

# Messunsicherheitsbetrachtung optischer Abstandssensoren basierend auf der konoskopischen Holographie

## Measurement uncertainty of optical distance sensors based on conoscopic holography

Gillhaus, R.; Pahlke, A.; Kästner, M. Dr.-Ing.; Reithmeier, E. Prof. Dr.-Ing.

Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 17, 30167 Hannover

E-Mail: [ruediger.gillhaus@imr.uni-hannover.de](mailto:ruediger.gillhaus@imr.uni-hannover.de)

### Kurzfassung

Optische Punktsensoren für Abstandsmessungen werden zunehmend in der Geometrie- und Rauheitsmessung komplexer Bauteile eingesetzt. Sensoren, basierend auf dem konoskopischen Messprinzip, eignen sich dabei durch ihr kollineares Messprinzip hervorragend, um auch geneigte Oberflächen, wie beispielsweise Zahnflanken an Verzahnungen zu erfassen.

Sämtliche Herstellerspezifikationen dieser optischen Sensoren beziehen sich ausschließlich auf Messungen an Ebenen, welche exakt orthogonal zur optischen Achse stehen.

Erstmals wird experimentell eine Betrachtung der Messunsicherheit in unterschiedlichen Messbedingungen wie etwa Neigung des Messobjekts, Variation der Lichtstärke oder Position innerhalb des spezifizierten Messbereichs durchgeführt. Als Messobjekte werden neben einem Ebenennormal auch ein Zylinder-, Kontur- und Zahnradnormal eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit des Sensors unter schwierigen Messbedingungen zu überprüfen.

Ziel dieser Betrachtung ist der funktionale Nachweis zur Eignung dieser optischen Sensoren zur hochgenauen Erfassung komplexer Geometrien, welche z. B. bei außenverzahnten Stirnrädern oder Kurbelwangen geometrien vorliegen.

### Abstract

Optical point sensors for distance measurements are often used for form and roughness measurements of complex components. Especially sensors, which are based on the conoscopic holography, are excellent to measure pitched surfaces like toothing because of their collinear measurement principle.

The producer specifies the sensors solely on plane measurements, where the optical axis is exactly orthogonal to the plane.

In this paper the specifications of the producer are experimentally tested in different measurement preconditions like pitched surfaces, light intensity, measurement range, etc.. Measurement objects are among a plane normal, a cylinder normal and a contour normal, to verify the capability of these sensors. The goal is the functional verification of these sensors to capture complex geometries like gear wheels or crank webs.

## 1. Einleitung

Die Erfassung komplexer Geometrien, wie beispielsweise Verzahnungen, wird in der Messtechnik oftmals durch optisch arbeitende Sensoren durchgeführt. Die Integration optischer Sensoren in Koordinatenmessgeräte, aber auch Stand-Alone-Applikationen gewinnen daher stetig an Bedeutung [1]. Neben der mechanischen Entkopplung von Messobjekt und Messsystem sind die wesentlich kürzere Messzeit und die erheblich höhere Datendichte die wesentlichen Vorteile der optischen Messtechnik gegenüber klassischen taktilen Messverfahren. Auch die Erfassung von Geometriemerkmalen bei geringen Bauteilgrößen ist mit taktilen Tastern aufgrund der physikalischen Ausdehnung beschränkt [2].

Auch am Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) werden eine Vielzahl von optischen Messsystemen zur Erfassung von Form-, Maß-, Lage- und Rauheitsparametern eingesetzt und deren Eignung mit Hilfe von angemessenen Normalen und Versuchsaufbauten experimentell überprüft.

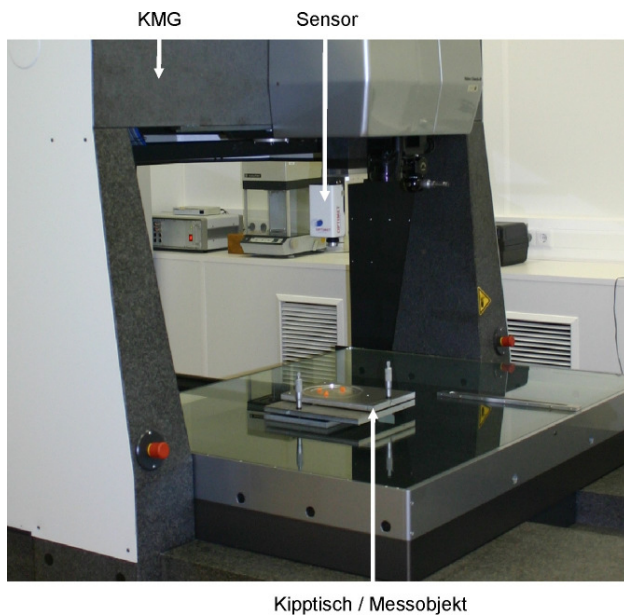
Ein häufig eingesetzter Sensor ist der konoskopische Sensor der Firma Optimet Ltd..

Aufgrund seiner kollinearen Funktionsweise kann er laut Hersteller Abstandsdaten bis zu Neigungswinkeln von  $\pm 85^\circ$  Grad zur Oberflächennormalen des Messobjekts sicher erfassen [3, 4, 5]. Diese Spezifikationen werden jedoch meist unter optimalen Messbedingungen nachgewiesen, die außerhalb von Messräumen selten vorliegen. Auch eine exakt orthogonale Ausrichtung des Messobjekts zum Sensor ist bei einem Einsatz in Produktionsprozessen oft nicht gegeben. Aus diesem Grund sind mehrere konoskopische Sensoren, die mittels unterschiedlichen Linsensystemen (Variation der Brennweite) verschiedene Genauigkeiten, Messbereiche und Arbeitsabstände aufweisen [6] in unterschiedlichen Messbedingungen experimentell auf ihre Spezifikation hin untersucht worden.

