



Peter Schreiber

Einführung

Optische Sensoren weisen gegenüber elektrischen eine Reihe von Vorteilen wie z. B. Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störfelder, Potenzialfreiheit und metallfreie Realisierbarkeit auf. Die Detektion von Schallwellen durch optische Abtastung einer Mikrofonmembran ist ein vielversprechendes Einsatzfeld derartiger Sensoren. Um die erforderliche hohe Empfindlichkeit zum Nachweis der Membranauslenkungen im sub-Mikrometerbereich zu erzielen, werden dafür häufig interferometrische Systeme oder singlemode Faserkoppler zur Detektion eingesetzt /1/. Problematisch ist dabei die Verwendung von Laserdioden als Lichtquelle, die auf Grund des Oszillatorauschlags das erzielbare Signal-Rauschverhältnis des Mikrofons begrenzen.

Systemdesign

Ein alternativer Ansatz mit einem konfokalen Defokussensor ermöglicht sowohl den Einsatz einer rauscharmen, lichtemittierenden Diode (LED) als Lichtquelle und die Ankopplung des Sensorkopfs über Multimodefasern als auch die Erzielung einer hinreichenden Wandlungsempfindlichkeit. Dieses Designkonzept wurde im Rahmen eines Projekts mit der Firma Sennheiser electronic entwickelt und als Labormuster realisiert.

In Abb. 1 ist der Aufbau des Mikrofonkopfs schematisch dargestellt. Die Abstrahlung der Sender-Multimodefaser wird von einer asphärischen Linse kollimiert und von dem nachfolgenden Zylinderlinsenarray in einer Reihe von Linienfoki auf die Mikrofonmembran abgebildet. Nach Reflexion an der Membran wird das System in umgekehrter Richtung durchlaufen und das

Licht auf die Empfängerfaser fokussiert. Entsprechend der aktuellen Membranauslenkung ist die Abbildung des Sendefaserkerns auf die Empfängerfaser mehr oder weniger stark defokussiert und damit der Koppelgrad der Anordnung von der Membranposition abhängig. Die Optimierung des optischen Designs erfolgte mit der Raytracing-Software ZEMAX. Die Anwendbarkeit der Strahlverfolgung wurde durch den Vergleich mit Koppelkurven, die durch Freiraum-Wellenpropagation /2/ berechnet wurden, bestätigt (Abb. 2). Das Raytracing liefert durch Vernachlässigung von Beugungseffekten in Fokusnähe zu optimistische Werte für den Koppelgrad, im Arbeitspunkt des Mikrofons auf der Flanke der Koppelkurve ist aber eine sehr gute Übereinstimmung beider Verfahren zu verzeichnen.

Bei der Optimierung des Designs sind u. a. folgende Randbedingungen zu beachten:

- Der Luftspalt zwischen Membran und Array sollte 0,2 mm aus akustischen Gründen nicht unterschreiten. Um dennoch eine geringe Arraybrennweite und damit hohe Empfindlichkeit zu erzielen, benötigt man Arrays, deren konvexe Seite zum Fokus orientiert ist. Das wiederum macht den Einsatz stark asphärischer Arrays erforderlich.
- Da die Mikrofonempfindlichkeit proportional zur numerischen Apertur des Arrays ist, ist eine möglichst hohe NA anzustreben. Zu große Werte über 0,5 sind aber wegen der dann zu flachen Austrittswinkel aus der konvexen Linsenfläche und den damit verbundenen Fresnelverlusten nicht sinnvoll.

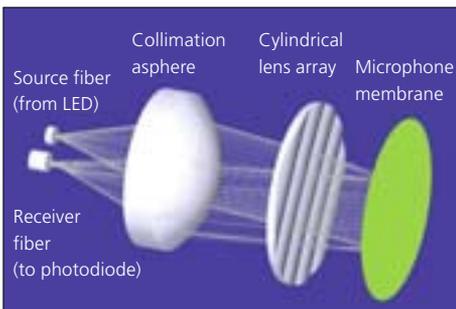


Abb. 1: Optikschemata des Mikrofonkopfs.

