

## Industrieanwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie

WERNER BÖSEMANN, Braunschweig & VOLKER UFFENKAMP, Leonberg

**Keywords:** close-range photogrammetry, industrial applications, off-line system, on-line system

**Zusammenfassung:** Die Industriephotogrammetrie beschäftigt sich mit der Vermessung dreidimensionaler Objekte in der industriellen Fertigung und in der Qualitätssicherung. Dabei werden entweder die Bauvorrichtungen und Fertigungswerkzeuge oder das zu fertigende Objekt erfasst. Die Industriephotogrammetrie knüpft hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit und der Objektdimensionen an die Theodolit-gestützte Ingenieurgeodäsie an. Photogrammetrische Verfahren im industriellen Umfeld bewähren sich besonders dort, wo instabile Aufnahmeorte eingenommen werden können oder müssen, das Objekt nicht mobil ist, die verfügbare Zeit zur Objekterfassung stark beschränkt ist oder eine große Anzahl von Messpunkten simultan erfasst werden soll. Der Beitrag beschreibt beispielhaft sieben Industrieanwendungen, die den erfolgreichen Einsatz photogrammetrischer Offline- und Online-Systeme dokumentieren.

**Summary:** *Industrial close-range photogrammetry applications.* Industrial photogrammetry deals with the metrology of three-dimensional objects in industrial manufacturing and quality assurance. Either the jigs and tools or the object itself will be inspected. With regard to available accuracy and object dimensions industrial photogrammetry links to theodolite-based systems. Photogrammetric methods in industrial environment prove their worth especially where unstable recording stations can or must be taken, if the object is not mobile, when the available time to record the object is very limited or a large number of object targets have to be measured simultaneously. This paper outlines seven industrial applications which demonstrate the successful use of photogrammetric off-line and on-line systems.

---

### 1 Grundlagen

Will man den heutigen Erfolg photogrammetrischer Industrieanwendungen unter besonderer Würdigung der Arbeiten von WILFRIED WESTER-EBBINGHAUS darlegen, muss man nahezu 30 Jahre zurückgehen und sich vergegenwärtigen, dass zu dieser Zeit die nicht-topographische Photogrammetrie im Wesentlichen zur Bestandsaufnahme von Kulturdenkmälern mittels analoger Stereobilder betrieben wurde. Zum Einsatz kamen konventionelle Mittelformat-Messkameras wie die Wild P31/P32 und Zeiss Oberkochen TMK/SMK. WESTER-EBBINGHAUS widmete seine Arbeiten von Beginn an praxisorientierten Verfahren unter Einbeziehung der aufkommenden Datenverarbeitungstechni-

ken. Seine konsequent vorangetriebenen Entwicklungen und erfolgreich in die Praxis umgesetzten Aufnahmesysteme und Auswertverfahren haben entscheidend zur Ausweitung der Photogrammetrie im industriellen Umfeld geführt. Insbesondere sind hier folgende Meilensteine zu nennen:

- Die Ausrüstung von Amateurkameras mit Réseaplatten erlaubt die Verwendung von Rollfilm anstelle von Glasplatten und ermöglicht den Einsatz von Wechselobjektiven, Fokussierbarkeit, Sucherbetrachtung und einen automatisierten Aufnahmevorgang durch Fernauslösung und motorisierten Filmtransport (WESTER-EBBINGHAUS 1981).

