

Peter Kühmstedt, Jörg Gerber und Gunther Notni



Peter Kühmstedt

## 1. Einführung

In der Qualitätskontrolle sowohl im Labor als auch direkt in der Fertigung nimmt der Einsatz der optischen 3-D-Messtechnik ständig zu. Damit verbunden ist die zunehmende Forderung, den Nachweis der Prozessfähigkeit solcher Systeme beim Einsatz in der Qualitätskontrolle zu erbringen. Hierzu ist das Erreichen entsprechender Messmittelfähigkeitsindizes nachzuweisen. Dabei sind die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Industrieunternehmen zu berücksichtigen /1/. Anhand der Untersuchung bei der Bestimmung von Stichmaßen an einem Messobjekt aus der industriellen Praxis wird gezeigt, welche Messmittelfähigkeitsindizes erreicht werden können.

## 2. Vermessung von Biegeteilen mittels Streifenprojektion

Am Fraunhofer IOF wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche optische 3-D-Messsysteme auf der Basis von Streifenprojektionstechniken entwickelt /2/, /3/. Einige davon sind in

industriellen Anwendungen im Einsatz. Hierzu zählt das 3-D-Digitalisiersystem „HSDIG“, das zur automatisierten Rundumvermessung kleinerer Objekte entwickelt wurde, siehe Abb. 1, /4/. Dieses ist durch folgende Kenngrößen charakterisiert:

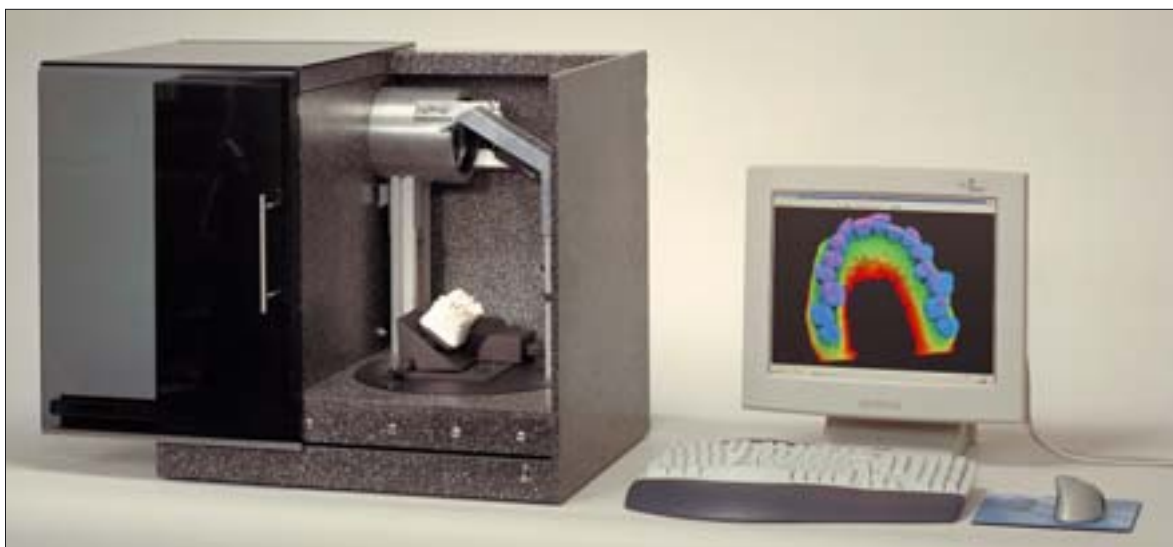
Tab. 1:  
Parameter des 3-D-Messsystems.

Messzeit	30 sec .. 4 min
Anzahl der Teilansichten	8 .. 16
Anzahl der Messpunkte	3.000.000
Anzahl der Bewegungsachsen	2
Messvolumen	Ø 90 mm Höhe 25 mm
Typische Messunsicherheit ( $\sigma$ )	< 16 $\mu\text{m}$

Eine typische mit diesem Messsystem zu realisierende Prüfaufgabe bestand in der prozessfähigen Ermittlung sowohl von Winkeln im Objekt als auch Durchmessern von Bohrungen (hier Stanzlöcher). Die Abb. 2 zeigt ein Foto des Messobjektes und die Abb. 3 zeigt die resultierende Punktwolke einer Messung.

Abb. 1:  
3-D-Digitalisierer „HS-DIG“.

Fig. 1:  
3-D digitizer „HS-DIG“.



# Measurement capability of an optical 3-D measurement

Peter Kühmstedt, Jörg Gerber und Gunther Notni

## 1. Introduction

3-D measurement methods are being used increasingly in quality control in the laboratory as well as in production. Consequently, there is an increasing demand for proof that such systems can be integrated into processes. It is thus necessary to prove that appropriate measurement capability indices can be attained. In this regard, the particular demands of the individual industrial companies need to be taken into consideration /1/. The measurement capability indices that can be reached in practice will be shown using the results gained from geometric features measured on an industrial object.

