

# Photogrammetrische Verfahren in der industriellen Messtechnik

THOMAS LUHMANN<sup>1</sup>

*Photogrammetrische Verfahren und Systeme zur dreidimensionalen industriellen Messtechnik haben in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Die Gründe dafür liegen im Fortschritt der digitalen Bilderfassung und Bildverarbeitung, die zu gesteigerten Messgenauigkeiten, höherem Automationsgrad, schnellem und geschlossenem Datenfluss und leichter Bedienbarkeit geführt haben. Die in der Praxis eingesetzten Systeme lassen sich einerseits in mobile, flexible Online- und Offline-Systeme, andererseits in stationäre, prozessintegrierte Systeme unterscheiden. In den meisten Fällen steht die Erfassung einzelner 3D-Punktkoordinaten im Vordergrund, häufig durch diskrete Punktsignalisierungen unterstützt. Vermehrt kommen aber auch Oberflächenmesssysteme zum Einsatz, die in der Regel auf der Basis von projizierten Streifen- oder Flächenmustern arbeiten. Die Anwendungsgebiete der Industriephotogrammetrie reichen von hochgenauen Qualitätskontrollen im Flugzeugbau über integrierte Systeme in Fertigungsanlagen bis zur Aufnahme und Dokumentation von Industrieanlagen. Mit der Erarbeitung einheitlicher Empfehlungen für die Abnahme und Überwachung optischer 3D-Messsysteme ist die Grundlage für objektive und nachvollziehbare Genauigkeitsangaben gelegt worden.*

*Abstract: Photogrammetric methods and systems have raised more attention in three-dimensional industrial metrology. Main reasons can be identified in the progress of digital image acquisition and processing leading to increased accuracy, higher degrees of automation, fast and closed data flow, and easier to use systems. Photogrammetric systems used in practice can be distinguished in mobile, flexible on-line and off-line systems, and in stationary systems integrated in manufacturing processes. In most cases the measurement of single 3-D point co-ordinates is of major importance, often supported by discrete point targeting. An increased use can be observed for surface measurement systems, normally based on the projection of fringe or area type patterns. Applications in industrial photogrammetry vary from high accuracy quality control in aerospace industry, integrated systems in production environments towards the reconstruction and as-built documentation of industrial sites. Standardised recommendations for acceptance and re-verification tests of optical 3-D measuring systems yield to a basis for objective and comparable accuracy quantities.*

## 1. Einführung

### 2.1 Geschichtlicher Rückblick

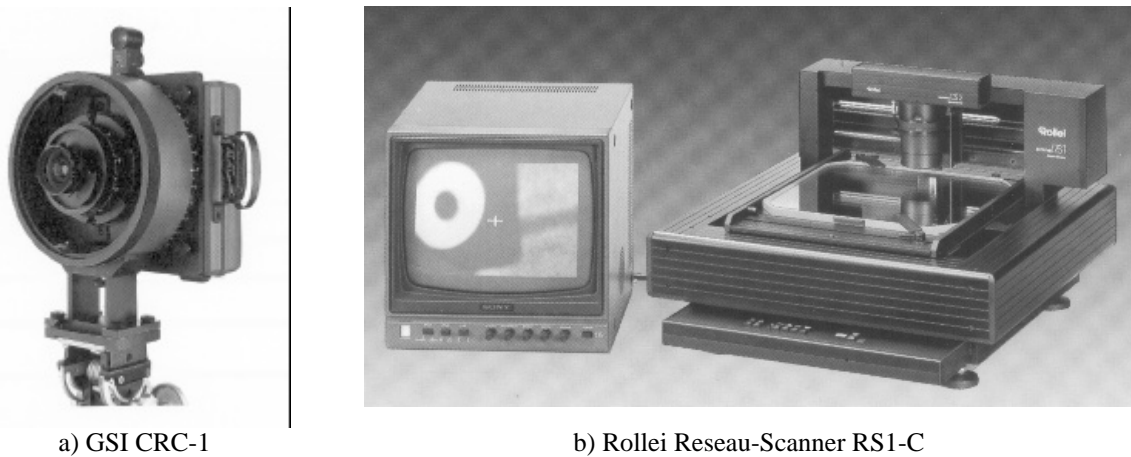
Der industrielle Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie begann, von Einzelanwendungen abgesehen, Anfang der achtziger Jahre. Im Mittelpunkt der Entwicklung standen zum Einen Verfahren zur Orientierung und Kalibrierung von beliebigen (konvergenten) Bildverbänden durch Bündeltriangulation. Im Gegensatz zur Aerotriangulation in der Luftbildphotogrammetrie erfordern Bündelausgleichungsprogramme für Nahbereichsanwendungen

---

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg; luhmann@fh-oldenburg.de

die Integration zusätzlicher (geodätischer) Beobachtungen, Ansätze zur Selbstkalibrierung verschiedenster Aufnahmekameras, Verarbeitung in beliebig gelagerten Objektkoordinatensystemen sowie automatisierte Verfahren zur Berechnung von Näherungswerten in komplexen Aufnahmeconfigurationen. Grundlegende Arbeiten und operationelle Programmsysteme wurden u.a. durch Kruck (BINGO, 1983), Wester-Ebbinghaus (MOR, 1985), Fraser und Brown (STARS, 1986) und Hinsken (CAP, 1989) entwickelt.

