

Mehrbild-3D-Messsysteme in Rapid Prototyping- und Qualitätssicherungs-Prozessketten

Gunther Notni, Peter Kühmstedt

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik – IOF Jena
Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena
e-mail: peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de

1. Einleitung

Die Digitalisierung von Modellen, die durchgängige Fertigungskontrolle und die Inspektion ausgewählter Komponenten sind wichtige Teile der modernen industriellen Produktentstehung /1-3/. Die Anwendung von 3D-Messsystemen erfordert die Auswahl des geeigneten Messsystems und daran anschließend die angepasste Datenauswertung. Diese muss sich an der Zielstellung der Messung orientieren. In Abb. 1 sind verschiedene Nutzungsmöglichkeiten für die Messdaten gezeigt. Dabei können sowohl Flächenrückführung als auch Stichmaßbestimmung als wesentliche Varianten hervorgehoben werden. Generell müssen bei solchen Messungen sehr hohe Anforderungen an die vollständige Erfassung der Objekte (Mehrbild) und die angemessene Auswertestrategie gestellt werden. Einfache optische 3D-Messsysteme liefern nur ein Teilbild des Messobjekts. Man muss deshalb Messstrategien zur Verfügung stellen, die es gestatten, komplexe Messobjekte aus mehreren Ansichten und somit vollständig rundum – sogenannte Mehrbildtechniken – mit ortsunabhängiger Messunsicherheit zu erfassen.

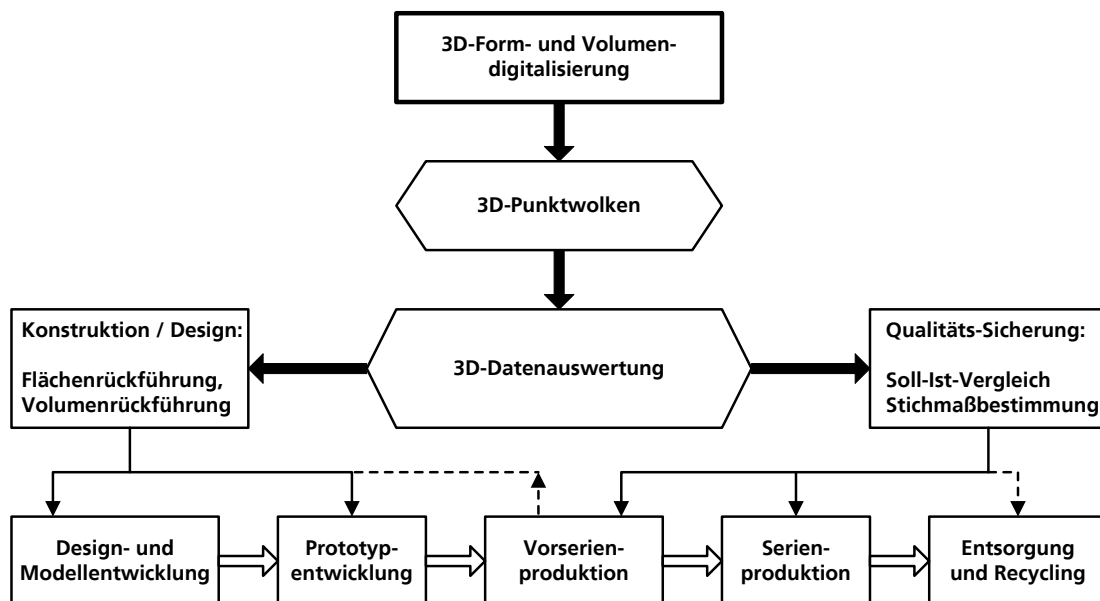


Abb. 1: Einsatzszenarien der optischen 3D-Messtechnik.

Hier werden neue Möglichkeiten von Mehrbildtechniken unter Verwendung der Streifenprojektionstechnik nach der Methodik der Phasogrammetrie in Verbindung mit korrelationsbasierter Streifenauswertung und der nachfolgenden Datenauswertung anhand von Messsystemrealisierungen und ausgewählten Messbeispielen vorgestellt.

2. Grundlagen der Mehrbildtechniken

Um die möglichst vollständige und automatisierte Vermessung komplexer Objekte zu ermöglichen, muss bei der Systementwicklung dem Problem der Rundumvermessung (Mehrbildtechniken) besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, wobei hier unterschiedliche prinzipielle Ansätze verfolgt werden /1,4/:

- a) Durchführung einer Relativbewegung zwischen Objekt und Sensor /5,6,7/
(Dies erfordert i.A. hoch genaue, robuste Bewegungssysteme für das Objekt bzw. den Sensor und auch Strategien zum Einmessen derartiger Systeme.)
- b) Zusammensetzen unterschiedlicher Teilbilder mittels mathematischer Methoden der Bildmontage / Bildregistrierung (Matching, Sensordatenfusion) /8,9,10/
(Dies stellt i.A. Randbedingungen an die Form des zu vermessenden Objekts bzw. erfordert spezielle Strategien zur Datenaufnahme und ist durch einen hohen mathematischen Aufwand gekennzeichnet.)
- c) Anwendung photogrammetrischer Methoden /11,12,13/
(Diese erfordern eine Objektinteraktion durch das Anbringen photogrammetrischer Marken auf dem Objekt bzw. Verwendung von Navigationskulissen, über welche eine photogrammetrische Vorabkalibrierung und spätere Bildregistrierung erfolgt.)
- d) Nach Methoden der selbstkalibrierenden Streifenprojektionstechniken - der sogenannten Phasogrammetrie - in Verbindung mit dem Prinzip der virtuellen Passmarken (siehe unten) /14,15,27/.

Die im Folgenden vorgestellten robusten Mehrbildtechniken basieren auf der Methode d).

2.1. Selbstkalibrierung – Methode der Phasogrammetrie

2.1.1. Grundprinzip der Phasogrammetrie

Unter Selbstkalibrierung versteht man, dass die Kalibrierung im Messprozess selbst stattfindet, so dass Kalibrierprozeduren vor der Messung entfallen und man zu keinem Zeitpunkt der Messung selbst Kenntnis von den Systemparametern (innere und äußere Orientierung des Sensors) haben muss. Diese Systeme sind somit ideal im Sin-

ne einer bequemen und flexiblen Handhabung durch den Nutzer und Sicherung der Langzeitstabilität eines 3D-Messsystems.
 Eine Möglichkeit, die Selbstkalibrierung bzw. In-Prozess-Kalibrierung zu realisieren, stellt die am Fraunhofer-Institut IOF entwickelte Methode der Phasogrammetrie dar. Die Phasogrammetrie ist die mathematisch geschlossene Verschmelzung der Methodik der Photogrammetrie mit denen der Streifenprojektion /14-17, 22, 25, 29/. Das Grundprinzip 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° zur ersten Serie verdreht ist und die bildaufzeichnende Kamera ortsfest in Bezug zum Objekt verbleibt. Damit wird jeder Objektpunkt durch mindestens 4 Phasenwerte signalisiert. Die am Objektpunkt M gemessenen Phasenwerte $\phi_x^{(i)}$ und $\phi_y^{(i)}$ und ihre zugehörigen Projektionszentren $O_p^{(i)}$ definieren räumliche Strahlenbündel, die in gleicher Weise wie die Strahlenbündel der Photogrammetrie zur Koordinatenberechnung genutzt werden können (siehe Abb. 2).

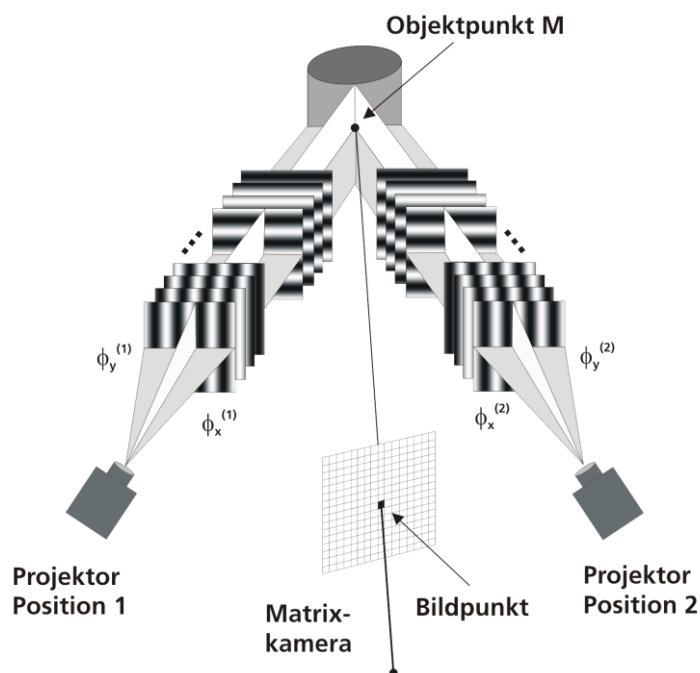


Abb. 2: Geometrisches Aufnahmemodell der Phasogrammetrie.

Die phasogrammetrischen Systeme lassen sich mathematisch geschlossen in Form der Kollinearitätsgleichungen beschreiben (Kollinearitätsgleichungen – siehe /18/ S. 238 Gl. 4.8). Dabei werden die üblichen Bildkoordinaten x',y' für die Kamera durch die den Projektor beschreibenden Phasenwerte $\phi_x^{(i)}, \phi_y^{(i)}$ am Objektpunkt P und die Hauptpunktkoordinaten x'_0, y'_0 durch die den Hauptpunkt des Projektors beschreibenden Phasenwerte $\phi_{x0}^{(i)}, \phi_{y0}^{(i)}$ ersetzt. Zur Überführung in eine Längeneinheit werden hierbei die Phasenwerte mit $\lambda/2\pi$ multipliziert (λ entspricht der Gitterkonstante im Projektor). Die Kollinearitätsgleichungen der Phasogrammetrie ergeben sich damit zu:

$$\Phi_x^{(i)} = \Phi_{x0}^{(i)} - \left(c^{(i)} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot \frac{r_{1li}(x - x_0^{(i)}) + r_{2li}(y - y_0^{(i)}) + r_{3li}(z - z_0^{(i)})}{r_{13i}(x - x_0^{(i)}) + r_{23i}(y - y_0^{(i)}) + r_{33i}(z - z_0^{(i)})} + d\Phi_x^{(i)}$$

$$\Phi_y^{(i)} = \Phi_{y0}^{(i)} - \left(c^{(i)} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot \frac{r_{1li}(x - x_0^{(i)}) + r_{2li}(y - y_0^{(i)}) + r_{3li}(z - z_0^{(i)})}{r_{13i}(x - x_0^{(i)}) + r_{23i}(y - y_0^{(i)}) + r_{33i}(z - z_0^{(i)})} + d\Phi_y^{(i)}$$
(1)

mit $d\phi\delta\delta_{x,y}^{(i)}$ dem Verzeichnungskorrekturterm und i dem Index für die Projektorposition.

Den Aufnahme- und Auswerteprozess der Phasogrammetrie zeigt Abb. 3.

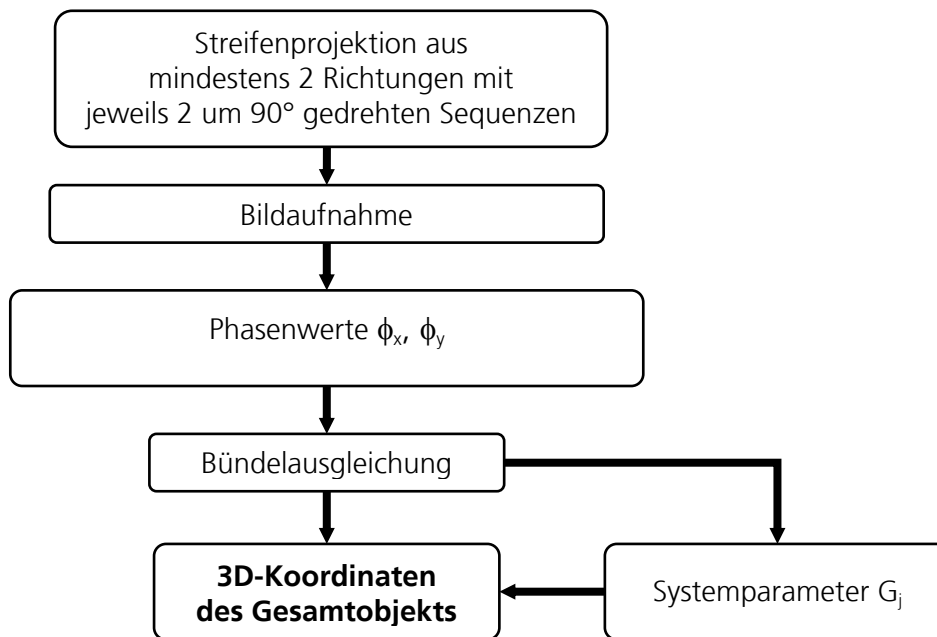


Abb. 3: Aufnahme- und Auswerteprozess der Phasogrammetrie.

Im Ergebnis der Berechnung erhält man sämtliche für die Koordinatenberechnung notwendigen Orientierungsparameter des bewegten Projektionssystems.

