

PHOTOGRAMMETRISCHE DEFORMATIONSMESSUNGEN AN KAROSSERIEN

J. Peipe, Neubiberg

1. Photogrammetrische Erfassung von Deformationen

Änderungen der Lage und / oder der Form eines Objekts als Funktion der Zeit lassen sich durch Deformationsmessungen bestimmen (z.B. PELZER 1987). Sie können als Bewegungen gegenüber der Umgebung (Starrkörperbewegungen: Verschiebung, Verdrehung) bzw. Verformungen (Dehnung, Scherung, Durchbiegung, Torsion) beschrieben werden. In der Regel erfolgt eine räumliche und zeitliche Diskretisierung: es werden Meßwerte für eine repräsentative Auswahl von Objektpunkten an mindestens zwei Zeitpunkten (Epochen) ermittelt. Die daraus abgeleiteten Objektpunktkoordinaten werden epochenweise miteinander verglichen; durch Differenzbildung erhält man Verschiebungsbeträge, die mit Hilfe statistischer Verfahren zu analysieren sind. Insbesondere ist dabei ein Referenzsystem einzurichten, das durch als unverändert nachgewiesene Punkte definiert wird und auf das sich alle Punktverschiebungen beziehen. Außerdem ist die Signifikanz der Deformationen zu prüfen, zumal sie oft in der Größenordnung der Meßgenauigkeit liegen.

Als eine Methode zur Bestimmung der Objektkoordinaten kann die Photogrammetrie angewendet werden. Wenn Deformationen nur in einer Ebene auftreten, so genügt es, für jede Epoche eine Aufnahme herzustellen und diese zu entzerren. Bei räumlichen Verformungen muß eine dreidimensionale Punktbestimmung erfolgen. Als Standardverfahren wird hierfür die Bündeltriangulation eingesetzt. Dabei wird das Objekt aus verschiedenen Richtungen von frei im Raum stationierten Kamerastandorten aus fotografiert, alle Aufnahmen - mindestens zwei - werden in einem Bildverband zusammengefaßt und über gemeinsame Objektpunkte miteinander verknüpft. Leistungsfähige Rechenprogramme erlauben die Ausgleichung photogrammetrischer Beobachtungen (Bildkoordinaten) zusammen mit zusätzlicher Objektinformation (Koordinaten, Strecken, Höhenunterschiede u.a.) (z.B. KRAUS 1984, KRUCK 1984, MÖLLER und STEPHANI 1984, WESTER-EBBINGHAUS 1985, FRASER und BROWN 1986).

Als Aufnahmegerät sollte eine Meß- oder Teil-Meßkammer (WESTER-EBBINGHAUS 1983) verwendet werden, um die exakte Wiederherstellung der Aufnahmestrahlenbündel zu gewährleisten. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen, die für Deformationsmessungen die Regel sind, ist eine Kalibrierung der Aufnahmekammer simultan mit der Objektrekonstruktion vorzunehmen. Dies kann im Rahmen der Bündelausgleichung geschehen; dabei können bereits bekannte Daten der inneren Orientierung mit einem ihrer Genauigkeit entsprechenden Gewicht eingeführt werden.

Photogrammetrische Verfahren werden im Bereich der Ingenieur- und Industrievermessung vor allem dann vorteilhaft eingesetzt, wenn ein Objekt groß und / oder unzugänglich ist, wenn viele Punkte gleichzeitig zu erfassen sind, die Arbeitszeit vor Ort sehr kurz gehalten werden muß und ein Dokument der Vermessung vorliegen soll. In der Automobilindustrie finden sich Anwendungen zum Beispiel bei der Bestimmung der Form der Karosserie und einzelner Bauteile, bei der Qualitätskontrolle von Werkzeugen, der Qualitätssicherung während der Produktion und bei Crash-Tests (MARUYASU und OSHIMA 1966, SCHOLZE et al. 1975, WAHL 1983, HELLMEIER 1984, WESTER-EBBINGHAUS und WEZEL 1985 und 1986, CLAUS 1986, BORUTTA und PEIPE 1987 u.a.).

Die photogrammetrische Erfassung von Deformationen soll im folgenden an einigen Beispielen aus dem Karosseriebau erläutert werden.

2. Verformungen beim Zusammenbau eines Windlaufs

Der die Frontscheibe eines Fahrzeugs umgebende Rahmen wird als Windlauf bezeichnet. Er besteht aus vier Einzelblechen - eines für jede Fensterseite - und wird in einer Vorrichtung als Untereinheit zusammengebaut. Die Bleche werden dabei in die Vorrichtung eingelegt, durch Spanner gegen Auflager gepreßt und miteinander verschweißt. Nach dem Entspannen kann das fertige Teil der Vorrichtung entnommen werden (Abb. 1).

Bei der Vorbereitung der Serienfertigung müssen Vorrichtung und Schweißmaschine so eingerichtet werden, daß das Produkt ohne Spannungen und in der geplanten Form erzeugt wird. Insbesondere ist die Erfassung der Deformationen von Interesse, die nach dem Spannen und vor dem Entspannen, also während des Schweißvorgangs, am Windlauf auftreten. Diese Aufgabe wurde photogrammetrisch gelöst. Da gleichzeitig eine Punktbestimmung mit dem Industriemeßsystem Wild RMS 2000 erfolgte, war ein Vergleich der beiden Meßverfahren möglich.