## 2. Measurement of bent parts with the help of fringe projection

For several years, IOF has been developing different 3-D measurement methods based on fringe projection. Some of these have subsequently gone into industrial application, including the „HSDIG“ 3-D digital system, which

was produced for the automatic all-around measurement of small objects (see fig. 1, /4/). The system features the following characteristics:

Tab. 1:  
Parameters of the 3-D measurement system.

Time of measurement	30 sec .. 4 min
Number of views/patches	8 .. 16
Number of measurement points	3 000 000
Number of rotational drives	2
Measurement volume	Ø 90 mm, High 25 mm
Typical measurement uncertainty ( $\sigma$ )	< 16 $\mu$ m

One typical task for which this system can be used is the determination of angles in objects as well as the diameter of drill holes. Fig. 2 shows a photograph of the object to be measured and fig. 3 shows the resulting point cloud for one measurement



Jörg Gerber



Gunther Notni

Abb. 2:  
Foto des Biegeteils.

Fig. 2:  
Photo of the object.



Abb. 3:  
Messergebnis – Punktwolke eines Biegeteils, Farbkodierung der Höhe.

Fig. 3:  
Point cloud of a metallic probe, colour indicate high.



### 3. Messmittelfähigkeitsindizes – Toleranzen

Beim Einsatz von Messmitteln in der Qualitätssicherung ist es erforderlich, ausreichend kleine Standardabweichungen bei den Messungen zu realisieren, um die geforderten Toleranzen der zu messenden Merkmale des Messobjektes zu erreichen. Dabei gibt es bei den Industrieunternehmen unterschiedliche Definitionen der nachzuweisenden Fähigkeitsindizes. Für unsere Untersuchungen haben wir uns an den Anforderungen der Firma Bosch orientiert /5/. Dabei wurden folgende Fähigkeitsindizes ermittelt:

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_w} \quad C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - |\bar{x} - x_r|}{3 \cdot s_w}$$

T – Toleranz, diese wird vom Anwender vorgegeben

$s_w$  – Standardabweichung bei der Messung

Um eine Einstufung als „fähig“ zu erlangen ist gefordert, dass für das Messmittel sowohl  $C_g \geq 1,33$  als auch  $C_{gk} \geq 1,33$  erfüllt wird. Das führt direkt zu der zu erfüllenden Relation:  $T \geq 40 s_w$ . Weiter werden toleranzbezogene Gesamtstrebereiche (siehe Tab. 2) ermittelt und die Anforderung gestellt  $S_M \% \leq 12 \%$ . Die Bewertung dieser Anforderung zeigt, dass mit den Standardabweichungen bei der Messung im Bereich von 1–10  $\mu\text{m}$ , wie sie für optische Systeme typisch sind, eine Toleranz im Bereich von 40  $\mu\text{m}$  bis 400  $\mu\text{m}$  zu realisieren ist (siehe Tab. 2).

Kritisch anzumerken ist, dass insbesondere bei Maschinenbauteilen häufig die Einhaltung noch kleinerer Toleranzen gefordert wird. Dies bedeutet sowohl für taktil als auch optisch antastende Verfahren bisher kaum umsetzbare Anforderungen an die Einhaltung der Fähigkeitsindizes und muss deshalb kritisch hinterfragt werden (siehe auch /6/).

### 4. Messresultate

Es wurden zwei Untersuchungsverfahren eingesetzt.

#### Ziel von Verfahren 1:

Prüfung der Fähigkeit eines Messprozesses bzgl. Streuung und Lage der Messwerte im Toleranzfeld eines Merkmals – durchzuführen an einem kalibrierten Normal (hier ein kalibriertes Prüfprisma).

#### Ziel von Verfahren 2:

Prüfung der Fähigkeit des Messprozesses bzgl. des Streuverhaltens der Messwerte über den Arbeitsbereich der Messeinrichtung mit Einfluss des Messobjektes – durchzuführen an 25 Serienteilen. Hierzu wurden 25 Prüflinge jeweils 2 x gemessen, so dass insgesamt 50 Messungen vorlagen.

Für das Verfahren 1 wurden Längen ausgewertet und für Verfahren 2 sowohl Durchmesser (entspricht einer Länge) als auch ein Winkel am Prüfobjekt. In Abb. 4 sind die jeweiligen Merkmale in der Messpunktwolke und der CAD-Auswertesoftware markiert. Dabei konnten folgende Resultate erreicht werden:

Tab. 2:  
Zusammenhang von vorgegebener Toleranz und durch das Messsystem zu erfüllender Standardabweichung.

vorgegebene Toleranz T	zu erfüllende Standardabweichung $s_w$
40 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
80 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
400 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

### 3. Measurement capability indices – tolerances

When using measuring methods in quality control, it is necessary to realize small standard deviations in order to reach the required tolerances of the characteristics which are to be measured. Industrial companies have varying definitions of the capability indices that need to be reached. Our investigation is based on the requirements presented by the BOSCH company /5/.

