

## Messgenauigkeit und Kameramodellierung – Kernfragen der Industriephotogrammetrie

THOMAS LUHMANN, Oldenburg & ROBERT GODDING, Braunschweig

**Keywords:** close-range photogrammetry, camera calibration, accuracy, industrial applications

**Zusammenfassung:** Einhaltung und Nachweis der spezifizierten Messgenauigkeit gehören zu den wichtigsten Kriterien beim Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie im industriellen Umfeld. Der Beitrag fasst die wesentlichen Einflussgrößen auf das photogrammetrische Messergebnis zusammen. Kritische Faktoren bestehen zum einen in der Repräsentation des physischen Messpunktes, z. B. durch Art und Genauigkeit einer Zielmarke. Zum anderen liegen wesentliche Einflüsse in der Güte des verwendeten Aufnahmesensors und seiner mathematischen Beschreibung. Kenngröße für die erreichte Messgenauigkeit eines photogrammetrischen Industriemesssystems ist die ISO-konforme Längenmessabweichung. Der Beitrag beschreibt Möglichkeiten und praktische Erfahrungen bei der Ermittlung dieser Kenngröße. Es wird gezeigt, dass durch geeignete Wahl von Signalisierung, Aufnahmeanordnung und Kameramodellierung die erreichbare Längenmessgenauigkeit optimiert werden kann.

**Summary:** *Measuring Accuracy and Camera Modelling – Key Issues in Industrial Photogrammetry.* Achieving and proving of the specified measuring accuracy are major criteria for the use of close-range photogrammetry in industrial applications. This report summarizes the essential parameters affecting the photogrammetric measuring result. On the one hand, critical factors are given by the representation of the physical object point, e.g. by type and accuracy of the used target. On the other hand, quality of the applied imaging sensor and its mathematical description are of major importance. The ISO error of length measurement (LME) is used as the parameter for the achieved accuracy of the photogrammetric system. Possibilities and practical experiences for the determination of this parameter are described. We can show that by sufficient choice of targeting, imaging configuration and camera modelling the resulting error of length measurement can be optimised.

---

### 1 Einleitung

Die Industriephotogrammetrie erlebte ihre erste Blütezeit Mitte bis Ende der achtziger Jahre, als die Entwicklung großformatiger analoger Kameras, hoch auflösender Bildabtastung und bis dahin verfügbare Rechenverfahren zur Bildmessung und Bündelausgleichung den Einsatz der Photogrammetrie in hochgenauen Anwendungen erlaubte. Bis zu dieser Zeit wurden vor allem manuelle Theodolitmesssysteme bei der Vermessung großer Objekte (z. B. Flugzeugbau, Antennenbau) eingesetzt, die auf Grund ihrer Messgenauigkeit lange Zeit als Referenzverfahren gegolten haben. In der Folgezeit

wurden diese Systeme motorisiert und mit im Strahlengang integrierten CCD-Kameras versehen, die erstmals hochgenaue automatische Messungen online erlaubten (STAI-GER 1992).

Die photogrammetrischen Entwicklungen gingen im Wesentlichen von der Firma Geodetic Services Inc., USA, aus, die mit den Kamerasystemen CRC-1 (230 mm × 230 mm) und CRC-2 (115 mm × 115 mm) sowie dem automatischen Präzisionskomparator AutoSet-1 erstmals ein Komplettsystem für die Industrieanwendung auf den Markt brachten (FRASER & BROWN 1986). Das System erlaubte hohe Messgenauigkeiten durch folgende Merkmale:

- Verwendung kreisförmiger, retro-reflektierender Zielmarken
- Großformatkamera mit réseau-basierter Filmverebnung und Ringblitz
- Digitale subpixel-genaue Punkterkennung und -messung
- Automatische Vororientierung (Näherungswertbestimmung)
- Erweiterte Bündelausgleichung (Ausreißerererkennung, Integration zusätzlicher Beobachtungen, simultane Kamerakalibrierung mit zusätzlichen Parametern)

