuverlässiger Fertigungsgeräte auf den Gebieten Abformtechnik für Kunststoffmikrostrukturen und Montage hybrider mikrooptischer Systeme notwendig. Darüber hinaus muss die Bereitstellung von Halbfertigerzeugnissen oder Fertigungshilfsmitteln wie z.B. Abformwerkzeuge sichergestellt werden. Die Prozesskette mit ihren Schnittstellen zu den Zulieferern sowie den Herstellern der einzelnen Subsysteme muss eindeutig definiert werden.

## 1.2 Gesamtzielstellung

Bär, M.

Die Hauptmotivation für das Projekt MikroFEMOS stellte die allgemeine Situation auf dem Mikrosystemtechnikmarkt dar. Im Gegensatz zu anderen Branchen, wie z. B. dem Maschinenbau oder auch der Elektronikfertigung, fehlt dem Mikrosystemtechnikbereich die breite wirtschaftliche Basis und Infrastruktur, welche notwendig ist, um die Technologie flächendeckend einzusetzen und insbesondere auch in kleine und mittelständische Betriebe zu portieren. Erst wenn dies gelingt, kann tatsächlich von einer Marktdurchdringung gesprochen werden. Bislang waren im Wesentlichen Einzelapplikationen in Großunternehmen bekannt. Dort wird allerdings zumeist in so großen Stückzahlen gefertigt, dass auch anwendungsspezifische Fertigungs- und Montagelösungen sinnvoll sind. Oftmals spielt auch der Kostenfaktor bei solchen Anwendungen keine vordergründige Rolle.

Demgegenüber sind für einen mittelständischen Anwender Fragen der Flexibilität der Technik und insbesondere auch die Kostenstruktur des Fertigungsequipments von entscheidender Bedeutung. An dieser Stelle sollte das hier beschriebene Vorhaben entscheidende Impulse setzen.

Bei der Herstellung mikrotechnischer und insbesondere mikrooptischer Komponenten kommt der entsprechenden Fertigungstechnologie eine vordergründige Bedeutung zu. Zum einen sind viele der Abläufe aufgrund der benötigten extremen Präzision und Wiederholgenauigkeit manuell nicht bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand unter industriellen Serienbedingungen zu realisieren, andererseits verbirgt sich hier ein erhebliches Potenzial zur Effektivierung. MikroFEMOS sollte helfen, eine wesentliche Barriere für eine breite Marktdurchdringung – nämlich die unbefriedigende Kostensituation bei Mikrosystemen – zu entschärfen.

Im Rahmen dieses Vorhabens sollte der fertigungstechnische Aspekt aber nicht passiv, d. h. aus der reinen Sicht des Automatisierers gesehen werde, vielmehr bestand das erklärte Ziel darin, ausgehend von vernünftigen fertigungs- und montagetechnischen Prinzipien und Abläufen, Regeln für das montagegerechte Design von Mikrokomponenten abzuleiten.

Es sollte versucht werden, verschiedene in der „makroskopischen Welt“ längst bekannte Aspekte in die Mikrotechnik zu portieren. So ist es bspw. im elektronischen Gerätebau (eine der Hauptzielbranchen für die moderne Automationstechnik) seit längerem bekannt, dass die Montageeffektivität drastisch erhöht werden kann, wenn bereits bei der Produktkonzeption bestimmte Regeln und Normen in Bezug auf eine montagegerechte Gestaltung beachtet werden.

Leider – dies zeigten die projektvorbereitenden Untersuchungen – ist es aufgrund der unterschiedlichen Größen-, Einsatz- und Umfeldbedingungen nicht ohne weiteres möglich, die aus dem elektronischen Gerätebau bekannten Prinzipien und Methoden 1 : 1 auf die Mikrotechnik zu übertragen. Bekannte Methoden sollten daher in MikroFEMOS kritisch bewertet und daraus neue Methoden entwickelt und erprobt werden.

Parallel hierzu sollte eine entsprechend optimierte montagespezifische Gerätetechnik entstehen, welche im Zusammenspiel mit der o. g. optimierten Aufbaumethodik ein gesamtheitliches Optimum erwarten lässt.

Aus gerätetechnischer Sicht bestand das Ziel in MikroFEMOS darin, eine Fertigungskette zur Herstellung mikrooptischer Sensorsysteme aufzubauen und zum Zwecke des Nachweises der Serienfertigungstauglichkeit im Rahmen einer Modellfertigung detailliert zu analysieren. Als Referenzprodukt diente ein Miniaturabstandssensor, der mittels eines neuartigen Aufbaukonzepts („mikrooptischer Flipchip“) realisiert wurde. Bei diesem Aufbaukonzept wird die Kernkomponente des Sensors, das „elektrooptische Subsystem“, aus einer mikrooptischen Bank (Kunststoffmikrostruktur) und einer elektrooptischen Platine gefügt. Das Sensordesign wurde im Hinblick auf eine automatisierte Serienfertigung optimiert. Zur Realisierung der Fertigungskette musste neben einer serienfertigungstauglichen Mikroprägemaschine ein leistungsfähiges Montagesystem (Bestückung der mikrooptischen Bank und Montage elektrooptisches Subsystem) konzipiert und aufgebaut werden. Die Qualifizierung beider Systeme war mittels Fertigung von Testserien geplant.


Neben diesen grundsätzlichen technologischen Zielstellungen lag ein weiterer wesentlicher Fokus bei der Bearbeitung des Projektes auf der Erweiterung der Kompetenzen und Fähigkeiten der beteiligten Partner auf dem Gebiet der Fertigung und Montage mikrotechnischer Produkte. Die Verwertung der Projektergebnisse sollte durch eine (nach Projektabschluss stattfindende) Qualifizierung der Erkenntnisse und maschinentechnischen Modellösungen zu konkreten Produkten sowie deren Vermarktung erfolgen.



## 1.3 Projektorganisation

Bär, M.

### 1.3.1 Projektpartner

IEF Werner GmbH – Furtwangen	
Wickert Maschinenbau GmbH – Landau	
Boehringer Ingelheim microParts GmbH – Dortmund	
MICRO-OPTRONIC MESSTECHNIK GmbH – Langebrück	
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH / Abteilungen IAI, PTKA-PFT, IMT – Eggenstein-Leopoldshafen	

### 1.3.2 Organisation

Die Vorgehensweise zur Zielerreichung sah für das Gesamtprojekt vier Arbeitsfelder mit insgesamt 9 Arbeitspaketen vor. Die vier Arbeitsfelder waren:

1. Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung eines miniaturisierten Abstandssensors, der den vom Markt vorgegebenen Spezifikationen genügt. Ziel war hier der Nachweis der Tauglichkeit des Konzeptes der verteilten Fertigung von mikrooptischen Systemen (Arbeitspakete 1, 2, 3).
2. Entwicklung und Validierung einer serienfertigungstauglichen Prägemaschine (Arbeitspakete 4,5,7).
3. Entwicklung und Validierung von serientauglichen Montage- und Handhabungseinrichtungen zur Herstellung der elektrooptischen Platine und des elektrooptischen Subsystems (Arbeitspakete 4,6,7).
4. Nachweis der Fertigungstauglichkeit der Maschinen und Qualifizierung des modularen Fertigungskonzeptes durch die Herstellung von Distanzsensoren in Kleinserie (Arbeitspaket 8).

Dabei wirkte sich das in Arbeitsfeld 1 erarbeitete Sensorkonzept einerseits auf die Fertigungs-, Montage- und Handhabungseinrichtungen aus. Auf der anderen Seite musste das Sensorkonzept die Anforderungen, die sich aus einer industrietauglichen Montage ergeben, berücksichtigen.

Die in Arbeitsfeld 2 zu entwickelnde serienfertigungstaugliche Prägemaschine hatte die Anforderungen, die sich aus der Tatsache ergeben, dass optische Teile gefertigt werden, zu berücksichtigen. Dies zeigt die Verflechtung der einzelnen Arbeitsfelder, was insbesondere zu Beginn des Projektes eine genaue Festlegung der Schnittstellen, sowohl was das Bauteil als auch die Geräte betrifft, erforderte.

Dies war insbesondere auch deshalb wichtig, da das modulare Fertigungskonzept eindeutige Prüfkriterien an den Schnittstellen erfordert, um spezifikationsgerechte Teile an den nächsten Fertigungspartner zu liefern. Da insbesondere die Prüfung der optischen Funktionalität bei den jeweiligen Subsystemen schwierig sein kann, sind neue Methoden und Regeln der Zusammenarbeit zu erarbeiten. Diese werden im Rahmen der qualitätssichernden Maßnahmen erarbeitet und haben Modellcharakter für die Herstellung mikrooptischer Systeme.

Nach Festlegung des Designs (bis Monat 3) werden die Arbeitsfelder 1-3 parallel bearbeitet, wobei ständig ein gegenseitiger Austausch der Erkenntnisse stattfindet, um sicherzustellen, dass in den einzelnen Arbeitspaketen keine Lösungen verfolgt werden, die in anderen Arbeitsfeldern zu Problemen führen.

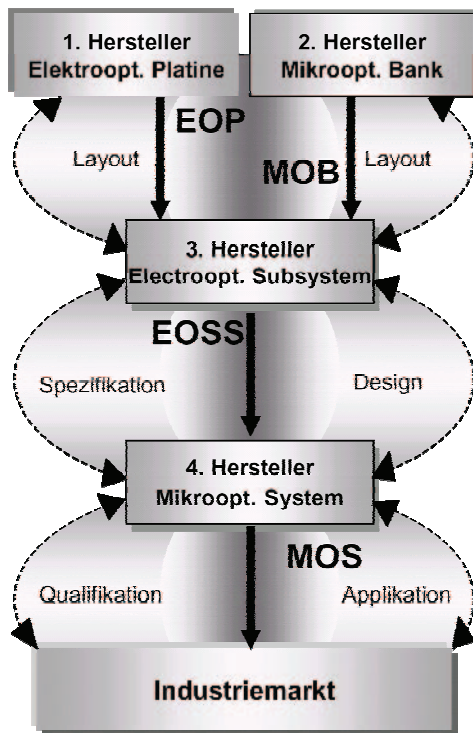
Mit Abschluss von Arbeitsfeld 1 (Monat 16) ist sicher gestellt, dass das Design und Konzept des miniaturisierten Abstandssensors die Anforderungen des Marktes erfüllt, indem die Sensorprototypen bzgl. der Einhaltung der Spezifikationen charakterisiert sind. Außerdem liegt nach einem Jahr das Layout für einen Formeinsatz vor, der bei der Qualifizierung der Fertigung eingesetzt werden kann.

Mit Abschluss von Arbeitsfeld 2 (Monat 19) und 3 (Monat 19) liegen die serientaugliche Prägemaschine und die serientauglichen Montage- und Handhabungseinrichtung vor. Sie sind bzgl. Erreichung der Spezifikationen getestet.

Die Validierung des modularen Fertigungskonzeptes erfolgt in Arbeitsfeld 4. Durch die Herstellung einer Kleinserie von Abstandssensoren nach dem modularen Fertigungskonzept wird das Konzept validiert (Monat 23). Auf Basis dieser Ergebnisse wird eine Potential- und Schwachstellenanalyse durchgeführt, die einer zukünftigen Gerätefertigung als Verbesserungsansatz dienen kann. Außerdem werden die Möglichkeiten der Übertragung des Konzeptes auf andere Sensorsysteme evaluiert (Monat 24).

### **1.3.3 Prototypische Umsetzung**

In die Überprüfung des Konzepts zur verteilten Fertigung mikrotechnischer Systeme sollte die gesamte Prozesskette einbezogen werden:



*elektro-optische Platine*

→ Platinenhersteller (höhere Genauigkeit in der Komponentenablage)

*mikrooptische Bank*

→ Abformung (Erfahrung mit mikrooptischen Komponenten)

*elektro-optisches Subsystem*

→ OEM-Lieferant (Erfahrung in der Montage von Mikrosystemen)

*mikrooptisches System*

→ Systemlieferant (Kenntnisse des Marktes)

Bild 1-2: Rollenverteilung in einem Konzept der Verteilten Mikrofertigung

#### 1.4 Literatur

- [1] J. Mohr, A. Last, U. Hollenbach, T. Oka, U. Wallrabe, "A Modular Fabrication Concept for Microoptical Systems", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 3, (2003) pp 643 - 647
- [2] U. Wallrabe, U. Hollenbach, P. Krippner, J. Mohr, T. Oka, "Characterization of a Micro Optical Distance Sensor", *Sensors and Actuators, A* 102, (2003) pp 261-267



## 2 Fertigungsgerechtes Design für einen mikrooptischen Abstandssensor

Hollenbach, U.; Heckeke, M.; Hofmann, A.; Mohr, J.;

### 2.1 Ausgangssituation

Optische Abstandssensoren mit einer Laserstrahlantastung nach dem Triangulationsprinzip werden in der industriellen Messtechnik vielfach eingesetzt. Kleinere Messsysteme dieser konventionellen Abstandssensoren haben derzeit eine Messkopfgröße von etwa 70 mm x 55 mm x 20 mm bei einem Gewicht von ca. 40 g bis 100 g. Die Messbereiche für Anwendungen im Nahbereich stufen sich von 5 mm bis 60 mm bei einem Grundabstand (Freiraum) von 20 mm.

Für bestimmte Messaufgaben in der industriellen Fertigung wäre es vorteilhaft, die bauliche Größe und das Gewicht zu verringern. In sehr kleinen Arbeitsbereichen von Maschinen und Anlagen lassen sich viele Sensoren aufgrund ihrer Größe nicht einbauen. Das relativ hohe Gewicht verhindert es die Sensoren auf schnell beschleunigten Achsen mitzubewegen.

Aus den zuvor geschilderten Gründen gab es schon vor dem Jahr 2000 erste Projekte zwischen der Firma Mitsubishi Electric Corporation (MELCO) und dem Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT), um Herstellkonzepte nach dem LIGA-Verfahren [1] für mikrooptische Abstandssensoren zu entwickeln und erste Funktionsmuster aufzubauen. Man entwickelte dabei ein modulares Konzept dessen Vorteil ist, dass die Mikrosensoren in diesem Fall aus zwei Mikromodulen bestehen, die eigenständig hergestellt werden können. Die Chips tragen einerseits die aktiven, elektrooptischen Komponenten (Laserdiode, Monitordiode und Positionsdetektor) und andererseits nur die rein passiven, mikrooptischen Strukturelemente und Komponenten (Linsen und Spiegel) für die Strahlformung und Strahlführung.

Da die Herstellungsprozesse auf zwei Basismodule aufgeteilt sind, kann die Entwicklung an jedem Modul dezentral erfolgen. Damals bearbeitete MELCO das optische Design und lieferte die elektrooptische Platine (EOP). Das IMT lieferte nach Vorgabe die mikrooptische Bank (MOB). Die Mikrostruktur wurde direktlithografisch durch Röntgentiefenbestrahlung und anschließender Entwicklung direkt in Polymer hergestellt. Durch Anwendung einer hybriden Verbindungstechnik wurden die Chip-hälften planar zu einem elektrooptischen Subsystem (EOSS) verbunden, so dass erste Funktionsmuster mikrooptischer Abstandssensoren realisiert werden konnten [2].

Die Projektarbeit für das IMT in Mikro-FEMOS basiert auf den Ergebnissen des oben beschriebenen Vorlaufprojekts mit der Firma MELCO. Die verteilte Fertigung ist am Referenzprodukt eines modifizierten, mikrooptischen Abstandssensors zu demonstrieren. In dem neuen fertigungsgerechten Design [3-7] muss dabei die Herstellung der MOB durch Abformung und einer teilautomatischen Mikromontage der Module berücksichtigt werden.

Die Basis für das Design liefert eine Ray-Trace-Simulation, die allein die optische Funktionalität der Strahlformung und der Strahlführung in der MOB beschreibt. Anschließend in der weiteren Verfeinerung werden zusätzlich mit einem 3D-CAD-Programm anhand von Volumenmodellen auch die Belange der Abformung, der

Handhabung und der Mikromontage am Gesamtdesign der MOB und der EOP berücksichtigt.

## 2.2 Vorgaben für das optische Design

Der mikrooptische Abstandssensor soll nach dem Triangulationsprinzip arbeiten. Das heißt, ein fokussierter Laserstrahl tastet über eine Ausgangsoptik das Messobjekt an. Ein Teil der Lichtintensität gelangt als diffuse Rückstreuung unter einem definierten Rückstreuungswinkel zur Eingangsoptik und wird danach auf einen positionsempfindlichen Detektor abgebildet (siehe auch Kap. 4). Der Projektpartner Micro-Optronic als Sensorhersteller legt in einem Lastenheft bestimmte Randbedingungen und Spezifikationen für zwei unterschiedlich ausgelegte Abstandssensoren fest, von denen die wichtigsten in Tabelle 1 erfasst sind. Die Spezifikationen der mikrooptischen Abstandssensoren entsprechen teilweise markttauglichen, konventionellen Sensoren.

Anhand der geometrischen Vorgaben lassen sich die Mikromodule EOP und MOB schematisch darstellen (siehe Bild 2-1). Wie zu sehen ist, betragen die Messbereiche der Sensoren 1 mm (Typ 1) und 10 mm (Typ 2) bei einem jeweiligen Grundabstand (Freiraum vor dem Messbereich) von 10 mm (Typ 1) bzw. 20 mm (Typ 2). Weitere Vorgaben sind, dass die Laserdiode (LD) und die Monitordiode (MD) auf der EOP für beide Sensoren in den gleichen Positionen liegen. Die Lagekoordinaten vom positionsempfindlichen Detektor (PSD) kann sich jedoch für die zwei Sensortypen unterscheiden. Die Prinzipskizzen zeigen, dass der Basisabstand zwischen Send- und Empfangsstrahlachse bei der gewünschten Chipbreite maximal einen Wert von ca. 7 mm annehmen kann. Beim Sensor Typ 2 erkennt man, dass der Rückstreuungswinkel für die Messbereichsmittle nicht bei ca. 30° liegt, was nur bei einer größeren Chipbreite möglich wäre. Man bevorzugt hier lieber dieselbe Chipbreite von 10 mm.

Design - Vorgaben	Sensor Typ 1	Sensor Typ 2
Funktionsprinzip	optische Triangulation	optische Triangulation
Chipgröße der MOB (B x L)	$\leq 10 \times 10 \text{ mm}^2$	$\leq 10 \times 10 \text{ mm}^2$
Höhe der MOB (ohne Wafer)	0.75 mm	0.75 mm
Chipgröße der EOP (B x L)	$10 \times 18 \text{ mm}^2$	$10 \times 18 \text{ mm}^2$
Messbereich (MB)	1 mm	10 mm
Grundabstand	10 mm	20 mm
Rückstreuungswinkel vom Target	ca. 30	ca. 30°
Auflösung des MB *)	1/1000	1/1000
rel. Linearitätsfehler des MB *)	$\leq 0.5 \%$	$\leq 0.5 \%$
optische Leistung am Target	$\leq 1 \text{ mW @ } 650 \text{ nm}$	$\leq 1 \text{ mW @ } 650 \text{ nm}$
Spotdurchmesser am Target	ca. 40 $\mu\text{m}$	ca. 40 $\mu\text{m}$
Positionsdetektor Typ	PSD	PSD
Aktive Nutzlänge des PSD 60 %	Spotweg 2.1 mm	Spotweg 2.1 mm

Tabelle 2-1: Spezifikationsvorgaben für mikrooptische Abstandssensoren.

\*) gilt i. A. für eine weiße Referenzkeramik oder Photopapier.

Aus dieser Kenntnis heraus kann man erste geometrisch-optische Berechnungen vornehmen, aus denen nach der Scheimpflug-Bedingung z. B. die Spotbewegung

über die festgelegte Nutzlänge am Positionsdetektor hervorgeht. Das Ergebnis dieser Berechnungen für beide Sensortypen ist in Bild 2-2 und Bild 2-3 grafisch dargestellt. Auf der y-Achse ist der jeweilige Messbereich und auf der x-Achse die Spotbewegung am Positionsdetektor (PSD) angetragen. Die durchgezogenen Kurven verlaufen typischerweise nichtlinear, was im Bild 2-3 für Sensor Typ 2 wegen des größeren Messbereichs deutlicher erkennbar ist. Die Kurvenverläufe dienen hier zur Überprüfung der gewählten Messbereiche der Abstandssensoren in Verbindung mit der festgelegten Detektorgröße.

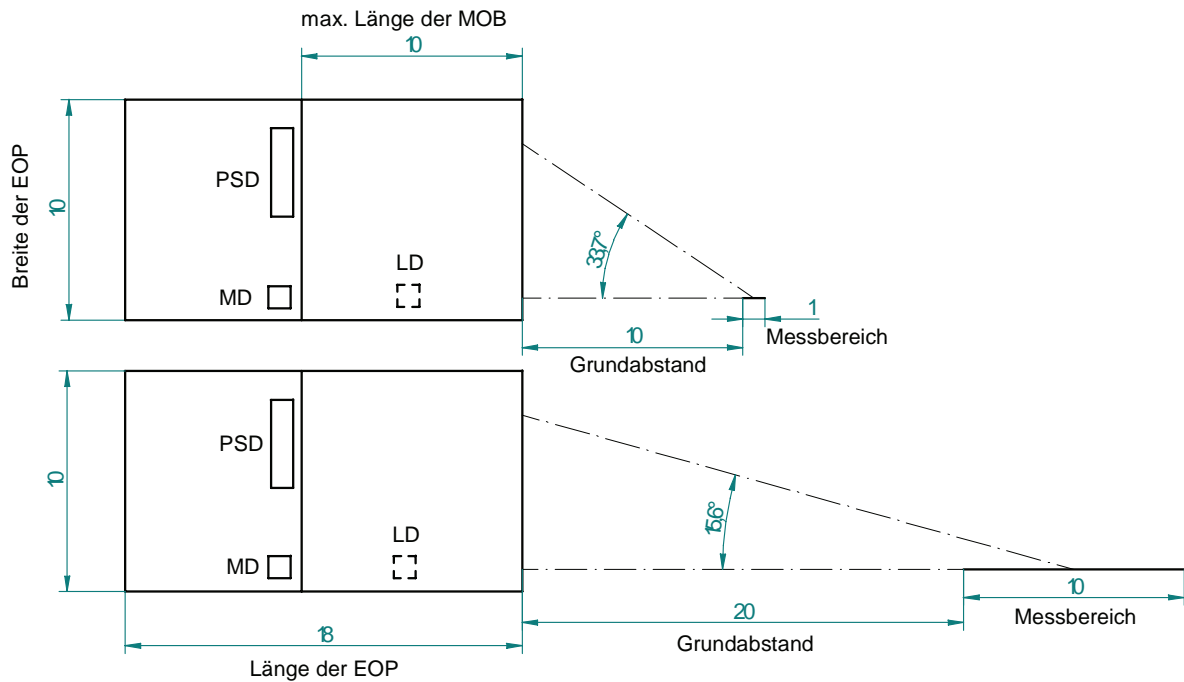


Bild 2-1: Schematische Darstellung von Sensor Typ 1 mit 1 mm Messbereich und Sensor Typ 2 mit 10 mm Messbereich.

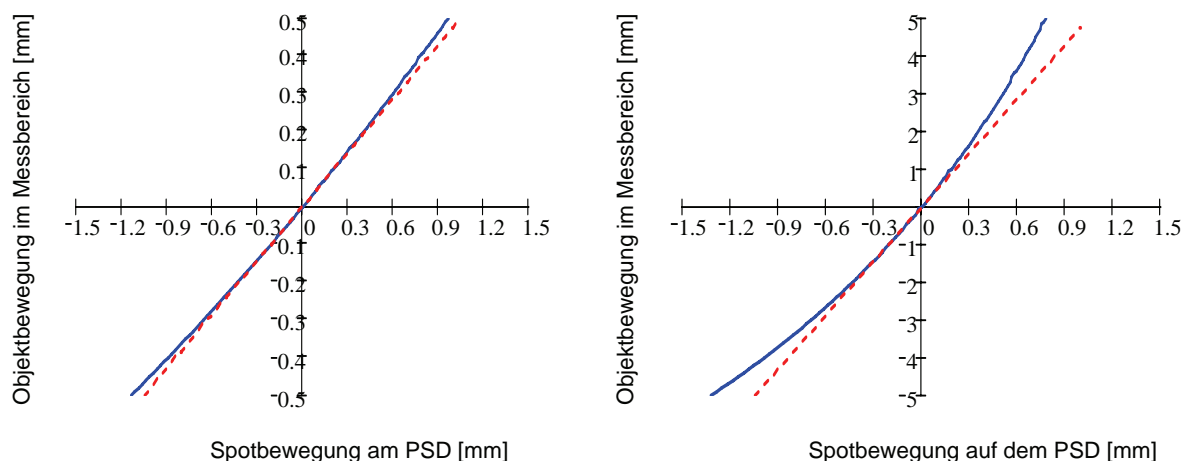


Bild 2-2: Berechnete Spotbewegung am PSD als Funktion der Objektverschiebung für Sensor Typ 1. Bild 2-3: Berechnete Spotbewegung am PSD als Funktion der Objektverschiebung für Sensor Typ 2.

Im Design der mikrooptischen Bank (MOB) wird von Beginn an berücksichtigt, dass die Spotbewegung über 2.1 mm am Detektor einen linearen, symmetrischen Verlauf

erhalten soll wie es im gestrichelten Kurvenverlauf von Bild 2-2 und Bild 2-3 zu sehen ist.

Für die Simulationsrechnungen und das Design wird das Ray-Trace-Programm ZEMAX der Firma Optima Research verwendet, um die optischen Schnitte für die Strukturen in der MOB nach Vorgabe der optischen Spotgröße am Messobjekt und respektive am positionsempfindlichen Detektor (PSD) zu optimieren. Durch den Herstellprozess nach dem LIGA-Verfahren kann man die optisch wirksamen Strukturelemente nur entlang einer optischen Achse krümmen. Als Bestandteil in der MOB sind gekrümmte Spiegelflächen integrierbar, die eine horizontale Fokussierung bewirken. In Verbindung mit einer Zylinderlinse für die vertikale Fokussierung ist dann ein gewünschter Spotdurchmesser erzielbar. Die Mikrolinse muss man separat herstellen und hybrid in die MOB-Struktur einpassen. Um die Spotbewegung am Positionsdetektor zu lenkieren (siehe Bild 2-2 und Bild 2-3), ist zusätzlich ein gekrümmter Spiegel im Empfängerstrahlengang notwendig. Über ebene Spiegelflächen erfolgen Strahlumlenkungen bzw. Strahlauskopplungen.

## **2.3 Optisches Design**

Das optische Design erfolgt in zwei Entwicklungsschritten, die sich aus einer räumlichen Strahlauflösung für den Abstandssensor ergeben. Man hat einerseits den Sendestrahlerverlauf vom Laser bis zum Messobjekt und andererseits einen Empfängerstrahlverlauf von verschiedenen Positionen des Messbereichs bis zum Detektor. Nach getrennter Optimierung der Strahlformung und Strahlführung werden die beiden Teilmodelle zu einem Gesamtstrahlmodell verknüpft.

### **2.3.1 Optimierung für den Sendestrahlerverlauf**

Im oberen Teil von Bild 2-4 ist das Simulationsergebnis für den gesamten Sendestrahlerverlauf (Sensor Typ 1) grafisch dargestellt. Ausgehend vom Laserquellpunkt, über eine Mikrozyylinderlinse, über einen Fokusspiegel, über einen ebenen Umkehrspiegel und ein Gehäusefenster (schematisch) endet der Strahlverlauf im Fokus am Target in der Mitte des Messbereichs im Abstand von 10.5 mm (gemessen von der Front des Gehäusefensters).

In den unteren Ausschnittsvergrößerungen von Bild 2-4 erkennt man in der Seitenansicht und der Aufsicht der Mikrozyylinderlinse und den nachfolgenden Spiegeln, dass der Strahlverlauf vom Laserquellpunkt her mit unterschiedlicher Divergenz in den Achsen erfolgt. Dies ist eine Eigenschaft der gewählten Laserdiode, die im Design berücksichtigt wird. Die vertikale Divergenz der Laserdiode ist größer, daher sind nach der Quelle erst die Mikrolinse und danach der Fokusspiegel angeordnet. Die Kombination einer Mikrozyylinderlinse mit einem Fokusspiegel ist notwendig, da durch den gewählten Herstellprozess (Direktlithografie bei den Linsen) nur einachsige Krümmungen herstellbar sind und erst durch die gemeinsame optische Wirkung der Linse mit einem Fokusspiegel die gewünschte Spotgröße von ca. 40  $\mu\text{m}$  Durchmesser am Messobjekt eintritt.



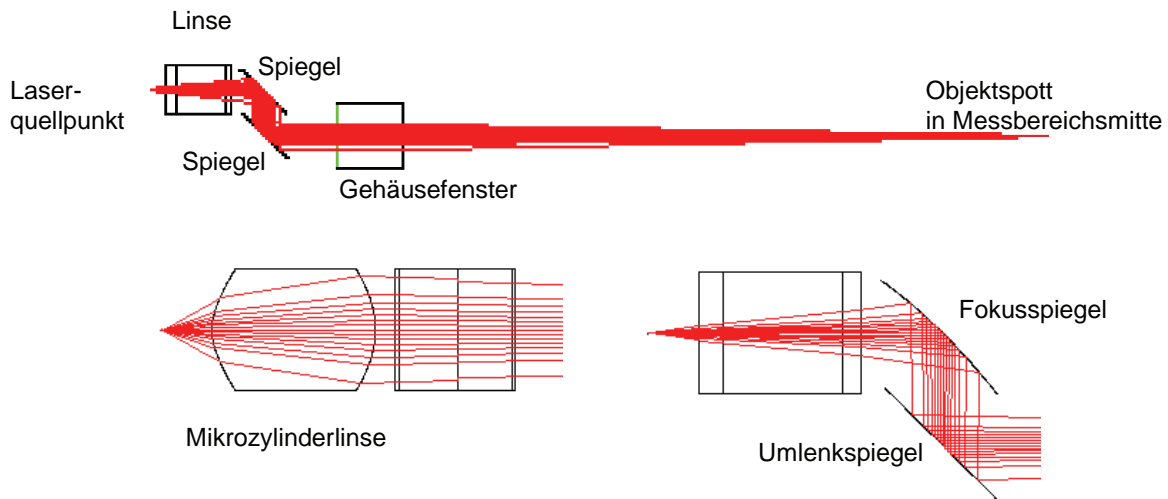


Bild 2-4: Oben: Simulierter Strahlverlauf für Sensor Typ 1 sendeseitig bis Messbereichsmitte bei 10.5 mm; Unten: Seitenansicht (links) und Aufsicht (rechts) der Mikrozyylinderlinse  $L \times B \times H = 1 \times 0.75 \times 0.74 \text{ mm}^3$  und der nach-folgenden Spiegelebenen

Die Optimierungsbedingungen für die optischen Schnitte (Krümmungen) kann man bei der Arbeit am fertigungsgerechten Design unterschiedlich gewichten. Prinzipiell führen verschiedene Linsen- u. Spiegelschnitte zum gleichen Ergebnis eines gewünschten Spotdurchmessers mit gaußscher Intensitätsverteilung im Messbereich. Bei der lithografischen Herstellung von Masken und Abformwerkzeugen könnten die einachsigen optischen Schnitte eigentlich beliebig entartet (asphärisch) sein, da bei der Röntgenbestrahlung komplizierte Strukturen mit hoher Genauigkeit in Polymeren strukturierbar sind. Um auch die Möglichkeit offen zu lassen, die Mikro-linsen durch andere Verfahren, wie z. B. mechanische Bearbeitung, herzustellen, sollten die Linsenschnitte nicht zu komplizierte, asphärische Formen haben. Aus diesem Grund ist die Mikrozyylinderlinse wie im Bild 2-4 (links unten) gezeigt, auf eine möglichst einfache Gestalt an Vorder- und (oder) Rückseite zu optimieren.

Der fokussierende Spiegelschnitt (Bild 2-4, rechts unten) zeigt nach der Optimierung eine nahezu rein elliptische Form. Der horizontale Spotdurchmesser im Messbereich ist möglichst dem vertikalen Spotdurchmesser, der über die Mikrozyylinderlinse eingestellt wird, anzugleichen, damit der Spot am Messobjekt eine symmetrische Intensitätsverteilung erhält. Die Spotverteilungen im Bild 2-5 stammen aus der Simulation; sie gelten für den Sensors Typ 2 mit Messabständen zwischen 20 bis 30 mm in Intervallen von 2.5 mm. Die Bildkanten haben jeweils 100  $\mu\text{m}$  Länge. Weil das fertigungsgerechte Design möglichst wenig mikrooptische Elemente aufweisen soll, sind optische Abbildungsfehler nur bedingt korrigierbar und daher wird ein gewisser Rest von Astigmatismus im Spotbild über den Messbereichs akzeptiert, was am Messbereichsanfang und -ende am deutlichsten in Erscheinung tritt. Der geforderte Spotdurchmesser von ca. 40  $\mu\text{m}$  ist deshalb auch nur für die Messbereichsmitte sehr gut optimierbar. Beim Sensor Typ 1 tritt dieser Abbildungsfehler wegen des geringeren Messbereichs von 1 mm kaum in Erscheinung.

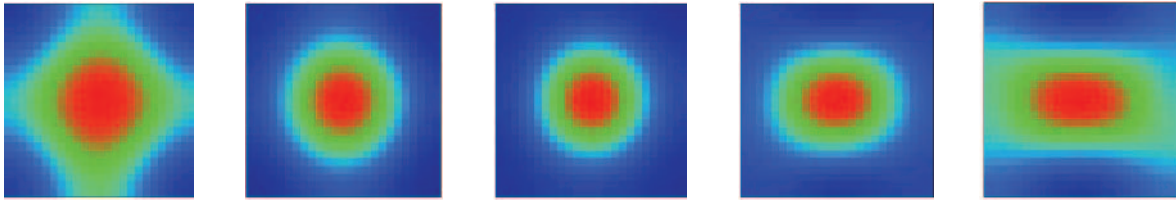


Bild 2-5: Spotbilder aus der Simulation für den Sensors Typ 2, sie gelten für die Messabstände von 20 mm (links), 25 mm (mittig) und 30 mm (rechts). Die Bildkanten haben jeweils 100  $\mu\text{m}$  Länge.

### 2.3.2 Optimierung für den Empfängerstrahlverlauf

Im Bild 2-6, links ist das Simulationsergebnis für den Empfängerstrahlverlauf (Sensor Typ 1) graphisch dargestellt. In der Aufsicht sind die Strahlverläufe von mehreren Quellpunkten über die optischen Elemente innerhalb der Sensorstruktur gezeichnet. Die Strahlen starten in diesem Modellteil von neun Quellpunkten, die äquidistant im Abstand von 125  $\mu\text{m}$  über den Messbereich verteilt liegen. Sie sollen für die Optimierung der Abbildung die Messobjektverschiebung simulieren. Die Strahldivergenz ist jeweils so gewählt, dass die Empfängerlinse voll ausgeleuchtet ist (siehe Bild 2-6, rechts). Wie schon im Sendestrahlerlauf beschrieben, dient die Mikrozyylinderlinse in Kombination mit einem Fokusspiegel zur Einstellung der Spotgröße am positionsempfindlichen Detektor (PSD). Auch hier liefern die gleichen Optimierungsbedingungen wie im Abschnitt zuvor beschrieben die optischen Schnitte an der Mikrozyylinderlinse und am Fokusspiegel. Über einen zusätzlichen, asphärisch gekrümmten Spiegel wird die Linearisierung der Spotbewegung am PSD realisiert. Nach der Optimierung dieses Bauelements verteilen sich die neun Bildpunkte äquidistant im Abstand von 262.5  $\mu\text{m}$  über die geforderte Detektornutzlänge von 2.1 mm.

