

# Reflexionskompensierter faseroptischer Abstandssensor

Ansgar Wego, Hochschule Wismar  
Gundolf Geske, Astech Angewandte Sensortechnik GmbH, Rostock

**Abstandsänderungen im Mikrometer- und Submikrometerbereich lassen sich mit hoher Auflösung und hoher Messdynamik einfach und kostengünstig mit faseroptischen Abstandssensoren erfassen. Berücksichtigt man dabei in geeigneter Weise die Reflexionseigenschaften des Messobjektes, können die Eigenschaften des Messflecks verbessert und der Messbereich vergrößert werden.**

Faseroptische Abstandssensoren werden oft dort verwendet, wo andere Methoden aufgrund kleiner Bauräume, fehlender Auflösung im unteren Mikrometerbereich oder fehlender Messdynamik nicht eingesetzt werden können oder der Einsatz technisch zu aufwändig und kostspielig wäre. Auch mehrere Messstellen gleichzeitig sind mit faseroptischen Systemen einfach abfragbar. Im Bereich der Luft- und Raumfahrt, des Automobilbaus, der Druckindustrie, der Optik- und Mikrotechnik werden diese Sensoren häufig zur Überwachung von Maschinenachsen, Wellen, Führungen, Membranen etc. eingesetzt.

Einfache Sensoren dieser Art, die jeweils einen Lichtleiter für den Lichtsende- und Lichtempfangsweg, eine Sendelichtquelle und einen Photodetektor enthalten, sind seit langer Zeit bekannt. Bereits in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurden entsprechende Anordnungen beschrieben [1,2]. Das Grundprinzip des faseroptischen Abstandssensors (Bild 1) beruht auf einer abstandsabhän-

gigen Abbildung des Lichtbündels auf den Empfänger. Dadurch werden die Lichtströme mit dem Abstand moduliert. Die Abstandsabhängigkeit wird durch das optische Abbildungsverhalten und durch das photometrische Entfernungsgesetz (Gl. 1) bestimmt.

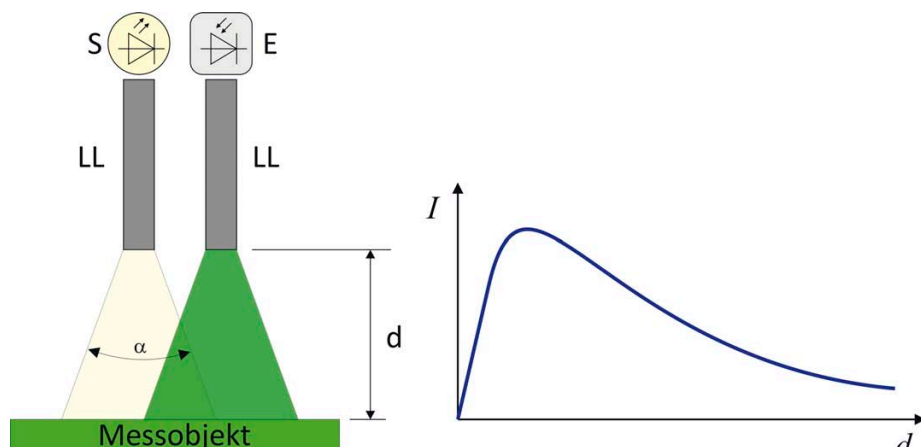
$$E = -\frac{I}{r^2} \cos \alpha \quad (\text{Gl.1})$$

E = Beleuchtungsstärke  
I = Lichtstärke  
r = Abstand zwischen Lichtquelle und Fläche  
 $\alpha$  = Einfallswinkel

Als Sendelichtquelle dient meist eine LED, deren Licht über einen Sendelichtleiter auf das Messobjekt trifft. Ein Empfangslichtleiter führt das vom Messobjekt reflektierte Licht auf eine Photodiode, die es in ein elektrisches Signal wandelt. Komplettete Sensorsysteme beinhalten außerdem Mikrokontroller und zusätzliche Elektronik zur Signalverarbeitung.