Etwa zeitgleich wurden auch in Deutschland Bündelausgleichungsverfahren für geodätische und photogrammetrische Beobachtungen entwickelt (KRUCK 1983, WESTER-EBBINGHAUS 1985, HINSKEN 1989). WESTER-EBBINGHAUS untersuchte Anordnungen zur Kamerakalibrierung von Teilmesskameras und entwickelte in Zusammenarbeit mit Rollei Fototechnic, Braunschweig, analoge Mittel- und Großformatkameras mit Réseautechnik (Large Format Camera LFC, 230 mm × 230 mm) sowie einen digitalen Réseaukomparator zur automatischen Bildmessung (LUHMANN & WESTER-EBBINGHAUS 1986). Eine ausführliche Würdigung dieser Arbeiten ist KUPFER (1993) zu entnehmen.

DOLD (1997) führte die Arbeiten im Bereich der hochgenauen Photogrammetrie weiter und schlug bereits ein standardisiertes Verfahren zur Definition und Abnahme der Messgenauigkeit vor, das auf Längenmessungen basiert, wie es für ein spezielles Messsystem von GODDING & LUHMANN (1992) bereits durchgeführt worden war. Die bis dahin übliche Festlegung der erreichten Genauigkeit durch mittlere Standardabweichungen in der Bündelausgleichung ergab zu optimistische Werte, die sich weder mit alternativen Messmethoden (z. B. taktilen Koordinatenmessgeräten) noch untereinander vergleichen ließen (SCHWENKE et al. 1997). DOLDS Vorschläge mündeten in die Gründung des VDI/DGPF-Gemeinschaftsausschusses „Optische 3D-Messtechnik“, der heute ein selbständiger Fachausschuss im VDI/VDE ist (FA 3.32).

Die anschließenden Weiterentwicklungen sind durch konsequente Digitalisierung

praktisch aller Systemkomponenten charakterisiert. Sie ermöglichten die Entwicklung vollautomatischer Messsysteme, die sich in Fertigungsprozesse und andere Abläufe integrieren lassen. Überwiegend kommen dabei handelsübliche, professionelle Digitalkameras oder hoch auflösende Videokameras zum Einsatz, während spezialisierte photogrammetrische Messkameras nur noch in wenigen Produkten enthalten sind. Zur Unterstützung der vollautomatischen Auswertung wurden neue Ansätze in die Berechnungsalgorithmen integriert. Als Beispiel sei die Einführung von L1-Norm-Schätzern zur Berechnung von Näherungswerten und in der Bündelausgleichung genannt, die eine hochgradig robuste Ausreißerererkennung ermöglichen und damit den Auswerteprozess entsprechend unterstützen (FELLBAUM & GODDING 1995, KAMPMANN 1986).

Der heutige Stand in der Industriephotogrammetrie zeichnet sich dadurch aus, dass gegenüber den oben genannten Systemmerkmalen weitere Möglichkeiten hinzugekommen sind (Übersichten z. B. in DOLD 1999, LUHMANN 2003):

- digitale Bildsensoren bis ca. 4000 × 4000 Pixel (ca. 1300 × 1000 Pixel für Videokameras)
- automatische Punktmessung und Zuordnung durch Verwendung codierter Zielmarken
- Online-Einbettung in Prozesse
- Genauigkeit: bis 1:200.000 (1 Sigma, RMS aus Bündelausgleichung)
- bis 1:100.000 für Längenmessabweichung bei optimierter Kalibrierung
- flächenhaft antastende Systeme mit photogrammetrischer Orientierung
- taktil antastende Systeme auf Ein- oder Mehrkamerabasis
- hybride Systeme in der Kombination Kamera/Lasertracker, Laserscanning/Photogrammetrie, Streifenprojektion/Photogrammetrie

Die Verwendung nicht-spezialisierter Aufnahmekameras mit nur unvollständig bekannten internen Signalverarbeitungen sowie häufig mechanisch unzureichenden

Konstruktionen erfordern ein erhöhtes Augenmerk auf das in der Kalibrierung verwendete mathematische Kameramodell. Dies gilt umso mehr, seit in jüngeren Untersuchungen über die erreichbare Längenmessunsicherheit überraschend schlechte Ergebnisse erzielt worden sind (LUHMANN et al. 2001, RAUTENBERG & WIGGENHAGEN 2002). Zudem wachsen in der Praxis die Anforderungen an die Genauigkeit gepaart mit der Erwartung, Messunsicherheiten stets im Zusammenhang mit der Rückführbarkeit auf die Einheit Meter anzugeben.