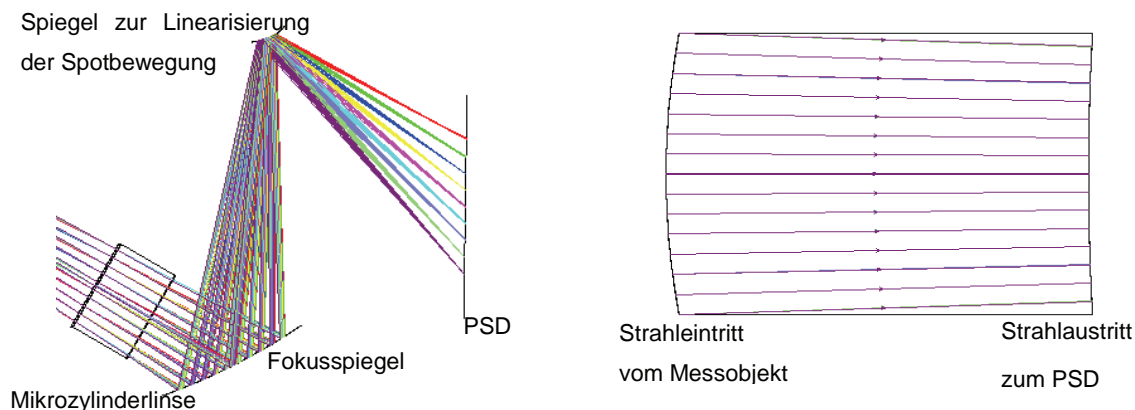


Bild 2-6: Links: Simulierter Strahlverlauf für Sensor Typ 1 empfängerseitig. Rechts: Seitenansicht der Mikro-Zylinderlinse  $L \times B \times H = 1 \times 1.5 \times 0.74 \text{ mm}^3$ .

### 2.3.3 Gesamtstrahlmodell

Die Optimierung der Mikrozyylinderlinsen und der Spiegelschnitte ist an dieser Stelle abgeschlossen. Im nächsten Schritt des Sensor-Designs werden die Einzelstrahlmodelle der Sendeseite und der Empfängerseite zu einem Gesamtstrahlmodell verknüpft. Dieser Simulationsteil ist mehr objektorientiert. Das heißt, man kann mit

Hilfe dieses Modells die mikrooptische Bank (MOB) erstmals über die rein optisch notwendigen Strukturelemente durch Zusatzelemente erweitern. Es können beliebige Objekte wie Lichtquellen (Störquellen), Detektoren, Trennwände oder ein Substrat platziert werden. Die Oberflächen lassen sich spiegelnd bis absorbierend oder streuend definieren. Das Gesamtstrahlmodell kann man somit auf die ursprünglich gewünschten Abbildungseigenschaften und darüber hinaus auf Störlichteinflüsse untersuchen. Die Störlichtquellen liegen außerhalb oder innerhalb der Sensorstruktur. Es lassen sich z. B. Rückreflexe von der ersten Oberfläche der Zylinderlinse verfolgen und man kann die Beeinflussung auf den positionsempfindlichen Detektor untersuchen. Als Gegenmaßnahme definiert man Trennwandstrukturen zwischen Sende- und Empfangsteil und erprobt ihre Wirkung.

Wie in der Grafik von Bild 2-7 zu sehen ist, liegt noch kein echtes Volumenmodell der optischen Komponenten vor, denn die gekrümmten Spiegel sind nur zweidimensional ohne echte Wanddicke abgebildet. Der Platzbedarf für weitere Strukturelemente, die für die Handhabungs- u. Verbindungstechnik erforderlich sind, kann jetzt anhand des Gesamtmodells diskutiert werden, da alle Positionen der optisch wirksamen Elemente festliegen. Die Chipgröße der mikrooptischen Bank (MOB) ist im Gesamtstrahlmodell gegeben und beträgt in  $L \times B = 6.3 \times 9.5 \text{ mm}^2$  und ist damit im geforderten Maß von max. 10 mm je Kantenlänge realisiert.

Im Bild 2-7 ist die Laserdiode (LD) mit ihrem Raumbedarf schematisch enthalten. Zum bisher diskutierten Sendestrahilverlauf in Richtung Messobjekt kommt hier zusätzlich ab der LD in entgegengesetzter Richtung ein Strahlverlauf hinzu. Dies ist der Monitorstrahlverlauf, der es erlaubt, über eine einfache Monitordiode (MD) den Laserbetrieb zu kontrollieren. Die in Richtung MD platzierte zweite Mikrozyylinderlinse ist identisch zur ersten und soll lediglich die höhere Divergenz in vertikaler Richtung verringern, damit die Detektorfläche in dieser Achse nicht überstrahlt wird. Die Rückstreuung vom Messobjekt im Bild 2-1 ist idealisiert. Die Strahlen, welche die Empfängerlinse nicht treffen, sind zur besseren Übersicht ausgeblendet. In der Darstellung fehlt auch das Gehäusefenster aus Filterglas RG630 von 1 mm Dicke über die Breite der MOB. In den Berechnungen wird es stets mitberücksichtigt.

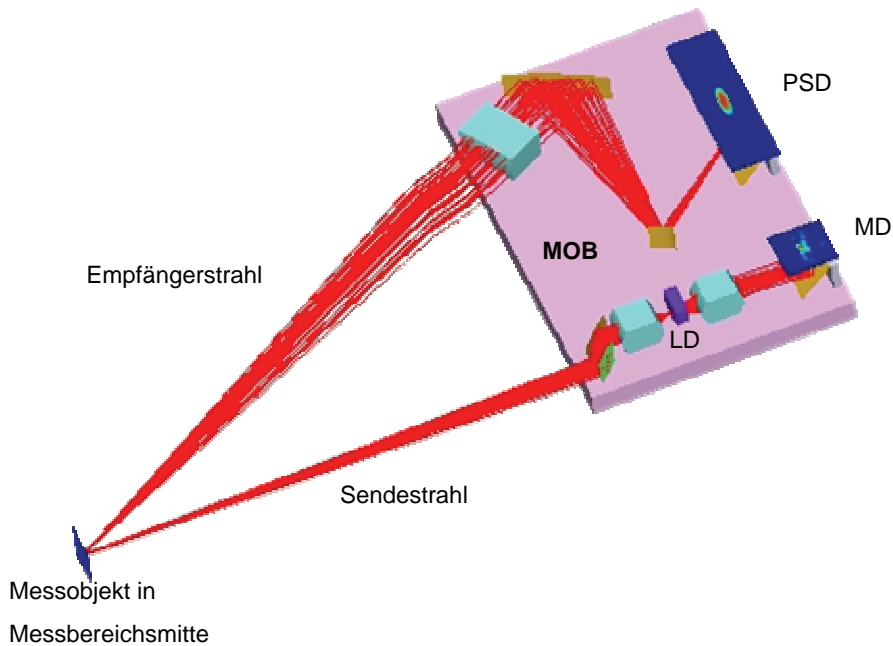


Bild 2-7: Gesamtstrahlmodell für die mikrooptische Bank (MOB) von Abstandssensor Typ 1. Die Rückstreuung vom Messobjekt ist idealisiert. Die Strahlen, welche die Empfängerlinse nicht treffen, sind zur besseren Übersicht ausgeblendet. Abmessungen  $L \times B = 6.3 \times 9.5 \text{ mm}^2$ .

Die Komponenten LD, MD und PSD in Bild 2-7 sind letztlich Bestandteile der elektrooptischen Platine (EOP). Erst nach der Montage beider Mikromodule MOB und EOP befinden sie sich in den hier dargestellten Positionen. Um die Detektorflächen zu erreichen, müssen die Strahlverläufe über 45°-orientierte Spiegelebenen aus der Ebene der MOB in Vertikalrichtung umgelenkt werden.

## 2.4 Designgestaltung unter kunststoffabformtechnischen Aspekten

### 2.4.1 Gestaltung in Kunststoff

Die zentrale Idee der MOB beruht auf der Kombination von Haltestrukturen und Funktionsstrukturen. Die Integration solch verschiedener Anforderungen wie mechanischen Stabilität neben hoher Präzision und optischer Qualität kann durch die Verwendung von Kunststoff ideal erfüllt werden. Die Gestaltungsfreiheit mit polymeren Materialien hat das Weltbild in den letzten fünfzig Jahren entscheidend verändert und bringt auch in der Mikrosystemtechnik eine wesentliche Erweiterung für die meisten Anwendungsgebiete mit sich.

Wenn man in diesem Projekt sowohl die optischen Eigenschaften durch Anpassung des Designs optimiert (vgl. Abschnitt 2.3) als auch montagegerechte Modifikationen nahezu beliebig integrieren kann (vgl. Abschnitt 2.5), so hängt das unmittelbar mit den Möglichkeiten der Kunststofftechnik zusammen. Trotz der vielen Freiheiten bei der Konstruktion mit polymeren Werkstoffen gibt es aber auch Einschränkungen und Begrenzungen, die vor allem durch die Herstellbarkeit bedingt sind.

## 2.4.2 LIGA - Strukturen

Die Realisierung einer mikrooptischen Bank ist eng mit den Möglichkeiten der LIGA - Technik verbunden. Die Vorteile wie hohe Strukturen und große Aspektverhältnisse sowie Seitenflächen mit optischer Güte, welche diese Technik auszeichnen, erlauben die Umsetzung einer solchen Idee.

Die LIGA – Technik bedeutet aber auch grundsätzliche Einschränkungen: Die Möglichkeit dreidimensionale Freiformflächen zu schaffen ist, bis auf wenige, aufwendig zu realisierende Ausnahmen, nahezu Null. Damit reduziert sich die Designfreiheit auf nur zwei Dimensionen. Schon die Integration von schrägen Spiegelflächen erfordert eine zweite justierte Bestrahlung. Der dazu notwendige geneigte Einbau zieht aber weitere Einschränkungen bezüglich des Layoutbereichs nach sich.

## 2.4.3 Formeinsätze

Grundsätzlich kann eine LIGA - Struktur durch Übergalvanisieren auch zu einem Formeinsatz weiterprozessiert werden mit dessen Hilfe können dann Kunststoffbauteile abgeformt werden. Damit ist allerdings zunächst nur eine Art Rapid Prototyping möglich. Bei mit solch einem Stempel gefertigten Teilen ist aber nicht automatisch gewährleistet, dass sie dieselben Eigenschaften des direktlithographisch hergestellten Bauteils aufweisen. Für die Qualität der abgeformten Bauteile müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden:

Zunächst die Abformbarkeit: Ein Design, welches sich über LIGA - Technik herstellen lässt und welches sogar in einen Formeinsatz umgesetzt werden kann, muss sich nicht unbedingt auch abformen lassen. Kritische Punkte in der Prozesskette sind die Formbefüllung und die Entformung. Die Formbefüllung ist beim Heißprägen ein nur geringes Problem [8]. Während beim Mikrospritzgießen, je nach Angussart und Verteilersystem Probleme mit unterschiedlichen Fließwegen auftreten, die zur Binde-nahtbildung, Nichtbefüllung oder sogar Formeinsatzbeschädigungen führen können, profitiert das Heißprägen von der flächigen Befüllung, bei der simultan, das erweichte Polymer über kurze Fließwege in die Form gedrückt wird. Simulationen zeigen, dass erst für extreme Aspektverhältnisse die Befüllung der schmalsten Strukturen problematisch wird, aber durch höhere Prägedrucke unterstützt werden kann [9]. Änderungen im Design sind beim Heißprägen deshalb nicht notwendig.

Kritischer ist dagegen der Entformschritt. Während im makroskopischen Abformbereich bewährte Hilfsmittel wie Designmaßnahmen (Entformschrägen) oder technische Modifikationen (Auswerferstifte) zur Verfügung stehen, sind solche Lösungen in der Mikroabformung, speziell mit LIGA – Formeinsätzen, nicht möglich und im Falle reflektiver optischer Strukturen auch nicht tolerierbar. Die hohen Aspektverhältnisse und die großen Höhen führen zu einer enormen Vergrößerung der Oberfläche mit einer damit verbundenen hohen Haftkraft zwischen Prägeteil und Werkzeug. Für die MOB mit einer Strukturhöhe von 750 µm kommt dieser Umstand besonders zum tragen. Ein besonders kritischer Bereich im Layout ist hier die ringartige Haltestruktur für die Justierkugel. Die filigranen Säulen, müssen auf eine gewisse Nachgiebigkeit ausgelegt werden, um über einen Federeffekt ausreichend Haltekraft zu erzielen. Nur ein Kompromiss zwischen maximaler Federkraft und optimaler Entformung kann hier eine akzeptable Lösung darstellen. Die Haltesäulen reißen beim Entformen nicht ab, leichte Deformationen durch Überziehen können jedoch toleriert werden, da in diesem Bereich keine optische Funktion gestört wird.

#### **2.4.4 Abgeformte Strukturen**

Andere kritische Bereiche liegen überall da, wo große, zusammenhängende Kunststoffflächen im Design anzutreffen sind. In diesen Bereichen wirkt sich die Schwindung des Polymers in der Abkühlphase am meisten aus. Damit die am Rande solcher großen Kunststoffbereiche liegenden optischen Funktionsflächen nicht deformiert werden, sollten diese soweit reduziert werden, wie es die mechanische Stabilität zulässt. Allerdings gilt es auch hier Kompromisse zu schließen. Da das Prägen kein reiner Urformprozess ist, sondern durch das Einlegen eines Halbzeuges auch einen gewissen Umformanteil beinhaltet, ist zusätzlich der lokale Materialfluss zu berücksichtigen. Besonders wenn es darum geht die Restschicht zu minimieren, sollte ein möglichst großer Flächenanteil als erhabene Kunststoffstruktur verbleiben. Diese Zusatzflächen können aber so positioniert werden, dass sie Abschirmfunktionen gegen Fehllicht übernehmen. Trotzdem gelingt es nicht immer, eine homogene Verteilung über die Fläche zu erzielen. So muss funktionsbedingt ein relativ großer Bereich vor dem Detektorspiegel frei bleiben. Wie in Bild 2-11 (Abschnitt 0) deutlich zu erkennen ist, besteht das endgültige Design aus wesentlich mehr Strukturen als den rein optischen Funktionselementen.

Ein letzter Aspekt bei der Auslegung des Designs ist die Berücksichtigung der Kunststoffschwindung. Über einen linearen Vorhalt im Design werden die Maße für den Formeinsatz automatisch schon im Layout für die erste Maske berücksichtigt. Da die Schwindung nicht nur vom Material abhängt, sondern auch von der Abformtechnik, muss bereits in der Designphase entschieden werden, für welchen Herstellungsprozess und welches Material der Formeinsatz verwendet werden soll. Insbesondere der Unterschied zwischen Spritzgießen und Heißprägen ist groß. Für PMMA wird die Schwindung beim Spritzgießen mit 1,5 % angegeben. Beim Heißprägen liegt sie bei nur 0,5%. Für Polycarbonat als alternatives Material liegt die Schwindung im Heißprägeprozess bei 0,7%. Diese geringe Differenz erlaubt den Einsatz des Formeinsatzes im Heißprägeprozess in erster Näherung sowohl für PC also auch für PMMA.

#### **2.5 Montage-/fertigungsgerechte Gestaltung des Gesamtsystems**

Neben den Anforderungen des optischen Designs und den Anforderungen der Prozesstechnik des Heißprägens müssen auch die Anforderungen, die sich aus der teilautomatisierten Montage ergeben, berücksichtigt werden. Alle Anforderungen gemeinsam bilden die Ausgangsbasis für die Erstellung eines volumetrischen CAD-Modells des Gesamtsystems. Ergänzend hierzu werden die relevanten Teile der EOP dreidimensional modelliert. Mit Hilfe dieses Gesamtmodells lassen sich die handhabungsspezifischen Randbedingungen ableiten. Außerdem bildet es die Basis für die Kollisionskontrolle bei der Simulation der Handhabungsvorgänge. Die Fertigung der einzelnen Komponenten benötigt als Eingabedaten wiederum 2D-Formate. In diesem Abschnitt wird die Erstellung des Modells beschrieben und beispielhaft die Integration von mechanischen Hilfsstrukturen zur Zuführung in das Layout der MOB dargestellt.

Die Modellierung des Gesamtsystems in einem 3D-CAD-Modell erfolgt mit dem Programm ProEngineer der Firma Parametric. Zum Datenaustausch mit anderen Systemen stehen hier unterschiedliche Formate zur Verfügung. Im Rahmen dieses Projekts werden alle 3D-Daten über die Formate STEP oder IGES transferiert. Der Transfer der 2D-Daten für die Maskenerstellung erfolgt über das Format DXF.

### 2.5.1 Transfer der Flächenbeschreibungen in ein CAD-Modell

Die von der optischen Simulationssoftware gelieferten Flächenbeschreibungen werden in das Austauschformat exportiert. Die räumliche Zuordnung der einzelnen Teilflächen wird über ein Referenzkoordinatensystem (RKS), das in beiden Systemen (optische Simulation und Mechanik-CAD) übereinstimmt, sichergestellt. Dieses RKS wird in den Mittelpunkt des Messobjekts in Messbereichsmittle gelegt (s. Bild 2-7). D. h. jede Flächenbeschreibung aus der Optiksimulation bezieht sich auf dieses Referenzkoordinatensystem. Beim Import in das CAD-Programm werden die Globalkoordinaten aller Elemente auf das Referenzkoordinatensystem des CAD-Modells gelegt.

Bild 2-8 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise beim Transfer der 3D-Daten zwischen den einzelnen Werkzeugen. Der Rücktransport der CAD-Daten des fertigen Modells von Mechanik-CAD zu Optiksimulation erfolgt ebenso.

### 2.5.2 Erstellung eines fertigungsgerechten Modells

Am vorliegenden 3D-Modell des Abstandssensors werden nach Vorgabe der beteiligten Partner einzelne Strukturen modifiziert. Folgende Einflussfaktoren werden hierbei u. a. berücksichtigt:

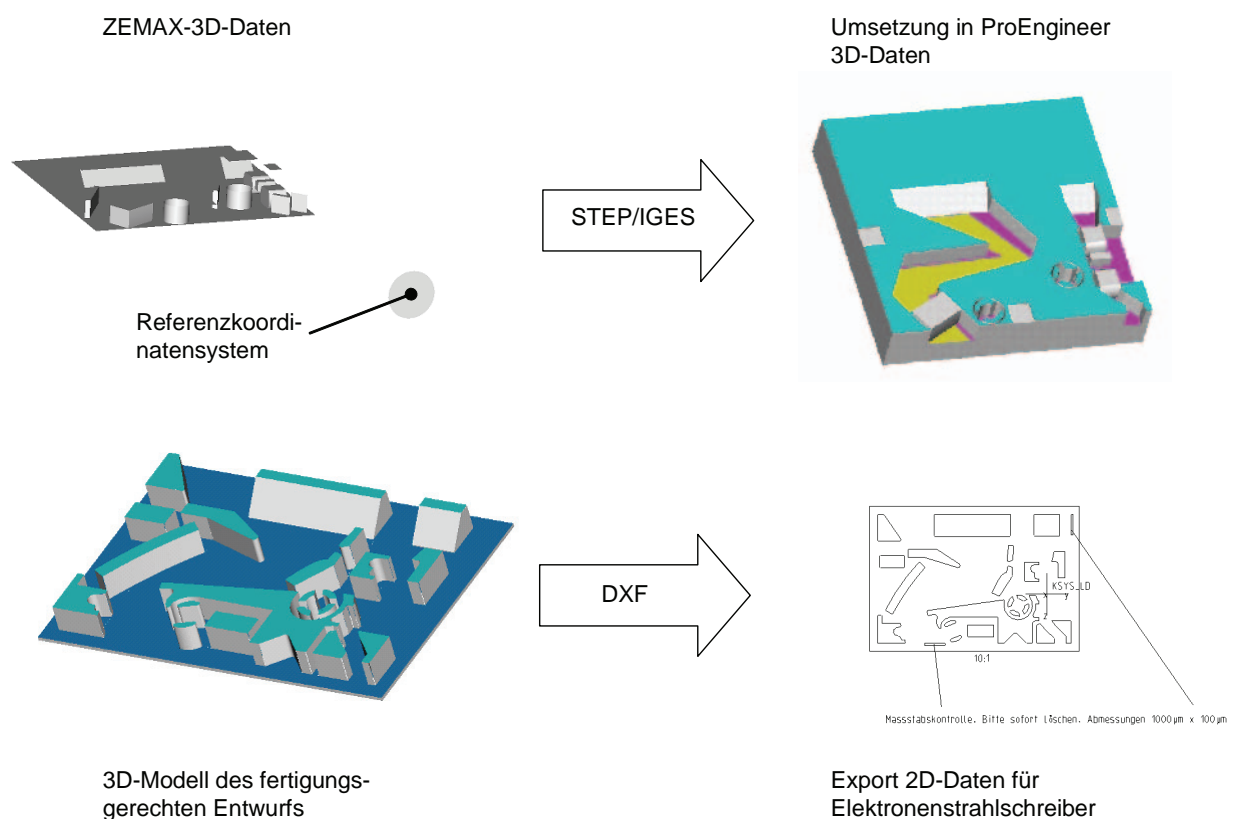


Bild 2-8: Datenaustausch bei der Erstellung des CAD-Modells

- Randbedingungen, die sich aus der Beschreibung des optischen Systems ergeben (Position der Elemente)
- Reduktion der negativen Einflussfaktoren auf die optische Leistungsfähigkeit (Streulichtunterdrückung, Integration von Abschattungen)

- Randbedingungen, die sich aus der Prägetechnik ergeben (Wandabstände, Wanddicken)
- Zuführung und Fixierung der Bauteile bei der Montage (Schnittstellen zu Werkstückträger, Werkzeug)
- Freiräume zur kollisionsfreien Manipulation der zu fügenden Komponenten (Linsen, Laserdiodenaufbau, Bonddrähte)
- Integration fügetechnisch relevanter Strukturen (Klebstoffzuführung, Klemmung MOB/EOP)
- Abfuhr von Abwärme der Laserdiode
- etc.

Dies führt zu Maßnahmen im Design von denen einige beispielhaft in Tabelle 2 gelistet sind.

Partner	Anforderung	Zwischenstand	Endstand
E	Freiraum seitlich der LD für Submount und Bonddrähte	ein Bonddraht auf LD	zusätzlich ein Bonddraht auf Submount
E	Visuelle Kontrolle der Bonddrähte		offene Randstruktur bei der LD
FZ	Vergrößerung der Klebmulden	0.8 mm x 0.8 mm	1.3 mm x 0.8 mm, bessere Haftung
FZ	Vergrößerung des Randabstandes der Klebmulden	200µm	300µm, Randfestigkeit erhöht
HM	Änderung der Klemmringstruktur bez. der Anlagepunkte	8 Punkte nicht achssymmetrisch ausgerichtet	6 Punkte achssymmetrisch ausgerichtet
HM	Änderung der Linsenanlagepunkte	4 Punkte	3 Punkte
HM	Anpassung der Klebblöcke an die Klebmulden	Kleber vom Rand einfüllen in seitlich offene Klebmulde nach der Montage von MOB auf EOP	Kleber kommt dosiert als erstes in die Klebmulden vor der Montage von MOB auf EOP
HM	Verdrängungsräume f. d. Kleber	willkürlich	Vorzugsrichtung für überschüssigen Kleber
HM	Freiräume für ein Klebbett an den Linsen	Kleber unter den Linsen (MELCO Projekt)	Kleber neben d. Linse, Befüllung mit Injektionsnadeln
FZ	Freistellen der Spiegelstrukturen	große PMMA – Blöcke	kleine PMMA – Blöcke mit geringerer Verzugkraft durch innere Spannungen
FZ	PMMA – Rand um die Empfangsseite möglichst geschlossen strukturieren		optisch dichte Randstruktur; Fremdlichtunterdrückung
FZ	Abstände von Wänden am PSD – Spiegel und parallele Spiegelwände vergrößert		keine Abschattung beim Bedampfen der Spiegelschichten
E	Freiräume für PSD – Bonddrähte		Öffnungen in der hinteren Randstruktur



Fortsetzung	Partner	Anforderung	Zwischenstand	Endstand
	FZ	Parasitäre Reflexe in Richtung PSD unterdrücken		schräge Wandverläufe
	A	Mindestabstand zwischen PMMA – Strukturen (z.B. an d. Klemmringstruktur)	50µm Wanddicke im Abformwerkzeug (MELCO – Design)	200µm Wanddicke im Abformwerkzeug
	A	Verlagerung einer Leiterbahn		stärkere Wanddicke am Linsenanschlag MD
	A	Min. Wanddicken von 200µm		Wandstabilität
	A	PMMA – Spitzen vermeiden		Verrundungen aller Strukturelemente ergeben sicheres Entformen

Tabelle 2-2: Auszug aus der Liste der Designabsprachen zur Erstellung eines fertigungsgerechten Designs des Abstandssensors. Abkürzungen: E (Elektrooptik), HM (Handhabung und Montage), FZ (Funktion und Zuverlässigkeit) und A (Abformung).

Diese Liste führt nur einen Teil der bearbeiteten Fragestellungen auf. Exemplarisch soll hier auf die Gestaltung der mechanischen Strukturen auf der MOB, die zur Zuführung auf dem Werkstückträger dienen, eingegangen werden.

### 2.5.3 Integration mechanischer Hilfsstrukturen zur Zuführung der MOB

Das in Kapitel 5 beschriebene Montagekonzept erfordert die definierte Zuführung der Bauteile in den Arbeitsraum der Maschine. Die Position des Bauteils muss bekannt sein, damit die Montageaufgaben fehlerfrei bearbeitet werden können. Hierzu werden geeignete mechanische Strukturen in das Layout der Bauteile integriert, welche die Positionierung sicherstellen.

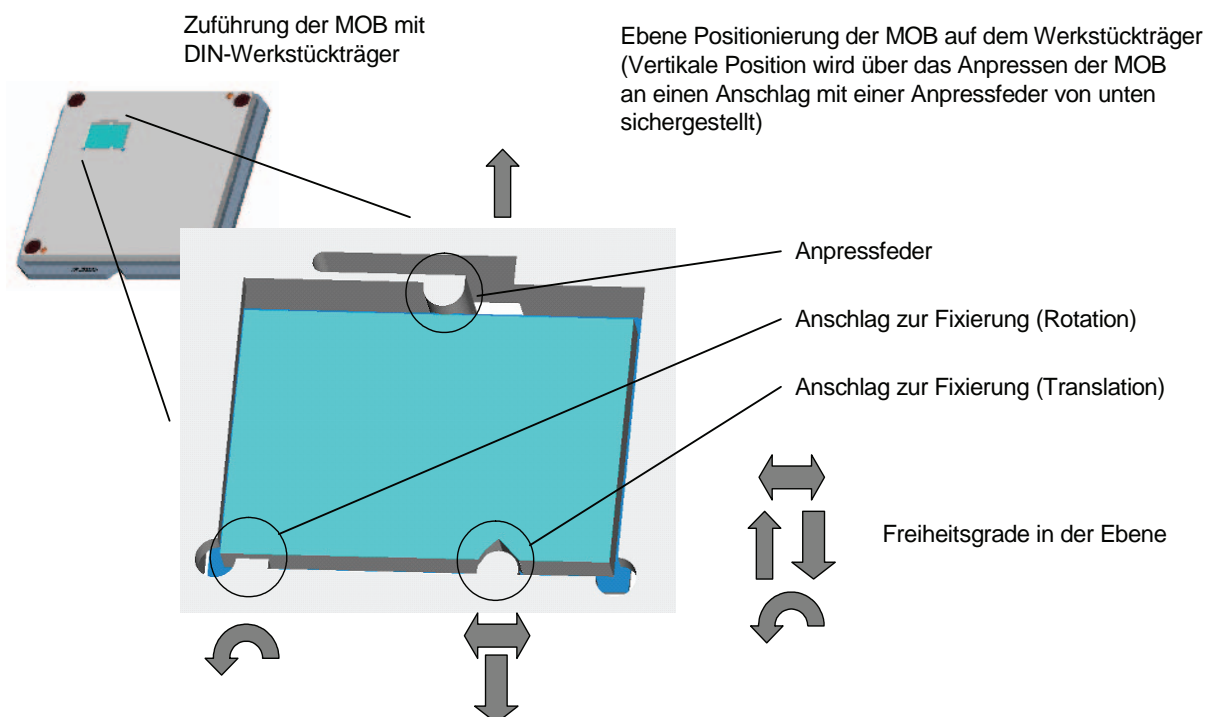


Bild 2-9: Positionierung der MOB auf Werkstückträger über passive Anschläge und Federn

Bild 2-9 zeigt die Strategie der Positionierung von Bauteilen über passive Anschläge am Beispiel MOB auf. Die hier erarbeiteten Designvorgaben fließen in das Layout der Komponenten ein.

Entsprechende Konstruktionselemente werden außer zum Zwecke der Zuführung ebenso auch zur Handhabung und zur Unterstützung der Füge-technik integriert (s. a. Kapitel 5). Hier werden beispielsweise die geometrischen Abmessungen der eingesetzten Dosiernadeln berücksichtigt indem die Größe der Klebetaschen zur Fixierung der Linsen auf der MOB ausreichend groß dimensioniert wird.

#### 2.5.4 CAD-Modell des Gesamtsystems

Die Erstellung des CAD-Modells des kompletten Sensors bietet die Möglichkeit am Rechner entwurfsunterstützende Simulationen durchzuführen. Bei der Planung der Werkzeuge zur Handhabung wie auch bei der Konzeption der Montageprozesse kann begleitend am 3D-Modell eine erste virtuelle Kontrolle auf z. B. Volumenbedarf (Kollisionsüberprüfung) durchgeführt werden. Dies erleichtert und verkürzt den Konstruktionsprozess und vermindert die Anzahl der oft trotzdem notwendigen mechanischen Überarbeitungen (Re-Design-Phasen).

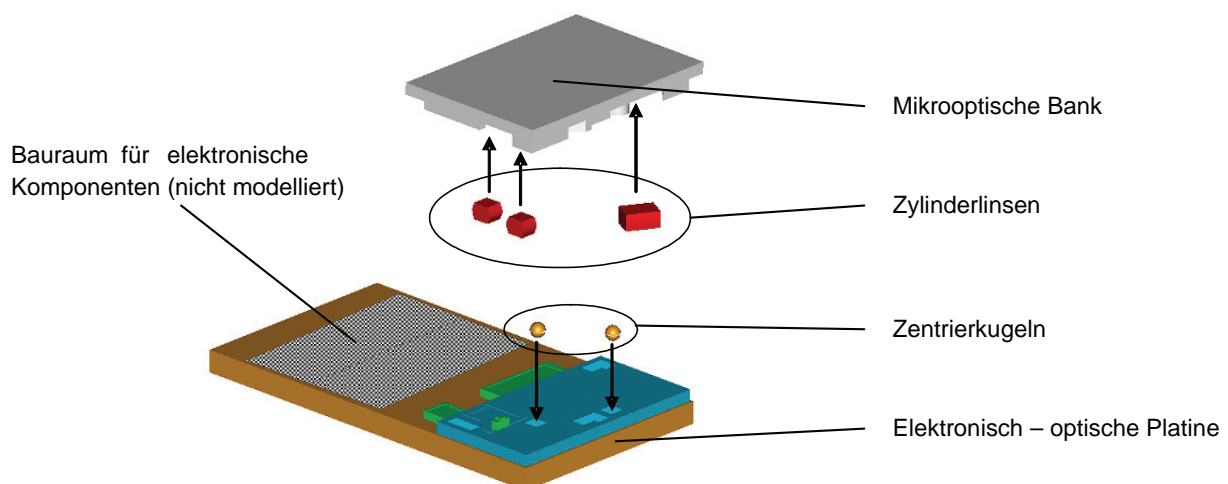


Bild 2-10: Modell des Gesamtsystems (nicht relevante elektronische Komponenten nicht dargestellt)

Bild 2-10 zeigt die Explosionsdarstellung des CAD-Modells des Gesamtsystems an Hand dessen alle weiteren Untersuchungen wie z. B. auch die Überprüfung des Entwurfs mit der optischen Simulation stattfinden.

#### 2.6 Simulation am Volumenmodell

Nach der Modellierung im 3D - CAD besitzt die MOB (siehe Bild 2-11) alle notwendigen Strukturelemente. Neben den optisch wirksamen Mikrolinsen und Spiegeln sind nun auch die Halte- und Fügelemente zum Befestigen der Mikrolinsen vorhanden. Zum Befestigen der MOB mit der EOP gibt es Klebblöcke und zur passiven Ausrichtung beider Mikromodule sind ringartige Klemmstrukturen vorhanden. Die Spiegelemente und Klemmstrukturen haben eine Mindestwanddicke für die notwendige Stabilität im Prägeprozess. Die Strukturen, die als Spiegel dienen, sind freistehend innerhalb der MOB, um Strukturverzüge gering

zu halten. Alle Strukturelemente sind aus Polymer und als Substratmaterial wird ein Silizium - Chip verwendet. Die MOB wird komplett metallisch oder dielektrisch beschichtet, so dass die Seitenwände als Spiegel wirken können.

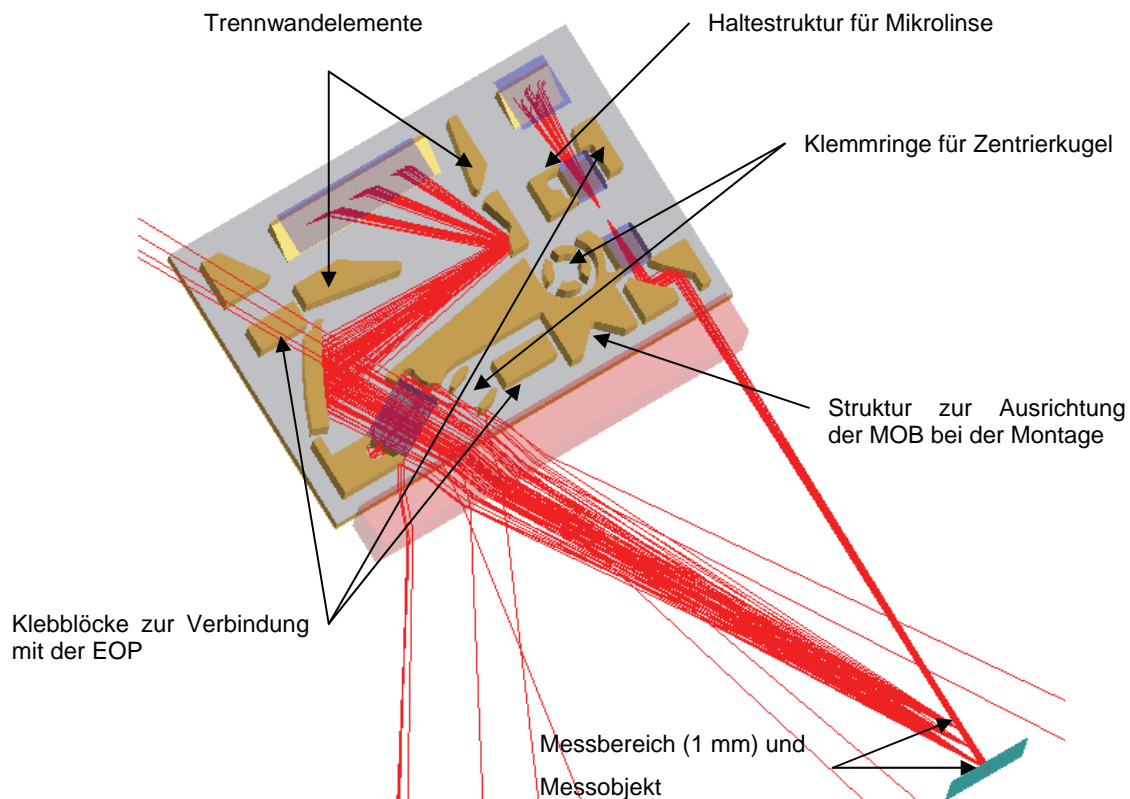


Bild 2-11: Volumenmodell der MOB, Sensor Typ 1 mit simuliertem Strahlverlauf. Die Strukturelemente sind aus Polymer, metallisch oder dielektrisch verspiegelt. Als Substrat ist Silizium vorgesehen. Abmessungen L x B = 6.3 x 9.5 mm<sup>2</sup>. Einige spezielle Halte- u. Fügestrukturen in der MOB sind benannt.