## 2. Versuchsaufbau

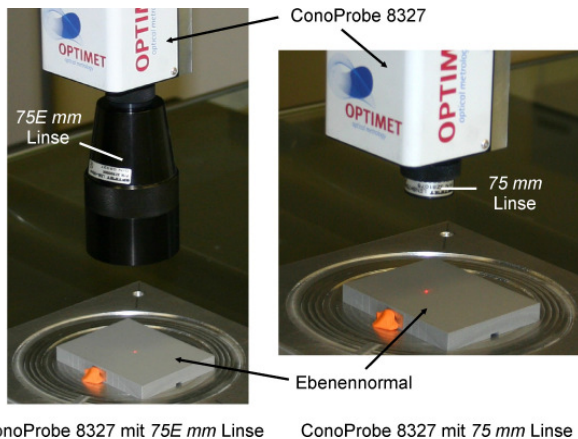
Zur experimentellen Untersuchung der Messunsicherheit sind konoskopische Sensor-Linsensysteme in ein Koordi-

natenmessgerät (KMG) VCIP 3D der Firma Werth integriert worden. In **Bild 1** ist der Versuchsaufbau dargestellt.



**Bild 1** Versuchsaufbau

Die konoskopischen Sensoren (ConoProbe) werden mittels einer Adapterplatte an die zweite z-Pinole des KMGs montiert. Die unterschiedlichen Messobjekte können mittels eines Kipptisches orthogonal zur optischen Achse des Abstandssensors ausgerichtet werden. Der Sensor wird bei allen Messungen entweder nur horizontal oder vertikal verfahren und dient als Referenz gegenüber den vom Sensor ermittelten Abstandswerten. Die Achsen des KMGs sind mit einer Positioniergenauigkeit von  $E_1 = 1,5 \pm (L/300) \mu\text{m}$  spezifiziert.



ConoProbe 8327 mit 75E mm Linse      ConoProbe 8327 mit 75 mm Linse

**Bild 2** Konoskopische Sensoren mit unterschiedlichen Linsentypen

Bei den unterschiedlichen Linsensystemen sind auch sogenannte Extended-Linsen getestet worden. Diese setzt das IMR zur Messdatenerfassung innerhalb von Produktionsprozessen ein, da diese über einen wesentlich größeren Arbeitsabstand verfügen. **Bild 2** zeigt einen konoskopischen

Sensor mit einer herkömmlichen und mit einer Extended-Linse.

Neben dem eigentlichen Abstand liefert der konoskopische Sensor optional weitere Informationen über die Güte der Messung, wie beispielsweise das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), die Lichtintensität auf der CCD-Zeile (TAL=Total Amount of Light) oder auch die Anzahl überbelichteter Pixel auf der CCD-Zeile. Diese Werte können beispielsweise zur Filterung der Abstandsdaten genutzt werden. Laut Hersteller sollte beispielsweise der Wert für TAL zwischen 1200-16000 liegen [4].

Innerhalb dieser experimentellen Untersuchung werden insgesamt vier konoskopische Sensoren eingesetzt, die sich hinsichtlich ihrer Baureihe (Produktgeneration), Messfrequenz und Bauweise unterscheiden. Die in den unteren Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Messungen sind meist exemplarisch an einer Sensor-Linsenkombination gezeigt.

In **Tabelle 1** ist die vom Hersteller angegebene Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und der Messbereich der eingesetzten Linsensysteme (Variation der Brennweite / Fokusslänge) ersichtlich.

Brennweite	50	75	100
Genauigkeit	< 6 $\mu\text{m}$	< 10 $\mu\text{m}$	< 15 $\mu\text{m}$
Reproduzierbarkeit	< 1 $\mu\text{m}$	< 2 $\mu\text{m}$	< 4 $\mu\text{m}$
Messbereich (ca.)	8 mm	18 mm	35 mm

**Tabelle 1** Genauigkeiten und Reproduzierbarkeiten (laut Hersteller)

Als Messobjekte werden neben einem Ebenennormal ein Zylinder-, Kontur- und Zahnradnormal genutzt, deren Spezifikationen entweder durch einen Kalibrierschein oder taktile Referenzmessungen bekannt sind. Die Messungen wurden allesamt in einem feinklimatisierten Raum mit einer Umgebungstemperatur von  $20^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ K}$  durchgeführt.

### 3. Messungen am Ebenennormal

Erstes Messobjekt zur Untersuchung von konoskopischen Sensor-Linsensystemen ist ein Ebenennormal, welches zur Kalibrierung von Streifenprojektionssystemen genutzt wird. Es verfügt über eine optisch kooperative, das heißt diffus reflektierende Oberfläche und weist eine Formabweichung < 2  $\mu\text{m}$  auf.

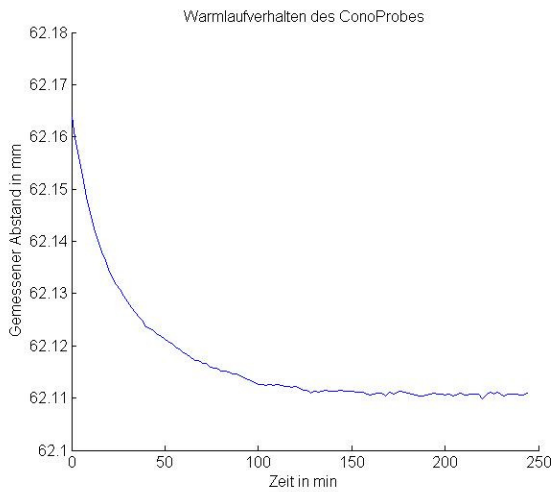
#### 3.1. Orthogonale Ausrichtung

Innerhalb dieser Messreihe ist das Ebenennormal durch eine geeignete Einmessstrategie orthogonal zur optischen Achse des montierten konoskopischen Sensors ausgerichtet worden, so dass grundsätzlich eine Messsituation wie bei der vom Hersteller durchgeführten Zertifizierung vorliegt.