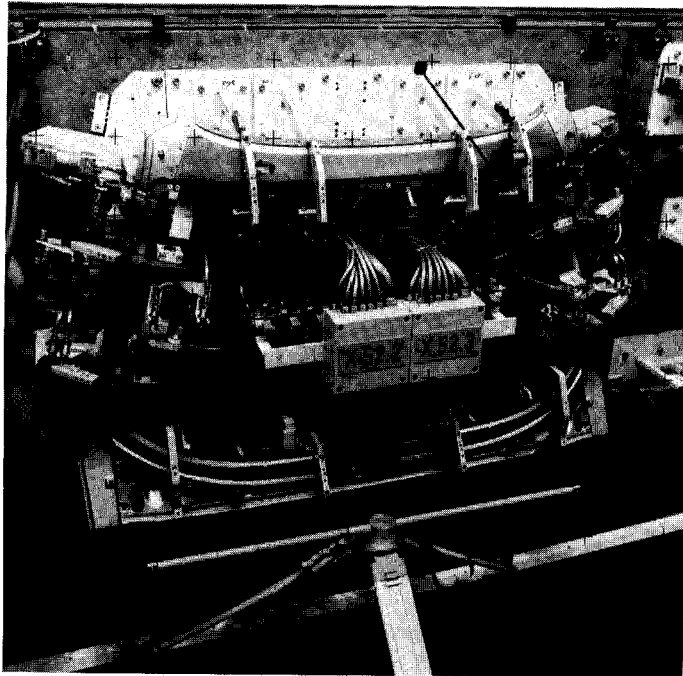


Abb. 1 Meßaufnahme während der Montage eines Windlaufs

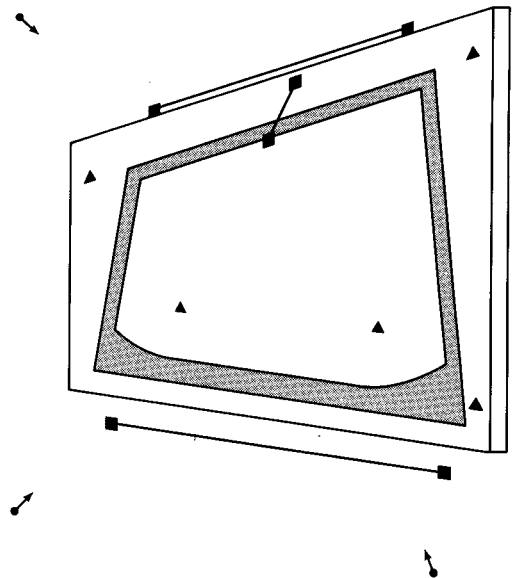


Abb. 2 Aufnahmeanordnung Windlauf



Abb. 3

2.1 Aufnahmeanordnung

Die für den Zusammenbau des Windlaufs konstruierte Vorrichtung ist auf einer vertikalen Stahlplatte fest montiert. Sie ist von vorne zugänglich, um die einzelnen Stahlbleche einlegen zu können (Abb. 1). Nach dem Spannen wird der ganze Aufbau um 200 gon gewälzt und der Schweißvorgang auf der - in der Abbildung nicht sichtbaren - Rückseite durchgeführt. Anschließend wird die Vorrichtung in ihre ursprüngliche Lage zurückgedreht.

An vorgegebenen Stellen wurden 39 kreisförmige Zielmarken auf den Windlauf geklebt. Weitere fünf Marken wurden auf der Stahlplatte und von ihr ausgehenden Bauteilen befestigt, um ein Referenzsystem einzurichten.

Als Aufnahmekammer diente eine Mittelformatkamera Rollei SLX RESEAU mit 50 mm - Weitwinkelobjektiv (Abb. 4). Die Verwendung dieser handlichen Teil-Meßkammer führte zu einer sehr kurzen Arbeitszeit von nur wenigen Minuten vor Ort. Die Aufnahmeanordnung ist aus Abb. 2 zu ersehen. Dargestellt sind die Stahlplatte und der Windlauf selbst, vier Kamerastandorte, die fünf Referenzpunkte und drei Strecken mit bekannter Länge, eine davon in Aufnahmerichtung. Die unterhalb der Stahlplatte aufgebaute Präzisionslatte gehört zum Meßsystem RMS 2000; die beiden anderen Strecken (Abb. 3) bestehen

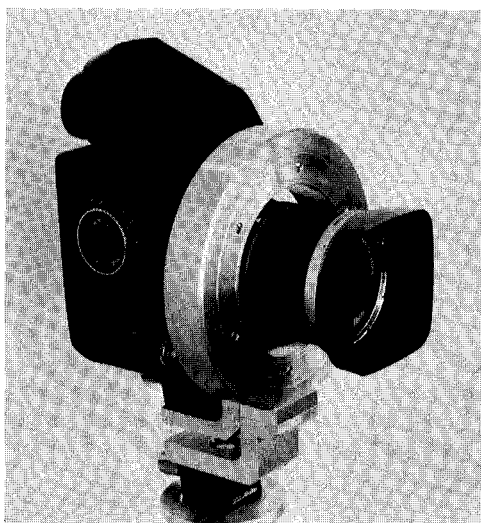


Abb. 4 Teil-Meßkammer Rollei SLX RESEAU mit 50 mm - Objektiv und Wälzring

aus verzugsfreien, carbonfaserverstärkten Rundstäben von acht Millimetern Durchmesser.

