

# Flexible Phasogrammetrie – eine neue Methodik zur 3-D-Rundumvermessung

Peter Kühmstedt, Matthias Heinze, Michael Himmelreich, Gunther Notni



Peter Kühmstedt

## 1. Einleitung

Die Digitalisierung von Modellen und die durchgängige Fertigungskontrolle sind wichtige Teile der modernen industriellen Produktentstehung. Generell müssen bei solchen Messungen sehr hohe Anforderungen an die vollständige Erfassung der Objekte (multi-view) gestellt werden. Man muss deshalb Messstrategien entwickeln, die komplexe Messobjekte vollständig erfassen.

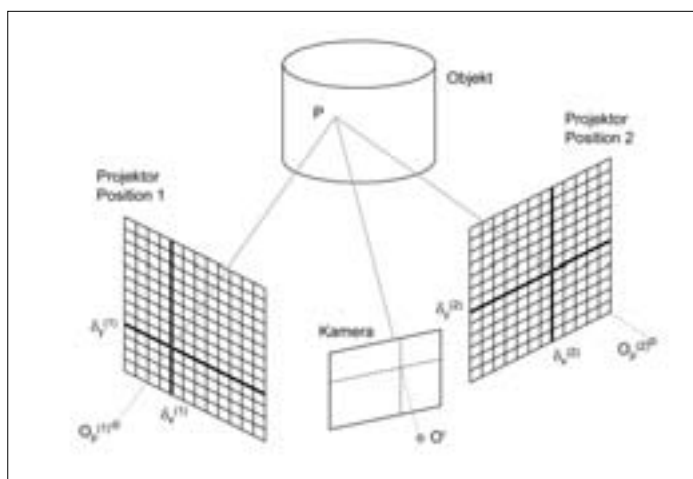
Für die Realisierung der Rundumvermessung wurde in den letzten Jahren vom IOF die Methodik der selbstkalibrierenden Streifenprojektion – die Phasogrammetrie – entwickelt [1], [2].

## 2. Phasogrammetrie

Die Methode der Phasogrammetrie stellt die mathematisch geschlossene Verschmelzung der Methodik der Photogrammetrie mit denen der aktiven Musterprojektion dar. Das Grundprinzip der Phasogrammetrie besteht darin, dass von mindestens zwei unterschiedlichen Positionen jeweils zwei Serien von Mustersequenzen (z. B. Gray-Code-Sequenzen in Verbindung mit phasenverschobenen Gitterlinien) auf das zu vermessende Objekt projiziert werden, wobei die zweite Serie um einen Winkel von  $90^\circ$  zur ersten Serie verdreht ist und die bildaufzeichnende Kamera ortsfest in Bezug zum Objekt verbleibt. Damit wird jeder Objektpunkt durch mindestens vier Phasenwerte signalisiert. Die am Objektpunkt P gemessenen Phasenwerte  $\delta_x^{(i)}$  und  $\delta_y^{(i)}$  und ihre zugehörigen Projektionszentren  $O_p^{(i)}$  definieren räumliche Strahlenbündel, die wie die Strahlenbündel der Photogrammetrie zur Koordinatenberechnung genutzt werden (siehe Abb. 1).

Abb. 1:  
Geometrisches Modell  
der Phasogrammetrie.

Fig. 1:  
Geometric model of phasogrammetry.



# Flexible phasogrammetry – a new method for whole body 3-D measurement

Peter Kühmstedt, Matthias Heinze, Michael Himmelreich, Gunther Notni

## 1. Introduction

Digitization of models and continuous production control are important aspects of modern industrial product development. The development of appropriate industrial strategies generally requires highly accurate measurements, which encompass a complete registration of the object (multi-view) in question.

The provision of a suitable measuring strategy has led to the recent development of a methodology called phasogrammetry [1], [2] at Fraunhofer IOF, Jena in which whole body measurement is achieved by self-calibrating fringe projection.

