

Mikro-Optik: Querschnitts-Technologie für die Telekommunikation und Sensorik

U. Wallrabe, H. Dittrich, U. Hollenbach, P. Krippner, A. Last, J. Mohr, A. Ruzzu, IMT; W. Zißler, Spinner GmbH; T. Oka, Mitsubishi Electric Co.

Einleitung

Die rasant wachsende Nachfrage nach Information und Kommunikation hat dem Licht als Datenüberträger einen enormen Vor Schub gebracht. Schon heute werden über 90% der Datenmengen in Deutschland über Photonen in Glasfasernetzen transportiert [1]. Die Vorteile von Licht liegen nicht nur in seiner Geschwindigkeit, sondern auch in seiner Störanfälligkeit, d.h. die Photonen lassen sich weder von externen Feldern wesentlich beeinflussen noch treten sie untereinander in Wechselwirkung [2]. Doch nicht nur im globalen Datenverkehr, auch in Privathaushalten oder im Auto werden optische Netze zum Einsatz kommen. Damit rückt die optische Datenübertragung in den „Consumer-Markt“ vor und wird zunehmend durch einen entsprechenden Preisdruck gekennzeichnet.

Ähnliches gilt für den Bereich der optischen Sensorik. Sie findet ebenfalls wegen ihrer Störanfälligkeit einen stets wachsenden Einsatzbereich, sei es in der industriellen Produktion zur Regelung und Überwachung von automatisierten Prozessen oder ebenfalls im Consumer-Bereich, insbesondere wiederum im Auto. Auch in der Medizintechnik ist die optische Sensorik von besonderem Interesse, da sie im Allgemeinen nichtinvasiv ist und unabhängig von starken Feldern, wie sie z.B. in einem Kern-Spin-Tomographen vorliegen, verwendet werden kann.

Im Zuge zunehmender Miniaturisierung mit dem Ziel der Kosten-

dämpfung durch höhere Integration kommt der Mikrooptik für die optische Telekommunikation und Sensorik eine Schlüsselrolle zu. Sie ist somit eine Querschnitts-Technologie für die genannten Anwendungsfelder, was im Englischen auch mit „enabling technology“ bezeichnet wird, – wörtlich eine „Möglichmacher-Technologie“.

Die Konstruktion hochintegrierter mikrooptischer Bauteile hängt häufig von den zur Verfügung stehenden Fertigungsprozessen ab, d.h. deren Entwicklung ist in der Regel miteinander verknüpft und kann kaum gesondert betrachtet werden. Dies führt jedoch zu hochspezialisierten Prozessen, die der Forderung nach Effizienz und Kostensenkung entgegenstehen. Aus diesem Grunde geht der Entwicklungstrend dahin, mikrooptische Systeme modular aufzubauen auf Kosten einer vollständigen Integration.

Ein solch modularer Ansatz erlaubt den Herstellern von mikrooptischen Systemen, sich auf die Fertigung jeweils eines Modules zu spezialisieren, eine entsprechende Technologie bei sich zu implementieren, und diese für weitere ähnliche Module zu nutzen. Das verringert die notwendigen Investitionen, erhöht die Prozesssicherheit, und beschleunigt für die Unternehmen den „Return of Investment“. Im Folgenden werden ein modulares Fertigungskonzept vorgestellt [3] und Beispiele für optische Bauteile und Systeme gegeben, die danach gefertigt werden können.

Modulares Fertigungskonzept

Grundlage für ein modulares Fertigungskonzept für mikrooptische Systeme ist die Tatsache, dass diese häufig in zwei funktionale Untergruppen geteilt werden können: Das ist einmal eine optische Grundplatte, d.h. eine mikrooptische Bank, in der optische Basiskomponenten wie Linsen, Prismen oder Spiegel entweder direkt strukturiert sind oder in sie eingesetzt werden. Zum anderen ist das eine elektrooptische Grundplatte, die entsprechend elektrooptische Basiskomponenten wie Photodioden, Laserdioden oder LEDs enthält, die fast ausschließlich eingesetzt werden. Beide Grundplatten können unabhängig voneinander bei zwei verschiedenen Herstellern gefertigt werden.

Der Zusammenbau dieser zwei Grundplatten ergibt ein mikroelektrooptisches Subsystem, das wiederum in Kombination mit Treiber- und Auswerteelektronik sowie einer Häusung zum vollständigen System wird. Die Montage des Subsystems kann bei einer dritten Firma stattfinden. Der Aufbau des Gesamtsystems liegt beim Systemhersteller, der auch die Kenntnis des Anwendungsmarktes hat.