Für beide Beobachtungsepochen - vor und nach dem Schweißen - wurden acht Bilder (z.B. Abb. 1) hergestellt, d.h. von jedem Kamerastandort zwei konvergent auf das Objekt gerichtete Aufnahmen, die um 200 gon gegeneinander gekantet sind (Zwei-Lagen-Aufnahmen). Zu diesem Zweck war die Kamera mit einem Wälzring verbunden (Abb. 4). Die Aufnahmeentfernung betrug etwa 2.3 m, der horizontale Abstand der Aufnahmeorte 1.6 m, der vertikale 1.2 m. Damit stand ein stabiler Bildverband für die Bündelausgleichung zur Verfügung.

2.2 Ergebnisse der Bündeltriangulation

Die Aufnahmen wurden monoskopisch am analytischen Auswertegerät Planicomp C 100 ausgemessen und die erhaltenen Komparatorkoordinaten maschenweise in die Ebene des Réseau der Rolleiflex SLX transformiert (KOTOWSKI 1984), um systematische Bildfehler zu eliminieren. In die Bündelausgleichung mit dem Programm MOR (WESTER-EBBINGHAUS 1985) gingen außer den Bildkoordinaten die Sollstrecken - mit einer Standardabweichung von 0.02 mm - ein, die - sich gegenseitig kontrollierend - den Maßstab des photogrammetrischen Netzes festlegen. Die Lagerung des Bildverbandes erfolgte zwangsfrei auf sechs Koordinatenwerten der als stabil vorgegebenen Referenzpunkte.

Die Standardabweichung der Bildkoordinatenmessungen nach der Ausgleichung betrug $s_{x,y} = 3.0 \mu\text{m}$. Die Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten s_x , s_y und s_z (Z in Aufnahme- x,y richtung) sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Um den Zusammenhang zwischen Meßaufwand und Genauigkeit aufzuzeigen, wurden mehrere Versionen mit unterschiedlicher Bildanzahl gerechnet. Ausgehend von Version 1 (8 Bilder) wurden gewälzte Aufnahmen aus dem Bildverband entfernt, also die Redundanz verringert. Die Genauigkeit der Versionen 2 (mit zwei gewälzten Bildern) und 3 (mit einem gewälzten Bild) ist an den Standardabweichungen s_x , s_y und s_z abzulesen; sie zeigt sich aber auch beim Vergleich der Objektpunktfelder: DX, DY und DZ geben jeweils den quadratischen Mittelwert der Differenzen gegenüber der Bezugsversion 1 an. Eine hohe Zuverlässigkeit der Punktbestimmung ist auch in Version 3 - bei fünf Strahlenschnitten pro Objektpunkt - gewährleistet.

Version	Bilder	s_x	s_y	s_z	DX	DY	DZ	$c \pm s_c$	$x_H \pm s_{x_H}$	$y_H \pm s_{y_H}$
1	8	0.09	0.09	0.15	--	--	--	51.847 0.011	-0.026 0.005	-0.047 0.005
2	6	0.11	0.10	0.17	0.08	0.08	0.10	51.857 0.013	-0.037 0.006	-0.043 0.006
3	5	0.12	0.11	0.19	0.10	0.08	0.10	51.868 0.014	-0.032 0.008	-0.046 0.007
4	4	0.24	0.20	0.21	0.46	0.34	0.12	51.877 0.015	-0.128 0.051	-0.203 0.037
5	4	0.12	0.12	0.21	0.07	0.08	0.11	51.847 --	-0.026 --	-0.047 --
6	5	0.13	0.12	0.21	0.15	0.07	0.11	51.864 0.015	-0.058 0.016	-0.048 0.012
7	8	0.09	0.08	0.15	--	--	--	51.856 0.011	-0.014 0.005	-0.032 0.005

Tab. 1 Ergebnisse der Bündelausgleichungen (Dimension: mm)

An dieser Stelle sind einige Bemerkungen zur inneren Orientierung der Aufnahmekammer angebracht. Ihre Elemente (Kammerkonstante c , Hauptpunktlage x_H , y_H und Verzeichnung) müssen durch simultane Kalibrierung in der Bündelausgleichung ermittelt werden, um eine exakte Objektrekonstruktion zu erhalten. Insbesondere gilt dies, wenn konvergente Aufnahmen im Bildverband vorhanden sind oder das Objekt eine merkliche Tiefenausdehnung aufweist (WESTER-EBBINGHAUS 1986). Bei dem vorgestellten Projekt liefern die konvergenten und gewälzten Aufnahmen ausreichende Information für die Simultankalibrierung. Dabei ermöglichen die Zwei-Lagen-Aufnahmen die Berech-