## 2. Phasogrammetry

Phasogrammetry means the combination of photogrammetry and active fringe projection in closed mathematical form. The basic principle of phasogrammetry includes the projection of at least two different positions, each one including two series of pattern sequences (e.g. Gray-Code-sequences in combination with phase-delayed grid lines) onto the object being measured, the second series being rotated 90° with respect to the first one. The recording camera remains in the same position relative to the object. Every spot on the object is therefore characterized by at least four phase values. The phase values  $\delta_x^{(i)}$  and  $\delta_y^{(i)}$  on the object spot P and its associated projection centers  $O_p^{(i)}$  define a spatial bundle of rays, similar to those of photogrammetry, which can be used to calculate the coordinates (see fig. 1).



Matthias Heinze



Michael Himmelreich



Gunther Notni

### 3. Flexible phasogrammetrische Systeme

Grundvoraussetzung bisheriger phasogrammetrischer Systeme (siehe Abb. 2) ist, dass alle Kameras ortsfest in Bezug zum Objekt sein müssen. Damit ist die Anzahl der Objektansichten beschränkt auf die Anzahl der eingesetzten Kameras /2/. Es ist aber nicht immer sinnvoll (Kosten), die Kameraanzahl zu erhöhen.

#### 3.1 Messablauf

In seiner Grundanordnung besteht das neuartige flexible phasogrammetrische Messsystem nur noch aus einem Sensorkopf, welcher eine Messkamera  $K_p$  und einen Streifenprojektor enthält, sowie einer weiteren Kamera, der so genannten Kalibrierkamera  $K_m$ .

Im Messablauf wird das Objekt nacheinander aus unterschiedlichen Richtungen mit den aus der Phasogrammetrie bekannten Mustersequenzen beleuchtet. Sowohl die starr angeordnete Kalibrierkamera als auch die mitbewegte Messkamera zeichnen simultan die Bilder auf (Messablauf siehe Abb. 2). Im Ergebnis erhält man neben den Phasenmesswerten der Kalibrierkamera  $K_m$  aus jeder Beleuchtungsrichtung Phasenmesswerte von der mitbewegten Messkamera  $K_p$ . Die mitbewegte Messkamera hat jedoch während des Messablaufes in Bezug zum Messobjekt eine Ortsänderung erfahren, was im Widerspruch zum Grundprinzip der bisherigen Phasogrammetrie steht.

#### 3.2 Auswertestrategie – das Prinzip der virtuellen Passmarken

Dieser Widerspruch wurde durch das neu entwickelte Prinzip der virtuellen Passmarken gelöst /3/. Dieses beinhaltet den folgenden dreistufigen Selbstkalibrierprozess.

##### Schritt 1:

Kalibrierung des Projektors P  
Mit den Phasenwerten der stationären Kalibrierkamera  $K_m$  werden die Orientierungsparameter des Projektors für alle Projektorpositionen N mittels bekannter Methoden des Bündelblockausgleichs berechnet. Die Kalibrierkamera als Übersichtskamera dient zum Registrieren der homologen Punkte bzw. ihre Pixel dienen als „virtuelle Passmarken“.  
→ Orientierungsparameter des Projektors

##### Schritt 2:

Kalibrierung der Messkamera  $K_p$   
Mit den Orientierungsparametern des Projektors an der Position 1 und den Phasenwerten der Messkamera an ausgewählten Punkten werden die Orientierungsparameter der Messkamera  $K_p$  an der Position 1 berechnet (freier Bündelausgleich).  
→ Orientierung der Messkamera an der Position 1

##### Schritt 3:

3-D-Koordinatenberechnung  
Nach dem Prinzip der klassischen Streifenprojektion können jetzt die 3-D-Koordinaten der für die Messkamera  $K_p$  sichtbaren Objektpunkte (Sensorposition 1) berechnet werden.  
→ 3-D-Koordinaten aus Position 1  
Schritte 2 und 3 werden jetzt für alle weiteren N Sensorpositionen durchgeführt.