Phasogrammetrische Messsysteme sind zusammengefasst durch folgende spezifische Merkmale gekennzeichnet:

- Sie sind unempfindlich gegenüber zeitlichen Instabilitäten im Messsystem, hervorgerufen z.B. durch Temperaturschwankungen, Vibrationen usw. durch Anwendung der Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung;
- Es werden keinerlei Anforderungen an die Positionier- und Führungsgenauigkeit der verwendeten Bewegungseinheiten (Hub- und Kippverstellungen, Dreheinheiten, x-y-Tische, Robotersysteme, u.a.) gestellt, weil mittels der Simultankalibrierung die äußeren Orientierungen im Messablauf selbst bestimmt werden;

Dies ermöglicht den Einsatz der hochgenauen Messtechnik unter Produktionsbedingungen unabhängig von speziellen Messräumen.

Phasogrammetrische Messsysteme lassen sich zu einem Netzwerk zur Rundumvermessung erweitern, indem das Objekt etwa mit einem oder mehreren Projektoren aufeinanderfolgend aus verschiedenen Richtungen beleuchtet und von einer oder mehreren Kameras sequentiell oder auch parallel aus unterschiedlichen Positionen beobachtet wird /4, 15-17, 22, 25/. Eine Erweiterung stellt die im Folgenden beschriebene Methode der virtuellen Passmarken dar.

2.1.2. Mehrbildmessung mit der Methode der virtuellen Passmarken

Für praktische Anwendungen von größtem Interesse ist eine möglichst einfache Mehrbildmessung, d.h. ohne zusätzliche Referenzierungshilfen, Passmarken oder ähnliches. Einen Schritt in diese Richtung stellt die von den Autoren entwickelte Methodik der virtuellen Passmarken dar /27/.

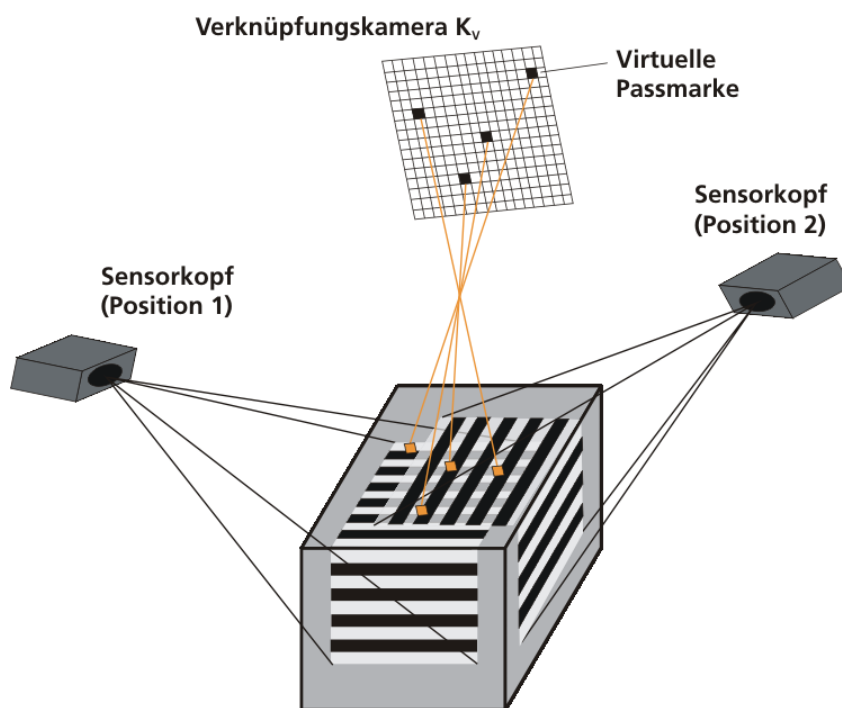


Abb. 4: Grundanordnung einer multi-view Messung nach dem Prinzip der virtuellen Passmarken.

Um das Objekt rundum zu erfassen, wird im Messablauf der Streifenprojektor (d.h. der Sensorkopf - bestehend aus einem Projektor und mindestens einer Sensorkopfkamera K_p) an verschiedenen Positionen in Bezug zum Objekt positioniert. Weiterhin wird eine hiervon unabhängige Kamera - die sogenannte Verknüpfungskamera K_v - einmalig so in Bezug zum Messobjekt positioniert, dass sie eine Übersicht über die Messszene aufnehmen kann (siehe Abb. 4).

Den Mess- und Datenberechnungsablauf zeigt die Abb. 5. Während des Messablaufs projiziert der Projektor die oben genannten zwei um 90° gedrehten Gittersequenzen. Die Kamera(s) des Sensors nehmen simultan mit der Verknüpfungskamera die Streifensequenzen auf. Hiernach erfolgt das Umpositionieren des Sensorkopfes und die Messwertaufnahme wird aus dieser neuen Richtung wiederholt. Die Verknüpfungskamera bleibt hierbei stationär in Bezug zum Messobjekt. Dieser Messablauf erfolgt so lange, bis das Objekt aus allen erforderlichen Blickrichtungen erfasst worden ist. Die Anzahl der Teilbilder N wird insgesamt bestimmt durch die Zahl (n) der angesteuerten Positionen, der Zahl der Sensorkopf-kameras (p) und der Anzahl (m) der Verknüpfungskameras und ergibt sich zu $N = ((n \times p) + m)$.

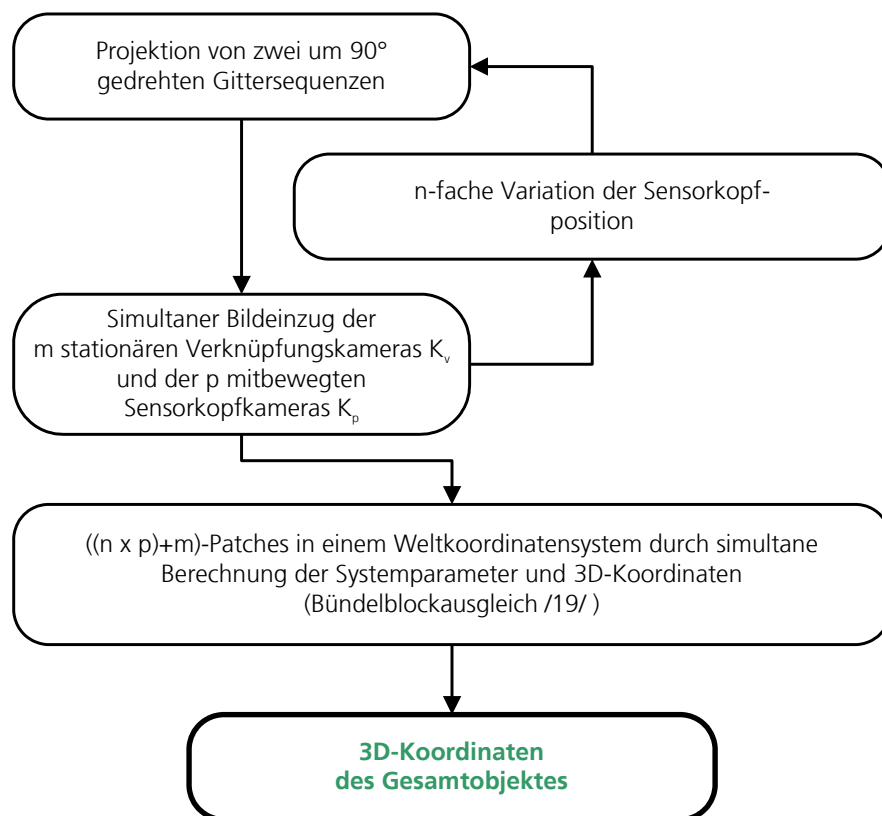


Abb. 5: Ablaufschema der multi-view Messung nach dem Prinzip der virtuellen Passmarken.

Nach der Messwertaufnahme erfolgt die Koordinatenberechnung bis zum 3D-Gesamtbild und die Systemkalibrierung in einem Prozessschritt. Die Kamerapixel der Verknüpfungskamera bilden hierbei sozusagen „virtuelle Passmarken“ zum Registrieren der Einzelansichten zum Gesamtbild. Die Orientierung des Sensors im Raum, d.h. die Berechnung der Systemparameter, wird nach der in 2.1.1. beschriebenen Methode der Selbstkalibrierung bestimmt. Im Ergebnis können in der Koordinatenberechnung alle einzelnen Bilder in einem gemeinsamen Weltkoordinatensystem berechnet werden. Als Besonderheit des Systemkonzepts ergibt sich somit, dass **keine** Passmarken, hochgenauen (mechanischen, optischen) Führungssystemen, Referenzrahmen, andere Einmessvorrichtungen (Tracker) oder Matchingprozeduren (verbunden mit An-

forderungen an die Objektform) für das Zusammensetzen (Registrierung, Bildorientierung) des 3D-Gesamtbildes aus den einzelnen Teilansichten verwendet werden müssen. Dies führt zu einer hohen Flexibilität und Nutzerfreundlichkeit, da die Selbstkalibrierung und Bildorientierung über die Verknüpfungskamera gegeben ist. Damit wird ein flexibles passmarkenfreies Vermessen beliebiger Objekte möglich.

Einzigste notwendig für die praktische Anwendung ist die Vorabkalibrierung der Inneren Parameter des Sensorkopfes, d.h. die Bestimmung des Bezuges zwischen den Sensorkopf-kameras und dem Projektor. Durch die in 2.1.1. beschriebene Methode der Selbstkalibrierung erhält man die Lage des Projektors an jeder Messposition im Raum und damit die Position des gesamten Sensorkopfes.

Hieraus wird ersichtlich, dass prinzipiell eine Vielzahl unterschiedlicher Systemlösungen realisiert und diese an die spezifischen Applikationsforderungen angepasst werden können. In den folgenden Kapiteln werden einige derselben näher erläutert. Die Parameter der Systeme sind in der Tabelle im Abschnitt 6 aufgeführt.

3. Systemrealisierungen phasogrammetrischer 3D-Messsysteme

Grundkomponente aller folgenden Systeme ist der sogenannte Sensorkopf in Stereoanordnung. Dieser besteht aus einer Projektionseinheit und p Sensorkopf-kameras K_p (hier $p=2$) (siehe Abb. 6) /28/. Dieser wird je nach Messerfordernis in unterschiedliche Systemkonfigurationen integriert.

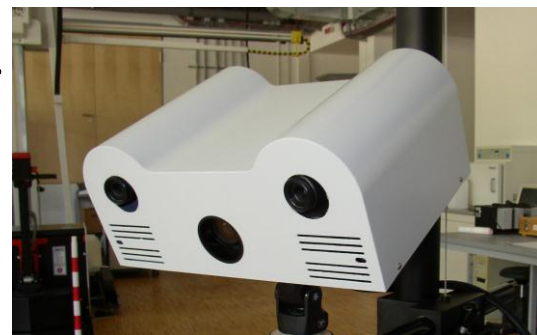
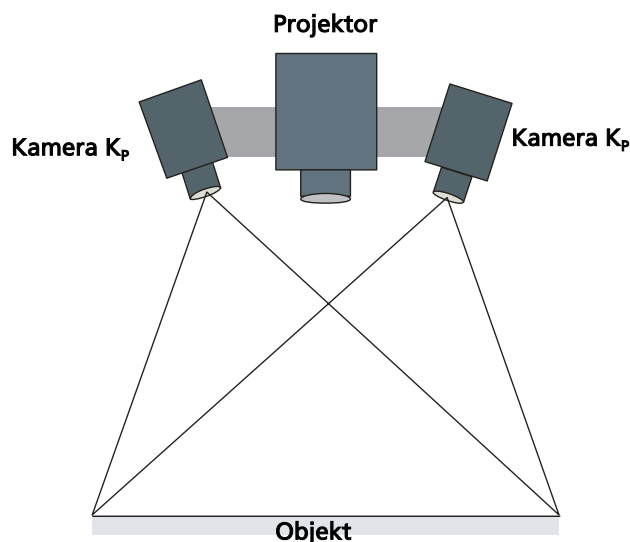


Abb. 6: Grundanordnung und Foto des Streifenprojektionssensorkopfes in Stereoanordnung.

3.1. Flexible, mobile Systemkonfiguration

Oft wird eine hohe Flexibilität bezüglich der Art von zu vermessenden Objekten und darüber hinaus noch eine Messung an verschiedenen Standorten im Unternehmen oder gar im Feld gewünscht. Hierzu sind voll flexibel einsetzbare und mobile Systeme erforderlich.

3.1.1. Stativmesssystem „kolibri MOVE“

Die einfachste mobile Anordnung besteht aus einem frei beweglichem Sensorkopf und einer sogenannten Verknüpfungskamera K_V (beide sind jeweils auf einem Stativ gelagert, siehe Abb. 7 und 8).