- Die neu gewonnene Flexibilität der Aufnahmesysteme verlangt eine systematische Analyse der Möglichkeiten zur Kamera-Kalibrierung. Je nach Verfügbarkeit von Informationen im Objektraum werden bestimmte Aufnahmeanordnungen zur Kalibrierung vorgeschlagen (WESTER-EBBINGHAUS 1986).
- Die Erweiterung der Bündelausgleichung um zusätzliche Beobachtungen, welche die geometrischen Beziehungen zwischen Objektpunkten, Aufnahmeestandpunkten oder Aufnahmerichtungen beschreiben, erlaubt die simultane Kalibrierung aller kamera- und objektseitigen Parameter (WESTER-EBBINGHAUS 1985).
- Der Forderung der Industrie nach Systemen mit hohem Automatisierungsgrad kann durch Einsatz opto-elektronischer Flächensensoren entsprochen werden (WESTER-EBBINGHAUS 1984). Gemeinsam mit der Firma Rollei entwickelt WESTER-EBBINGHAUS den Réseauscanner RS1 sowie die Large Format Camera (LFC), um den hohen Forderungen in der industriellen Fertigung nach Messsystemen mit relativen Genauigkeiten von besser als  $10^{-5}$  nachzukommen (DOLD & RIECHMANN 1989).

Damit waren die wesentlichen Grundlagen geschaffen. Die nachfolgenden Jahre waren der Entwicklung von Systemen mit digitaler Aufnahmetechnik gewidmet sowie der kontinuierlichen Einführung der Nahbereichs-photogrammetrie in die Industrie. Dabei wird die klassische Koordinatenmesstechnik nicht immer vollständig ersetzt. In der Regel ergänzen die photogrammetrischen Systeme Koordinatenmessgeräte oder andere portable Koordinatenmesstechnik wie Lasertracker oder Gelenkarme. Seit 1990, parallel zur Entwicklung hochauflösender CCD-Kameratechnologie sowie leistungsfähiger, aber erschwinglicher Rechnerplattformen, hat sich die digitale Industriephotogrammetrie vom Status einer Nischentechnologie zu einem bewährten Verfahren entwickelt, das erfolgreich an vielen Stellen in der industriellen Messtechnik Anwendung findet. Inzwischen werden digitale Off-

line- und Online-Systeme als ausgereifte Produkte durch einige spezialisierte Firmen wie z. B. die Firma AICON 3D Systems GmbH aus Braunschweig, an deren Gründung auch WILFRIED WESTER-EBBINGHAUS beteiligt war, breit am Markt angeboten.

## 2 Anwendungen

Das Hauptaugenmerk der kontinuierlichen Systementwicklung lag stets auf der Automatisierung der Verfahren und der Vereinfachung der Arbeitsabläufe bei der photogrammetrischen Vermessung. Es sollte möglich sein, umfangreiche Auswertungen ohne besondere photogrammetrische Vorkenntnisse durchzuführen. Die folgenden Beispiele sollen einen Überblick über das breite Spektrum der Anwendungen geben. Dabei wird versucht, solche Anwendungen auszuwählen, bei denen die charakteristischen Vorteile photogrammetrischer Industrie-messtechnik wie Mobilität, Flexibilität und Automation besonders deutlich werden. Auf die Angabe von Genauigkeiten wird bewusst verzichtet. In jedem einzelnen Beispiel wurden das eingesetzte System und der Messaufwand vor Ort an die Genauigkeitsanforderungen der Anwender angepasst.

### 2.1 3D-Vermessung von Solar-Panels bei Eurocopter Deutschland

Bei der Eurocopter Deutschland GmbH werden in der Komponentenerprobung, als Teil eines umfangreichen Testprogramms, Belastungsversuche mit Solar-Panels durchgeführt (SCHREDL & WENG 2003). Bei der Erprobung von Solar-Panels werden sowohl Parameter für die Steifheit als auch die Ebenheit durch Messungen im belasteten und unbelasteten Zustand bestimmt. Zu diesem Zweck wurden bisher die Objekte zu einem Koordinatenmessgerät transportiert. Dort mussten dann sowohl der Versuch als auch die dreidimensionale Vermessung durchgeführt werden. Die Größe der zu messenden Objekte (z. B. ca.  $2\text{ m} \times 2,5\text{ m}$  oder  $4\text{ m} \times 2,3\text{ m}$ ) und der für den jeweiligen Transport bzw. Versuchsaufbau erforderli-

che Aufwand ließ den Wunsch nach einem mobilen Messsystem aufkommen.