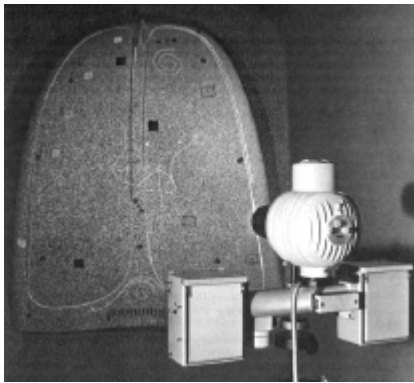
Zum Anderen wurden analoge Aufnahme- und Bildmessgeräte entwickelt, die eine hochgenaue Bilderfassung und Punktmessung erlaubten. Hier sind zunächst Entwicklungen durch Geodetic Services (GSI) zu nennen, die mit großformatigen Messkameras (CRC-1, CRC-2, Abb. 1a) und einem zugehörigen digitalen Präzisionskomparator (AutoSet-1) ein Gesamtsystem auf den Markt brachten, das vor allem in hochgenauen Fragestellungen der Luft- und Raumfahrtindustrie zum Einsatz kam (Fraser & Brown 1986). Mit (inneren) Messgenauigkeiten von bis zu 1:500.000 trat diese Technologie in Konkurrenz zu Theodolitmesssystemen, die bis dahin als einzige praktikable Lösung zur 3D-Vermessung großer Objekte zur Verfügung standen (Staiger 1992).



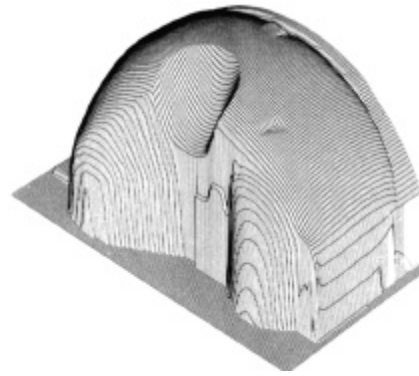
**Abb. 1: Analoge Großformatkamera und Präzisionsscanner**

Aufbauend auf den Arbeiten von Wester-Ebbinghaus brachte die Firma Rollei mit der Rolleiflex SLX, später der Rolleiflex 6006/6008 einen photogrammetrische Reseaukamera auf den Markt, die hinsichtlich Flexibilität und Handhabung bisherigen Messkamern weit überlegen war. Der Einsatz eines Reseaus zur Definition und numerischen Rekonstruktion einer ebenen Bildfläche ließ es zu, auch handelsübliche Photokameras für messtechnische Zwecke einzusetzen. Mit der Großformatkamera Rollei LFC und dem Präzisionskomparator (Reseau-Scanner, Abb. 1b) Rollei RS1 wurde der gerätetechnische Höhepunkt der Reseautchnik erreicht (Luhmann & Wester-Ebbinghaus 1987, Dold 1997).

Mit der Entwicklung digitaler Bildverarbeitungsverfahren wurden Automationsgrad und Genauigkeit der Punktmessung und Bildzuordnung erheblich gesteigert. Hier sind zum Einen Methoden zur hochgenauen Messung kreuz- und ellipsenförmiger Zielmarken zu nennen (Luhmann 1986), zum Anderen entstanden Verfahren zur bild- und objektbasierten Stereo- und Mehrbildzuordnung auf der Basis Kleinster-Quadrate-Lösungen (u.a. Förstner 1985, Grün 1985, Baltsavias 1991, Heipke 1991, Schneider 1991). In der industriellen Anwendung wurde mit dem System Zeiss InduSURF das erste operationelle Oberflächenmesssystem etabliert (Schewe 1984, Abb. 2).



a) GSI CRC-1



b) Rollei Reseau-Scanner RS1-C

**Abb. 2: Oberflächenmesssystem Zeiss InduSURF**

Die seit Mitte der achtziger Jahre verfügbare optoelektronische Aufnahmetechnik war hinsichtlich Auflösung und Bildqualität noch stark eingeschränkt. Mit der Entwicklung spezieller Scanning-Kameras wurde zwischenzeitlich die Möglichkeit zur hochauflösenden Bilderfassung geschaffen, z.B. mit dem Prinzip des Micro-Scannings (ProgRes 3012, 4608 x 3480 Pixel, Lenz 1990), des Reseau-Scannings (Rollei RSC, 4500 x 4500 Pixel, Riechmann 1990) oder des Macro-Scannings (Zeiss UMK HighScan, 15000 x 11000 Pixel, Kludas 1995). Diese Entwicklungen haben sich auf Grund der notwendigen stationären Objektaufnahme, langer Bilderfassungszeiten und ungünstigem Preis-Leistungs-Verhältnis nur vorübergehend in praktischen industriellen Anwendungen behaupten können.

Ein wesentlicher technischer Durchbruch wurde mit der Entwicklung sogenannter Still-Video-Kameras erreicht. Die mit einer Pixelauflösung von 1500 x 1000 Pixel und in der Kamera integrierter Datenspeicherung ausgestattete Spiegelreflexkamera Kodak DCS 420 führte zum vermehrten Einsatz von photogrammetrischen Offline-Systemen. Diese erlauben die schnelle digitale Bilderfassung "aus der Hand", die unmittelbare Weiterverarbeitung der Bilder auf (tragbaren) PCs und erfüllten somit die Forderung nach schneller, automatisierter und genauer photogrammetrischer Punkterfassung (Beyer 1992).