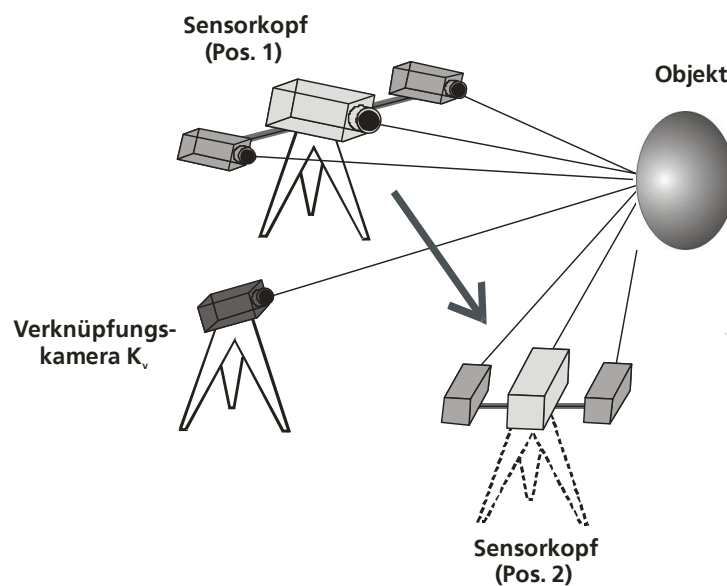


Abb. 7: Grundanordnung eines mobilen Stativmesssystems.

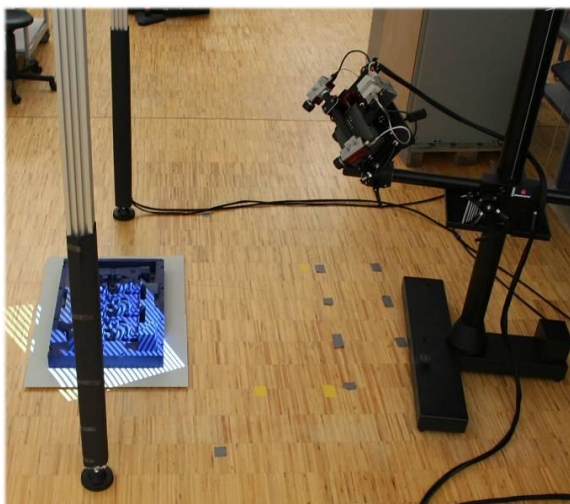


Abb. 8: Foto der Messanordnung „kolibri MOVE“.

Im Messablauf wird der Sensorkopf mittels des beweglichen Statives an verschiedene Positionen in Bezug zum Objekt positioniert. Diese Positionierung ist vollständig frei und somit wird höchste Flexibilität in der Messwertaufnahme ermöglicht. Die stationäre Verknüpfungskamera K_V erfasst wie oben beschrieben die Messszene in Übersicht. Den Messablauf zeigt die Abb. 9.

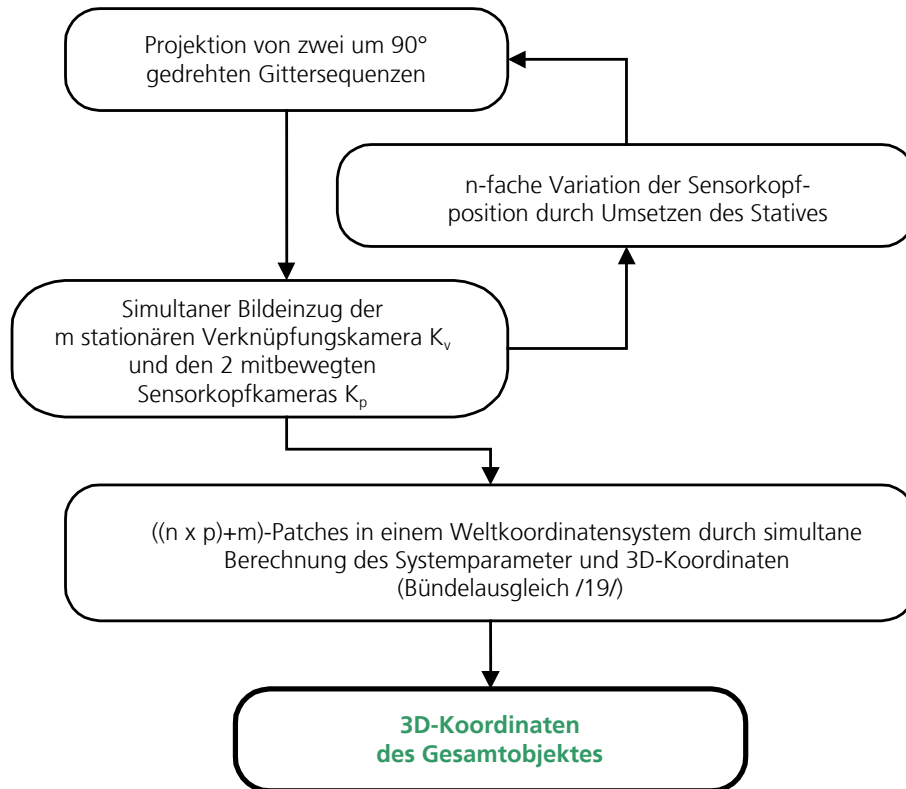


Abb. 9: Ablaufschema der Messwertaufnahme des Messsystems „kolibri move“.

Die Koordinatenberechnung bis zum 3D-Gesamtbild und die Systemkalibrierung erfolgen nach der Messwertaufnahme in einem Prozessschritt. Damit wird ein flexibles passmarkenfreies Vermessen großflächiger Objekte (z.B. PKW-Teile, Clay-Modelle, Skulpturen etc.) möglich. Erwähnt werden sollte, dass eine beliebige Anzahl (m) an Verknüpfungskameras eingesetzt werden kann, was die Anpassung an großflächige komplexe Objektgeometrien erleichtert.

Abb. 8 zeigt eine Systemrealisierung und Abb. 10 ein Werkzeug im System.



Abb. 10: Messobjekt mit Streifenmuster bei der Messung im System „kolibri MOVE“.

3.1.2. Handgeführter 3D-Sensor „kolibri CORDLESS“

Für das Vermessen an schwer zugänglichen Bereichen wie im Interieur-Bereich von PKW's, in Werkzeugmaschinen oder gar im Feld bietet sich der Einsatz handgeführter 3D-Sensoren an. Unter Verwendung LED-basierter Digitalprojektoren und schneller Kameras gelingt es, die oben genannten Mustersequenzen in einer Zeit von <200ms zu projizieren, so dass Verwacklungen beim Führen des Sensorkopfes mit der Hand und damit Messartefakte weitgehend vermieden werden können. Einen derartigen Sensor zeigt Abb. 11. Das System besteht aus 3 Kernbestandteilen dem Sensorkopf, der mobilen Steuereinheit mit Laptop und Akku und einem iPod touch. Der iPod dient hier der Systemkommunikation und schnellen Visualisierung (Live View).

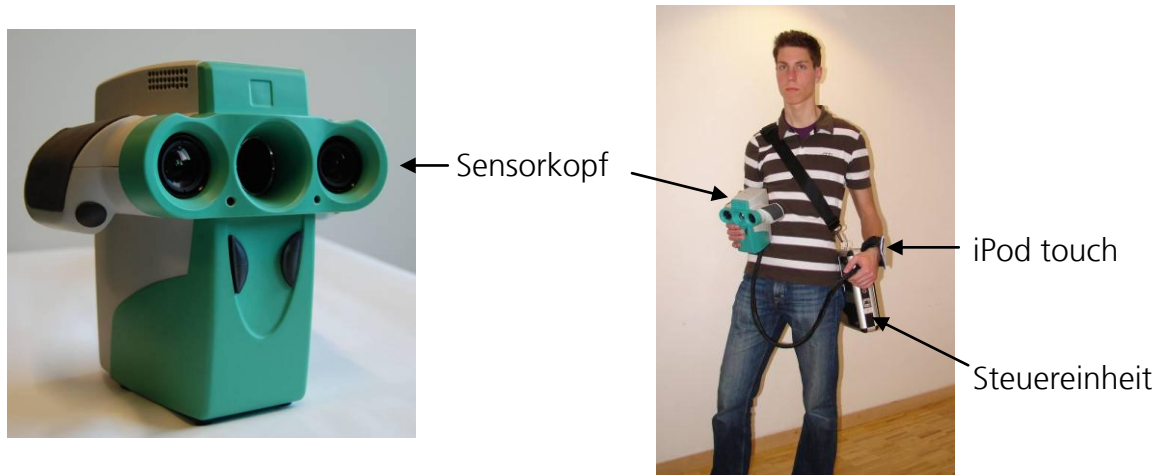


Abb. 11: Handgeführter 3D-Sensor „kolibri CORDLESS“.

Dieser Sensor zeichnet sich auch durch folgende weitere Merkmale aus:

- Batteriebetrieb
- Datenübertragung per W-LAN an Basisstation

und damit vollständig kabellosen Einsatz.

Einsatzszenarien ergeben sich so auch in der Kriminalistik zur Tatortsicherung (digitale Spurensicherung), in der Archäologie (Vermessung in Ausgrabungen), in der Medizin (Vermessung von Körperpartien) und zur Kunstgüterarchivierung. Hierbei ist von besonderem Vorteil, dass keine Kontamination / Änderung des Messgegenstandes vorgenommen werden muss, eine Vermessung auch in schwer zugänglichem Gelände möglich ist (an steilem Gelände, in Höhlen und Gruben) und dass das System nach einer Anlaufzeit von 2min sofort einsatzbereit ist.

Den prinzipiellen Messablauf und Datenfluss zeigt Abb. 12, und Abb. 13 das Ergebnis der Digitalisierung einer Statue aus 45 Ansichten.

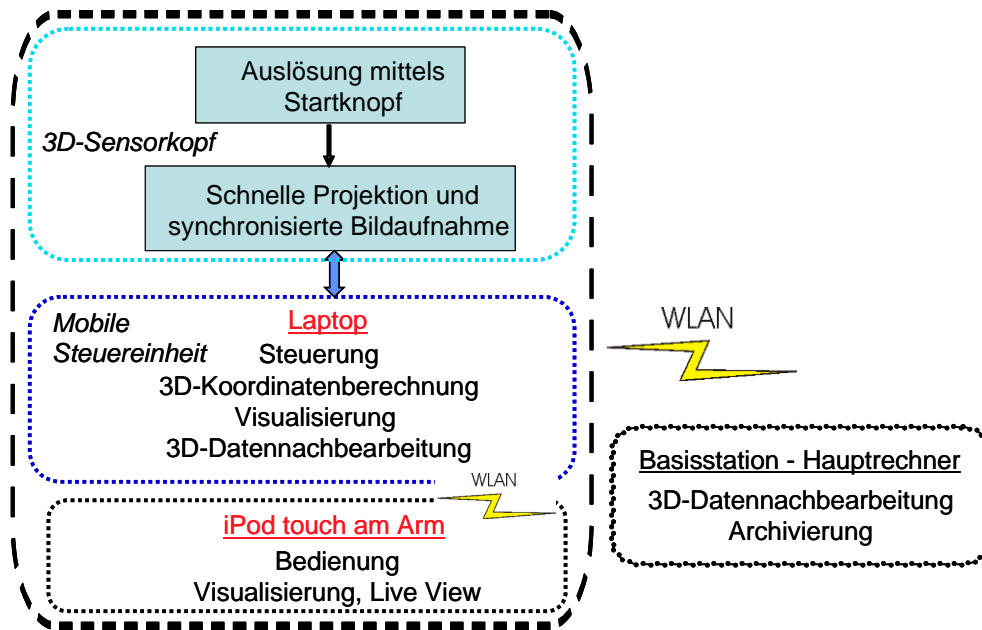


Abb. 12: Messablauf und Datenfluss für handgeführten 3D-Sensor.

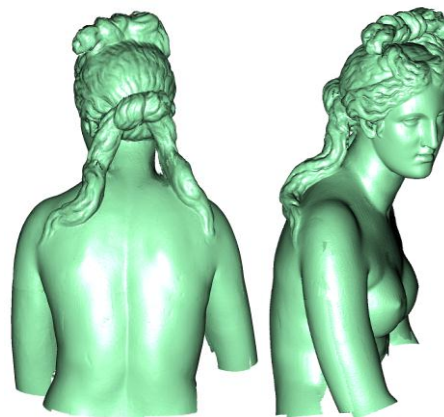


Abb. 13: Vermessung einer Statue.

3.2. Systemlösungen der 3D-Messautomation

Aus obigem Grundprinzip können unterschiedliche Systeme der Messautomation abgeleitet werden. Diese unterscheiden sich nach der Wahl des automatisierten Handlingsystems zur Sensorkopf- und/oder Messobjektpositionierung, der Messobjektgröße und -art und der Messaufgabe. Vorteilhaft ist, dass Messabläufe bis zur Datenauswertung voll automatisiert werden können. Im Folgenden sind einige typische Realisierungen gezeigt.

3.2.1. 3D-Messzelle „kolibri II“

Eine erste Geräteversion ist die selbstkalibrierende optische 3D-Messzelle „kolibri II“, siehe Abb. 14. Wesentlicher Bestandteil sind der auf einer Kreisbahn frei positionierbare Sensorkopf sowie die stationären Verknüpfungskameras K_V - im Beispiel sind 3 Stück gezeichnet.