Seit einiger Zeit wird für diese Aufgabe das 3D-Industriemesssystem AICON DPA-Pro, ein photogrammetrisches Offline-System (SCHNEIDER 1996), eingesetzt. Mit diesem mobilen Messsystem können jetzt alle Messungen am jeweiligen Ort des Versuchsaufbaus durchgeführt und ausgewertet werden.

Zur Bestimmung der Steifheit wird das Panel auf den Boden gelegt und an vier Ecken gelagert. Anschließend wird die erforderliche Anzahl von retroreflektierenden Messmarken aufgebracht. Es folgt eine Vermessung im belastungsfreien Zustand. Mit einer hochauflösenden Digitalkamera werden die Messbilder aus freier Hand in nur wenigen Minuten aufgenommen. Der kameraseitig installierte Ringblitz gewährleistet die gleichmäßige Ausleuchtung der retroreflektierenden Messmarken. Anschließend wird das Zentrum des Panels mit einem Gewicht von ca. 5 kg belastet und eine erneute Vermessung durchgeführt, um die Deformationen, die in einer Größenordnung von 10–20 mm liegen, zu erfassen. Die Bildmessung und die Berechnung der 3D-Koordinaten erfolgt automatisch. Interaktionen zur Steuerung der photogrammetrischen Auswertung sind seitens des Anwenders nicht erforderlich. Anschließend werden die Deformationsvektoren zwischen den Belastungszuständen berechnet. Die Ergebnisse werden zur Gegenüberstellung in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert

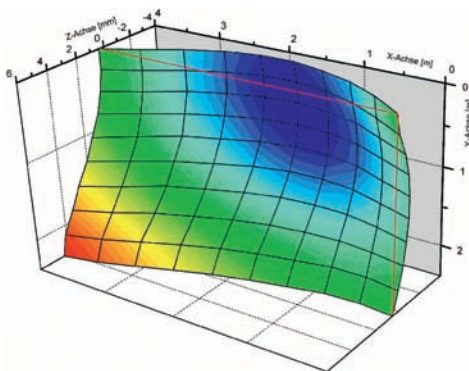


Abb. 1: Ergebnis der Verformungsmessung.



Abb. 2: Ebenheitsmessung am Solar-Panel.

und die geforderten Messprotokolle erstellt. Eine grafische Ergebnisdarstellung ermöglicht die einfache Beurteilung der Versuchsergebnisse (Abb. 1).

In einem weiteren Versuch wird die Ebenheit des Panels gemessen. Hierzu wird es an den zwei Eckpunkten der längeren Seite aufgehängt. Diese Lagerung kommt dem Zustand des Panels in der Schwerelosigkeit am nächsten. Nach einer Einschwingphase kann mit der Aufnahme der Messbilder begonnen werden. Durch einfache Hilfsmittel, wie z. B. eine Bockleiter, lassen sich schnell geeignete Aufnahmeorte einnehmen (Abb. 2).

## 2.2 Verformungsmessungen in einer Klimakammer

Bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge in der Automobilbranche gehören Klimaversuche regelmäßig zum Testprogramm, um alternative Werkstoffe hinsichtlich ihrer Verwend-

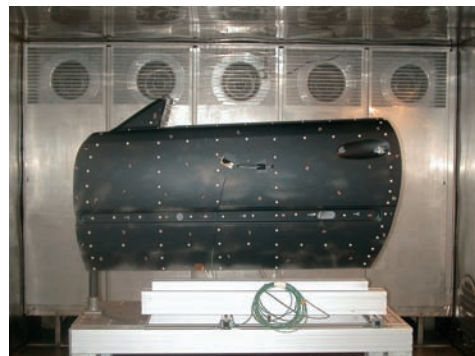


Abb. 3: Tür in der Klimakammer.

barkeit in der Serienfertigung beurteilen zu können. Das Testobjekt, z. B. eine Tür oder eine Fahrzeugverkleidung, wird wechselnden klimatischen Bedingungen ausgesetzt (Abb. 3), um sein Verhalten unter Stress zu beobachten. Die klimatischen Bedingungen werden hierfür in einer Klimakammer künstlich erzeugt.