## 2.2 Stand der Technik

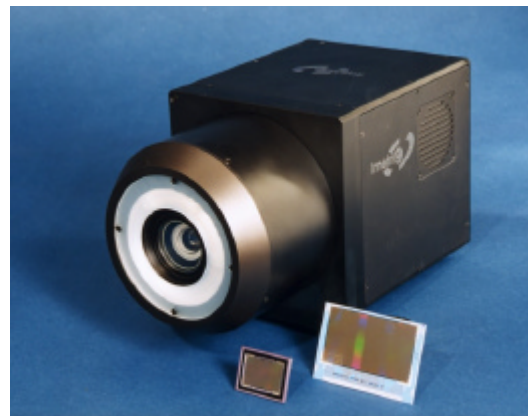
Mit der Digitalkamera Kodak DCS 460/660 (3000 x 2000 Pixel á 9µm x 9µm Größe, Abb. 3a) steht seit ca. 1995 eine hochauflösende Still-Video-Kamera zur Verfügung, die zu einer adäquaten Objektmessgenauigkeit in industriellen Anwendungen führt (Peipe 1995). Bei Verwendung kreisförmiger signalisierter Messmarken lassen sich Bildmessgenauigkeiten von besser als 1/20 Pixel erreichen entsprechend besser als 0,5µm. Bei hinreichender Aufnahmekonfiguration (siehe Abs. 3) lassen sich relative Messgenauigkeiten von 1:50.000 bis 1:100.000 erreichen. Höhere Messgenauigkeiten sind von höchstauflösenden Kameras zu erwarten, die für Spezialanwendungen eingesetzt werden (Imetric ICam 28, 7000 x 4000 Pixel, Abb. 3b)

Auf der Basis dieser oder ähnlicher Kameras werden heute Mehrbildauswertesysteme angeboten, die automatisierte, aber auch interaktive Bildmessungen zulassen und häufig eine direkte Schnittstelle zu CAD-Systemen oder anderen Programmen zur Weiterverarbeitung bieten (z.B. DPA-Win, Peipe et al. 1994, PHIDIAS-MS, Benning & Schwermann 1997). Diese Systeme werden häufig als Offline-Photogrammetrie-Systeme bezeichnet, da in der Regel zunächst eine sequentielle Bilderfassung erfolgt, während die eigentliche Bildauswertung und Objektrekonstruktion erst in einem nachgeschalteten Schritt geschieht. Mit der Entwicklung sog. intelligenter Kameras mit integriertem Rechner und Bildmessung

ist jedoch schon eine Zwischenstufe zum im Folgenden erläuterten Prinzip der Online-Photogrammetrie verfügbar (Leica/GSI INCA, Dold 1997).



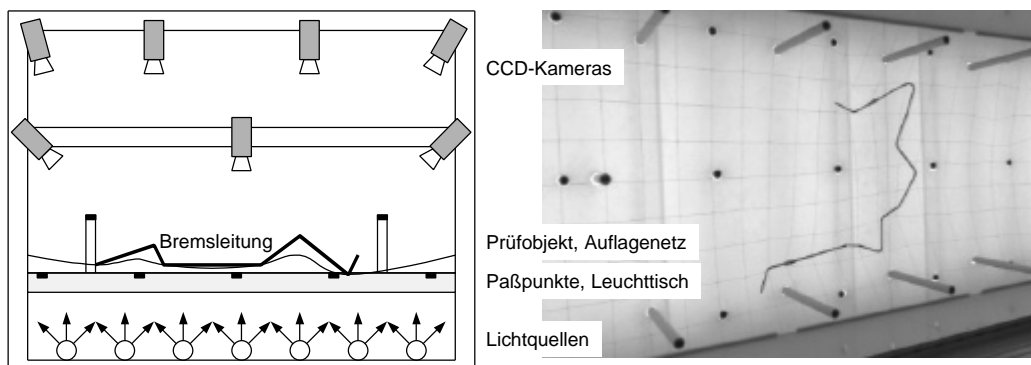
a) Kodak DCS Kameras



b) Imetric Icam 28

**Abb. 3: Digitale Aufnahmesysteme**

Werden mindestens zwei Kameras synchronisiert ausgelöst, die einen Bereich des Objektraumes gleichzeitig beobachten, ist die unmittelbare Berechnung von 3D-Informationen möglich, wenn die Parameter der inneren und äußeren Orientierung vorliegen. Auf dieser Grundlage werden Zwei- und Mehrkamerasysteme angeboten, die einen taktil antastenden Messstift und dessen Messpunktspitze durch Vorwärtseinschneiden im Raum erfassen (z.B. Metronor, Pettersen 1992, Abb. 5a). Der Taster kann auch selbst über integrierte Kameras verfügen, die sich mittels Rückwärtsschnitt an einem bekannten Punktfeld orientieren. Mehrkamera-Online-Systeme lassen sich auch für spezielle Messaufgaben konfigurieren, zum Beispiel für die integrierte Prozesskontrolle oder die Robotersteuerung (z.B. Messung von Bremsleitungen, Bösemann 1996, Abb. 4).



**Abb. 4: Mehrbild-Onlinesystem zur Messung von Bremsleitungen (AICON OLM)**

Der aktuelle Stand der digitalen Bilderfassung zeichnet sich durch einen extremen Preisverfall digitaler Fotoapparate aus, die für den Consumer-Markt entwickelt werden. Für den High-End-Bereich stehen hochauflösende Kameras mit 3000 x 2000 Pixel bis 4000 x 4000 Pixel zur Verfügung, in der Regel als Farbkameras ausgelegt. Während die verfügbare Pixelauflösung nur langsam steigt, werden die Kosten für hochauflösende Sensoren auch in näherer Zukunft noch deutlich sinken.

Weitere Übersichten zur Entwicklung der Nahbereichsphotogrammetrie sowie zu ihren mathematischen und technischen Grundlagen finden sich in Luhmann (2000), Atkinson (1996) und Dold (1997).