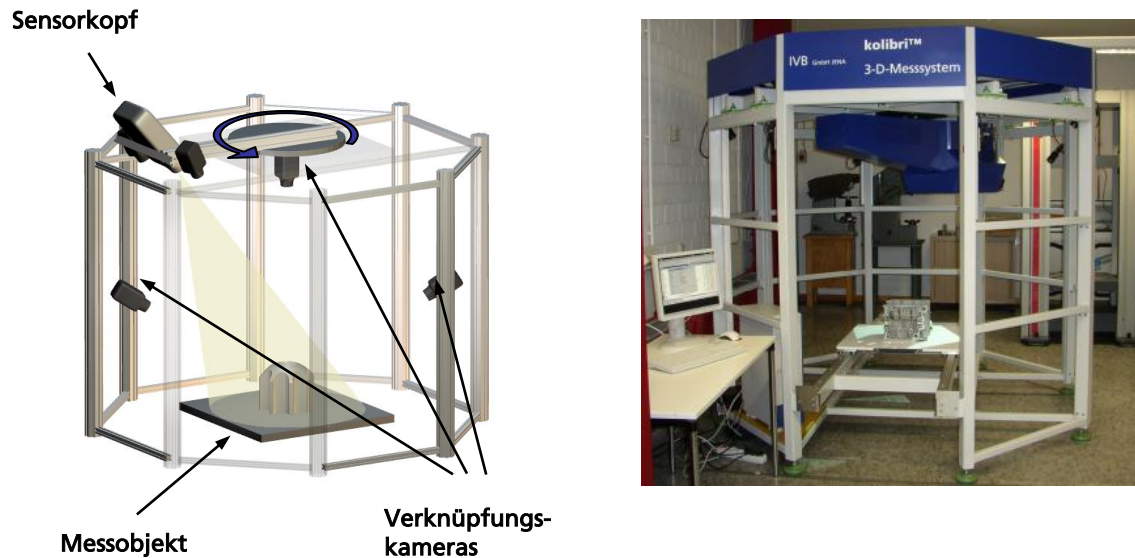


Abb. 14: 3D-Messsystem „kolibri II“ mit drehbarer Sensorkopfseinheit.

Im Messablauf liegt das Objekt auf einer ortsfesten Unterlage. Die Verknüpfungskameras sind so angeordnet (Position vor der Messung frei wählbar), dass sie wesentliche Teile des Messfeldes erfassen. Um unterschiedliche Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtungen zu realisieren, ist der Sensorkopf an einer Dreheinheit befestigt. In einer ersten Position der Projektionsrichtung werden die für die Selbstkalibrierung notwendigen zwei um 90° zueinander verdrehten Gittersequenzen projiziert. Sowohl die Sensorkopf- als auch Verknüpfungskameras nehmen hierbei simultan die Bilder auf. Nach der Bildaufnahme wird die Projektionsrichtung durch Anfahren einer neuen Winkelposition der Dreheinheit geändert. Aus dieser neuen Richtung erfolgt wiederum die Projektion der Gittersequenzen bei erneut simultaner Bildaufnahme aller Kameras. Diese Schritte der Änderung der Projektionsrichtung und simultanen Bildaufnahme werden so lange wiederholt, bis das Messobjekt möglichst vollständig ausgeleuchtet und beobachtet wurde. Die hierfür notwendigen Winkelpositionen des Sensorkopfes können in einem Messplan vor der Messung vom Anwender selbst frei eingestellt werden. Die Anzahl der Positionen kann frei gewählt werden. Das Ablaufschema der Messwertaufnahme ist zusammengefasst in Abb. 15 dargestellt.

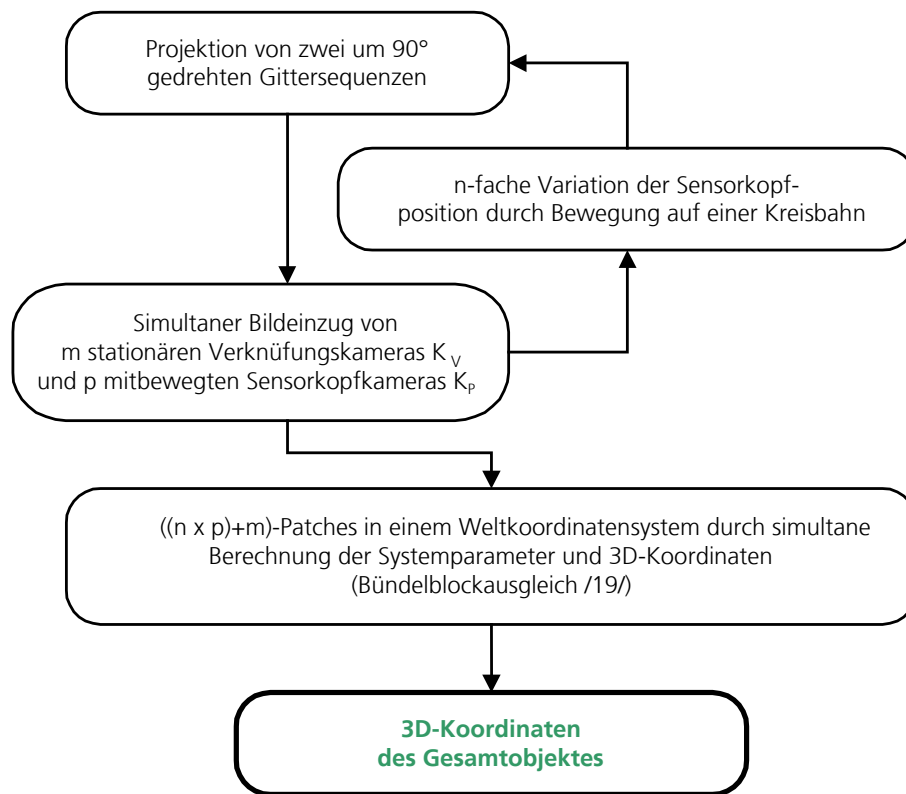


Abb. 15: Ablaufschema der Messwertaufnahme des Messsystems „kolibri II“.

3.2.2. Vermessung großflächiger Objekte

Im Folgenden werden drei Ausführungen von großflächig messenden Messsystemen vorgestellt.

3.2.2.1. 3D-Messzelle „kolibri 1500“

Eine Erweiterung des Systems für die Vermessung von Objekten, die größer sind als das einfach ausgeleuchtete Messfeld im System „kolibri II“, kann durch die Integration eines x-y-Tisches zur lateralen Objektpositionierung vorgenommen werden, siehe Abb. 16.

Hierbei sind an den in x-y-Richtung verschiebbaren Objektstisch eine (oder mehrere) Verknüpfungskameras K_V montiert. Diese beobachtet die gesamte Messszene im Überblick. Den Messablauf zeigt Abb. 17. Während der Musterprojektion nehmen sowohl die Sensorkopfkameras als auch alle Verknüpfungskameras simultan die Streifenbilder auf. Nachdem der in 3.2.1 beschriebene Messzyklus der Messzelle „kolibri II“ für einen Objektbereich durchgeführt wurde, kann der Messobjektbereich durch Anfahren einer neuen Position des x-y-Tisches geändert werden. In dieser neuen Position wird der Messablauf wiederholt. Diese Schrittfolge wird so lange durchgeführt,

bis das Messobjekt möglichst vollständig erfasst wurde. Die hierfür notwendigen x-y-Positionen des Messobjektes können auch hier in einem Messplan vor der Messung vom Anwender selbst frei eingestellt werden. Die Anzahl der Positionen (k) kann frei gewählt werden.

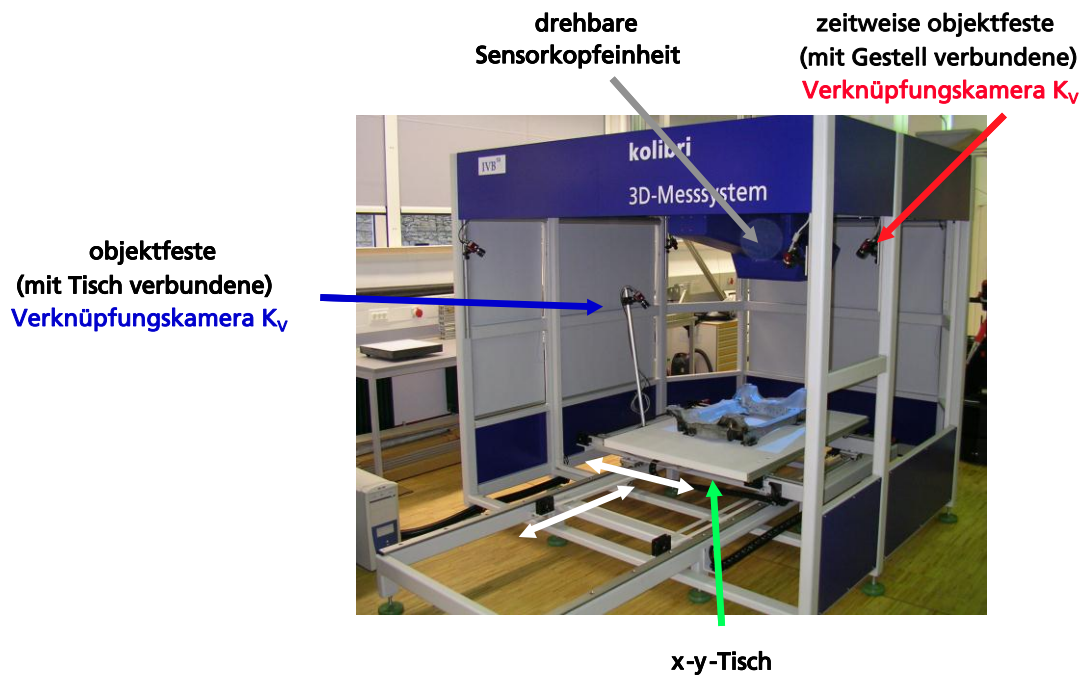


Abb. 16: 3D-Messsystem „kolibri 1500“ mit drehbarer Sensoreinheit und x-y-Tisch.

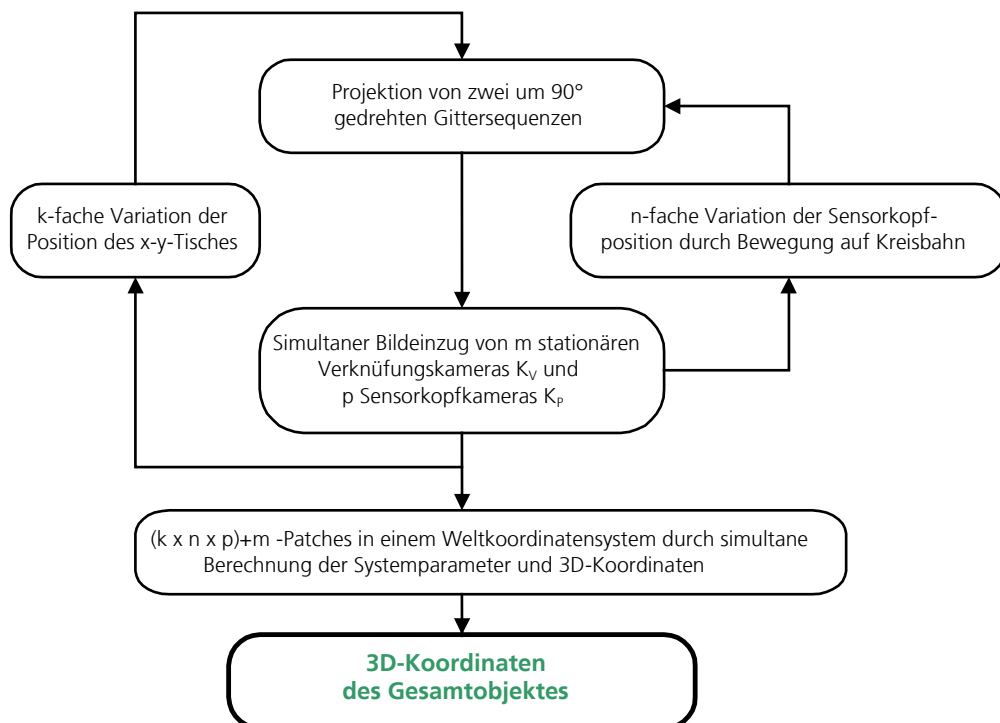


Abb. 17: Ablaufschema der Messwertaufnahme des Messsystems „kolibri 1500“.

Betont werden sollte, dass sich die Position der mit dem Objektisch verbundenen Verknüpfungskamera in Bezug zum Messobjekt nicht ändert, da diese immer mitbewegt wird. Dadurch können in der Koordinatenberechnung alle einzelnen Bilder in einem gemeinsamen Weltkoordinatensystem berechnet werden.

Als Besonderheit des Systemkonzepts ergibt sich, dass keinerlei Anforderungen an die Positionier- und Führungsgenauigkeit des x-y-Tisches gestellt sind, da die Selbstkalibrierung und Bildorientierung über die Verknüpfungskamera gegeben ist.

Messbeispiele aus dem industriellen Einsatz zeigen die Abb. 37 und 38. Anzumerken sei, dass derartige Systeme die Möglichkeit der direkten Integration in Fertigungslinien bieten und vollautomatisiert arbeiten können.