Wesentliche Erkenntnisgrundlage bei der Auswertung von Klimaversuchen ist die Verformung der Testobjekte in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen. Hierzu ist eine vollständige 3D-Vermessung der Testobjekte erforderlich. Das einzusetzende Messsystem muss folgende Rahmenbedingungen erfüllen:

- Das Messverfahren muss berührungslos sein, damit das Testobjekt nicht durch die Messung selbst verändert wird.
- Die Messung muss innerhalb der Klimakammer durchgeführt werden, also muss das Messsystem auch unter extremen klimatischen Bedingungen einsetzbar sein.
- Die Objekterfassung darf nur wenig Zeit in Anspruch nehmen, da unterstellt wird, dass sich das Objekt für den Zeitraum der Messung nicht verändert.
- Die Auswertung der Messung soll weitestgehend automatisiert erfolgen, damit die Ergebnisse vieler Belastungszustände mit möglichst wenig Aufwand erzeugt werden können.
- Die Präsentation der Ergebnisse muss grafisch illustriert werden und sich in das entsprechende Untersuchungsergebnis einbinden lassen.



Abb. 4: Bildaufnahme bei 180°C.

Für die Vermessung von Verformungen bei Klimaversuchen ist ein photogrammetrisches Offline-System das ideale Werkzeug, da es alle genannten Forderungen erfüllt. Das Testobjekt wird mit einer hochauflösenden digitalen Messkamera nach einer hierfür optimierten Aufnahmeanordnung erfasst. Die Kamera ist auch unter extremen klimatischen Bedingungen in einer Klimakammer einsetzbar (Abb. 4) und kann im Bedarfsfall mit einem speziellen Schutzgehäuse verwendet werden. Die Erfassungszeit des Objektes ist sehr kurz, so dass die erforderliche Anzahl von Messepochen ohne Probleme durchgeführt werden kann.

### 2.3 Nichtlineare Berechnung von Stahlflanschverbindungen mit gemessenen Imperfektionen

Die Beanspruchung von Tragwerken und Tragwerksteilen wird meist an idealisierten Modellen ermittelt. In der Realität weisen Tragwerke hingegen häufig Imperfektionen auf. Derartige Imperfektionen können ge-



Abb. 5: Aufbau einer Windkraftanlage.



benenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Beanspruchung und damit auf die Tragfähigkeit besitzen. Eine größere Windkraftanlage in Mecklenburg-Vorpommern (Abb. 5) wurde im Bauzustand untersucht (BUCHER & EBERT 2000).

Für die Untersuchung wurden sieben bereits einbetonierte Ringflanschhälften mit Hilfe eines mobilen Offline-Systems vermessen. Zur Durchführung der Vermessung wurden die Flanschflächen vorab punktweise mit unterschiedlichen Konfigurationen markiert (Abb. 6).

Mit einer Digitalkamera wurde das zu vermessende Objekt zunächst aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen und alle relevanten Objektbereiche erfasst. Anschließend wurden die digitalen Messbilder im Auswerterechner verarbeitet und die 3D-Koordinaten der Geometriepunkte berechnet. Die diskreten Messwerte wurden in der Auswertung zu Darstellungszwecken auf die gesamte Flanschgeometrie interpoliert. Die Abweichungen von der mittleren Flanschenebene betragen bis zu 3 mm.