## 2. Photogrammetrische Industriemesssysteme

### 2.1 Systeme zur Punkterfassung

#### 2.1.1 Offline-Photogrammetrie

In industriellen Anwendungen geschieht die punktweise Erfassung von 3D-Koordinaten üblicherweise mit Hilfe signalisierter Zielmarken oder durch taktile Antastung. Für die Signalisierung haben sich helle, kreisförmige Marken durchgesetzt, die aus retro-reflektierendem Material, selbstleuchtend oder einfach auf Papier oder Folie gedruckt realisiert werden können. Werden diese Marken zusätzlich mit einem geeigneten maschinenlesbaren Code versehen, kann nicht nur das Punktzentrum sicher und genau bestimmt werden, sondern auch die Punktidentifizierung (Punktnummer) automatisch zugeordnet werden (siehe Abb. 5b). Signalisierte Punkte oder entsprechende mechanische Adapter sind so zu gestalten und zu verteilen, dass das eigentliche (möglicherweise nicht direkt messbare) Objekt durch diese Hilfsmittel hinreichend genau repräsentiert wird.

Ein typisches Offline-Photogrammetrie-System besteht aus einer hochauflösenden Digitalkamera (Still-Video-Kamera) mit integrierter Datenspeicherung (Memory-Karten, Mini-Festplatten). Die Datenverarbeitung geschieht in einem (tragbaren) Rechner, der über eine entsprechende Schnittstelle zum Bildspeichermedium verfügt (z.B. SCSI, PCMCIA, USB). Die Bildauswertung und 3D-Punktbestimmung läuft typischerweise in folgenden Schritten ab:

#### 1. Bildpunktmessung

Sämtliche Bilder werden automatisch nach punktförmigen Mustern durchsucht, die Kandidaten für tatsächlich signalisierte Punkte darstellen. Wenn Punktcodierungen erkannt werden, werden die gemessenen Bildpunkte mit ihrer zugehörigen Nummer abgespeichert, sonst werden sie fortlaufend nummeriert abgelegt.

#### 2. Näherungswertberechnung

Die über ihren Punktcode identifizierten Bildpunkte werden bildübergreifend zugeordnet. Liegen für ein beliebiges Bildpaar mindestens fünf homologe Punkte vor, kann mittels relativer Orientierung ein Modellsystem erzeugt werden, in dem alle weiteren Bildpunkte unter Zuhilfenahme der Epipolargeometrie zugeordnet werden können. Weitere Bilder oder Modelle können an dieses Startbildpaar angehängt werden, bis alle Bilder näherungsweise orientiert sind. Werden an Hand der Punktcodierungen bekannte Passpunkte identifiziert, kann das lokale Modellsystem in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem transformiert werden. Auf diese Weise können sukzessiv alle Bilder näherungsweise orientiert und alle gemessenen Bildpunkte näherungsweise im Raum bestimmt werden.

#### 3. Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung

Die folgende Bündelausgleichung liefert neben den äußeren Orientierungsdaten und den ausgeglichenen Objektkoordinaten auch die Parameter der inneren Orientierung, so dass bei geeigneter Aufnahmeconfiguration der geometrische Zustand der Aufnahmekamera für den Zeitpunkt der Objektmessung simultan mitbestimmt werden kann. Eine besondere Problematik liegt in der Erkennung und Eliminierung grober Fehler (Ausreißer), die durch Fehler in der Bildmessung oder Identifizierung und Zuordnung auftreten können.

#### 4. Ergebnisausgabe

Die gemessenen Objektpunkte können in beliebiger Weise weiterverarbeitet werden. Üblich sind die direkte Integration photogrammetrischer Auswertesysteme in 3D-CAD-Systeme oder die Anbindung an Systeme für den Soll-Ist-Vergleich.

### 2.1.2 Online-Photogrammetrie

Online-Systeme basieren auf der simultanen, synchronisierten Mehrbilderfassung des Objektraumes. Eine weitere Verbreitung haben besonders taktile photogrammetrische Koordinatenmesssysteme erlangt. Hierbei wird ein Messtaster, in der Regel manuell, an die Objektoberfläche geführt (Abb. 5a). Üblicherweise besteht der Taster aus einer hochgenauen Tastspitze und mindestens drei Referenzmarken, die von den Kameras beobachtet werden können. Durch Starten der Messung am Taster werden die Kameras ausgelöst. Mittels räumlichen Vorwärtsschnitt werden die 3D-Koordinaten der Referenzpunkte am Taster bestimmt und damit die in diesem lokalen System kalibrierte Position der Tastspitze.



a) Metronor



b) AICON ProCam3

**Abb. 5: Taktile Online-Messsysteme**

Der Messablauf sieht typischerweise folgendermaßen aus:

#### 1. Vorabkalibrierung

Aufgrund der eingeschränkten Aufnahmeanordnung ist keine Simultankalibrierung der Kameras möglich. Sie müssen also vorab kalibriert werden, zum Beispiel mit Hilfe eines geeigneten Testfeldes. Die ermittelten Daten der inneren Orientierung werden für die Messungen als konstant vorausgesetzt.

#### 2. Orientierung der Kameras

Nach dem Aufstellen der (beiden) Kameras erfolgt die gegenseitige Orientierung über einem signalisierten Punktfeld. Damit wird ein lokales Gerätekoordinatensystem erzeugt.

#### 3. Taktile Messung

Es folgt die (manuelle) taktile Objektmessung analog zu taktilen Koordinatenmessgeräten.