3.2.2.2. Messsystem „kolibri PORTAL“

Großflächige und auch sehr komplexe Objektgeometrien erfordern die völlig freie Positionierung des Sensorkopfes während der Messwertaufnahme. Dies kann durch die Anbindung des Sensorkopfes an ein beliebiges Handlingsystem realisiert werden.

Durch Anwendung der hier vorgestellten Methodik der Selbstkalibrierung muss dieses keinerlei Anforderungen an die Führungs- und Positioniergenauigkeit genügen, und es sind somit einfache Portale oder Roboter einsetzbar. Der Mess- und Auswerteprozess erfolgt insgesamt nach dem für das System „kolibri MOVE“ allgemein erläuterten Ablaufschema (siehe Abb. 9).

Eine derartige Anordnung in Portalbauweise zeigt Abb. 18. Dieses Portal dient zur Vermessung großflächiger Objekte bis zu mehreren Quadratmetern. Hierbei ist der Sensorkopf mittels des Portals frei über dem Messobjekt positionierbar. Ein Beispiel der Vermessung eines PKW-Karosserieteils zeigt Abb. 19.

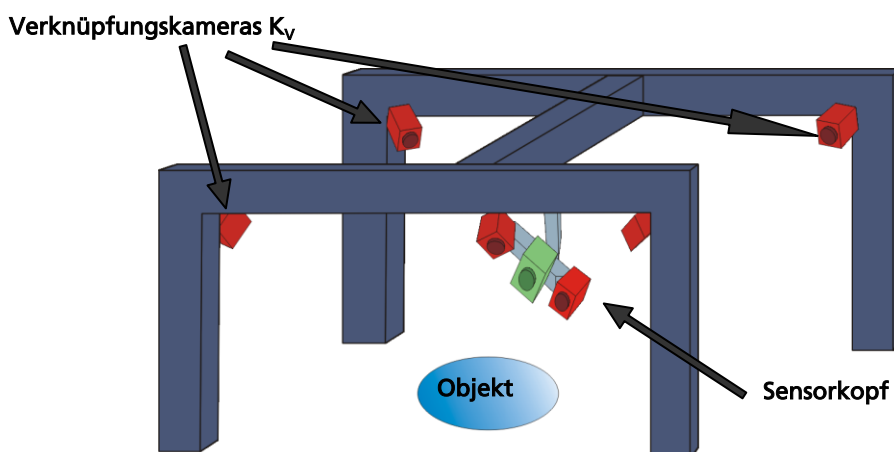


Abb. 18: Grundanordnung des Mehrbildmesssystems „kolibri PORTAL“.

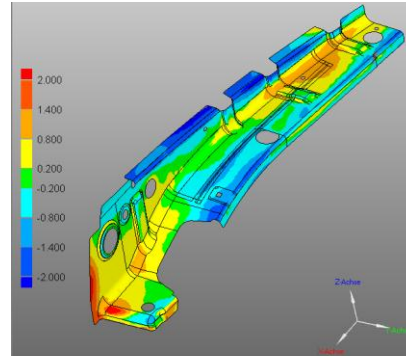
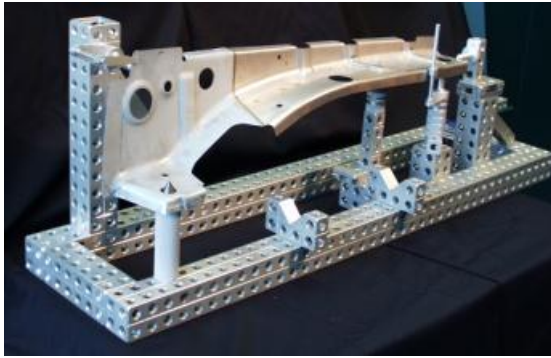


Abb. 19: Karosserieteil und 3D-CAD-Vergleich.

3.2.2.3. Robotergeführter 3D-Sensor „kolibri ROBOT“

Die oben beschriebenen Systeme sind gekennzeichnet durch die Projektion „schräg von oben“ bzw. eine beschränkte Anzahl an Bewegungsachsen. In einigen Anwendungsfällen ist es jedoch notwendig, das Objekt aus unterschiedlichsten Richtungen (ausgenommen natürlich einem Bereich zur Halterung) zu vermessen. Hierzu dient das Messsystem „kolibri robot“, bei dem der Sensorkopf durch einen Roboter frei in Bezug zum Messobjekt positioniert werden kann, siehe Abb. 20. Damit hat man die Möglichkeit, die Messrichtungen sehr flexibel einzustellen und an die Objektgeometrie anzupassen. Es sollte noch einmal betont werden, dass für die Erzielung eines hochwertigen 3D-Gesamtbildes keinerlei Passmarken auf dem Objekt benötigt und an die Positioniergenauigkeit des Robotersystems keinerlei Anforderungen gestellt werden. Somit werden externe Referenzvorrichtungen bzw. Einmesseinrichtungen nicht benötigt. Auch hier erfolgt der Messablauf entsprechend dem Ablaufschema von Abb. 9, und ein Messbeispiel zeigt Abb. 21.

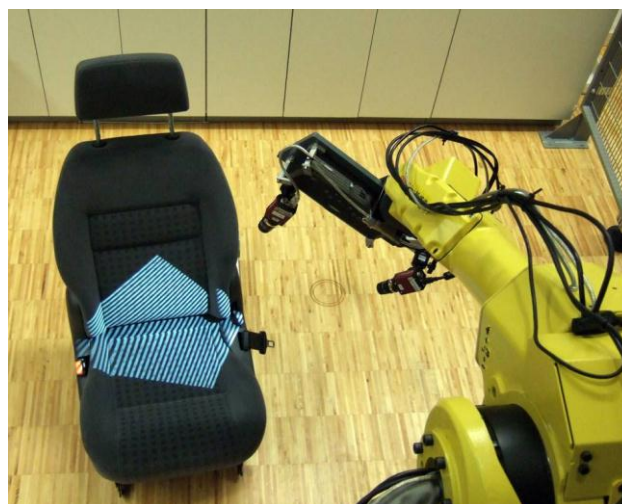


Abb. 20: Robotergeführtes 3D-Messsystem „kolibri ROBOT“.



Abb. 21: Vermessung eines PKW-Sitzes.

3.2.3. Messsystem „kolibri FLEX“

Zur mobilen, schnellen und automatisierten 3D-Vermessung mittelgroßer Objekte wurde das System „kolibri FLEX“ entwickelt (siehe Abb. 22). Hierbei befindet sich das Objekt auf einem (mobilen) Drehtisch, wobei die Verknüpfungskamera mit diesem fest verbunden ist (Position an einem Arm direkt über dem Objekt). Der Sensorkopf befindet sich auf einer weiteren mobilen Einheit. Im Messablauf liegt das Objekt auf dem Drehtisch. Die projizierten Struktursequenzen werden schräg von oben aus frei wählbaren Richtungen auf die zu vermessende Objektfläche gelenkt. Um die unterschiedlichen Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtungen zu realisieren, ist der Sensorkopf durch eine Höhenverstellung und Kippung in seiner Blickposition in Bezug zum Objekt veränderbar und das Objekt mittels des Drehtisches drehbar.

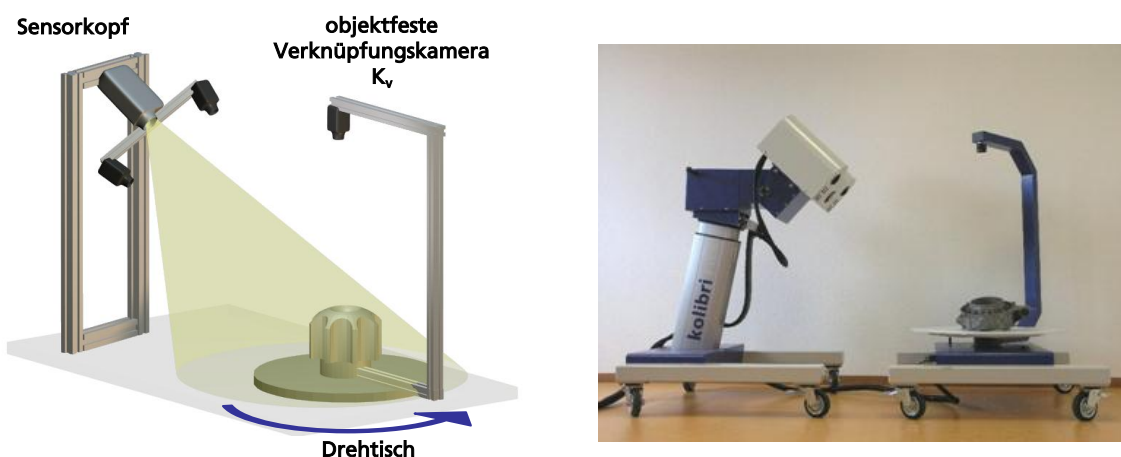


Abb. 22: Mobiles Mehrkamera-Messsystem „kolibri FLEX“ (Foto IVB GmbH).

Die Schritte der Änderung der Projektionsrichtung und simultanen Bildaufnahme werden so lange wiederholt, bis das Messobjekt möglichst vollständig ausgeleuchtet und beobachtet wurde. Die hierfür notwendigen Winkelpositionen des Drehtisches und der Höhen- / Kipppositionen des Sensorkopfes können in einem Messplan vor der Messung vom Anwender selbst frei eingestellt werden. Den Messablauf insgesamt zeigt Abb. 23. Messbeispiele zeigen die Abbn. 31-34, 36.

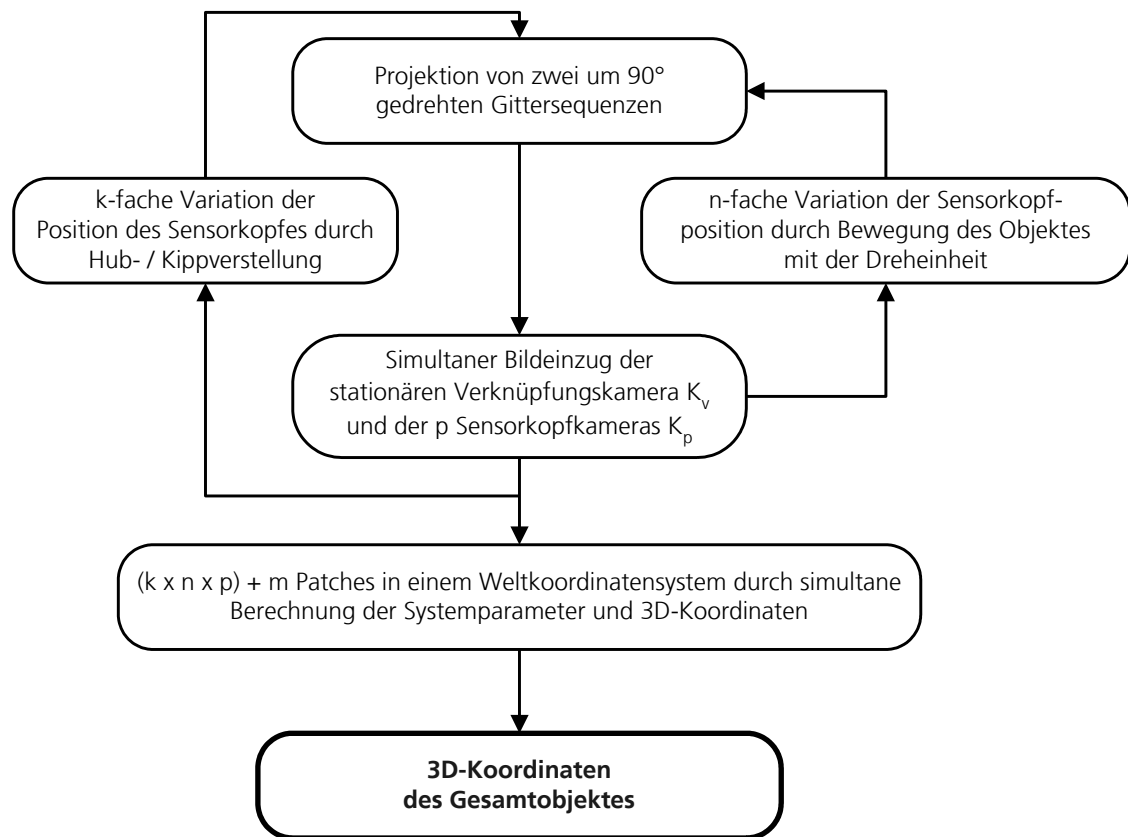


Abb. 23: Ablaufschema der Messwertaufnahme des Messsystems „kolibri FLEX“.