nung der Koordinaten des Hauptpunktes im Bildkoordinatensystem. In Tabelle 1 zeigen die Standardabweichungen s_c , s_{x_H} und s_{y_H} die gute Bestimmbarkeit der Parameter. Die Versionen 1, 2 und 3 lassen kaum Abweichungen erkennen, obwohl zuletzt lediglich eine gewälzte Aufnahme mitgeführt wurde. Wird diese aus dem Bildverband genommen (Version 4), so ist die Hauptpunktlage nur sehr ungenau bestimmt, und die Auswirkungen auf die Objektkoordinaten in X- und Y-Richtung sind deutlich. Daß dieser Effekt nicht auf die zu geringe Anzahl von Bildern zurückzuführen ist, zeigt Version 5 mit ebenfalls vier Bildern; dabei wurden jedoch die Kammerparameter nicht frei bestimmt, sondern es wurden die in Version 1 erhaltenen Werte benutzt und bei der Berechnung der Objektkoordinaten fest angehalten.

Version 6 enthält eine gewälzte Aufnahme mit nur zehn, regelmäßig über das Objekt verteilten Bildpunkten. Im Unterschied zu Version 3 verschlechtert sich die Bestimmbarkeit der Hauptpunktlage, vor allem in X-Richtung, so daß auch Veränderungen im Objektpunktfeld auftreten.

Bei allen Versionen wurde im übrigen die radial-symmetrische Verzeichnung des Objektivs mitbestimmt, wobei sich nahezu identische Werte ergaben.

Abschließend sei auf die Resultate der Simultankalibrierung für die zweite Beobachtungsepoche - nach dem Schweißen - hingewiesen (Version 7). Die Aufnahmen hierzu wurden an demselben Tag etwa drei Stunden nach denen der ersten Beobachtungsepoche mit unveränderter Kamera hergestellt. Bei gleicher Genauigkeit zeigen die in voneinander unabhängigen Bündelausgleichungen berechneten Parameter der inneren Orientierung gute Übereinstimmung (Tab. 1: Version 1 und 7). Dies bestätigt die bisherigen Erfahrungen zur Reproduzierbarkeit der Kalibrierung der Rolleiflex SLX (PEIPE 1986).

2.3 Ermittlung der Deformationen und Vergleich der Meßverfahren

Aus den Bündelausgleichungen für die beiden Objektzustände ergeben sich dreidimensionale Punkthaufen, die auf denselben Koordinatenwerten der als stabil vorgegebenen Referenzpunkte zwangsfrei gelagert sind. Durch Differenzbildung erhält man die Deformationen an den Objektpunkten.

Da die Verformungen einerseits photogrammetrisch, andererseits mit einem Industriemeßsystem (IMS) erfaßt wurden, sollen die beiden Verfahren an diesem konkreten Beispiel kurz einander gegenübergestellt werden. Das Wild RMS 2000 bestand in der hier benutzten Konfiguration aus zwei elektronischen Theodoliten und einem on-line angeschlossenen Tischrechner zur Datenverarbeitung mit dem Softwarepaket MESCAL (KATOWSKI 1985).

Der Umfang der photogrammetrischen Ausrüstung (Kamera, Stative, Maßstäbe) war gering; eine Person genügte für den Transport der Geräte und die Arbeit vor Ort; die Aufnahmen wurden innerhalb weniger Minuten fertiggestellt. Der instrumentelle Aufwand beim IMS liegt um einiges höher; es sind zwei Beobachter notwendig; die Meßdauer betrug eine dreiviertel Stunde pro Epoche. Allerdings sind die Objektkoordinaten und die Deformationsbeträge direkt im Anschluß an die Messung verfügbar, während in der Regel mehrere Tage vergehen, bis die Resultate einer photogrammetrischen Auswertung vorliegen.

Die innere Genauigkeit der Punktbestimmung mit dem IMS konnte aus Doppelmessungen zu < 0.1 mm abgeschätzt werden. Bei einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation der photogrammetrisch bestimmten Objektkoordinaten auf das IMS-Punktfeld verblieben mittlere Restklaffungen von $DX = 0.08$ mm, $DY = 0.07$ mm und $DZ = 0.14$ mm (Maximalwert: 0.45 mm in Z).

Grundsätzlich sind Genauigkeit und Zuverlässigkeit beider Verfahren von der Geometrie und der Zahl der Strahlenschnitte im Objektpunkt abhängig. Der Vorteil der Photogrammetrie liegt darin, daß sich viele und günstige Strahlenschnitte ohne weiteres realisieren lassen, da man mit einer beliebigen Zahl von Aufnahmen von flexibel wählbaren Kamerastandorten aus in kurzer Zeit beliebig viele Objektpunkte erfassen kann.

Letztlich hängt die Entscheidung für ein Meßverfahren von der Aufgabenstellung und den Gegebenheiten vor Ort ab. Photogrammetrische und geodätische Techniken können sich dabei ergänzen. Dies zeigt sich zum Beispiel bei der Verbindung von elektronischem Theodolit und CCD-Kamera (GOTTWALD und BERNER 1987, WESTER-EBBINGHAUS 1987) und bei der Anwendung der Bündelausgleichung für die räumliche Orientierung von IMS-Theodoliten (ROBERTS und MOFFITT 1987).

