

Anwendungsbeispiele der Nahbereichsphogrammetrie in der Automobilindustrie

MANFRED WIGGENHAGEN, Hannover

Keywords: Camera calibration, quality assessment, industrial application

Summary: *Close Range Photogrammetry Applications in the Automotive Industry.* This paper describes the application of photogrammetric methods in two selected areas of the automotive industry. Detailed information is given about investigations for the improvement of the measuring accuracy under practical conditions and the three dimensional point determination from image sequences. In the field of high precision determination of reference points improvements are presented for the design of scale bars, the signalization of object points and the consideration of interior orientation parameters. For image sequence measurements the effect of asynchronous cameras is considered.

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt Anwendungen der Photogrammetrie in zwei ausgewählten Bereichen der Automobilindustrie. Es wird im Detail auf Untersuchungen zur Verbesserung der photogrammetrischen Messgenauigkeit unter praktischen Bedingungen und die dreidimensionale Punktbestimmung aus Bildsequenzen eingegangen. Auf dem Gebiet der hochgenauen Bestimmung von Referenzpunkten werden Verbesserungen bei der Bereitstellung von Maßstäben, der Signalisierung von Objektpunkten und Berücksichtigung der Parameter der inneren Orientierung vorgestellt. Aus dem Bereich der Bildsequenzauswertung wird näher auf die Berücksichtigung asynchroner Kameras eingegangen.

1 Einleitung

Die hohe Akzeptanz der Nahbereichsphogrammetrie in der Automobilindustrie basiert auf der Fähigkeit der berührungslosen Messung und der Möglichkeit, große und komplexe Objekte in relativ kurzer Zeit zu erfassen. Weiterhin können dynamische Prozesse mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung dreidimensional ausgewertet werden.

Kennzeichnend für photogrammetrische Messsysteme ist die hohe Flexibilität in der Anwendung. Sie werden unter anderem in der Produktion als Prüfmittel für Form und Maß oder zum Digitalisieren von Modellen in der Entwicklung eingesetzt. So werden optische 3-D-Industriemesssysteme zunehmend auch in Bereichen der Qualitätssicherung eingesetzt, in denen bisher taktil antastende Geräte, wie zum Beispiel Koordinatenmessmaschinen verwendet wurden. Ins-

besondere bei der Vermessung komplexer Objekte mit großer räumlicher Ausdehnung spielten bereits in den 90er Jahren großformatige Industriemesssysteme eine wichtige Rolle (DOLD 1997). Inzwischen werden die Methoden der dreidimensionalen Punktbestimmung auch erfolgreich im Bereich der Fahrzeugsicherheitsversuche (Crashtests) eingesetzt. Bei der Auswertung von Bildsequenzen müssen jedoch zusätzliche Rahmenbedingungen beachtet werden, wie z. B. die Synchronität der Kameras bei der Aufnahme mit mehreren Sensoren gleichzeitig.

In diesem Beitrag wird zunächst auf die Rahmenbedingungen und die Optimierungsmöglichkeiten bei der hochgenauen dreidimensionalen Punktbestimmung eingegangen und die Berücksichtigung von Prüfgrößen zur Qualitätskontrolle vorgestellt. In der Bildsequenzauswertung werden aktuelle Entwicklungen bei der Verarbeitung von asynchron aufgenommenen Bild-

sequenzen beschrieben und Vorschläge für zukünftige Optimierungen der Messverfahren besprochen.

2 Hochgenaue dreidimensionale Punktbestimmung

Für die hochgenaue dreidimensionale Vermessung von Fahrzeugoberflächen werden Streifenprojektionssysteme eingesetzt, deren Messvolumen allerdings begrenzt ist. Die photogrammetrische Punktbestimmung wird daher in diesem Anwendungsbereich zur Beschaffung von Referenzpunkten genutzt. Die Verknüpfung einzelner Patches der Streifenprojektion erfolgt dann über diese photogrammetrisch bestimmten Referenzpunkte (ANDRÄ & PEIPE 2002). Da diese Punkte zur hochgenauen Verknüpfung der Punktwolken dienen müssen, sollten sie eine Größenordnung genauer als die Messung mit Streifenprojektionssystemen sein. In den vergangenen Jahren haben sich die Messverfahren der Streifenprojektion erheblich weiterentwickelt und erreichen inzwischen relative Genauigkeiten von weniger als 0,1 mm pro 1 m gemessener Objektlänge. Voraussetzung für die Einführung von Referenzpunkten ist demnach eine Standardabweichung der Punktkoordinaten von 0,01 ... 0,02 mm als Ergebnis der photogrammetrischen Bündelausgleichung. Diese Forderung kann nur unter Beachtung folgender Kriterien erfüllt werden:

- Bereitstellung von hochgenau kalibrierten Systemmaßstäben (Längenverkörperung besser 5 μm),
- Nutzung hochauflösender Kameras mit stabiler Kamerageometrie,
- Aufnahme des Objektes über Rundumverbände mit hoher Redundanz und guten Schnittbedingungen,
- Optimale Ausleuchtung der Szene mit leistungsfähigen Blitzgeräten,
- Signalisierung der Objekt- und Verknüpfungspunkte mit angepassten Messmarken und
- Berücksichtigung zusätzlicher Parameter der inneren Orientierung.

Die in den vergangenen Jahren entwickelten Verbesserungsmöglichkeiten des photogrammetrischen Messsystems wurden ausgelegt auf die optimale Erfüllung der o.g. Kriterien. Hierzu wurden in Kooperation mit den Automobilherstellern, insbesondere der Volkswagen AG, Wolfsburg, kontinuierlich wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt und die Ergebnisse in die praktische Anwendung übernommen.

2.1 Überprüfung der Messergebnisse mit hochgenau kalibrierten Systemmaßstäben

Bei der Volkswagen AG wurden in den letzten Jahren längenstabile Prüfkörper aus Kohlefasermaterial hergestellt, deren signalisierte Maßstabslängen mit einem Laserinterferometer auf $\pm 5 \mu\text{m}$ genau kalibriert werden können. Unter Berücksichtigung der Richtlinie VDI/VDE 2634/1 zur Überprüfung der erreichbaren Längenmessgenauigkeit (siehe VDI/VDE 2002) wurden umfangreiche Simulationsrechnungen zur Optimierung des photogrammetrischen Messverfahrens durchgeführt. Aus den Simulationsrechnungen ergaben sich Lösungen für optimale Aufnahmeverbände (siehe Abb. 1) und Vorschläge für die Umsetzung der VDI/VDE Richtlinie im praktischen Einsatz. Das Prüfgestell wurde nach dieser Richtlinie mit System- und Kontrollmaßstäben versehen. Mehrere digitale Kameras wurden zur dreidimensionalen Punktbestimmung der Verknüpfungs- und Maßstabspunkte am Prüfgestell genutzt, um das

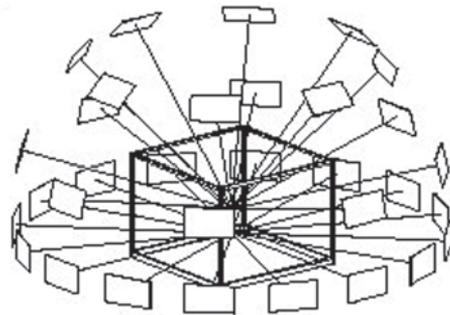


Abb. 1: Rundumverband mit 36 Aufnahmen.

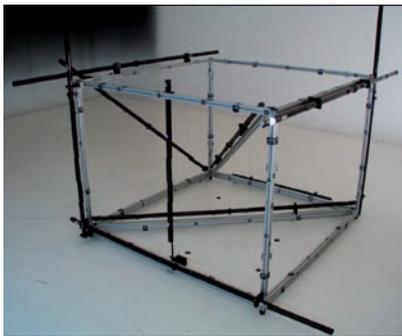


Abb. 2: Prüfgestell mit Maßstäben.

Leistungspotenzial der einzelnen Messsysteme vergleichen und einschätzen zu können (siehe Abb. 2).