Eine unerlässliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Montage ist die eindeutige Definition der Prüfmethode zum Nachweis der Spezifikation der Komponenten sowie aller optischen und elektrischen Schnittstellen. Diese sind teilweise normiert, wie z.B. die Glasfaserdurchmesser, teilweise benötigen sie die Absprache aller beteiligten Firmen.

Selbstverständlich kann das beschriebene theoretische Konzept nicht immer vollständig und in seiner reinen Form auf die Anwendung übertragen werden. In Abweichung davon können ebenso zwei ausschließlich optische Grundplatten ohne elektrooptische Komponenten zu einem System ergänzt werden, oder auch eine elektrooptische Grundplatte mit Elektronik zu einem Komplettsystem.

Zur Veranschaulichung werden verschiedene Beispiele aus Telekommunikation und Sensorik vorgestellt und jeweils der Modulcharakter ausgearbeitet. Alle im Folgenden beschriebenen mikrooptischen Bänke werden mit dem LIGA-Verfahren [4, 5] hergestellt sowie mit damit verknüpften Prozessen wie Spritzgießen [6], mechanischer Mikrofertigung [7] und Screen Printing [8].

Faserstecker

Ein Beispiel für ein einfaches System ist ein Faserstecker [9], der die gleichzeitige Kopplung von 16 Glasfasern erlaubt. Er besteht aus zwei optischen Grundplatten, die selbst keine optischen Bauteile enthalten sondern nur Mikrostrukturen zur Positionierung der Glasfasern aufweisen. Diese können entweder als Einzelfasern oder als Faserbündchen vorliegen. Das Steckerdesign wurde explizit für eine einfache Montage ausgelegt. Dazu wurden in Steckerlängsrichtung Faserführungsstrukturen angeordnet (Abb. 1), deren Abstand sich in Richtung des Koppelendes verringert. Die hinterste Reihe der Führungsstrukturen hat einen Abstand von 140 μm , die vorderste Reihe von 123 μm .

Für die Montage werden die Fasern über den Führungsstrukturen der unteren Steckerhälfte platziert. Streicht man mit einem geeigneten Werkzeug von hinten nach vorne darüber, so justieren sich die Fasern selbständig und werden zwischen den vordersten Führungsstrukturen leicht geklemmt, was die weiterführende Montage vereinfacht. Die Klemmung selbst wird durch eine gerippte Oberfläche der Führungsstrukturen erleichtert (Abb. 1, Inset), da zwischen Führungsstrukturen und Fasern nur Punktkontakte vorliegen.

Anschließend wird die obere Steckerhälfte auf die untere gesetzt. Eigens für diesen Montageschritt vorgesehene Einraststrukturen helfen, die zwei Steckerhälften passiv zueinander auszurichten. Durch das Loch in der oberen Steckerhälfte wird lichthärtender Kleber zugeführt, der

