

Kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung bei der Fusion terrestrischer Laserscannerdaten, Panorama- und zentralperspektivischer Bilddaten

DANILO SCHNEIDER*

Zusammenfassung: Bisherige Ansätze zur Kombination terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten verwenden die Bildinformationen meist nur sekundär (z.B. Kolorierung von Punktwolken bzw. Texturierung). Bei konsequenter Nutzung der komplementären Eigenschaften beider Sensortypen können sich jedoch Laserscanner und Kamera in der Auswertung gegenseitig stützen. Zu diesem Zweck wurde eine Bündelblockausgleichung für die gemeinsame Ausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bild- bzw. Panoramabilddaten, auf Basis der jeweiligen geometrischen Modelle, entwickelt. Da es sich um unterschiedliche Typen von Beobachtungen handelt, ist es notwendig, den Messungen verschiedene Gewichte zuzuordnen (stochastisches Modell). Zu diesem Zweck wurde das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung implementiert. Dadurch werden die jeweiligen Eigenschaften der Messdaten (z.B. laterale Genauigkeit der Bildkoordinaten, Zuverlässigkeit der Streckenmessung) genutzt, um die 3D-Koordinaten von Objektpunkten zu bestimmen und gleichzeitig die beteiligten Messgeräte zu kalibrieren (Selbstkalibrierung). Außerdem wird eine Aussage über die Genauigkeit der beteiligten Messungen möglich und meist eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht. Der vorliegende Beitrag beschreibt die zugrunde liegenden geometrischen Modelle, sowie die kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung. Es werden erste Ergebnisse, basierend auf Daten, die in einer 360°-Testumgebung aufgenommen worden sind, vorgestellt und bewertet.

1 Einleitung

Die kombinierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten wird heutzutage von mehreren Softwarepaketen unterstützt, da die Kombination dreidimensionaler Punktwolken und hochauflösender Bilder aufgrund der weitgehend komplementären Natur der Daten viel versprechende Möglichkeiten bietet. Aus diesem Grunde wird von mehreren Herstellern terrestrischer Laserscanner eine digitale Kamera auch hardwareseitig im Laserscannersystem integriert (MULSOW et.al., 2004). Meistens stellt dabei der Laserscanner die Hauptkomponente dar, während die Bildinformationen nur sekundär zur nachträglichen Kolorierung der 3D-Punktwolke, zur Texturierung einer Oberfläche oder zur besseren Orientierung innerhalb der Laserscanner-Daten dienen. Weiterhin wurde in bisherigen Ansätzen die Verwendung von Bildern zur automatischen Registrierung von Laserscannerdaten vorgeschlagen (AL-MANASIR & FRASER, 2006; DOLD & BRENNER, 2006), sowie die automatische Generierung von Orthobildern auf Grundlage von Bild- und Entfernungsdaten beschrieben. Bei (REULKE, 2006) werden die Entfernungsdaten anstelle des Laserscanners mit einer distanzmessenden Kamera aufgenommen.

* Danilo Schneider, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, e-mail: danilo.schneider@tu-dresden.de

Eine kombinierte Auswertung terrestrischer Laserscanner und photogrammetrischer Bilddaten bietet jedoch ein weitaus größeres Potenzial (JANSA et.al., 2004; WENDT & HEIPKE, 2006). Bei konsequenter Nutzung der komplementären Eigenschaften der beiden Sensortypen im Rahmen einer gemeinsamen Ausgleichung können sich Laserscanner und Kamera bei der Bestimmung von Objektgeometrien und bei der Kalibrierung gegenseitig stützen (ULLRICH, et.al., 2003).

Besonders viel versprechend ist die Verwendung hochauflösender Kameras in einem kombinierten System, da damit höhere Genauigkeiten senkrecht zur Aufnahme- richtung zu erwarten sind, als die Winkelmessgenauigkeit des Laserscanners. Angepasst an die Funktionsweise der meisten Scanner, die ein horizontales Gesichtsfeld von 360° abdecken, bietet sich insbesondere die Nutzung von Panoramakameras an. Panoramakameras besitzen oft eine hohe Auflösung und damit ein großes Genauigkeitspotenzial bei der Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten (LUHMANN & TECKLENBURG, 2004; SCHNEIDER & MAAS, 2005)

Basierend auf den geometrischen Modellen von Laserscanner und Kamera, sowie auf dem am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden entwickelten geometrischen Modell einer Panoramakamera (SCHNEIDER & MAAS, 2006) wurde eine kombinierte Bündelblockausgleichung für die gemeinsame Ausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bild- bzw. Panoramabilddaten implementiert.