Nachdem das fertige Volumenmodell der MOB als Datensatz aus dem 3D-CAD in das Ray-Trace-Programm reimportiert wurde, kann die Simulation von Strahlverläufen jetzt mit allen Strukturelementen in ihrer Endgestaltung erfolgen (siehe Bild 2-11). Vom Messobjekt aus (im Bild 2-11, rechts unten) sind von drei unterschiedlichen Positionen des Messbereichs jeweils die Rückstreustrahlen bis zum Detektor berechnet und eingezeichnet, um zu veranschaulichen, wie sich die Abbildungen der Spots am PSD in Abhängigkeit von einer Objektverschiebung verlagern.

Aus der Modellierung der MOB leitet sich direkt die Gestaltung der elektrooptischen Platine (EOP) ab. Das Ergebnis ist als Volumenmodell im Bild 2-12 dargestellt. Die längere Trägerplatine ist aus Keramik in der Abmessung L x B = 18 x 10 mm<sup>2</sup> mit Leiterbahnen und Steckerkontakten am Ende. Im vorderen Teil ist ein Silizium - Chip mit den Maßen L x B = 5 x 9.9 mm<sup>2</sup> aufgesetzt. Dieser trägt den Aufbau der Laserdiode und die notwendigen, elektrischen Zuleitungen. Am äußeren Rand des Si-Chips befinden sich drei größere Ätzgruben, die zur Aufnahme von Kleber zur Verbindung beider Mikromodule dienen. Zwei weitere, kleinere Ätzgruben sind zur Aufnahme und zum Einkleben von Zentrierkugeln vorgesehen (s. a. Bild 2-10). Mit Hilfe der fixierten Zentrierkugeln erfolgt die spätere passive Justierung der zwei

Mikromodule in einer Art „flip-chip“-Verbindung, bei der die MOB passgenau in einer „up side down“ Position über der EOP positioniert und fixiert wird.

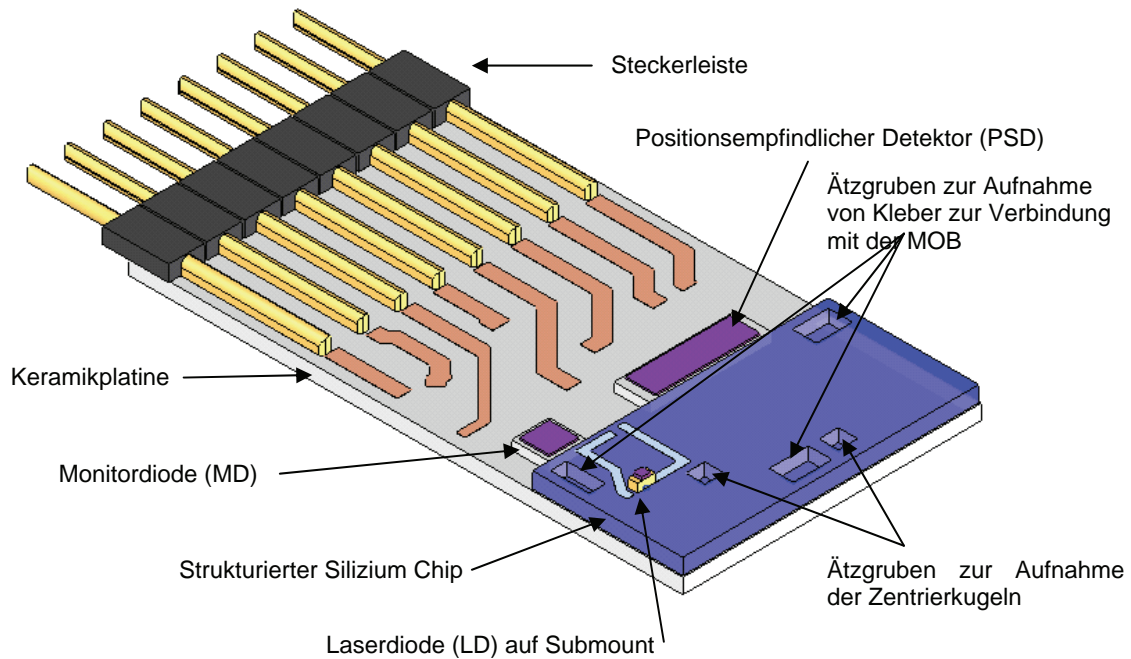


Bild 2-12: Volumenmodell der EOP. Eine Keramikplatte  $L \times B = 18 \times 10 \text{ mm}^2$  trägt in Front einen Silizium - Chip  $L \times B = 5 \times 9.9 \text{ mm}^2$  mit der Laserdiode. Zur passiven Justierung und Fixierung mit der MOB werden positionsgenaue Gruben in den Si - Chip geätzt. Die Detektoren befinden sich hinter dem Si-Chip auf der Keramik.

## 2.7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse für ein fertigungsgerechtes Design mikrooptischer Abstandssensoren sind in Bild 2-11, Bild 2-12 und Bild 2-13 dargestellt. Die elektrooptische Platine in Bild 12 ist bis auf die seitliche Platzierung des positionsempfindlichen Detektors (PSD) für zwei entwickelte Sensortypen identisch. Die Einzelstrukturen der mikrooptischen Bänke für den Sensor Typ 1 und Typ 2 (siehe Bild 2-13) sind vom Design her sehr ähnlich, obwohl sie für unterschiedliche Messbereiche von 1 mm und 10 mm mit dem jeweiligen Grundabstand von 10 mm und 20 mm ausgelegt sind. Der Sende- und der Empfangsstrahlengang unterscheiden sich nur durch die Krümmungen der Mikrozyylinderlinsen (im Bild 2-13 nicht enthalten) und der Spiegel sowie durch ihre horizontalen Richtungswinkel zur optischen Achse. Das deutlichste Unterscheidungsmerkmal ist die Position des  $45^\circ$ -Auskoppelspiegels: Sie ist beim Sensor Typ 2 etwa um 1 mm nach rechts versetzt. Die Grundfunktion beider Triangulationssensoren konnte durch die Ray-Trace-Simulation (siehe Bild 2-11) auf die Spezifikationsanforderungen angepasst und optimiert werden.

Nach Abschluss der Arbeiten am fertigungsgerechten Design dienen Layout-Zeichnungen als Vorlagen für die Herstellung von lithografischen Masken für jeden Sensortyp und die benötigten Mikrolinsen. Die Mikrostrukturen der Sensoren lassen sich innerhalb des Maskenfensters von  $60 \times 20 \text{ mm}^2$  jeweils bis zu 16 mal und die Mikrolinsen bis 560 mal gruppieren.

Nach der Realisierung und Charakterisierung von Prototypensensoren in einer Kleinserie ist ein Redesign für weitere Verbesserungen an den Mikrostrukturelementen geplant, um Fehllicheinflüsse zu minimieren und die Funktionalität der mikrooptischen Sensoren zu optimieren.

Die großen Freiheiten beim Konstruieren mit Kunststoff erlauben es, die fertigungsgerechten Designvorgaben der Optik und der Montagetechnik problemlos umzusetzen. In nur wenigen Fällen müssen Kompromisse eingegangen werden, um eine ausreichende Prozesssicherheit als Voraussetzung für eine stabile Fertigungstechnik zu gewährleisten. Dafür gelingt es allerdings auch in gewissem Maße, Ausgleichsflächen die der Heißprägeprozess erfordert mit mechanischen Stabilisierungsfunktionen zu kombinieren oder als optische Abschirmungen zu nutzen.

Insgesamt konnte durch die den eigenen Entwicklungsbereich übergreifende Layoutgestaltung in der Konstruktionsphase ein Design erstellt werden, das alle Anforderungen erfüllt und sich problemlos im Heißprägeprozess abformen lässt.

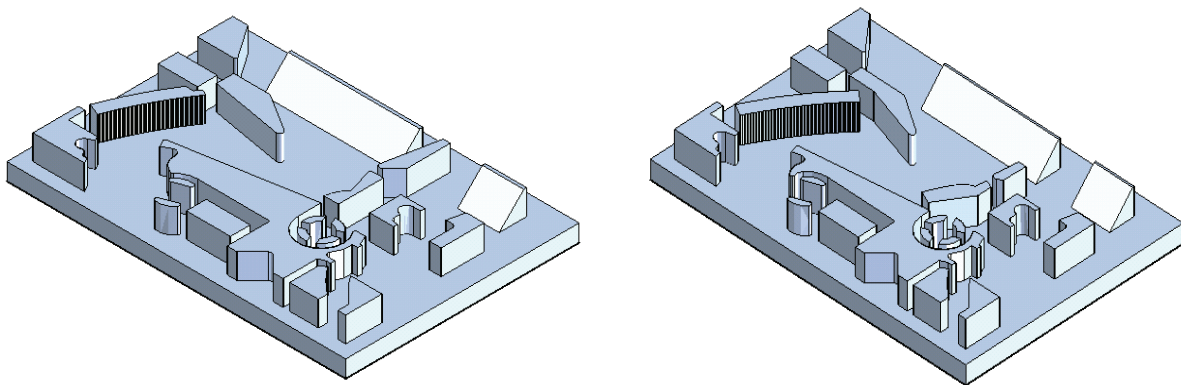


Bild 2-13: Ergebnis des fertigungsgerechten Designs zweier mikrooptische Bänke für unterschiedliche Abstandssensoren. Links: Typ 1 mit 1 mm Messbereich bei einem Grundabstand von 10 mm. Rechts: Typ 2 mit 10 mm Messbereich bei einem Grundabstand von 20 mm. Der Unterschied der optischen Funktionalität ist nur in den Spiegel- und Linsenkrümmungen enthalten. Die Mikrolinsen sind nicht eingezeichnet.

## 2.8 Veröffentlichungen

- [1] J. Mohr, "LIGA – A technology for fabrication microstructures and microsystems", *Sensors Mater.*, Vol. 10, pp. 363-373, 1998.
- [2] U. Hollenbach, P. Krippner, J. Mohr, T. Oka, U. Wallrabe, "A Modular Fabrication Concept for EOSS is demonstrated by a Micro Optical Distance Sensor", *Proc. Of OPTO Conf.*, pp 35 40, Erfurt, May 2002.
- [3] J. Mohr, A. Last, U. Hollenbach, T. Oka, U. Wallrabe, "A Modular Fabrication Concept for Microoptical Systems", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 3, March 2003.
- [4] I. Sieber, A. Hofmann, U. Hollenbach, "Application of the Microoptical Construction Kit to a Microoptical Distance Sensor", *Proc. of MICRO.tec 2003 Conf.*, pp. 381-386, October 13-15, Munich, 2003.
- [5] U. Hollenbach, J. Mohr, T. Oka, U. Wallrabe, I. Sieber, "Novel design and prototyping of a micro optical distance sensor considering a distributed fabrication", *Proc. of SPIE*, Vol. 5459, April 2004.

- [6] U. Hollenbach, „Fertigungsgerechtes Design für einen mikrooptischen Abstandssensor“, Ergebnispräsentation, BMBF Verbundprojekt MikroFEMOS, Messe Sinsheim, 23.09.2004.
- [7] U. Hollenbach, J. Mohr, T. Stautmeister, “Micro Optical Distance Sensor – Actual Results from Prototypes”, Proc. of SENSOR 2005 Conf., Vol. I, pp. 79-84, May 2005.
- [8] M. Worgull, M. Heckeke, W.K. Schomburg, “Analysis of the micro hot embossing process“, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 6922
- [9] M. Worgull, M. Heckeke, “New aspects of simulation in hot embossing“, Microsystem Technologies 10 (2004) 432-437

### 3 Heißpräganlage für Mikrostrukturen

Herzinger, S.

#### 3.1 Die genaueste 100 Tonnen Presse der Welt

Mit der ersten industriell nutzbaren Heißprägemaschine für Mikrostrukturfertigung lassen sich Standardkunststoffe aber auch Hochleistungspolymere in Formen pressen, deren kleinste Strukturen nur mehr eine Größe im 1/1000 mm-Bereich haben. Damit kann diese neue Maschine im wahrsten Sinn des Wortes Kunststoffteile mit – beidseitig – haarfeinen Strukturen (ein menschliches Haar hat etwa 100/1000 mm Durchmesser) fertigen.

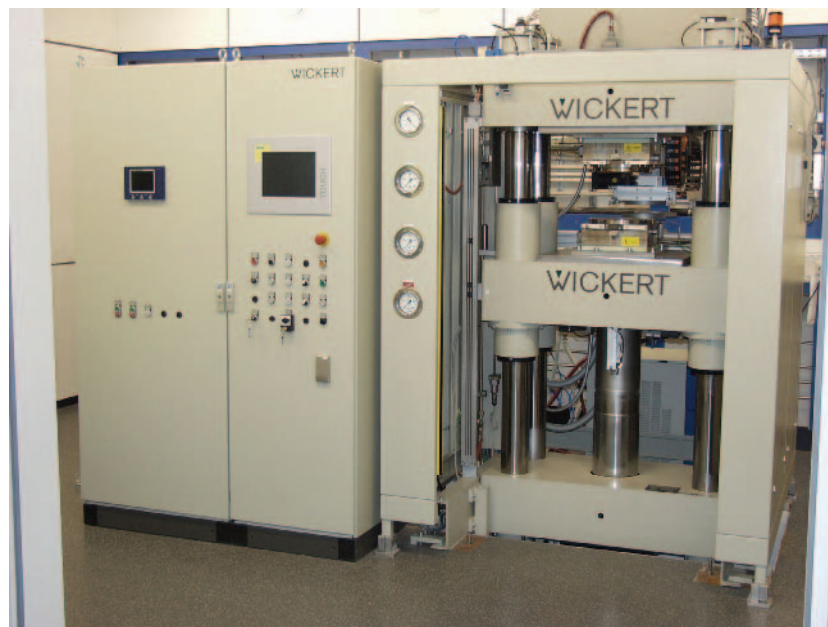


Bild 3-1: Heißprägemaschine

Die geringen Strukturabmessungen stellen in Verbindung mit großen Aspektverhältnissen, d.h. dem Verhältnis von Strukturhöhen zu Wanddicken, enorm hohe Anforderungen an den Prägeprozess. So messen z.B. die planparallelen Strukturwände einige Mikrometer, die lateralen Steg- und Grabenstrukturen ebenso nur mehr wenige Mikrometer Breite. Nicht nur das Prägen selbst, auch das automatische Einlegen des Formteils sowie die Entformung des gefertigten Teils stellen eine Herausforderung uns dar.

Diese innovative Heißprägemaschine wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts mit dem im Bereich der Heißprägetechnik führenden Institut für Mikrostrukturtechnik am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt. Ziel der im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Bildung geförderten Projekts war die wirtschaftliche Herstellung mikrooptischer Sensoren. Mit zu entwickeln war die dafür notwendige modulare Fertigungs-, Montage- und Automatisierungstechnik.

Weitere Partner in diesem Projekt sind IEF Werner für die Handhabungs- und Montagetechnik, Boehringer Ingelheim microParts als Produktionsbetrieb für mikrotechnische Teile und Micro Optronics als Sensoren-Hersteller.

### **3.2 Vorteile gegenüber der Spritztechnik**

Die Kunststoffabformung durch Heißprägen hat sich in den letzten Jahren im Bereich der Mikrosystemtechnik etabliert und sich gerade bei kleinsten Strukturdetails als Alternative zum klassischen Spritzgießen präsentieren können. In langjähriger Entwicklungsarbeit konnte in den Forschungslabors in Karlsruhe an einer Vielzahl von Kunststoffkomponenten demonstriert werden, dass die im Gegensatz zum Spritzgießen wesentlich geringeren Fließgeschwindigkeiten des Polymers sich in günstigen Bauteileigenschaften widerspiegeln. Besonders eignet sich der Einsatz des Heißprägeverfahrens, wenn mikrometergenaue Details über große Flächen gefordert sind. Denn während beim Spritzgießen der plastifizierte Kunststoff in die Form eingespritzt wird, erfolgt beim Heißprägen das Einpressen einer mikrostrukturierten Form in plastifizierten Kunststoff oder in eine Kunststoff-Folie.

### **3.3 Vom Labormaßstab zur industriellen Fertigung**

Die Heißprägetechnik war bislang im Bereich der Mikrofertigung auf den Labormaßstab und die Fertigung im Manufakturbetrieb beschränkt. Auch bei den Anfängen dieses Fertigungsverfahrens waren wir schon dabei. Bereits im Jahr 1999 konnte der Fachöffentlichkeit eine erste „Labor“-Heißprägemaschine vorgestellt werden. Um zum industriellen, wirtschaftlichen Fertigungsprozess zu gelangen, waren vier wichtige Schritte zu tun:

- Vergrößerung der Prägekraft gegenüber der Labormaschine von 200 auf 1000 kN.
- Die Prägefläche wurde von 200 mm Durchmesser für den Strukturbereich (8“) verfunffacht. Damit sind jetzt pro Prägezyklus 5 x mehr Teile zu fertigen als mit der Labormaschine des Jahres 1999.
- Durch das automatische Einlegen und Entnehmen per Handhabungsgerät entsteht ein zusätzlicher Produktivitätsgewinn. Außerdem ist die Vorschubbewegung der Schließeinheit bis zu 4 x schneller als im „Labor-Muster“.
- Die Entwicklung eines neuen Werkzeugkonzepts, das die thermischen Massen reduziert, ohne die für den Prägeprozess benötigte mechanische Stabilität zu gefährden. Wichtiger Nebennutzen: die Verkürzung der Zykluszeit im Vergleich zur Labormaschine um mehr als die Hälfte.

Die in 4-Säulen-Vertikalbauweise ausgeführte Prägemaschine besteht aus folgenden Komponenten:

#### **3.3.1 Presse**

Die servohydraulische Presse nimmt gleichförmige, absolut versatzfreie Bewegungsabläufe vor. Öffnen und Schließen der Vakuum-Presskammer sowie Prägehub sind kraft- und positionsgeregelt. Die Bewegungsgeschwindigkeiten betragen 500 bis 1000 mm/min für das Öffnen und Schließen. Um höchste Produktqualität zu sichern,



beträgt die stufenlos einstellbare Verfahrensgeschwindigkeit des Präge- und Entformhubs nur mehr 0,001 bis 0,5 mm/s. 1 mm Weg in ca. 17 Minuten, - dagegen ist Zeitlupe schon Intercity-Tempo.

Diese Vorschubgeschwindigkeit kann mit einer Genauigkeit von 0,001 mm/s geregelt werden. Damit wird eine maximale Prägekraft von 100 Tonnen mit einer Genauigkeit von  $\pm 7$  kg erreicht. Die Positionierung erfolgt auf  $+0,5 \mu\text{m}$  genau oder so, dass man ein Haar 100 mal spalten müsste. Nach dem Zufahren der Schließeinheit erfolgt innerhalb von 10 s das Antasten der Kunststoffoberfläche (Vorpresen) – auch wieder aus Gründen der Produktqualität – mit der geringen Kraft von  $+0,007$  kN.



Bild 3-2: Präzise Säulenführung

### 3.3.2 Werkzeugaufnahme mit Positioniereinheit

Gleichsam als Schnittstelle zwischen Maschine und Werkzeug bietet sie verschiedene Aufspannmöglichkeiten für unterschiedliche Werkzeuge, sowie die Anschlüsse für Sensorik und Heizung bzw. Kühlung. Die Positioniereinheit richtet die Werkzeughälften mit einer Genauigkeit von  $+5 \mu\text{m}$  bei einem Verstellweg von 5 mm aus.

### 3.3.3 Vakuumkammer

Zur sicheren Evakuierung der Kavität musste das Werkzeug mit einer Dichtung ausgerüstet werden, die einen Prägehub von bis zu 3 mm überbrücken kann. Die Kammer ist einfach an unterschiedlich große Formeinsätze anpassbar. Sie besitzt das kleinstmögliche Volumen, um eine Evakuierzeit  $<1,5$  s zu erreichen. Je nach Fertigungsaufgabe werden 1,0 – 1,5 s Evakuierzeit erreicht.

### 3.3.4 Heiz- und Kühlsystem

Die Werkzeugtemperierung erfolgt oben und unten getrennt jeweils elektrisch, die Kühlung über Öl oder Wasser. Die maximale Umformtemperatur, gemessen an der Oberfläche des Formeinsatzes, erreicht 320°C, was die Verarbeitung auch von Hochleistungspolymeren wie PSU, LCP oder PEEK ermöglicht.

### 3.3.5 Steuerung

Zur Produktionsüberwachung und als Qualitätssicherungsnachweis werden Präge- und Entformkraft, Position der Druckplatte der Prägeeinheit, Werkzeug- und Kühlmittemperaturen sowie der Werkzeuginnendruck und die individuelle Lage der Werkzeughälften zueinander in direkter (nicht indirekter!) Messung erfasst und protokolliert. Überwacht werden auch die Spaltweite zwischen den Werkzeughälften, die Antriebskraft der Auswerfereinheit sowie die pneumatischen Drücke.

### 3.3.6 Intelligentes Werkzeugkonzept

Um die thermischen Massen zu verringern, wurden die Heizplatten so dünn wie nur möglich ausgelegt und durch einen Luftspalt vom kalten Werkzeugteil isoliert. Der Prägeraum ist sehr klein gehalten. Dies bietet den Vorteil, nur ein minimales Volumen in der Vakuumkammer evakuieren zu müssen. Damit konnte die für die Mikroabformung notwendige variotherme Prozessführung, die bei konventionellen Werkzeugen enorme zyklische Heiz- und Kühlleistung (und damit Kosten) verursacht, deutlich verringert werden.

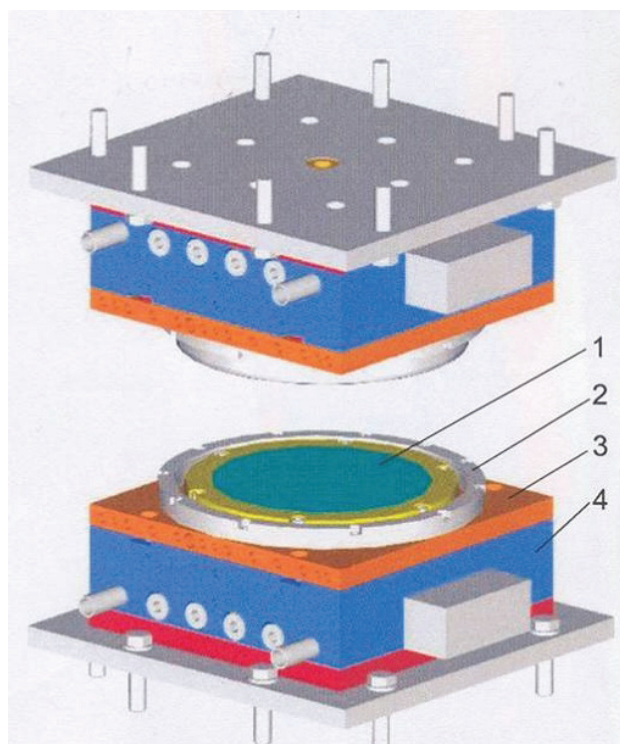


Bild 3-3: Werkzeugkonzept

### **3.4 Ausblick**

Die vorgestellte Maschine ermöglicht erstmals das wirtschaftliche Heißprägen bei mittleren Stückzahlen. Ein neuer mikrooptischer Abstandsensor wird das erste Industrieprodukt sein, das in Serie auf der weltweit genauesten 100 Tonnen Prägepresse gefertigt wird. Und dies bedeutet bei diesem Verfahren etwa 50 Presszyklen pro Schicht. Dies ergibt bei 20 Teilen je Zyklus immerhin 1000 mikrooptische Sensorenbauteile pro Schicht. Damit kann anspruchsvolle Mikrosensorik zu „marktgerechten“ Preisen bei höchster Qualität produziert werden.

Mit der neuen Hochpräzisionspresse wird ein neuer Maßstab für den Kunststoffpressenbau gesetzt: Bislang unvorstellbare Genauigkeiten für eine Maschine dieser Leistung und Größe wurden realisiert.



## 4 Heißprägen von mikrooptischen Komponenten in großen Stückzahlen

Heckele, M.; Dittrich, H.; Mehne, C.; Wissmann, M.

### 4.1 Ausgangssituation und Problemstellung

#### 4.1.1 Technologische Situation zu Projektbeginn

Die Aufgabenstellung für die Arbeitsgruppe „Kunststoffabformung“ am Institut für Mikrostrukturtechnik war die Heißprägetechnik, die sich bei der Herstellung von hochpräzisen Komponenten in der Laborumgebung bewährt hat, auch für die Fertigung größerer Stückzahlen nutzbar zu machen. Dazu sollte an drei verschiedenen Punkten angesetzt werden. Natürlich sollte über die Verkürzung der Zykluszeiten auf unter 10 Minuten ein größerer Durchsatz an Proben je Zeiteinheit erzielt werden. Mit der Vergrößerung der Prägefläche auf einen Durchmesser von 200 mm wurde aber auch die vorher maximal nutzbare Fläche vervierfacht. Ein dritter wichtiger Punkt war aber letztendlich auch die Integration in eine Fertigungsumgebung, da es sich gezeigt hatte, dass ein wesentlicher Zeitverlust in der Fertigungskette durch das Handling bei der Bestückung und beim Entnehmen bedingt wird.

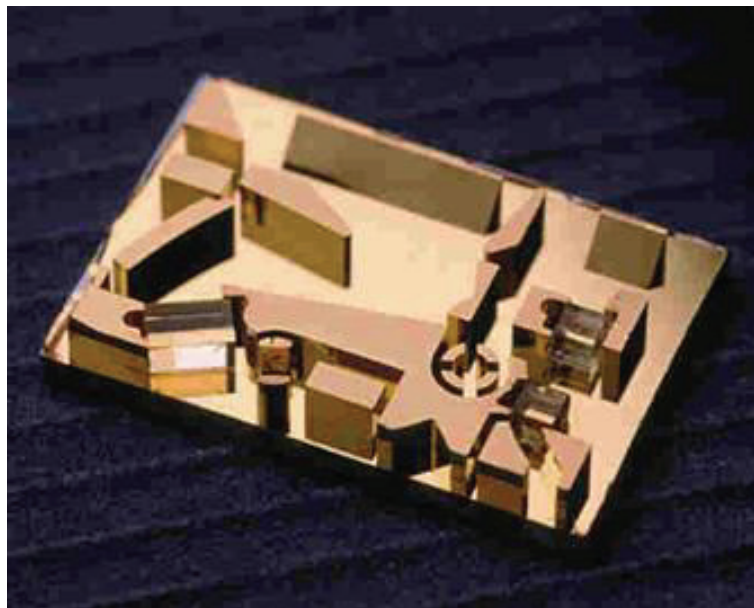


Bild 4-1: Die mikrooptische Bank: Im Volumenmodell sind deutlich die Herausforderungen an das Kunststoffbauteil wie senkrechte Seitenwände und große Strukturhöhe zu erkennen

Als Demonstrator wurde ein mikrooptisches Bauteil, die mikrooptische Bank (MOB), ausgewählt, da gerade im Bereich Mikrooptik in einem wachsenden Markt große Stückzahlen zu erwarten sind, bei denen die Anforderung an die Qualität sehr hoch sind.

#### 4.1.2 Voraussetzung für das Vorhaben

Die Voraussetzungen zu Beginn des Projektes waren außerordentlich günstig. Die Heißprägetechnik hatte sich in den letzten Jahren sehr schnell entwickelt und Eingang in eine Vielzahl von Labors gefunden. Der Wissenstand in diesem Bereich der Kunststoffreplikation war so hoch entwickelt, dass einfache Abformungen auf einem einfachen, selbstgebauten Laborgerät, immer weniger nachgefragt waren, sondern Replikationen möglichst hoher Güte, gefertigt mit zuverlässigen Maschinen gewünscht wurden. Über die Forschung hinaus begann die Nachfrage nach fertigungstauglichen Anlagen, die nicht nur im Labormaßstab sondern auch im Fertigungsumfeld eingesetzt werden können.

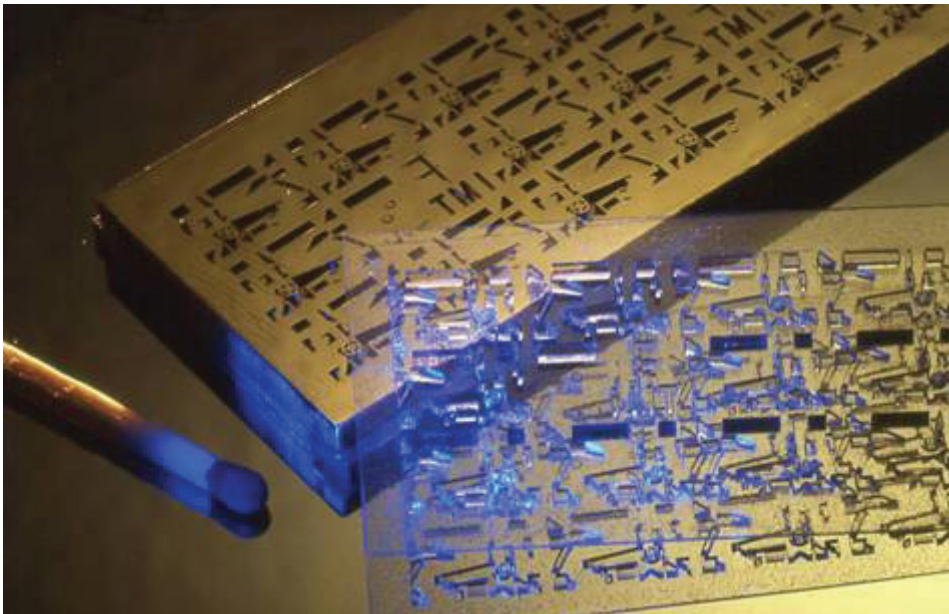


Bild 4-2: Umsetzung der Designs in einen LIGA - Formeinsatz (hinten) und realisierte Abformung (vorne). 750 µm tiefe Mikrostrukturen im Nickel müssen im Heißprägeschritt komplett befüllt werden.

Bei der Abformung von mikrooptischen Komponenten unterschiedlicher Funktionsweisen bestanden am IMT bereits vielfältige Erfahrungen. So konnte auf verschiedenen Anlagen erfolgreich Bauteile wie Mikrolinsen und Strahlteiler im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte repliziert werden. Mikrospektrometer im UV-VIS Bereich wurden sogar in einer Kleinserie von über 5.000 Einheiten gefertigt. Dies geschah allerdings noch in einer Art optimierter Laborfertigung [1].

Durch diese langjährige Entwicklungsarbeit sowohl in der Anlagentechnik als auch in der Prägeprozesstechnik war ausreichend Know-how vorhanden, um sich der Aufgabe zu stellen Anlagen und Prozesstechnik in eine Fertigungsprozesskette zu integrieren. Die kurzen Wege und die enge Zusammenarbeit zwischen der Arbeitsgruppe „Mikrooptik“, die für das Demonstratordesign verantwortlich zeichnete und der Arbeitsgruppe „Handhabungstechnik“, die sich mit der Montagetechnik und dem Gesamtprozess beschäftigte, war eine Voraussetzung für die Realisierung eines durchgehenden Gesamtkonzepts.

### 4.1.3 Vorarbeiten

Als das Projekt im Frühjahr 2002 geplant wurde, zeigte sich im wissenschaftlichen Bereich der Kunststoffprägetechniken im Mikrobereich eine deutliche Aufspaltung der Aktivitäten. Im klassischen Bereich des Mikrovakuumheißprägens orientierte man sich zu höheren Aspektverhältnissen sowie zu Sonderverfahren wie Prägen mit Löchern. Außerdem begann man mit der Ausweitung der Materialpalette, sowie Arbeiten bei denen verschiedene Materialkombinationen (Kunststoff-Kunststoff aber auch Kunststoff-Metall) eingesetzt werden. Auf der anderen Seite entwickelten Forschergruppen, die eher aus der Siliziumstrukturierung kamen, das sogenannten Nanoimprint- oder Nanolithographieverfahren, bei dem großflächig dünnste Schichten mit Strukturen im Bereich weniger Nanometer versehen werden.

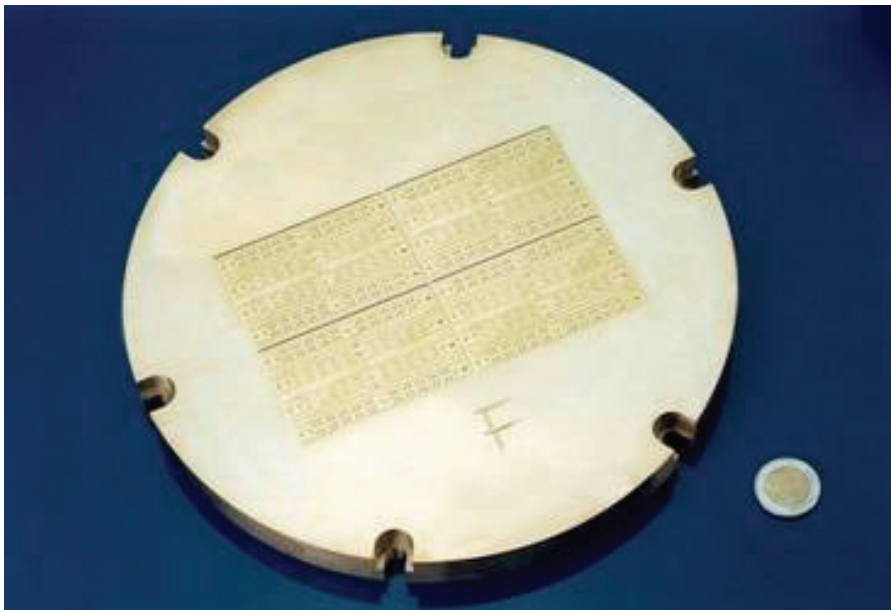


Bild 4-3: Ein mikromechanisch strukturierter Formeinsatz aus Messing mit 200 mm Durchmesser. Mit wachsender Größe werden auch monolithische Formeinsätze immer schwieriger zu fertigen.

Entsprechend der Reife dieser beiden Trends stellte sich auch der technische Stand dar [2]. Beim Mikroheißprägen konnte man auf eine ziemlich ausgefeilte und stabile Labortechnik zurückgreifen, während bei den Nanoimprintverfahren noch an vielen verschiedenen alternativen Methoden entwickelt wurde.

Am Institut für Mikrostrukturtechnik standen vor Projektstart zwei Heißprägemaschinen für die Laborfertigung sowie zwei für die Mikrofertigung im Kleinserienbereich eingesetzte Anlagen der ersten Generation zur Verfügung. Im Nanoimprintbereich engagierten sich mehrere Firmen aus der Siliziumwafertechnologie beim Bau von modifizierten Bondinganlagen als Imprintmaschinen, die dem Stand der Technik entsprechend, auf einen Durchmesser von 200 mm ausgelegt waren und sich an Schnittstellen der Halbleiterfertigung orientierten.

### 4.1.4 Prozessuntersuchungen

Ein wesentliches Ziel des Gesamtvorhabens war die Demonstration einer durchgängigen Fertigungskette. Für die Heißprägegruppe ergaben sich daraus Zusammenarbeiten mit verschiedenen Arbeitsgruppen.