Mit den photogrammetrisch gemessenen Imperfektionen wurden Messwerte gewonnen, die einer Finite-Elemente-Modellierung unterworfen wurden. Hiermit ließen sich Schraubenkräfte unter Berücksichtigung der gemessenen Imperfektionen berechnen und den Resultaten einer Berechnung mit perfekter Flanschgeometrie gegenüberstellen. Die Berechnungsergebnisse lassen erkennen, dass die Berücksichtigung realistischer Imperfektionen der Geometrie von Flanschverbindungen zu einer Erhö-



Abb. 6: Signalisierte Stahlflanschverbindung.

hung der Kräfteschwankungen und damit zu einer merklich geringeren rechnerischen Lebensdauer führen kann.

#### 2.4 3D-Vermessung zur Herstellung von Fenstern für Luxusyachten

Die Herstellung von Fenstern für Luxusyachten stellt an die Fertigung höchste Ansprüche, da die Glasscheiben um mehrere Achsen mit wechselnden Radien gebogen sind. Zur Vermessung der Form und der Abmessungen von Fensterrahmen und Relingen hat sich das mobile 3D-Industriemesssystem DPA-Pro bewährt (Abb. 7). Die früher verwendeten Messmethoden (Holzschablonen, Theodolitmesssystem) erwiesen sich für diesen Bereich als zu aufwendig und nicht in jedem Fall geeignet.

Zu vermessende Punkte werden am Objekt signalisiert, digital fotografiert und nach kurzer Auswertung stehen ihre 3D-Koordinaten zur Verfügung (Abb. 8). Durch die Verwendung von speziellen Adaptern lassen sich selbst schwierig zugängliche Punkte vermessen und die Arbeitszeit an Bord noch weiter reduzieren.



Abb. 7: Vermessung einer Reling.



Abb. 8: Ergebnis der Auswertung.

Mit diesem Verfahren können nicht nur die Fenster von Yacht-Neubauten vermessen werden, sondern auch Reparaturvermessungen durchgeführt werden. Hierbei ist die Mobilität des Systems von großem Vorteil. Die Vermessung und der Austausch von defekten Scheiben erfolgt nicht auf einer Werft, sondern kann weltweit in jedem Hafen, wo sich die Yacht gerade befindet, durchgeführt werden. Die Bewegungen, die das Schiff auf dem Wasser vollführt, haben auf diese Art der Vermessung keinen Einfluss.

### 2.5 Mobiles 3D-Messverfahren für den Busbau

Der Busbau ist geprägt von einer hohen Variantenvielfalt, häufigen Sonderwünschen der Kunden und einer sehr geringen Fertigungsautomatisierung. Eine automatisierte Prüfung der Einzelteile und Gesamtfahrzeuge im Rahmen der Qualitätssicherung ist auch wegen der Abmaße – bei Längen bis 15 m – schwierig (Abb. 9). Nur wenige Bauteile werden auf stationären Koordinatenmessgeräten geprüft. Häufig werden für qualitative Prüfungen in der Fertigungslinie Messbänder und Schablonen verwendet.

Bei der NEOMAN Bus GmbH in Salzgitter wird jetzt das 3D-Messsystem ProCam (Abb. 10; BÖSEMANN & SCHNEIDER 2001) der Fa. AICON eingesetzt. Das mobile Online-System wurde bisher vorwiegend im Pkw-Bereich verwendet und nun in einem EU-Projekt für die Omnibusfertigung optimiert. Gemeinsam mit dem Institut für Werkzeug-



Abb. 9: Busfertigung.



Abb. 10: ProCam Messsystem.

maschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig wurde das Projekt „Imbus“ (Inspection and Monitoring of Bus Manufacturing; HESSELBACH & OETZMANN 2000) durchgeführt, in dem diese Messtechnik an die besonderen Gegebenheiten der Busfertigung adaptiert wurde. Neben rein technischen Fragen war die Einbettung der neuen Technologie in die betrieblichen Abläufe ein bedeutender Aspekt.