##### 3.1.1. Warmlaufverhalten

Erster Untersuchungspunkt der Messunsicherheitsbetrachtung ist das Warmlaufverhalten der konoskopischen Sen-

soren. Hierfür ist der Sensor fix auf einer Messposition gehalten und in einem Zeitraum von vier Stunden alle zwei Minuten eine Messung durchgeführt worden. In **Bild 3** ist exemplarisch der Verlauf des gemessenen Abstandes eines konoskopischen Sensors abhängig von der Zeit ersichtlich.

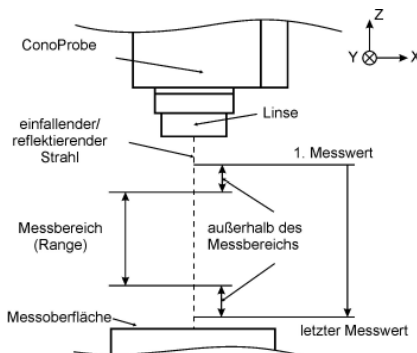


**Bild 3** Warmlaufverhalten eines konoskopischen Sensors

Ab ca. 120 Minuten stabilisiert sich der Abstandswert, der über den weiteren betrachteten Zeitraum von zwei Stunden in der angegebenen Reproduzierbarkeit des Herstellers konstant gehalten wird. Daher ist es überaus wichtig eine mindestens zweistündige Warmlaufphase bei konoskopischen Sensoren einzuhalten, da sonst ein Drift von über 50 µm auftritt.

**3.1.2. Messbereich**

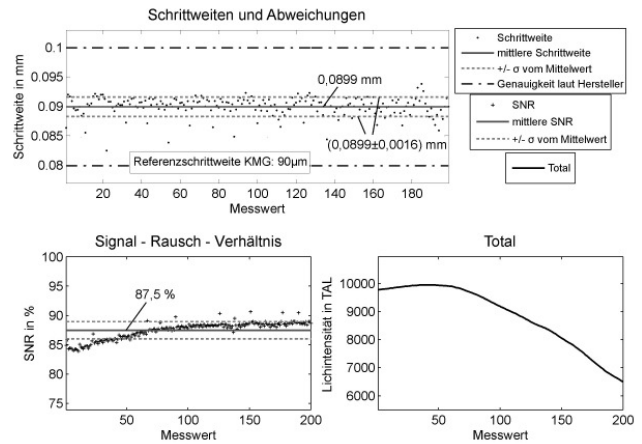
Nächster Fokus der Messunsicherheitsbetrachtung ist, ob der eingesetzte Sensor über seinen gesamten Messbereich laut Spezifikation funktioniert und inwieweit eine Überschreitung des spezifizierten Messbereichs die Messunsicherheit der Abstandswerte verschlechtert, respektive der Messbereich gegebenenfalls vergrößert werden kann. Der Messablauf ist in **Bild 4** prinzipiell dargestellt.



**Bild 4** Messdatenaufnahme am Ebenennormal

Mit Hilfe der z-Achse des KMGs wird der Sensor mit einer auf die Linse angepasste Schrittweite, die den Messbereich des Sensors in 200 äquidistante Bereiche aufteilt, po-

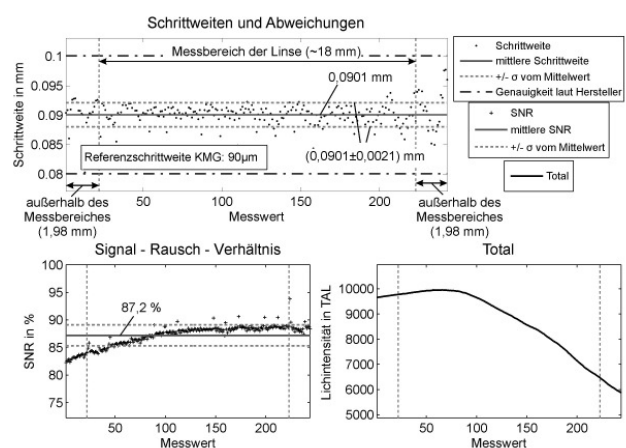
sitioniert. Dies bedeutet beispielsweise für die Linse mit einer Brennweite von 75 mm eine Schrittweite von 90 µm. Aus den gemessenen Abständen  $x_i$  des Sensors werden nachfolgend die gemessenen Schrittweiten  $s_i = x_i - x_{i+1}$  für  $i-1$  Messungen errechnet und mit der Referenzschrittweite des KMGs verglichen. **Bild 5** zeigt exemplarisch das Ergebnis für die Messbereichsanalyse für eine 75 mm-Linse mit einem Messbereich von 18 mm.



**Bild 5** Ergebnis für eine Linse mit einer Brennweite von 75 mm: spezifizierter Messbereich

Über den ganzen Messbereich ermittelt der Sensor eine gemessene Schrittweite von  $89,9 \pm 1,6 \mu\text{m}$  ( $\pm 1\sigma$  d. h.  $k=1$ ), welches sich in den Spezifikationen des Sensors befindet. Zusätzlich ist in Bild 4 der Verlauf des SNR und des TAL gezeigt. Beide sind in den vom Hersteller geforderten Bereichen. Diese beiden Größen werden zur Filterung genutzt, da bei dessen Über- bzw. Unterschreitung die Abstandswerte des Sensors stark fehlerhaft sind.