The following capability indices were ascertained:

$$c_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_w} \quad c_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - |x - x_r|}{3 \cdot s_w}$$

- T – tolerance  
(determined by the user)
- $s_w$  – standard deviation  
of the measurement

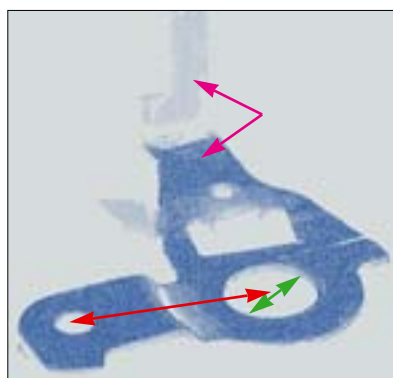
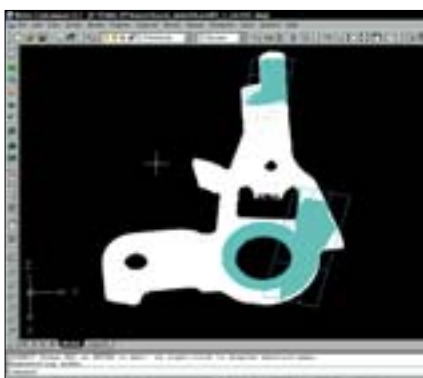
For a classification to be judged as „capable“ the measurement method must fulfill  $c_g > 1.33$  as well as  $c_{gk} > 1.33$ , leading to the following relation:  $T > 40 s_w$ . Furthermore, the spread area as related to tolerance (see table 2) must be calculated and tested with the following requirement:  $S_M\% \leq 12\%$ .

Tab. 2:  
The correlation between the stipulated tolerance and the required standard deviation of the measurement system.

Stipulated tolerance T	Required standard deviation $s_w$
40 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
80 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
400 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

Abb. 4:  
Darstellung der auszuwertenden Formmerkmale (Winkel und Länge sowie Durchmesser).

Fig. 4:  
Indication of the geometric Elements, to analys (angle und diameter).



The assessment shows that a measurement accuracy (see tab. 2) of between 1 – 10  $\mu\text{m}$  has a tolerance of between 40 and 400  $\mu\text{m}$ , as is typical for optical systems.

One criticism of this measurement system is that mechanical engineering components often demand even smaller tolerances. This means that present demands are almost impossible to reach with tactile as well as optical methods. In the light of this, the tolerance requirements should be critically reviewed /6/.

### 4. Measurement results

We used two methods of investigation:

#### Objective of procedure 1:

to test the ability of measurement processes in regard to the scattering and the position of measurement results within the tolerance field of a certain characteristic. This is realized with a calibration object.

#### Objective of procedure 2:

to test the ability of measurement processes in regard to the scattering of measurement results. This is realized with 25 serial components. In this process, we measured 25 candidates twice for a total of 50 measurement results.

In procedure 1 we evaluated the length and in procedure 2 the diameter as well as an angle of the test sample. The characteristics in fig. 4 are marked on the point clouds and on the CAD-evaluation software.

### Verfahren 1 – Längenmessung

vorgegebene Toleranz T: 0,1 mm;  
richtiger Wert  $x_r = 12,445$  mm;  
Mittelwert  $\bar{x} = 12,444$  mm;  
Standardabweichung  $s_w = 0,00099$  mm

Daraus ergeben sich die Werte der  
Fähigkeitsindizes zu:  $c_g = 3,37$  und  
 $c_{gk} = 3,03$ . Damit konnte die geforderte  
Messmittelfähigkeit für die vorgegebene  
Toleranz erreicht werden.

### Verfahren 2 – Längen- und Winkelmessung

vorgegebene Toleranzen T:  
Längen 0,1 mm,  
Winkel 1°

Somit liegt der Wert für den Gesamt-  
streubereich (toleranzbezogen) wie ver-  
langt unterhalb der geforderten 12 %.

Tab. 3:  
Messergebnisse des 3-D-Messsystems.