Das System besteht aus einem Messtaster, mehreren tragbaren Referenzpanelen mit codierten Marken sowie einem Rechner für die Steuerung und Auswertung. Zum Zeitpunkt der Messung blickt die Kamera auf das zuvor eingemessene Referenzpunktfeld mit bekannten Koordinaten. Die mechanisch mit der Kamera verbundene Tastspitze berührt den gewünschten Objektpunkt (Abb. 11). Wird die Messung ausgelöst, nimmt die Kamera den in der jeweiligen Lage sichtbaren Teil des Referenzpunktfeldes auf.

Mittels räumlichem Rückwärtsschnitt werden die 3D-Koordinaten der Kamera zum Zeitpunkt der Messung bestimmt, mit denen dann ebenfalls der Ort der Tastspitze berechnet werden kann. Es sind alle Punkte messbar, von denen aus die Kamera einen Teil des Referenzfeldes einsehen kann. Durch Verlängerung der Tastspitze ist der Arbeitsbereich so erweiterbar, dass auch verdeckte Punkte am Objekt angetastet und gemessen werden können. Das Design des Tasters ist sehr robust, was die Einsatzmöglichkeiten in der Fertigungslinie verbessert. Ein entscheidender Vorteil für den Anwender gegenüber Prüfungen mit Schablone



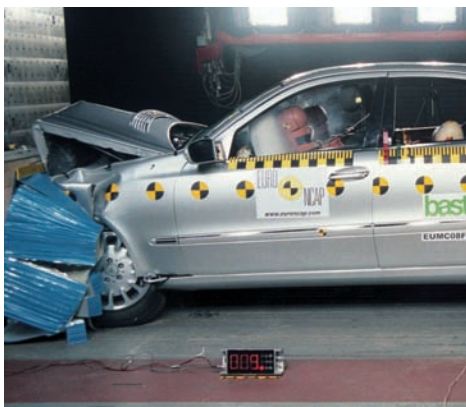
**Abb. 11:** Mobiler Messtaster.

oder Messband ist die direkte Abspeicherung und Auswertbarkeit von Messwerten aus der Produktionslinie.

Die Messdaten und Auswertungen werden über eine Intranet-Seite bereitgestellt, so dass die aktuellen Qualitätsinformationen ständig verfügbar sind. Mitarbeiter aus dem Qualitätsbereich, aber auch aus Konstruktion, Planung oder Fertigung bekommen damit die Möglichkeit, sich mit sehr wenig Aufwand über die aktuelle Fertigungsqualität zu informieren.

## 2.6 3D-Vermessung von Crashfahrzeugen

Beim Kauf eines Neufahrzeugs ist das Sicherheitspaket, das der Hersteller dem Käufer bietet, ein Entscheidungsfaktor von zunehmender Bedeutung. Deshalb haben sich in Europa Automobilverbände, einige europäische Regierungen und weitere Verbraucherorganisationen zum EURO NCAP (EURO New Car Assessment Programme)



**Abb. 12:** Frontalcrash.

zusammengeschlossen. Sie setzen einheitliche Verfahren für die Durchführung von Crashtests durch und liefern jetzt normierte und detaillierte Informationen über die Qualität des Insassenschutzes.

Wesentliche Erkenntnisgrundlage bei der Auswertung von Crashversuchen ist die crashbedingte geometrische Veränderung des Versuchsfahrzeugs. Eine genaue 3D-Vermessung vor und nach dem Crash liefert die für die Beurteilung erforderlichen Messwerte, mit denen dann Aussagen gemacht werden können, wie das Verletzungsrisiko der Insassen minimiert werden kann. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an das Messsystem.