3. Deformationen während der Fahrzeugproduktion

3.1 Aufgabenstellung und Deformationsanalyse

Eine Fahrzeugkarosserie wird zur Montage auf einer Fertigungsstraße kontinuierlich fortbewegt. Nach dem Einbau der Innenausstattung und der Türen wird sie in einem Gehänge transportiert. Motor, Achsen, Getriebe, Räder etc. werden montiert, und das fertige Automobil steht nach dem Absetzen bereit zur Auslieferung (Abb. 5). Aufgrund der unterschiedlichen Gewichte und Einbau-



Abb. 5 Meßaufnahme an Station 4
 (nach dem Absetzen)

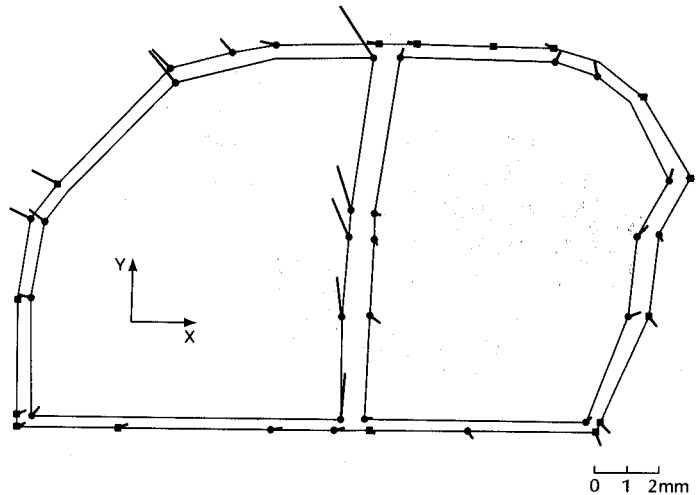


Abb. 6 Verformungen (XY-Ebene) zwischen den
 Meßstationen 2 und 4

orte der Montagekomponenten sowie der verschiedenen Fahrzeugaufleger im jeweiligen Fördersystem entstehen geringe und wechselnde elastische Verformungen der Karosserie. An vier ausgewählten Meßstationen sollte ihre Größe durch den Vergleich dreidimensionaler Punktfelder festgelegt werden. Da die Arbeiten in der laufenden Serie an einem normalen Kundenfahrzeug durchzuführen waren, ohne dessen Fertigung zu beeinträchtigen, kam als Aufnahmeverfahren nur die Photogrammetrie in Frage.

Die Bestimmung der 3D-Koordinaten von etwa 50 an der Karosserie markierten Punkten erfolgte in ähnlicher Weise und mit vergleichbarer Genauigkeit wie bei der oben beschriebenen Vermessung des Windlaufs (Kap. 2.2) und soll daher hier nicht näher erläutert werden (siehe BORUTTA und PEIPE 1986).

Allerdings standen keine als stabil vorgegebenen Referenzpunkte außerhalb des deformierten Objekts zur Verfügung, da sich das Fahrzeug während der Fertigung ständig weiterbewegte. Die aus dem Vergleich verschiedener Beobachtungsepochen abgeleiteten Objektpunktverschiebungen beziehen sich also auf ein gleiches, aber spezielles Datum. Falls Deformationen in den Lagerungspunkten vorhanden sind, so haben sie sich über das Verschiebungsfeld verteilt. Daher wird eine Gruppe von Meßpunkten am Fahrzeug ausgewählt, die als unverändert vermutet werden, und durch Anwendung statistischer Verfahren eine Aufteilung in verschobene und stabile Punkte vorgenommen. Auf letztere kann dann das gesamte Verschiebungsfeld transformiert werden, um die endgültigen Deformationsbeträge zu erhalten.

Abb. 6 zeigt als Beispiel das Ergebnis der Deformationsanalyse mit einem Verfahren auf der Grundlage robuster Schätzer (BORUTTA und PEIPE 1987). Die Verbindungslinien der Meßpunkte - quadratische Signaturen bezeichnen die gewählte Referenzpunktgruppe - beschreiben das Untersuchungsgebiet auf der Fahrerseite des Fahrzeugs: Schweller, Dachrahmen, vordere und hintere Säule, vordere und hintere Seitenwand und die Türen (siehe auch Abb. 5).

3.2 Digitale Bildauswertung

Bei der in Kap. 3.1 beschriebenen Auswertung wurde ein Planicomp C 100 zur Messung der Bildkoordinaten verwendet. Sieben Bilder einer Beobachtungsepoche wurden zusätzlich am Réseau-Scanner Rolleimetric RS 1 ausgemessen. Dieses Gerät ermöglicht die Digital-Wandlung analoger Bildvorlagen und ist als digitaler Monokomparator für die manuelle oder automatische Bestimmung signalisierter Punkte einsetzbar. Abb. 7 und 8 zeigen den Réseau-Scanner und das zugrundeliegende Meßprinzip (LUHMANN und WESTER-EBBINGHAUS 1986 und 1987).