Mitwirkung beim Erstellen des **Layouts** für die mikrooptische Bank unter Aspekten der Abformbarkeit. Zusammen mit den Optikern und den Montagespezialisten wurde das ursprünglich für die Direktlithographie entwickelte Layout geändert. Um die Abformtauglichkeit eines Formeinsatzes zu verbessern wurden einige Stege bzw. Gräben insbesondere im Bereich der Justierkugelhalterung verbreitert, da mit der Abformung nicht die extremen Aspektverhältnisse realisiert werden können, die in der Röntgentiefenlithographie erzielt werden. Darüber hinaus erfolgte eine Reduzierung großflächiger Stütz- und Haltestrukturen, da beim Abformprozess solche Bereiche ein negatives Verhalten bezüglich Schwindung und Einfallstellen aufweisen (vgl. Kap. 2).



Bild 4-4: Ein parallel entwickeltes Forschungswerkzeug für justierte beidseitige Abformung mit integrierten Auswerfern. Dieses Werkzeug kann durch den modularen Aufbau der neuen Prägemaschine auch in die Wickert WMP1000 eingebaut werden.

**Anlagenbau:** Mit dem Industriepartner Wickert Maschinenbau GmbH und dessen Kompetenz im Bau hydraulischer Pressen wurde ein gemeinsames Lastenheft für den Bau einer Heißpräganlage abgestimmt. Das Institut für Mikrostrukturtechnik brachte hier in der ersten Phase sein gesamtes Know-how im Bereich Mikroheißprägen und Heißprägemaschinenbau mit ein. Durch das, wegen der benötigten hohen Prägekräfte von bis zu 1000 kN bedingte, neue Konzept einer hydraulischen Maschine mit kleinen Antast- und Vorprägekräften war die Modifikation einiger bisher eingesetzter Konstruktionsmerkmale und Betriebsarten erforderlich [3]. Die aufwendige und teure Anlagentechnik erforderte eine genaue Abstimmung und mehrmalige Anpassung des Lastenheftes (vgl. Kap. 3).

**Werkzeugbau:** Während beim Anlagenbau die Verantwortung für die Konstruktion auf Seiten des Industriepartners lag, kümmerte sich das Institut für Mikrostrukturtechnik um die Konstruktion des Basiswerkzeugs.

Durch die Festlegung des Lastenheftes für die Prägemaschine ergaben sich auch die Randbedingungen für das Werkzeug. Neben dem Basiswerkzeug wurde im Rahmen



einer schon bei Projektbeginn gestarteten Dissertation ein weiteres, sehr viel aufwendigeres Werkzeug gebaut [4]. Die Auslegung der Anlage und des Basiswerkzeuges wurden so konzipiert, dass sich ein Maximum an Überlapp ergab und das zweite Werkzeug auch an der neuen Anlage eingesetzt werden kann. Das Problem lag weniger in der mechanischen Anpassung, als in der Integration der Werkzeugsteuerung in die Anlagensteuerung (vgl. Kap. 3)

**Handhabungstechnik:** Ein wesentlicher Aspekt einer durchgehenden Fertigungskette ist die Handhabungstechnik. Hier galt es auch den Heißprägeprozess zu integrieren. Bei der Definition der Schnittstelle galt es hier abzuwägen welche Funktionen im Werkzeug integriert sein müssen, und welche Aufgaben in einen Nacharbeitungsschritt verlagert werden können.

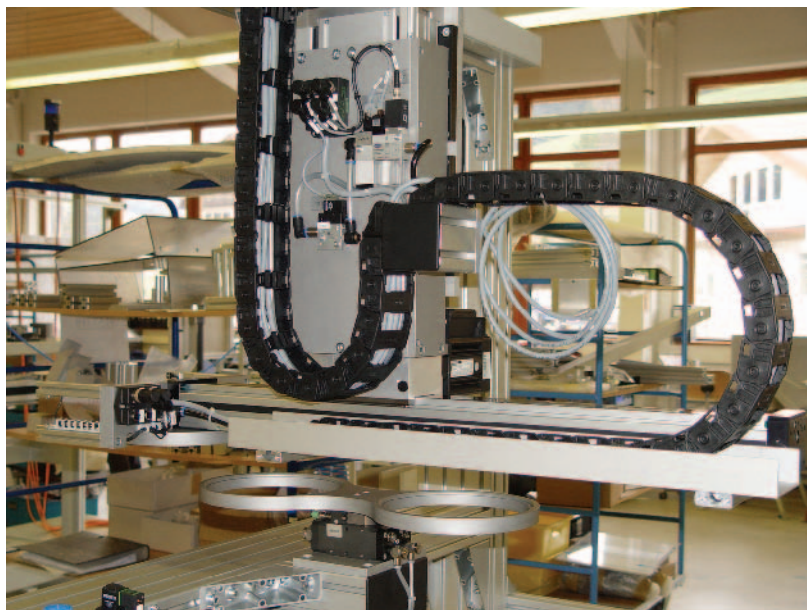


Bild 4-5: Das Handlinggerät (IEF Werner) kurz vor dem Einbau in die Anlage: Automatische Bestückung und Entnahme sind unerlässliche Voraussetzung für die Integration der Heißprägeanlage in eine Fertigungsumgebung.

Hier fiel die Entscheidung, auch wegen der auf einen Wafer geprägten mikrooptischen Bank, auf ein substratorientiertes System, bei dem entweder ein Substrat (Wafer, Keramikplatte, ..) mit darauf geprägten Mikrostrukturen oder auf dicker Rest bzw. Trägerschicht geprägte Mikrostrukturen entnommen werden.

**Prägeprozess:** Mit der Entwicklung des Heißprägeprozesses für großflächige Formate und kurze Zykluszeiten konnte wegen des Modulcharakters der Werkzeuge schon vor Fertigstellung der Heißprägeanlage begonnen werden. Insbesondere Vorversuche zur Stabilität von Wafern beim Heißprägen in Kombination mit LIGA - Formeinsätzen.

## 4.2 Ergebnisse

Für den Bereich der Abformung können folgende Ergebnisse des Projektes erwähnt werden:

**Anlagenentwicklung:** Die in Zusammenarbeit mit der Fa. Wickert Maschinenbau GmbH entwickelte Anlage wurde aufgebaut und steht funktionstüchtig am Institut für Mikrostrukturtechnik.

**Werkzeugentwicklung:** Beim Basiswerkzeug wurde mit dem variablen Isolierspalt ein Neuansatz in der Werkzeugtechnik umgesetzt, der die Voraussetzung für kurze Zykluszeiten schafft. Die offene Konstruktion des Basiswerkzeugs erlaubt auch eine Kombination mit einem Handlingsystem.

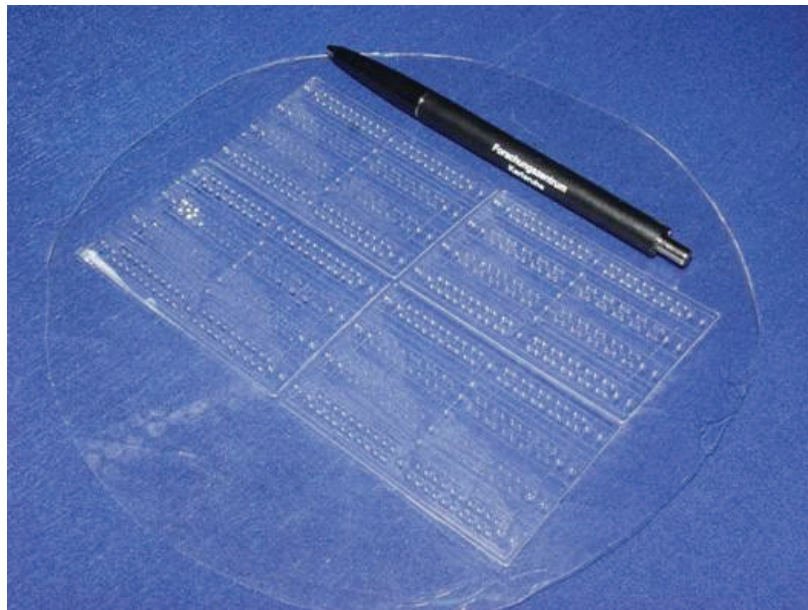


Bild 4-6: Abgeformte PMMA Struktur mit 200 mm Durchmesser. Mit 160 Flussensorgehäusen pro Nutzen erreicht man Größenordnungen, die auch wirtschaftlich interessant sind.

**Anlagensteuerung und Handlingkonzept:** Die Steuerung über das Simatic System hat sich als integrierender Faktor bewährt. Die Einbindung der Steuerung des Handlingsystems und die Werkzeugsteuerung für das am IMT entwickelte Werkzeug funktioniert. Bei der Kundendemonstration überzeugt dieses Steuerungskonzept besonders Neueinsteiger in die Mikroheißprägetechnik und hilft Schwellenängste zu überwinden.

**Kurze Zykluszeiten:** Auf dem Basiswerkzeug konnten bei der Vorabnahme bereits Zykluszeiten von 6 Minuten beim Prägen von PMMA erreicht werden. Damit liegt man unter dem angestrebten Ziel von 10 Minuten.

**Großformatige Abformung:** Die erwähnte Zykluszeit wurde mit einem mikromechanisch gefertigten Formeinsatz erzielt, auf dessen strukturierter Fläche (200 mm Durchmesser) sich 160 Mikrostrukturen für die Abformung von Flussensorgehäusen befinden.

Abformung der **mikrooptischen Bank:** Mit einer Strukturhöhe von 750µm stellt die mikrooptische Bank die bislang höchste am Institut für Mikrostrukturtechnik abgeformte LIGA - Mikrostruktur dar. Der Formeinsatz wurde mit verschiedenen

Materialien auf Siliziumwafern abgeformt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl PMMA als auch PC sich gut verarbeiten lassen. Besonders interessant ist, dass auch rußgefülltes schwarzes PC zu guten Abformergebnissen führt.



Bild 4-7: Erst die Abformung auf Siliziumwafern mit geringem thermischen Ausdehnungskoeffizienten erlauben den Einsatz der MOB aus Kunststoff in der Praxis. Die Abformung erfolgte in Polycarbonat (schwarz)

Die Abformung auf einem Siliziumsubstrat ist problemlos möglich, auch wenn wegen der Anforderung eines möglichst geringen thermischen Einflusses die Restschicht auf einen minimalen Wert reduziert werden muss. Restschichten im Bereich zwischen  $50\mu\text{m}$  und  $100\mu\text{m}$  sollten ausreichen. Für die Vereinzelung sind je nach Material aber dünnere Werte wünschenswert.

### 4.3 Ausblick

Die Verwertung der neu entwickelten Prägetechnik auf großen Formaten ist eng mit der neu konzipierten Anlagen- und Werkzeugtechnik verbunden. Mit der Verfügbarkeit einer Anlage in diesen Dimensionen, ist das Tor zur industriellen Verwertbarkeit jedoch aufgestoßen. Die Konzeption der Anlage wurde so angelegt, dass auf möglichst viele Standardelemente des Pressenbaus zurückgegriffen werden konnte. Beim Design wurde drauf geachtet, dass ein Anwender trotz der innovativen Mikroheißprägetechnik den Eindruck hat, mit einer ihm weitgehend vertrauten Anlage zu arbeiten. Damit können Berührungsängste gegenüber einer Technik reduziert werden, die bislang in der Fertigung noch wenig bekannt ist.



Bild 4-8: Abgeformte mikrooptische Bank, abgeformt in PMMA. Detailaufnahme.

Mit dem Bau eines Prototyps und der Aufstellung der Maschine am IMT besteht die Möglichkeit diese Technik potentiellen Anwendern auch direkt zu vorzuführen. Die enge Anbindung an die Optikgruppe erlaubt es bei Kundenanfragen für eine Komponentenentwicklung schon frühzeitig mögliche Fertigungsstrategien zu berücksichtigen und großformatiges Prägen als Alternative zu prüfen.

Die Möglichkeit großformatige Abformungen anzubieten hat zu mehreren Kontakten aus dem Bereich der polymeren Mikrooptik (EU-Projekte Polymicro, NEMO) geführt.

- [1] M. Heckeke, W. Bacher, T. Hanemann, H. Ulrich, "Hot Embossing and Injection Molding for Microoptical Components", SPIE Conference, San Diego 1997
- [2] M. Heckeke, W.K.Schomburg, "Review on Micro Molding of Thermoplastic Polymers", Journal of Micromechanics and Microengineering", 14(2004) R1-R14
- [3] H. Dittrich, C. Mehne, M. Heckeke; "Double Sided Large Area Hot Embossing for Polymer Microstructures with High Aspect Ratios" HARMST 2005, Book of Abstracts (2005) 226-227
- [4] H. Dittrich, M. Heckeke, W.K. Schomburg, "Tool Development for Hot Embossing of Double-sided Microstructured Molded Parts", Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 7058

## 5 Montagekonzept für einen mikrooptischen Abstandssensor

Hofmann, A.; Gengenbach, U.; Scharnowell, R.; Skupin H.

### 5.1 Montage von Mikrosystemen mit niedrigen Stückzahlen

Die Montage von Mikrosystemen ist gekennzeichnet von einer enormen Vielfalt der zu fertigenden Systeme mit Komponenten unterschiedlichster mechanischer Eigenschaften und Stückzahlen. Dies umfasst beispielsweise die Montage von Systemen, die in geringsten Stückzahlen pro Jahr z.B. in Großgeräten der Medizintechnik zum Einsatz kommen, aber auch die Fertigung von Sensoren, die millionenfach im Bereich Automotive benötigt werden. Diese Spreizung der Jahresproduktion der gefertigten Stückzahlen umfasst somit die manuelle bzw. halbautomatisierte Montage von wenigen hundert bis zu mehreren tausend Stück pro Jahr bis zur vollautomatischen Fertigung eines Produkts in großen Stückzahlen.

Bei der Projektierung einer Fertigung stellt sich demnach von Beginn an die Frage nach den zu erwartenden Stückzahlen. Die Steigerung der Produktion bei einer Manufakturfertigung, die hauptsächlich auf manuelle Montage bzw. teilautomatisierte Montageschritte ausgelegt wurde, ist nur eingeschränkt möglich. Insbesondere eine Produktionsrate im Bereich von mehreren 100000 ST/a ist von Grund auf als automatisierte Fertigung zu projektieren. Nur hier ist eine Amortisation des Fertigungsequipments über die Produktionszeit des Produkts möglich. Im Stückzahlbereich um 10000 ST/a ist dies bei einer automatisierten Fertigung nicht immer sichergestellt. Ist eine automatisierte Fertigung/Montage des Produkts unumgänglich – Gründe hierfür sind beispielsweise Sicherheitsvorschriften, erforderliche Montagegenauigkeiten, Reinraumbedingungen, usw. – dann ist es oft schwierig, die Amortisation des Fertigungsequipments über den Produktionszeitraum des Mikrosystems sicherzustellen. Es werden die unterschiedlichsten Lösungsansätze verfolgt, dieses Problem zu lösen. Ein Hauptmerkmal dieser Strategien ist die Nutzung des Fertigungsequipments über mehrere Produktzyklen bzw. auch für unterschiedliche Produkttypen. Diese in allen Bereichen der produzierenden Industrie übliche Vorgehensweise kann jedoch in den Bereich der Montage von Mikrosystemen nicht uneingeschränkt übertragen werden. Die Montageanlagen für Mikrokomponenten sind meist spezifisch auf ein bestimmtes Produkt bzw. einen bestimmten Prozessschritt abgestimmt. Die Realisierung anderer Prozesse bzw. Prozessschritte auf der gleichen Anlage ist oft nicht möglich. Seit mehreren Jahren wird versucht, hier eine Lösung zu finden. Ein Erfolg versprechender Ansatz ist ein modularer Aufbau der Montagemaschine unter Integration von im Idealfall standardisierten Schnittstellen. Die Schnittstellen können zwischen funktionalen Modulen der Anlage aber auch zwischen den zu montierenden Produkten und der Maschine liegen. Derart modularisierte Montagesysteme können in gewissen Grenzen flexibel und schnell an andere Montageaufgaben angepasst werden. Im BMBF-Verbundprojekt MikroFEMOS soll eine derartige Montagemaschine entwickelt werden.

Die Beschreibung der Montage des mikrooptischen Abstandssensors ist Thema dieses Kapitels. Zuerst wird allgemein auf die Montage mikrooptischer Systeme eingegangen. Anschließend werden die zur Montage des Referenzprodukts erforder-

lichen Prozesse und Werkzeuge beschrieben und abschließend das realisierte Montagekonzept vorgestellt.

### **5.1.1 Strategien bei der Montage von mikrooptischen Systemen**

Bei der Montage von mikrooptischen Systemen kommen unterschiedliche Strategien zum Einsatz. Eine grobe Einteilung ergibt sich durch die Unterscheidung zwischen:

- aktiver Justage und
- passiver Justage.

Unter Justage (Justierung) wird im Qualitätswesen das „Minimieren der systematischen Messabweichungen durch Veränderung der Messeinrichtung, soweit für die vorgesehene Anwendung erforderlich“ verstanden [1]. Das Übertragen dieser Definition auf die Montage von Bauteilen führt zu einer differenzierten Betrachtung des Montageprozesses. Der Montageschritt teilt sich demnach in den Teilvorgang „Positionierung“ und den daran anschließenden Teilvorgang „Justierung“ auf. Bei der Justierung werden der Definition entsprechend „die Messabweichungen minimiert.“ Bei der aktiven Justage werden die zu montierenden Bauteile funktional betrieben und das Nutzsignal detektiert. Die zu montierenden Teile werden in die zu erwartende Position gebracht und so zueinander positioniert, dass das Signal maximiert ist. Bei Erreichen der Position mit maximalem Nutzsignal werden die Teile gefügt. Diese Vorgehensweise sichert die optimale Positionierung der zu montierenden Bauteile ist andererseits aber sehr aufwändig und nicht bei allen mikrooptischen Systemen einsetzbar. Bei der passiven Justage werden die Bauteile an die vorgesehene Position gebracht und dann fixiert. Dies ist die in den meisten Fällen eingesetzte Strategie. Die genaue Positionierung und Justierung der Bauteile zueinander wird überwiegend über entsprechend präzise Positionierachsen sichergestellt. In den meisten Fällen erfolgt die Detektion der Bauteilposition über den Einsatz von Bildverarbeitungssystemen.

### **5.1.2 Montagestrategie für den Abstandssensor**

Ziel beim Aufbau der Montageaufgabe für den Abstandssensor ist die Realisierung einer Montagestrategie mit passiver Justage. Die korrekte Positionierung der Bauteile zueinander wird über passive Anschläge erreicht. Während des Montagevorgangs werden die Bauteile gegriffen, an diese Anschläge geschoben und dabei ausgerichtet. Über eine entsprechende Gestaltung der Greifwerkzeuge bzw. eine angepasste Positionierstrategie wird eine Beschädigung der Bauteile durch diesen mechanischen Kontakt ausgeschlossen (Integration von Nachgiebigkeiten). Ziel ist es weiterhin, durch entsprechende Gestaltung der Komponenten den Einsatz eines kostspieligen Bildverarbeitungssystems zu vermeiden. Zum einen ist hierbei ein fertigungsgerechtes Design der Komponenten entscheidend. Zum anderen müssen die Bauteile in entsprechender Genauigkeit gefertigt werden. Hierauf wurde in den vorigen Kapiteln schon eingegangen. Im Folgenden werden Montageaufgaben, die Zuführung und die Handhabungsschritte für die jeweiligen Bauteile und Teilsysteme beschrieben.

## **5.2 Montageprozesse bei der Montage des Abstandssensors**

Der Abstandssensor setzt sich aus zwei Teilsystemen zusammen:

- der mikrooptischen Bank (MOB) und
- der elektronisch-optischen Platine (EOP).

Beide Teilsysteme zusammengebaut ergeben das elektronisch-optische Subsystem (EOSS). Das EOSS stellt einen funktionsfähigen ungehäuseten Sensor dar. Die Häusung und die elektrische Anbindung sind nicht Umfang dieser Arbeiten.

### Montageaufgaben bei der Montage des Abstandssensors

Die Montage des EOSS lässt sich in drei Montageaufgaben unterteilen (s. Bild 5-1):

- Aufgabe 1: Montage der Zylinderlinsen in die mikrooptische Bank
- Aufgabe 2: Montage der Justierkugeln in die elektronisch-optische Platine
- Aufgabe 3: Zusammenbau der MOB und der EOP zum elektronisch-optischen Subsystem

Montageaufgaben:

- Montage von Zylinderlinsen in eine mikrooptische Bank
- Montage von Zentrierkugeln in eine elektronisch-optische Platine
- Zusammenbau von mikrooptischer Bank und elektronisch-optischer Platine

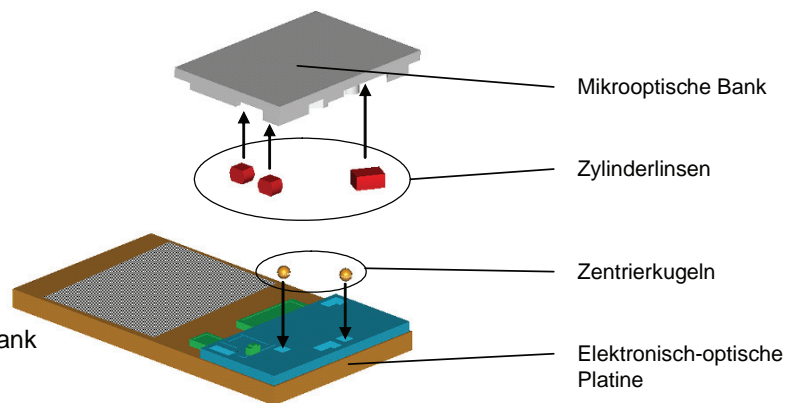


Bild 5-1: Montageaufgaben im Rahmen des Projekts MikroFEMOS

Auf Grund der zu Beginn der Produktion zu erwartenden geringen Stückzahlen (<10000 ST/a) wird angestrebt, alle Montageaufgaben sequenziell auf einer Maschine zu bearbeiten und die Maschine zur Bearbeitung der einzelnen Aufgaben umzurüsten. Dies erfordert eine flexible Konzeption der Materialzuführung und der eingesetzten Werkzeuge.

#### 5.2.1 Montage der Zylinderlinsen in die mikrooptische Bank

Der Aufbau des Sensors ist in Kapitel 2 bzw. in [2] ausführlich beschrieben. Die mikrooptische Bank muss mit drei quaderförmigen Zylinderlinsen bestückt werden.

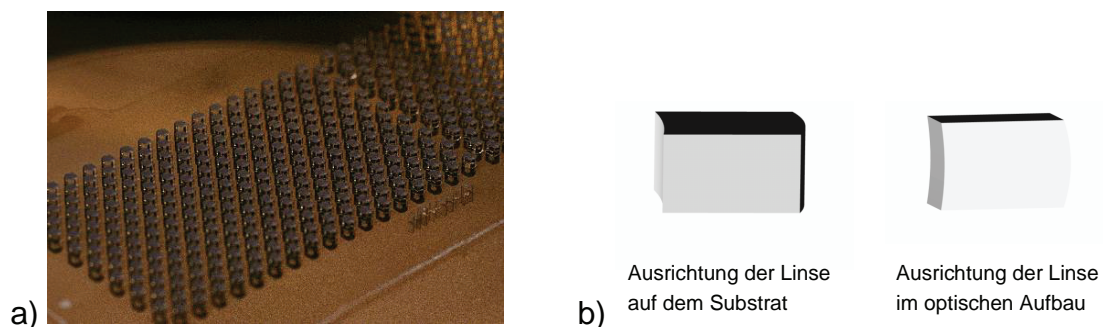


Bild 5-2: Bereitstellung der Zylinderlinsen. a) Linsen auf Substrat; b) Linsenausrichtung auf Substrat und im optischen Aufbau

Diese Linsen werden auf dem Substrat stehend und fixiert bereitgestellt und müssen in den Arbeitsraum der Maschine eingebracht werden. Die geometrische Ausrichtung der Linsen auf dem Trägersubstrat ist auf Grund des Produktionsprozesses um  $90^\circ$  zur Montagerichtung gedreht. Somit müssen die Linsen vor dem Einbau in die MOB vom Trägersubstrat abgelöst und um  $90^\circ$  gedreht werden (s. Bild 5-2 a) und b)). Die Positionierung der Linsen in der mikrooptischen Bank erfolgt über die Ausrichtung an passiven Anschlägen (s. Bild 5-3).

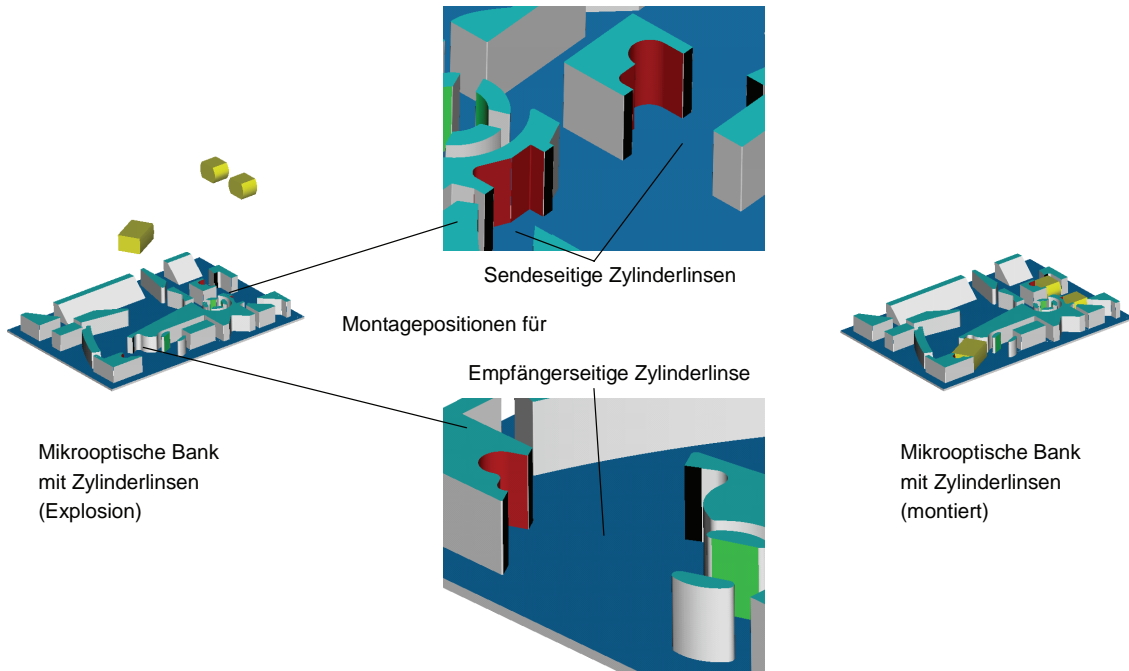


Bild 5-3: Schematische Darstellung der Montagepositionen der Linsen in der mikrooptischen Bank

Die Linsen werden an drei Punkten lateral angelegt und vertikal auf den Grund der mikrooptischen Bank aufgelegt.

## 5.2.2 Montage der Justierkugeln in die elektronisch-optische Platine

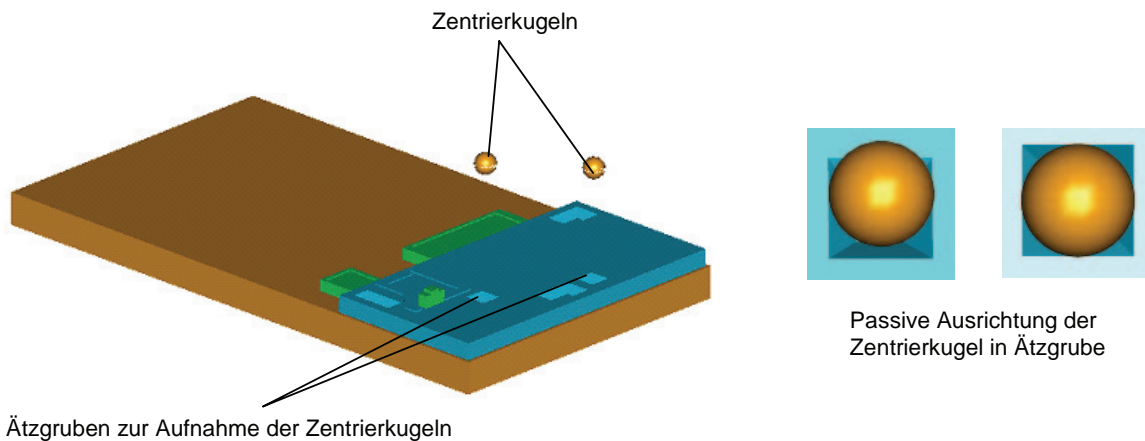


Bild 5-4: CAD-Modell der EOP mit schematischer Darstellung der selbstzentrierenden Montagepositionen für die Zentrierkugeln



Die Justierkugeln dienen der Ausrichtung der MOB zur EOP. Sie müssen in geätzte Kavitäten in Form eines negativen quadratischen Pyramidenstumpfs eingelegt und dort verklebt werden. Sie liegen als Schüttgut vor (s. Bild 5-4).

### 5.2.3 Zusammenbau der MOB und der EOP zum elektronisch-optischen Subsystem

Die mit den Linsen bestückte MOB und die EOP mit den Justierkugeln werden abschließend zusammengebaut. Hierzu wird die MOB gedreht und kopfüber auf die EOP gesetzt (s. Bild 5-5).

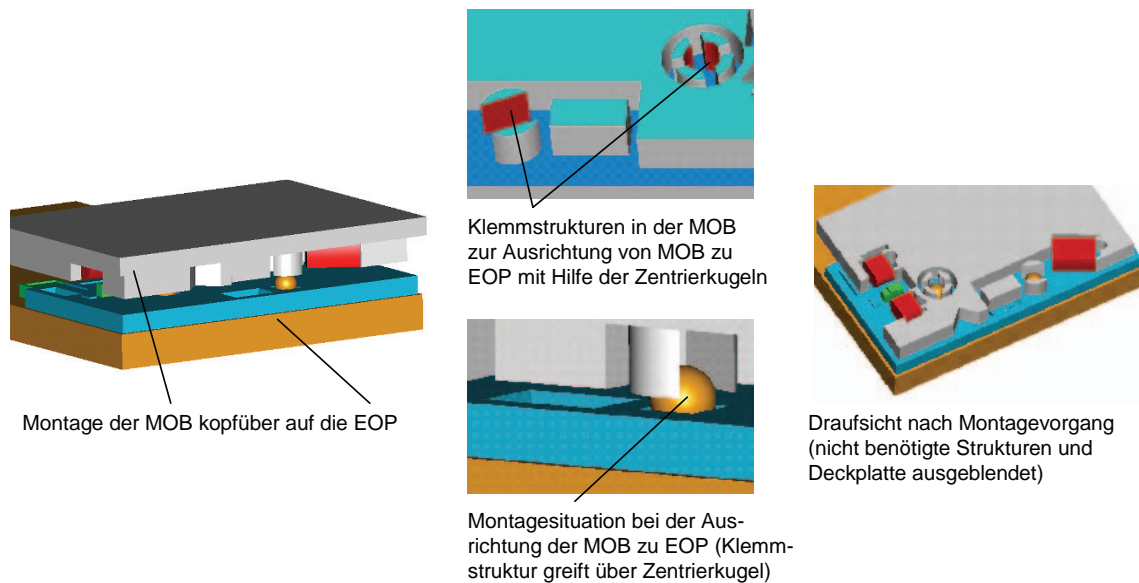


Bild 5-5: CAD-Modell der Montagesituation MOB auf EOP; Darstellung der Klemmstrukturen

Bei diesem Vorgang greifen die in Kapitel 2 beschriebenen Polymerklemmstrukturen über die Zentrierkugeln und richten MOB und EOP zueinander aus.

### 5.2.4 Identifikation der benötigten Prozesse und Werkzeuge

Folgende Komponenten müssen während des Montagevorgangs in den Arbeitsraum der Maschine zugeführt bzw. gehandhabt werden:

- Mikrooptische Bank
- Elektronisch-optische Platine
- Substrat mit Zylinderlinsen
- Vereinzelt Zylinderlinsen
- Zentrierkugeln

Die EOP und die Substrate mit den Zylinderlinsen werden während der Montagevorgänge nicht bewegt. Sie können an einer Position im Arbeitsraum fixiert bleiben. Die MOB, die Linsen und die Kugeln werden während der Montage gegriffen, positioniert und gefügt.

In Bild 5-6 sind die einzelnen Prozessschritte vermerkt. Es ist zu beachten, dass die Handhabung der Linsen in zwei Prozessschritte aufgeteilt ist (s. Anmerkung 1)). Hier wird die Drehung um 90° berücksichtigt. Anmerkung 2) bezieht sich auf die Zuführung der MOB, die kopfüber auf die EOP montiert wird.

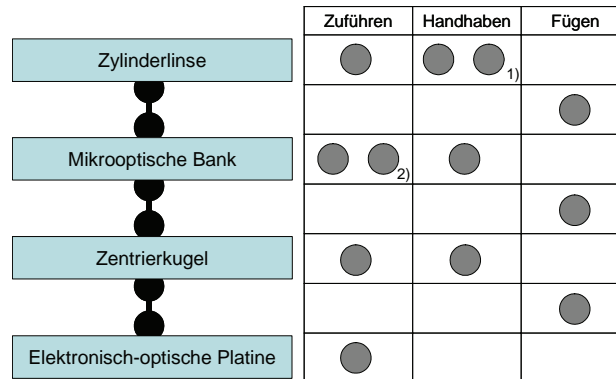


Bild 5-6: Übersicht über die benötigten unterschiedlichen Prozessschritte (Anmerkung 1): Drehung der Linse; 2): Zuführung der MOB kopfüber)

Es werden somit fünf Zuführeinrichtungen für die MOB, die EOP, das Linsensubstrat und die Zentrierkugeln benötigt. Außerdem drei Greifer für die MOB, die vereinzelt Linse und die Zentrierkugel. Des Weiteren wird ein Modul zur Drehung der Linse um 90° benötigt. Für das Fügen der Komponenten muss Klebstoff dosiert werden (drei Prozesse mit unterschiedlichen Klebstoffen).

### 5.3 Beschreibung des Montagekonzepts und der zugehörigen Werkzeuge und Module

Wie oben erwähnt, stellt ein modularer Aufbau einer Montagemaschine mit der Möglichkeit der flexiblen Anpassung der Zuführung bzw. der Werkzeuge einen wichtigen Schritt hin zur kostengünstigen Montage von Mikrosystemen dar. Bei einer geringen Stückzahlproduktion pro Jahr ist es weiterhin sinnvoll, die Montagemaschine so zu gestalten, dass über einen Umrüstschrift mehrere Montagevorgänge auf einer Maschine durchgeführt werden können. Bei steigenden Stückzahlen können die Prozesse dann auf mehreren Maschinen bearbeitet werden. Im Vollausbau ist eine Verkettung mehrerer Stationen mit automatischem Transport der Bauteile von Station zu Station denkbar. Hierauf wird in Kapitel 6 noch eingegangen.

#### 5.3.1 Zuführung der Bauteile

Die Zuführung der Bauteile erfolgt auf Basis genormter DIN-Werkstückträger [3] in der Größe 2-Zoll (s. Bild 5-7). Die zur Zuführung nutzbare Fläche ist grau dargestellt. Die Werkstückträger (WT) werden außerhalb der Maschine manuell mit den Bauteilen beladen. Die Positionierung der WT auf der Maschine wird über definierte Auflagen und Anschläge sowie einer mechanischen Klemmung gewährleistet. Die Positionierung der Bauteile (Linsensubstrat, MOB, EOP) auf dem WT wird auf ähnlichem Weg realisiert. Der WT verfügt über mechanische Strukturen, die in entsprechende Gegenstücke an den Bauteilen eingreifen und somit die Positionierung dieser Komponenten relativ zu den Außenkanten des Werkstückträgers sicherstellen (s. Kapitel 2).