Um eine geometrische 3D-Vermessung möglichst schnell und wirtschaftlich durchführen zu können, müssen folgende Anforderungen von dem Messsystem erfüllt werden:

- Ausreichende Messgenauigkeit
- Minimale Rüstzeiten
- Schneller Messdurchlauf und kurze Messzeiten für ca. 80 Punkte am und im Fahrzeug
- Geringe Anschaffungs- und Unterhaltungskosten

Der Vergleich verschiedener Messsysteme bei einem großen Automobilhersteller hat gezeigt, dass das ProCam System die hohen Anforderungen an einen modernen Messplatz erfüllt (Abb. 13). Nach der erstmaligen





**Abb. 13:** ProCam Messzelle.

Installation benötigt es für die Einzelmessungen keine Rüstzeiten. Alle erforderlichen Messpunkte, die z.T. unterhalb oder im Inneren des Fahrzeuges liegen, lassen sich in einem Durchgang ohne Unterbrechung direkt messen. Die geforderten Messgenauigkeiten werden problemlos erreicht – und das bei einer großen Zeitersparnis gegenüber den bisherigen Messverfahren.

### 2.7 On-line Positionierung von Dummies im Crashversuch

Bei einem Crashversuch kommt es darauf an, dass der Dummy in seiner Lage und Sitzposition so im Fahrzeug positioniert ist, wie es die jeweiligen nationalen Vorschriften, auf deren Grundlage der Versuch durchgeführt wird, erfordern. Mit einem photogrammetrischen Online-System steht eine optische 3D-Positioniermöglichkeit zur Verfügung, die eine online Ausrichtung von Dummies im Fahrzeugkoordinatensystem ermöglicht (Abb. 14). Das Messsystem für die Dummypositionierung erfüllt folgende Anforderungen:

- Positionierung im Fahrzeugkoordinatensystem,
- Dokumentation des Ergebnisses in einem benutzerdefinierten Protokoll,
- Möglichkeit zur Erfassung von Zusatzmaßen,



**Abb. 14:** Online Dummypositionierung.

- Datenbank für alle Informationen über die immer wiederkehrenden Versuchsbedingungen (Fahrzeugtyp, Dummy, nationale Vorschriften, Sitzstellung) und
- einfache Handhabung für eine zügige Positionierung.

Für die Ausrichtung des Dummies sind im Wesentlichen drei Arbeitsschritte erforderlich:

#### *Schritt 1: Vorbereitung*

Zur Vorbereitung der Dummypositionierung werden auf der jeweiligen Fahrzeugseite Bezugspunkte signalisiert, deren Koordinaten im Fahrzeugkoordinatensystem vorliegen. Nach Aufstellen und Inbetriebnahme des Online-Systems wird kontinuierlich eine Transformation ins Fahrzeugkoordinatensystem über die Hilfspunkte durchgeführt. Hierdurch werden Bewegungen des Fahrzeugs, wie sie z. B. durch das Hineinsetzen des Dummies entstehen können, laufend kompensiert.



*Schritt 2: Dummypositionierung*

Die aktuelle Position des Dummys wird über Messpunkte, die auf dem Dummy angebracht sind, erfasst und mit der Solllage verglichen. Mit Hilfe eines Softwaremoduls wird nach Auswahl der Versuchsanordnung aus der Datenbank der aktuelle Sitz des Dummys laufend in einer Koordinatentabelle oder als Grafik angezeigt.

*Schritt 3: Zusatzmessungen, Protokoll*

Mit einem Messtaster können noch Zusatzkoordinaten bzw. -strecken gemessen werden. Abschließend wird ein Messprotokoll erstellt.