Als Ergebnis wurden maximale Längenmessabweichungen des Halbverbandes von 0,260 mm und des Vollverbandes von 0,292 mm ermittelt (vgl. RAUTENBERG 2000). Da sich in der aufgenommenen Szene acht kontrollmaßstäbe befanden, konnten die triangulierten Streckenlängen mehrfach mit den kalibrierten Solllängen verglichen werden. Die Differenzen werden in einem Diagramm als Längenmessabweichungen dargestellt (siehe Abb. 3) Die Ergebnisse dieser ersten Untersuchungen ergaben jedoch Längenmessabweichungen, die teilweise bis zu 10-fach schlechter als die erwarteten Längenmessabweichungen waren. Diese Diskrepanz war darauf zurückzuführen, dass die Ergebnisse der photogrammetrischen Punktbestimmung erstmalig nach den Vor-

gaben der VDI/VDE Richtlinie kontrolliert und als Qualitätsmaß die Längenmessabweichung herangezogen wurde, während früher häufig die innere Genauigkeit der Bündelausgleichung als Qualitätskriterium betrachtet wurde (vgl. LUHMANN & GODDING 2004). Da sich diese ersten Ergebnisse auf eine sehr frühe Realisierung des Prüfgestells bezogen, wurden zur weiteren Steigerung der Messgenauigkeit Verbesserungen an der Konstruktion der Maßstäbe und Zielmarken vorgeschlagen und umgesetzt.

2.2 Erhöhung der Messgenauigkeit mit optimierten Messmarken

Da in der Automobilindustrie auch Versuche in der Kältekammer bei extremen Temperaturunterschieden durchgeführt werden, wurden die Punktmarken auf den Maßstäben als Glasflächen mit austauschbarem Hintergrund für indirekte Beleuchtung und mit aufgedampften Zielmarken für hohe Randschärfe ausgelegt. In mehreren unabhängigen Untersuchungen (siehe DREYER 2003 und GÜLKER 2004) wurden jedoch negative Einflüsse der chrombedampften Glasmarken auf das Messergebnis nachgewiesen. Je nach Ausleuchtung der Szene ergaben sich bei den Glasmarken unerwünschte Schatten und Doppelabbildungen, die die automatische Punktmessung in den digitalen Bildern verfälschten (siehe Abb. 4). Daher wurden die Messmarken der Referenzmaßstäbe hinsichtlich ihrer Form und Farbe optimiert.

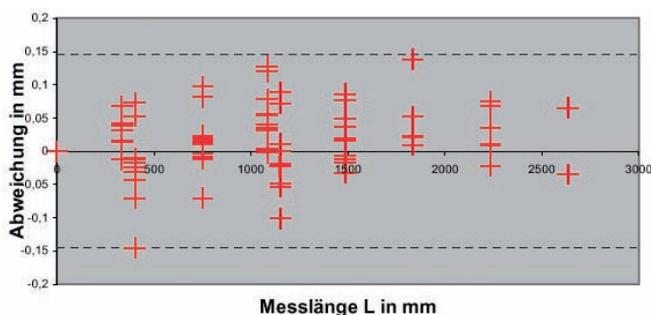


Abb. 3: Längenmessabweichungen dargestellt für 9 Streckenlängen auf 8 genutzten Kontrollmaßstäben.



Abb. 4: Chrombedampfte Glasmarke.

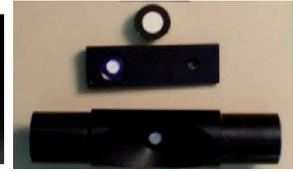
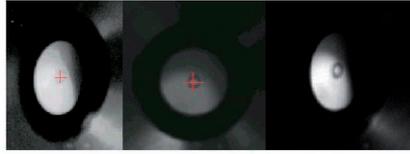


Abb. 5: Epoxydmarke (oben).

Hierzu wurden die Referenzmaßstäbe mit weißen Epoxydmarken versehen (siehe Abb. 5) und die Längenmessabweichungen erneut aus mehreren Projekten mit unterschiedlichen Kamera-Objektivkombinationen berechnet. Die Optimierung der Messmarken führte zu einer Verkleinerung der maximalen Längenmessabweichungen von bisher 0,3 mm auf 0,050 mm. Da dieser Wert noch nicht der erwarteten Größenordnung entsprach, wurden Instabilitäten in der Kamerageometrie vermutet, die ggf. auf Abnutzungserscheinungen der Objektivfassungen zurückgeführt werden können.