#### 4. Nachorientierung

Einige Systemhersteller erlauben die ständige Nachorientierung der Kameras an dem festen Punktfeld (siehe Punkt 2), um etwaige Veränderungen der Kamerapositionen und Aufnahmerichtungen zu ermitteln.

## 5. Ergebnisausgabe

Ein taktiles Online-Photogrammetrie-System kann als optische Koordinatenmessmaschine aufgefasst werden, deren Ergebnisse sofort nach der Antastung vorliegen und weiterverarbeitet werden können.

Der hier beschriebene Messablauf vereinfacht sich noch erheblich, wenn die Kameras fest in einem gemeinsamen Gehäuse angeordnet und dauerhaft orientiert sind, wie man es im Prinzip von älteren Stereomesskameras kennt. Solche Systeme werden vielfach in der Medizintechnik, aber zunehmend auch in der industriellen Messtechnik eingesetzt (z.B. NDI Polaris).

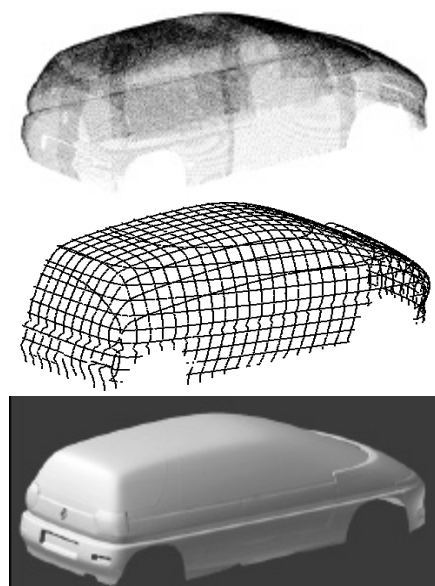
Neben dem oben erwähnten Online-Messprinzip existiert mit dem AICON Procam3 System eine Variante, bei der die Messkameras im handgeführten Taster selbst untergebracht sind (Abb. 5b). Mit Hilfe eines in der Nähe platzierten Referenzpunktfeld, das über koordinatenmäßig bekannte und codierte Zielmarken verfügt, kann die Kameraorientierung automatisch ermittelt werden und die dazu kalibrierte Tastspitze im Raum bestimmt werden (Sinnreich & Bösemann 1999).

## 2.2 Systeme zur Oberflächenerfassung

Für die Erfassung beliebig geformter industrieller Oberflächen ist häufig keine Signalisierung mit diskreten Punkten möglich oder sinnvoll. Für die Messung von Freiformoberflächen haben sich in jüngerer Zeit vor allem Streifenprojektionssysteme durchgesetzt. Dabei werden streifenförmige periodische Muster auf die Objektoberfläche projiziert, die sequentiell verschoben werden und durch eine oder mehrere räumlich versetzte Kameras beobachtet werden. Die aus der Höhenänderung am Objekt resultierende Phasenverschiebung des wellenförmigen Streifenmusters erlaubt die direkte und schnelle Erfassung der Oberflächenform, und zwar für jedes Pixel der Kamera innerhalb weniger Sekunden (Breuckmann 1993).