**3 Zusammenfassung und Ausblick**

WESTER-EBBINGHAUS hat mit seinen grundlegenden Entwicklungen wesentliche Voraussetzungen für die moderne Industriephotogrammetrie geschaffen; deren vielfältige Umsetzung in Systeme und Anwendungen zu erleben und mitzugestalten war ihm leider nicht mehr vergönnt. Heute stehen digitale Offline- und Online-Systeme mit hochauflösenden Sensoren, ausgereifter Bildverarbeitung und robusten Auswertalgorithmen hoher Automation sowie umfangreiche Möglichkeiten zur Datennachbearbeitung zur Verfügung. Eine hohe Anzahl unterschiedlichster Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik, dem Automobil-, Schiff- und Waggonbau, dem Tunnel- und Anlagenbau, der Crashvermessung und Robotersteuerung – um nur einige Bereiche zu nennen – dokumentieren die große Flexibilität und das Leistungsvermögen der Industriephotogrammetrie. Da ein vollständiger Überblick über die Vielzahl der Anwendungen hier nicht gegeben werden kann, sei ergänzend auf ein Buch mit über 70 Anwendungen, zum großen Teil aus der industriellen Messtechnik, hingewiesen (LUHMANN 2002).

Bei aller Zufriedenheit über die erfolgreichen Anwendungen soll nicht verschwiegen werden, dass die Industriephotogrammetrie gegenüber der konventionellen 3D-Koordinatenmesstechnik immer noch sehr geringe

Marktanteile aufweist. Hohe Genauigkeiten sind nach wie vor nur mit Marken und Adaptionen zu erreichen. Berührungslose 3D-Bildmesstechnik ruft auch nach mehr als 10 Jahren Einsatz noch häufig Berührungsängste in der Welt des Maschinenbaus hervor. Die neue VDI/VDE Richtlinie 2634 (VDI/VDE 2002) zur Abnahme und Überprüfung von optischen 3D-Messsystemen lässt jedoch hier auf Änderung hoffen.

**Literatur**

- BÖSEMANN, W. & SCHNEIDER, C.-T., 2001: Online 3D measurement using inverse photogrammetry. – In: Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, Proc. SPIE, **4309**: 288–293.
- BUCHER, C. & EBERT, M., 2000: Nichtlineare Berechnung von Stahlflanschverbindungen mit gemessenen Imperfektionen. – Stahlbau, 71. Jg., H. 7: 516–522.
- DOLD, J. & RIECHMANN, W., 1989: LFC und RS1; ein hochgenaues Industriemesssystem. – In: KAHMEN, H. & GRÜN, A. (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques. – pp. 229–240, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- HESSELBACH, J. & OETZMANN, A., 2000: Moderne 3D-Messverfahren für den Busbau. – VDI Z., Mitgliederausgabe der VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Heft 9/10, 2002, Springer VDI Verlag.
- LUHMANN, T. (Hrsg.), 2002: Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis. – 318 S., Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- SCHNEIDER, C.-T., 1996: DPA-WIN – A PC based digital photogrammetric station for fast and flexible on-site measurement. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **31/B5**: 530–533.
- SCHREDL, J. & WENG, T., 2003: Photogrammetrie als Messmittel bei Eurocopter. – GESA Symposium 2003, VDI-Berichte **1757**: 205–211, Düsseldorf.
- VDI/VDE, 2002: Optische 3-D Messsysteme. – VDI/VDE Richtlinie 2634, Beuth Verlag, Berlin.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1981: Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichsphotogrammetrie. – Dissertation, Universität Bonn.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1984: Optoelektrische Festkörper-Flächensensoren im photogrammetrischen Abbildungssystem. – Bildmessung und Luftbildwesen, **1984** (6): 297–301.

WESTER-EBBINGHAUS, W., 1985: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. – Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3: 101–111.

WESTER-EBBINGHAUS, W., 1986: Analytische Kamerakalibrierung. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **26** (5): 77–84.

Anschriften der Autoren:

Dr.-Ing. WERNER BÖSEMANN  
AICON 3D Systems GmbH  
D-38114 Braunschweig  
e-mail: werner.boesemann@aicon.de

Dr.-Ing. VOLKER UFFENKAMP  
Robert Bosch GmbH  
Fahrerassistenz-Systeme  
Videosensorik  
D-71229 Leonberg  
e-mail: volker.uffenkamp@de.bosch.com

Manuskript eingereicht: September 2003

Angenommen: Oktober 2003