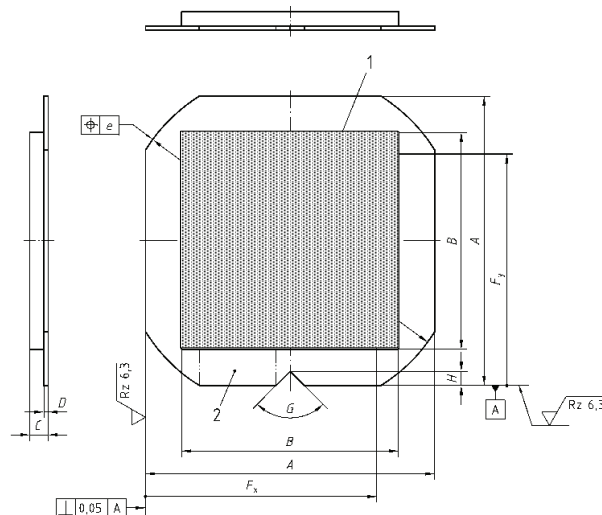


Bild 5-7: Zeichnung des DIN-Werkstückträgers mit grau markierter Nutzfläche (nach [4])

### Werkstückträger: Linsensubstrat

Die Zylinderlinsen werden in einem Lithografieprozess aus einem Polymerresist hergestellt, der auf einem Siliziumträgersubstrat aufgeklebt ist. Dieses Substrat wird auf einer Wafersäge zugeschnitten und anschließend in den WT eingelegt.

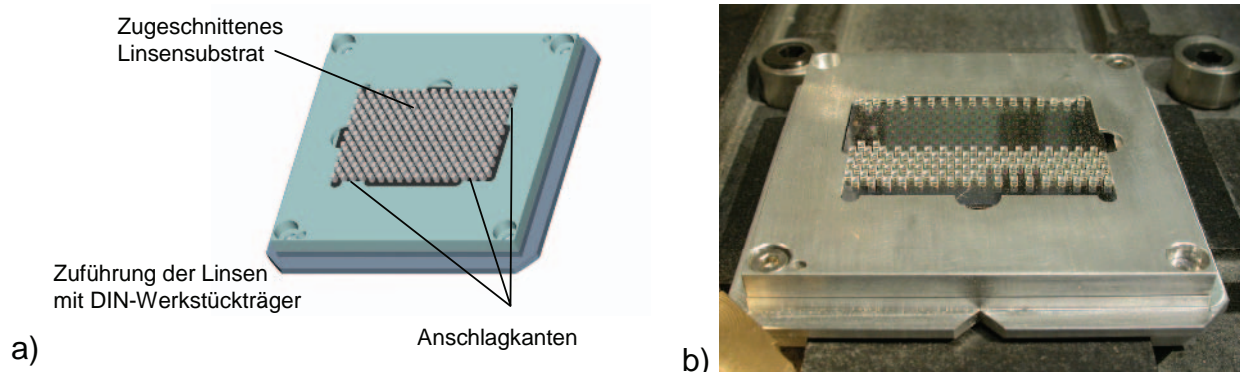


Bild 5-8: 2-Zoll DIN-Werkstückträger für Linsenzuführung; a) CAD-Modell; b) Werkstückträger in Maschine mit Substrat mit Empfängerlinsen bestückt

Der WT verfügt über Anschlagkanten an die die außen liegenden Reihen (vorne und links) der Linsen angeschoben werden. Hierdurch wird die Positionierung des Linsenarrays relativ zu den Außenkanten des Werkstückträgers gewährleistet. Die Abholpositionen für die zu montierenden Linsen ergeben sich aus den CAD-Daten des Linsensubstrats. Die Ausführung des Substrats mit den Linsen ermöglicht die Zuführung von über 200 Bauteilen mit einem WT. Dies bedeutet, dass die Bestückung des WT mit dem Substrat relativ selten erfolgt. Die Klemmung bzw. Verriegelung dieses Werkstückträgers erfolgt dementsprechend über eine Verschraubung.

### Werkstückträger: Mikrooptische Bank

Auf Grund der Größe der MOB sind auf der Nutzfläche des Werkstückträgers maximal neun Bauteile anzuordnen. Um bei der Montageaufgabe 3 (s. Abschnitt 5.2) die Bestückung der Maschine mit den unterschiedlichen Werkstückträgern für die

MOB und EOP im gleichen Zyklus sicherzustellen, werden entsprechend der Zuführung der EOP (sechs EOP je WT) nur sechs MOB auf dem WT angeordnet (s. Bild 5-9).

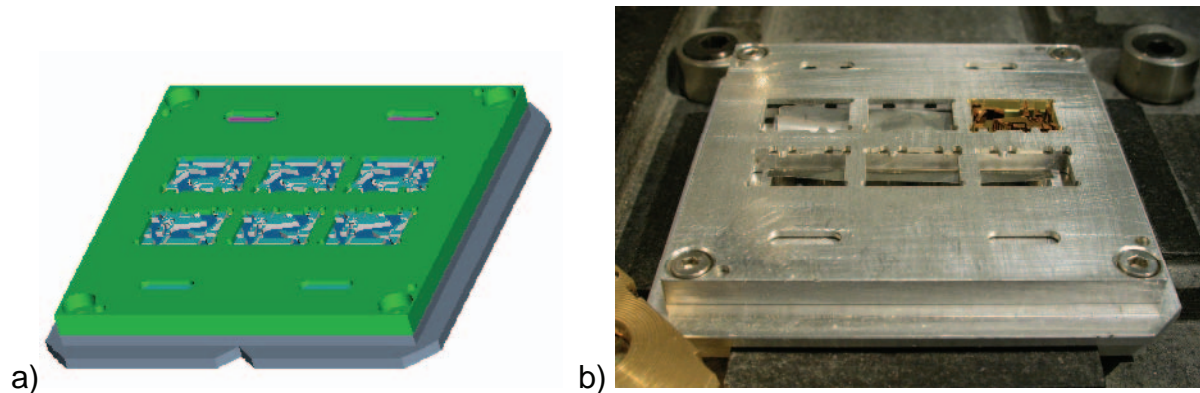
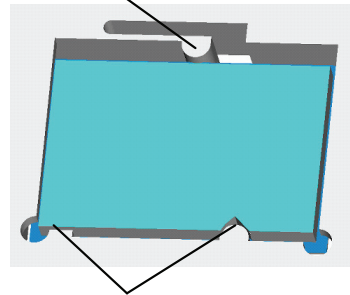


Bild 5-9: 2-Zoll DIN-Werkstückträger für sechs mikrooptische Bänke; a) CAD-Modell mit sechs MOB; b) Werkstückträger in Maschine mit einer MOB bestückt

Somit werden bei Montageaufgabe 3 nach Abarbeitung der Aufgabe beide WT immer gleichzeitig gewechselt. Im Gegensatz zur Fixierung des Linsensubstrats auf dem Linsen-WT muss die Zuführung der MOB so gestaltet sein, dass der WT nach dem Montageprozess schnell und prozesssicher entladen und wieder beladen werden kann, da dieser Vorgang nach der Montage von jeweils sechs EOSS erfolgt. Die Bestückung des Werkstückträgers erfolgt von der Rück-/Unterseite. Hierzu kann an der Unterseite eine Abdeckplatte geöffnet werden. Die Bauteile werden in den umgedrehten geöffneten WT eingelegt. Anschließend wird die Abdeckplatte aufgelegt und verriegelt. Die Ausrichtung der MOB erfolgt wie oben und in Kapitel 2 schon beschrieben an Strukturen, die in das mechanische Design der optischen Bank integriert sind (s. Bild 5-10). Die Abdeckplatte verfügt hierzu über Hebelemente, die federunterstützt die MOB auf diese seitlichen Anschläge drücken. Außerdem wird die MOB von unten an die Deckplatte des Werkstückträgers gepresst. Die Position der MOB relativ zum WT ist somit eindeutig und wiederholgenau definiert.

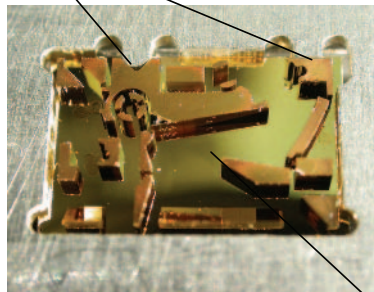
Anpressfeder ist in nebenstehendem Foto unterhalb der Abdeckung angeordnet



Anschläge zur Fixierung

a)

Werkstückträger mit Anschlägen zur Ausrichtung der MOB



Mikrooptische Bank

b)

Bild 5-10: 2-Zoll DIN-Werkstückträger: Mikrooptischer Bank in Werkstückträger eingelegt und an Anschlägen ausgerichtet; a) CAD-Modell; b) Detailaufnahme: MOB an Anschlägen in WT ausgerichtet

Die Zuführung der MOB bei Montageaufgabe 3 (MOB kopfüber auf EOP) wird ebenfalls mit diesem WT realisiert. Hierzu wird der WT umgedreht und ebenfalls kopfüber in der Maschine eingespannt. Die Abdeckplatte wird entnommen und die MOB liegen offen, mit der Unterseite nach oben in den einzelnen Fächern des Werkstückträgers. Der Greifer kann die jetzt nicht geklemmten Teile entnehmen und montieren (vgl. Bild 5-14).

### Werkstückträger: Elektronisch-optische Platine

Wie bereits erwähnt, werden sechs EOP auf dem WT angeordnet. Die EOP liegen in Vertiefungen an drei Außenkanten mit der Keramikplatte auf. Der mittlere Bereich der Keramikunterseite bleibt frei, da in einer weiteren Designvariante der EOP die Keramik auf beiden Seiten mit den Bauteilen der Auswerteelektronik bestückt werden soll. Die Ausrichtung der EOP zu den Außenkanten des Werkstückträgers erfolgt über Anschläge, die an zwei Seitenflächen der Siliziumplatine anliegen. Eine kleine Feder stellt sicher, dass die EOP sich nicht verschiebt (s. Bild 5-11).

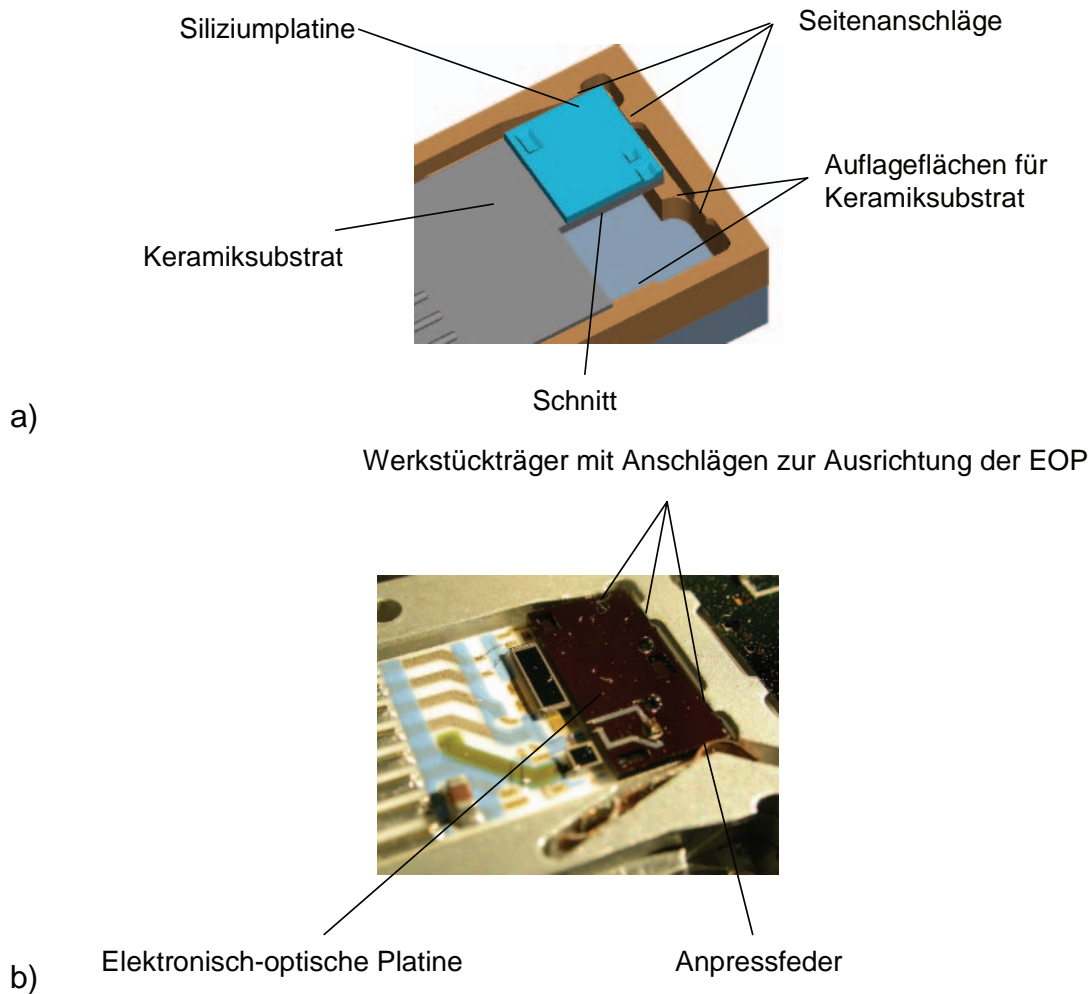


Bild 5-11: 2-Zoll DIN-Werkstückträger für sechs elektronisch-optische Platinen (a) CAD-Modell mit Auflageflächen und Seitenanschlagen zur Positionierung der EOP auf dem Werkstückträger; b) Detailaufnahme: EOP in WT eingelegt)

### Werkstückträger: Zentrierkugel

Die als Schüttgut vorliegenden Zentrierkugeln werden einzeln lose in die Taschen eines herkommlichen „Waffle-Pack“ der Firma Entegris [5] eingelegt, der die gleichen Außenabmessungen wie der 2-Zoll WT hat (s. Bild 5-12).

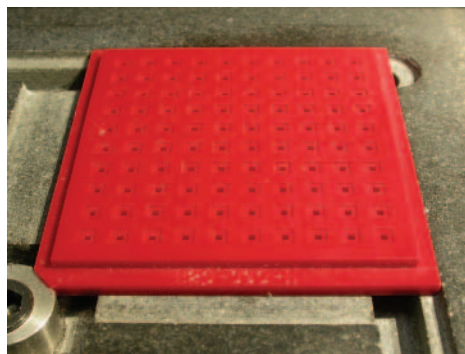


Bild 5-12: 2-Zoll „Waffle-Pack“ der Firma Entegris zur Zuführung der Zentrierkugeln

Die definierte Zuführung der Zylinderkugel wird durch die entsprechende Gestaltung des Greifers sichergestellt (s. Abschnitt 5.3.2).

### 5.3.2 Handhabung der Bauteile

Die Handhabung der Bauteile erfolgt ausschließlich mit Vakuumbreifern. Die Analyse der einzelnen Montageaufgaben in Abschnitt 5.2.4 ergab, dass Greifer für drei Handhabungsaufgaben benötigt werden.

Bauteil	Form	Funktion	Material	Handhabung	Sonstiges
<b>Zylinderlinse</b>	quaderförmig	optisch	Polymer	definierte Handhabungsflächen	zwei Baugrößen
<b>Zentrierkugel</b>	sphärisch	mechanisch	Glas	unkritisch	Schüttgut
<b>Mikrooptische Bank</b>	Chip-ähnlich	optisch/mechanisch	Silizium/Polymer	definierte Handhabungsflächen	Seitenkanten gesägt

Tabelle 5-1: Handhabungsspezifische Bauteileigenschaften

In Tabelle 5.1 sind die handhabungsspezifischen Bauteileigenschaften aufgelistet. Die Analyse der einzelnen Bauteile zeigt, dass Handhabung der Linsen und der Zentrierkugeln mit einem Mehrfachsauggreifer, der über mehrere Greifflächen verfügt, erfolgen kann.

#### Mehrfachgreifer zur Handhabung der Linsen und Kugeln

Bild 5-13 zeigt das CAD-Modell und ein Foto des realisierten Greifers. Er verfügt über zwei Greifflächen mit jeweils einer Saugöffnung, die über eine gemeinsame Pneumatikleitung versorgt werden. Auf Grund der geringen Bohrungsdurchmesser der Saugöffnungen von 0,5 mm ist ein getrenntes Schalten der Saugbohrungen nicht notwendig. Der fluidische Widerstand einer Saugöffnung ist so groß, dass die Haltekraft des Sauggreifers ausreicht auch wenn der zweite Kanal ebenfalls geöffnet ist.

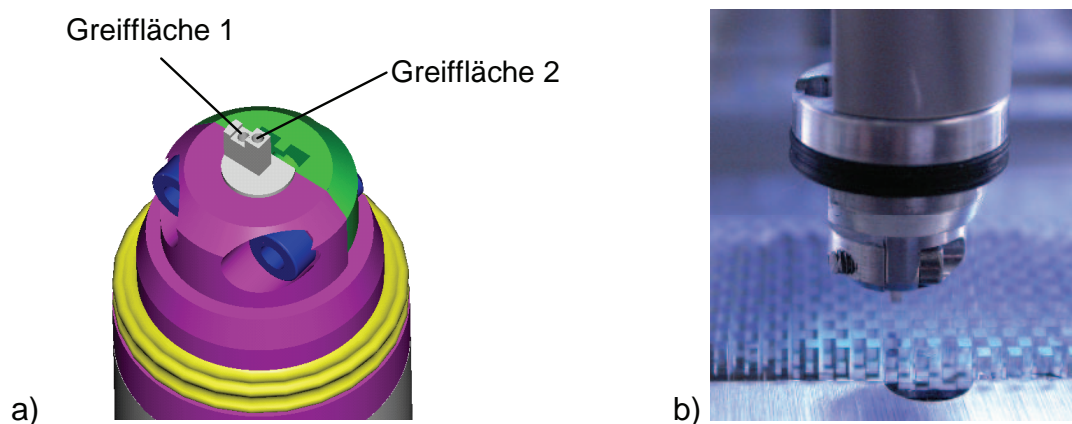


Bild 5-13: Mehrfachgreifer mit zwei Greifflächen (Saugfläche 1, Saugfläche 2); a) CAD-Modell; b) Detailaufnahme: Greifer über Linsensubstrat positioniert

Der Betrieb des Greifers zeigt, dass die Querströmung, die sich auf Grund der offenen Bohrung ergibt, den Montagevorgang nicht stört. Die Bauteile werden je nach Montageaufgabe an unterschiedlichen Greifflächen gegriffen (s. Tabelle 5-2).

Bauteil	Montageaufgabe	Prozessschritt	Greiffläche	Prozessrandbedingungen
Zylinderlinse	1	Ablösen Linse von Substrat und Absetzen Linse auf Wendeeinheit	1	Linse wird in Schiebe-/Drehbewegung abgeschert
Zylinderlinse	1	Aufnehmen Linse von Wendeeinheit und Montage der Linse in MOB	2	Linse hängt an Greifer und kann bei Kontakt an Anschlag in MOB an Greiffläche entlang gleiten (Nachgiebigkeit)
Zentrierkugel	2	Ansaugen der Kugel aus Tasche in Werkstückträger und Montage in EOP	2	Selbstzentrierung der Kugel in Bohrung

Tabelle 5-2: Einsatz der unterschiedlichen Greifflächen des Mehrfachgreifers

Bedingt durch die Bauteilgröße erfordert die Handhabung der MOB den Einsatz eines größeren Greifers.

### Greifer zur Handhabung der MOB

Der Sauggreifer zur Handhabung der MOB (s. Bild 5-14) basiert auf einem Standardsauger der Firma Schmalz [6]. Dieser Greifer wird bei Bedarf automatisch eingewechselt und verbleibt ansonsten im Werkzeugmagazin. Das Werkzeugmagazin und das Greiferwechselsystem werden in Abschnitt 5.3.4 beschrieben.

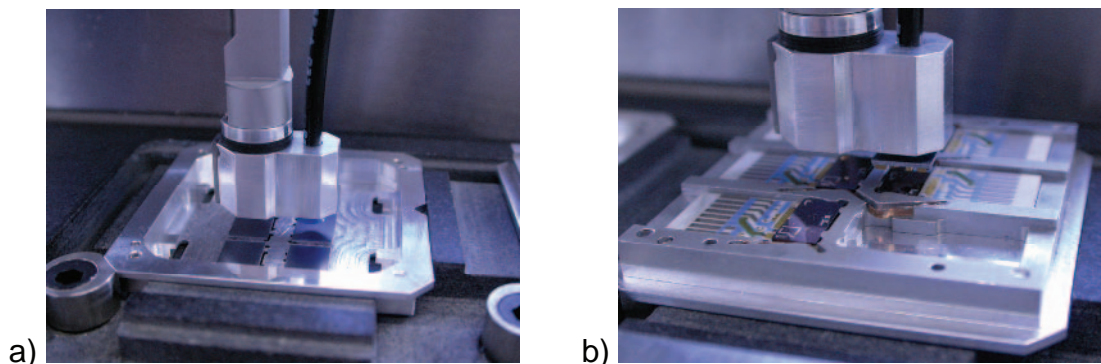


Bild 5-14: Saugnapfgreifer mit Werkzeugwechselschnittstelle; a) Greifer an Vertikalachse über geöffnetem und gedrehtem MOB-Werkstückträger; b) Montageaufgabe 3: MOB auf EOP

### 5.3.3 Fügen der Bauteile

Die dauerhafte Verbindung der einzelnen Bauteile erfolgt über unterschiedliche Klebstoffe, diese sind teilweise lichthärtend aber auch thermisch härtende Kleber kommen zum Einsatz.





Bild 5-15: Reservoir-Dosiernadeln der Firma EFD, USA

Die Applikation der Klebstoffe geschieht mit Miniatur-Dosiernadeln, die über ein kleines Reservoir verfügen (s. Bild 5-15) [7].

Fügeprozess	MA	Material Fügepartner	Klebstoffsystem
Verbindung Zylinderlinse/MOB	1	Polymer mit optionaler Entspiegelung/verspiegeltes Polymer	UV-lichthärtend
Verbindung Zentrierkugel/EOP	2	Glas/Silizium	UV-lichthärtend
Verbindung MOB/EOP	3	verspiegeltes Polymer/Silizium	UV-lichthärtend/thermisch härtend

Tabelle 5-3: Fügeprozesse und Fügepartner bei den einzelnen Montageaufgaben (MA)

Die exakte Dosierung des Klebstoffs wird über die Druckluftbeaufschlagung der Dosiernadel mit einem definierten Druck für eine definierte Zeitdauer realisiert (Druckluft-Zeit-Dispenser). Die Dosiermodule mit den unterschiedlichen Klebern werden im Werkzeugmagazin bereitgestellt (s. Abschnitt 5.3.4). In Tabelle 5.3 sind die unterschiedlichen Fügeprozesse aufgelistet.

#### 5.3.4 Beschreibung weiterer Module des Montagesystems

Die Bearbeitung der Montageaufgaben erfordert, wie oben schon erwähnt, die Integration weiterer Module in das Montagesystem:

- Wendeeinheit für die Zylinderlinsen und
- Werkzeugmagazin für den MOB-Greifer und die Dosiermodule.

##### Wendeeinheit für die Zylinderlinsen

Auf Grund der durch den Herstellungsprozess bedingten Fehlorientierung der Zylinderlinsen auf dem Substrat, muss die vom Substrat aufgenommene Linse um 90° gedreht werden. Bild 5-16 zeigt den Ablauf bei der Drehung der Zylinderlinsen.

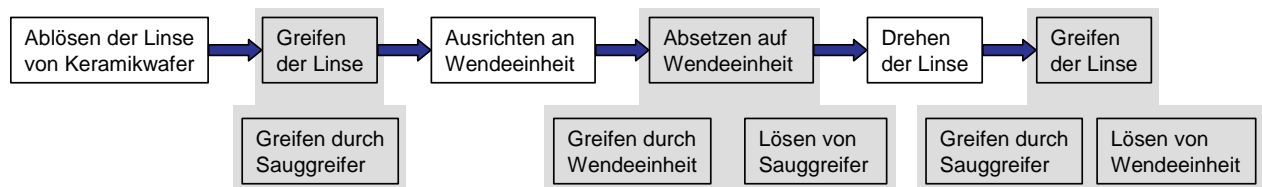


Bild 5-16: Prozessablauf beim Drehen der Zylinderlinsen um 90°

Während der Übergabe der Linse an die Wendeeinheit wird sie an dort angebrachten seitlichen Anschlägen ausgerichtet. Diese Wendeeinheit ist in das Montagesystem integriert.

### **Aufbau der Wendeeinheit**

Die Wendeeinheit verfügt über Greifflächen für beide Linsengrößen, auf denen die jeweilige Linse während des Wendevorgangs mittels Vakuum gespannt wird. Diese Linsenaufnahme ist auf eine handelsübliche pneumatische 180°-Schwenkeinheit montiert. Die 90°-Drehung der fixierten Linse wird dadurch realisiert, dass die Drehachse der Schwenkeinheit um 45° aus der Senkrechten gekippt ist, die zugehörigen Linsenablagen jedoch horizontal ausgerichtet sind.

Nach der 180°-Drehung der Schwenkeinheit ist die Linsenablage vertikal ausgerichtet und die darauf gespannte Linse um 90° gedreht. Anschließend wird die Linse wieder entnommen und montiert. Bild 5-17 zeigt den Prototyp der Wendeeinheit (a)) und die Einbausituation in der Maschine (b)).a)

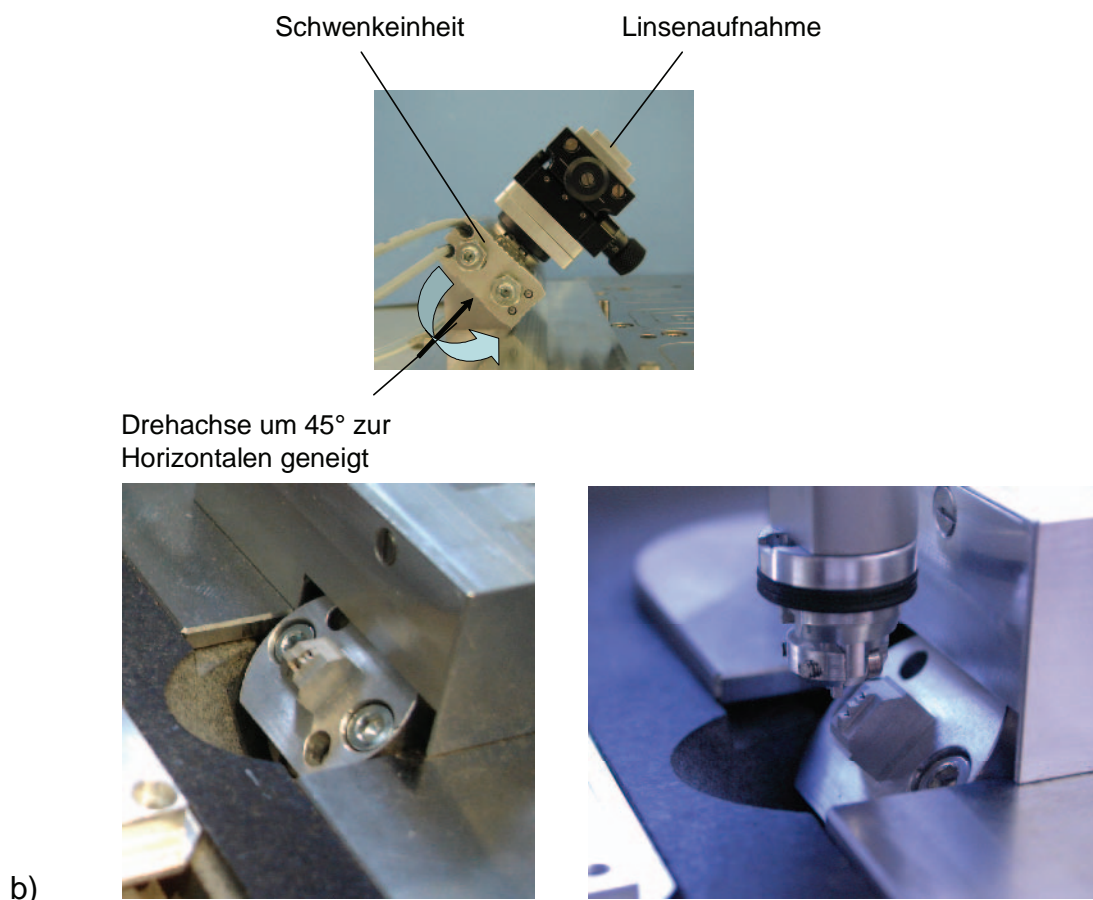


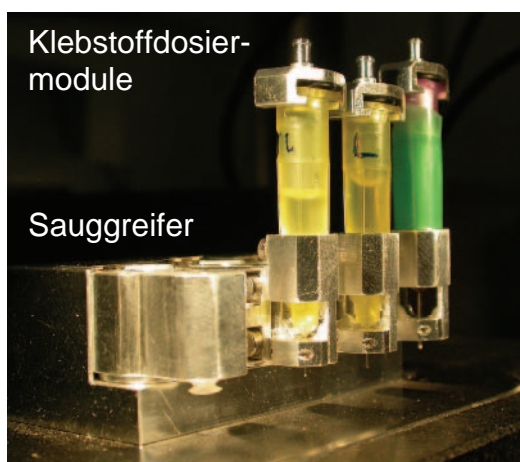
Bild 5-17: Wendeeinheit zur Drehung der Linsen um 90°; a) Prototyp der Wendeeinheit; b) Einbausituation in Montagemaschine unterhalb des Werkzeugmagazins

### Werkzeugmagazin für den MOB-Greifer und die Dosiermodule

Die Realisierung aller drei Montageaufgaben auf einer Maschine erfordert die Integration einer Werkzeugwechseleinheit mit einer Schnittstelle an der Vertikalachse. Auf Grund der geringen Traglast dieser Achse ist es nicht möglich, ein am Markt erhältliches System einzusetzen. Deshalb wird in der MikroFEMOS-Maschine ein an die Möglichkeiten der Maschine und die Montageanforderungen angepasstes eigenes System eingesetzt.

Die Bereitstellung der drei Dosiermodule und des MOB-Greifers erfordert ein Werkzeugmagazin mit vier Plätzen.

Bild 5-18 b) zeigt das Magazin im eingebauten Zustand. Die Werkzeuge werden an den Magazinpositionen magnetisch gehalten. Die Vertikalachse verfügt über eine präzise gefertigte zylindrische Kontur, die zusammen mit einem topfähnlichen Gegenstück den mechanischen Teil der Schnittstelle bildet. Bei der Einwechslung fährt die Achse in den Topf und verriegelt pneumatisch. Die magnetische Verriegelung der Schnittstelle im Magazin wird gelöst, das Werkzeug ist an der Achse fixiert und kann eingesetzt werden.



a)



b)

Bild 5-18: Werkzeugmagazin mit vier Werkzeugen (1 Sauggreifer; 3 Klebstoffdosiermodule) ohne Pneumatikschläuche; a) Seitenansicht; b) Integration Wendeeinheit und Werkzeugmagazin in Maschinengrundplatte

## 5.4 Umsetzung der Montageaufgaben

Mit Hilfe der oben beschriebenen Module lassen sich die drei Montageaufgaben bearbeiten. Im Folgenden werden Werkzeuge und Module für die einzelnen Aufgaben jeweils kurz aufgelistet.

**Montageaufgabe 1:***Montage der Zylinderlinsen in die mikrooptische Bank*

<b>Werkzeuge:</b>	Mehrfachgreifer
<b>Bauteile:</b>	MOB, Linse 1 (Sendelinse), Linse 2 (Empfangslinse)
<b>Zuführung der Bauteile:</b>	MOB auf WT 1, Linse 1 auf WT 2, Linse 2 auf WT 3
<b>Sonstige Module:</b>	Wendeeinheit mit Aufnahmen für 2 Linsen Klebstoffdispenser mit Kleber für Linsen

**Ablauf:**

- MOBs werden manuell in WT 1 eingelegt
- Zwei zugeschnittene Linsensubstrate werden manuell in WT 2 und WT 3 eingelegt
- WT 1-3 werden manuell in Maschine eingesetzt
- Klebstoffdispenser wird befüllt
- Start des Montagevorgangs
- Nach Bestückung der MOB wird WT 1 manuell gewechselt

**Montageaufgabe 2:***Montage der Justierkugeln in die elektronisch-optische Platine*

<b>Werkzeuge:</b>	Mehrfachgreifer
<b>Bauteile:</b>	EOP, Zentrierkugeln
<b>Zuführung der Bauteile:</b>	EOP auf WT 4, Justierkugeln in WT 5 („Waffle Pack“)
<b>Sonstige Module:</b>	Klebstoffdispenser mit Kleber für Justierkugeln

**Ablauf:**

- EOP werden manuell in WT eingelegt
- Justierkugeln werden manuell in WT eingelegt
- WT 4 und WT 5 werden manuell in Maschine eingesetzt
- Klebstoffdispenser wird befüllt
- Start des Montagevorgangs
- Nach Bestückung der EOP wird WT 4 manuell gewechselt

**Montageaufgabe 3:***Zusammenbau der MOB und der EOP zum elektronisch-optischen Subsystem***Werkzeuge:** Saugnapfgreifer**Bauteile:** MOB, EOP**Zuführung der Bauteile:** MOB auf WT 1 (kopfüber), EOP auf WT 4**Sonstige Module:** Klebstoffdispenser mit Kleber für MOB/EOP**Ablauf:**

- WT1 mit MOB wird kopfüber manuell in Maschine eingesetzt
- WT 4 wird manuell in Maschine eingesetzt
- Klebstoffdispenser wird befüllt
- Start des Montagevorgangs
- Nach Bestückung der EOP wird WT 4 und WT 1 manuell gewechselt

**5.5 Betrachtung des Einflusses der Bauteiltoleranzen auf das Montagekonzept**

Ziel bei der Montage von Systemen ist immer die sichere Einhaltung der geforderten Montagetoleranzen. Die automatisierte Zuführung und Positionierung von Bauteilen wird beeinflusst von den Toleranzen der beteiligten Komponenten. In vielen Fällen kann diese Abhängigkeit durch die Detektion der Bauteilposition im Arbeitsraum der Maschine während des Handhabungsvorgangs minimiert werden. Im vorliegenden Fall ist dies nicht möglich. Alle Abhol- und Ablagepositionen werden fest in der Maschinensteuerung einprogrammiert. Aus diesem Grund ist die genaue Betrachtung dieser Einflussfaktoren erforderlich. In Bild 5-19 sind die unterschiedlichen Einflussgrößen bei der Positionierung der Komponenten im Arbeitsraum der Maschine dargestellt. Basierend auf dem Ansatz der „Passiven Justage“ ist die Lage der ausrichtenden Struktur, die zur Positionierung der Bauteile zueinander dient, und die Genauigkeit des Fügevorgangs entscheidend. Die Position dieser ausrichtenden Struktur hängt von der Toleranzkette aller beteiligten Komponenten ab. Dieser Wert soll eine gewisse Größe nicht überschreiten, da beispielsweise der zur Verfügung stehende Einfügeraum an den Montagepositionen in den optischen Aufbau begrenzt ist. Ist die sich im Rahmen der Toleranzen ergebende Lage der Einfügeposition zu weit verschoben, besteht Kollisionsgefahr bei der Montage der Komponenten.