Im Endergebnis erhält man eine 3-D-Punktewolke des Objekts, gewonnen mit der Messkamera  $K_p$  aus N Sensorpositionen und aus der Beobachtungsposition der Kalibrierkamera  $K_m$  in einem Weltkoordinatensystem. Die Bestimmung der Passmarken geschieht dabei rein virtuell und automatisch.

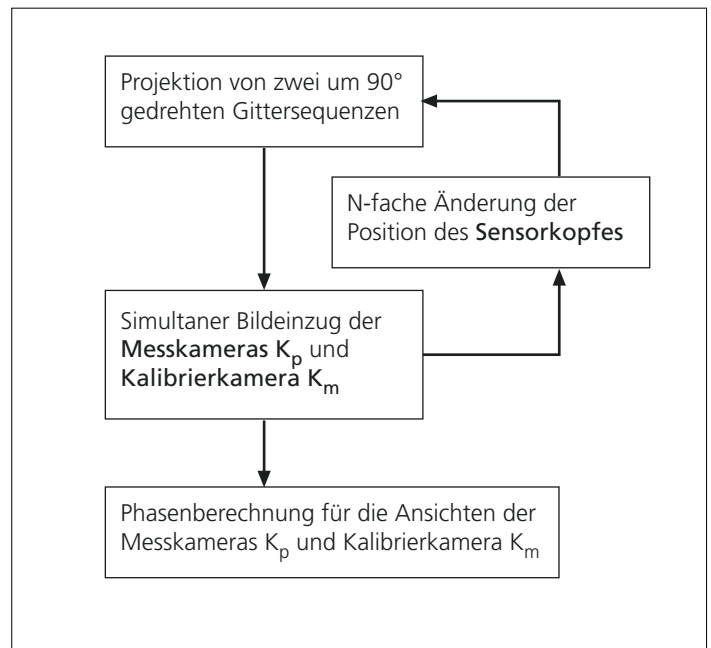


Abb. 2: Aufnahmeprozess der flexiblen Phasogrammetrie.

### 3. Flexible phasogrammetric systems

The basic precondition of previous phasogrammetric systems is the fixed camera position relative to the object (see fig. 2). Thus the number of object views is limited to the number of simultaneously measuring recording cameras /2/. However, it is not always judicious to increase the number of cameras (cost).

#### 3.1 Measuring process

In its basic form such a flexible phasogrammetric measuring system consists only of a sensor head, which itself is composed of a measuring camera  $K_p$ , a fringe projector and another camera, the so-called calibration camera  $K_m$ .

During the measuring process, the object is illuminated from different directions with previously established phasogrammetric pattern sequences. Both the stationary calibration camera as well as the mobile measuring camera record the images (see fig. 2). The measured phase values of the stationary calibration camera  $K_m$  as well as the measured phase values of the mobile measuring camera  $K_p$  are obtained as a result. However contrary to the basic principle of phasogrammetry to date, the measuring camera  $K_p$  has moved.

#### 3.2 Analyzing strategy – the principle of virtual landmarks

The contradiction of a moving camera and the requirement for fixation has been resolved by the newly developed principle of virtual landmarks /3/. This includes the following three-step self-calibration process:

##### Step 1:

Calibration of the projector P  
The orientation parameters for the projector are calculated for all projector positions N via well established methods of bundle block adjustment using the phase values recorded by the stationary calibration camera  $K_m$ . The pixels of the all-round-view calibration camera are considered as virtual landmarks.

result: orientation parameters for the projector

##### Step 2:

Calibration of the measuring camera  $K_p$   
Knowing the orientation parameter of the projector at position 1 and the phase values at selected points recorded by the measuring camera  $K_p$ , the orientation parameters for the measuring camera  $K_p$  at position 1 are calculated using free bundle adjustment

result: orientation of the measuring camera at position 1

##### Step 3:

3-D coordinate calculation  
Calculation of the 3-D coordinates of the object points, recorded by the camera  $K_p$  (position 1) using classical fringe projection  
result: 3-D coordinates for the entire object (from position 1)

The analyzing steps 2 and 3 may now be performed for the second sensor position and afterwards stepwise for each subsequent position.