**Bild 6** zeigt die Ergebnisse des gegenüber dem spezifizierten Messbereich an beiden Messbereichsgrenzen um ca. 2 mm erweiterten Messbereichs.



**Bild 6** Ergebnis für eine Linse mit einer Brennweite von 75 mm: erweiterter Messbereich

Wie ersichtlich wird die Spezifikation hinsichtlich der Reproduzierbarkeit leicht überschritten. Jedoch kann festgestellt werden, dass unter diesen optimalen Messbedingungen der



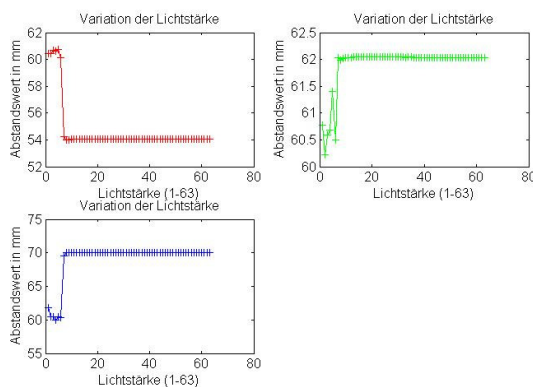
Messbereich um ca. 20 % vergrößert werden kann, ohne signifikante Abweichungen hinnehmen zu müssen. Auch für sämtliche anderen Sensor-Linsen-Kombinationen kann aufgrund ähnlicher Messdatenverläufe die gleiche Schlussfolgerung getroffen werden (siehe exemplarisch **Tabelle 2** für spezifizierten Messbereich).

Cono-Probe Nr.	Brennweite in mm	Referenzschrittweite in $\mu\text{m}$	Gemessene Schrittweite in $\mu\text{m}$	Standardabweichung in $\mu\text{m}$ (k=1)
8325	50	40	40,0	$\pm 0,8$
	50E	40	40,0	$\pm 0,6$
	75	90	89,9	$\pm 1,6$
8327	75E	90	90,1	$\pm 1,3$
	50	40	39,9	$\pm 0,8$
	50E	40	40,1	$\pm 0,4$
11853	75	90	90,0	$\pm 1,5$
	75E	90	90,3	$\pm 1,1$
	100	170	170,4	$\pm 2,1$

**Tabelle 2** Ergebnisse der Messbereichsuntersuchung

### 3.1.3. Lichtstärke und Messfrequenz

Bei dieser Messreihe befindet sich die eingesetzte Sensor-Linsen-Kombination (75 mm Brennweite) in drei festen Positionen, die sich jeweils 8 mm in der z-Koordinate des KMGs unterscheiden. Variiert wird diesmal einerseits die Messfrequenz und andererseits die Lichtstärke des Sensors. Eine Variation der letzt genannten kann mit einer sich ändernden Oberfläche gleichgestellt werden, da eine dunklere Oberfläche mehr Licht absorbiert als eine hellere und somit die am CCD-Sensor ankommende Lichtintensität sinkt. Ebenso beeinflusst die Veränderung der Messfrequenz die ankommende Lichtintensität, so dass der Effekt ähnlich ist. **Bild 7** zeigt die gemessenen Abstandswerte abhängig von der Lichtstärke.

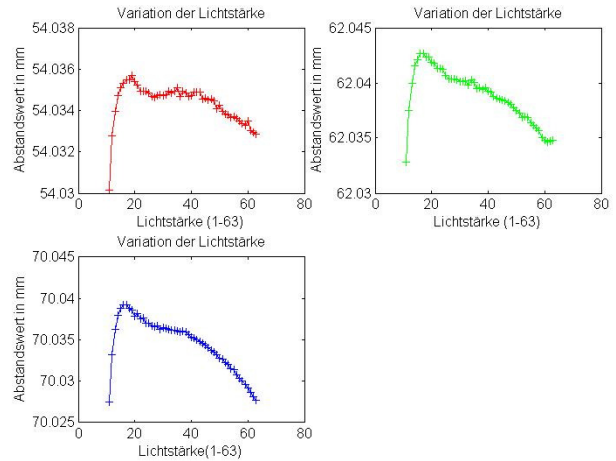


**Bild 7** Variation der Lichtintensität (1-63)

Die Lichtstärke ist in 63 Stufen von 1 bis 63 einstellbar. Die Variation der Lichtstärke ist in drei festen Positionen durchgeführt worden, so dass an der unteren und oberen Grenze und in der Mitte des Messbereichs Messdaten erfasst werden. Durch Bildung der Differenz kann zusätz-

lich ein Vergleich mit der Referenzschrittweite des KMGs durchgeführt werden.

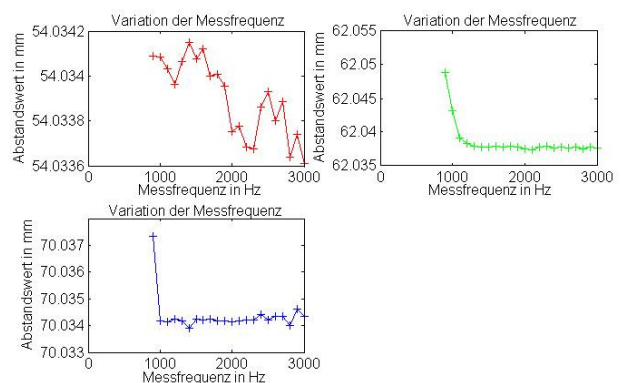
Wie in **Bild 7** zu sehen, schwanken bei niedrigen Lichtstärken die Abstandswerte in allen drei Positionen enorm. In diesen Fällen reicht die Lichtintensität an der CCD-Zeile nicht aus und unterschreitet die vom Hersteller geforderte Lichtintensität, wodurch ebenfalls das Signal-Rausch-Verhältnis niedrig ist. Werden die Daten zwischen diesen beiden Grenzwerten extrahiert (wie beschrieben), stellt sich folgender Abstandswerteverlauf ein (**Bild 8**).