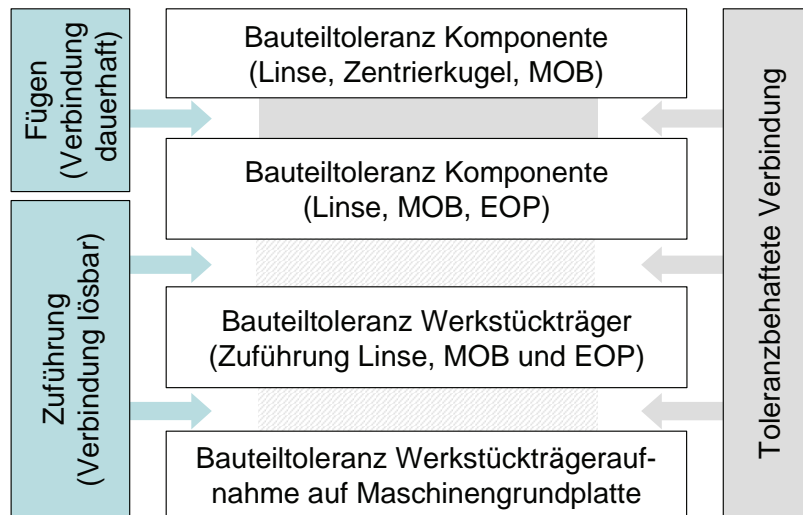


Bild 5-19: Einfluss der Bauteil und Verbindungstoleranzen auf die Teilezuführung mit Werkstückträgern.

Bild 5-20 zeigt die Verhältnisse bei der Montageaufgabe 1. Die Montageposition wird beim Einfahren des Prozesses detektiert und in der Steuerungssoftware hinterlegt. Dadurch wird der Einfluss der invarianten Bauteiltoleranzen der Zuführung unterdrückt. D.h. die hier dargestellte Toleranzkette reduziert sich auf die Position der passiven Anschläge für die Linse in der mikrooptischen Bank (Bauteiltoleranz) und die drei Verbindungen bei der Zuführung.

Die Wiederholgenauigkeiten bei der Fixierung des Werkstückträgers auf der Maschine und des Bauteils auf dem WT bleiben als toleranzbehaftete Einflussfaktoren, die sich auf die Position des Linsenanschlages auswirken, da diese Verbindungen bei der Bestückung der WT mit den Komponenten bzw. der Fixierung der WT auf der Maschine immer wieder gelöst und aufgebaut werden.

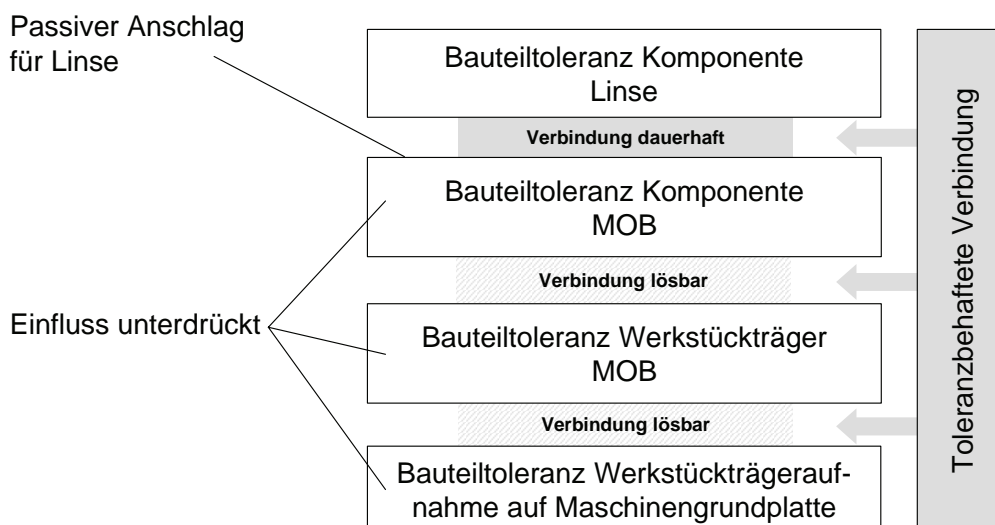


Bild 5-20: Unterdrückung der Einflussfaktoren auf die Positionierung der Montageanschläge im Arbeitsraum

Die resultierende Toleranz in der Position des Linsenanschlags ist auf Grund dieser Maßnahmen derart reduziert, dass der im Design vorgesehene Freiraum zum kollisionsfreien Einfügen der Linsen in die MOB ausreicht.

## 5.6 Ausblick

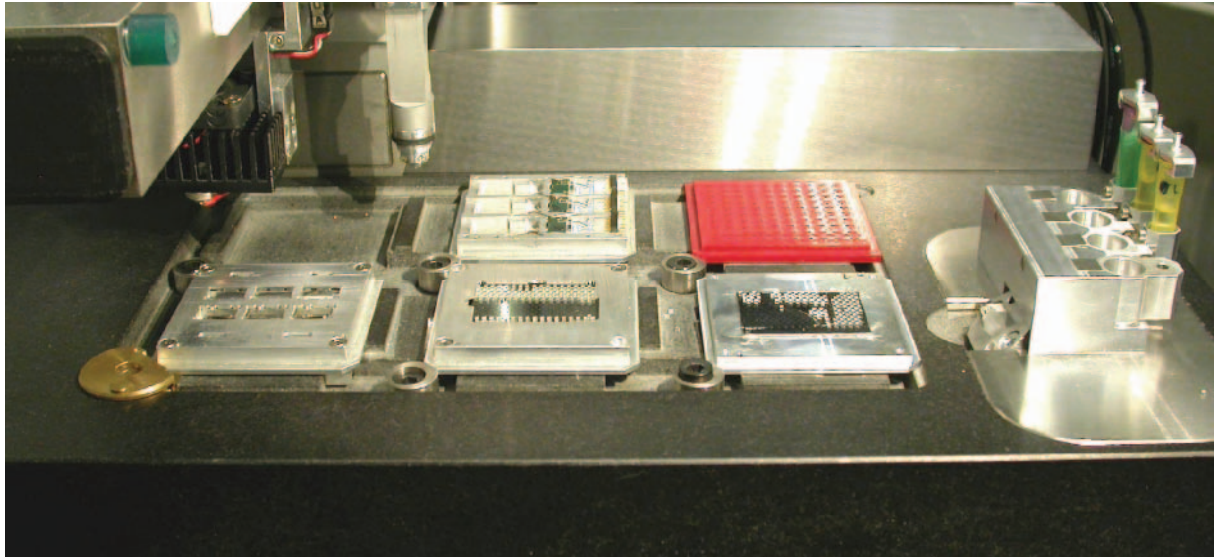


Bild 5-21: Arbeitsraum der MikroFEMOS-Montagemaschine mit eingespannten Werkstückträgern und Zusatzmodulen rechts am Bildrand (Werkzeugmagazin und Wendeeinheit)

Das Montagekonzept für den mikrooptischen Abstandsensor basiert auf der Strategie der „passiven Justage“ ohne den Einsatz einer digitalen Bildverarbeitung. Aufbauend hierauf wurden die Zuführung, die Handhabungsprozesse und die Fügeprozesse auf dem vorgegebenen Maschinenkonzept (s. Kapitel 6) realisiert. Bild 5-21 zeigt den Arbeitsraum der Maschine mit den eingespannten Werkstückträgern. Rechts am Bildrand sind das Werkzeugmagazin und die integrierte Wendeeinheit zu erkennen.

Die Montageergebnisse zeigen, dass das Konzept prinzipiell funktioniert. In zwei Bereichen sind wesentliche Änderungen bzw. Weiterentwicklungen erforderlich:

- Die Gestaltung der passiven Anschläge für die Linsen in der mikrooptischen Bank müssen modifiziert werden, um die Prozesssicherheit zu erhöhen und um die Fehleranfälligkeit des Montagevorgangs zu reduzieren.
- Die hohen Fertigungskosten für die WT für MOB und EOP erfordern eine Überarbeitung dieser Komponenten. Eine Anpassung der Ausrichtstrukturen an der MOB bietet hier ein großes Einsparpotential.

Die erfolgreiche Realisierung dieser Montageaufgaben begründet sich neben der Prozesstechnik in der sehr präzisen Positionierung der eingesetzten Werkzeuge. In Kapitel 6 wird detailliert auf diese Maschinenbasis eingegangen.

## 5.7 Literatur

- [1] N.N.: <http://www.quality.de>, WWW-Seite: Qualitätsmanagement unter einem D,A,CH, QM-Lexikon, Stand April 2005

- [2] U. Hollenbach, P. Krippner, J. Mohr, T. Oka, U. Wallrabe, "A Modular Fabrication Concept for EOSS is demonstrated by a Micro Optical Distance Sensor", Proc. Of OPTO Conf., pp 35 40, Erfurt, May 2002.
- [3] N.N.: DIN 32561, "Fertigungsmittel für Mikrosysteme Werkstückträger - Anschlussmaße und Toleranzen", DIN Berlin, 2000
- [4] Gengenbach, U.: Standards für die Mikrofertigungsgeräte SMT - Surface Mount Technology, 2000, 13. Jahrgang, Ausgabe 7, S. 26 – 29
- [5] N.N.: <http://www.entegris.com>, <http://www.devicecare.com>, WWW-Seiten der Firma Entegris Inc., Bereich: Wafer and Device Handling Product Solutions, Stand April 2005
- [6] N.N.: <http://www.schmalz.de>, WWW-Seite der Firma Schmalz, Bereich: Vakuumkomponenten/Vakuumsauggreifer, Stand April 2005
- [7] N.N.: <http://www.efd.com>, Deutschland: <http://www.glt-pforzheim.de>, WWW-Seite der Firma EFD bzw. GLT, Stand April 2005



## 6 Modulare Montagemaschine – Tischfabrik

Bär, M.

### 6.1 Ausgangssituation

Die Firma IEF Werner ist als Anbieter von Komponenten und Systemen für die Automatisierung von Fertigungs- und Montageprozessen seit Jahren erfolgreich am Markt aktiv. Mittelfristiges Ziel der Fa. IEF Werner ist es, den Bereich der Mikrofertigungstechnik als ein tragfähiges „Standbein“ des Unternehmens aufzubauen. So wurden bspw. Automationskonzepte für Mikrospritzgussprozesse, angefangen vom Entnahmehandling über die Angusstrennung bis hin zur Bereitstellung der Mikrotechnik-Bauteile für nachfolgende Verfahrensschritte erarbeitet. In diesem Zusammenhang entstanden erste Ansätze zur Realisierung reinraumtauglicher Transport- und Materiallogistik-Strukturen.

Weiterführende Arbeiten auf dem Gebiet der Automation von Mikrofertigungs- und -montageprozessen brachten auch komplexe Mikrosystemtechnik-geeignete Werkstückträgersysteme, optisch unterstützte Feinpositionierlösungen, reinraumtaugliche Flächenportale und einiges mehr hervor.

Abgeleitet von diesen Forschungsarbeiten entstand in einer separaten Produktentwicklung das hochpräzises Achssystem „IEF-microLINE“, aus dem sich flexibel und wirtschaftlich Montagesysteme aufbauen lassen.

Zur Erschließung neuer Marktpotenziale im Bereich der Fertigungstechnik mikrooptischer Komponenten sollte das Engagement der Fa. IEF Werner im Rahmen des Projekts Mikro-FEMOS Lösungsansätze zu den für die Montage mikrooptischer Systeme benötigten Fertigungsgeräten hervorbringen.

### 6.2 Stand der Technik zu Projektbeginn

Während die Fertigung monolytischer Mikrosysteme, die auf Basis bekannter Halbleiter-Verfahren hergestellt werden, für die Großserie gelöst war, stellte sich zu Projektbeginn der Aufbau hybrider Mikrosysteme, die aus mehreren Einzelteilen bestehen, als nicht unerhebliche technologische Herausforderung dar. Eine Schlüsselrolle wurde dabei automatisierten Montage-, Justage- und Aufbautechniken zugeordnet.

Vor allem standen keine industriellen serientauglichen Montagemaschinen für kleinste Bauteile zur Verfügung. Die vorhandene Technologie war folgendermaßen charakterisiert:

- Linearachsen mit Gewichten pro Achse 3600 g bis 1900 g
- Wiederholgenauigkeit: 20  $\mu\text{m}$
- Maximales Handhabungsgewicht: 500 g

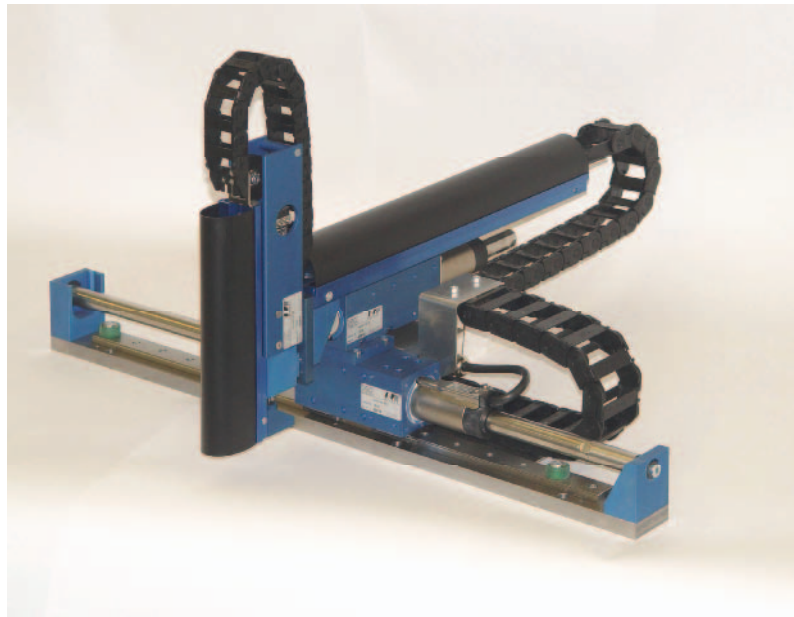


Bild 6-1: Typisches Achssystem zu Projektbeginn

Da bestehende Montagewerkzeuge aus der Makrowelt aber nicht beliebig in die Größenordnung der Mikrosystemtechnik skaliert werden können, wurde Bedarf zur Entwicklung neuer Technologien festgestellt. Diese sollten einerseits an die kleinen Dimensionen angepasst sein, andererseits aber auch die Durchsatz- und Präzisionsanforderungen erfüllen und letztlich auch eine optimale Ausnutzung der Materialien ermöglichen, die im Bereich der Mikrosystemtechnik eingesetzt werden.

An dieser Stelle klaffte zu Projektbeginn allerdings eine eklatante Lücke zwischen technologisch hochgradig ausgereiften und spezialisierten mikrotechnischen Prototypen aus dem Labor und deren industrieller Fertigung in signifikanten Stückzahlen und zu vernünftigen Kosten. Zur Lösung des Problems wurden verschiedene BMBF-Projekte initiiert, die jeweils Teile dieser Problematik aufgegriffen haben und bei denen z. T. auch beachtliche Teillösungen entstanden sind.

So wurden bspw. im BMBF-Verbundprojekt MOMSYS optische Komponenten mit einem sechssachsigen Industrieroboter montiert. Zur Montage von mikrooptischen Komponenten wurde am Forschungszentrum Karlsruhe das Mikromontagesystem MIMOSE erstellt (vgl. [http://presse.fzk.de/aktuelles/presseinfo/1998/PI09\\_98.html](http://presse.fzk.de/aktuelles/presseinfo/1998/PI09_98.html)). In Kooperation der IEF Werner GmbH mit mehreren Partnern aus Industrie und Forschung wurde im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes Microfeed2 eine modulare Montagemaschine für die automatische Montage von fluidischen Mikrosystemen konzipiert. Diese Maschine ist bereits in der Lage, fluidische Mikrosysteme in Serienstückzahlen (> 10.000 pro Jahr) zu fertigen.

Unter Nutzung der vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnisse sollte in MikroFEMOS nun eine Anpassung des Montageequipments an die Anforderungen optischer Mikrokomponenten vorgenommen werden. Neben dem Handhabungssystem sollte die Lösung die Teilezuführung über standardisierte Werkstückträgersysteme (Adaption der Ergebnisse aus Microfeed2, DIN 32561) und modulare Greifersysteme (Synergie zum Projekt Greifer) umfassen.

### 6.3 Ziel des Teilprojekts

Ausgehend von der oben beschriebenen Ausgangssituation wurde folgende grundsätzliche Zielstellung definiert:

- Reduzierung des Achsgewichtes
- Reduzierung der Baugröße
- Erhöhung der Genauigkeit
- Flexibler modularer Geräteaufbau

### 6.4 Modulares Mikromontagekonzept

#### 6.4.1 Systemtechnik

Ausgehend von den notwendigen Präzisionen und Wiederholgenauigkeiten wurde als vernünftigste Lösung der Einsatz luftgelagerter Achssysteme herausgearbeitet. Konkret realisiert wurden vorgespannte Luftlager höchster Präzision.

Der spezifischen Eigenschaft von Luftlagern, bei ausschalten der Druckluft in undefinierten Zustand zu verfahren, wurde durch Klemmen der Achse bei Druckluftauschaltung begegnet.

Angetrieben wird die Achse piezotechnisch. Die Positionsrückmeldung erfolgt über ein optisches Messsystem (100 nm Step).

Ein spezieller Servocontroller steuert die Achsen über SpiiPlus. Für die Steuerungsfunktionalität kommt die Positionier- und Ablaufsteuerung PA-CONTROL smart zum Einsatz.

#### 6.4.2 4-Achs-Montagemaschine

Im Projekt Mikro-FEMOS ist es gelungen, eine modulare, erweiterbare Montagemaschine für kleinste Bauteile als industriell anwendbare Struktur zu realisieren.

- Erstmals kann für die industrielle Fertigung auf eine Standardmontageanlage zurückgegriffen werden, bei der Bauteilgröße bzw. -gewicht und Anlagengröße, sowie Energieeinsatz in einem realistischen Verhältnis zueinander und insbesondere zum Zielfokus „Mikro“ stehen.
- Die zur Mikromontage erforderliche höchste Reproduzierbarkeit wird ohne Umwege über Feinpositionierung direkt von der Anlage erreicht.
- Durch kleinsten Bauraum ist ein Betrieb im kostengünstigen „Mini-Environment“ (Lokaler Reinraum) möglich.
- Durch die Zuführung der Komponenten mit DIN-Werkstückträgern ist eine flexible Anpassung des Equipments an veränderte Montageaufgaben problemlos möglich.
- Durch Verkettung sind auch komplexere Aufgabenstellungen realisierbar, wobei dies gleichermaßen die Komplexität der Montageabläufe, als auch die Stückzahlforderungen betrifft. Es ist als Basis des Mikro-FEMOS-Konzept sogar möglich „mitwachsende“ Architekturen zu realisieren, die der Kunde mit Wachsen seiner eigenen Produktion Stück für Stück nachrüsten kann.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den 1. Prototyp eines solchen Mikro-Montagemoduls.



Bild 6-2: „Tischfabrik“ (4-Achs-Mikromontagemaschine)

Die wesentlichen Merkmale sind nachfolgend zusammengefasst:

- Baugröße: 420 x 280 x 300 mm à 35 dm<sup>3</sup>
  - ↳ bisher: 600 x 600 x 500 mm à 180 dm<sup>3</sup> (Faktor 5)
  - ↳ Größe eines DIN A3 Blattes
- Geeignet für Mini-Environment
- Gewicht Z - Pinole 100 g / bewegte Masse 30 g
- Genauigkeit: ± 4 counts (1 count = 100 nm) (Faktor 30 besser)
- Auf der Montagemaschine werden alle Montageprozesse durchgeführt.

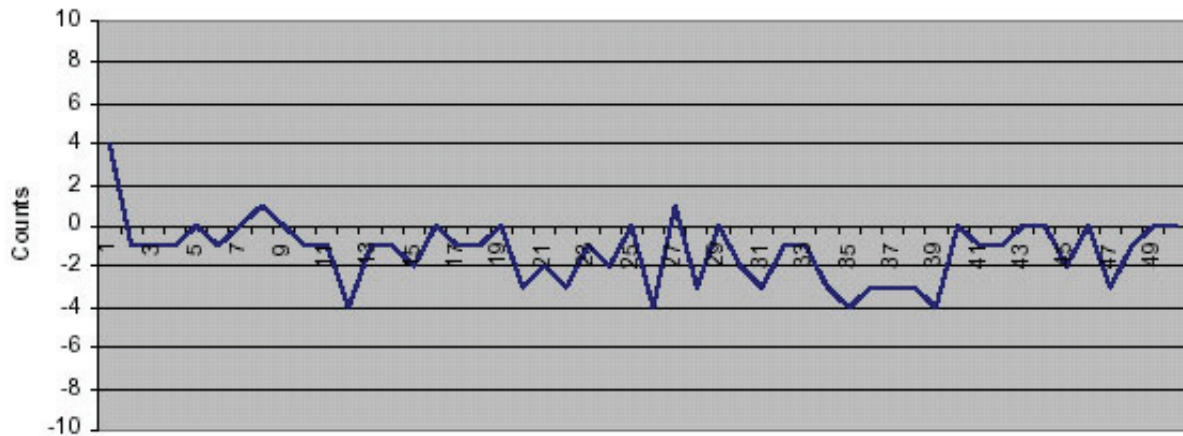


Bild 6-3: Erzielte Genauigkeiten mit dem Prototyp

### 6.4.3 Steuerungskonzept der modularen Tischfabrik

Das mechanische Grundkonzept der Tischfabrik ist auf maximale Modularität ausgelegt. Dem muss natürlich die Steuerungsphilosophie in gleicher Weise genügen. Realisiert wurde eine Architektur mit klarer, kaskadierbarer Struktur (siehe nachf. Abbildungen):

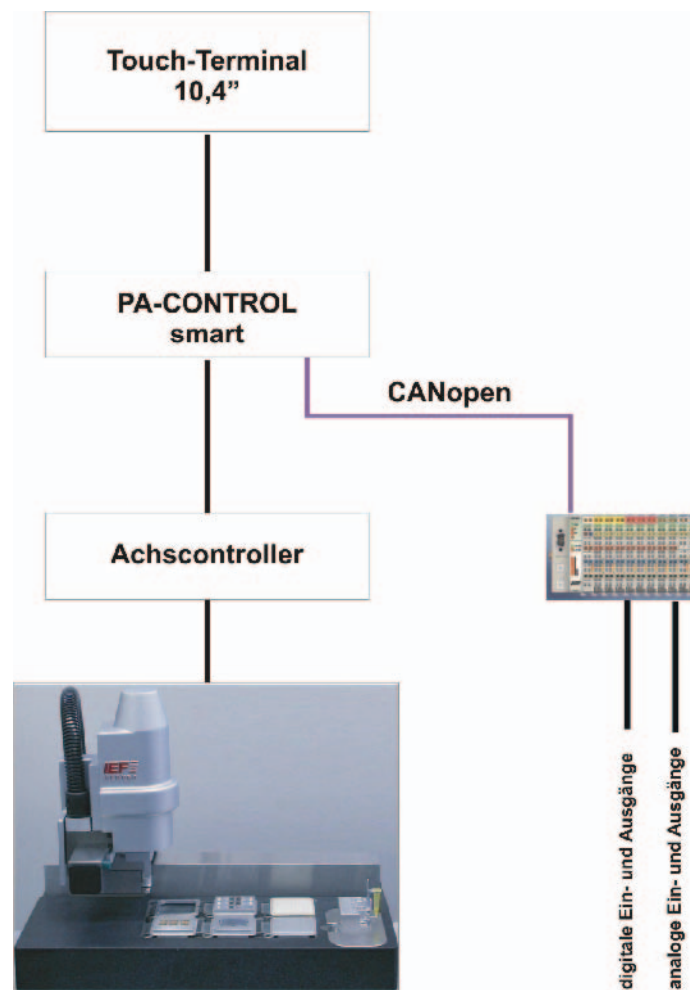


Bild 6-4: Steuerungskonzept der modularen Tischfabrik

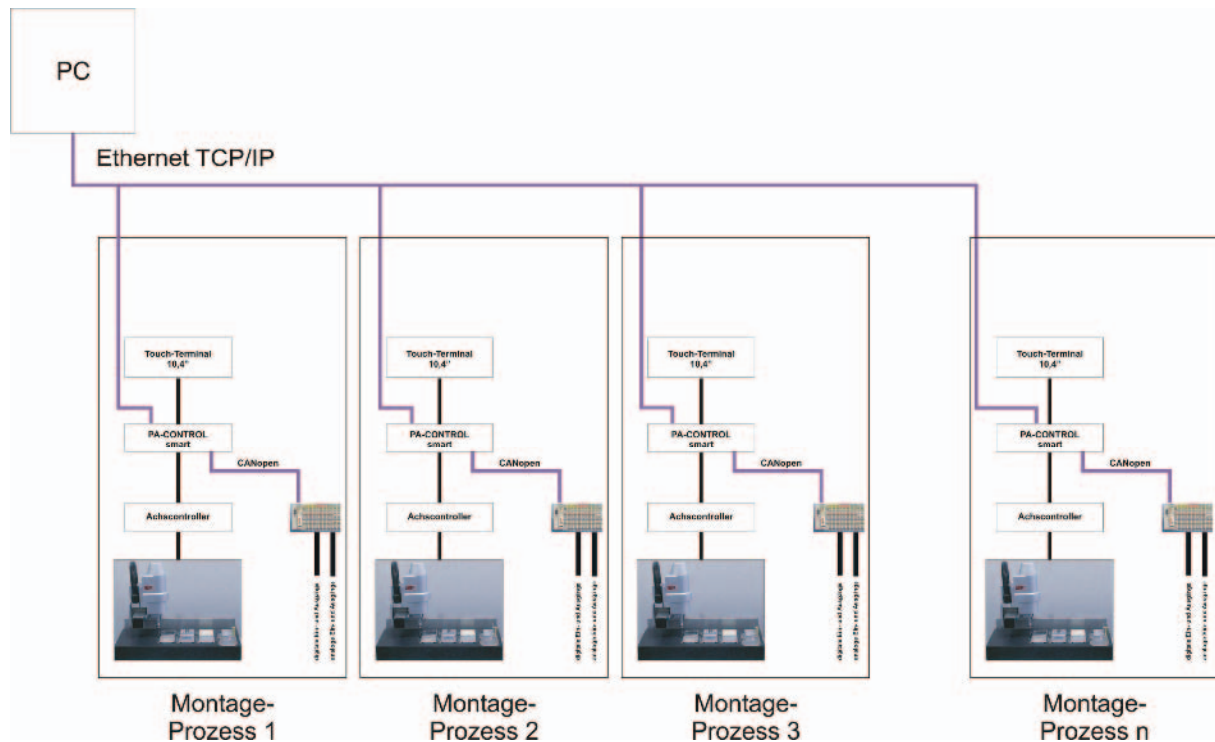


Bild 6-5: Automatisierungskonzept für Verkettete Stationen

## 6.5 Zusammenfassung zur Tischfabrik

Im Projekt Mikro-FEMOS ist es gelungen eine modulare erweiterbare Montagemaschine für kleinste Bauteile zur Serienreife zu bringen. Erstmals kann für die industrielle Fertigung auf eine Standardmontageanlage zurückgegriffen werden, bei der die Bauteilgröße bzw. Gewicht und Anlagengröße sowie Energieeinsatz in einem realistischen Verhältnisse zueinander stehen.

Die zur Mikromontage erforderliche höchste Reproduzierbarkeit wird ohne Umwege über Feinpositionierung direkt von der Anlage erreicht. Durch kleinsten Bauraum ist ein Betrieb im kostengünstigen Mini-Environment möglich. Durch die Zuführung der Komponenten mit DIN Werkstückträger ist eine flexible Anpassung des Equipments an veränderte Montageaufgaben gegeben. Durch Verkettung ist das Konzept auch für größere Stückzahlen erweiterbar (mitwachsend).

## 6.6 Ausblick

Das oben beschriebene Mikromontagemodul wurde zwischenzeitlich in die interne Konstruktion überführt, wo eine detaillierte Serienreife gemacht stattfindet. Es ist konkretes Ziel der IEF Werner GmbH, die entwickelte Technik so schnell wie möglich zur Serienreife zu führen und auf den Markt zu bringen.

Darüber hinaus wurden ausgehend von dem Mikro-FEMOS-Konzept auch weitergehende Forschungsaktivitäten dahingehend initiiert, dass zukünftig nicht nur montage-technische Prozesse, sondern auch komplexere mikrofögetechnische Verfahrensansätze auf Basis der Mikro-FEMOS-Ideenansätze angegangen werden sollen. Die oben beschriebene Vorbereitung der Architektur zur datentechnischen Verkettung ist dabei eine wichtige Grundvoraussetzung.

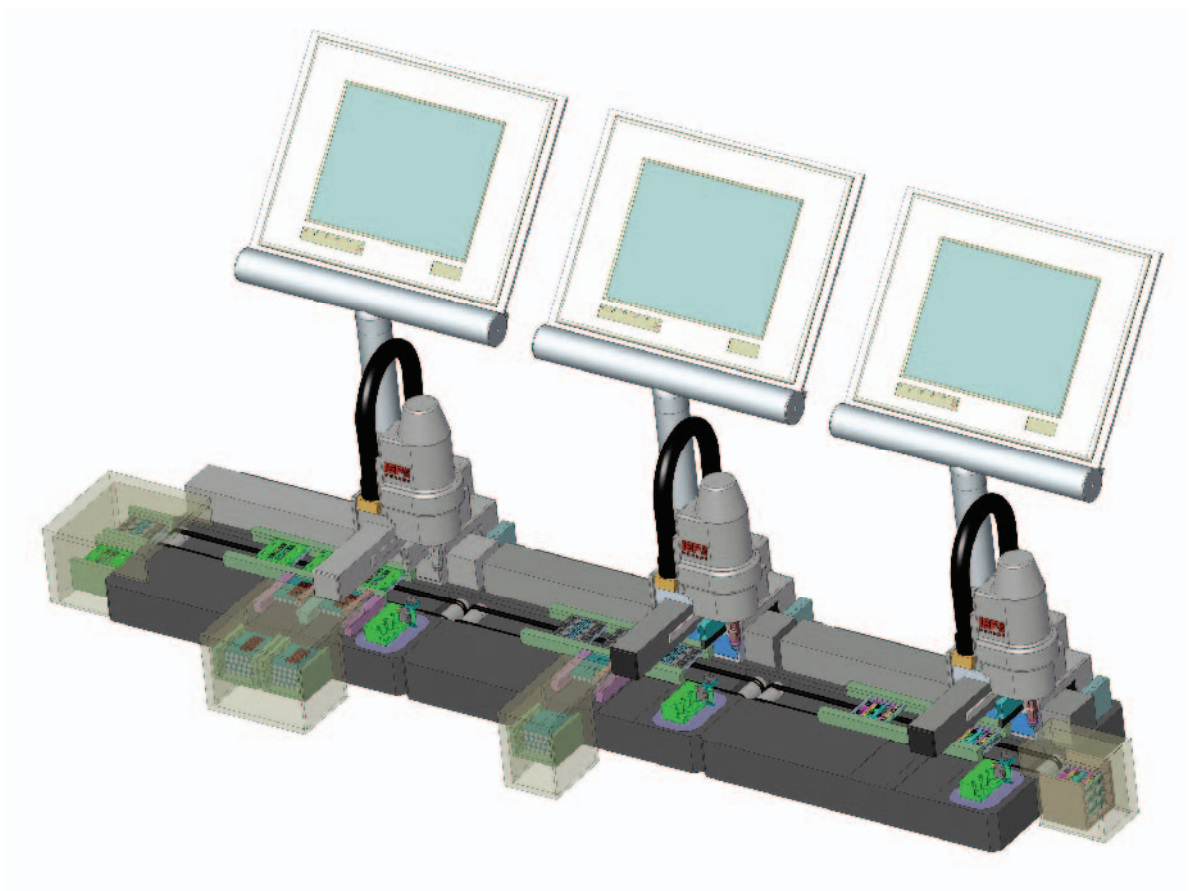


Bild 6-6: Verkettung von Montageprozessen auf Basis der Mikro-FEMOS-Architektur





## 7 Mikrooptisches Sensorsystem

Stautmeister, T.

### 7.1 Ausgangssituation

MICRO-OPTRONIC entwickelt und produziert laseroptische Distanzsensoren nach dem Triangulationsprinzip (Bild 7-1). Bisher wurden Sensoren für kleine und mittlere Stückzahlen entwickelt. Die Baugrößen dieser Sensoren liegen zwischen  $50 \times 65 \times 20$  und  $80 \times 130 \times 35$  mm<sup>3</sup> (H x B x T).

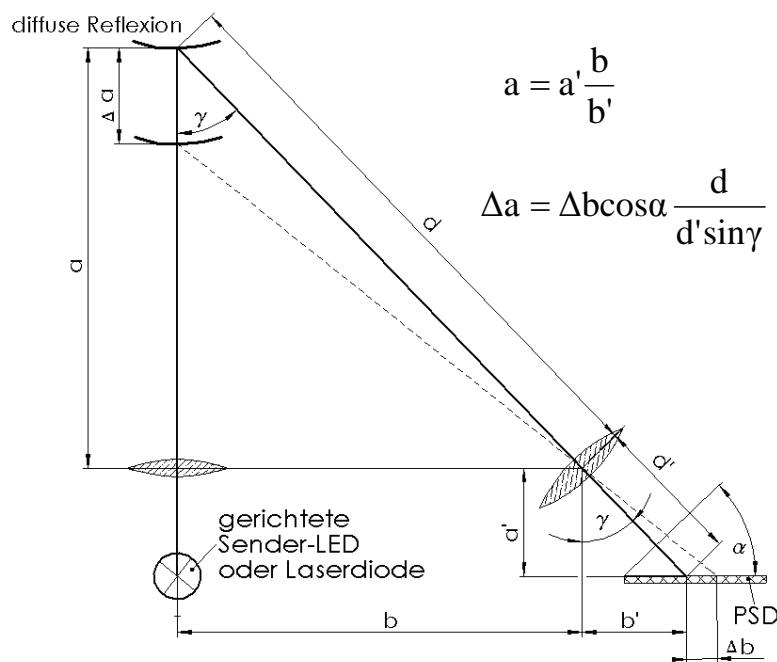


Bild 7-1: Laseroptischer Distanzsensor nach dem Triangulationsprinzip

Marktanalysen ergaben, dass für Anwendungen in der Prozessüberwachung, in der Automatisierungstechnik, im Maschinenbau für die Halbleiterindustrie aber auch im Automotivbereich ein Bedarf an großen Stückzahlen optischer Distanzsensoren mit kleineren Baugrößen bei ebenfalls deutlich geringeren Herstellungskosten besteht. Diese Analyse und eine Veröffentlichung [1] des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK), Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) zu einem Miniaturabstandssensor führten zum Entschluss unseres Unternehmens gemeinsam mit den Partnern des Projektes: **Mikro – Fertigungstechniken für hybride mikrooptische Sensoren (MikroFEMOS)** als Demonstrator im Projekt einen Miniatur-Triangulationssensor (MT) zu entwickeln und herzustellen.

Ziel des MikroFEMOS – Projektes war es, den Nachweis zu erbringen, dass optische Abstandssensoren als **mikrooptische Systeme** mit vergleichbaren Parametern wie konventionelle Abstandssensoren durch die Entwicklung einer verteilten Fertigung von mikrooptischen Baugruppen und deren Prüfung serienreif zu fertigen sind.

Gleichzeitig wollte sich MICRO-OPTRONIC damit Zugang zu Technologien schaffen, mit denen sehr preisgünstige Abstandssensoren für verschiedene Messbereiche gefertigt werden können.

Der MT soll aus folgenden Subsystemen bestehen (Bild 7-2):

- Mikrooptische Bank (**MOB**) mit Strahlformungs- und Lenkungselementen
- Elektrooptische Platine (**EOP**)

#### **Zusammen elektrooptisches Subsystem (EOSS)**

- Elektrooptisches Subsystem (EOSS) mit optischen und elektrischen Schnittstellen und Signalverarbeitung bildet ein mikrooptisches System (**MOS**)

#### **Mikrooptisches System(MOS) = Distanzsensor**



Bild 7-2: Subsysteme des MT

Aus den Marktrecherchen des Vertriebes u.a. auch aus einer Studie des Neu-Technikum-Buchs(NTB) [2] zu Lasertriangulationssensoren, wurde entnommen, dass Sensoren mit Messbereichen 1...10 mm in der Häufigkeit ihrer Anwendungen an 1. Stelle stehen. Deshalb wurde eine Entwicklung des MT für **zwei Messbereiche 1 mm und 10 mm Abstand** initiiert.