## 2 Definition der Messgenauigkeit

Photogrammetrische Systeme liefern 3D-Koordinaten, deren Messunsicherheit bekanntermaßen von vielen Parametern abhängt. Im Wesentlichen sind dies der Abbildungsmaßstab  $m_b$ , die Bildmessgenauigkeit eines Punktes  $dx'$ , die Aufnahmeconfiguration (Anordnung und Anzahl der Bilder im Raum) sowie äußere Bedingungen (Beleuchtung, Temperatureinflüsse usw.). In guter Näherung kann die Objektgenauigkeit  $dX$  für alle Koordinatenrichtungen angegeben werden mit

$$dX = q \cdot m_b \cdot dx', \quad (1)$$

wobei der Design-Faktor  $q$  Einflüsse durch Aufnahmeconfiguration und sonstige Effekte berücksichtigt.

Üblicherweise entstehen 3D-Koordinaten als Ergebnis einer Bündelausgleichung, d. h. simultan mit der Bestimmung sämtlicher anderer Systemparameter oder als Ergebnis eines räumlichen Vorwärtsschnittes, in den a priori bestimmte Orientierungs- und Kalibrierungsdaten eingehen. In beiden Fällen erhält prinzipiell jeder gemessene Objekt-punkt eine individuelle Messunsicherheit, da im Allgemeinen weder  $q$  noch  $m_b$  für eine Messaufgabe konstant sind.

Die aus einer Bündelausgleichung berechenbare mittlere Genauigkeit aller Objekt-punkte  $i$  folgt üblicherweise aus der Berechnung des RMS-Wertes aus sämtlichen Standardabweichungen a posteriori:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (s_i)^2}{n}} \quad (2)$$

mit

$$s_i = s_0 \cdot \sqrt{q_{ii}}$$

Dabei sind  $q_{ii}$  die Elemente der Hauptdiagonalen der Kofaktormatrix der ausgeglichenen Objektkoordinaten.  $s_0$  bezeichnet die Standardabweichung der Gewichtseinheit, also einer Beobachtung mit dem Gewicht 1. Mangels genauerer Kenntnisse werden üblicherweise alle Beobachtungen (hier: gemessene Bildkoordinaten) gleich gewichtet, obwohl bekannt ist, dass die Messgenauigkeit eine Funktion der Lage im Bild, des Bildkontrastes, der Objektsignalisierung, des Punktmessverfahrens usw. ist. Die nach der Ausgleichung verbleibenden Restklaffungen (Residuen) zeigen dabei lediglich, inwieweit das gewählte mathematische (funktionale) Modell mit den Beobachtungen zusammenfällt. Etwaige Diskrepanzen gehen nicht nur in die Residuen ein, sondern werden als Eigenschaft der Kleinsten-Quadrate-Lösung auch in andere Parameter gedrückt, z. B. in Parameter der inneren oder äußeren Orientierung, auch wenn es dafür keine physikalisch begründbaren Ursachen gibt. Ausgeglichen Parameter sind somit korreliert und entsprechend abhängig voneinander. Demzufolge geben sämtliche Standardabweichungen nur ein Maß für die innere Genauigkeit des Systems an, das gleichwohl sehr nützlich für die Beurteilung der Ausgleichungsqualität oder für die Suche nach groben Fehlern ist.