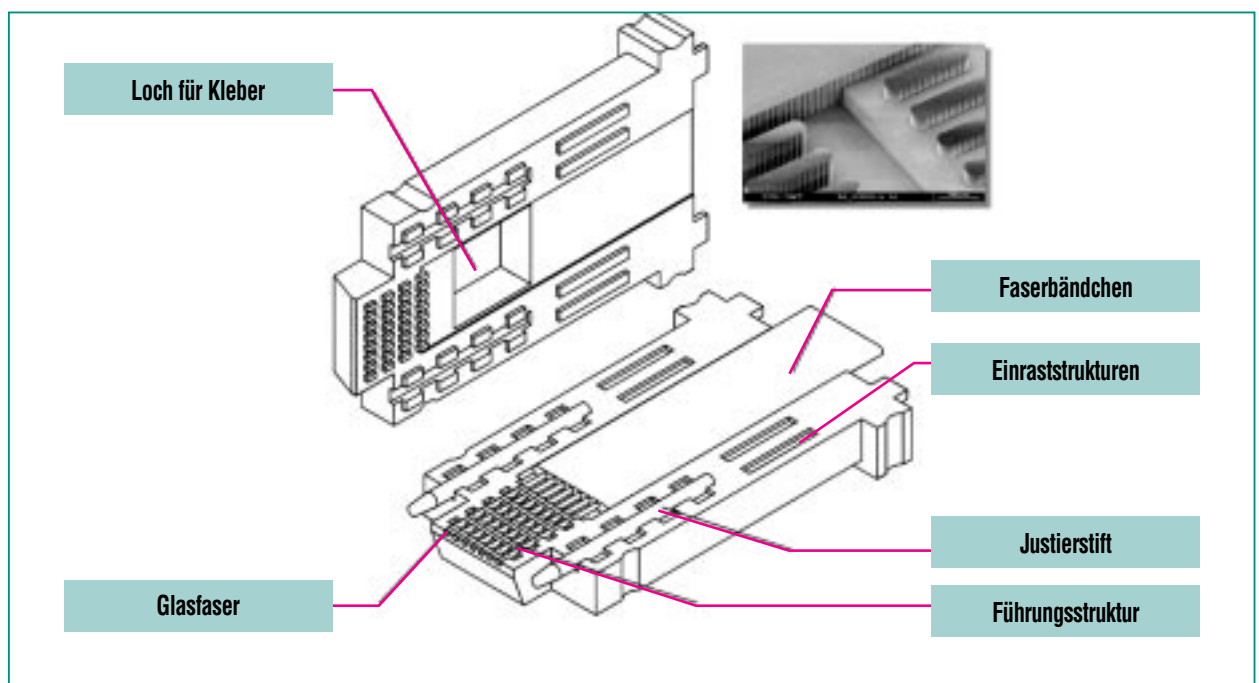


Abb. 1: Design eines Fasersteckers für die optische Telekommunikation, Detail: Rem-Aufnahme einer Rippenoberfläche an den Faser-Führungsstrukturen.

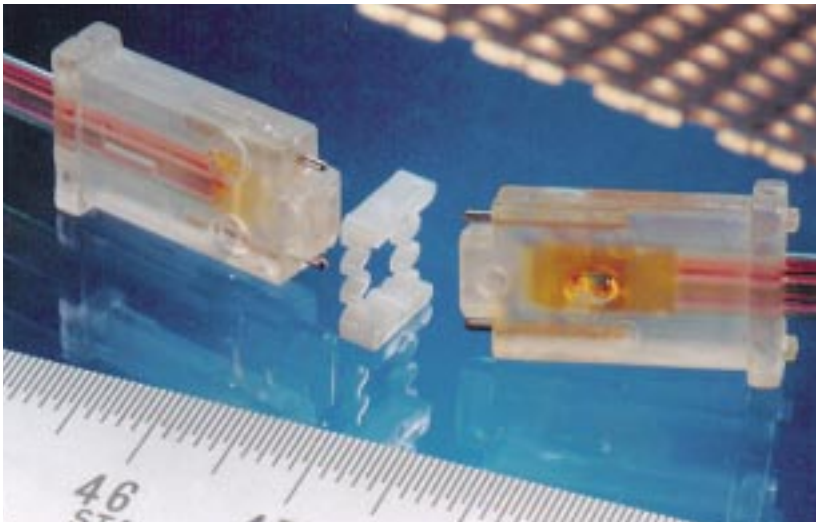


Abb. 2: Zwei fertig montierte Faserstecker mit verbindendem Koppelement.

sich allein durch Kapillarkräfte in dem Stecker verteilt und so die zwei Hälften fest miteinander verbindet. Abschließend werden die Koppelenden, d.h. die Steckerstirnflächen poliert.

Die Kopplung zweier Stecker erfolgt mit Hilfe zweier Justierstifte, die gleichzeitig mit den Fasern in die Steckerteile montiert werden. Sie werden in ein zusätzliches Koppelement eingeführt und so ausgerichtet, wie in Abb. 2 angedeutet. Die Lagegenauigkeit dieser Stifte bezüglich der Glasfasern ist in der Größenordnung von $1\ \mu\text{m}$ und definiert die Qualität der Steckverbindung. Den fertig montierten Stecker kann man im Sinne des modularen Fertigungskonzeptes als Subsystem verstehen. In Kombination mit einem Steckergehäuse sowie den elektrooptischen Schnittstellen, d.h. der Lichtein- und -auskopplung entsteht daraus das optische Gesamtsystem.

Die Stecker wurden mit 16-fachem Singlemode-Faserbünd-

chen ausgestattet. Der leichtleitende Kern jeder Singlemode-Faser hat einen Durchmesser von $9\ \mu\text{m}$. Die damit gemessene mittlere Einfügedämpfung beim Kopeln zweier Stecker beträgt $1,2\ \text{dB} \pm 0,5\ \text{dB}$ bei einer Wellenlänge von $1300\ \text{nm}$, d.h. der Versatz der Faserkerne zueinander ist ungefähr $2,3\ \mu\text{m}$ [10].