Da es sich dabei um verschiedene Typen von Beobachtungen handelt, ist es notwendig, den unterschiedlichen Beobachtungen bei der gemeinsamen Ausgleichung unterschiedliche Gewichte zuzuordnen. Dies kann entweder in Form fester Werte erfolgen oder die Gewichte werden im Zuge der Ausgleichung durch eine Varianzkomponentenschätzung automatisch bestimmt, wodurch die jeweiligen Eigenschaften der beteiligten Messgeräte optimal ausgenutzt werden und zudem oft eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht wird (KLEIN, 2001; SIEG & HIRSCH, 2000). Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung bei der kombinierten Ausgleichung von Laserscanner- und Bilddaten werden auch in (HARING, et. al., 2003) vorgestellt.

In diesem Beitrag wird die Implementierung der kombinierten Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung vorgestellt und anhand mehrerer Laserscanneraufnahmen, Bilder und Panoramabilder eines 360°-Testfeldes an der TU Dresden analysiert.

2 Geometrische Modelle

Vorraussetzung für die gemeinsame Auswertung verschiedener Messgeräte (Kamera, Panoramakamera, Laserscanner) ist die Kenntnis der zugrunde liegenden geometrischen Modelle sowie deren mathematische Beschreibung. Dies ermöglicht zum einen die Berechnung von Objektinformationen (z.B. Koordinaten von Objektpunkten) unter Nutzung der verschiedenen Messungen (Bildkoordinaten, Strecke, Winkel) und zum anderen erlaubt es die Kalibrierung der Messgeräte sofern die Modelle entsprechende Zusatzparameter beinhalten.

Kameras mit Flächensensoren entsprechen dem bekannten Modell der Zentralperspektive (vgl. Abb. 1, links). Mathematisch wird dieser Zusammenhang durch die Kollinearitätsgleichungen beschrieben. Üblicherweise werden diese Abbildungsgleichungen durch Korrekturterme erweitert, die zusätzliche Parameter, u.a. zur Korrektur der Objektverzerrung, enthalten.

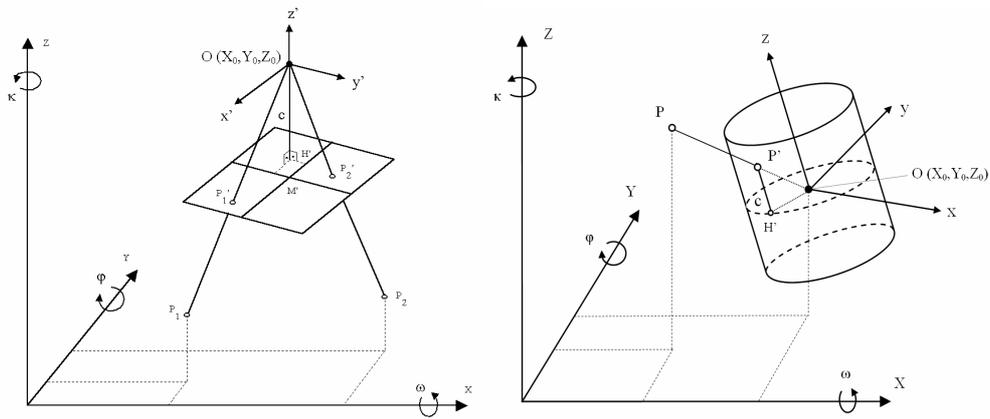


Abb. 1: Geometrisches Modell zentralperspektivischer und panoramischer Bilddaten

Panoramakameras erlauben die Aufnahme sehr großer horizontaler Öffnungswinkel (bis zu 360°) in einem Bild, was besonders für die Aufnahme von Räumen oder komplexen Anlagen von Vorteil ist. Technisch wird dies meist durch eine rotierende Sensorzeile realisiert. Panoramakameras bieten ein hohes Auflösungs- und damit auch Genauigkeitspotenzial. Die Panoramaabbildung lässt sich jedoch nur noch in einer Bildkoordinatenrichtung mit dem Modell der Zentralperspektive beschreiben. Geometrisch lässt sich der Abbildungsvorgang durch die Projektion auf einen Zylindermantel (Abb. 1, rechts) darstellen (AMIRI PARIAN, 2007; LUHMANN & TECKLENBURG, 2004; SCHNEIDER & MAAS 2006). Die Abbildungsgleichungen für zentralperspektivische und panoramische Bilder lauten wie folgt:

$$\begin{aligned}
 x' &= x_0' - \frac{c \cdot x}{z} + dx' & x'_{pano} &= x_0' - c \cdot \arctan\left(\frac{-y}{x}\right) + dx'_{pano} \\
 y' &= y_0' - \frac{c \cdot y}{z} + dy' & y'_{pano} &= y_0' - \frac{c \cdot z}{\sqrt{x^2 + y^2}} + dy'_{pano}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