a) GOM ATOS

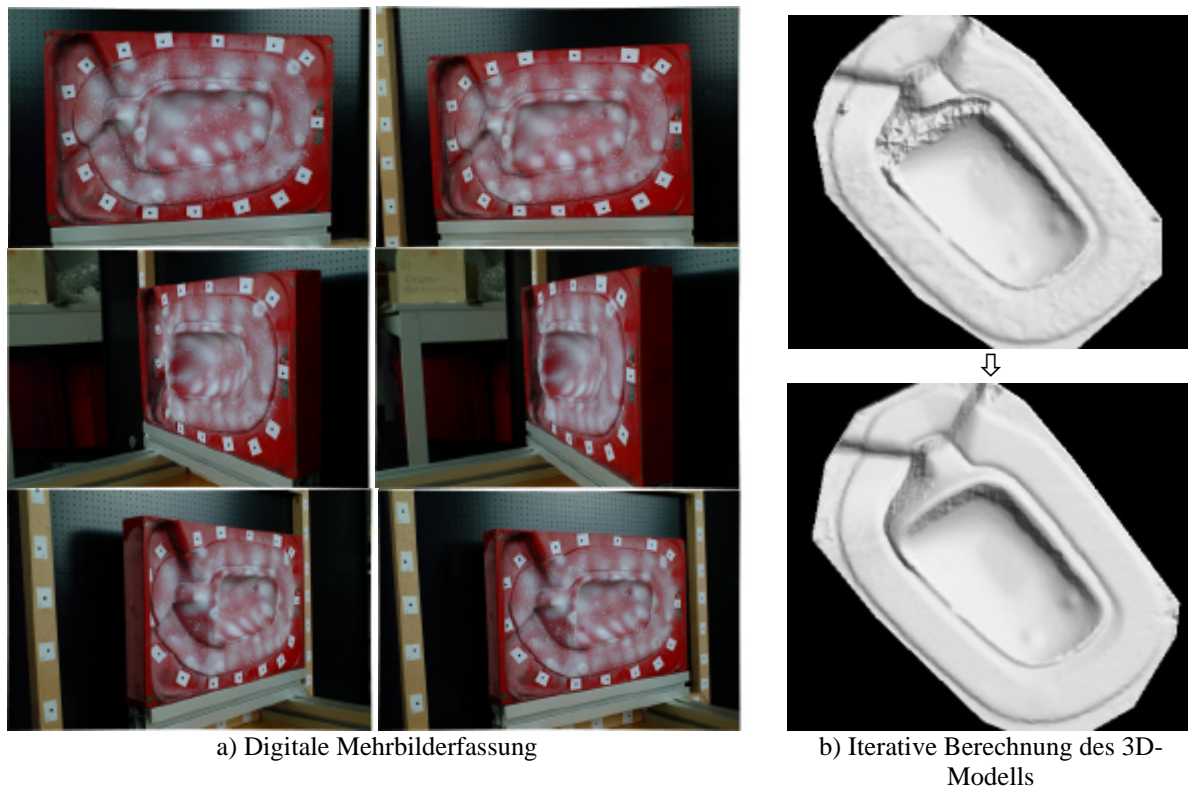


b) Aufnahme eines Designmodells

**Abb. 6: Photogrammetrisches Streifenprojektionssystem**

Größere oder komplexer geformte Oberflächen können mit der Streifenprojektionstechnik nur in mehreren Teilansichten erfasst werden. Dazu wird das Aufnahmesystem mittels signalisierter Punkte photogrammetrisch im Raum orientiert, so dass die erfassten 3D-Punktwolken absolut aufeinander transformiert werden können. Auf diese Weise können beispielsweise ganze Automobilkarosserien gemessen werden (Winter & Reich 1997).

Die rein photogrammetrische Oberflächenerfassung erfolgt entweder klassisch stereoskopisch oder durch Mehrbildzuordnung. In beiden Fällen muss die Objektoberfläche ausreichend strukturiert sein, entweder durch die natürlich vorhandene Oberflächentextur oder durch Projektion eines künstlichen Musters. Die Zuordnung homologer Bildbereiche geschieht bei automatischen Messverfahren durch Verfahren der Bildkorrelation oder Kleinsten-Quadrate-Zuordnung, ebenfalls wieder unter Berücksichtigung der Epipolargeometrie. Digitale Stereoauswertesysteme, die in der Regel für die Luftbildphotogrammetrie konzipiert worden sind, können mit wenigen Einschränkungen auch für die Oberflächenerfassung im Nahbereich eingesetzt werden (Beispiel in Abb. 7).



**Abb. 7: Photogrammetrische Oberflächenerfassung**

Ein weiter gehender Ansatz ist die objektbasierte Mehrbildzuordnung. Hierbei wird das Objekt durch einen praktisch beliebigen Mehrbildverband aufgenommen. Die Objektrekonstruktion erfolgt in der Weise, dass neben dem geometrischen 3D-Modell der Oberfläche auch ein radiometrisches Modell (Intensitätsmodell) berechnet wird. Sind der gesamte optische Abbildungsvorgang einschließlich der Beleuchtungs- und Reflexionseigenschaften bekannt, so können aus diesem (idealen) Objektmodell die Grauwerte in den beteiligten Bildern berechnet werden. Aus der Differenz zwischen tatsächlichen Grauwerten und dem berechneten Grauwerten kann das geometrische und radiometrische Oberflächenmodell durch eine iterative Kleinste-Quadrate-Ausgleichung bestimmt werden (Wrobel 1987, Heipke 1991, Schneider 1991).



### 3. Genauigkeitskriterien

Die erreichbare Genauigkeit ist ein wesentliches Kriterium für die Nutzbarkeit und Akzeptanz eines photogrammetrischen oder optischen 3D-Messsystems in der industriellen Praxis. Im Gegensatz zu anderen Kenngrößen eines Systems wie technische Ausführung, Messzeiten, Bedienerfreundlichkeit, Flexibilität usw. liegt mit der Messgenauigkeit eine einzige quantitative Größe vor, die zur Beurteilung des Messsystems herangezogen werden kann.

Die traditionelle photogrammetrische oder geodätische Betrachtungsweise der erreichten Messgenauigkeit basiert auf inneren numerischen oder statistischen Kenngrößen wie der Standardabweichung der Gewichtseinheit oder der Standardabweichung der einzelnen berechneten Punktkoordinaten. Sie spiegeln jedoch lediglich die numerische Genauigkeit wieder, mit der das eingegebene mathematische Modell die tatsächlich beobachteten Messwerte auf die gesuchten Unbekannten abbildet. Diese Vorgehensweise prüft zwar durchgreifend die innere Genauigkeit und Zuverlässigkeit, nicht aber die tatsächlich im Objektraum erreichte Messunsicherheit im Bezug zu übergeordnet genau gegebenen Referenzen.

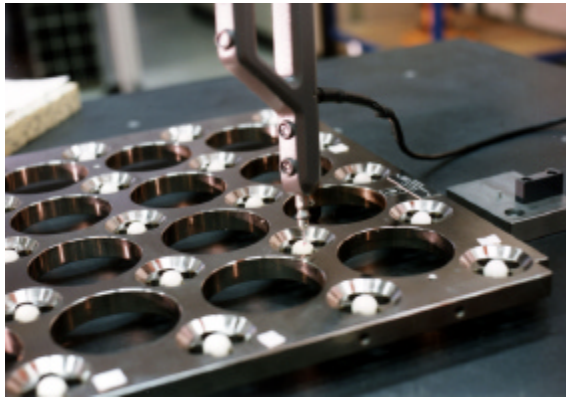
Für eine grobe a priori Abschätzung der erreichbaren Punktgenauigkeit wird in der Regel folgende Beziehung eingesetzt:

$$s_{XYZ} = q \cdot m_b \cdot s_{x'y'}$$

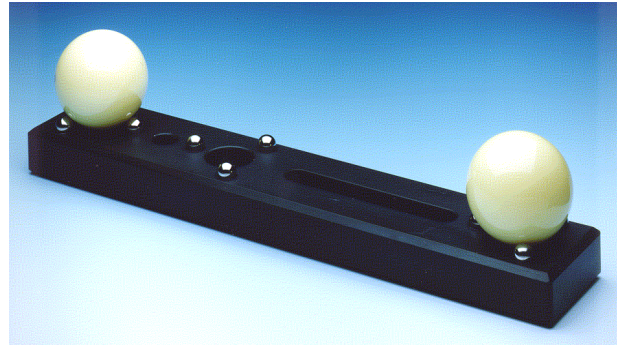
Dabei wird die Unsicherheit der Bildpunktmessung  $s_{x'y'}$  mit dem Abbildungsmaßstab  $m_b$  in den Objektraum  $S_{XYZ}$  übertragen. Der Designfaktor  $q$  beschreibt den Einfluss der Aufnahmeconfiguration, also die Anordnung der einzelnen Bilder, die zur Punktbestimmung beitragen, sowie weiterer nicht exakt formulierbarer Einflüsse. Für gut konfigurierte Mehrbildverbände (min. 4-6 konvergente Bilder pro Punkt) lässt sich ein Designfaktor zwischen 0,4 und 0,8 erreichen, gültig für alle drei Koordinatenrichtungen. Für Objektpunkte, die mit weniger oder ungünstiger angeordneten Bildern erfasst werden oder für klassische Stereoanordnungen kann der Designfaktor leicht Werte von größer als 2 annehmen, z.B. in Aufnahmerichtung ausgedrückt durch das Höhen-Basis-Verhältnis im Stereofall.

Zur Verifizierung der tatsächlich erreichten Messunsicherheit im Objektraum sind mit übergeordneter Genauigkeit kalibrierte Referenzen erforderlich. Grundsätzlich könnte dies durch geeignet gemessene Passpunkte geschehen, die als unabhängige Vergleichspunkte in der Punktbestimmung verwendet werden. Häufig ist es jedoch nicht möglich, zuverlässige und mit übergeordneter Genauigkeit vorliegende Passpunkte bereit zu stellen.

Geeigneter sind kalibrierte Maßstäbe, die als Prüflängen für die Ermittlung einer Längenmessabweichung verwendet werden (Beispiele in Abb. 8). In der vor kurzem verabschiedeten Richtlinie VDI/VDE 2634 "Optische 3D-Messsysteme" werden dazu Empfehlungen gegeben, wie geeignete Kenngrößen für punktförmig und flächenhaft antastende Systeme ermittelt werden können und die Rückführbarkeit auf die Einheit Meter gewährleistet wird (VDI 2000).



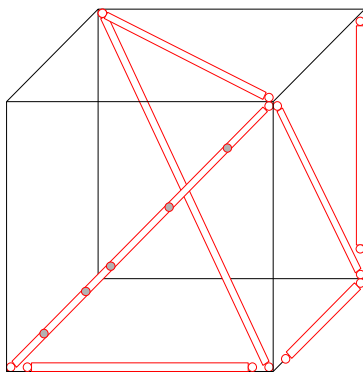
Kugelplatte



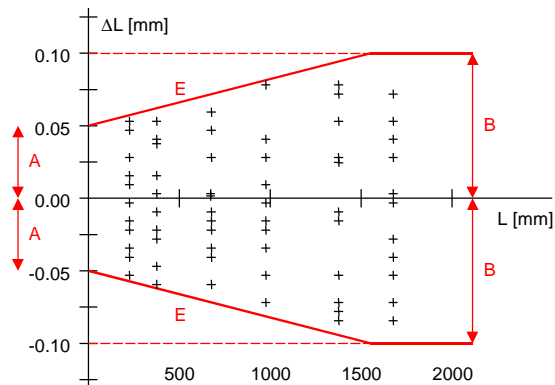
Kugelstab mit abnehmbaren Kugeln

**Abb. 8: Beispiele für Längenprüfkörper**

Aus den Differenzen gemessener Längen zu ihren kalibrierten und zertifizierten Sollwerten kann ein Längenabweichungsdiagramm (Abb. 10) abgeleitet werden, das die oberen und unteren Grenzwerte darstellt, zwischen denen sämtliche Längenmessungen liegen. Die Anordnung der Prüflängen erfolgt dabei nach dem in Abb. 9 vorgeschlagenen Schema, das innerhalb eines praktikablen Messvolumens eine Anzahl von Prüfstrecken enthält, um in allen Koordinatenrichtungen repräsentative Genauigkeitsaussagen zu erhalten.



**Abb. 9: Anordnung der Messlinien im Messvolumen**



**Abb. 10: Diagramm der Längenmessabweichung**

Die daraus ableitbare Längenmessunsicherheit ist konform zu internationalen Normen und bietet Vergleichbarkeit mit entsprechenden Richtlinien aus der taktilen Koordinatenmesstechnik. Für Oberflächenmesssysteme wird neben der Längenmessunsicherheit auch die Ebenheitsmessabweichung und die Antastunsicherheit bestimmt (Luhmann & Wendt 2000).

## 4. Zusammenfassung

Die industrielle Nahbereichsphotogrammetrie hat in den letzten Jahren einen erheblichen Aufschwung erlebt. Ursachen sind die heute verfügbaren digitalen Aufnahmesensoren, leistungsfähige Algorithmen zur Bildmessung und Objektrekonstruktion sowie schnelle Rechnertechnik, die zu einem höheren Automationsgrad und damit leichter Bedienbarkeit photogrammetrischer Systeme geführt haben.