3.2.4. Tischdigitalisiersystem „kolibri FLEX-mini“

Eine spezielle Ausführungsform einer Messanordnung für die Vermessung kleinerer Objekte, welche aus dem in 3.2.3. gezeigten Messsystem „kolibri FLEX“ abgeleitet wurde, ist das in Abb. 24 gezeigte System „kolibri FLEX-mini“. Dieses ist durch folgende wesentliche Unterscheidungsmerkmale gekennzeichnet:

- Das System ist als Tischsystem realisiert und kann leicht an verschiedene Aufstellorte versetzt werden.
- Das System ist für die Vermessung von kleineren Objekten ausgelegt (Messfelder von 10 bis 180 mm Durchmesser).
- Der Sensorkopf ist in seiner Blickrichtung (Neigungswinkel) umschaltbar. Die Umschaltung wird mit einem Kippspiegelsystem realisiert. Damit können sowohl die Oberseite und ihre Strukturen als auch die Seitenbereiche mit einer sehr guten Vollständigkeit erfasst werden. Somit können Unterschnitte bis zu 110° vermessen werden.
- Für die Beleuchtung wird ein speziell entwickelter LCOS-Projektor mit einer Beleuchtung auf LED-Basis eingesetzt. Damit ist sowohl ein sehr schnelles Schalten der projizierten Bilder als auch eine sehr geringe Wärmeentwicklung in der Projektoreinheit verbunden.

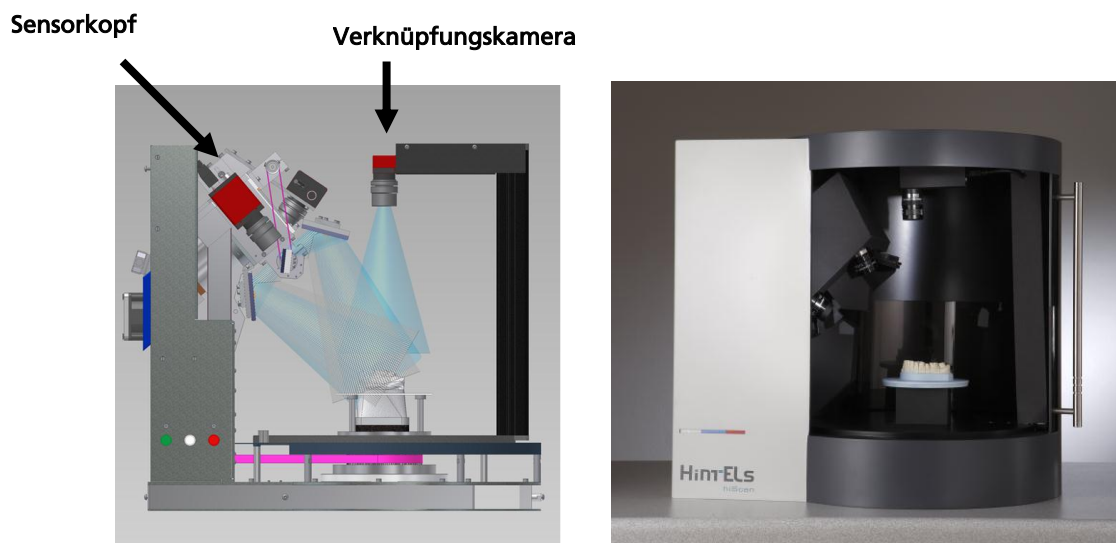


Abb. 24: Tisch-Messsystem „kolibri FLEX-mini“, Prinzipskizze der Optik und Foto des Messsystems (Foto Hint-Els GmbH).

Die Vollständigkeit der Messung ist anhand des folgenden Messbeispiels der Vermessung eines Erodierwerkzeuges zu erkennen (siehe Abb. 25).

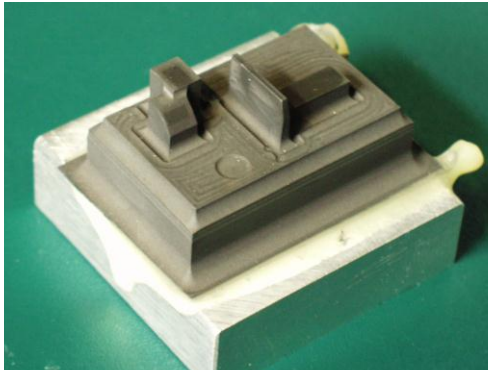
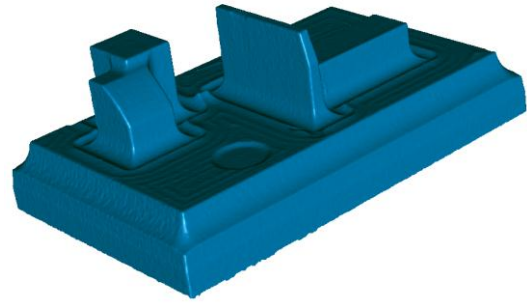
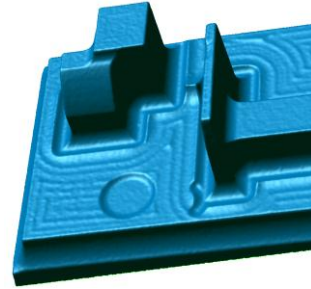


Foto der Elektrode



Gesamtobjekt STL-Darstellung



Detail in STL-Darstellung

Abb. 25: Vermessung einer Graphit-Erodier Elektrode.

3.2.5. Multi-Sensor 3D-Messzelle „kolibri MULTI“

In verschiedenen Anwendungen ist es notwendig, ein Objekt mit unterschiedlichen Auflösungen bzw. lokal angepassten Messunsicherheiten zu vermessen. Hierfür ist es notwendig, das Objekt in der der Messaufgabe entsprechenden Sensorauflösung zu erfassen. Dies wird erreicht durch die Vermessung des Objektes mit unterschiedlichen Messfeldgrößen. Zur Erzielung der jeweils optimalen Messunsicherheit und ohne das ein Umbau des Systems (z.B. Tausch der Abbildungsoptiken und damit verbundener Neukalibrierung des Systems) durchgeführt werden muss, wurde die Multi-Sensormesszelle „kolibri MULTI“ entwickelt, in der simultan bis zu 4 unterschiedliche Streifenprojektionsmessköpfe eingesetzt werden können /29/. Hier sind die Felder 20mm, 40mm, 90mm, 180mm verfügbar. Die Grundanordnung zeigt Abb. 26 (Sensorkopf 1 = 40mm, Sensorkopf 2 = 180mm). Eine Rundumvermessung wird durch Bewegung der Sensoren auf einer Kreisbahn mittels der zentralen Dreheinheit realisiert. Hierbei sind beliebige Drehwinkelpositionen einstellbar. Gleichzeitig kann in Analogie zum in 3.2.4. beschriebenen Tischmesssystem die Blickrichtung des Sensor Kopfes (Neigungswinkel) mittels eines Kippspiegelsystems realisiert werden. Damit können sowohl die Oberseite und ihre Strukturen als auch die Seitenbereiche mit einer sehr guten Vollständigkeit erfasst werden. Die Messabläufe sind wiederum voll automatisierbar.

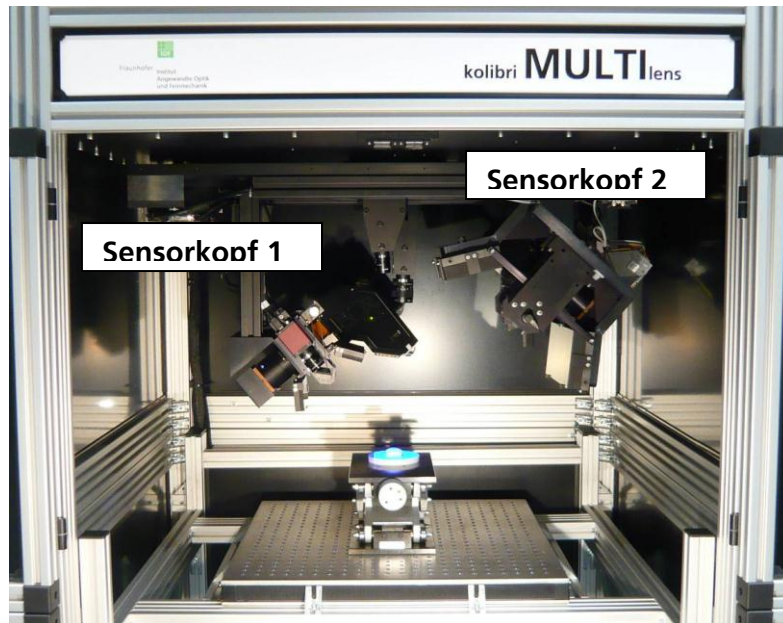


Abb. 26: Grundanordnung des Multi-Sensorsystems „kolibri MULTI“.



Abb. 27: Rapid-Prototyping Teil „Turm“: Foto und Messergebnis (STL-Darstellung).

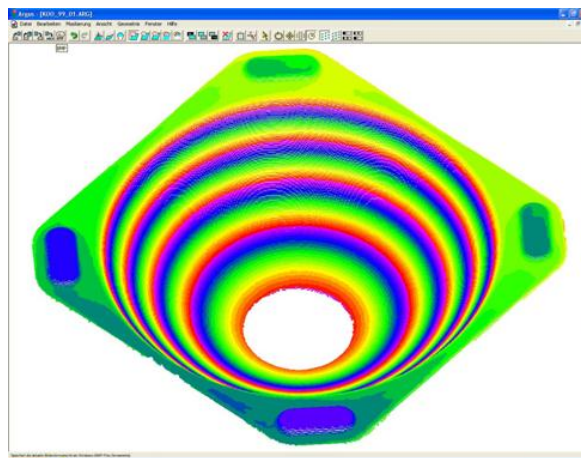


Abb. 28: Reflektor: Foto und Messergebnis (farbkodierte Höhendarstellung).

Das System kann z.B. zur Erfassung von Rapid Prototyping -Teilen (siehe Abb. 27) eingesetzt werden. Ebenso kann das System z.B. zur hochgenauen Vermessung optischer Komponenten / Freiformen wie z.B. eines Reflektors (siehe Abb. 28) oder Werkzeug- und Formteilvermessung genutzt werden (siehe Abb. 29). Vorteilhaft ist, dass über die zentrale Verknüpfungskamera die Messungen mit unterschiedlichen Sensoren in einem einheitlichen Koordinatensystem durchgeführt werden, und somit die 3D-Punktwolken automatisch zueinander eingepasst sind. Abb. 30. zeigt dies am Beispiel der Vermessung eines Ausgrabungsgegenstandes (Kachel). Damit können in einer Messung hochaufgelöste Detailmessungen mit Überblicksmessungen des gesamten Objektes verbunden werden.

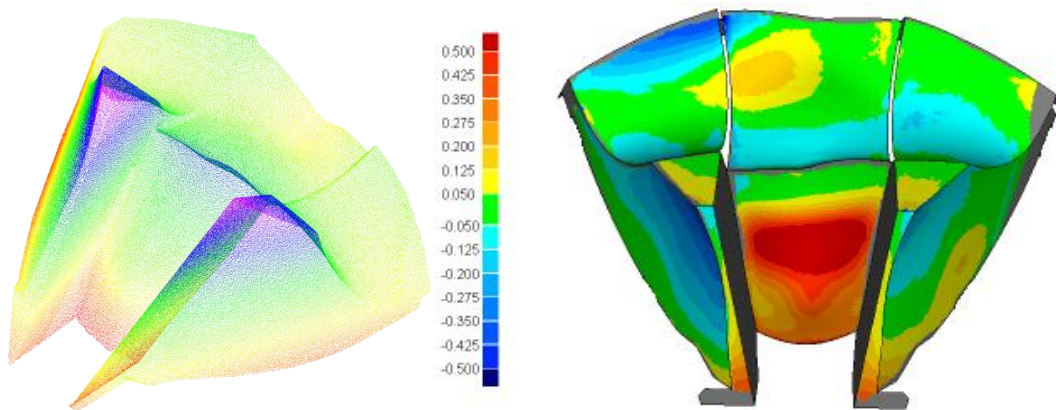


Abb. 29: Vermessung optischer Komponente (Heißbräteteil).

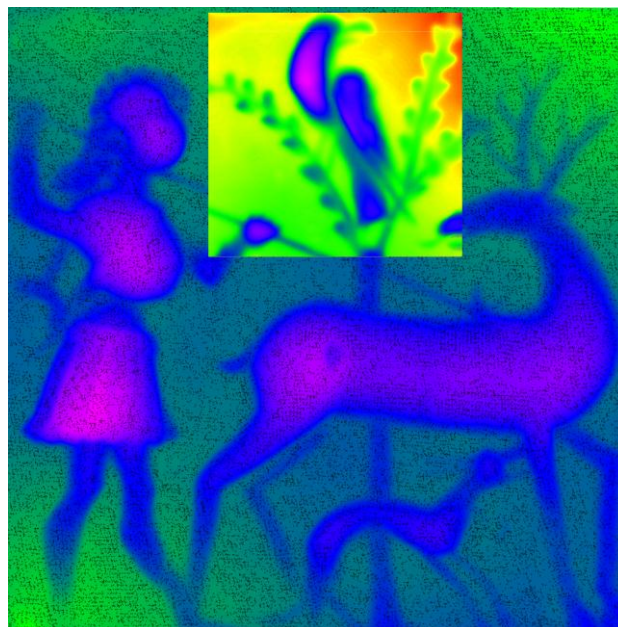


Abb. 30: Vermessung einer Kachel mit zwei Auflösungsstufen.