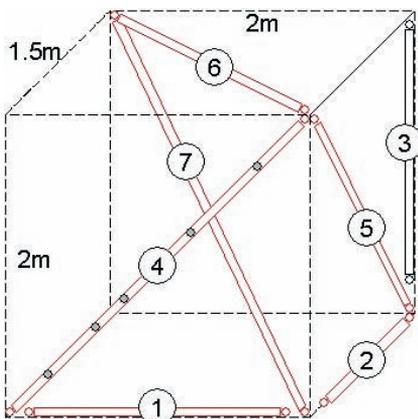
Wird ein räumlicher Vorwärtsschnitt für die Koordinatenberechnung verwendet, gehen in der Regel vorab durch Bündelausgleichung ermittelte Orientierungsdaten ein. Korrelationen zwischen den Parametern werden üblicherweise vernachlässigt. Wird der allgemeine Vorwärtsschnitt auf der Basis der Kollinearitätsgleichungen verwendet, kann die dabei berechnete Standardabweichung als kleinster Abstand zwischen den (windschiefen) Raumstrahlen als Genauigkeitskriterium interpretiert werden. Es lässt sich jedoch am Beispiel einer einfachen Stereokonfiguration leicht zeigen, dass ein

Messfehler im Bild nicht zwingend zu einer Klaffung der Raumstrahlen führt, die somit ebenfalls kein durchgreifendes Genauigkeitsmaß ist.

Die seit einiger Zeit eingeführte Richtlinie VDI/VDE 2634 (VDI 2000) überprüft ein punktförmig antastendes optisches 3D-Messsystem durch Ermittlung von Längen, die mit ihren kalibrierten Solllängen verglichen werden. Die dabei definierte Kenngröße Längenmessabweichung ist leicht zu ermitteln und zu interpretieren. Sie ist außerdem konform zu einschlägigen ISO-Normen (ISO 10360) und gewährleistet Rückführbarkeit auf die Einheit Meter. Angabe der Messunsicherheit und Rückführbarkeit gehören untrennbar zusammen und werden in Zukunft in der industriellen Praxis verlangt.

Der wesentliche Unterschied zur Angabe innerer Genauigkeiten liegt in der Tatsache begründet, dass die erreichte Längenmessunsicherheit 100 Prozent aller Messungen enthält, statistisch gesehen also einem Intervall von  $>3$  Sigma entspricht. Die theoretische Genauigkeit einer Strecke zwischen zwei ausgeglichenen Objektpunkten ergibt sich für jeweils gleiche Standardabweichungen in X, Y und Z ( $s_{x1} = s_{x2}$ ;  $s_{y1} = s_{y2}$  usw.) zu

$$s_S^2 = \frac{2}{S^2} \cdot ((x_2 - x_1)^2 \cdot s_x^2 + (y_2 - y_1)^2 \cdot s_y^2 + (z_2 - z_1)^2 \cdot s_z^2) \quad (3)$$



**Abb. 1:** Anordnung von Prüflängen nach VDI 2634.

und für gleiche Standardabweichungen in allen Richtungen ( $s_x = s_y = s_z$ ) zu:

$$s_S^2 = \frac{2s_{xyz}^2}{S^2} \cdot ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2) \quad (4)$$

Werden die Standardabweichungen mit 3 multipliziert, ergibt sich die zu erwartende Streckengenauigkeit also zu

$$s_S = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot s_{xyz} = \sqrt{18} \cdot s_{xyz} \quad (5)$$

Beispiel: Die gerechnete Strecke zwischen zwei Punkten mit den einfachen Standardabweichungen  $s_{xyz} = \pm 0,02$  mm ergibt sich bei dreifachem Sicherheitsintervall zu  $s_S = \pm 0,08$  mm.

Bei richtlinienkonformer Durchführung einer Systemprüfung werden dabei alle Koordinatenrichtungen und Raumdiagonalen sowie Strecken unterschiedlicher Länge gemessen (Abb. 1), die von einer anerkannten Prüfstelle (z. B. PTB oder DKD) kalibriert und zertifiziert sein müssen. Damit stellt die Längenmessunsicherheit ein durchgreifendes Maß einer äußeren Genauigkeit dar. Abb. 2 zeigt einen praktischen Messaufbau zur VDI-konformen Genauigkeitsüberprüfung.

Bereits heute wird in der industriellen Messtechnik die Angabe einer aufgabenspezifischen Messgenauigkeit gefordert: Ziel ist die Vorhersage über die zu erwartende Messgenauigkeit bei einer bestimmten Anwen-



**Abb. 2:** Messaufbau zur Ermittlung der Längenmessunsicherheit (AICON).

dung. Für photogrammetrische Messsysteme ist diese Forderung in naher Zukunft noch nicht erfüllbar und ist momentan Gegenstand intensiver Forschung.