2.3 Berücksichtigung zusätzlicher Parameter der inneren Orientierung

In vielen Bereichen der optischen Messtechnik werden Digitalkameras eingesetzt, die nicht ausdrücklich für den Einsatz als Messkamera mit stabiler und konstanter innerer Orientierung konstruiert wurden. Um qualitativ hochwertige Triangulationsergebnisse zu erzielen, wurden in unterschiedlichen Untersuchungen sowohl Erweiterungen der Modellierung der inneren Orientierung als auch bildvariante Ansätze getestet, die mögliche Abweichungen der Kamerageometrie während der Aufnahme kompensieren sollten. In allen Fällen sind diese Ansätze jedoch vom Typ und der Bauweise der genutzten Kamera abhängig und müssen je nach Auswahl durch den Anwender angepasst werden (vgl. RIEKE-ZAPP et al. 2008). Aus den eingehenden Untersuchungen zur Kamerageometrie und zu systematischen Linsenfehlern ergab sich die Vermutung, dass sich die Objektive der Digitalkameras während der Aufnahme in Abhängigkeit von der Schwerkraft relativ zum Sensor bewegen

und damit eine konstante innere Orientierung in Frage gestellt werden muss (siehe Abb. 6). Bei photogrammetrischen Aufnahmen nach VDI/VDE 2634/1 wird die horizontale Grundrissebene durch signalisierte Bodenpunkte repräsentiert. Über diese absolute Orientierung im Hallenkoordinatensystem und die äußere Orientierung der Kamera kann die Richtung der optischen Achse zur Gravitationsrichtung bestimmt und in den Auswerteprozess einbezogen werden. In weiteren Untersuchungen (vgl. HAIG et al. 2006 & HAIG et al. 2007) wird ein neuer gravitationsrichtungsabhängiger Parameter für die innere Orientierung digitaler Kameras zur Kompensierung von Neigungen am Objektivanschluss beschrieben. In diesen Beiträgen wird der Effekt der Gravitation auf das Objektiv und dessen Anschluss modelliert und ein physikalisches Modell zur Kompensation des Gravitationseinflusses getestet. Erste Ergebnisse weisen bereits Verbesserungen der Längenmessabweichungen nach VDI/VDE 2634/1 auf. In mehreren Versuchen (siehe Abb. 7) wurden mit einer Digitalkamera Fuji FinePix S2 Pro vergleichbare Bildverbände mit und ohne Korrektur der Objektivneigung gerechnet. In Projekt 1 wurden ca. 200 Aufnahmen mit häufiger Kantung der Kamera berücksich-

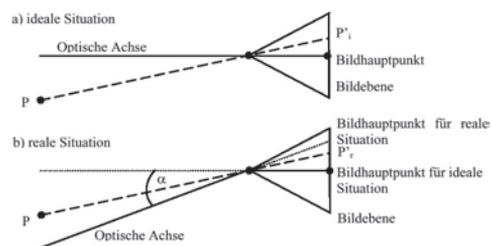


Abb. 6: Gravitationseinfluss auf die optische Achse.

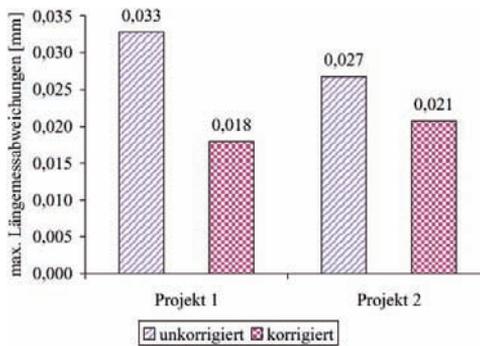


Abb. 7: Max. Längenmessabweichungen pro m für unkorrigierte und korrigierte Objektivneigungen.

tigt, in Projekt 2 wurden ca. 120 Aufnahmen in überwiegend horizontaler Anordnung ausgewertet. Die Vorgabe, eine Längenmessabweichung von 1:100 000 bzw. 0,020 mm bei einer Maßstabslänge von 2000 mm zu erreichen, konnte mit diesem Ansatz halb erfüllt werden, erreicht wurden 0,021 mm bezogen auf eine Streckenlänge von 1 m.

Die Erweiterung des Parametermodells für die innere Orientierung wurde daher in ein Bündelausgleichungsprogramm integriert. Weitergehende Untersuchungen zur signifikanten Wirkung dieses Ansatzes auf die Messgenauigkeit werden zur Zeit im Rahmen einer laufenden Dissertation an der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Es ist geplant, diese in Kürze zu veröffentlichen.