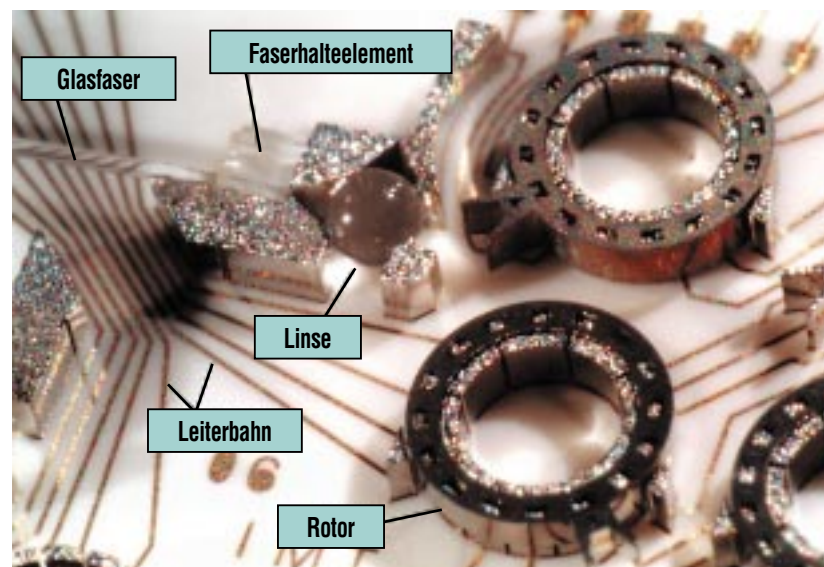


Abb. 3: Optische Grundplatte einer 2x2-Schaltmatrix für die Telekommunikation.

Schaltmatrix

Mit einer optischen Schaltmatrix können n Eingangskanäle wahlweise auf n Ausgangskanäle geschaltet werden. Die hier vorgestellte 2x2-Matrix für Singlemode-Fasern [11] besteht aus einer optischen Grundplatte mit Montagehilfsstrukturen für Glasfasern, Linsen sowie festen und beweglichen Spiegeln. Die beweglichen Spiegel basieren auf elektrostatischen Mikromotoren, deren Statoren mit auf der optischen Bank strukturiert sind und deren Rotoren mit den daran befestigten Spiegeln eingesetzt werden. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt solcher einer optischen Bank bestehend aus einem Keramiksubstrat mit Montagestrukturen aus galvanisierten Nickel und eingesetzten Linsen sowie Glasfasern auf Faserhalteelementen aus Plexiglas. Die Anschläge für alle Montageteile sind derart gestaltet, dass es sich bei den Kontaktstellen um Punktkontakte handelt,

was die Positionsgenauigkeit erhöht. Die Notwendigkeit der Faserhalteelemente ergibt sich aus den unterschiedlichen Durchmessern von Glasfasern und Linsen. Die Kugellinse hat einen Durchmesser von 650 μm , d.h. die optische Achse liegt auf halber Höhe, also auf 325 μm . Die Fasern haben jedoch nur einen Durchmesser von 125 μm , d.h. sie müssen mit einem geeigneten Halteelement auf die Höhe der optischen Achse angehoben werden.

Die Spiegelrotoren, ebenfalls aus Nickel, sind in die Statorstrukturen eingesetzt. Um die Motoren anzusteuern, sind zweierlei elektrische Schnittstellen realisiert worden. Die einfache Variante beruht auf Leiterbahnen (vgl. Abb. 3), die durch Drahtbonden kontaktiert werden. Bei einer 2x2-Matrix sind das bereits 33 Kontakte. Bei größeren Matrizen wird dieses Konzept schnell unbrauchbar. Daher wurde eine elektrische Grundplatte entwickelt, in der die Leiterbahnen durch Siebdruckverfahren ver-

senkt und entflochten werden [8]. Im Sinne des modularen Fertigungskonzeptes kommt hier zwar keine elektrooptische, aber eine rein elektrische Grundplatte zum Tragen. Die elektrische Grundplatte wird extern, also als Modul, gefertigt, und die optische Grundplatte wird unmittelbar darauf aufgebaut.

Abb. 4 zeigt eine entsprechende optische Bank sowie die durchkontaktierte elektrische Grundplatte, bei der die Kontakte in einem regelmäßigen Raster angeordnet sind. Beides zusammen bildet ein mikrooptisches Subsystem, das gemeinsam mit der Treiberelektronik für die Drehspiegel zu einem Gesamtsystem wird.