### 3 Kameramodelle

Der Begriff Kameramodell wird zunehmend in Ersatz der klassischen Parameter der inneren Orientierung verwendet. Ziel ist die korrekte mathematische Beschreibung des Abbildungsvorganges in einem Bildaufnahmesystem bestehend aus optischen, mechanischen, elektronischen und programmtechnischen Komponenten. Der klassische Ansatz besteht aus der Angabe der räumlichen Lage des Projektionszentrums (Kamerakonstante, Bildhauptpunkt) sowie Parametern zur Beschreibung von Abbildungsfehlern (Verzeichnung, Bilddeformationen usw.). Bekannte Parametersätze beschreiben u.a. BROWN (1971), KRUCK (1983), GODDING (1993), für eine Zusammenfassung siehe LUHMANN (2003).

Die Parameter eines Kameramodells werden üblicherweise im Rahmen einer Selbstkalibrierung on-the-job, also im Zuge der Objektauswertung, bestimmt. Die Güte der numerischen Kalibrierung hängt dabei wesentlich von einer geeigneten Aufnahme-konfiguration ab, die hinsichtlich minimaler Korrelationen zwischen den Modellparametern optimiert werden kann (GODDING 1993). Die üblichen Strategien basieren auf der Annahme, dass die verwendete Kamera über eine Bildserie konstante Parameter aufweist.

Die heute eingesetzten Digitalkameras genügen dieser Annahme jedoch nur selten und bei vorsichtiger Handhabung. Es liegt daher nahe, die von Bild zu Bild möglichen Veränderungen eines Aufnahmesystems ebenfalls zu modellieren. Erste erfolgreiche Ansätze dazu zeigt MAAS (1999) mit einer bildvarianten Einführung von Kamerakonstante und Hauptpunktlage in den Kalibrierungsprozess. Ein erweitertes Kameramodell beschreiben TECKLEBURG et al. (2001), das neben der bildvarianten Lage des Projektionszentrums sowohl einen Autokollimationspunkt für die radial-symmetrische Verzeichnung als auch ein Korrekturgitter

für die Sensoroberfläche auf Basis finiter Elemente enthält, die gemeinsam im Rahmen einer Bündelausgleichung geschätzt werden. Zu beachten ist, dass die jeweilige mathematische Modellierung das physikalische Verhalten der entsprechenden Kamera tatsächlich beschreibt, um die Gefahr einer Über- oder Falschparametrisierung auszuschließen.

Zahlreiche systematische Reihenuntersuchungen an verschiedenen handelsüblichen Kameras haben die Leistungsfähigkeit des erweiterten Ansatzes demonstriert. Genauigkeitssteigerungen um den Faktor 4 können gegenüber herkömmlichen Bündelausgleichungen erzielt werden. Die erreichbare Längenmessunsicherheit wird im Schnitt um etwa 30 Prozent gesteigert (siehe Kap. 4).

### 4 Praktische Versuche

Im Rahmen der Produktentwicklung für optische Messsysteme sind neue Ansätze zur Verbesserung der Genauigkeit zunächst durch zahlreiche Tests zu verifizieren, bevor sie Eingang in ein Produkt finden. Im Folgenden sind zwei dieser Tests beschrieben.

#### 4.1 Bildvariante innere Orientierung

Zur Verifizierung des Einflusses einer nicht stabilen inneren Orientierung wurde ein Referenzkörper entsprechend Kapitel 2 (Abb. 2) verwendet. Der Körper wurde mit einer älteren Kodak DCS460 aufgenommen. Die Kamera wurde zwischen den Aufnahmen mechanisch stark belastet sowie mehrmals das PCMCIA Laufwerk gewechselt. Entsprechend zeigten sich bei der Auswertung mit einem Standardansatz starke Abweichungen von den Sollstrecken mit einer Spanne von ca. 0,2 mm (Abb. 3).