Fig. 1: Optics scheme of the microphone head.

Optical microphone

Peter Schreiber, Sergey Kudaev, Ralf Rosenberger, Peter Dannberg, Bernd Höfer

Introduction

Optical sensors exhibit a variety of advantages compared to electrical sensors, they are insensitive with respect to electromagnetic influences, metal-free and electrically isolated. The detection of acoustic waves through measurement of optical displacement of a microphone membrane is a promising field of application for such sensors. To achieve the high level of sensitivity required for distance sensing of the membrane in the sub-micron range, interferometric systems or single-mode fiber-coupling schemes are usually employed /1/. For these types of systems the use of laser diodes as light source limits the achievable signal to noise ratio because of the oscillator noise of the laser.

System design

An alternative approach employing a confocal defocus sensor provides sufficient sensitivity and enables the use of a less noisy light-emitting diode (LED) coupled by a multimode fiber as light source. This design concept was developed and constructed as a laboratory demonstrator in collaboration with the company Sennheiser electronic.

In Fig. 1 the set-up is shown schematically. The light emitted by the transmitter fiber is collimated by an aspheric lens and then focused by a cylindrical lens array into a set of line-foci onto the membrane. After reflection, the light is propagated back through the system and is focused on the core of the receiver fiber. According to the actual axial position of the membrane, the

image is more or less defocused and thus the coupling efficiency of the system depends on the membrane displacement. The optimization of the system layout is carried out with the raytracing software ZEMAX. The applicability of raytracing is verified by a comparison of coupling curves calculated by raytracing and free-space wave propagation (Fig. 2) /2/. Raytracing fails near focus, because in this region effects of diffraction control the spot size. However at the sensor's operating point, at maximum steepness of the curve, both calculations agree well.

For the optimization of the system the following constraints must be considered:

- The air-gap between membrane and array should not be less than 0.2 mm from acoustic considerations. To achieve a short focal width of the array regardless of that constraint, planoconvex arrays, which have their curved side oriented towards the focus, are required. To realize such arrays aspheric lens surfaces are necessary.
- Because microphone sensitivity is proportional to the numerical aperture (NA) of the array, a high NA is desirable. An array-NA exceeding 0.5 is too large and must be avoided, because in such a case large ray exit angles from the curved array surface occur causing increased Fresnel losses.



Sergey Kudaev



Ralf Rosenberger



Peter Dannberg



Bernd Höfer

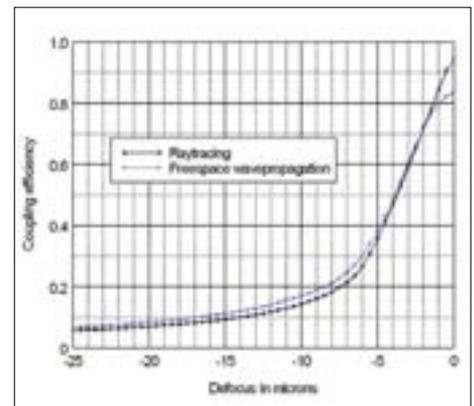


Abb. 2: Koppelgrad eines Systems mit 100 μm -Faser in Abhängigkeit von der Membranauslenkung, berechnet mittels Raytracing und Freiraum-Wellenpropagation.

Fig. 2: Coupling efficiency dependence from membrane displacement for a system with 100 μm -fiber, calculated by raytracing and free-space wave propagation.

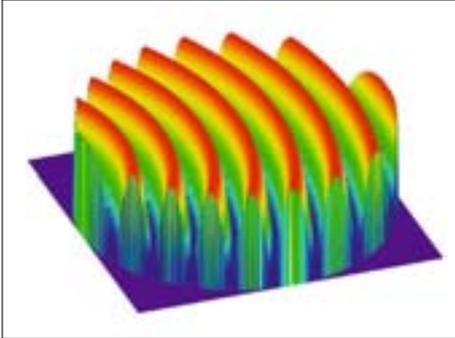


Abb. 3: ZEMAX user-defined surface für SPDT-Zylinderlinsenarray (nicht maßstäblich).