3 Auswertung von Bildsequenzen

In den vergangenen Jahren wurde die photogrammetrische Punktbestimmung auch erfolgreich für die Auswertung von Fahrzeugsicherheitsversuchen angepasst. Durch die Berechnung dreidimensionaler Objektpunktwolken des Fahrzeugs auf der Versuchsanlage konnten erstmalig dreidimensionale Simulationsdaten mit den realen Versuchsdaten überlagert werden und wertvolle Schlüsse für die Optimierung und Steigerung der Sicherheit der Fahrzeuge abgeleitet werden (siehe Abb. 8).

Die praxisnahe Integration der photogrammetrischen Messmethodik in den Ver-



Abb. 8: Überlagerung von Simulationsdaten mit realen Bilddaten.

suchsablauf stellte eine große Herausforderung dar. Einerseits mussten geometrische Minimalforderungen erfüllt werden, um eine akzeptable Messgenauigkeit zu erreichen, andererseits musste der zusätzliche Versuchsaufwand, wie z. B. die Punktsignalisierung und der Einsatz zusätzlicher Kameras in vertretbaren Grenzen gehalten werden. Zur Kontrolle einzelner Phasen der photogrammetrischen Messkette wurden Qualitätsparameter entwickelt, die den Anwendern geeignete Kenngrößen zur Einschätzung der erreichbaren Messgenauigkeit und Qualität des dreidimensionalen Ergebnisses zur Verfügung stellen (siehe WIGGENHAGEN & RAGUSE 2003).

3.1 Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung

In den vergangenen Jahren wurden bereits in unterschiedlichen Gremien, wie z. B. DIN und VDI verstärkt Richtlinien entwickelt und Verfahren vorgestellt, die unabhängig von den verwendeten Ausgleichsansätzen eine Bewertung der Qualität der photogrammetrischen Ergebnisse ermöglichen (siehe LUHMANN & WENDT 2000 und RAUTENBERG & WIGGENHAGEN 2002).

Aus praktischen Erfahrungen in Fahrzeugsicherheitsversuchen ergaben sich weitere Kenngrößen zur Beurteilung der Qualität photogrammetrischer Bildverbände in Nahbereichsprojekten (siehe RAGUSE & WIGGENHAGEN 2003a). Diese Kenngrößen

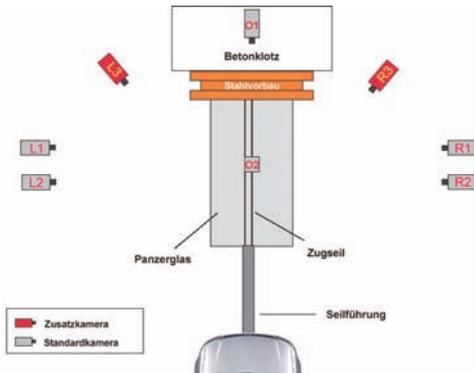


Abb. 9: Aufnahmeanordnung beim Sicherheitsversuch.

sollen den Nutzer in die Lage versetzen, bei der Vorbereitung und Durchführung photogrammetrischer Objektbestimmungen qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen. Die Kenngrößen können aus einfachen geometrischen Maßen abgeleitet werden und erfordern kein tiefgehendes Wissen über statistische Methoden oder Ausgleichsverfahren (siehe RAGUSE & WIGGENHAGEN 2003b). Die Aufspaltung der photogrammetrischen Messkette in Teilprozesse mit den jeweilig gültigen Kenngrößen hat dazu geführt, dass im praktischen Versuchsbetrieb Messabläufe optimiert und Aufnahmekonstellationen verbessert werden konnten (siehe Abb. 9). Bei einigen Automobilherstellern werden die spezifischen Kenngrößen zur Vorbereitung und Kontrolle interner Versuchsabläufe in der Nahbereichsphotogrammetrie, insbesondere bei der Vorbereitung von Fahrzeugsicherheitsversuchen, eingesetzt. So kann z. B. überprüft werden, ob der notwendige Zielmarkendurchmesser

in der speziellen Aufnahmegeometrie erfüllt ist.

Diese zusätzlich definierten Kenngrößen haben auch Beachtung auf internationaler Ebene gefunden und wurden zwischenzeitlich in abgewandelter Form in der Revision der ISO 8721 *Road vehicles – Measurement techniques in impact tests – Optical Instrumentation* verwendet (siehe ISO 2002).