Das auszuwertende Bild wird von einer Glasplatte mit engmaschigem Réseau (hier: 2 mm x 2 mm) bedeckt. Ein CCD-Matrix Sensor und die zugehörige Abbildungsoptik werden so gesteuert, daß jeweils eine Gittermasche auf die Sensorfläche abgebildet wird. Mit Hilfe der bekannten Koordinaten der vier Gitterkreuze kann der Inhalt des Teilbildes in das System des Abtast-Réseaus transformiert werden. An die mechanische Stabilität des Gerätes werden keine hohen Ansprüche gestellt, da sich die Messungen immer nur auf eine Gittermasche beziehen und nicht auf das ganze Bild, das erst durch Zusammenfügen der Teilbilder realisiert wird.

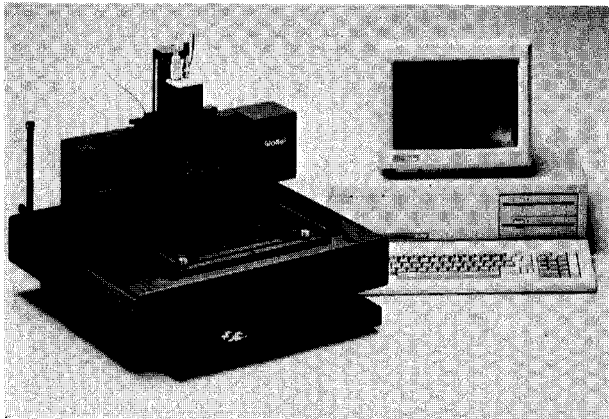


Abb. 7 Réseau-Scanner Rolleimetric RS 1

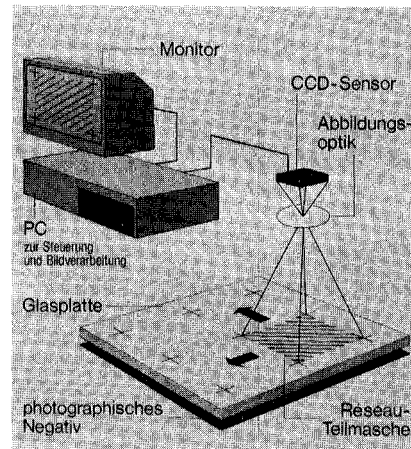


Abb. 8 Prinzip des Réseau-Scanning

Verwendet man den RS 1 als digitalen Monokomparator, so wird zunächst die Masche angefahren, in der sich zu messende Bildpunkte befinden, und es werden die vier umliegenden Gitterkreuze automatisch lokalisiert. Die Bildpunkte können dann manuell mit Hilfe eines Cursors eingestellt werden oder automatisch gemessen werden, wenn Näherungswerte für ihre Koordinaten vorhanden sind.

Bei dem vorliegenden Projekt wurden die Messungen manuell ausgeführt, da die Bildpunkte für eine automatische Bestimmung nicht durchweg geeignet waren. Dies galt vor allem für die zum Teil schlecht abgebildeten Réseaukreuze der verwendeten Teil-Meßkammer. Die Ergebnisse der anschließenden Bündelausgleichung sind in Tabelle 2 denen der Planicomp-Auswertung gegenübergestellt (LUHMANN und PEIPE 1987).

	RS 1	Planicomp
Standardabweichung der Bildkoordinatenmessungen $s_{x,y}$	3.0 μm	2.3 μm
Mittlerer räumlicher Punktfehler s_{XYZ}	0.41 mm	0.31 mm

Tab.2

Dabei ist die Standardabweichung der Bildkoordinatenmessungen von 3.0 μm im Zusammenhang mit der Bildelementgröße von 7.7 $\mu\text{m} \times 5.4 \mu\text{m}$ zu sehen. Es ist zu erwarten, daß die automatische Messung geeigneter Signale eine Steigerung der Genauigkeit mit sich bringen wird.

4. Deformationsmessung mit Hilfe der Motografie

Die Motografie (BAUM 1983) ist eine Methode zur Registrierung von Objektbewegungen und daher grundsätzlich für die Erfassung von Deformationen geeignet. Ausgewählte Punkte eines Objekts werden - z.B. mit Glühlämpchen - signalisiert und ihre Lageänderungen als Leuchtspuren photographisch aufgezeichnet. Ein Bewegungsablauf kann kontinuierlich in einer Aufnahme abgebildet werden. Durch photogrammetrische Auswertung erhält man Objektkoordinaten und aus diesen die Deformationen. Das folgende Beispiel soll die motografische Aufnahmetechnik demonstrieren.

Schwingung eines Auspuffendrohrs

Beim Anlassen des Motors, bei bestimmten Motordrehzahlen oder auch im Fahrbetrieb auf Holperstrecken gerät das Ende des Auspuffrohrs eines Fahrzeugs in vertikale Schwingungen. Die Größe einer solchen Bewegung, das heißt die Amplitude der Schwingung, wurde motografisch ermittelt. Hierzu wurde ein Glühlämpchen auf einer Schelle befestigt und diese am Auspuffrohr angebracht, so daß die Signalisierung durch die Hitzeentwicklung im Auspuff nicht direkt beeinflußt werden