Messgröße	Standardabweichung der Messwerte	Standardabweichung des Messprozesses	Gesamtstreubereich des Messprozesses	Gesamtstreubereich toleranzbezogen
	$s_\Delta = \sqrt{\frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^{25} (x_{\Delta i} - \bar{x}_\Delta)^2}$	$s_M = \frac{s_\Delta}{\sqrt{2}}$	$S_M = 6 \cdot s_M$	$S_M \% = \frac{s_M}{T} \cdot 100 \%$
Durchmesser	0,9 $\mu\text{m}$	0,63 $\mu\text{m}$	3,8 $\mu\text{m}$	3,8 %
Winkel	0,0052 °	0,0036 °	0,022 °	2,2 %

## 5. Zusammenfassung

Mit den vorliegenden Ergebnissen konnte die Messmittelfähigkeit des Messsystems HSDIG für die Kenngrößen Durchmesser und Winkel nachgewiesen werden. Die Bewertung der Messergebnisse an Stanz- und Bieeteilen erfordert eine sorgfältige Festlegung der auszuwertenden Teilbereiche und Merkmale der Objekt-oberfläche. Die Anwendbarkeit der Messmittelfähigkeitsindizes für die Bewertung von Messmitteln bei Toleranzen unterhalb von 40  $\mu\text{m}$  ist kritisch zu sehen, da dann die Reproduzierbarkeit und absolute Genauigkeit der Oberflächenmessung kaum wesentlich unterschritten werden kann, wie in /6/ ausdrücklich betont wird.

#### Literatur:

- /1/ Pfeifer T.: „Fertigungsmesstechnik“, Oldenbourg 1998.
- /2/ Kowarschik R., Kühmstedt P., Gerber J., Schreiber W., Notni G.: „Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light“, Optical Engineering 39 (2000) S. 150–158.
- /3/ Notni G.: „360-deg shape measurement with fringe projection – calibration and application“, Proc. of Fringe '01, (Ed. W. Jüptner), Elsevier Verlag (2001) S. 311–323.
- /4/ Kühmstedt P., Notni G., Hintersehr J., Gerber J.: „CAD-CAM-System for dental purpose – an industrial application“, Proc. of Fringe '01, (Ed. W. Jüptner), Elsevier Verlag (2001) S. 667–672.
- /5/ Firma Bosch, internes Material
- /6/ Heldt E., Meyer M., Weitlauff F.: „Toleranzen zu klein?“, QZ Messen und Prüfen, Carl Hanser Verlag, München, 46 (2001), S. 636–640.

**Results:**  
**Procedure 1 – length measurement**

Stipulated tolerance: T: 0.1 mm;  
Correct value  $x_r = 12.445$  mm;  
average  $\bar{x} = 12.444$  mm;  
standard deviation  $s_w = 0.00099$  mm  
The capability indices thus come to:  
 $c_g = 3.37$  and  $c_{gk} = 3.03$ .

The required measurement capability with the stipulated tolerance could therefore be reached.

**Procedure 2 – length- and angle-measurement**

Stipulated tolerances t:  
length 0.1 mm,  
angle 1°

It was therefore possible to reach the required low levels for the entire spread area (tolerance related).

Tab. 3:  
Measurement results.

Measured feature	Standard deviation measurement process	Standard deviation measurement process	Entire spread area tolerance related	Entire spread area
	$s_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^{25} (x_{\Delta i} - \bar{x}_{\Delta})^2}$	$S_M = \frac{s_{\Delta}}{\sqrt{2}}$	$S_M = 6 \cdot s_M$	$S_M \% = \frac{S_M}{T} \cdot 100 \%$
Diameter	0.9 $\mu\text{m}$	0.63 $\mu\text{m}$	3.8 $\mu\text{m}$	3.8 %
Angle	0.0052 °	0.0036 °	0.022 °	2.2 %

## 5. Summary

The results presented here demonstrate the measurement capability of the „HSDIG“ measurement system in relation to diameter and angle. The assessment of the measurement results for punching articles and bent parts requires the precise determination of the parts to be evaluated and their surface characteristics. The application of the measurement system for the assessment of measurement tools with tolerances below 40  $\mu\text{m}$  must be viewed critically, as the repeatability and the absolute accuracy of the surface measurements cannot be maintained at that level, as strongly emphasized in /6/.

Literature:

- /1/ Pfeifer T.: „Fertigungsmesstechnik“, Oldenbourg 1998.
- /2/ Kowarschik R., Kühmstedt P., Gerber J., Schreiber W., Notni G.: „Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light“ Optical Engineering 39 (2000) pp.150–158.
- /3/ Notni G.: „360-deg shape measurement with fringe projection – calibration and application“, Proc. of Fringe’01, (Ed. W. Jüptner), Elsevier Verlag (2001) pp. 311–323.
- /4/ Kühmstedt P., Notni G., Hintersehr J., Gerber J.: „CAD-CAM-System for dental purpose – an industrial application“, Proc. of Fringe’01, (Ed. W. Jüptner), Elsevier Verlag (2001) pp. 667–672.
- /5/ Firma Bosch, internal material.
- /6/ Heldt E., Meyer M., Weitlauff F.: „Toleranzen zu klein?“, QZ Messen und Prüfen, Carl Hanser Verlag, München, 46 (2001), pp. 636–640.