3.2 Synchronität von Mehrkamerasystemen

Eine grundlegende Voraussetzung für die exakte photogrammetrische Bestimmung bewegter Objekte aus Bildsequenzen eines Mehrkamerasystems ist die synchrone Bildaufnahme. Asynchronitäten zwischen den einzelnen Kameras können zu systematischen Verschiebungen der dreidimensionalen Objektkoordinaten führen. Daher wurden verschiedene Versuchsaufbauten untersucht, mit deren Hilfe vorhandene Asynchronitäten bei High-Speed Kameras bestimmt werden können (vgl. ERNST 2002). Diese bestanden z. B. aus rotierenden Prüfkörpern, die im Vordergrund vor einem Festpunktfeld bewegt wurden (siehe Abb. 10) und Asynchronitäten der eingesetzten zwei Kameras aus den Parallaxen bei der Punkttriangulation aufdecken konnten. Aus Asynchronitäten resultierende x-Parallaxen erzeugten Fehler in der Objektkoordinate parallel zur Blickrichtung, y-Parallaxen führten zu windschiefen Schnitten der Bildstrahlen und damit zu großen Verbesserungen in den Bildkoordinaten.

Die Untersuchungen deckten vorhandene Asynchronitäten bei Kameras mit externer Synchronisation auf und mündeten in der

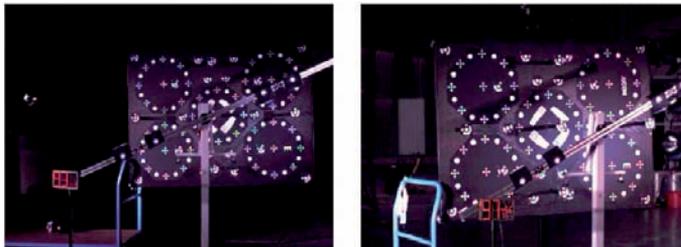


Abb. 10: Synchronisationsversuche mit zwei Kameras.

Konzeption und dem Bau eines sogenannten Synchronometers, einer Crashuhr bestehend aus LED-Laufzeilen mit vorprogrammierter Taktung, mit deren Hilfe mögliche Asynchronitäten direkt im Bild aus der abgebildeten Konfiguration der Leuchtdioden abgeleitet werden können.

Als Alternative ermöglicht auch ein Stereospiegelvorsatz die Herstellung von synchronen Videosequenzen ohne elektronische Hilfsmittel, da nur eine Kamera zur Bildaufnahme eingesetzt wird (vgl. LUHMANN 2005 und z. B. HASTEDT et al. 2005). Zwar halbiert sich durch die Nutzung des Spiegelvorsatzes das nutzbare Bildformat, durch die Beschränkung auf nur eine High-speedkamera ergibt sich aber eine sehr wirtschaftliche Lösung und ein absolut synchron aufnehmendes Messsystem.

Am IPI wurde allerdings ein anderer Weg eingeschlagen und ein neues Verfahren zur dreidimensionalen photogrammetrischen Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren entwickelt (siehe RAGUSE 2007). Dabei sind keine Hardwarekomponenten zur Synchronisation der Kameras oder zur Messung der Asynchronität erforderlich. Das Verfahren beruht auf der Synchronisation der Punktmessungen in den Bildsequenzen. Die Asynchronität wird in Form einer Korrekturfunktion modelliert und in das Modell der photogrammetrischen Bündelausgleichung aufgenommen. Auf diese Weise können die Objektkoordinaten zuverlässig bestimmt und der Einfluss einer möglichen Asynchronität rechnerisch kompensiert werden.

3.3 Mehrmediengeometrie

Innerhalb der Fahrzeugsicherheitsversuche werden auch High-Speed Filme des Versuchsfahrzeugs vom Fahrzeugboden und den Aggregaten aufgenommen (siehe Abb.11). Diese Aufnahmen erfolgen von unten aus einer Photogrube durch eine ca. 90 mm dicke Plexiglasscheibe.