**Bild 8** Variation der Lichtstärke (1-63), Ausschnitt

Während die Standardabweichungen des Mittelwerte aus **Bild 7** teilweise über 1 mm liegen, liegt nach Filterung (**Bild 8**) eine maximale Standardabweichung von 3,2  $\mu\text{m}$  vor (k=1). Als Schrittweiten ergeben sich 8,0045 und 7,9957 mm, welche im Rahmen der Genauigkeit der gewählten Sensorlinsenkombination liegt. Der hier vorliegende Trend der Abstandsabnahme bei Erhöhung der Lichtstärke kann nicht näher begründet werden.

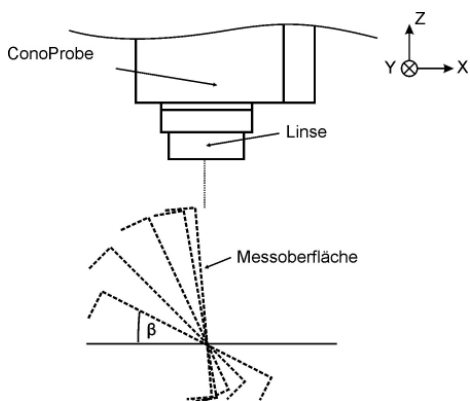
Ähnliche Ergebnisse, eine maximale Standardabweichung von 2,6  $\mu\text{m}$  und Schrittweiten von 8,0047 und 7,9958 mm, liefert die Variation der Messfrequenz, was **Bild 9** nach der Extraktion anhand SNR und TAL zeigt.



**Bild 9** Variation der Messfrequenz (800 – 3000 Hz)

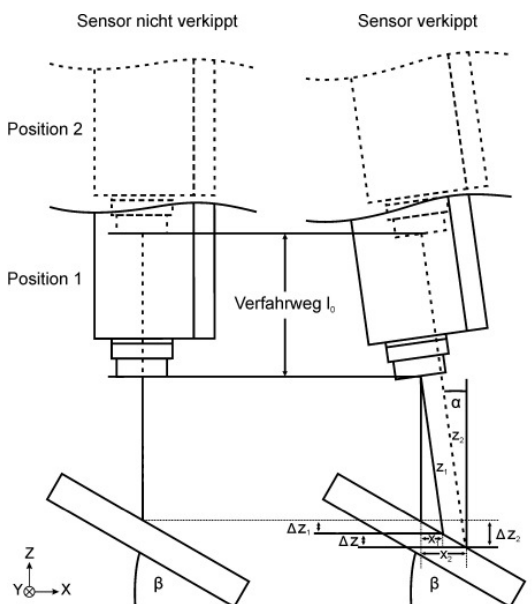
### 3.2 Winkeldefinierte Ausrichtung

Während bei den oberen Betrachtungen die optische Achse des Sensors orthogonal zum Messobjekt steht, wird bei den folgenden Messungen das Ebenennormal definiert verkippt. **Bild 10** zeigt exemplarisch fünf verschiedene Verkippfungswinkel  $\beta$ . Die Messprozedur entspricht der in Bild 3 dargestellten Vorgehensweise, ebenfalls die Auswertung der erfassten Abstandsdaten.



**Bild 10** Messdatenaufnahme am verkippten Ebenennormal

Im Gegensatz zur orthogonalen darf bei der winkeldefinierten Ausrichtung des Messobjekts die Verkipfung des konoskopischen Sensors aufgrund der Anflanschung an die Pinole des KMGs nicht mehr vernachlässigt werden. Der dadurch auftretende systematische Fehler ist in **Bild 11** skizziert.



**Bild 11** Problematik der zusätzlichen Verkipfung des konoskopischen Sensors

Der Winkel  $\alpha$  ruft eine zusätzliche Wegdifferenz  $\Delta z$  hervor, wenn der konoskopische Sensor vertikal, das heißt in z-Richtung durch das KMG bewegt wird. Mit Hilfe des bekannten Winkels  $\beta$  (gemessen mittels taktiler Messung),

des Verfahrenswegs  $l_0$  (Schrittweite KMG) und den gemessenen Abstandswerten kann der Winkel  $\alpha$  berechnet werden. Durch den Einsatz des Mittelwerts des Winkels  $\alpha$  können für verschiedene Winkel  $\beta$  die Wegdifferenzen  $\Delta z$  ermittelt und der gemessene Abstandswert korrigiert werden. Der Zusammenhang beläuft sich auf die folgende Gleichung:

$$\cos \alpha - \sin \alpha \tan \beta = \frac{l_0}{z_2 - z_1}$$

Das Ebenennormal ist taktil in fünf verschiedene Winkelpositionen  $\beta$  ausgerichtet worden: 26,57°, 44,66°, 65,51°, 79,16° und 84,27° (im weiteren Verlauf werden die ganzzahligen Winkel 27°, 45°, 66°, 79° und 84° genutzt). Wie bei der orthogonalen Ausrichtung sind zusätzlich Messpunkte außerhalb des von Hersteller angegebenen Messbereich erfasst worden (Linsensystem mit einer Fokusslänge von 75 mm). Die gewählte Schrittweite bei diesen Messungen wurde auf 0,2 mm festgelegt. Ohne die Beachtung des Verkippfungswinkels  $\alpha$  des Abstandssensors sind in **Tabelle 3** die Resultate für Messungen innerhalb des Messbereichs und für den erweiterten Messbereich gezeigt.