Der gleiche Datensatz wurde dann mit einem modifizierten Ansatz erneut berechnet. In diesem Ansatz werden einige Parameter der inneren Orientierung (insbesondere Kamerakonstante und Hauptpunktlage) variabel eingeführt. Abb. 3 zeigt die entsprechenden Ergebnisse mit einer resultierenden Spanne von nur noch 0,07 mm.



Die Auswertung ergab mittlere Objektgenauigkeiten von Neupunkten zwischen 12 und 14  $\mu\text{m}$  in allen Koordinatenrichtungen. Abb. 6 zeigt die über die Bildserie ermittelten Bewegungen des Projektions-

zentrums, die im Maximum 27  $\mu\text{m}$  erreichen. Abb. 5 stellt das simultan mitbestimmte Korrekturgitter für den Bildsensor dar. Die resultierende Spanne der Längenmessabweichungen beträgt  $\pm 0,04 \text{ mm}$  (Abb. 7).

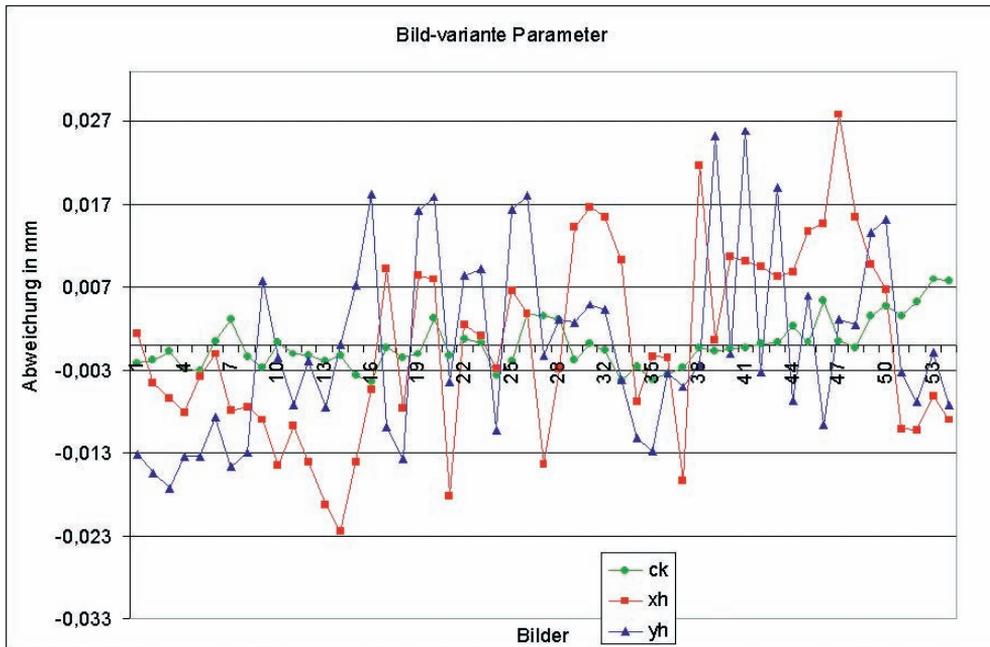


Abb. 5: Bewegungen des Projektionszentrums während der Aufnahmeserie.