Der Einsatzschwerpunkt dieser Systeme liegt vor allem in der punktwisen Objekterfassung, entweder im Offline-Modus mit sequentieller Bildaufnahme und anschließender

Objektauswertung, oder im Online-Modus mit simultaner Bilderfassung und taktiler Objektantastung. Zunehmende Bedeutung erlangen photogrammetrische und optische Oberflächenmesssysteme, vor allem auf der Basis von Streifenprojektionsmethoden.

Mit der Erarbeitung einheitlicher Empfehlungen für die Abnahme und Überwachung optischer 3D-Messsysteme ist eine weitere Grundlage dafür gelegt, dass diese Technologie in der Praxis objektiv bewertet werden kann und damit langfristig zu einer höheren Akzeptanz in der industriellen Messtechnik führt.

## 5. Literatur

- Atkinson, K.B. (ed.) (1996): *Close-Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, Caithness, UK.
- Baltsavias, E. (1991): *Multiphoto geometrically constrained matching*. Dissertation, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 49.
- Benning, W., Schwermann, R. (1997): *PHIDIAS-MS – Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsanwendungen*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 1/1997, pp. 16-25.
- Beyer, H. (1992): *Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system*. Mitteilungen Nr. 51, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- Bösemann, W. (1996): *The optical tube measurement system OLM – photogrammetric methods used for industrial automation and process control*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, B5, pp. 55-58.
- Breuckmann, B. (1993): *Bildverarbeitung und optische Meßtechnik in der industriellen Praxis*. Franzis Verlag, München.
- Dold, J. (1997): *Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung*. Dissertation, Heft 54, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr, München.
- Dold, J. (1999): *Stand der Technik in der Industriephotogrammetrie*. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Heft 2, pp. 113-126.
- Förstner, W. (1985): *Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder*. 40. Photogrammetrische Woche, Stuttgart.
- Fraser, C.S., Brown, D.C. (1986): *Industrial photogrammetry – new developments and recent applications*. The Photogrammetric Record 12 (68).
- Gruen, A. (1985): *Adaptive least squares correlation – a powerful image matching technique*. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14 (3), pp. 175-187.
- Heipke, C. (1991): *Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 366.
- Hinsken, L. (1989): *CAP: Ein Programm zur kombinierten Bündelausgleichung auf Personalcomputern*. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 3/1989, pp. 92-95.
- Kludas, T. (1995): *Three-dimensional surface reconstruction with the Zeiss photogrammetric industrial measurement system InduSURF Digital* (in deutsch). Publikationen der DGPF, Band 3, Dresden 1994., pp. 127-133.

- Kruck, E. (1983): *Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalem Modell*. Dissertation, Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 128.
- Lenz, R. (1990): *Grundlagen der Videometrie, angewandt auf eine ultra-hochauflösende CCD-Farbkamera*. Technisches Messen 57, pp. 366-380.
- Luhmann, T. (1986): *Automatic point determination in a réseau scanning system*. Symposium ISPRS Commission V, Ottawa.
- Luhmann, T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie*. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Luhmann, T., Wendt, K. (2000): *Recommendations for an Acceptance and Verification Test of Optical 3-D Measurement Systems*. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33/5, p. 493-499, Amsterdam.
- Luhmann, T., Wester-Ebbinghaus, W. (1988): *Digital Image Processing by Means of Réseau-Scanning*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 5/1988.
- Peipe, J. (1995): *Photogrammetric investigation of a 3000 x 2000 pixel high-resolution still-video camera*. ISPRS Intercommission Workshop „From Pixels to Sequences“, Zürich.
- Peipe, J., Schneider, C.T., Sinnreich, K. (1994): *Performance of a PC based digital photogrammetric station*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part 5, pp. 304-309.
- Pettersen, H. (1992): *Metrology Norway System – An on-line industrial photogrammetry system*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 24, B5, pp. 43-49.
- Riechmann, W. (1990) : *The réseau-scanning camera – conception and first measurement results*. ISPRS Symposium Commission V, Zürich.
- Schewe, H. (1988): *Automatische photogrammetrische Karosserievermessung*. Bild-messung und Luftbildwesen, Heft 1/1988, pp. 16-24.
- Schneider, C.-T. (1991): *Objektgestützte Mehrbildzuordnung*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 375.
- Sinnreich, K., Bösemann, W. (1999): *Der mobile 3D-Meßtaster von AICON – ein neues System für die digitale Industrie-Photogrammetrie*. Publikation der DGPF, Band 7, München 1998.
- Staiger, R. (1992): *Automatische und dynamische Koordinatenmessung mit mobilen Sensorsystemen*. In Welsch et al. (ed.): „Geodätische Meßverfahren im Maschinenbau“. Schriftenreihe DVW, 1/1992, Wittwer Verlag, Stuttgart, pp. 81-96.
- VDI (2000): *Optische 3D-Messtechnik*. VDI/VDE-Richtlinie 2634, Blatt 1-2, Beuth Verlag, Berlin.
- Wester-Ebbinghaus, W. (1985): *Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen*. Zeitschrift für Vermessungswesen, 110 (3), pp. 101-111.
- Winter, D., Reich, C. (1997): *Video-3D-Digitalisierung komplexer Objekte mit frei beweglichen, topometrischen Sensoren*. DGZfP – VDI/VDA-GMA Fachtagung „Optische Formerfassung“, Langen, GMA-Bericht 30, pp. 119-127.
- Wrobel, B. (1987): *Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen*. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3/1987, pp. 93-101.