Mit der Schaltmatrix werden Übersprechdämpfungen von über 90 dB, Einfügedämpfungen von minimal 3 dB sowie Wiederholungsgenauigkeiten von 0,5 dB erreicht. Die Schaltzeit beträgt minimal 30 ms bei 700 V oder maximal 700 ms bei 70 V.

Abstandssensor

Der Abstandssensor repräsentiert das vollständige modulare Fertigungskonzept. Er besteht aus einer mikrooptischen Bank mit diversen Spiegeln, die das Licht innerhalb der optischen Bank umlenken und fokussieren, als auch unter 45 Grad aus der Ebene auskoppeln (Abb. 5). Außerdem werden in die optische Bank Zylinderlinsen zum Fokussieren senkrecht zur Ebene eingesetzt. Das Gegenstück zur mikrooptischen Bank bildet eine elektrooptische Grundplatte bestehend aus einem Silizium-Chip mit einer Laserdiode (LD), einer Positions-sensitiven Diode (PSD) sowie einer Monitordiode (MD). Beide Chips werden kopfüber ineinander gesetzt und miteinander verklebt. Zur Vereinfachung der passiven Montage beider Chips werden Glaskugeln zunächst in passende Gruben in den Silizium-Chip geklebt. Bei der Überkopf-Montage der optischen Bank tauchen die Kugeln in entsprechende runde Justierzylinder, die gleichzeitig mit den Spiegeln in der optischen Bank strukturiert wurden [12].

Der Abstandssensor basiert auf dem Triangulationsprinzip, d.h. in Abhängigkeit des Messabstandes trifft das Licht auf verschiedenen Stellen der PSD auf (Abb. 6) und wird dort mit Hilfe einer Brückenschaltung orts aufgelöst abgegriffen.

Abb. 7 zeigt beide Chips vor der Endmontage. Die optische Bank, rechts im Bild, besteht aus Plexiglas-Strukturen auf einem Keramikträger, die zur Verspiegelung mit Gold bedampft sind. An der

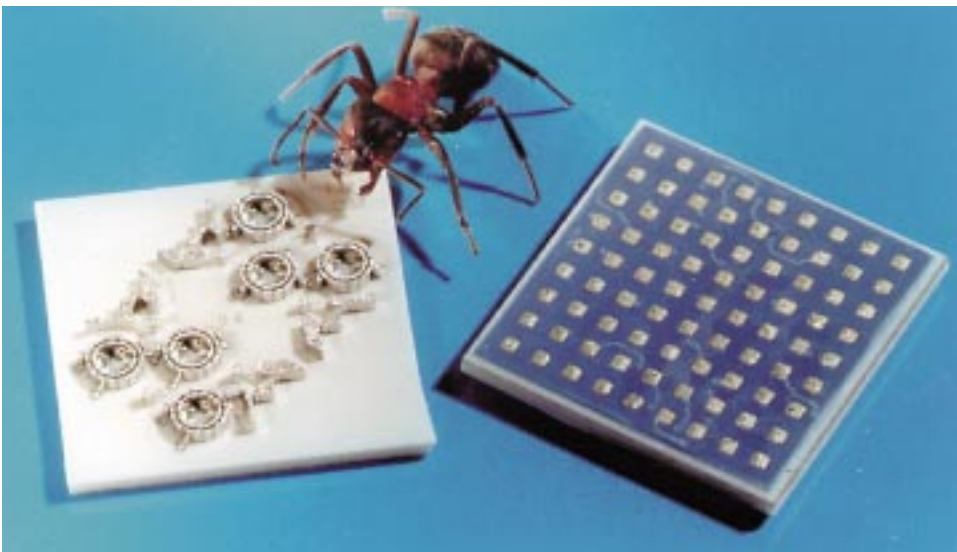


Abb. 4: Darstellung der elektrischen Grundplatte für eine 2x2-Schaltmatrix.