In weitergehenden Untersuchungen wurde die spezielle Mehrmediengeometrie (siehe auch KOTOWSKI 1987 und BACHMANN 2000) bei der Messung aus der Photogrube berücksichtigt und das geometrische Modell der Zentralperspektive um die Einflussgrößen der Strahlveränderung beim Durchtritt durch die Plexiglasscheibe erweitert (vgl. ROLAND 2007). Durch die Berücksichtigung der Mehrmediengeometrie im Ausgleichungsansatz konnte der mittlere Punktfehler wesentlich verringert werden und die geforderte Grenze von ± 5 mm eingehalten werden.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden praxisorientierte Lösungen vorgestellt, die in den letzten 10 Jahren am IPI entwickelt wurden und den Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie in speziellen Anwendungen der Automobilindustrie optimieren und damit die Akzeptanz bei den Nutzern wesentlich steigerten. Die systematischen Untersuchungen in der hochpräzisen Punktbestimmung führten zu einer Verbesserung der Systemmaßstäbe und der Punktsignalisierung sowie einer Erweiterung des Kameramodells in der Bündelausgleichung.

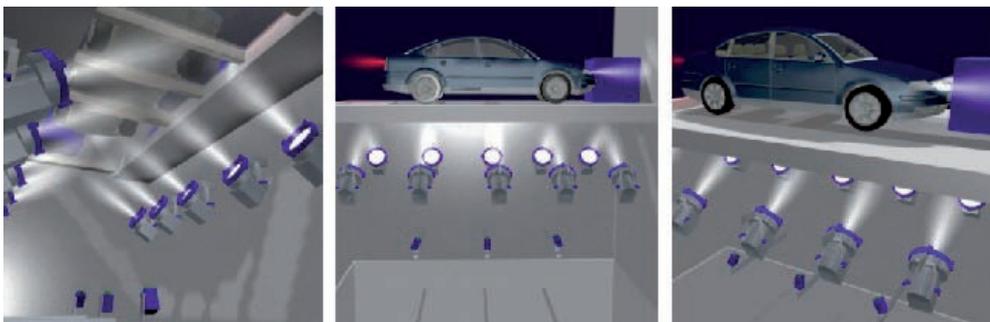


Abb. 11: Abstrahierte Darstellung der Fotogrube in der Versuchshalle.

delausgleichung. Mit praxisrelevanten Kenngrößen können Teilprozesse der photogrammetrischen Messkette eingeschätzt und geometrisch nachvollziehbare Messaufbauten erstellt werden.

Im Bereich der Bildsequenzauswertung wurden Vorschläge zur Optimierung der Aufnahmekonfiguration, der Stabilisierung der Messanordnungen durch zusätzliche Verknüpfungspunkte und Lösungen zur Berücksichtigung asynchron aufnehmender Kameras erarbeitet.

5 Danksagung

Der Autor möchte sich an dieser Stelle bei den Projektpartnern für die kooperative Zusammenarbeit bedanken. Die Projektpartner aus der deutschen Automobilindustrie sind die Volkswagen AG, die Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, die Audi AG, die BMW AG und die Daimler Chrysler AG.

Aufgrund der erfolgreichen Kooperation wurden in den vergangenen Jahren wiederholt Geodäsie-Ingenieure der Leibniz Universität Hannover mit dem Schwerpunkt Nahbereichsphotogrammetrie in den verschiedenen Abteilungen der Geräteanbieter und der Automobilindustrie eingestellt. Dieser enge Kontakt zu den Anbietern und Nutzern der optischen Messtechnik wird auch in Zukunft dazu führen, dass zielführende Verfahrens- und Geräteentwicklungen in enger Kooperation mit dem Institut für Photogrammetrie und GeoInformation durchgeführt werden können.