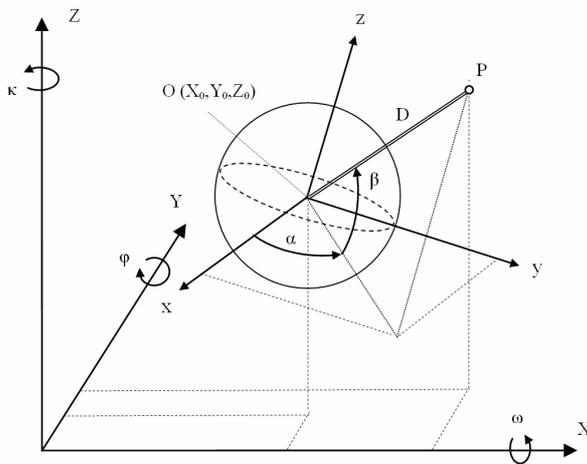
Die Umrechnung in ein einheitliches übergeordnetes Koordinatensystem erfolgt durch:

$$\begin{aligned}
 x &= r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \\
 y &= r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \\
 z &= r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Die Additionsterme dx' , dy' sowie dx'_{pano} und dy'_{pano} enthalten Zusatzparameter zur Korrektur systematischer Effekte, die durch die physikalischen Eigenschaften der Aufnahmegерäte hervorgerufen werden.

Ursprüngliche Messdaten terrestrischer Laserscanner sind sphärische Koordinaten, d.h. Strecke, Horizontal- und Vertikalwinkel. Entsprechend lässt sich das geometrische Modell durch die Umrechnung kartesischer in sphärische Koordinaten (Gleichung 3) ausdrücken. Durch die Anwendung von Gleichung 2 wird das lokale Laserscanner-Koordinatensystem in das gemeinsame übergeordnete System integriert.

Ebenso wie beim Kameramodell können beim geometrischen Modell terrestrischer Laserscanner Zusatzparameter in den Korrekturtermen dD , $d\alpha$ und $d\beta$ berücksichtigt werden, die individuelle Eigenschaften der jeweiligen Scannertypen erfassen und deren Kalibrierung erlauben. Jedoch besteht bei der Kalibrierung terrestrischer Laserscanner die Schwierigkeit, dass bereits durch den Hersteller im Scanner geometrische Korrekturen angebracht werden und das zu Grunde liegende geometrische Modell nicht bekannt ist. Entsprechend lassen sich meist keine signifikanten systematischen Effekte in den Residuen der Beobachtungen erkennen. Bisher wurde deshalb nur ein Maßstabs- (k_s) und ein Offset-Parameter (k_0) im geometrischen Modell verwendet (Gleichung 4), jedoch keine Korrekturen an Horizontal- und Vertikalwinkel angebracht.



$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + dD$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + d\alpha \quad (3)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) + d\beta$$

$$dD = k_s \cdot D + k_0 \quad (4)$$

Abb. 2: Geometrisches Modell Laserscanner

3 Integrierte Bündelblockausgleichung

Bei der Bündelblockausgleichung im ursprünglichen Sinne werden beliebig viele im Raum angeordnete Bilder simultan rechnerisch orientiert. Als Messwerte dienen die im Bild gemessenen Koordinaten von Objektpunkten. Resultat der Berechnung sind neben den Orientierungselementen der Bilder auch die Koordinaten der Objektpunkte. Erweitert man diesen Ansatz auf die kombinierte Bündelblockausgleichung, bedeutet das die gleichzeitige rechnerische Einpassung aller Aufnahmen (Bilder, Panoramas, Punktwolken) der beteiligten Messgeräte (Kamera, Panoramakamera, Laserscanner). Die Berechnung erfolgt unter der Forderung, dass sich alle Strahlen zwischen Objektpunkt und Messgerät optimal in einem Objektpunkt schneiden.

Als Beobachtungen gehen die sphärischen Koordinaten von mit dem Laserscanner gemessenen Objektpunkten und die mit einer Kamera bzw. Panoramakamera gemessenen Bildkoordinaten in eine gemeinsame Koeffizientenmatrix ein. Abb. 3 (links) zeigt die Struktur einer Koeffizientenmatrix eines synthetischen Beispiels. Die Berechnung erfolgt als Ausgleichung nach kleinsten Quadraten (MkQ-Schätzung), das Resultat sind die Koordinaten der Objektpunkte, die Position und Orientierung aller beteiligten Aufnahmen, die Kalibrierparameter der Aufnahmegeräte und statistische Größen zur Beurteilung der Korrelationen und Genauigkeiten.