Der Abstandsbereich mit ansteigender Signalintensität wird durch den Abstand der Sender- und Empfängerfasern bestimmt. Dieser empfindliche Bereich mit großer, fast linear verlaufender Intensitätsänderung ist bei eng nebeneinander liegenden Fasern sehr klein. Dagegen wird der Abstandsbereich nach dem Intensitätsmaximum hauptsächlich durch das photometrische Entfernungsgesetz bestimmt, zeigt damit einen quadratischen Intensitätsabfall und ist für größere Arbeitsabstände nutzbar. Die nichtlineare Kurvenform des Sensorsignals im Abstandsbereich fallender Signalintensität lässt sich einfach mit Hilfe eines Mikrokontrollers linearisieren und stellt somit keinen Nachteil dar.

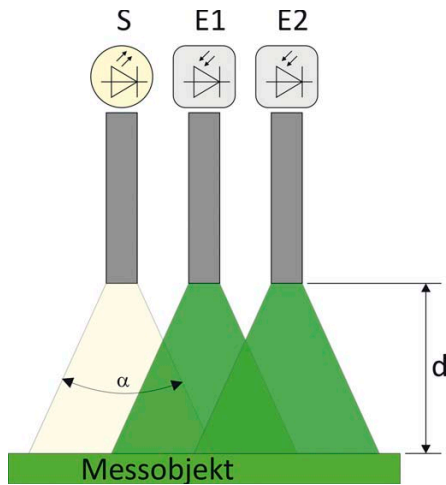
Die Intensität des im Photodetektor empfangenen Signals hängt aber nicht nur vom optischen Abbildungsverhalten der Lichtleiter und vom photometrischen Entfernungsgesetz ab. Wesentlichen Einfluss hat auch das Reflexionsvermögen des Messobjektes. In der Folge erhält man für Messobjekte mit zwar identischem Abstand aber unterschiedlicher Reflektivität auch ein unterschiedliches Abstandssignal. Der praktische Nutzen dieser einfachen Sensortypen ist damit auf spezielle Anwendungen beschränkt, bei denen immer dasselbe Messobjekt überwacht wird.



**Bild 1: Schematischer Aufbau und typisches Ausgangssignal eines einfachen faseroptischen Abstandssensors**

## Bisherige Methoden zur Reflexionskompensation

Für beliebig reflektierende Messobjekte kommen bislang verschiedene Methoden zur Kompensation der Reflexionsabhängigkeit faseroptischer Abstandssensoren zum Einsatz [3-8]. Hierbei werden zwei Empfängerkanäle mit gleichen elektrischen Eigenschaften verwendet. Die beiden Empfangslichtleiter mit gleichen optischen Eigenschaften sind dabei in einer speziel-



**Bild 2: Prinzip der geometrischen Fasernordnung in einem reflexionskompensierten faseroptischen Abstandssensor**

len geometrischen Weise zum Messobjekt angeordnet (**Bild 2**), sodass sich deren optisches Abbildungsverhalten unterscheidet. Dadurch unterscheidet sich auch das Intensitätssignal der beiden Empfangskanäle und somit das elektrische Signal der beiden Photodioden. Die Empfindlichkeit des jeweiligen Sensorkanals ist unabhängig von den Reflexionseigenschaften des Messobjektes. Daher ergibt der Quotient der Intensitäten beider Empfangssignale ein von den reflektiven Eigenschaften weitgehend unabhängiges Abstandssignal. Dabei wird der zweite Empfängerlichtleiter in einem weiteren Abstand zum Sendeleichtleiter angeordnet. Praktisch wird eine solche Anordnung meist als Faserbündel ausgeführt, wobei die einzelnen Sende- und Empfängerfasern coaxial in einem Tastkopf geordnet sind. Bei vielen Anwendungen ist eine genaue Kenntnis der Messstelle nötig. Der Mess-

fleck auf dem Objekt wird durch die Schnittflächen der Lichtkegel aus Sende- und Empfängerfasern gebildet. Da nur die Fläche des Sendelichtkegels auf dem Messobjekt sichtbar wird, ist der genaue Messort nicht bzw. nur schätzungsweise bekannt. Dies ist ein Nachteil aller Kompensationsmethoden, die auf dem geometrischen Fasernordnungsprinzip beruhen. Zusätzlich sind diese Methoden aufgrund des beschränkt nutzbaren Arbeitsabstandes limitiert.