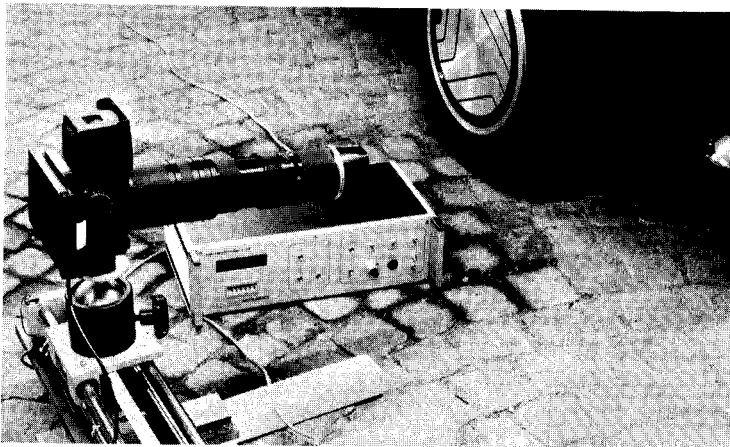


Abb. 9 Aufnahmeanordnung zur Aufzeichnung von Auspuffschwingungen

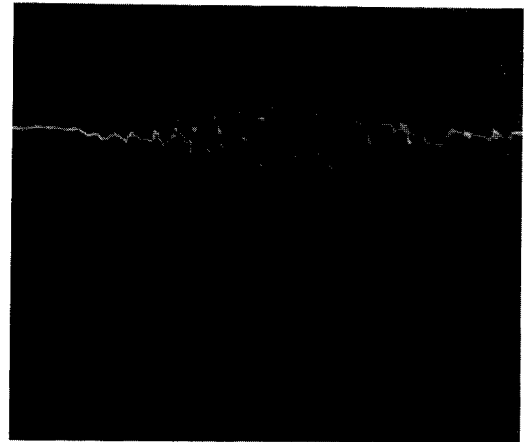


Abb. 10 Bewegung des Auspuffrohrs beim Starten eines Autos

konnte. In Abb. 9 ist am rechten Bildrand das Ende des Auspuffrohrs mit dem aufmontierten Lämpchen zu erkennen. Zur Registrierung der Deformationen wurde eine ROLLEIFLEX SLX mit 250 mm - Objektiv und Zwischenringen verwendet. Bei einer Aufnahmeentfernung von 0.8 m ergab sich ein Bildmaßstab von 1 : 1.5 . Die Kamera war auf einem Linearversteller befestigt und wurde während der Objektbewegung gleichmäßig verschoben, da sich sonst die aufgezeichneten Leuchtspuren zu stark überlagern würden (GÖTHNER und PEIPE 1987). Bei geöffnetem Verschluss der Kamera wurde die Auspuffschwingung ausmeßbar abgebildet (Abb. 10).

LITERATURVERZEICHNIS

- BAUM, E., 1983: Motografie II. Forschungsbericht Nr. 324 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Dortmund, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven
- BORUTTA, H., PEIPE, J., 1986: Deformation Analysis of Three-Dimensional Photogrammetric Point Fields. Int. Arch. Photogr. & Rem.Sensing Vol. 26/5, 165-175, Can. Inst. Surv. Ottawa
- BORUTTA, H., PEIPE, J., 1987: Photogrammetrische Erfassung von Deformationen im Automobilbau. AVN (im Druck)
- CLAUS, M., 1986: Digital Image Correlation with the Planicomp System. Pres. Paper, ISPRS Commission V Symposium, Ottawa
- FRASER, C.S., BROWN, D.C., 1986: Industrial Photogrammetry — New Developments and Recent Applications. Photogrammetric Record 12, 197-217
- GOTTWALD, R., BERNER, W., 1987: The New KERN "System for Positioning and Automated Coordinate Evaluation" — Advanced Technology for Automated 3-D-Coordinate Determination. Proceedings ASPRS-ACSM Annual Convention, Baltimore, Vol. 3, 260-266
- GÖTHNER, K., PEIPE, J., 1987: Registrierung und Analyse von Schwingungen mit Hilfe der Motografie. In: Symposium Motografie (hrsg. E. Dorrer und J. Peipe), Schriftenreihe Univ. Studiengang Verm., Univ. der Bw München, Heft 23 (in Vorbereitung)
- HELLMEIER, H.-J., 1984: Industriephotogrammetrie — von der 3-Stufen-Lösung zum Real-Time-Verfahren. AVN 91, 325-333
- KATOWSKI, O., 1985: RMS 2000 — ein System zum berührungslosen Messen großer Objekte. AVN 92, 221-229
- KOTOWSKI, R., 1984: Zur Réseaukorrektur von systematischen Bildfehlern. BuL 52, 96-101
- KRAUS, K., 1984: Gegenwärtiger Leistungsstand der Ingenieurphotogrammetrie. Ingenieurvermessung 84 — Beiträge zum IX. Int. Kurs für Ing.verm., Graz (hrsg. K. Rinner, G. Schelling, G. Brandstätter), A 16/ 1-12, Bonn: F. Dümmers Verlag
- KRUCK, E., 1984: BINGO : Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieurwendungen — Möglichkeiten und praktische Ergebnisse. Int. Arch. Photogr. & Rem. Sensing Vol. 25/A5, 471-480, XV. ISPRS-Kongreß Rio de Janeiro
- LUHMANN, T., PEIPE, J., 1987: A Réseau-Scanning System in Practice — First Experiences. Vortrag, Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken
- LUHMANN, T., WESTER-EBBINGHAUS, W., 1986: Rolleimetric RS — A New Digital Image Processing System. ISPRS-Symposium Commission II, Baltimore