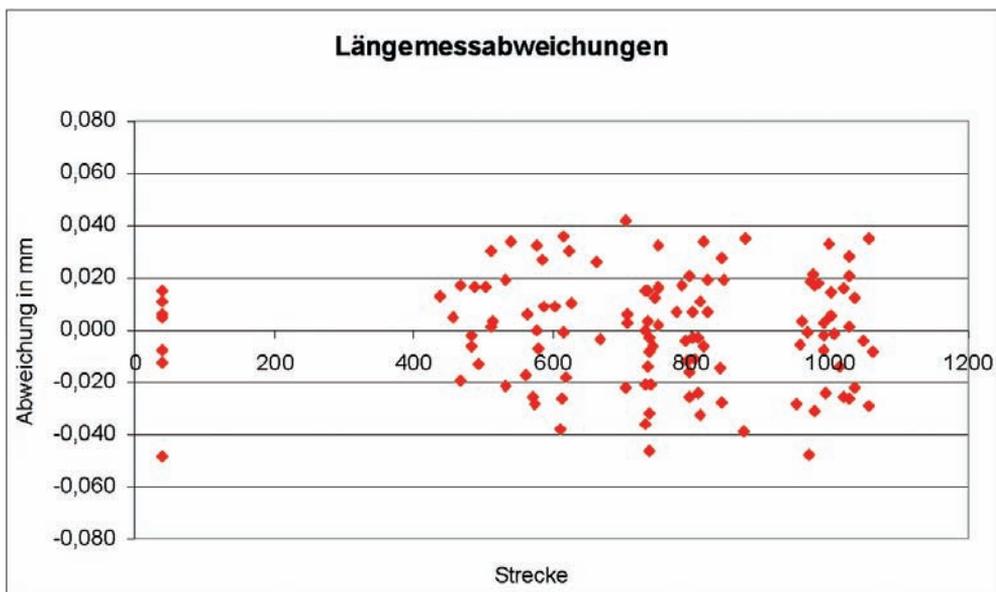


Abb. 7: Längemessabweichung (LME) bei varianter innerer Orientierung mit Sensorgitter.

Nach Gleichung (1) resultiert eine theoretische Längenmessunsicherheit von 0,02 mm bei 1 Sigma, entsprechend einer relativen Längenmessgenauigkeit von 1:130.000 für die maximale Raumdiagonale des Messvolumens von 2,7 m, bzw. 1:44.000 bei 3 Sigma.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Messgenauigkeit eines photogrammetrischen Industriemesssystems ist das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels zahlreicher Faktoren. Neuere, auf die Ermittlung äußerer Genauigkeitsangaben zielende Untersuchungen und Testmessungen verschiedener Autoren legen die Vermutung nahe, dass die herkömmliche Modellierung der Abbildungsgeometrie neuer digitaler Aufnahmesysteme im gewünschten Genauigkeitsniveau weniger hundertstel Pixel im Bildraum nicht genügt und – insbesondere für hochgenaue Anwendungen – präziser als in der Vergangenheit beschrieben werden muss.

Der vorgelegte Bericht stellt Lösungsmöglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung vor und weist deren Wirksamkeit anhand verschiedener praktischer Beispiele nach. Dabei wird die ISO-konforme Längenmessunsicherheit als Genauigkeitskriterium verwendet. Bezogen auf Längenmessungen lassen sich heute relative Genauigkeiten im Bereich von 1:100.000 erreichen, wenn hochauflösende Bildsensoren, präzise Signalisierung und geeignete Kameramodelle eingesetzt werden.

Die industrielle Praxis verlangt in Zukunft nicht nur eindeutige und handhabbare Genauigkeitsnachweise, sondern auch Systeme, die unter allen spezifizierten Betriebsbedingungen einwandfrei funktionieren. Letzterer Aspekt wird umso wichtiger, je mehr die photogrammetrischen Systeme in laufende Prozesse eingebunden sind. Wirtschaftlichkeit ist dabei weniger eine Frage der Anschaffungskosten, als vielmehr das Ergebnis eines voll funktionsfähigen Messbetriebes unter den gewünschten Umgebungsbedingungen.

Industrielle photogrammetrische Messsysteme sind heute üblicherweise nicht zer-

tifiziert. Die Hersteller können sich auf die in ISO 9000ff. spezifizierten Vorgaben beschränken. Die inzwischen eingeführte Richtlinie VDI/VDE 2634 leistet einen ersten Beitrag zur Vereinheitlichung von Genauigkeitsangaben und zu deren Überprüfung durch den Anwender.