### Neue Methode zur Reflexionskompensation

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Verfahren finden bei der neuen Methode Empfängerlichtleiter Verwendung, deren optische Eigenschaften sich unterscheiden und damit ein differierendes Abstandsempfindlichkeitsverhalten zeigen.

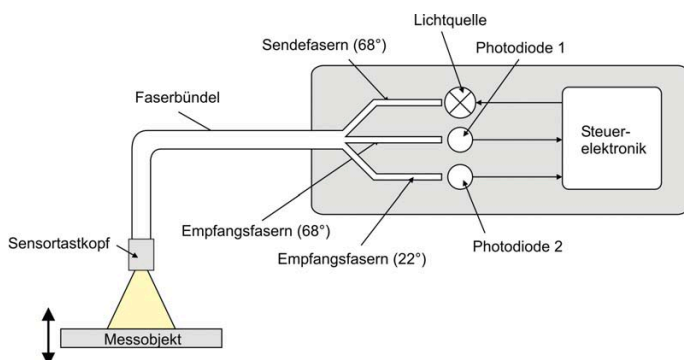
Ein wichtiger Parameter für Lichtleiter ist die numerische Apertur  $NA$ . Sie wird bei Stufenindexfasern durch die Brechzahlen von Lichtleiterkern  $n_1$  und Lichtleitermantel  $n_2$  definiert.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (Gl.2)$$

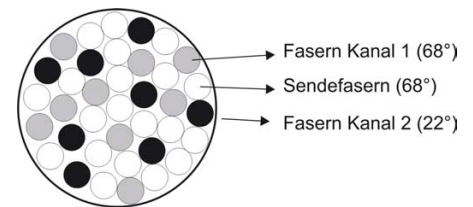
Die numerische Apertur bestimmt nach Gl. 2 wiederum den Öffnungswinkel (Akzeptanzwinkel)  $\alpha$  des Lichtkegels, der von der Faser ausgesendet bzw. aufgenommen werden kann.

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin NA \quad (Gl.3)$$

Die Empfindlichkeit des faseroptischen Abstandssensors ist vom Öffnungswinkel des Lichtleiters abhängig. Werden nun für den Empfang zwei Lichtleiter mit unterschiedlicher numerischer Apertur eingesetzt (**Bild 3**), so erhält man zwei verschiedene Intensitätskurven.



**Bild 3: Schema eines faseroptischen Abstandssensors mit Reflexionskompensation auf Basis zweier Empfängerlichtleiter mit unterschiedlicher numerischer Apertur**