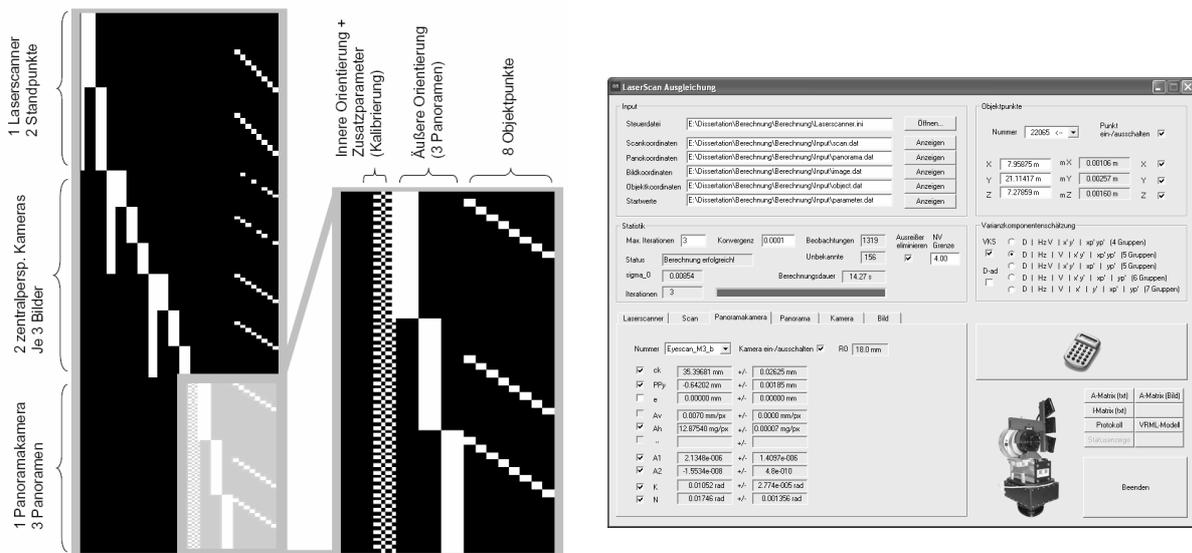


Abb. 3: Struktur der Designmatrix (Beispiel) und Benutzerdialog

Zur Berechnung der Bündelblockausgleichung wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden eine Software entwickelt, die außerdem den Import der entsprechenden Koordinatendateien (sphärische Koordinaten der Laserscans und Bildkoordinaten), den Import einer Parameterdatei mit Näherungswerten für die zu schätzenden Parameter, sowie den Export einer Ergebnisdatei und einer VRML-Datei erlaubt. Während die Ergebnisdatei alle Berechnungsergebnisse und statistischen Größen enthält, ist die VRML-Datei eine grafische Visualisierung des Resultates. Alle Einstellungen werden vor der Berechnung der Ausgleichung in einem grafischen Benutzerdialog angezeigt und können gegebenenfalls verändert werden (vgl. Abb. 3, rechts). Zur Ausreißerelimination wurde bisher das Data-snooping-Verfahren nach (BAARDA, 1968) in die Berechnung integriert.

Zum Testen der kombinierten Bündelblockausgleichung wurde in einem Innenhof der TU Dresden ein 360°-Testfeld eingerichtet. Der Innenhof ist ca. 45 × 45 m² groß, an die etwa 20 m hohen Fassaden der angrenzenden Gebäude wurden ca. 100 retro-reflektierende Zielmarken verteilt. Für die Laserscans wurde ein Riegl LMS-Z420i verwendet, der softwareseitig die Bestimmung der Zielmarkenmittelpunkte mittels Schwerpunktoperator im Intensitätsbild erlaubt. Weiterhin wurden mehrere Bilder mit der Panoramakamera Eyescan M3D, sowie zahlreiche Bilder mit den digitalen Spiegelreflexkameras Kodak DCS 14n und Nikon D 100 aufgenommen. Die Zielmarkenmittelpunkte wurden in den mit Blitzlicht aufgenommenen Bildern mit Schwerpunkt- bzw. Ellipsenoperator gemessen.

3.1 Beispiel 1

Dieses Testbeispiel zeigt die Berechnung der räumlichen Koordinaten von 10 Objektpunkten an einer Fassade des o.g. Testfeldes im Rahmen der kombinierten Bündelblockausgleichung mit insgesamt 2 Laserscanner-Standpunkten und 2 Standpunkten der Panoramakamera. Die Aufnahmen wurden schrittweise in verschiedenen Konstellationen der Berechnung hinzugefügt und die Standardabweichung der ausgeglichenen Objektkoordinaten analysiert.