Fig. 3: ZEMAX user-defined surface for SPDT-manufactured cylindrical lens array modeling (not to scale).



Abb. 4: Konstruktion des Labormusters des optischen Mikrofons.

Fig. 4: Construction of optical microphone laboratory demonstrator.



Abb. 5: Montiertes optisches Mikrofon und Mikrophonkapsel mit Array und aufgeklebter Membran (vorn rechts).

Fig. 5: Assembled optical microphone and microphone cartridge with lens array and glued membrane (front right).

Die Erfüllung beider Bedingungen ermöglicht der Einsatz von abgeformten Zylinderlinsenarrays, deren Master durch single-point diamond turning (SPDT) hergestellt wurden /3/. Ein Nachteil derartiger Arrays ist die prozessbedingte Krümmung der Zylinderlinslets senkrecht zum Linsenprofil (Abb. 3). Der Einfluss dieser Krümmung und die Auswirkungen der Totzonen des Arrays auf die Sensorsteilheit wurden durch Raytracing-Simulationen untersucht. Für die vorliegende Designvariante ist mit einer tolerierbaren Verschlechterung der Empfindlichkeit um nur wenige Prozent zu rechnen.

Realisierung

Ein Labormuster des optischen Mikrofons wurde mit 200 µm-Multimodefasern, einer Geltech-Kollimationsasphäre mit 8 mm Brennweite und einem asphärischen Zylinderlinsenarray mit Brennweite 0,2 mm und pitch 0,15 mm, entsprechend einer NA von 0,35, aufgebaut (Abb. 4, 5). Das Array wurde von einem mittels SPDT in Kupfer erzeugten Master abgeformt /3/. Die Abformung erfolgte durch Reaktionsguss eines UV-härtenden Polymers auf Floatglassubstrat /4/. Abb. 6 zeigt die mit einem Planspiegel als Membranmodell gemessene Abstandskennlinie des Labordemonstrators, verglichen mit der Raytracing-Simulation.

Bei der Assemblierung der Komponenten ist besondere Sorgfalt auf die parallele Montage der Mikrofonmembran relativ zum Linsenarray zu verwenden. Um die erforderliche Präzision in der Größenordnung einer Bogenminute zu erzielen, wurde die auf einem Metallring aufgezugene Membran unter aktiver Justage auf dem Arrayträger durch UV-Kleben fixiert. Die Reproduzierbarkeit dieser Technologie konnte durch die Realisierung mehrerer Mikrophonkapseln

nachgewiesen werden. Erste akustische Charakterisierungen des Mikrofons bei der Fa. Sennheiser zeigen mit einfachen Kondensatormikrofonen vergleichbare akustische Eigenschaften (Abb. 7).

Zusammenfassung

Ein konfokales optisches Mikrofon wurde durch Designrechnungen optimiert und als Labordemonstrator realisiert. Die Charakterisierung des Systems zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten. Das Sensorprinzip ist in unterschiedlichen Ausführungsformen vielfältig für Abstandsmessungen auch in anderen Bereichen, wie z. B. Maschinen- oder Automobilbau, einsetzbar.

Dank

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts „Optisches Mikrofon“ der Landesinitiative Mikrosystemtechnik Niedersachsen gefördert. Die Verfasser danken den Mitarbeitern der Fa. Sennheiser electronic für die konstruktive und anregende Zusammenarbeit.

Literatur:

- /1/ Garthe, D.: „Faser- und integriert-optische Mikrofone auf der Basis intensitätsmodulierender Membranabtastung“, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik Nr. 214 (1992).
- /2/ Duparré, J.; Göring, R.: „Numerical wave analysis of microlens array telescopes and comparison with experimental results“, Appl. Opt. 43 (2003) 3992.
- /3/ Gebhardt, A.; Steinkopf, R.: „Diamantdrehen mikrooptischer Strukturen“, Fraunhofer IOF, Jahresbericht 2003.
- /4/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: „Polymer UV-molding for micro-optical systems and O/E-integration“, Proc. SPIE 4179 (2000) 137.