Literatur

- ANDRÄ, P. & PEIPE, J., 2002: Zur Erfassung von Freiformflächen mit Streifenprojektionssystem und digitaler Nahbereichsphotogrammetrie. – Publikationen der DGPF **11**: 201–206.
- BACHMANN, M., 2000: Beitrag zur Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen von Großmanipulatoren im Mehrmedieneinsatz mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie, Leibniz Universität Hannover. – Fachbereich Maschinenbau, Dissertation.
- DOLD, J., 1997: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemesssystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. – Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr **54**, München.
- DREYER, J., 2003: Untersuchungen zur Steigerung des Genauigkeitspotenzials des photogrammetrischen Messsystems TRITOP der Firma GOM mbH. – Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover.
- ERNST, H., 2002: Eignung dreidimensionaler photogrammetrischer Verfahren in Sicherheitsversuchen. – Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/da-ernst.pdf (Mai 2008).
- GÜLKER, C., 2004: Untersuchungen zur Kalibrierfähigkeit und Praxistauglichkeit von unterschiedlichen Messmarkentypen in Maßstäben zur Genauigkeitssteigerung bei photogrammetrischen Messungen. – Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Diplomarbeit_Guelker.pdf (Mai 2008).
- HAIG, C., HEIPKE, C. & WIGGENHAGEN, M., 2006: Lens inclination due to instable fixings detected and verified with VDI/VDE 2634 Part I. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (5), auf CD.
- HAIG, C., HEIPKE, C. & WIGGENHAGEN, M., 2007: Ein neuer gravitationsrichtungsabhängiger Parameter für die Innere Orientierung zur Kompensierung von Neigungen am Objektanschluss. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage. Wichmann Verlag, Heidelberg, 44–51.
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & RAGUSE, K., 2005: Three-dimensional acquisition of high-dynamic processes with a single-camera system and stereo-beam splitting. – 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, 10 pages, on CD.
- ISO, 2002: Road Vehicles – Measurement Techniques in impact tests – Optical Instrumentation. – ISO/DIS 8721. – Erweiterte Version. Stand November 2002. International Organization of Standardization.
- KOTOWSKI, R., 1987: Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. – DGK Reihe **C 330**, München.
- LUHMANN, T. & WENDT, K., 2000: Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-D measurement systems. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **33** (B5): 493–500.

- LUHMANN, T. & GODDING, R., 2004: Messgenauigkeit und Kameramodellierung – Kernfragen der Industriephoto­grammetrie. – Photo­grammetrie – Fernerkundung – Geo­infor­mation **2004** (1): 13–21.
- LUHMANN, T., 2005: Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung. – Photo­grammetrie – Fernerkundung – Geo­infor­mation **2005** (2): 101–110.
- RAUTENBERG, U. & WIGGENHAGEN, M., 2002: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1. – Photo­grammetrie – Fernerkundung – Geo­infor­mation **2002** (2): 117–124.
- RAUTENBERG, U., 2000: Untersuchungen zur Zertifizierung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1 mittels Einsatz von Längennormalen. – Diplomarbeit am Institut für Photo­grammetrie und Geo­Infor­mation, Universität Hannover, www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Rautenberg.pdf (Mai 2008).
- RAGUSE, K. & WIGGENHAGEN, M., 2003a: Qualitative Beurteilung photogrammetrischer Aufnahmekonstellationen im Nahbereich. – Oldenburg, Wichmann Verlag, 43–50.
- RAGUSE, K. & WIGGENHAGEN, M., 2003b: Beurteilung der Optischen Messkette durch Simulation der Aufnahmekonfiguration. – Publikationen der DGPF **12**: 275–283.
- RAGUSE, K., 2007: Dreidimensionale photogrammetrische Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren. – DGK **C 602**, München. – Ebenfalls in: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geo­infor­matik der Leibniz Universität Hannover **265**.
- RIEKE-ZAPP, D., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W., 2008: Schrauben, kitteln, kleben – Zur Stabilität digitaler Kameras. – Photo­grammetrie – Laser­scanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2008, Wichmann Verlag, 63–70.
- ROLAND, M., 2007: Photo­grammetrische Auswertung der Aggregatbewegung im Sicherheitsversuch aus einer Fotogrube. – Diplomarbeit am Institut für Photo­grammetrie und Geo­Infor­mation, Leibniz Universität Hannover. www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/2007-05-22-Roland_Diplomarbeit.pdf (Mai 2008).
- VDI/VDE, 2002: VDI/VDE 2634, Optische 3D-Messsysteme VDI/VDE-Richtlinie, Blatt 1–2. – Beuth Verlag, Berlin.
- WIGGENHAGEN, M. & RAGUSE, K., 2003: Entwicklung von Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung optischer Prozessketten. – Photo­grammetrie – Fernerkundung – Geo­infor­mation **2003** (2): 125–134.

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. MANFRED WIGGENHAGEN, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photo­grammetrie und Geo­Infor­mation (IPI), 30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-3304, Fax: +49-511-7623-2483, e-mail: wigge@ipi.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: April 2008

Angenommen: Juni 2008