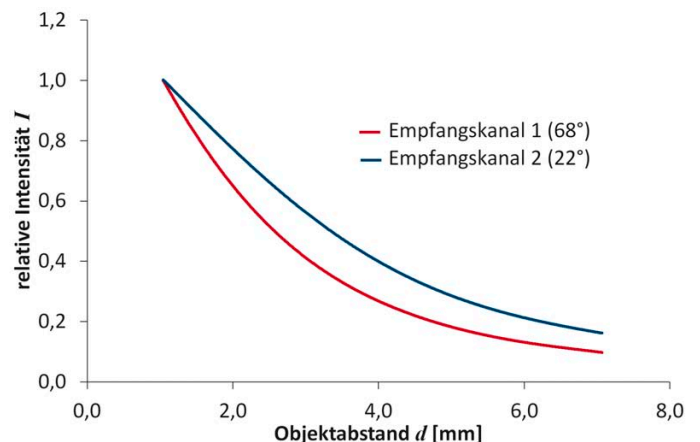


**Bild 4: Statistisch gemischte Anordnung der Sende- und Empfängerfasern im Tastkopf**

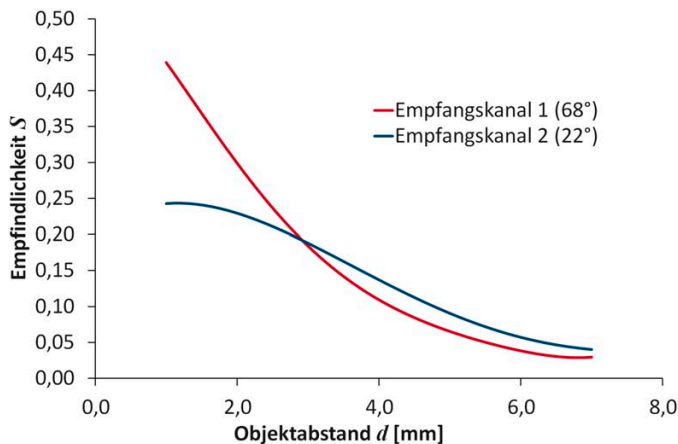
Das Funktionsmuster eines solchen Sensortyps verwendet eine Weißlicht-LED zur Messobjektbeleuchtung. PIN-Photodioden, die ebenfalls über einen weiten Spektralbereich empfindlich sind, detektieren das Licht und eine spezielle Steuerelektronik mit Mikrokontroller übernimmt die Strom-/Spannungswandlung, Signalverstärkung, LED-Steuerung, A/D-Wandlung und digitale Signalverarbeitung. Der Öffnungswinkel der eingesetzten Fasern für den Sendeleichtleiter beträgt  $68^\circ$  ( $NA = 0,56$ ). Die Fasern der Empfangskanäle 1 und 2 mit einem Öffnungswinkel von  $68^\circ$  ( $NA = 0,56$ ) bzw.  $22^\circ$  ( $NA = 0,21$ ) sind in einem gemeinsamen Lichtleiterschutzmantel gebündelt und in einem Tastkopf statistisch gemischt angeordnet (**Bild 4**).

Diese statistische Mischung der Fasern im Tastkopf hat den Vorteil, dass der auf dem Messobjekt sichtbare Lichtfleck weitgehend dem Messort entspricht. Außerdem werden kleinere Inhomogenitäten auf der Messobjektoberfläche durch diese Anordnung besser kompensiert.

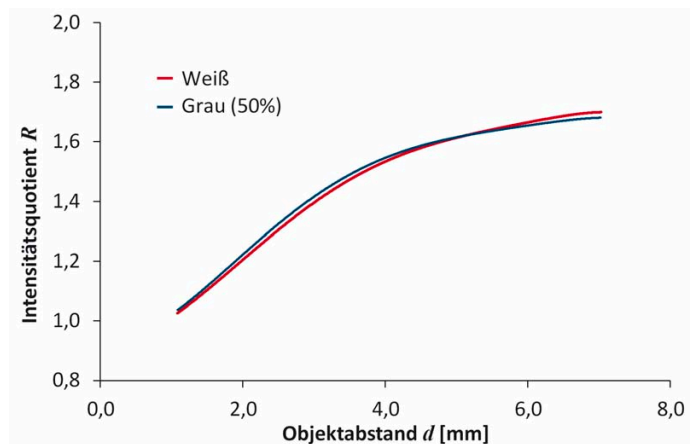
Die typischen Intensitätskurven der beiden Empfangskanäle 1 und 2 des neuen faseroptischen Abstandssensors (**Bild 5**) zeigen nur den Kurvenbereich abfallender Intensität. Der Abstand zwischen dem Sensortastkopf und dem Messobjekt wurde mit einem Triangulationssensor



**Bild 5: Relativer Intensitätsverlauf der beiden Empfangskanäle**



**Bild 6: Empfindlichkeitskurven der beiden Empfangskanäle**



**Bild 7: Intensitätsquotient als Funktion des Objektabstands bei unterschiedlich reflektierenden Objekten**

(Typ OADM 12U6460) im Bereich von 1...7 mm aufgenommen. Zur besseren Kurvendarstellung sind die Intensitätswerte auf den Anfangswert bei 1 mm Tastkopfabstand normiert.