Tab. 1: Berechnungsergebnisse für verschiedene Aufnahmekonstellationen

Anzahl Scans	Anzahl Panoramen	$\hat{\sigma}_D$ (mm)	$\hat{\sigma}_{\alpha,\beta}$ (mgon)	$\hat{\sigma}_{x',y'}$ (pixel)	RMS_X (mm)	RMS_Y (mm)	RMS_Z (mm)
1	–	7,45	4,92	–	2,82	6,83	3,36
1*	–	5,56	4,91	–	2,55	5,22	2,93
–	2	–	–	0,55	4,18	14,15	4,99
1	1	5,56	4,85	0,59	2,25	5,07	2,61
1	2	5,84	4,88	0,62	1,96	4,81	2,51
2	–	6,87	6,30	–	2,53	4,83	2,95
2	1	6,48	5,65	0,68	2,12	4,47	2,51
2	2	6,21	5,42	0,65	1,91	4,33	1,88

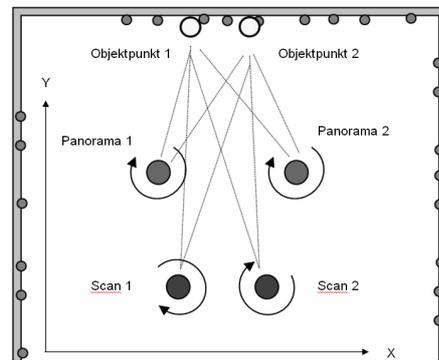


Abb. 4: Aufnahmekonstellation (schematisch, Grundriss der Testumgebung)

Durch die Berechnung der Objektkoordinaten auf Grundlage von nur 2 Panoramabildern wurde in dem vorliegenden Beispiel eine schlechtere Genauigkeit (v.a. in Aufnahmerichtung Y) erreicht als mit einer Laserscanneraufnahme, was mit einer relativ schlechten Strahlenschnittgeometrie zu begründen ist. Außerdem konnte das Potenzial der hochauflösenden Panoramakamera nicht ausgenutzt werden, da die signalisierten Punkte nicht aktiv beleuchtet wurden und damit die Bildkoordinatenmessung als kritisch zu bewerten ist. Dennoch wird bei einer Kombination beider Geräte (bereits bei einem Scan und einer Panoramaaufnahme) eine Genauigkeitssteigerung erreicht. Generell zeigt sich, dass das Hinzufügen weiterer Aufnahmen (Scan und/oder Panorama) eine Verbesserung der Genauigkeit (vgl. Tab. 1: RMS der Standardabweichungen der geschätzten Objektpunktkoordinaten) bewirkt. Während die Messungen des Laserscanners die Genauigkeit in Tiefenrichtung verbessern, bewirken die Messwerte der Panoramakamera eine Steigerung der Genauigkeit in Lagerichtung. Werden weitere Aufnahmen hinzugefügt, verringern sich die RMS-Werte entsprechend, wenn auf gute Strahlenschnittwinkel geachtet wird. Unabhängig von diesen Berechnungsergebnissen ist zu erwähnen, dass die Laserscannerdaten bereits gute Näherungswerte für die Objektkoordinaten liefern, zudem das photogrammetrische Netz insbesondere durch die Streckenmessung stützen und damit auch die Zuverlässigkeit der Koordinatenbestimmung erhöhen.

3.2 Beispiel 2

Ein weiteres Berechnungsbeispiel soll zeigen, ob frei gehaltene Bilder einer Spiegelreflexkamera die Bilder einer Panoramakamera gleichwertig ersetzen können bzw. ob durch die zusätzliche Verwendung zentralperspektivischer Bilder eine Genauigkeitssteigerung möglich ist. Dazu wurden neben 4 Laserscans und 5 Panoramabildern insgesamt 62 Bilder mit der digitalen Spiegelreflexkamera Kodak DCS 14n aufgenommen. Die Anordnung der Aufnahmen erfolgte im Hinblick auf eine gute Strahlenschnittgeometrie. Außerdem wurden weitere Bilder der Kamera Nikon D100, die fest auf dem Riegl Laserscanner fixiert ist, in die Berechnung integriert. Abbildung 5 zeigt die Aufnahmekonfiguration schematisch.

* mit Berücksichtigung eines Maßstabs- und Offsetparameters entspr. Gleichung (4)