Both conditions can be met by using cylindrical lens arrays replicated from master structures manufactured by single-point diamond turning (SPDT) /3/. One drawback of such arrays is the curvature perpendicular to the lens profile, resulting from the diamond turning process. The influence of that curvature and the array fill factor were simulated by raytracing calculations. For the current design, a tolerable degradation of only a few percent was observed.

Realization

A laboratory demonstrator of the optical microphone was realized using 200 μm multimode fibers, a Geltech asphere with an 8 mm focal width and an aspheric cylindrical lens array with a 0.2 mm focal width and 0.15 mm pitch according to an NA of 0.35 (Fig. 4, 5). The array was replicated from a copper master fabricated by SPDT /3/. The replication process was carried out by UV-molding of a polymer onto a float-glass substrate /4/. Fig. 6 shows the sensor curve recorded with a plane mirror as a membrane model compared to the raytracing simulations.

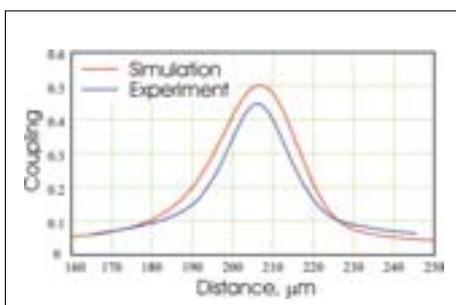


Abb. 6:
Sensorkennlinie, berechnet und gemessen.

Fig. 6:
Calculated and measured sensor characteristics.

During system assembly special attention has to be paid to parallel adjustment of the microphone membrane with respect to the lens array surface. To meet the required precision, which is in the range of one arc minute, the membrane attached to a mounting ring was fixed on the array carrier by UV-curing with active alignment. The reproducibility of that process was proven by successfully mounting a number of microphone cartridges. Initial acoustic characterization of the microphone exhibited properties comparable to simple condenser microphones (Fig 7).

Summary

A confocal optical microphone was optimized by design calculations and constructed as a laboratory demonstrator. Characterization of the system showed good agreement between calculated and measured parameters. The sensor principle is appropriate for a wide variety of applications regarding distance measurement, for instance in engine building and in the car manufacturing industry.

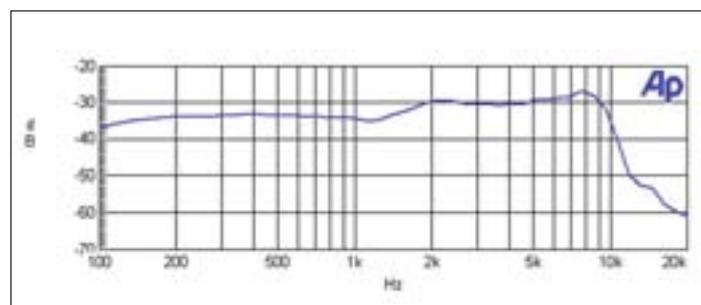


Abb. 7:
Frequenzgang des optischen Mikrofons.

Fig. 7:
Measured frequency response of the optical microphone.

Acknowledgement

This work was sponsored as part of the project „Optisches Mikrofon“ of the Landesinitiative Mikrosystemtechnik Niedersachsen. The authors wish to thank their colleagues from Sennheiser electronic for their constructive and stimulating cooperation.

References:

- /1/ Garthe, D.: „Faser- und integriert-optische Mikrofone auf der Basis intensitätsmodulierender Membranabtastung“, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik Nr. 214 (1992).
- /2/ Duparré, J.; Göring, R.: „Numerical wave analysis of microlens array telescopes and comparison with experimental results“, Appl. Opt. 43 (2003) 3992.
- /3/ Gebhardt, A.; Steinkopf, R.: „Diamond turning of micro-optical structures“, Fraunhofer IOF, Annual report 2003.
- /4/ Dannberg, P.; Mann, G.; Wagner, L.; Bräuer, A.: „Polymer UV-molding for micro-optical systems and O/E-integration“, Proc. SPIE 4179 (2000) 137.