- LUHMANN, T., WESTER-EBBINGHAUS, W., 1987: Digital Image Processing by means of Réseau-Scanning. Vortrag, 41. Photogrammetrische Woche, Stuttgart (in diesem Band)
- MARUYASU, T., OSHIMA, T., 1966: Stereo-Cameras Designed for Measurement of Objects in Motion and Some Examples of its Actual Use. Pres. Paper, ISP Comm. V Symposium, Tokyo
- MÜLLER, F., STEPHANI, M., 1984: Effiziente Berücksichtigung geodätischer Beobachtungen und Objektinformationen in der Bündelblockausgleichung. Int. Arch. Photogr. & Rem. Sensing Vol. 25/A5, 558-569, XV. ISPRS-Kongreß Rio de Janeiro
- PEIPE, J., 1986: Interior Orientation Stability of a Partial Metric Camera — An Experimental Study. Int. Arch. Photogr. & Rem. Sensing Vol. 26/1, 171-178, ESA Noordwijk
- PELZER, H. (Hrsg.), 1987: Ingenieurvermessung : Deformationsmessungen; Massenberechnung. Ergebnisse des AK 6 des DVW. Stuttgart: Wittwer (Verm. bei K. Wittwer, Bd. 15)
- ROBERTS, T.P., MOFFITT, N.M., 1987: Kern System for Positioning and Automated Coordinate Evaluation — A Real-Time System for Industrial Measurement. Proceedings ASPRS-ACSM Annual Convention, Baltimore, Vol. 7, 57-61
- SCHOLZE, F., TÖPPLER, J., VOSS, G., 1975: Anwendung der Photogrammetrie im Automobilbau. Jenaer Rundschau 20, 83-88
- WAHL, M., 1983: Die Industriephotogrammetrie in den Renault-Werken. Jenaer Rundschau 28, 189-192
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1983: Ein photogrammetrisches System für Sonderanwendungen. BuL 51, 118-128
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1985: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. ZfV 110, 101-111
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1986: Ingenieur-Photogrammetrie — Mathematische Ansätze und instrumentelle Voraussetzungen. XVIII. FIG-Kongreß, Nr. 611.2, Toronto
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1987: High Resolution Digital Object Recording with Small Format Matrix Sensors. Vortrag, Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken
- WESTER-EBBINGHAUS, W., WEZEL, U.E., 1985: Photogrammetrische Vermessung von Crash-Fahrzeugen. Automobil-Industrie 30, 49-53
- WESTER-EBBINGHAUS, W., WEZEL, U.E., 1986: Photogrammetric Deformation Measurement of Crash Vehicles. Passenger Comfort, Convenience and Safety: Test Tools and Procedures. P-174 SAE-Conference, Nr. 860207, 183-192, Detroit/Michigan

ZUSAMMENFASSUNG

Die Photogrammetrie ist ein effizientes Verfahren für die industrielle Meßtechnik. Ein flexibles Aufnahmeinstrumentarium und der Ansatz der Bündeltriangulation mit simultaner Kalibrierung der Aufnahmekammer bieten bestmögliche Voraussetzungen für eine präzise und zuverlässige dreidimensionale Punktbestimmung im Nahbereich. Deformationen lassen sich aus dem Vergleich räumlicher Punktfelder, die unterschiedliche Objektzustände repräsentieren, ableiten. Die Vorgehensweise wird an zwei Beispielen aus dem Automobilbau erläutert.

Der Einsatz des Réseau-Scanners Rolleimetric RS 1 als digitaler Monokomparator für die Messung signalisierter Punkte wird beschrieben. Bei manueller Messung wird eine Standardabweichung der Bildkoordinaten nach der Bündelausgleichung von 3 µm erreicht. Die automatische Lokalisierung gut definierter Ziele läßt eine höhere Genauigkeit erwarten.

Die Motografie, eine Methode zur Aufzeichnung von Objektbewegungen mit Hilfe von Leuchtspuren, kann zur kontinuierlichen Erfassung von Deformationsvorgängen benutzt werden.

MEASUREMENT OF CAR-BODY DEFORMATIONS BY CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY

ABSTRACT

Close-range photogrammetry is a suitable measuring tool in industry. The combination of flexible recording technique and self-calibrating bundle adjustment effects a precise and reliable three-dimensional point determination. The comparison of spatial point fields representing different epochs allows the calculation of deformations. The procedure used is outlined by two examples relating to the construction of automobiles.

The application of the Réseau-Scanner Rolleimetric RS 1 as a digital monocomparator to the measurement of signalized points is described. A standard deviation of image coordinates

measured manually $s_{x,y} = 3.0 \mu\text{m}$ after bundle adjustment was achieved. The automatic determination of optimized $s_{x,y}$ targets will lead to higher accuracy.

Motography as a method for recording movements of an object by means of light traces can be applied to the continuous registration of deformations.

Dipl.-Ing. J. Peipe
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
D-8014 Neubiberg