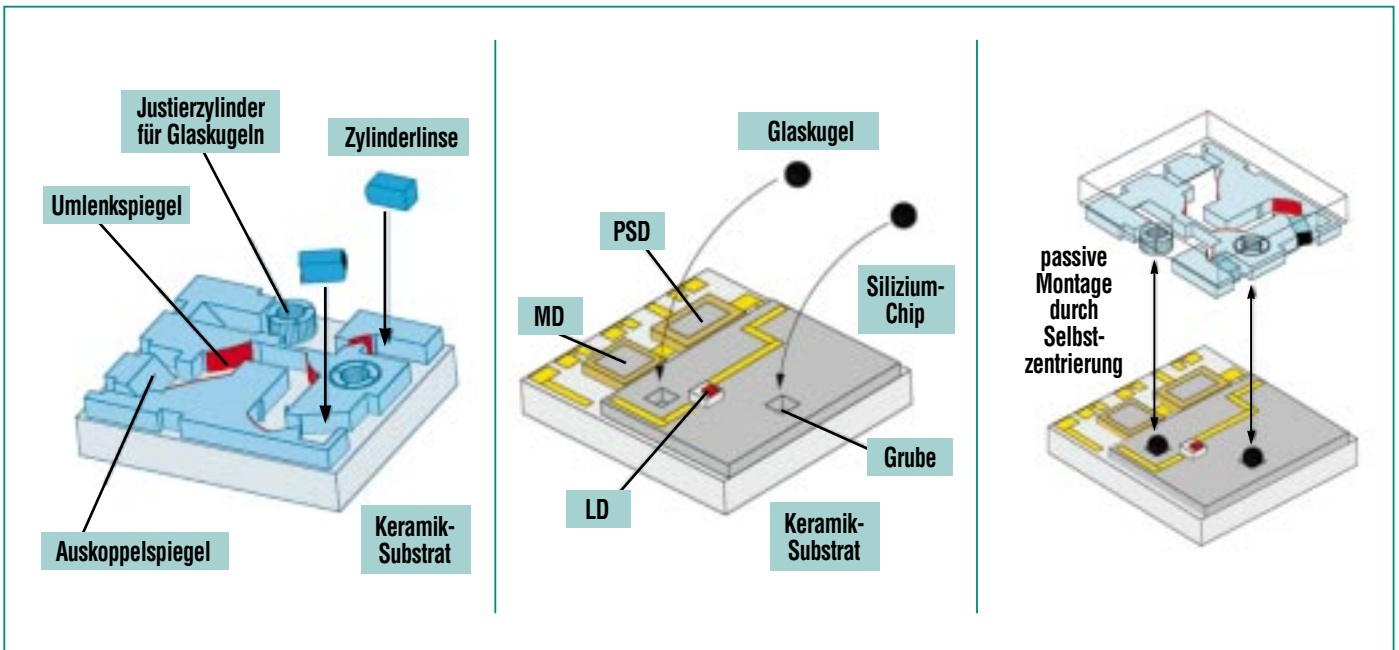


Abb. 5: Modularer Aufbau eines Abstandssensors mit mikrooptischer Bank und elektrooptischer Grundplatte zur Überkopf-Montage.

Vorderkante sind die eingesetzten Zylinderlinsen zu erkennen. Der Siliziumchip, links im Bild, ist auf einem Aluminium-Träger fixiert. Die Glaskugeln sind bereits eingesetzt. Die rein elektrische Schnittstelle nach außen sind die

Bondkontakte für die Dioden. Das so entstandene mikrooptische Subsystem wird im weiteren mit einem Gehäuse und Steuerelektronik versehen und stellt dann ein vollständiges optisches System dar.

Es wurden zwei Sensortypen mit Messabständen von 6 ± 1 mm und 16 ± 10 mm hergestellt. Beide Typen weisen ein lineares Ausgangssignal mit einem Linearitätsfehler von $\pm 2\%$ auf. Die Wiederholgenauigkeit ist besser als 0,3%.

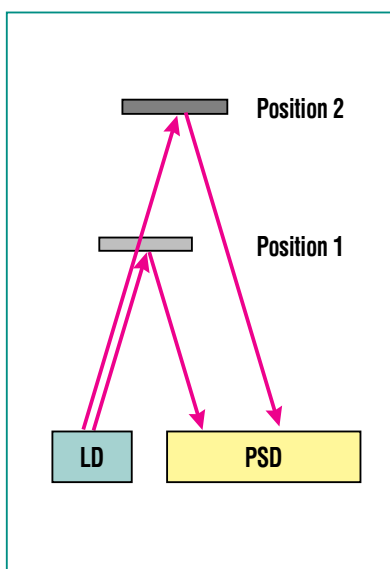


Abb. 6: Triangulationsprinzip.