$\beta$ in °	Schrittweite im Messbereich in mm (k=1)	Schrittweite im erweiterten Messbereich in mm (k=1)
27	0,2005 ± 0,0024	0,2001 ± 0,0029
45	0,2008 ± 0,0025	0,2005 ± 0,0031
66	0,2017 ± 0,0019	0,2011 ± 0,0026
79	0,2041 ± 0,0019	0,2026 ± 0,0047
84	0,2085 ± 0,0044	0,2081 ± 0,0052

**Tabelle 3** Gemessene Schrittweiten bei unterschiedlichen Kippwinkeln des Ebenennormals

Wie in Tabelle 3 gezeigt, ist die Standardabweichung beim erweiterten Messbereich stets größer, die im Durchschnitt gemessene Schrittweite entspricht jedoch im Wesentlichen der im spezifizierten Messbereich. Weitaus prägnanter ist, dass sich die gemessene Schrittweite erhöht, je steiler der Kippwinkel des Ebenennormals ist. Der Grund liegt in der in Bild 11 gezeigten zusätzlichen Verkipfung des Abstandssensors. Mit den obigen Abstandsdaten kann der Winkel  $\alpha$  berechnet werden zu  $0,2404^\circ \pm 0,0251^\circ$  (k=1). Die gemessenen Schrittweiten werden mit den Wegdifferenzen  $\Delta z$ , welche mit dem Winkel  $\alpha$  und dem Verkippfungswinkel  $\beta$  des Normals berechnet werden, korrigiert. Die Resultate sind in **Tabelle 4** dargestellt.

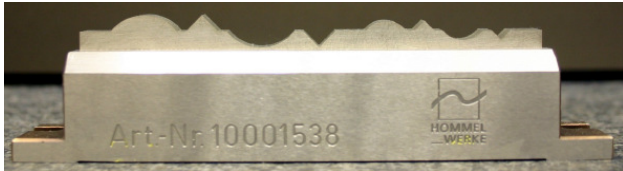
$\beta$ in °	Schrittweite im Messbereich in mm (k=1)
27	0,2001 ± 0,0024
45	0,1999 ± 0,0025
66	0,1998 ± 0,0019
79	0,1996 ± 0,0019
84	0,1997 ± 0,0044

**Tabelle 4** Gemessene Schrittweiten bei unterschiedlichen Kippwinkeln des Ebenennormals

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der konoskopische Sensor auch bei großen Neigungswinkeln sehr gute Abstandsdaten liefert. Einzig bei dem größten eingestellten Neigungswinkel, der nahe bei der vom Hersteller angegebenen maximalen Neigung liegt, erhöht sich die Messunsicherheit um etwa das Doppelte.

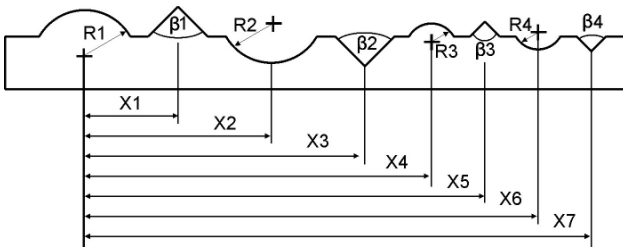
#### 4. Messungen am Konturnormal

Das eingesetzte Normal zur Überprüfung des Abstandssensors wird nach der Richtlinie VDI/VDE 2629 Blatt 1 für Konturmessungen eingesetzt ist in **Bild 12** dargestellt.



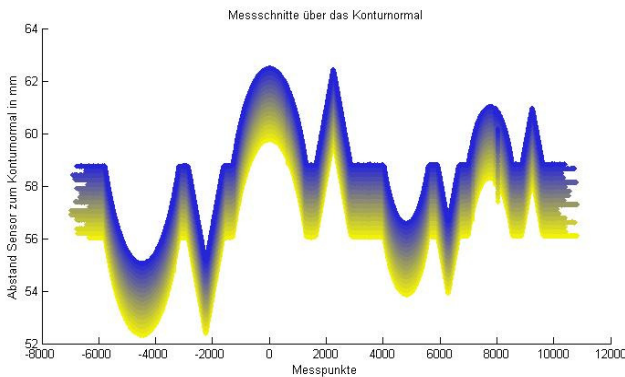
**Bild 12** Konturnormal

Dieses weist die wesentlichen Geometrielemente Radien, Winkel und Abstände auf, die für Konturmessungen erforderlich sind. Das Normal hat eine Vielzahl von Merkmalen, von denen einige in die Bild 13 gezeigt werden.



**Bild 13** Einige Merkmale des Konturnormals

Bei der Messung wird der Abstandssensor mit einem Linsensystem von 75 mm Brennweite horizontal (in x-Richtung, siehe Bild 10) über das Konturnormal verfahren. Dies wird in 17 unterschiedlichen z-Positionen durchgeführt. Die einzelnen Schnittverläufe sind in **Bild 14** gezeigt.



**Bild 14** 17 Messschnitte über das Konturnormal

Nach der Abstandsdatenaufnahme sind die einzelnen Geometriemerkmale extrahiert worden, um die in Bild 13 dargestellten Merkmale berechnen zu können. Während die Kreissegmente, Kreise eingepasst worden sind, werden in die Spitzen zwei Geraden eingepasst und der dazugehörige Schnittwinkel und der Schnittpunkt der Gerade berechnet (jeweils Least Square). In **Tabelle 5** sind diese den Werten des Kalibrierscheins gegenübergestellt.