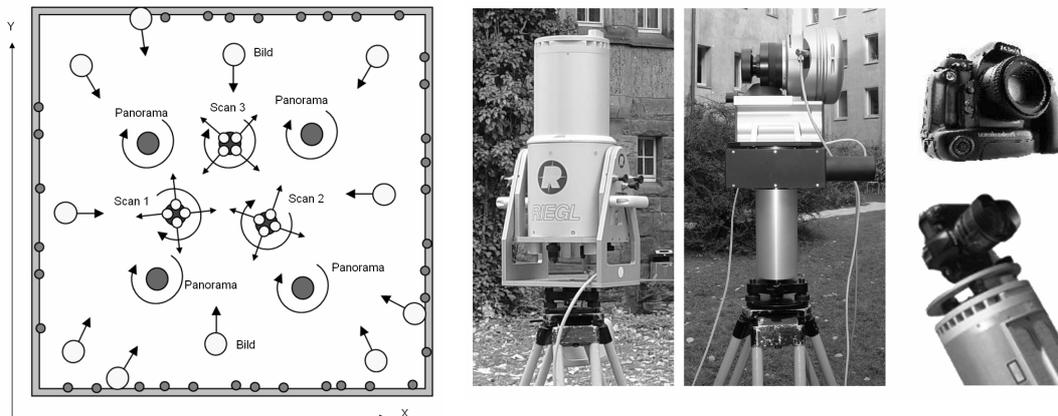


Abb. 5: Aufnahmekonstellation (schematisch, Grundriss der Testumgebung) und beteiligte Geräte (Riegl Laserscanner Z420i, Panoramakamera Eyescan M3, Kodak DCS 14n, Nikon D100)

Tab. 2: Berechnungsergebnisse für verschiedene Aufnahmekonstellation

Anzahl Scans	Anzahl Panoramamen	Anzahl zentralp. Bilder		Unbek. Objektpunkte	$\hat{\sigma}_D$ (mm)	$\hat{\sigma}_{\alpha,\beta}$ (mgon)	$\hat{\sigma}_{x_p',y_p'}$ (pixel)	$\hat{\sigma}_{x',y'}$ (pixel)	RMS _X (mm)	RMS _Y (mm)	RMS _Z (mm)
		Kodak	Nikon								
3	–	–	–	35	5,22	5,62	–	–	2,28	2,19	1,75
3	4	–	–	35	5,19	5,45	0,59	–	1,89	1,67	1,26
3	–	18	–	35	5,27	5,76	–	0,30	1,86	2,08	1,55
3	–	–	18	35	5,19	5,70	–	0,18	1,81	2,04	1,52
3	4	18	–	35	5,23	5,55	0,59	0,29	1,51	1,62	1,12
3	4	–	18	35	5,20	5,63	0,60	0,19	1,50	1,61	1,12
3	–	18	18	35	5,24	5,79	–	0,24	1,80	2,03	1,49
4	5	62	42	8	5,59	5,91	0,63	0,25	0,49	1,12	0,60

Die Ergebnisse dieses Berechnungsbeispiels (Tab. 2) zeigen, dass die Berücksichtigung zusätzlicher Aufnahmen (Panoramen oder zentralperspektivische Bilder) die Genauigkeit der berechneten Ergebnisse generell verbessern können. In der Praxis könnte dies bedeuten, dass der Nutzer während der Aufnahme der Laserscans zusätzliche Bilder unter günstigen Schnittwinkeln aufnimmt und diese später in die Auswertung integriert. In gleicher Weise können die Bilder einer auf dem Scanner montierten Kamera (Nikon D100) bzw. einer im Scanner integrierten Kamera zu einer Verbesserung der Genauigkeit beitragen. Die hohe Anzahl zusätzlicher Bilder der letzten Berechnung in Tabelle 2 ist zwar in der Praxis nicht effektiv, zeigt aber das Genauigkeitspotenzial der kombinierten Bündelblockausgleichung.

4 Varianzkomponentenschätzung

Bei der kombinierten Bündelblockausgleichung werden unterschiedliche Typen von Beobachtungen gleichzeitig verwendet, um die unbekannt Parameter zu schätzen. Aus diesen Gründen ist es notwendig, den Beobachtungsgruppen (Bildkoordinaten in zentralperspektivischen und panoramischen Bilddaten, Distanzmessung des Laserscanners, Winkelmessung des Laser-

scanners) angemessene Gewichte zuzuordnen. Die Definition von Gewichten kann dabei in Form fester Werte erfolgen, wenn a priori Standardabweichungen der Messungen, z.B. aus Herstellerangaben, oder Erfahrungswerte vorliegen. Dabei wird jedoch der Informationsgehalt der Beobachtungen nicht voll ausgeschöpft. Durch das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung ist es möglich, optimale Gewichte für die einzelnen Beobachtungsgruppen sowie die Standardabweichungen der Beobachtungen im Zuge der eigentlichen Bündelblockausgleichung zu schätzen. Dadurch wird zum einen eine Aussage über die Genauigkeit der einzelnen Messungen möglich und zum anderen wird meist eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht, da die jeweiligen Eigenschaften der beteiligten Messgeräte optimal ausgenutzt werden (KLEIN, 2001; SIEG & HIRSCH, 2000). Werden die Horizontal- und die Vertikalwinkelmessung des Laserscanners, sowie die horizontalen und vertikalen Bildkoordinaten der Panoramakamera in verschiedene Beobachtungsgruppen aufgeteilt, lassen sich zusätzlich Aussagen über die Charakteristik der Messgeräte treffen. Darüber hinaus können auch Messgeräte mit unterschiedlichen Genauigkeiten berücksichtigt werden.