As a result a 3-D point-cloud of the object is acquired, which was recorded by the camera  $K_p$  from N sensor positions and from the viewing position of the calibration camera  $K_m$ . Landmarks are hereby determined virtually and automatically.

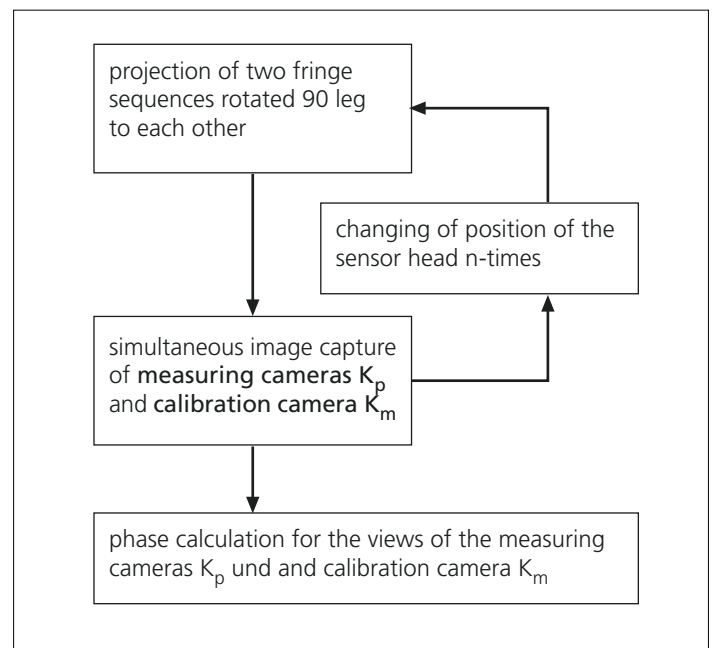


Fig. 2: Measuring process of flexible phasogrammetry.

### 3.3 Systemrealisierungen

Die Abb. 3 und 4 zeigen Realisierungsvarianten flexibler 3-D-Messanordnungen.

Das System in Abb. 3 leitet sich aus dem System „kolibri“ (siehe /1/) ab. Es ist dahingehend vereinfacht, dass weniger Kameras (hier drei gezeigt) verwendet werden. Durch die mitbewegte Messkamera im Sensorkopf ist die Anzahl der realisierbaren Objektansichten vollständig frei bei gleichzeitiger Reduktion der Messzeit.

Die Abb. 4 zeigt eine Anordnung in Portalbauweise und eine konkrete Realisierung. Der Sensorkopf kann mittels des Portals frei über dem Objekt positioniert werden, ohne spezielle Genauigkeitsanforderungen zu beachten. Es können großflächige komplexe Objekte in einem Messablauf erfasst werden. Es werden z. Z. folgende Messparameter erreicht (Tab. 1):

Tab. 1  
Messparameter.

Messvolumen bis zu:	2 000 x 2 000 x 1 000 mm <sup>3</sup>
Messunsicherheit:	< 50 µm
Typische Messzeit:	2–15 min

Die Abb. 5 und 6 zeigen Messbeispiele der Vermessung großflächiger Objekte.

#### 4. Zusammenfassung:

Das neu entwickelte Messprinzip der flexiblen Phasogrammetrie ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Vermessung von großen komplexen Objekten möglich.
- Rundumvermessung ohne zusätzliche Matchingprozeduren, ohne objektfeste oder projizierte Passmarken.
- Bewegung des Sensorkopfes: keine teuren, genauen Führungsmittel bzw. Handlingsysteme notwendig.
- Anzahl der zu digitalisierenden Objektansichten frei wählbar.