Das bedeutet, dass die Elektrooptische Platine (EOP) und die mikrooptische Bank (MOB) in zwei Layoutausführungen entstehen müssen. Im Rahmen der Designprüfung sollte entschieden werden inwieweit die Signalverarbeitung mit auf der EOP integriert werden kann. Hier sind die Einflüsse durch Temperatur aufgrund des Strombedarfs sowie der Einfluss auf die Baugröße und das Gewicht des Mikrooptischen Systems zu beachten.

## **7.2 Entwicklung eines Miniaturtriangulators**

### **7.2.1 Zieldaten für den Miniaturtriangulator**

Die technischen Zieldaten der zu entwickelnden Sensoren sind in Tabelle 7-1 dargestellt .

Technische Daten	Mikrotriangulator TYP 1	Mikrotriangulator TYP 2
Messbereich [mm]	1	10
Grundabstand MBA [mm]	10	20
Linearitätsfehler [% d. M.] *)	< ±0,5	
Auflösung [% d. M.] bei *) voller Messrate Mittelwert 100	<0,1<0,05 %	
Abtastrate [kHz]	100	
Temperaturstabilität des Nullpunkts [% d. M./K]	0,05	
Langzeitstabilität [% d. M. /Monat]	0,01	
Lichtquelle/Laserklasse	Laser 670 nm LK 2	
Zulässiges Fremdlicht [lx]	10.000 lx	
Lichtfleckdurchmesser [µm]	35 x 45 µm	40 x 45 µm
Winkelfehler bei 30° Verkip. 15° Verkip.	±2 % ±1 %	
Kabellänge	Max. 10 m	
Ausgang	Pulsweite oder 4...20 mA	
Gehäuseabmessungen	Max. Ø 15 x 30 mm	
Befestigung	Max. M15	
Betriebstemperatur	0...50°C	
Lagertemperatur	-20...70°C	
Stromversorgung	5 V ± 15 %	
Schutzgrad	IP 64	
*) Gilt für Referenztarget weiße Keramik		

Tabelle 7-1: Zielparameter des zu entwickelnden optischen Systems

## 7.2.2 Konzept für die Signalverarbeitung des Mikrotriangulators

Die kompakte Signalverarbeitung (Bild 7-3) des MT beinhaltet ein Laserdiodenchip(LD), ein separates Monitordiodenchip(MD), ein positionsempfindliches Photodiodenchip (PSD), Control-, Treiber- und

Schutzschaltungen, eine Spannungserzeugung und als Verarbeitungseinheit einen Mikrocontroller. Der Mikrocontroller realisiert die komplette digitale Signalverarbeitung von der AD – Wandlung der beiden Diodenströme des PSD bis zur analogen bzw. digitalen Ausgabe der berechneten und linearisierten Abstandswerte. Als Mikrocontroller wurde ein Controller aus der ATMEL – Reihe ausgewählt.

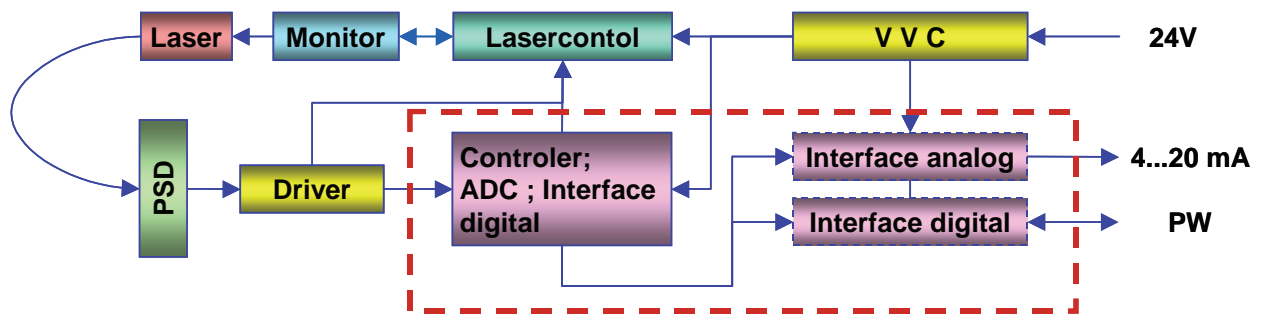


Bild 7-3: Signalverarbeitungskonzept

## 7.2.3 Entwicklung der Subsysteme

### Elektrooptische Platine (EOP)

Die Basis der EOP ist ein Keramikträger (Bild 7-4). Eine aufgedruckte Dickschichtstruktur realisiert die elektrischen Verbindungen zum Sender - LD, zur MD, zum PSD und zum Steckverbinder. Die EOP für MT – Typ 1 unterscheidet sich von Typ 2 nur in der Ablage des PSD. Für die genaue Lagepositionierung dieser Funktionsteile sind mittels Laserstrukturierung Markierzeichen in Dickfilmstrukturen auf den Keramik-Träger aufgebracht. Sie ermöglichen eine problemlose Realisierung der geforderten Lagetoleranzen von 200  $\mu\text{m}$  in x und y. Auf der EOP befindet sich ebenfalls die Si - Baseplate, welche über Positioniermarken auf ca. 50  $\mu\text{m}$  genau zu zwei Keramikträgerkanten ausgerichtet geklebt wird.

Dieser erste Aufbau wurde für den Test der mikrooptischen Strukturen entworfen und beinhaltet deshalb noch keine verarbeitende Elektronik.

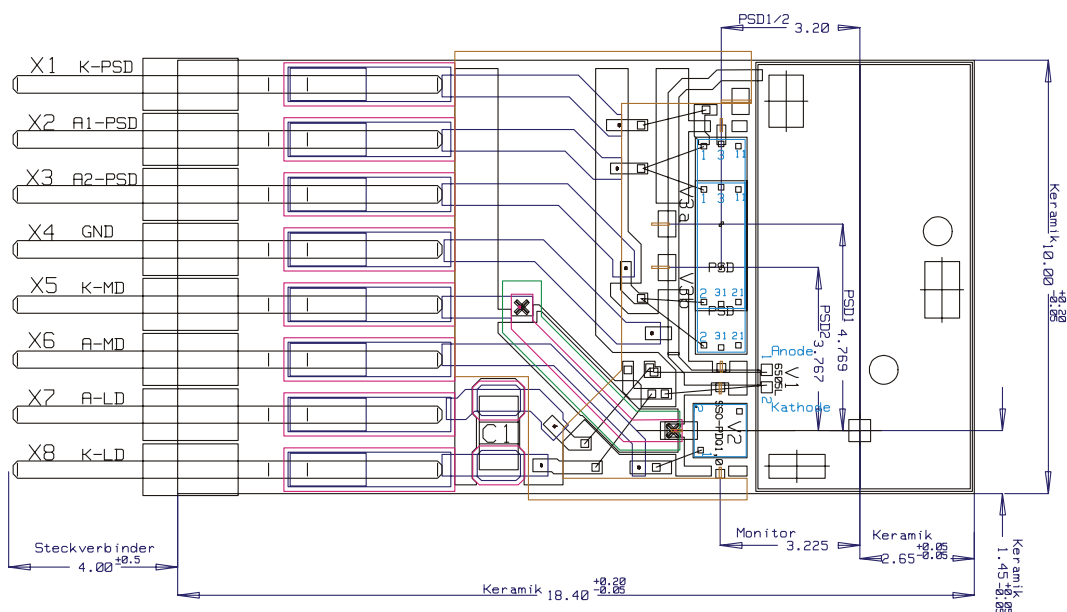


Bild 7-4: Elektrooptisches Subsystem

### Si – Baseplate

Die Si – Baseplate (Bild 7-5) hat folgende Funktionen:

- Schnittstelle zur Mikrooptischen Bank(MOB) über Ätzgruben mit Montagekugeln
- Aufnahme des Laserdiodenchips, Submount
- Elektrische Leitungen für Laserdiode
- Ableitung der Wärme von der Laserdiode

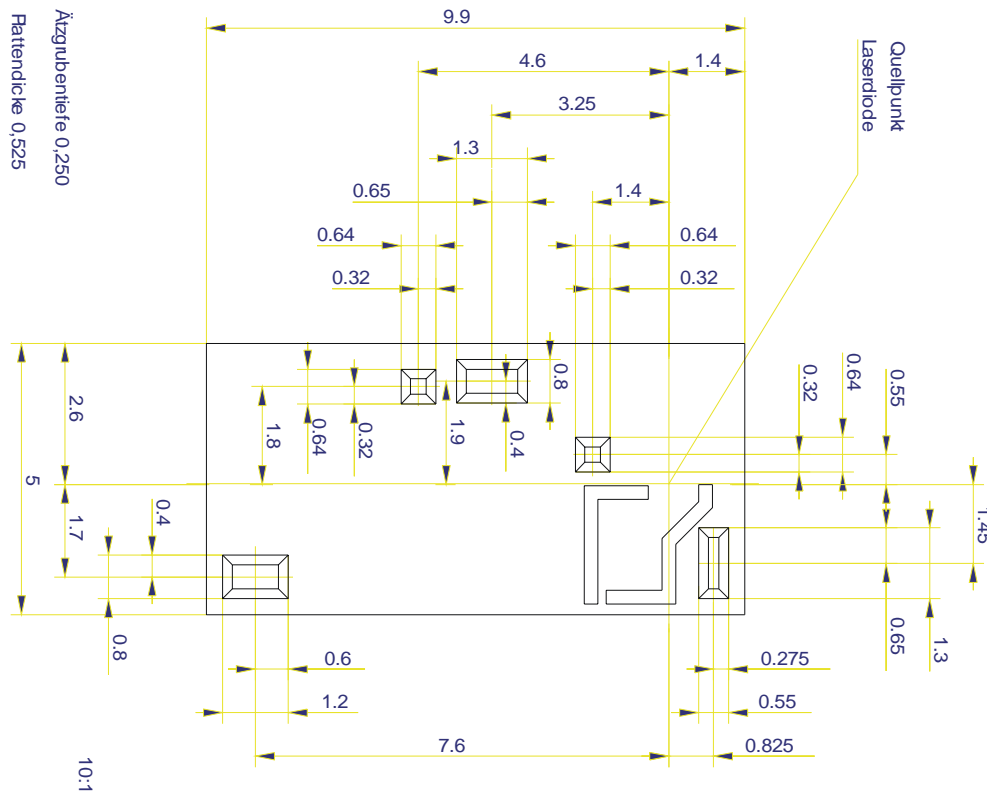


Bild 7-5: Si-Baseplate

Beim Prozess zur Herstellung der Ätzgruben handelt es sich um maskiertes zeitgesteuertes nasschemisches alkalisches anisotropes Tiefenätzen von 100 – Silizium.

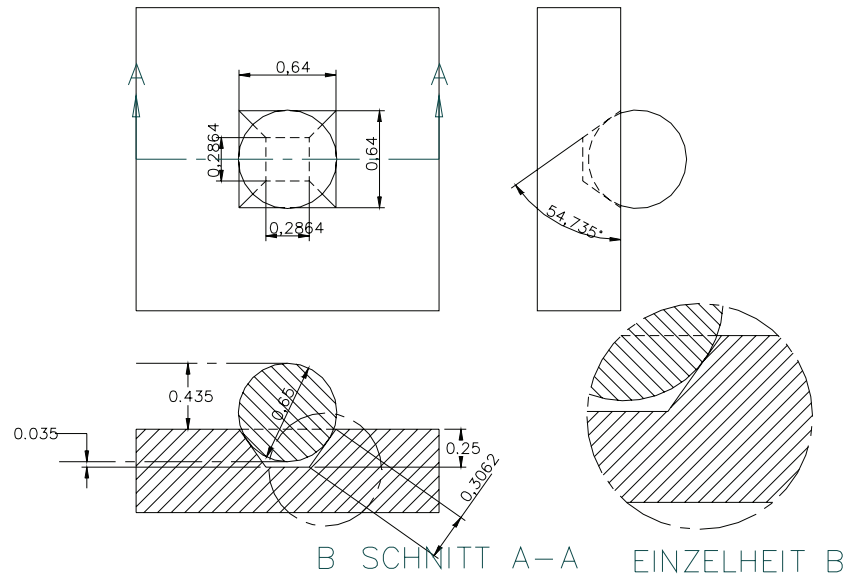


Bild 7-6: Konzept zur Passiv-Justage

Durch den Ätzprozess konnte eine Ablagegenauigkeit der Kugeln in den Ätzgruben von  $< 5 \mu\text{m}$  realisiert werden (Bild 7-6).

Bild 7-7 zeigt die Aufnahme einer Ätzgrube, speziell die Ätzkanten im Grund der Grube.

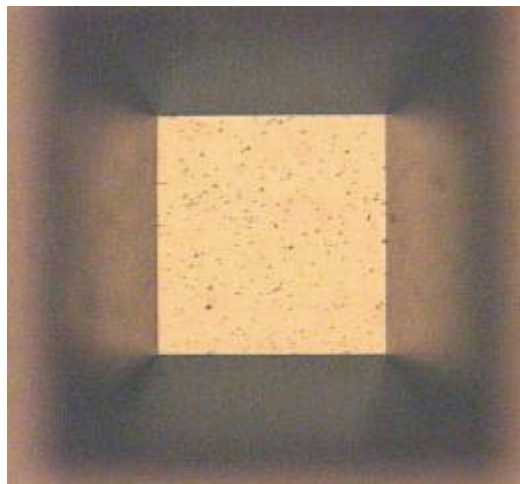


Bild 7-7: Ätzgrube

### Montage der Laserdiode auf der Si - Baseplate

Der Anpassung der z-Position der Laserquelle an die geforderte Höhe für die MOB dient ein metallisierter Silizium-Chip mit definierten geometrischen Dimensionen ( $700 \times 450 \times 250 \mu\text{m}^3$ ). Unter Berücksichtigung der Dicke des LD-Chips von  $100 \mu\text{m}$  und den Fügenschichtdicken zwischen Si-Baseplate und Submount sowie Submount und LD ergibt sich die geforderte z-Position des Quellpunkts der LD von  $380 \mu\text{m}$  über Oberfläche Baseplate mit einer Genauigkeit von  $+ 5 \mu\text{m}$  (

Bild 7-8 und Bild 7-9) .

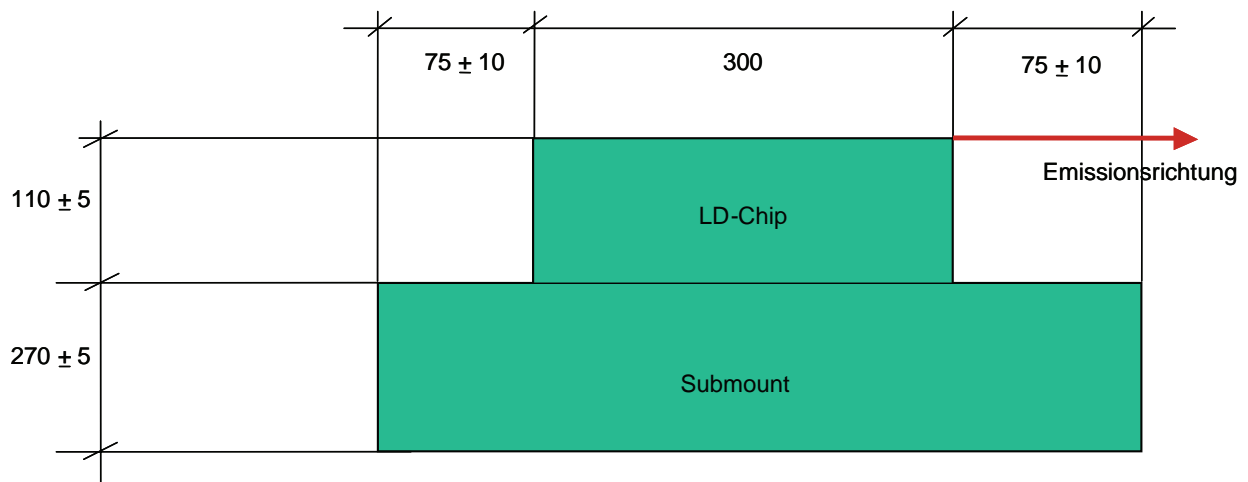


Bild 7-8: Berechnung der z-Position des Quellpunkts

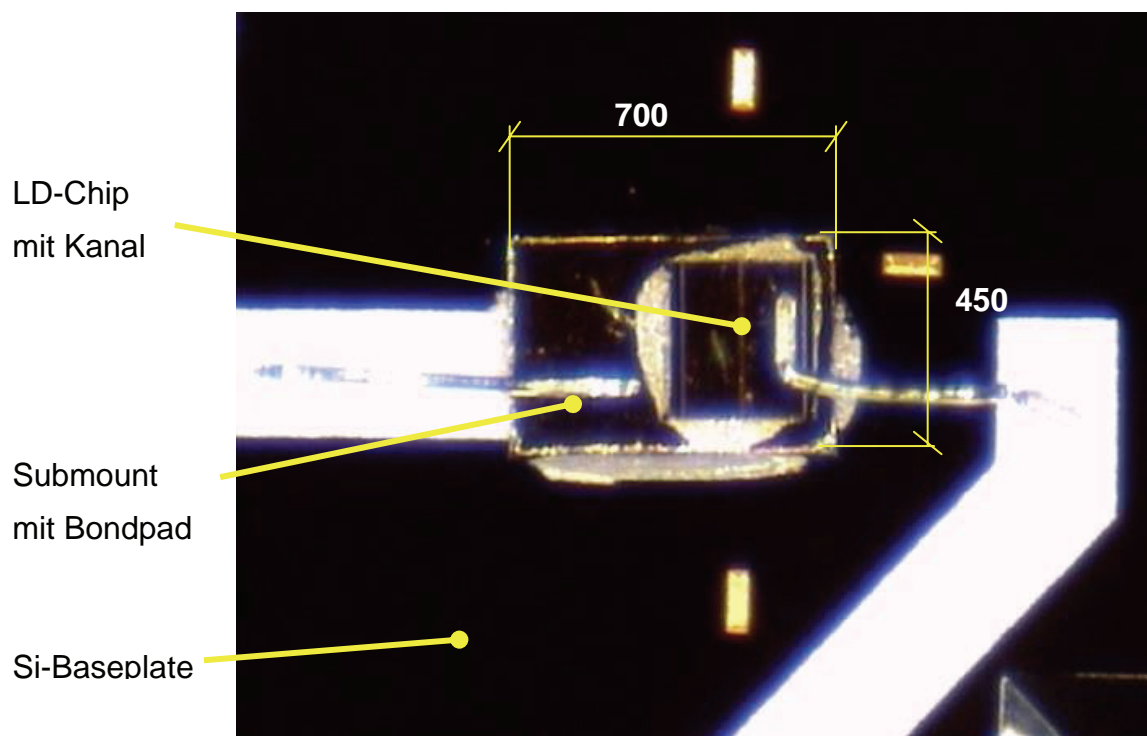


Bild 7-9: Erstes Muster

Die Anforderung an die laterale Lagegenauigkeit ( $x$ ,  $y$ ) des Quellpunkts des LD-Strahlers zu den Ätzstrukturen der Positionierpyramiden auf der Si-Baseplate wird mit  $< + 10 \mu\text{m}$  gefordert. Die Lage des Laser-Quellpunkts wird aus der Position der Wellenleiter-Kanal-Struktur auf der Oberfläche des LD-Chips (Bild 9) entnommen. Der Schnittpunkt des Wellenleiterkanals mit der vorderen LD-Kante wird beim Montageprozess mittels des Positioniersystems der für den Montageprozess eingesetzten Placeranlage „Fineplacer“ mit den geätzten Justiermarken auf der Oberfläche der Si-Baseplate zur Deckung gebracht (Bild 7-10). Da der Wellenleiterkanal nur auf der Chipoberseite sichtbar ist, ist die Lagepositionierung des Laser-Strahls zur Baseplate nur mit einer Face-up Montage des LD-Chips

möglich, obwohl aus Sicht des Wärmeabführung aus der aktiven Zone der LD eine Face-down Montage vorzuziehen wäre.

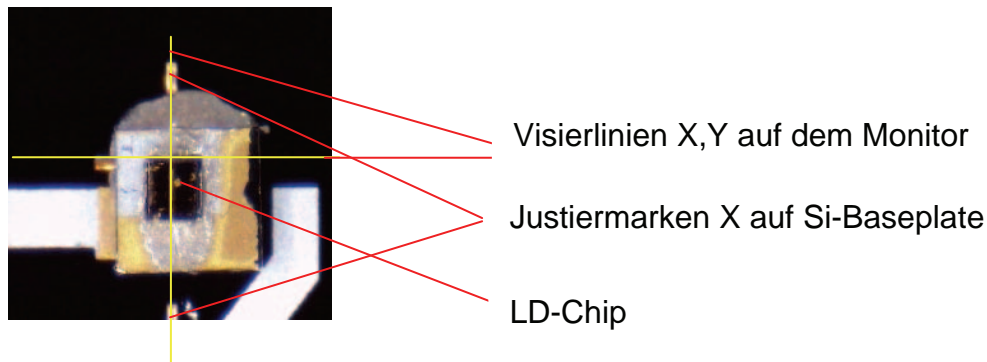


Bild 7-10: Positionierung

Der Fügeprozess umfasst das Kleben von

- LD-Chip auf Submount mittels Ag-gefülltem Leitkleber Typ Epotec H 20 E PFC.
- Submount auf Baseplate mit Kleber Elecolit 323
- Baseplate auf Keramik-Trägersubstrat mit Kleber

Die 700µm langen Submounts werden mit einer Hälfte zu ca. 300 µm in einer Klemmvorrichtung aus Federblech gehalten. Mit einem spitzen Spezialwerkzeug wird unter einem Mikroskoparbeitsplatz ein Klebstoffpunkt des Ag-Leitklebers Typ Elecolit 323 der Fa. Panacol-Elosol auf die freie, nicht von der Feder abgedeckten Hälfte der Submounts aufgebracht. Die erforderliche Klebstoffmenge wurde empirisch ermittelt, sie beträgt  $< 0,03 \text{ mm}^3$ . Auf diesen Klebstoffpunkt wird mittels einer Spezialpinzette die Laserdiode von  $300 \times 300 \times 100 \text{ µm}^3$  Kantenlänge manuell aufgesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass der höherenergetische Primärstrahl der Laserdiode in Vorwärtsrichtung austritt. Eine lagerichtige Abnahme vom Wafer ist dafür die Voraussetzung. Lageabweichungen zu den Aussenkanten des Submounts von einigen 10 µm sind bei diesem Fügeprozess ausreichend. Wesentlich ist die komplette Benetzung der Rückseite des Laserdiodenchips mit dem Ag-Leitkleber um eine optimale thermische Kopplung zwischen Submount und LD-Chip zu erreichen. Unter einem Fineplacer der Fa. Finetech, Berlin wird mit dem oben angegebenen Leitkleber, der auch für die Klebung der Laserdioden auf den Submounts verwendet wurde, die Baugruppe Submount-Laserdiode entsprechend den optischen Genauigkeitsforderungen von  $\leq \pm 10 \text{ µm}$  in x, y und phi zu den Positioniermarken auf der Si-Baseplate positioniert und durch Kleben fixiert.

Dazu wird die vorgefertigte Si-Baseplate in einer Spezialvorrichtung auf dem Fineplacer gehalten und unter das computergestützte Kamera-Sichtsystem des Placers gebracht. Mittels elektronischem Fadenkreuz und Feintrieben wird Überdeckung mit dem Markierungskreuz auf der Baseplate hergestellt. Nun erfolgt mittels eines Spezialwerkzeugs die Applikation einer geringen Menge des Leitklebers auf das Fadenkreuz auf die vorgesehene Position der Baseplate. Mit einer Spezialpinzette wird dann die vorgefertigte Baugruppe Laserdiode - Submount nach unten in diesen Klebstoffpunkt abgesetzt. Wegen der kleinen Abmessungen der Einzelteile erfordert dieser Vorgang hohes handwerkliches Geschick. Mit einer besonders spitz geschliffenen Nadel wird die Gruppe angedrückt und der unter dem



Mikroskop sichtbare Wellenleiterkanal der Laserdiode zur Lage des Fadenkreuzes ausgerichtet. Für die Forderungen der optischen Funktion müssen sich der Quellpunkt der höher energetischen Seite der Laserdiode und der Kreuzungspunkt der geätzten Markierungen auf der Baseplate mit einer Genauigkeit  $\leq 10 \mu\text{m}$  überdecken. Abschließend erfolgt die Klebstoffaushärtung im Temperofen (2h,  $80^\circ\text{C}$ ).

Das Erstellen des Layouts der EOP und der Si-Baseplate incl. deren Fertigung sowie die Realisierung der Montage der Laserdiode incl. der Berechnung und experimentellen Überprüfung und Anpassung der für die Wärmeabführung notwendigen Größe des Submounts erfolgte im Unterauftrag unter der Annahme, dass derartige elektro-optische Zukaufteile ohne größere Probleme durch Übernahme von Technologien aus der Elektronikfertigung hergestellt werden können.

### MOB

Die Entwicklung der MOB erfolgte nach Vorgaben aus den Zieldaten durch das FZK/IMT. (Die weitere Beschreibung ist unter Abschnitt 2.5 zu finden.) Durch zwei unterschiedliche Layouts der MOB werden die beiden MT – Typen 1 und 2 realisiert

### Sensorgehäuse

Für die Aufnahme des MOS wurden zwei Gehäusevarianten entworfen, die Dimensionen aufweisen, welche die Aufnahme von MOS mit verarbeitender Elektronik gestatten (Bild 7-11 und Bild 7-12).



Bild 7-11: Bauform 8 x 12 x 35 mm<sup>3</sup> (H x B x T)



Bild 7-12: Bauform M16 x 30

Die Form der Gehäuse entspricht zwei häufigen Einbauvarianten im Maschinenbau und in der Automatisierungstechnik, Durchwandmontage und Aufwandmontage.

### 7.2.4 Ergebnisse

In Bild 7-13 und Bild 7-14 sind die beiden Subkomponenten des miniaturisierten Abstandssensors dargestellt. Bild 7-13 zeigt das montierte elektro-optische Subsystem (EOSS), das durch einfache Fügetechnik der beiden Elemente zusammengesetzt wurde.

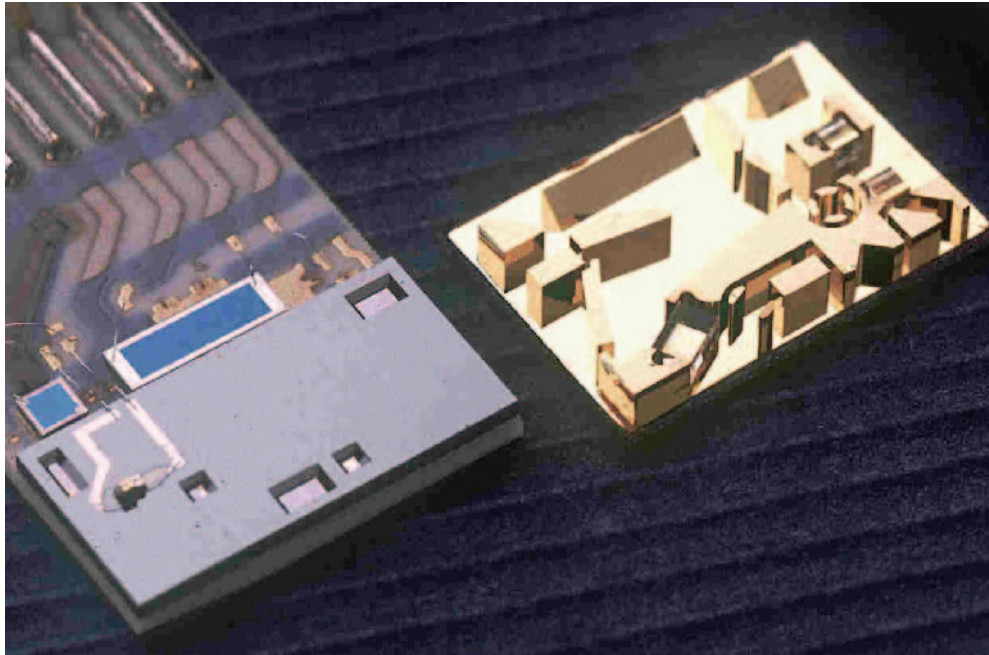


Bild 7-13: EOSS und MOB (Typ 1) nicht montiert

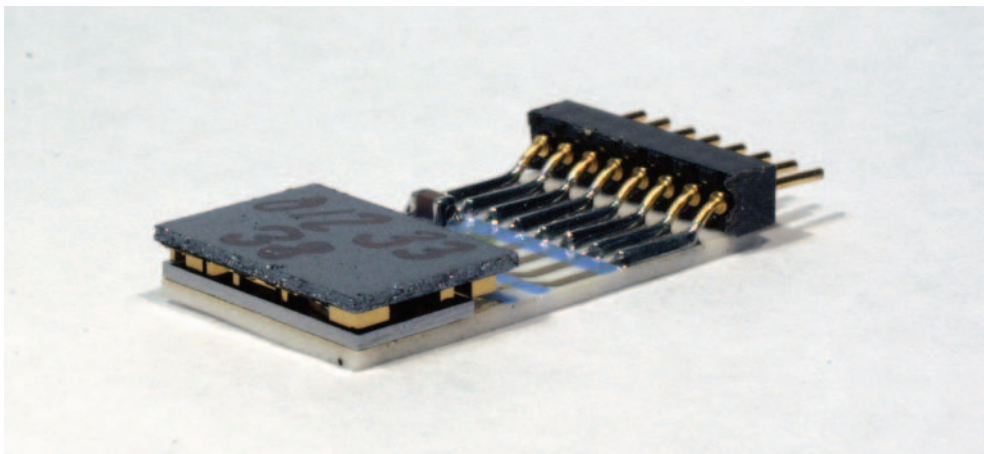


Bild 7-14: MOS (EOSS und MOB montiert)

An den hergestellten Prototypen wurden beim Projektpartner am IMT Testmessung zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Sensoren durchgeführt. Die Labormessungen erfolgen statisch und das Referenzobjekt ist weißes Standard-Photopapier.

Im Bild 15 ist eine Abstandsmessung von Sensor Typ 1 zu sehen. In der linken Grafik sind die Komplementärsignale der verstärkten PSD-Ausgangsströme aufgetragen und mit theoretischen Werten verglichen (gestrichelter Kurvenzug). Im Diagramm, rechts, sind die PSD-Signale als normierte Kurve (Differenz dividiert durch die Summe) dargestellt. Im Idealfall verläuft die Normierung linear. Die Abweichung ist als relativer Linearitätsfehler aufgetragen und beträgt hier etwa  $\pm 0.5\%$  innerhalb des Messbereichs von 1 mm. Der Messabstand liegt bei 10 mm bis 11 mm. Der Signalhub am Sensor Typ 2 fällt wegen des größeren Messabstands von 20 mm – 30 mm um den Faktor 10 geringer aus. Dies entspricht auch den theoretisch berechneten Signalen, wenn die relativ geringen

Reflexionskoeffizienten der realisierten Spiegelschichten an den Prototypensensoren dieser Berechnung zu Grunde liegen.

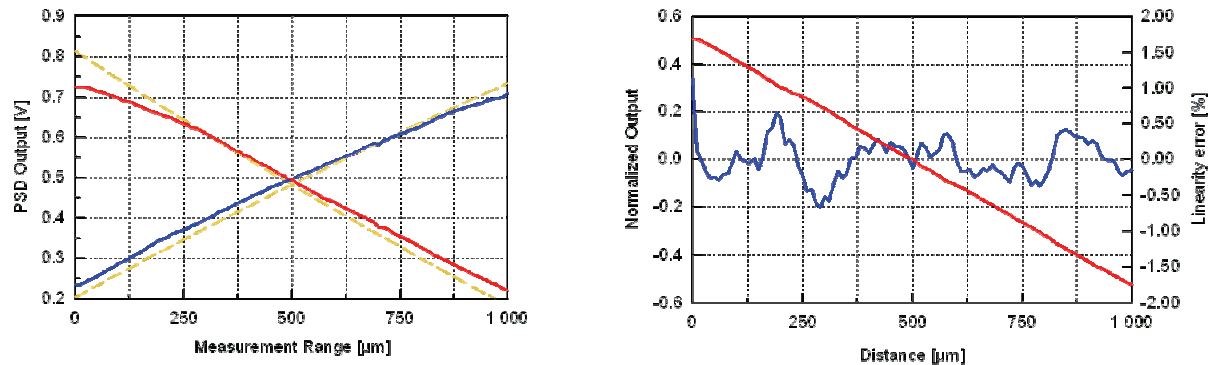


Bild 7-15: Messergebnis Abstandsmessung EOSS Typ 1 (MB 1 mm) gegen weißes Photopapier (Quelle IMT); links: PSD-Signale, rechts: normierte Signalausgabe (rot) und Linearitätsfehler (blau).

Die Messungen mit der Laborelektronik sind idealisiert; so können Störlichtanteile am PSD-Detektor einzeln kompensiert werden und die Signalausgabe ist nur gering verstärkt und keinen speziellen Analogausgangswerten angepasst. Die innerhalb des Projekts erfolgten Abstandsmessungen am IMT dienen in erster Linie zum Vergleich der Sensoren untereinander und um erkannte Fehlfunktionen an der Optoelektronik oder Störlicht am PSD zu beschreiben und gegebenenfalls durch ein Redesign zu beseitigen. Sie erlauben noch keine gesicherten Aussagen über das dynamische Messverhalten, die Auflösung und die Genauigkeit insbesondere bei der Verwendung unterschiedlicher Materialien des Messobjekts. Weitere Ergebnisse wurden in [3] veröffentlicht.

Die technischen Ergebnisse zeigen, dass mit dem modularen Aufbau und dem Konzept der verteilten Fertigung unter Anwendung mikrotechnischer Methoden prinzipiell Abstandssensoren, insbesondere für kurze Messabstände, hergestellt werden können. Auch wurde vom Projektpartner FZK weiteres Verbesserungspotential aufgezeigt. Eine Umsetzung in eine Fertigung erfordert allerdings die Umsetzung dieses Verbesserungspotentials sowie die Sicherstellung anderer technischer Voraussetzungen. Eine veränderte Marktsituation und eine Analyse der Kosten auf der Basis des derzeitigen Aufbaus und der vorhandenen Fertigungstechnik stellt leider die zu Beginn zu erwartende Marktdurchdringung in Frage.

**Technische Gründe:** Die Beschaffung von Laserdiodenchips in geprüfter Ausführung ist nicht möglich aufgrund der von uns prognostizierten Stückzahlen, so dass mit diesem Bauelement die Ausbeute der EOP's derzeit nur bei 90 % liegt. Weitere Bearbeitungsschritte bei der Fertigung der EOP reduzieren die Ausbeute noch einmal auf insgesamt 80 % (aufgrund der geringen Anzahl bisher gefertigter EOP's sind dies nur ungefähre Werte).

Nach wie vor muss die Verlustwärmeabführung an der Laserdiode verbessert werden, die Ergebnisse zeigen, dass die Diode ab einer bestimmten Leistung im Wärmestau arbeitet, dies führt zur vorzeitigen Alterung, d.h. die Lebensdauer des Sensors wird dadurch geringer (Bild 7-16).