Die Gewichte p_i der Beobachtungen werden durch den Quotienten der Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 und der Varianz der Beobachtung σ_i^2 , die meist aus Herstellerangaben oder Erfahrungswerten entnommen werden, festgelegt. Für σ_0 wird ein fester Wert vorgegeben (z.B. 0,01 in den folgenden Berechnungsbeispielen). Die Standardabweichung der Ausgleichung $\hat{\sigma}_0$ zeigt dann, ob die Gewichte bzw. die a-priori-Standardabweichungen der Beobachtungen zu pessimistisch ($\hat{\sigma}_0 < \sigma_0$) oder zu optimistisch ($\hat{\sigma}_0 > \sigma_0$) veranschlagt wurden. Bei der Verarbeitung von Beobachtungen gleichen Typs berechnet sich die Varianz-Kovarianz-Matrix Σ aus dem Produkt σ_0^2 und der Kofaktor-Matrix Q . Werden unterschiedliche Beobachtungsgruppen gemeinsam ausgeglichen wird die Matrix Σ in Komponenten $\Sigma_i = \sigma_i^2 Q_i$ aufgespalten. Die Faktoren σ_i^2 sind die zu schätzenden Varianzkomponenten und repräsentieren die a-priori-Messunsicherheiten der einzelnen Beobachtungsgruppen. Die Berechnung erfolgt nach (KOCH, 1997).

Tab. 3: Kombinierten Bündelblockausgleichung mit unterschiedlichen stochastischen Modellen

Berechnungsbeispiel	Bemerkung zur Gewichtung	$\hat{\sigma}_0$	RMS_X (mm)	RMS_Y (mm)	RMS_Z (mm)	RMS_{XYZ} (mm)
1	Überbetonung Streckenmessung	0,01309	1,78	1,78	2,03	3,23
2	Überbetonung Winkelmessung	0,01479	2,03	2,62	1,33	3,57
3	Überbetonung Panorama	0,01320	2,12	2,31	1,32	3,40
4	Überbetonung zentralpersp. Bilder	0,01061	2,68	3,05	1,94	4,50
5	Ausgewogen, aber zu pessimistisch	0,00573	1,58	1,71	1,16	2,60
6	Ausgewogen, aber zu optimistisch	0,02296	1,63	1,83	1,15	2,71
7	Sehr gute feste Gewichte	0,01046	1,59	1,74	1,19	2,64
8 (VKS)	VKS, 4 Gruppen	0,01000	1,51	1,64	1,13	2,50
9 (VKS)	VKS, 5 Gruppen (α , β getrennt)	0,01000	1,56	1,68	1,04	2,52
10 (VKS)	VKS, 5 Gruppen (x_p , y_p getrennt)	0,01000	1,47	1,60	1,16	2,46
11 (VKS)	VKS, 6 Gruppen	0,01000	1,52	1,63	1,05	2,46
12 (VKS)	VKS, 7 Gruppen	0,01000	1,52	1,63	1,05	2,46

In Tab. 3 bzw. Tab. 4 sind die Ergebnisse 12 verschiedener Berechnungsbeispiele aufgeführt, die ersten 4 mit ungünstiger Gewichtung der Beobachtungen. Die Gewichtung in Beispiel 5 und 6 ist zwar ausgewogen aber insgesamt zu pessimistisch bzw. zu optimistisch. In Berechnungsbeispiel 7 wurden ausgewogene realistische Gewichte als feste Werte vorgegeben. In die Berechnungen 8-12 wurde eine Varianzkomponentenschätzung integriert, jeweils mit unterschiedlichen Gruppierungen der Beobachtungen. Prinzipiell ist zu erkennen, dass die Varianzkomponentenschätzung zur Verbesserung der Genauigkeit beitragen kann, vor allem dann, wenn die Genauigkeiten der beteiligten Messgeräte nur unzureichend a priori bekannt sind.

Tab. 4: Kombinierten Bündelblockausgleichung mit unterschiedlichen stochastischen Modellen (in Klammern: Standardabweichung für die a priori Festlegung der Beobachtungsgewichte, darunter die geschätzten a-priori-Standardabweichungen der Beobachtungen)