Literatur:

- /1/ Schreiber, W.; Notni, G.: „Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique“, Opt. Eng. 39/2000, S. 159–169.
- /2/ Notni, G.: „360-deg shape measurement with fringe projection – calibration and application“, Proc. Fringe’01 (Eds. W.Osten, W. Jüptner) Elsevier-Verlag 2001, S. 311–323.
- /3/ Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Himmelreich, M.: „Phasogrammetrische 3-D-Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung“ in Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3-D-Messtechnik, Hrsg. Th. Luhmann, Wichmann-Verlag (2003) S. 21–32.



Abb. 3:  
Flexibles phasogrammetrisches 3-D-Messsystem „kolibri II“.

Fig. 3:  
Flexible phasogrammetric 3-D measuring system „kolibri II“

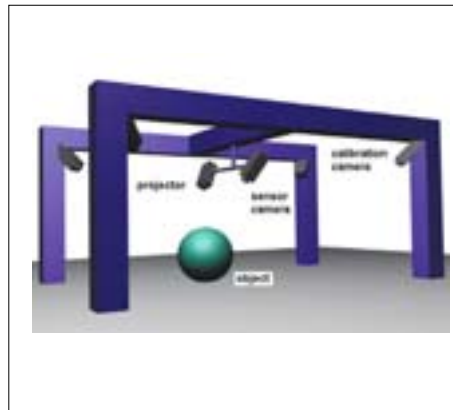


Abb. 4:  
Flexibles phasogrammetrisches Messsystem in Portalbauweise – „kolibri – portal“.

Fig. 4:  
Flexible phasogrammetric measuring system in overhead style, „kolibri – portal“; photograph of a realized construction.



### 3.3 System realization

Figures 3 und 4 show variants of the flexible 3-D measuring configurations.

The system in fig. 3 derives from the system „kolibri“ (see /1/). It is technically simplified by using only three cameras in this system. The number of possible object views is freed by using the mobile camera in the sensor head. The measuring time is simultaneously reduced.

Fig. 4 shows a diagram of an overhead construction and the actual construction. The sensor head can be placed above the object anywhere within the portal without specific requirements for accuracy. Even for extensive objects data can be acquired in one measuring procedure. Currently, the following parameters are achievable:

Tab. 1  
Parameters.

Measuring volume up to:	2 000 x 2 000 x 1 000 mm <sup>3</sup>
Measuring uncertainty:	< 50 µm
Typical measuring time:	2–15 min

Figures 5 and 6 show examples of large surface object measurements.

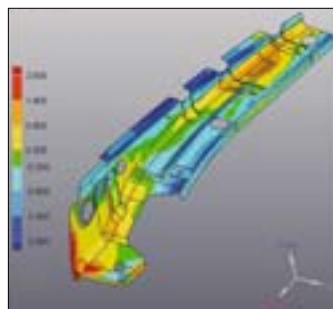


Abb. 5:  
Bild und 3-D-CAD-Vergleich einer PKW-Karosseriebaugruppe.

Fig. 5:  
Image and 3-D CAD comparison of a car body group.

### 4. Summary

The newly developed measuring principle of flexible phasogrammetry is characterized as follows:

- Measurement of large complex objects is possible
- Whole body measurement without any additional matching procedures, without object fixed or projected landmarks
- Movement of the sensor head: no accurate and expensive leading or handling systems necessary
- Arbitrary number of digitized object views, may be larger than the number of cameras used

#### References:

- /1/ Schreiber, W.; Notni, G.: „Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique“, Opt.Eng. 39 / 2000, S. 159–169.
- /2/ Notni, G.: „360-deg shape measurement with fringe projection-calibration and application“, Proc. Fringe'01 (Eds. W.Osten, W. Jüptner) Elsevier 2001, S. 311–323.
- /3/ Notni, G.; Kühmstedt, P.; Heinze, M.; Himmelreich, M.: „Phasogrammetrische 3-D-Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung“ in Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3-D-Messtechnik, Hrsg. Th. Luhmann, Wichmann-Verlag (2003) S. 21–32.



Abb. 6:  
PKW-Sitz.

Fig. 6:  
car seat.