Aus den Intensitätskurven können nach Gl. 4 die Empfindlichkeitsverläufe der beiden Empfangskanäle ermittelt werden (**Bild 6**). Die Empfindlichkeit  $S$  entspricht der Steigung der Intensitätskurve beim betrachteten Abstandswert.

$$S = -\frac{dI}{dd} \quad (\text{Gl.4})$$

Die Empfindlichkeitskurven zeigen einen unterschiedlichen Verlauf. Eine Quotientenbildung aus den beiden Intensitätswerten der Empfangskanäle ergibt nach Gl. 5 ein von den reflektiven Eigenschaften des Messobjektes unabhängiges Maß  $Q_1$  für den Objektabstand  $d$ .

$$Q_1 = \frac{I_2}{I_1} = f(d) \quad (\text{Gl.5})$$

In **Bild 7** ist der Intensitätsquotient  $Q_1$  als Funktion des Objektabstands  $d$  beispielhaft für zwei unterschiedlich reflektierende Messobjekte (Weiß und 50% Grau) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass trotz der großen Reflexionsunterschiede ein nahezu gleicher Kurvenverlauf erreicht wird.

Um ein lineares Ausgangssignal des Sensors zu gewährleisten, wird eine Korrektur mittels Suchtabelle (LUT) und anschließender linearer Interpolation zwischen den

Tabellenwerten vorgeschlagen. Alternativ zu diesem Verfahren kann auch eine aus einer Kurvenanpassung gewonnene Polynom-Gleichung zur Linearisierung verwendet werden.

## Fazit

Faseroptische Abstandssensoren, die ein reflexionsunabhängiges Abstandssignal liefern sollen, müssen über eine geeignete Kompensationsmethode verfügen. Das vorgestellte Kompensationsprinzip, welches auf der Verwendung zweier Empfangslichtleiter mit unterschiedlicher numerischer Apertur basiert, ist aufgrund des definierten Lichtflecks und Messortes auf dem Messobjekt gegenüber den bislang verwendeten Verfahren mit geometrischer Fasernanordnung vorteilhaft. Die statistische Fasermischung im Tastkopf kompensiert zudem auch kleinere Inhomogenitäten auf der Messobjektoberfläche. Das Verfahren eignet sich für einen vergleichsweise weiten Messabstandsbereich.

## Literaturhinweise:

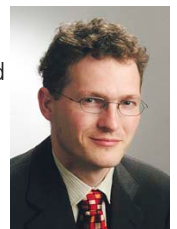
- [1] W.E. Frank, *Detection and measurement device having a small flexible fiber transmission line*, U.S. Patentschrift 3,273,447 (1966)
- [2] C.D. Kissinger, *Fiber optic proximity probe*, U.S. Patentschrift 3,327,584 (1967)
- [3] C.D. Kissinger, R. Dormann, *Reflectivity compensating system for fiber optic sensor employing dual probes at a fixed gap differential*, U.S. Patentschrift 4,488,813 (1984)
- [4] L. Hooogenboom, *Fiber optic proximity sensors for*

*narrow targets with reflectivity compensation*, U.S. Patentschrift 4,701,610 (1987)

- [5] C.D. Kissinger, *Reflectivity compensated fiber optic sensor*, U.S. Patentschrift 4,701,611 (1987)
- [6] R. Häfle, *Fiber optic probe sensor for measuring target displacement*, U.S. Patentschrift 5,017,772 (1991)
- [7] F. Suganuma, A. Shimamoto, K. Tanaka, *Development of a Differential Optical-Fiber Displacement Sensor*, Appl. Opt. 38 (1999), pp. 1103-1109
- [8] X. Li, K. Nakamura, S. Ueha, *Reflectivity and illuminating power compensation for optical fibre vibrometer*, Meas. Sci. Technol. 15 (2004), pp. 1773-1778

## Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Ansgar Wego  
Hochschule Wismar  
Bereich Elektrotechnik und Informatik  
Philipp-Müller-Str. 14  
D-23966 Wismar  
Tel. 03841/753-74 74  
E-Mail:  
ansgar.wego@hs-wismar.de



Dr.-Ing. Gundolf Geske  
Astech Angewandte Sensortechnik GmbH  
Schonenfahrerstr. 5  
D-18057 Rostock  
Tel. 0381/44073-17  
Fax 0381/44073-20  
E-Mail: geske@astech.de  
Internet: www.astech.de



www.photonik.de ▶ Webcode 5004