Wie in Tabelle 5 ersichtlich, werden die Radien des Konturnormals mit einer maximalen Abweichung von 6 µm ermittelt, was innerhalb der Spezifikation der eingesetzten Sensor-Linsenkombination ist. Die ermittelten Längen, die sich laut Kalibrierschein auf die Mittelpunkte der errechneten Kreise beziehen, werden mit einer maximalen Differenz von etwa 4 µm sehr gut getroffen. Bei den Längen, die sich auf den Schnittpunkt der ermittelten Geraden bei den gemessenen Spitzen beziehen ist die Differenz mit maximal 16 µm weitaus höher. Dieses spiegelt auch die Ermittlung der Winkel  $\beta$  nach Bild 13 wieder. Diese liegen bis  $0,16^\circ$  neben den im Kalibrierschein angegebenen Werten. Auch die Standardabweichungen der gemessenen und errechneten Winkel sind mit maximal  $0,09^\circ$  erheblich. Der Grund der Abweichungen an den gemessenen Winkelementen kann nicht genauer spezifiziert werden und erfordert weitere Untersuchungen.

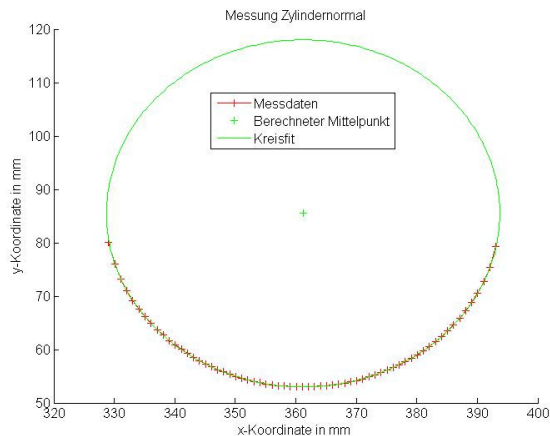
Merkmal	Gemessenes Merkmal in mm (k=1)	Wert im Kalibrierschein in mm (k=2)	Differenz in mm
R1	10,0075 ± 0,0072	10,0021 ± 0,0009	0,0054
R2	10,0046 ± 0,0012	10,0106 ± 0,0011	-0,0060
R3	5,9939 ± 0,0074	5,9940 ± 0,0012	-0,0001
R4	6,0260 ± 0,0020	6,0207 ± 0,0012	0,0053
X1	13,4921 ± 0,0013	13,4795 ± 0,0008	0,0126
X2	26,9567 ± 0,0007	26,9610 ± 0,0008	-0,0043
X3	40,4234 ± 0,0006	40,4391 ± 0,0008	-0,0157
X4	55,8078 ± 0,0008	55,8036 ± 0,0008	0,0042
X5	64,6961 ± 0,0018	64,6839 ± 0,0008	0,0122
X6	73,5619 ± 0,0007	73,5648 ± 0,0008	-0,0029
X7	82,4220 ± 0,0019	82,4437 ± 0,0008	-0,0017
Merkmal	Gemessenes Merkmal in ° (k=1)	Wert im Kalibrierschein in ° (k=2)	Differenz in °
$\beta_1$	89,9903 ± 0,0594	90,0394 ± 0,015	-0,0491
$\beta_2$	90,1825 ± 0,0305	90,0026 ± 0,015	0,1565
$\beta_3$	90,0575 ± 0,0890	90,0387 ± 0,0183	0,0188
$\beta_4$	89,9336 ± 0,0714	90,0926 ± 0,0212	-0,1590

**Tabelle 5** Gegenüberstellung der gemessenen Werte zum Kalibrierschein

#### 5. Messungen am Zylindernormal

Eine weitere Erprobung des konoskopischen Sensors wird mittels eines Zylindernormals durchgeführt, welches einen Durchmesser von  $64,9825 \pm 0,0014$  mm aufweist. Die Durchführung dieser Messung entspricht im wesentlichen der Messung am Konturnormal mit dem Unterschied, dass die Messpunkte in einem diskreten Messraster von 1 mm aufgenommen worden sind. Als Linse wur-

de aufgrund des Durchmessers die Brennweite von 100 mm gewählt, da diese einen Messbereich von 35 mm aufweist. **Bild 15** zeigt die gemessenen Kreisschnitt und die dazugehörige Kreiseinpassung (Least Square).



**Bild 15** Messung am Zylindernormal

Aus den Messdaten wird ein Durchmesser von 64,9818 mm bestimmt, was eine Abweichung von unter einem 1  $\mu\text{m}$  entspricht.

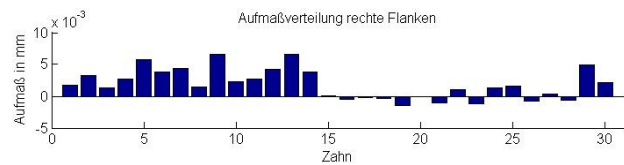
Weitere Messungen am Zylindernormal entsprechen dem Vorgehen bei dem Ebenennormal. Aufgrund der Sensorverkipfung durch die Befestigung an der Pinole des KMGs entstehen ebenfalls Abweichungen wie bei den Messungen am Ebenennormal. Da sich durch die Bewegung des Sensors in z-vertikaler Richtung auch der Verkipfungswinkel des Normals ändert, ist der systematische Fehler größer als bei den oben gezeigten Ebenennormalmessungen. Die Korrektur ist jedoch aufgrund des gewählten Messvorgangs nicht ohne Weiteres durchführbar. Daher wird auf deren Darstellung verzichtet.