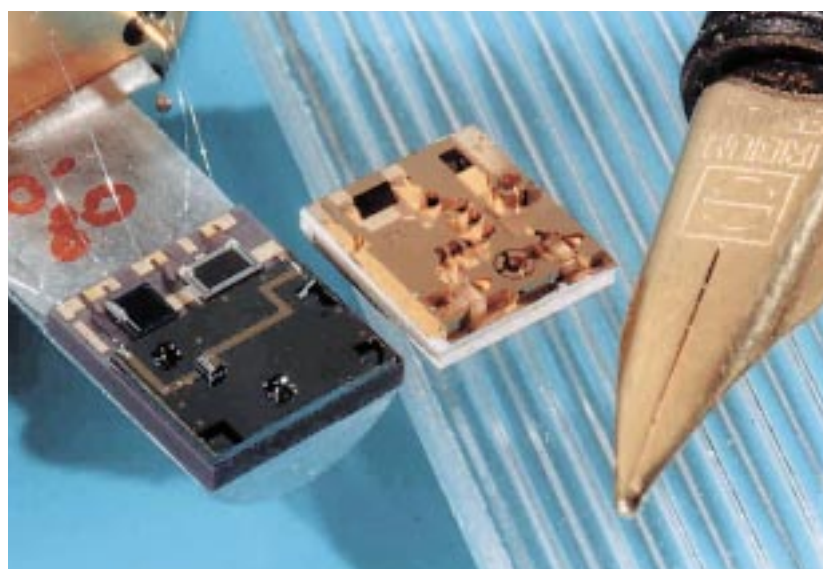


Abb. 7: Photo der zwei Chips des Abstandssensors.

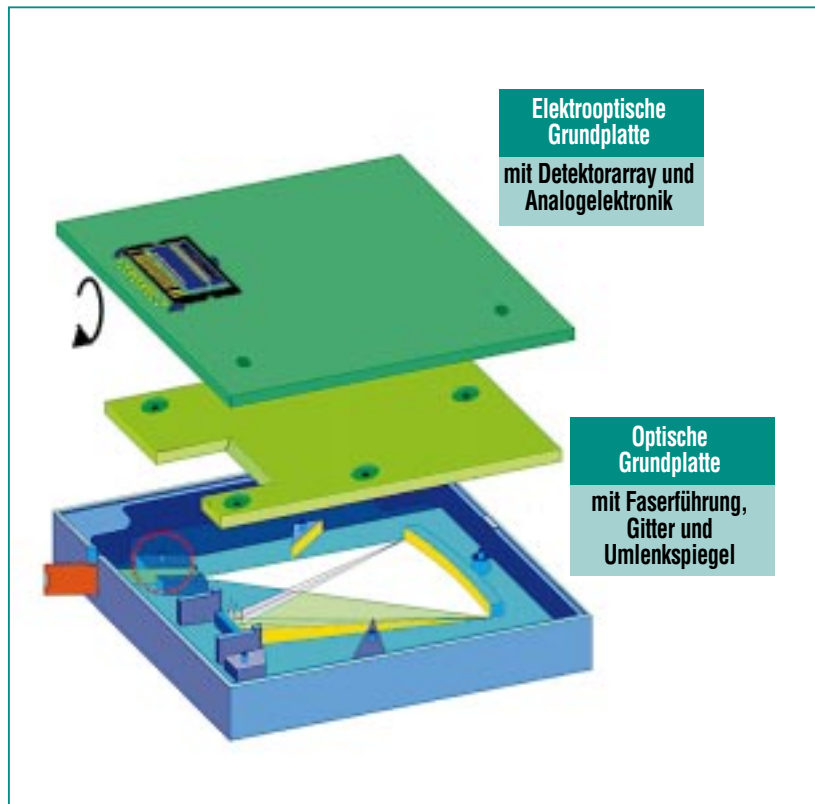


Abb. 8: Modularer Aufbau eines NIR-Spektrometers.



Abb. 9: Messgerät für Neugeborenenengelbsucht auf der Basis eines Mikrospektrometers.

NIR Spektrometer

Ein weiteres Beispiel für das vollständige modulare Konzept ist ein Spektrometer für das nahe Infrarot (NIR). Hier besteht die optische Bank aus einem reflektierendem Beugungsgitter sowie Faserhaltestrukturen und einem 45°-Spiegel zur Auskopplung des Lichtes aus der Ebene [13]. Die elektrooptische Grundplatte enthält auf der dem Spektrometer zugewandten Seite ein Diodenarray sowie auf der abgewandten Seite die entsprechende Auswerteelektronik. Abb. 8 zeigt schematisch den Aufbau und die Funktion des Subsystems.

Über eine Glasfaser wird weißes Licht in das Spektrometer eingekoppelt. Es breitet sich in der Ebene des Spektrometers aus und beleuchtet vollständig das reflektierende Gitter. Aufgrund der Gitterkrümmung wird das gebeugte Licht auf die Ebene des Diodenarrays fokussiert und kann dort wellenlängenaufgelöst abgegriffen werden. Die Auflösung beträgt im unteren Spektralbereich, d.h. bei Wellenlängen zwischen 0,9 und 1,15 μm , ca. 13 nm, im oberen Spektralbereich, also zwischen 1,15 und 1,8 μm , 20 nm.