Standardabw. der Beobach- tungen	Unausgewogene Gewichte				Zu optimistisch/ zu pessimistisch			Varianzkomponentenschätzung*				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Strecke in mm	(2,0) 2,0	(10,0) 14,8	(10,0) 13,2	(10,0) 10,6	(10,0) 5,73	(3,0) 6,89	(5,3) 5,54	(7,5) 5,23	(7,5) 5,21	(7,5) 5,24	(7,5) 5,22	(7,5) 5,23
Horizontal- winkel in mgon	(10,0)	(2,0)	(10,0)	(10,0)	(10,0)	(2,0)	(5,6)	(10,0)	(10,0) 4,23	(10,0)	(10,0) 4,21	(10,0) 4,21
Vertikalwinkel in mgon	13,1	(3,0)	13,2	10,6	5,73	4,59	5,86	5,57	(10,0) 6,61	5,58	(10,0) 6,64	(10,0) 6,64
Panorama x _p ' in Pixel	(1,00)	(1,00)	(0,25)	(1,00)	(1,00)	(0,25)	(0,6)	(0,5)	(0,5)	(0,5) 0,52	(0,5) 0,52	(0,5) 0,52
Panorama y _p ' in Pixel	1,31	1,48	0,38	1,06	0,57	0,66	0,63	0,60	0,60	(0,5) 0,66	(0,5) 0,66	(0,5) 0,66
Zentralp. Bild x' in Pixel	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,12)	(0,5)	(0,12)	(0,24)	(0,2)	(0,2)	(0,2)	(0,2)	(0,2) 0,26
Zentralp. Bild y' in Pixel	0,65	0,74	0,66	0,13	0,29	0,29	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	(0,2) 0,23

Tab. 4 zeigt außerdem, dass es möglich ist, durch die Berechnung mit Varianzkomponentenschätzung die Genauigkeit der beteiligten Beobachtungen – weitestgehend unabhängig von der Festlegung von Näherungsgewichten – zu schätzen. Darüber hinaus können auch Rückschlüsse auf Unterschiede in Horizontal- und Vertikalwinkelmessung beim Laserscanner, sowie auf Unterschiede in der Genauigkeit horizontaler und vertikaler Bildkoordinaten, insb. bei Panoramakameras gezogen werden. Zukünftig soll die Unterteilung in weitere Beobachtungsgruppen (z.B. bei Verwendung unterschiedlicher Kameras oder Scans unterschiedlicher Auflösung, Aufspaltung in konstante und streckenabhängige Varianzkomponenten) untersucht werden. Außerdem ist die Implementierung und Analyse der freien Ausgleichung (ohne Passpunkte) mit Varianzkomponentenschätzung vorgesehen. Um realistische Angaben zur Genauigkeit des vorgestellten Verfahrens machen zu können, wären zudem unabhängige Testmessungen bzw. ein Vergleich der in der Ausgleichung geschätzten Objektpunktkoordinaten mit unabhängigen, möglichst übergeordnet genau gemessenen, Objektpunktkoordinaten sinnvoll.

* Die eingeklammerten Standardabweichungen bei den Berechnungen mit Varianzkomponentenschätzung dienen nur zur Festlegung von Näherungswerten der Beobachtungsgewichte.

5 Literaturverzeichnis

- AL-MANASIR, K. & FRASER, C., 2006: Automatic registration of terrestrial laserscanner data via imagery. Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- AMIRI PARIAN, J., 2007: Sensor modelling, terrestrial panoramic camera calibration and close-range photogrammetric network analysis. Dissertation ETH Zürich.
- BAARDA, W., 1968: A testing procedure for use in geodetic networks. Netherlands Geodetic Commission, Vol. 2, No. 5, Delft.
- DOLD, C. & BRENNER, K., 2006: Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- HARING, A.; BRIESE, M.; PFEIFER, N., 2003: Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten am Beispiel der Marc-Anton-Plastik. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4: 288-296.
- JANSA, J.; STUDNICKA, N.; FORKERT, G.; HARING, A.; KAGER, H., 2004: Terrestrial laserscanning and photogrammetry – acquisition techniques complementing one another. Intern. archives of Photogrammetry, Remote Sensing, Spatial Information Sciences. Vol. XXXV, Part B5.
- KLEIN, B., 2001: Untersuchungen zur Feldprüfung geodätischer Instrumente mittels Varianzkomponentenschätzung. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, unveröffentlicht.
- KOCH, K.-R., 1997: Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Dümmler Verlag, Bonn, 3. Auflage.
- LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W., 2004: 3-D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- MULSOW, C.; SCHNEIDER, D.; ULLRICH, A.; STUDNICKA, N., 2004: Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004: 108-113, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- REULKE, R., 2006: Combination of distance data with high resolution images. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- SCHNEIDER, D. & MAAS, H.-G., 2005: Combined bundle adjustment of panoramic and central perspective images. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5/W8.
- SCHNEIDER, D. & MAAS, H.-G., 2006: A geometric model for linear-array-based terrestrial panoramic cameras. The Photogrammetric Record, 21(115): 198-210, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.
- SIEG, D. & HIRSCH, M., 2000: Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen; Teil 1: Theorie. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 3/2000: 82-90.
- ULLRICH, A.; SCHWARZ, R.; KAGER, H., 2003: Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4: 281-287.
- WENDT, A. & HEIPKE, C., 2006: Simultaneous orientation of brightness, range and intensity images. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.