4. Anwendungsbeispiele

Im Folgenden sind einige Anwendungsbeispiele aus dem Umfeld des Einsatzes der 3D-Messtechnik für Aufgaben der Qualitätssicherung (3D-CAD-Vergleich, Stichmaßbestimmung, siehe Abb. 31, 32, 35-38) und des Reverse Engineering (STL-Datengenerierung, siehe Abb. 21, 25, 27, 33-34, 37) aufgezeigt /23, 26/. Für die Lösung dieser Aufgabenstellungen kann der Anwender aus einer Vielzahl kommerziell verfügbarer Programmpakete wählen. Diese sollten in Abhängigkeit von der Komplexität und Art der zu lösenden Aufgabenstellung und dem geforderten Automatisierungsgrad ausgewählt werden. Typischerweise wird die 3D-Punktewolke im ASCII-Format vom 3D-Scanner an die Softwaretools übergeben. Mögliche Programmpakete sind z.B. (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- GEOMAGIC (IVB GmbH)
- POLYWORKS (DUWE 3D)
- METRIS (metris)
- POINTMASTER (Knotenpunkt GmbH)
- POMOS (Ilmcad CAD-Ingenieurbüro GmbH)
- CONTUR CONTROL (ASCONA)
- GUGS (FhI-IPA).

Diese Programmpakete dienen dazu, die von unterschiedlichen Digitalisierern stammenden 3D-Punktewolken zu manipulieren und dann z.B. 2D-/ 3D-Kurvenschnitte zu extrahieren, eine geometrische Analyse von Einzelgeometriemaßen des Messobjekts oder einen 3D-CAD-Vergleich durchzuführen, Geometriemodelle zu generieren (Dreiecksvermaschung / Triangulation) oder Flächen zu generieren (NURBS). Typische Ausgabeformate z.B. für die Generierung von Bahndaten von Bearbeitungsmaschinen sind STL, VRML, IGES und VDAFS. Diese Schnittstellen sind für unterschiedlichste Branchen wie Formenbauer, die Automobilindustrie, den Designbereich, die Medizintechnik, Multi-Media und angrenzende Branchen geeignet. Neben den genannten Auswertefunktionen sind im Allg. umfangreiche Punktoperationen zur Aufbereitung der Daten, z.B. krümmungsabhängige Homogenisierung, Glätten, Schnitte, Projektionen, Justieren u.a. implementiert.

4.1. Bestimmung von Geometriemerkmalen aus den Punktewolken

Beispiel 1:

Im Beispiel 1 wurde der Durchmesser und die Lage von zwei Innenzylindern mit dem Programmpaket SURFACER bestimmt. Die Genauigkeit der Zylinderanpassung betrug hierbei $\pm 8\mu\text{m}$.

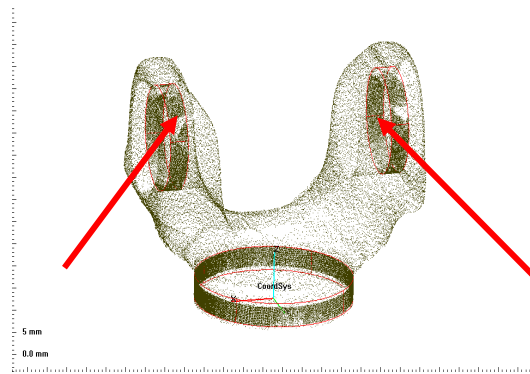


Abb. 31: Bestimmung der Durchmesser und der Zylinderlage an einem Automobilteil. (Objektgröße: 120x80x120 mm³).

Beispiel 2:

Im Beispiel 2 wurden Stichmaße an einem mit dem System „kolibri FLEX“ vermessenen Blechbiegeteil mit den Programmpaketen metris CADcompare automatisiert bestimmt. Stichmaße sind hierbei z.B. Biegewinkel, Abstände von Bohrungen und Objektkanten und Bohrungsdurchmesser.

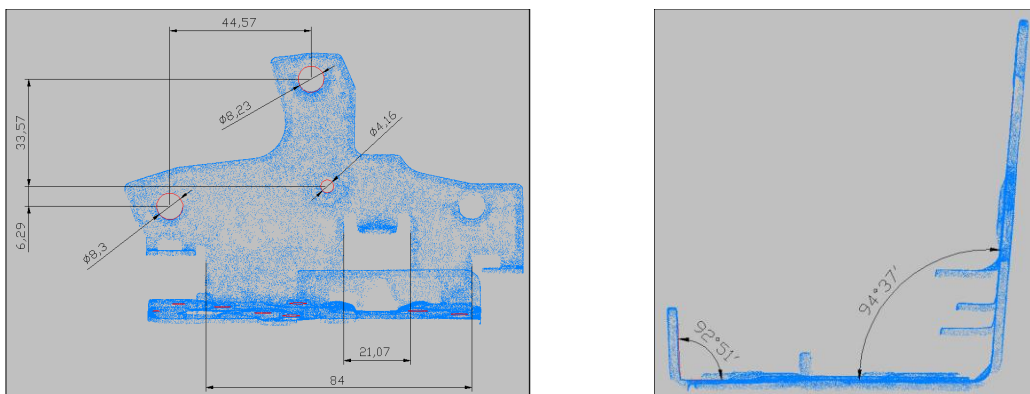


Abb. 32: Bestimmung von Stichmaßen eines Blechbiegeteils (Objektgröße: 120 x 90 x 80 mm³).

4.2. Flächenrückführung

Die Messdaten in Form der Punktwolke müssen für die weitere Auswertung in der Regel in eine Fläche umgewandelt werden. Dabei erfolgt zuerst eine Triangulation, bei der die einzelnen Punkte mit Nachbarschaftsbeziehungen versehen und dann als zusammenhängende Menge von Dreiecksflächen gespeichert werden. Dies erfolgt im STL-Format. Diese Fläche kann als Grundlage für verschiedene Nutzungen wie z.B. die Berechnung von Fräsbahnen, die Erzeugung von Nurbsflächen, die Berechnung von Schnittlinien in der Körperoberfläche u.a. dienen.

Beispiele solcher Flächen sind in den folgenden Abbildungen 33 und 34 gezeigt. Abb. 33 zeigt die STL-Fläche eines Frästeiles, welche aus 760.000 Dreiecksflächen besteht.

Abb. 34 zeigt in zwei verschiedenen Ansichten die STL-Fläche einer Montageschelle. Die Anzahl der Dreiecksflächen beträgt 610.000.

Bild 33: STL-Fläche eines Frästeiles, schattierte Darstellung (Messsystem „kolibri FLEX“).

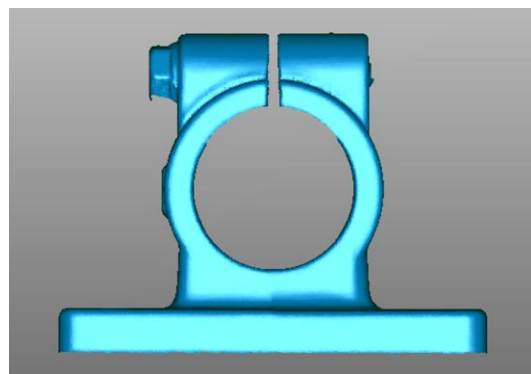
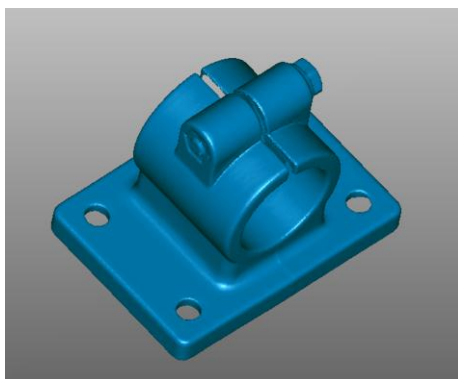
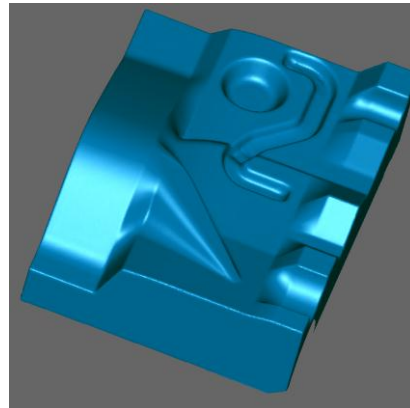


Abb. 34: STL-Fläche einer Montageschelle, schattierte Darstellung schräg von oben und Seitenansicht (Messsystem „kolibri FLEX“).

4.3. 3D-CAD-Vergleich

Die folgenden Beispiele zeigen exemplarisch die Möglichkeiten eines Vergleichs der gemessenen 3D-Punktwolke mit dem CAD-Modell. Dadurch bietet sich insbesondere die Möglichkeit, sowohl globale als auch lokale Formabweichungen zu detektieren. In den Beispielen wurde die Punktwolke trianguliert und anschließend die Registrierung der Punktwolke zum CAD-Modell und der eigentliche 3D-Vergleich nach einem Best-Fit-Ansatz durchgeführt. Die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Form werden farbkodiert.

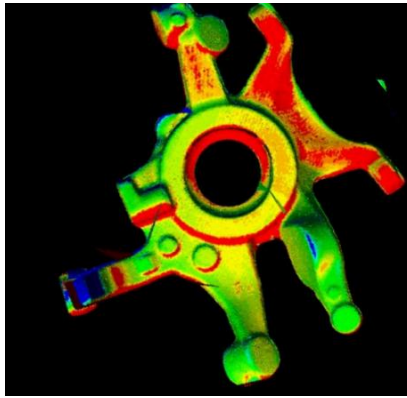
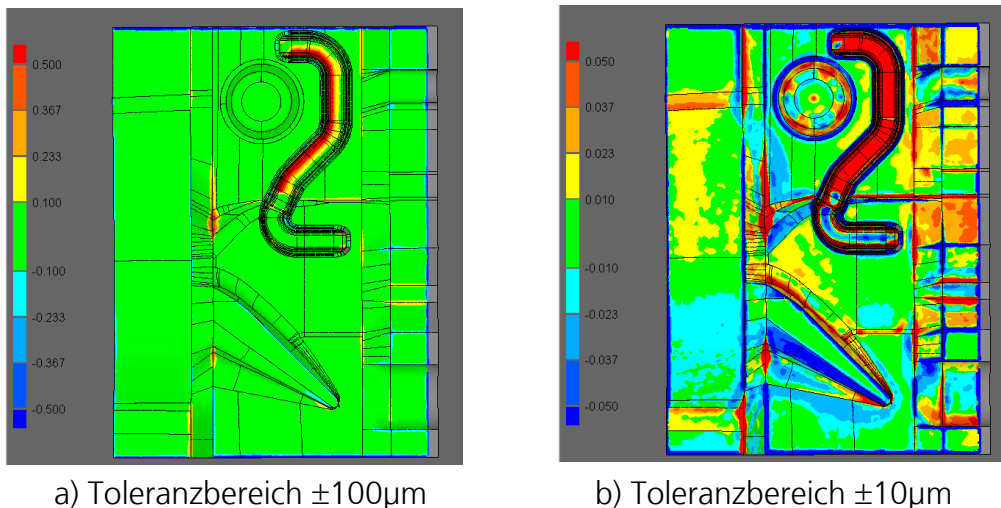


Abb. 35: 3D-CAD-Vergleich für ein Schmiedeteil.
(Messsystem: kolibri II, Objektgröße: 250x250x200 mm³)

Die Darstellung der Auswertung des oben gezeigten Frästeils (Abb. 33) bei Einstellung unterschiedlicher Toleranzfelder zeigt Abb. 36.



a) Toleranzbereich ±100μm

b) Toleranzbereich ±10μm

Abb. 36: Toleranzbezogene Auswertung eines Frästeils
(Objektgröße 250x150x50mm³, Messsystem kolibri FLEX).

Die Auswertung der Vermessung einer PKW-Bodenbaugruppe mit dem Messsystem „kolibri 1500“ zeigt Abb. 37. Hierbei kamen fünf Verknüpfungskameras und eine bewegte Sensorkopfkamera bei 6 Positionen des x-y-Tisches und jeweils 6 Drehpositionen des Sensorkopfes zum Einsatz. Insgesamt setzt sich das Messergebnis aus 37 Teilansichten zusammen. Der Mess- und Auswerteablauf ist hierbei vollautomatisch.