## 6. Messung am Zahnradnormal

Der konoskopische Sensor wird am IMR innerhalb eines Sonderforschungsbereichs (SFB489) unter anderem zur Verzahnungsmessung (beispielsweise bei Ritzelwellen) eingesetzt. Durch eine Einpassung der Messdaten auf eine Referenzgeometrie wird eine ideale Position berechnet, in der ein etwaiges Aufmaß auf den Zahnflanken optimal verteilt ist, um eine vollständige Bearbeitung der Zahnflanken innerhalb eines Schleifprozesses zu gewährleisten [7, 8]. Zur Überprüfung der Abstandssensoren bei einer Verzahnungsmessung ist ein ideales Lehrzahnrad der Firma Frenco gemessen worden, dessen maximale Teilungseinzelabweichung 1,7  $\mu\text{m}$  (linke Flanke) bzw. 1,3  $\mu\text{m}$  (rechte Flanke) beträgt und eine Profilgesamtabweichung von 3,5  $\mu\text{m}$  (linke Flanke) bzw. 3,4  $\mu\text{m}$  (rechte Flanke) aufweist.

Die durch den konoskopischen Sensor ermittelte Aufmaßverteilung (orthogonaler Abstand der Messpunkte zur Referenzgeometrie: ideale Evolventenverzahnung) beträgt maximal 6,5  $\mu\text{m}$  an der rechten Flanke und 7,1  $\mu\text{m}$  bei der linken Flanke, was eine generelle Eignung des Sensors für

diese Messaufgabe zeigt. **Bild 16** zeigt exemplarisch die Aufmaßverteilung an den rechten Flanken.



**Bild 16** Aufmaßverteilung an den rechten Flanken des Lehrzahnrad

## 7. Zusammenfassung

Ziel dieser Betrachtung war die Eignungsprüfung von auf der konoskopischen Holographie basierenden Abstandssensoren zur Erfassung komplexer Geometrien, wie beispielsweise Verzahnungen oder Kurbelwangen. Hierfür wurde in umfangreichen experimentellen Untersuchungen die Messunsicherheit bei variierenden Messbedingungen untersucht. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der konoskopische Abstandssensor in vielen Messsituationen gute Ergebnisse zeigt. Gerade die Aussage des Herstellers bis zu einem Neigungswinkel von  $85^\circ$  gegenüber der Oberflächennormalen messen zu können, sind mittels guter Ergebnisse am verkippten Ebenennormal bestätigt worden. Jedoch erhöht sich bei großen Neigungswinkeln die Standardunsicherheit der Messwerte bis auf das Doppelte der spezifizierten Reproduzierbarkeit.

Bei der Messung des Konturnormals weichen jedoch insbesondere die ermittelten Winkel von den im Kalibrierschein angegebenen Werten ab. Auch deren Standardabweichungen sind erheblich höher als bei allen übrigen Messungen. Ob dieses jedoch ein sensorspezifisches Problem darstellt kann noch nicht beantwortet werden. Hierfür sind weitere umfangreiche Messungen am Konturnormal erforderlich.

## 8. Danksagung

Die Autoren dieses Beitrags danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Teilprojekte A5 und T4 innerhalb des Sonderforschungsbereichs 489. Auch danken die Autoren Jörn Gebauer und Waldemar Gorschenew für die Unterstützung bei der umfangreichen Messdatenaufnahme.

## 9. Literatur

- [1] Schwenke, H.; Neuschäfer-Rube, U.; Kunzmann, H.; Pfeiffer, T.: Optical methods for dimensional metrology in production engineering, CIRP Annals:51 (2002), 2, pp. 685-699
- [2] Neuschäfer-Rube, U.; Wendt, K.; Ehrig, W.: Optische Sensoren für die Koordinatenmesstechnik – Prinzipien und Prüfung. PTB-Mitteilungen 117 (2007), Heft 4, S. 380-389
- [3] Pahlke, A.; Gillhaus, R.; Schroth, M.; Kästner, M.; Reithmeier, E.: Mit scharfem Blick. Konoskopische Lasersensoren erfassen komplexe Bauteile. QZ - Qua-

- lität und Zuverlässigkeit, 6/2009, Jahrgang 54, S. 43 - 45
- [4] NN: Conoprobe - True 3D Free-Form Absolute Measurement with  $\mu\text{m}$  Resolution. OPTIMET Optical Metrology, 2001
- [5] Rahlves, M.; Seewig, J.; Beichert, G.; Berger, G.; Gillhaus, R.; Kästner, M.; Körfer, F.; Köllmann, D.; Lyda, D.; Püschmann, D.: Optisches Messen Technischer Oberflächen in der Praxis. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [6] Gillhaus, R.; Kästner, M.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: Sensorintegration zur Feinpositionierung von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen. VDI-Tagung "Sensoren und Messsysteme 2008", 10-12.03.2008, Ludwigsburg, VDI Berichte 2011, S. 841-850, 2008
- [7] Gillhaus, R.; Kästner, M.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: 3D-Data Acquisition, Processing and Analysis of Gear Shaft Measurements Using Optical Sensors. Coordinate Measuring Technique 2008, Bielsko-Biela, Poland, pp.270-278, 2008
- [8] Denkena, B.; Immel, J.; Gillhaus, R.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: In-Process Measurement and Positioning of Precision-forged Gear Shafts in 4 DOF. Conference Proceedings of the euspen International Conference, 18-22.05.2008, Zurich, Volume II, pp. 240-244, 2008