Mit dem Subsystem wird von entsprechenden Systemherstellern zusammen mit Auswerteelektronik sowie Bedien- und Anzeigeeinheiten ein Gesamtsystem aufgebaut. Abb. 9 zeigt als Beispiel ein Messgerät der Firma SpectrX, das ein ähnliches Spektrometer für sichtbares Licht enthält. Hiermit kann nichtinvasiv der Bilirubinwert bestimmt werden, der ein Maß für Neugeborenenengelbsucht darstellt.

Zusammenfassung

Um die Mikrooptik als Querschnittstechnologie für Telekommunikation und Sensorik preislich und logistisch rentabel zu machen, wurde ein modulares Fertigungskonzept zur Herstellung von Mikrooptischen Systemen entwickelt und anhand von vier Beispielen veranschaulicht. Der Modulcharakter gestattet eine Entflechtung der Fertigung an verschiedene Standorte bei jeweils hochspezialisierten Herstel-

lern. Dabei bleibt das grundlegende Konzept jedoch immer erhalten: Die Trennung von einer mikrooptischen Bank mit teilweise integrierten optischen Elementen wie Spiegeln und Prismen sowie einer elektrooptischen Grundplatte mit Lasern und Dioden etc. Die Montage der Elemente sowie der Grundplatten zueinander verläuft weitestgehend passiv, was eine weitere wichtige Vereinfachung und damit Verbilligung der Gesamtfertigung bedeutet. Mit der Beherr-

schung solch einer modularen Fertigungsmethode für mikrooptische Systeme ist damit eine wichtige Voraussetzung für innovative Entwicklungen in der optischen Telekommunikation und Sensorik geschaffen.

Literatur

- [1] *Deutsche Agenda: Optische Technologien für das 21. Jahrhundert*, VDI-Technologiezentrum Düsseldorf
- [2] J. Jahns: *Photonik*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001
- [3] J. Mohr, A. Last, U. Hollenbach, T. Oka, U. Wallrabe: *Proc. MOEMS 2002, Okinawa, August 2001*, pp. 77-78
- [4] J. Mohr: *Sensors and Materials 10 (1998)*, pp. 363-373
- [5] Th. Hanemann, M. Heckeke, V. Piotter: *Polymer News*, Vol. 25 (2000), No. 7, pp. 224-229
- [6] V. Piotter, Th. Hanemann, R. Ruprecht, J. Hausselt: *Proc. (CD) INJECTION MOLDING 2001, Copenhagen, Denmark, March 2001*, ISBN 87-89753-36-4
- [7] Th. Schaller, H. Dittrich, A. Gerlach, A.E. Guber, M. Heckeke, A. Muslija, U. Wallrabe, W. Zißler: *EUSPEN 2nd International Conference, Turin, Italy, May 2001*, Vol.2, pp. 676-679.
- [8] A. Ruzzu, O. Fromhein, D. Haller: *HARMST, 01, Fourth International Workshop on High-Aspect-Ratio Micro Structure Technology, Baden-Baden, Germany, June 2001*, pp. 247- 248.
- [9] U. Wallrabe, H. Dittrich, G. Friedsam, Th. Hanemann, K. Mohr, K. Müller, V. Piotter, P. Ruther, Th. Schaller, W. Zißler: *SPIE Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP2001, Cannes, France, April 2001*, SPIE Volume 4408, pp. 478-48521.
- [10] A. Ghatak, A. Sharma, R. Tewari: *Viva Books Private Ltd., Neu Dehli*, p. 71
- [11] A. Ruzzu, D. Haller, J. Mohr, U. Wallrabe: *SPIE Micromachinig and Microfabrication, MOEMS and Miniaturized Systems, Santa Clara, Cal., Sept. 2000*, SPIE Vol. 4178, pp. 67-76.
- [12] T. Oka, H. Nakajima, A. Shiratsuki, M. Tsugai, U. Wallrabe, U. Hollenbach, P. Krippner, J. Mohr: *TRANSDUCER'01, The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, June 2001*, pp. 536-539
- [13] P. Krippner, T. Kühner, J. Mohr, V. Saile: *SPIE Micro- and Nanotechnology for Biomedical and Environmental Applications, San Jose, Cal., Jan. 2000*, SPIE Vol. 3912, pp. 141-149