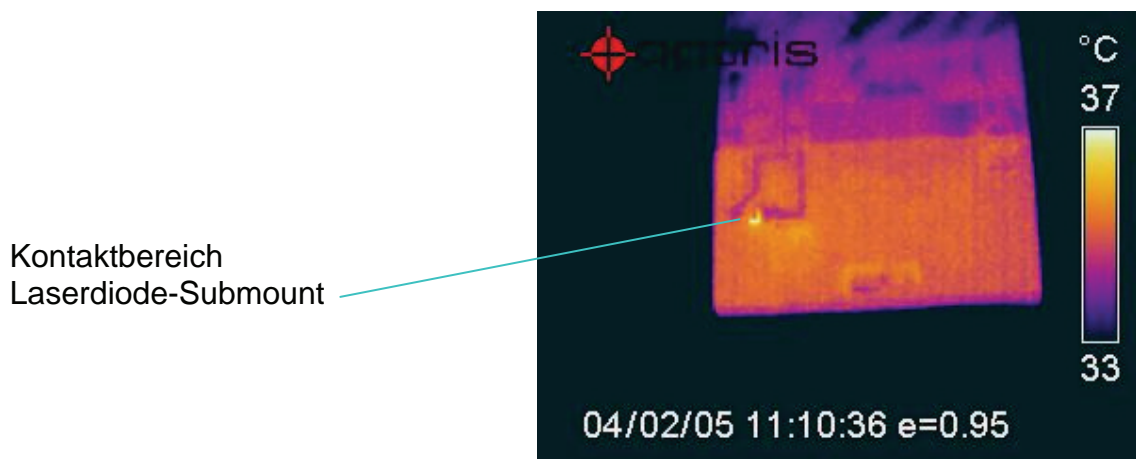


Bild 7-16: Wärmebild des Kontaktbereichs der Laserdiode

Temperaturverteilung auf EOP wenn Laser in Betrieb ohne aufgesetzte MOB, deutlich überhitzter Bereich an der Laserdiode

Beide Unzulänglichkeiten erfordern ein komplett neues Konzept für den Aufbau, der ursprünglich als Zulieferteil angesehenen EOP, dessen Umsetzung mit erheblichen Entwicklungskosten verknüpft ist.

Weiter ist die Reflexion an den Spiegeln der MOB noch zu verbessern, wobei gleichzeitig der Streulichtanteil innerhalb der MOB zu reduzieren ist insbesondere beim Typ 2.

Durch den hohen Streulichtanteil (ca. 100 mV) am Typ 1 kann nur beim Messen gegen weiße Objekte die geforderte Auflösung von 10 Bit erreicht werden. Am EOSS Typ 2 ist der Streulichtanteil deutlich höher (einige Volt), hier kann auch gegen weiße Objekte nicht praxistgerecht gemessen werden, d.h. eine Offsetkompensation ist hier beim Einsatz anwendungsnaher Signalelektronik ohne Erfolg. Der hohe Streulichtanteil ist teilweise durch Unzulänglichkeiten am Design begründet und ließe sich in einem Redesign sicherlich reduzieren. Ob dies ausreichend ist, müsste in einem zusätzlichen Entwicklungsschritt überprüft werden. Um eine hochreflektierende Schicht zu erzeugen ist es notwendig, dielektrische Schichten auf den polymeren Mikrostrukturen aufzubringen. Dieser Prozess ist derzeit nicht zuverlässig und mit der geforderten Qualität verfügbar; eine umfangreiche und kostenintensive Neu- bzw. Weiterentwicklung ist hier notwendig.

Prinzipiell weisen beide Typen Mehrdeutigkeiten des Messbereichs auf, d.h. ein Einrichten des Sensors ist nur durch genaues Ausmessen des lt. Datenblatt vorgegebenen Grundabstandes möglich, letztlich in der Applikation aber nicht praktikabel. Dieses Problem kann bei einem Redesign deutlich reduziert werden.

Die Kosten für die angesprochenen Entwicklungsarbeiten liegen im 6-stelligen Bereich. Diese Kosten müssten später auf die Sensoren umgeschlagen werden, was deren Preis bei den mittleren Stückzahlen unverhältnismäßig erhöht und unter den im Folgenden diskutierten kaufmännischen und Marktgesichtspunkten keinen Sinn macht.

**Kaufmännische Gründe:** Die derzeitigen Berechnungen für die Herstellungskosten bei 10.000 St liegen liegt um den Faktor 3 höher als die Zielstellung.

Diskussionen in den MikroFEMOS – Treffen zeigten bisher keine Wege auf, die Kosten ohne erhebliche Zusatzentwicklungen zu senken.

**Marktsituation:** Mittlerweile gibt es am Markt Sensoren die bei Einzelstückzahlen preiswerter sind und auch in vergleichbarer Baugröße angeboten werden und deren Aufbau mit herkömmlicher Technologie (Standardoptik) erfolgt. Vorteil dieser Sensoren ist auch noch, dass sie empfindlicher sind und mit größeren Messabständen arbeiten.

Weitere Ergebnisse wurden in [3] veröffentlicht.

### 7.3 Verwertung

Die teilautomatisierte Fertigung miniaturisierter optischer Komponenten bis zum Abstandssensor war für MICRO-OPTRONIC ein wichtiger Einstieg in die mögliche Mengenfertigung optoelektronischer Abstandssensoren. Die mit dem Beispiel Abstandssensor gewonnenen Erkenntnisse können auch für andere Firmen und Industriezweige, die sich mit der Montage von Mikrokomponenten beschäftigen, interessant sein.

Aufgrund obiger Ausführungen ist der im Projekt hergestellte Sensor ohne zusätzlichen Entwicklungsaufwand nicht marktfähig. Eine Verwertung der Projektergebnisse hinsichtlich des Sensors durch MICRO OPTRONIC erfolgt somit nicht. Trotzdem konnten aus den erreichten Ergebnissen wichtige Erkenntnisse für die Miniaturisierung von optischen Abstandssensoren gewonnen werden. Diese werden in neuen Entwicklungen bei MICRO-OPTRONIC einfließen und verwertet.

### 7.4 Literatur

[1] T. Oka, H. Nkajima, A. Shiratsuki, M. Tsugai, U. Wallrabe, U. Hollenbach, J. Mohr, P. Krippner, "Development of a MICRO-OPTICAL Distance Sensor with electrical I/O Interface", TRANSDUCERS '01 EUROSENSORS XV, The 11<sup>th</sup> International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, June 10-14, 2001

[2] Interstaatliche Fachhochschule für Technik Buchs, Labor Qualitätstechnologie "Lasertriangulationssensoren – Marktanalyse 2000"

[3] U. Hollenbach, J. Mohr, T. Stautmeister, "Micro Optical Distance Sensor – Actual Results from Prototypes", Proc. of SENSOR 2005 Conf., Vol. I, pp. 79-84, May 2005



## 8. Modulare Fertigung

Kadel, K.

### 8.1 Anforderung an die Produktion wettbewerbsfähiger, mikrooptischer Produkte

Für eine modulare Fertigung mikrooptischer Produkte mit guter Qualität und Ausbeute sind eine Reihe von Anforderungen an die Umgebungsbedingungen und den Fertigungsprozess zu erfüllen, die im Folgenden erläutert werden.

Um die mit modularer Fertigung erzielbaren Produkteigenschaften und Fertigungsergebnisse zu demonstrieren, wurde als Produktbeispiel ein Abstandssensor nach dem Triangulationsprinzip ausgewählt. Anhand dieses Produktbeispiels werden durch die Fertigung von Prototypen die Produkteigenschaften und Fertigungsparameter demonstriert.

Folgende Anforderungen an die Produktion sind zu erfüllen:

#### ▫ Verifizierte Produkteigenschaften durch Prototypen

- definierte Produkthanforderungen
- definierte Material- und Toleranzanforderungen

#### ▫ Produktionsspezifische Fertigungsumgebungen und -abläufe

Aufgrund der vielen beteiligten Flächen und der optischen Komponenten zur Strahlführung muss die Partikelkontamination durch spezielle Fertigungs- und Montagebedingungen begrenzt werden.

Bild 8-1 zeigt den zu kontrollierenden Bereich von Partikeln für eine effektive Fertigung. Dieser reicht vom Sub- $\mu$ -Bereich, zur Vermeidung von Belägen (Ölnebel,  $\lambda$ -Viertelschichten, etc.), bis zu Partikeln von einigen Mikrometern Durchmesser (Stäube).

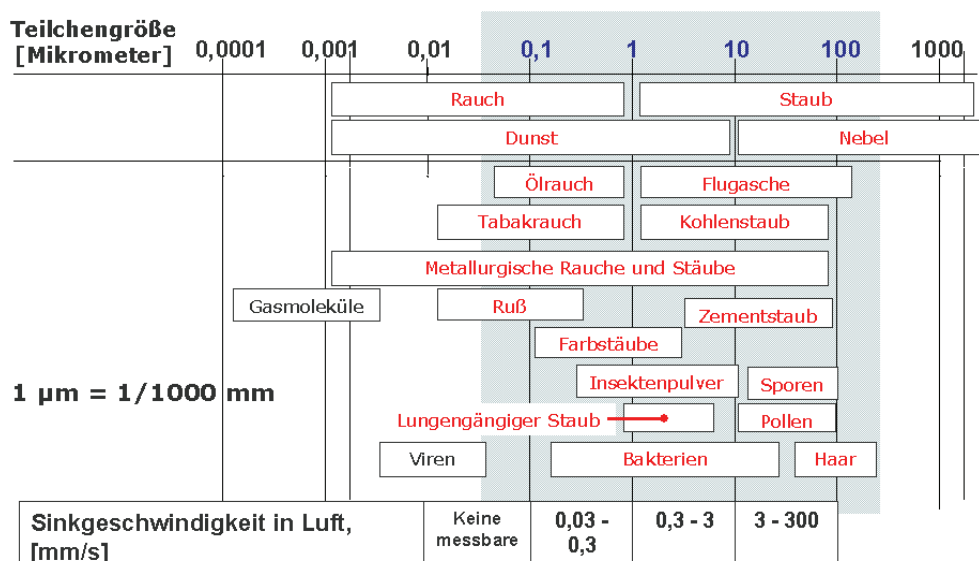


Bild 8-1: Partikelarten, Partikelgrößen und Sinkgeschwindigkeit verschiedener Partikel. Der zu kontrollierende Bereich ist unterlegt.

Die Fertigung und Handhabung der optischen Komponenten erfordert daher entsprechend kontrollierte Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise eine Flow-Box oder eine Fertigung in speziellen Reinräumen, damit auch Partikel verdrängt werden können, die nicht mehr zu Boden sinken. Nur durch die Anpassung an die Fertigungsumgebung und die Abläufe kann eine entsprechende ausbeuteoptimierte Fertigung erzielt werden.

▫ **Stabile mikrotechnische Produktionsprozesse**

Ein weiterer wesentlicher Punkt für die Herstellung wettbewerbsfähiger mikrooptischer Bauteile ist das Vorhandensein stabiler mikrotechnischer Produktionsprozesse. Speziell für den Abstandssensor bedeutet dies eine zyklusoptimierte Heißprägetechnik sowie haftfeste, hochreflektierende und langzeit-stabile Beschichtungen.

▫ **Zuverlässige Verbindungstechnik**

Ein weiterer Punkt ist das Vorhandensein einer zuverlässigen mechanisierten und automatisierten Verbindungstechnik für die Montage der Mikrostrukturen, der Platinen, weiterer miniaturisierten Bauteile, der optischen Komponenten sowie für die Integration im Gehäuse zum Komplettsystem.

▫ **Einsatz einer qualifizierten, flexiblen sowie stückzahloptimierten Mikromontageanlage**

Dies ist die Basis einer effizienten kostenoptimierten Fertigung.

▫ **Aussagekräftige Prüftechnik**

Darüber hinaus ist noch eine fertigungsintegrierte, effektive und aussagekräftige Prüftechnik notwendig, um die Produktionskosten zu begrenzen.

## **8.2 Entwicklung einer durchgängigen Fertigungslinie**

Um ein technisches und ökonomisches Optimum bei der modularen Fertigung zu erzielen, war es zwingend erforderlich, dass in dem Projekt Fertigungsgeräthehersteller mit den entsprechenden Komponentenherstellern und Systemintegratoren zusammenarbeiten.

Durch den modularen Aufbau der Fertigungskette (siehe Bild 8-2) mit eindeutig definierten Schnittstellen und Subsystemen hat das Projekt Modellcharakter, um aufzuzeigen, wie mittelständische Unternehmen als Hersteller und Zulieferer von Subsystemen einen Beitrag zur Fertigung von komplexen mikrooptischen Systemen leisten können.

Damit werden mikrotechnische Fertigungsmethoden sowohl für weitere Sensorfirmen als auch für Firmen anderer Branchen nutzbar.



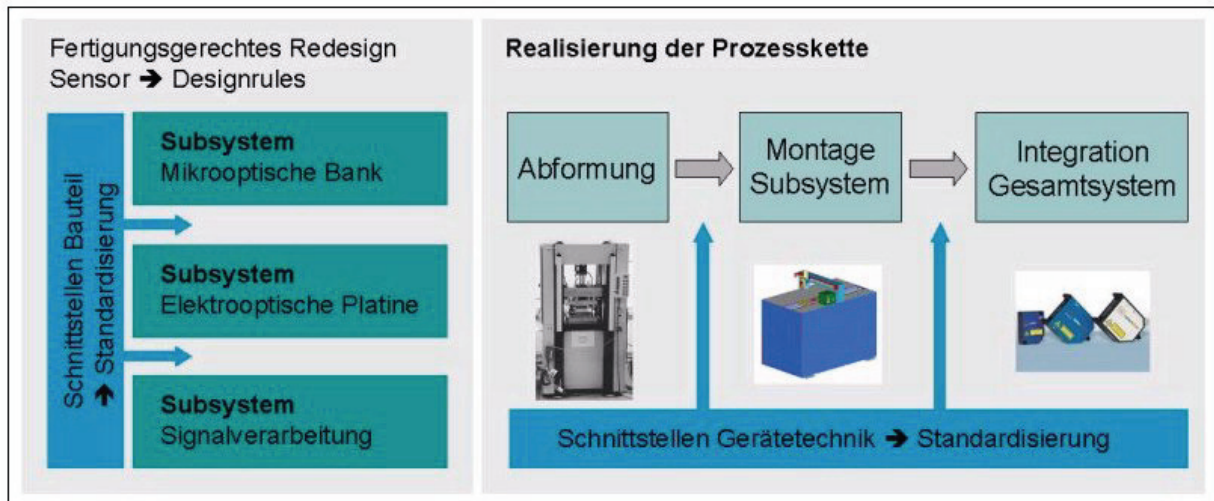


Bild 8-2: Modularer Aufbau der Fertigungskette

Der modulare Aufbau des Triangulationssensors aus mehreren funktionalen Subsystemen wird aus Bild 8-3 ersichtlich. Die Trennung in optische und elektrooptische Baugruppen sowie Elektronik erleichtert die Definition der Schnittstellen. Folgende Subsysteme wurden realisiert:

- die mikrooptische Aufbauplatte, kurz „mikrooptische Bank“ (MOB) mit integrierten Strahlformungselementen, wie Linsen, Prismen und Strahlteiler,
- die elektrooptische Platine (EOP) mit Sender-, Empfangs- und Kontrollioden
- sowie der Elektronik der Signalverarbeitung.

Zusammengefügt ergeben sich daraus mikrooptische und elektrooptische Baugruppen.

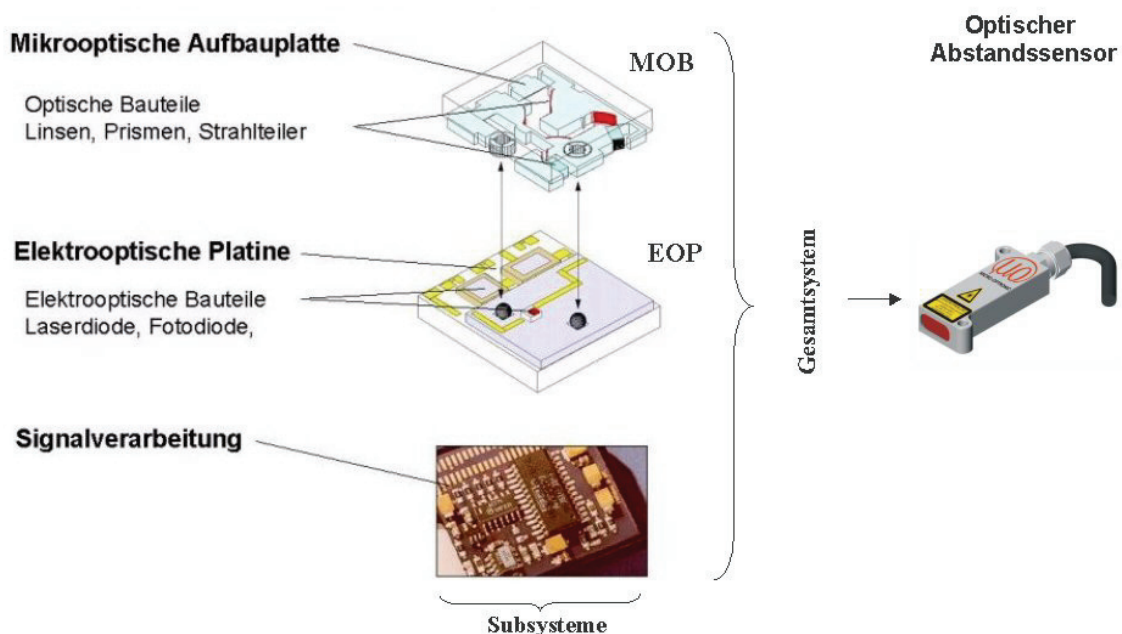


Bild 8-3: Modularer Aufbau des Sensorsystems

### 8.3 Fertigungsablauf

Der Fertigungsablauf für die mikrooptische Bank ist in Bild 8-4 dargestellt. Er beginnt mit der Herstellung eines Formeinsatzes für die Herstellung einer geeigneten Stückzahl im Nutzen. Aus einem Prägerohling aus Polycarbonat oder PMMA wird auf einem Wafer die Struktur dieses Formeinsatzes repliziert.

Nach einer Zwischenprüfung (ZP) erfolgt die Metallisierung zur Herstellung der reflektiven Oberflächen.

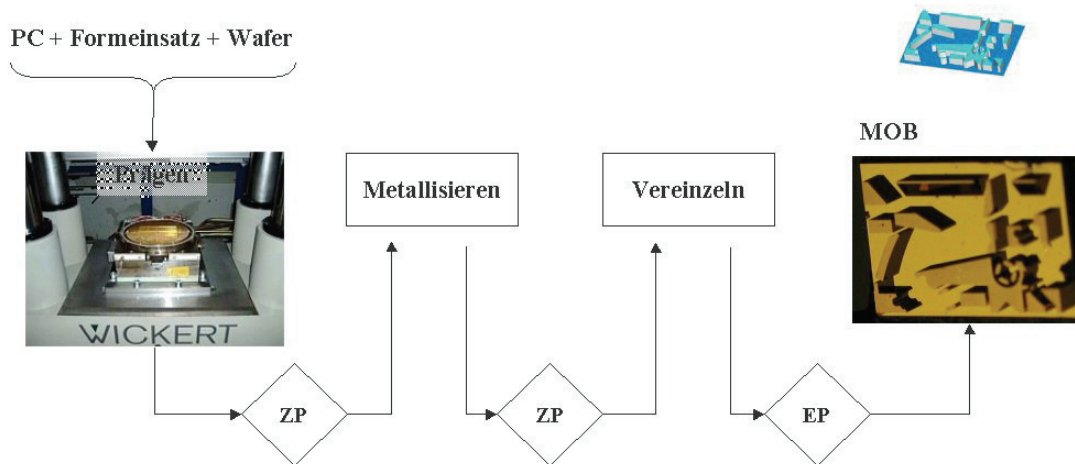


Bild 8-4: Herstellung der mikrooptischen Bank (MOB)

Die im mehrfachen Nutzen (hier 16 Stück) hergestellten und beschichteten MOB's werden dann nach einer weiteren Zwischenprüfung getrennt und geprüft. Nach der Endprüfung (EP) liegen die MOB's für die weitere Bearbeitung bereit.

Für die folgenden Montagschritte auf dem Mikromontageautomat werden Standard-2" Werkstückträger verwendet (siehe Bild 8-5).

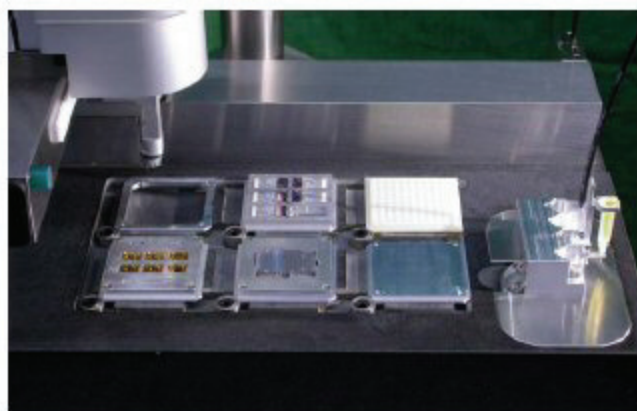


Bild 8-5: Mikromontageautomat mit 2" Werkstückträgern

Die elektrooptische Platine (EOP) entsteht aus einer Elektronikplatine, auf der ein Stück mikrostrukturiertes Silizium montiert wird mit den notwendigen Ätzgruben für

die Kugelmontage sowie Leitungsbahnen für die Laserdioden. Die Montage der Laserdiode erfolgt über ein Submount positioniert auf dem Silizium (siehe Kapitel 7). Die Montage der EOP war nicht Teil dieses Projektes, da diese als Zukaufteil realisiert werden sollten.

Für die Herstellung des elektrooptischen Subsystems (EOSS, siehe Bild 8-6) wird die mikrooptische Bank (MOB) durch das Einsetzen von drei Linsen, die EOP durch das Einsetzen von zwei Kugeln für den folgenden Montageschritt komplettiert.

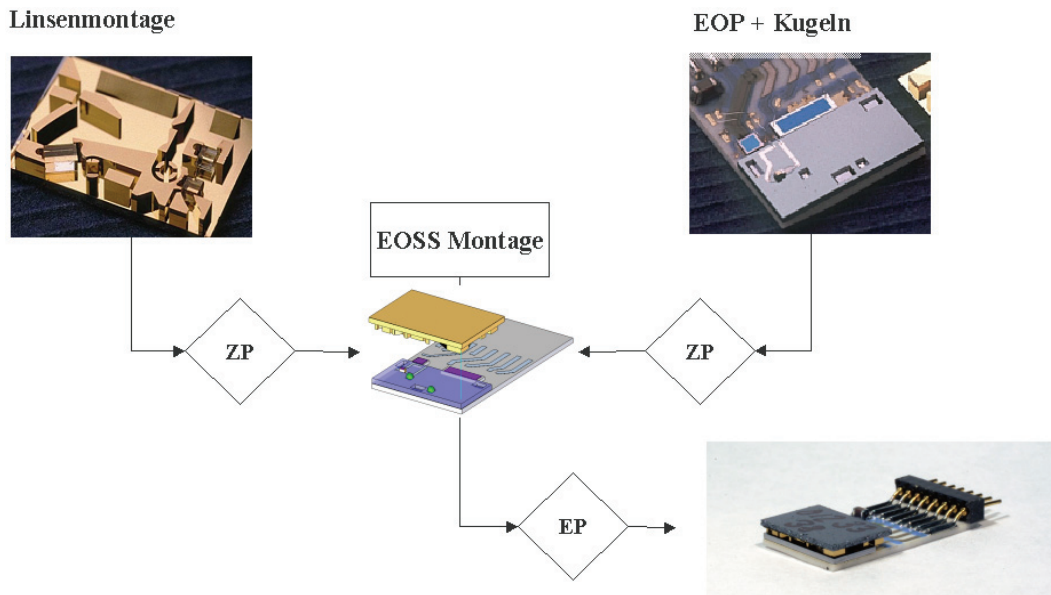


Bild 8-6: Herstellung des elektrooptischen Subsystems (EOSS)

Diese beiden Teile werden jeweils überprüft und zu dem elektrooptischen Subsystem verbunden, wobei die beiden in die EOP eingesetzten Kugeln der passiven Justierung dienen. Nach einer Endprüfung der EOSS steht diese für den Einbau in das Gehäuse zur Verfügung.

#### 8.4 Kennzahlen der Fertigung

In der Bild 8-7 sind die Kennzahlen für die modulare Fertigung dargestellt. Der Wert für die Ausbeute der EOSS Endmontage ist eine Annahme, die zu dem Zeitpunkt der Drucklegung dieses Artikels noch nicht in der Modellfertigung verifiziert werden konnte, sondern aus dem Prototyping abgeleitet wurde.

Die dargestellten Zykluszeiten sind die Bearbeitungszeiten ohne Rüstzeiten. Die Ausbeute der MOB reduziert sich auf ca. 55 %, da bis zu diesem Schritt die Fertigung im Nutzen erfolgt, fehlerhafte Bausteine also trotzdem metallisiert und vereinzelt werden.

Die Zykluszeit beim "MOB komplettieren" (Linsenmontage) beinhaltet ein einmaliges Reinigen des Dispensers sowie die Zeit für das Aushärten (0:40 min). Für die Montage der beiden kleinen Linsen wurden 1:25 min ermittelt, für die Montage der großen Linse 0:40 min.

<b>Prägen</b> Ausbeute: 90 % Zykluszeit: 10 min Stck/Zyklus: 16 Zeit/Stück: 0,6 min	<b>Metallisieren</b> Ausbeute: 98 % Zykluszeit: 60 min Stck/Zyklus: 352 Zeit/Stück: 0,2 min	<b>Vereinzeln</b> Ausbeute: 90 % Zykluszeit: 30 min Stck/Zyklus: 16 Zeit/Stück: 1,9 min	<b>Geprüfte MOB</b> Ausbeute: 55 % Zykluszeit: offen Stck/Zyklus: 1 Zeit/Stück: offen
<b>MOB Linsenmontage</b> Ausbeute: 98 % Zykluszeit: 0,7 min Stck/Zyklus: 3 Zeit/Stück: 3,5 min	<b>EOP Kugel-Montage</b> Ausbeute: 98 % Zykluszeit: 0,5 min Stck/Zyklus: 2 Zeit/Stück: 1,8 min	<b>EOSS Endmontage</b> Ausbeute: 98 % * Zykluszeit: 1:45 Stck/Zyklus: 1 Zeit/Stück: 1,8 min	<b>Gesamtausbeute</b> Ausbeute: 41 %

Bild 8-7: Kennzahlen der Fertigung

Die Zykluszeit bei der Kugelmontage setzt sich zusammen aus der Reinigung des Dispensers (0:35 min), der Kugelmontage (0:30 min) sowie dem Zeitaufwand für das Aushärten des Klebers (0:40 min)

Für die Montage der EOSS ergeben sich 0:35 min für die Dispenserreinigung, 0:30 min für den Montagevorgang MOB auf EOP sowie 0:40 min für das Anhängen des Klebers. Durch die Abschattung der MOB ist hier bisher noch ein Nachhängen des Klebers erforderlich.

Die Ausbeuten "MOB komplettieren", "EOP komplettieren" sowie "EOSS montieren", waren im Rahmen der Modellfertigung zu verifizieren. Erwartet wird abschließend eine Gesamtausbeute von etwa 41%. Dies bedeutet für die mikrooptische Bank, dass 2,4 Bauteile zu starten sind, für die Herstellung eines Gutteils. Auf der Basis des derzeitigen Entwicklungsstandes ergibt sich ein Kalkulationspreis von 137€ bei einer Stückzahl von 20000. Davon entfallen ca. 1/3 auf die Herstellung der MOB und ca. 2/3 auf die Herstellung der EOP. Für die Weiterentwicklung ergeben sich Einsparpotenziale von ca. 30 % bei Einsatz der LTCC Technik zur Herstellung der EOP (Mehrschichtverbundtechnik).

## 8.5 Ausblick

Für die verteilte Fertigung hybrider, mikrooptischer Bauteile wurden im Projekt Anlagen, Verfahren und Abläufe ausgelegt, realisiert und qualifiziert. Die Prozesskette ist für die flexible Fertigung von Sensorsystemen in mittleren und großen Stückzahlen geeignet. Die Kennzahlen des Fertigungsablaufes zeigen die Möglichkeit der ökonomischen Produktion mikrooptischer Abstandssensoren.

Durch den modularen Aufbau ist es möglich, kleine und mittlere Unternehmen auf der Basis einer qualifizierten spezifischen Fertigungstechnik in die Wertschöpfungskette der Sensorherstellung zu integrieren.

## 9 Zusammenfassung und Resümee

Bär, M.

### 9.1 Projektrückblick

Im Rahmen dieses Projektes wurden die zur wirtschaftlich serientauglichen Herstellung mikrooptischer Sensorsysteme notwendigen Prozesse und die dazu gehörigen Fertigungs- und Montageausrüstungen entwickelt. Die Serienfertigungstauglichkeit wurde durch eine Modellfertigung eines Distanzsensors nachgewiesen.

Das beantragte Projekt war mit einer Gesamtlaufzeit von 2 Jahren und einen Umfang von ca. 2,5 Mio. € geplant. Das Budget wurde eingehalten. Leider war wegen verschiedener Schwierigkeiten (u. a. Wegbrechen eines Partners) eine Laufzeitverlängerung um 8 Monate erforderlich, die angesichts der sehr positiven Ergebnisse aber gerechtfertigt war.

### 9.2 Nutzen für KMUs

Um eine Höherintegration mikrooptischer Sensorsysteme und eine damit verbundene Reduktion der Fertigungskosten und Verkleinerung der Außenabmessungen zu erzielen, sollte für zukünftige Sensorsysteme ein modularer Aufbau aus

- mikrooptischer Aufbauplatte mit integrierten Strahlformungselementen und
- elektrooptischer Platine sowie
- einer adäquaten Gehäusetechnik

angestrebt werden.

Dies wurde so auch erreicht. Mit diesem modularen Aufbau ist es nun möglich, die klein- und mittelständische Industrie in die Wertschöpfungskette der Sensorherstellung einzubinden, indem sich diese Firmen für die Herstellung der Module auf der Basis einer speziellen Fertigungstechnik spezialisieren und qualifizieren. Die Systemhersteller können auf die bei den KMUs liegende geeignete Fertigungstechnik ohne hohe Investitionskosten zurückgreifen und damit ein funktions- und kostenoptimiertes Sensorsystem realisieren.

Darüber hinaus wurden die wesentlichen Technologiemodule, insbes. das Mikromontagemodul und das Mikroprägemodul zwischenzeitlich in die interne Konstruktion überführt, wo eine detaillierte Serienreifmachung stattfindet. Es ist konkretes Ziel der betreffenden Partner, die entwickelte Technik so schnell wie möglich zur Serienreife zu führen und auf den Markt zu bringen. Auch dieser Punkt stärkt die Position von KMUs in der Mikrosystemtechnik.

Darüber hinaus wurden ausgehend von dem Mikro-FEMOS-Konzept zwischenzeitlich auch weitergehende Forschungsaktivitäten initiiert, die vor allem die Verkettung mehrerer Module zu komplexen Prozessabläufen betreffen – wiederum unter maßgeblicher Beteiligung mittelständischer und kleiner Unternehmen.

### 9.3 Technisches Resümee

Das Projekt wurde erfolgreich abgeschlossen.

In dem vorliegenden Projekt wurde zur Demonstration dieses Fertigungskonzepts die LIGA-Technik, speziell die Abformtechnik, angewendet. Dazu war die Entwicklung folgender Technologien und Fertigungseinrichtungen oder Fertigungsmittel erforderlich:

- Fertigung von Formeinsätzen mit LIGA-Technik (Forschungszentrum Karlsruhe GmbH)
- Maschinenentwicklung zur Abformung (Fa. Wickert Maschinenbau, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH)
- Hochpräzise Fertigung der Polymerkomponenten in großen Stückzahlen durch Prägen (Fa. Boehringer-Ingelheim microParts, Dortmund)
- Herstellung der elektrooptischen Platine (Fa. Micro-Optronic)
- Maschinenentwicklung zur automatisierten Integration und zum präzisen Zusammenfügen von mikrooptischen und optoelektronischen Komponenten (Fa. IEF Werner, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH) zu komplexen Systemen.

Darüber hinaus erfolgten zum Nachweis des Fertigungskonzeptes im Rahmen der Modellfertigung des Distanzsensors Arbeiten zur Spezifizierung des Sensors und seiner Subsysteme (mikrooptische Bank, elektrooptische Platine, elektrooptisches Subsystem), zur Entwicklung der Sensorauswerteelektronik und zur Charakterisierung des Sensors und der Subsysteme (Forschungszentrum Karlsruhe, Fa. Micro-Optronic).

Die Ergebnisse wurden auf einem umfangreichen Statusseminar anlässlich der MO-TEK 2004 in Sinsheim präsentiert. Ausgestellt wurde eine 4-Achs-Mikromontagemaschine, die auf reges Besucherinteresse stieß. Es wurde dabei gezeigt, dass es im Projekt MikroFEMOS gelungen ist, eine modulare, erweiterbare Montagemaschine für kleinste Bauteile als industriell anwendbare Struktur zu realisieren.

Erstmals kann für die industrielle Fertigung auf eine Standardmontageanlage zurückgegriffen werden, bei der Bauteilgröße bzw. -gewicht und Anlagengröße, sowie Energieeinsatz in einem realistischen Verhältnis zueinander und insbesondere zum Zielfokus „Mikro“ stehen.

Die zur Mikromontage erforderliche höchste Reproduzierbarkeit wird ohne Umwege über Feinpositionierung direkt von der Anlage erreicht. Durch kleinsten Bauraum ist ein Betrieb im kostengünstigen „Mini-Environment“ möglich. Durch die Zuführung der Komponenten mit DIN-Werkstückträgern ist eine flexible Anpassung des Equipments an veränderte Montageaufgaben problemlos möglich.

Durch Verkettung sind auch komplexere Aufgabenstellungen realisierbar, wobei dies gleichermaßen die Komplexität der Montageabläufe, als auch die Stückzahlforderungen betrifft. Es ist als Basis des Mikro-FEMOS-Konzept sogar möglich „mitwachsende“ Architekturen zu realisieren, die der Kunde mit Wachsen seiner eigenen Produktion Stück für Stück nachrüsten kann.

In diesem Zusammenhang sei auch festgehalten, dass einige Mitarbeiter von mehreren Projektpartnern seit vielen Jahren in verschiedenen Normungsgremien tätig sind.

Wichtig ist vor allem der DIN-Normungsausschuss NAFuO AA F3 „Fertigungsmittel für Mikrosysteme“. Dieser Ausschuss wurde als Gremium für Standardisierungsvorschläge initiiert und wurde im Rahmen dieses Projektes vor allem bzgl. Geräte- und Bauteilschnittstellen konsultiert.

Die Kontakte wurden während des Vorhabens intensiv gepflegt. Auf diese Weise ist eine breite Zugänglichkeit und Verbreitung der Projektergebnisse sichergestellt.

#### **9.4 Förderpolitisches Resümee**

Die beteiligten Industriepartner, vor allem die Maschinenbauer, verfolgen das Ziel, über dieses Projekt den Einstieg in das neue Technologiesegment „Mikrooptische Komponenten“ zu finden bzw. zu vertiefen. Der Übergang vom klassischen Maschinenbau in die neue Technologie der Fertigungstechnik für Mikrosysteme birgt für eine mittelständische Firma ein erhebliches Risiko.

Aufgrund der bestehenden ersten Erfahrungen und der Zusammenarbeit mit kompetenten Partnern aus Forschung und Industrie werden im Ergebnis des Vorhabens gute Chancen gesehen, in der neuen Technologie Fuß zu fassen und mittel- bis langfristig signifikante Umsätze zu erzielen.

Ohne eine öffentliche Förderung der Erstinnovation, welche die erheblichen Risiken abfedert, wäre ein Projekt dieses Umfangs nur mit deutlich längerem Zeithorizont oder überhaupt nicht umgesetzt worden. Große wissenschaftliche und wirtschaftliche Chancen wären ungenutzt geblieben.