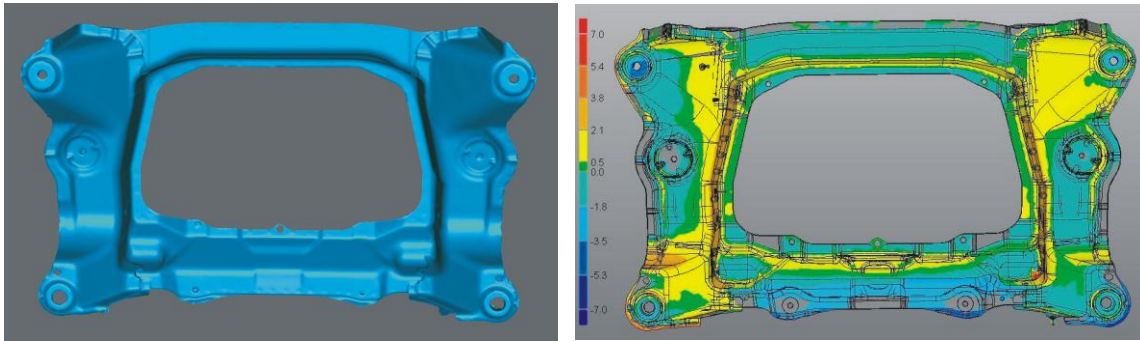
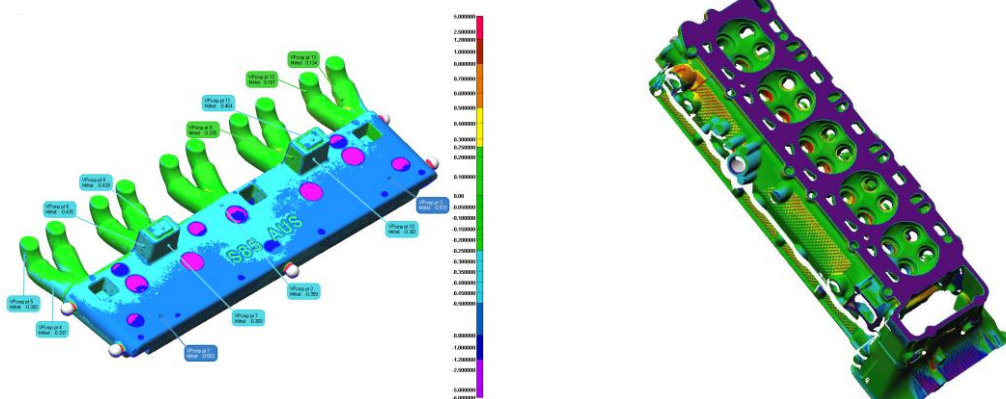


Abb. 37: STL-Fläche (1,5 Mio. Dreiecke) und 3D-CAD-Vergleich einer digitalisierten PKW-Bodenbaugruppe.
(Objektgröße 915 x 545 x 185 mm³, Messsystem kolibri 1500).

Die Anwendung des Systems „kolibri 1500“ zur Qualitätssicherung in Gießereiprozessen in der Automobilindustrie (Standort BMW, Landshut) zeigt Abb. 38 /26/. Hierzu zählen u.a. die Vermessung der Werkzeuge und Gussformen (Sandformen, Lostfoammodelle) und des gegossenen Endprodukts. Durch den Einsatz des „Kolibri-Messsystems“ können die Abhängigkeiten der jeweiligen Werkzeuge und der daraus resultierenden Produkte anschaulich dargestellt werden. Hierbei werden die Einflüsse der Werkzeuge (in Bezug auf Maßhaltigkeit, Formtreue) auf das spätere Produkt sichtbar gemacht, und weitere Maßnahmen können abgeleitet werden. Auch sind Unwägbarkeiten wie z.B. Verzug beim Entformen durch dieses Hilfsmittel leichter zu erkennen und der genaue Umfang dieser Problemstellen anhand des maßlich bestimmten Farbprints gut zu verdeutlichen.

In den hier aufgeführten Beispielen kamen im Messsystem fünf Verknüpfungskameras (m=5) und zwei mitbewegte Sensorkopfkameras (p=2) bei 3 Positionen des x-y-Tisches (k=3) und jeweils 6 Drehpositionen des Sensorkopfes (n=6) zum Einsatz. Insgesamt setzt sich das Messergebnis somit aus 41 Teilansichten zusammen. Die Zeit für die vollautomatische Datenaufnahme betrug 10 min bis zur homogenisierten 3D-Punktwolke.



a) Sandkern eines Lufteinlasskanals

b) Motorblock

Abb. 38: 3D-CAD-Vergleiche von Gussformen und –endprodukten.

5. Zusammenfassung

Heutige optische 3D-Messsysteme auf der Basis von Streifenprojektionstechniken haben einen Stand erreicht, bei dem in Verbindung mit geeigneten Softwaretools zur Datenauswertung unterschiedlichste Aufgabenstellungen im produktiven Umfeld realisiert werden können. Insbesondere die jüngsten Entwicklungen der hier vorgestellten Methoden und Systeme von selbstkalibrierenden Messsystemen zur automatisierten Vermessung komplexer Objekte (Mehrkamera-Messsysteme) helfen hierbei, neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Die hier vorgestellten Systeme nach dem Prinzip der Phasogrammetrie unter Verwendung der Methodik der virtuellen Passmarken zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

- **Selbstkalibrierung** (d.h. vorab keine Kalibrierprozeduren notwendig), wodurch die Systeme unempfindlich gegen Umgebungseinflüsse werden. Dies bietet das Potenzial, diese Messtechnik direkt in den Fertigungsprozess, unabhängig von Messräumen, zu integrieren;
- Vermessung komplexer Objekte durch **automatisierte Mehrbilderfassung** realisiert (d.h. keine Verwendung von Passmarken, Matchingprozeduren, hochgenauen mechanischen, optischen Führungssystemen, Orientierungshilfen, Navigationskulissen o.ä. für die Sensororientierung zur Bildzusammensetzung). Dies wird möglich durch die Nutzung des Prinzips der **virtuellen Passmarken**.
- Durch die Verwendung der Methode der **Phasenkorrelationstechnik** sind die Systeme unempfindlich gegenüber durch das Objekt und seine Oberflächenstruktur hervorgerufenen Phasenstörungen.

6. Literatur

- /1/ Chen F., Brown G.M., Song M.:
Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods,
Opt.Eng. 39(2000), S. 10-22
- /2/ Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3D-Messtechnik
Hrsg. Fraunhofer Allianz Vision, www.vision.fhg.de, ISBN 3-8167-6297-2 (2003)
- /3/ Luhmann Th.:
Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis – Beispiele und Problemlösungen
Wichmannverlag (2002)
- /4/ 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
- /5/ Kühmstedt P., Notni G., Hintersehr J., Gerber J.:
CAD-CAM-System for Dental Purpose-an Industrial Application, Proc. Fringe 2001-
Proc. Fringe'01 (Eds. W.Osten, W.Jüptner) Elsevier-Verlag (2001) S. 667-672
- /6/ Halioua M., Krishnamurty R.S., Liu H.C., Chiang F.P.:
Automated 360° profilometry of 3D diffuse objects

- Appl.Opt. 24(1985), S. 2193-2196
- /7/ Kowarschik R., Kühmstedt P., Gerber J. Schreiber W. and Notni G.:
Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light
Opt. Eng. 39 (2000), S. 150-158
- /8/ Karbacher St.; Häusler G.; Schönfeld H.:
Reverse Engineering using optical range sensors
Handbook of computer vision and application vol.3 (ed.B.Jähne), Academic press,
(1999), S. 359-380
- /9/ Neugebauer P.J.:
Reconstruction of real-world objects via simultaneous registration and robust combination of multiple range images
Int.J. of Shape Modelling 3(1997), S. 71-90
- /10/ Laboureux X., Häusler G.:
Localization and registration of three-dimensional objects in space – where are the limits
Appl.Optics 40 (2001) S. 5206-6216
- /11/ Reich C., Ritter R., Thesing J.:
3D-shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection
Opt.Eng. 39 (2000), S. 224-231
- /12/ Zilker A., Winter D.:
WinGS – Optical measurement and inspection system for aircraft windtunnel models
Proc.SPIE 3824 (1999), S. 334-337
- /13/ siehe Informationsmaterial der Steinbichler Optotechnik GmbH, www.steinbichler.de
- /14/ Kirschner V., Schreiber W., Kowarschik R., Notni G.:
Self-calibrating shape-measuring system based on fringe projection
Proc.SPIE 3102 (1997), S. 5-13
- /15/ 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
- /16/ Notni G., Kühmstedt P., Heinze M., Himmelreich M.:
Phasogrammetrische 3D-Messsysteme und deren Anwendung zur Rundumvermessung
Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Hrsg. Th.Luhmann, Wichmannverlag (2003) S. 21-32
- /17/ Notni G., Kühmstedt P., Heinze M.:
Systemkonfigurationen phasogrammetrischer 3D-Messsysteme - Anwendungsbeispiele
Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Hrsg. Th.Luhmann, Wichmannverlag (2004) S. 30-37
- /18/ Luhmann Th.:
„Nahbereichsphotogrammetrie“, Wichmann-Verlag (2003) S. 238
- /19/ Kruck E.:
Programmpaket „BINGO“, GIP GmbH Aalen, (2003)

- /20/ Notni G., Kühmstedt P.:
 „Der digitale Mensch“
 Laser-Photonik 11 (2003) S.46-48
- /21/ Schreiber W., Notni G., Kühmstedt P., Gerber J., Kowarschik R.:
 “Optical 3D-coordinate measuring system using structured light”
 Proc. SPIE vol.2782 (1996), S. 620-627
- /22/ Kühmstedt P., Heinze M., Notni G.:
 „Phasogrammetric optical 3D-Sensor for the measurement of large objects“
 Proc. SPIE 5457 (2004) S. 56-64
- /23/ Gerber J., Notni G., Kühmstedt P.:
 „Von der Punktwolke zum Stichmaß“
 VDI Berichte 1572 (2000) S.79-86
- /24/ Reitemeier B., Notni G., Heinze M., Schöne Ch., Schmidt A., Fichtner D.
 „Optical modeling of extraoral defects“
 Journal of Prosthetic Dentistry, 91 (2004) S. 80-84
- /25/ Kühmstedt P., Heinze M., Himmelreich M., Bräuer-Buchardt Ch., Brakhage P., Notni G.:
 „Optical 3D sensor for large objects in industrial applications“
 Proc. SPIE 5856 (2005) S. 118 – 127
- /26/ Notni G.
 „Einsatz von 3D-Messsystemen in der Produktionsumgebung“
 Fachmagazin Giesserei Erfahrungsaustausch 8 (2006) S. 10-13
- /27/ Notni G., Kühmstedt P., Heinze M., Munkelt C.:
 “The concept of virtual landmarks in 3D-multi-view fringe projection”
 Proc. SPIE 6762, 2007,
- /28/ Kühmstedt P., Munkelt C., Heinze M., Braeuer-Burchardt C., Notni G.:
 “3D shape measurement with phase correlation based fringe projection”
 Proc. SPIE 6616, pp. 66160B-1 – 66160B-9. 2007
- /29/ Kühmstedt P., Heinze M., Schmidt I., Breitbarth M., Notni G.:
 “Multi resolution optical 3D sensor”
 Proc. SPIE 6616, pp. 66161K-1 – 66161K-8, 2007

7. Systemparameter

	Messsystem „kolibri move“	Messzelle “kolibri 1500“	Messsystem „kolibri ROBOT“	Multi-Sensor- System “kolibri MULTI“	Messsystem “kolibri FLEX- mini“	Messsystem „kolibri cordless“
Maximale Messobjekthöhe H	bis 1500 mm	bis 400 mm	bis 500mm	10 – 120 mm	bis 50 mm	bis 1500 mm
Einzelmessfeld $\varnothing M_L$	bis 800 mm	bis 500 mm	bis 500mm	Bis zu 4 Messfelder simultan (20, 40, 90, 180 mm)	bis 180 mm	bis 300 mm
Maximal erfassbares Messfeld M	bis 2500 mm Länge bis 1000mm Breite	bis 1500 mm Länge bis 1000mm Breite	bis 1500 mm Länge bis 1500mm Breite	\varnothing 180 mm	bis \varnothing 180 mm	bis 1000 mm Länge bis 500mm Breite
Maximale Anzahl der erfassba- ren Teilansichten (N_{\max})	100	100	100	24	24	100
Pixelanzahl der Kamera	1,3 – 5 Mio. Pixel	1,3 Mio. Pixel	1,3 – 5 Mio. Pixel	1,3 – 5 Mio. Pixel	1,3 – 5 Mio. Pixel	1 Mio. Pixel
Messunsicherheit (1σ)	50 – 100 μm	50 μm	50 – 100 μm	2 – 10 μm	5 μm	50 – 100 μm
Merkmalsgenauigkeit	$M_L / 100.000$ (8 μm)	$M_L / 100.000$ (5 μm)	$M_L / 100.000$ (5 μm)	$M_L / 100.000$ (1 μm)	$M_L / 100.000$ (1-2 μm)	$M_L / 10.000$ (20 μm)
Längenmessabweichung (VDI/VDE 2634)	100 μm	80 μm	80 μm	3 – 20 μm	5 – 20 μm	150 μm
Gesamtmesszeit (Messzeit + Datenberechnungszeit)	10 – 60 min	5 – 20 min	Typ. 5 -8 min	1,5 – 8 min	30s – 2,5 min	2 s
Besonderheiten	Vollraum mobil	Halbraum stationär	Vollraum stationär	Halbraum Stationär	Halbraum Tischsystem	handgeführt mobil

Tabelle 1: Parameter der Gerätefamilie „kolibri“; **weitere Produktinformationen siehe unter www.iof.fraunhofer.de.**