## Literatur

- BROWN, D.C., 1971: Close-range camera calibration. – *Photogrammetric Engineering*, **37** (8): 855–866.
- DOLD, J., 1997: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemesssystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. – Dissertation, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Heft **54**, 137 S., Universität der Bundeswehr, München.
- DOLD, J., 1999: Stand der Technik in der Industriephotogrammetrie. – *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, **1999** (2): 113–126.
- FRASER, C.S. & BROWN, D.C., 1986: Industrial photogrammetry – new developments and recent applications. – *The Photogrammetric Record* **12** (68): 197–217.
- FELLBAUM, M. & GODDING, R., 1995: Economic solutions in photogrammetry through a combination of digital systems and modern estimation techniques. – *Optical 3D-Measurement Techniques III*, pp. 362–371, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- GODDING, R., 1993: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. – *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, **1993** (2): 82–90.
- GODDING, R. & LUHMANN, T., 1992: Calibration and accuracy assessment of a multi-sensor online-photogrammetric system. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **29** (5): 24–29, Washington.
- HINSKEN, L., 1989: CAP: Ein Programm zur kombinierten Bündelausgleichung auf Personalcomputern. – *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, **1989** (3): 92–95.
- ISO 10360-2: Koordinatenmesstechnik – Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Koordinatenmessgeräten. – Beuth Verlag, Berlin.
- JANTOS, R., LUHMANN, T., PEIPE, J. & SCHNEIDER, C.-T., 2002: Photogrammetric performance evaluation of the Kodak DCS Pro Back. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. **34** (5): 42–47.

- KAMPMANN, G. (1986): Robuster Ausreißertest mit Hilfe der L1-Norm-Methode. – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, **93**: 139–147.
- KRUCK, E., 1983: Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalen Modell. – Dissertation, Universität Hannover.
- KUPFER, G., 1993: Wilfried Wester-Ebbinghaus – Sein Beitrag zur Photogrammetrie. – Publikationen der DGPF, **2**: 45–52, Augsburg.
- LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie. – 2. Aufl., 586 S., Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LUHMANN, T., RINGEL, H. & WENDT, K., 2001: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme – Erste Erfahrungen mit der VDI-Richtlinie 2634. – Fachtagung Koordinatenmesstechnik, Erlangen, VDI-Berichte 1618.
- LUHMANN, T. & WESTER-EBBINGHAUS, W., 1986: Hochauflösende digitale Bildabtastung mit optisch-numerischer Sensororientierung. – In: HARTMANN (ed.): 8. DAGM-Symposium Paderborn 1986, pp. 71–78, Springer Verlag.
- MAAS, H.-G., 1999: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. – Publikationen der DGPF, **7**: 47–53, Berlin.
- RAUTENBERG, U. & WIGGENHAGEN, M., 2002: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **2002** (2): 117–124.
- SCHWENKE, H., WÄLDELE, F. & WENDT, K., 1997: Überwachung und Messunsicherheit von optischen 3D-Meßsystemen. – Optische Formfassung, GMA-Bericht, **30**: 271–280, Langen.
- STAIGER, R., 1992: Automatische und dynamische Koordinatenmessung mit mobilen Sensorsystemen. – In: WELSCH et al. (ed.): Geodätische Messverfahren im Maschinenbau. – Schriftenreihe DVW, **1992** (1): 81–96, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- TECKLENBURG, W., LUHMANN, T. & HASTEDT, H., 2001: Camera modelling with image-variant parameters and finite elements. – In: GRUEN/KAHMEN (ed.): Optical 3-D Measurement Techniques V. – pp. 328–335, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- VDI, 2000: Optische 3D-Messsysteme. 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): 101–111.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1985: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich. – In: KUPFER/WESTER-EBBINGHAUS (ed.): Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. **275**: 106–114.
- WESTER-EBBINGHAUS, W. 1992: Photogrammetrische Systeme in der industriellen Messtechnik. – Geodätische Messverfahren im Maschinenbau, Schriftenreihe DVW, **1992** (1): 165–181, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.

#### Anschriften der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. THOMAS LUHMANN  
 Institut für Angewandte Photogrammetrie und  
 Geoinformatik  
 Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wil-  
 helmshaven  
 Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg  
 Tel.: 0441-7708-3172, Fax: 0441-7708-3170  
 e-mail: luhmann@fh-oldenburg.de

Dipl.-Ing. ROBERT GODDING  
 AICON 3D Systems GmbH  
 Biberweg 30 C, D-38114 Braunschweig  
 Tel.: 0531-58 000 58, Fax: 0531-58 000 60  
 e-mail: robert.godding@aicon.de

Manuskript eingereicht: September 2003  
 Angenommen: Oktober 2003