

Analysen zur Datumsfestlegung in photogrammetrischen Projekten großer Volumina

JAN REZNICEK¹, HEIDI HASTEDT¹, TANJA EKKEKEL¹, THOMAS LUHMANN¹ & CHRISTIAN JEPPIING¹

Zusammenfassung: Photogrammetrische Anwendungen erfordern insbesondere bei industriellen Aufgaben hohe Genauigkeitsniveaus und zwangsfreie Datumsfestlegungen. In der Regel werden bei einer freien Netzausgleichung photogrammetrische Maßstäbe in das Messvolumen eingebracht. Bei der statistischen Analyse der Bündelausgleichungsergebnisse eines großvolumigen Testszenarios mit einer großen Anzahl Maßstabsstrecken sowie einer langen interferometrisch bestimmten Strecke verweisen unterschiedliche Maßstabsfestlegungen auf besondere Effekte im Objektraum. Einerseits kann festgestellt werden, dass erhebliche Korrelationen zwischen den Prüflängen vorliegen, die in Abhängigkeit zur Konfiguration zu betrachten sind. Andererseits kann nachgewiesen werden, dass besondere Effekte in den Standardabweichungen der Objektpunkte durch die Aufnahme Konfiguration zu verzeichnen sind. Die Analyse der Konfidenzellipsoide verweist auf Systematiken, die im Hinblick auf die Datumsfestlegung näher zu betrachten sind. Im folgenden Beitrag sollen die aufgedeckten Effekte auf Basis eines großvolumigen Testszenarios spezifiziert und erläutert werden.

1 Motivation

Sollen Objekte großer Volumina hochgenau und dreidimensional erfasst werden, so sind häufig verschiedene Herausforderungen zu bewältigen. Aufgabenstellung und Genauigkeitsniveau bilden dabei den einschränkenden Faktor hinsichtlich der Wahl des Messverfahrens. Soll berührungslos und taktil mit einer Genauigkeit im Submillimeter-Bereich gemessen werden, so minimiert sich die Auswahl des Messverfahrens im Allgemeinen auf Lasertracking und Photogrammetrie. Bei der photogrammetrischen Erfassung ist dabei zu berücksichtigen, dass die Wahl einer geeigneten rückführbaren Maßverkörperung für eine zwangsfreie Ausgleichung schwierig ist. Handelsübliche Maßverkörperungen liegen in der Regel in Längen zwischen 1 m bis 2.5 m (ggf. 5 m) vor. Bei einem größeren Messvolumen müssen diese also während der Messung versetzt oder ein Verlust in Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Skalierung akzeptiert werden. KAHMEN (2015) und KAHMEN & LUHMANN (2016) zeigen einen Ansatz zur Konstruktion einer großen Maßverkörperung auf Basis eines Invardrahtes und verweist darauf, dass die äußere Genauigkeit einer photogrammetrischen Bestimmung unter Berücksichtigung einer langen, weniger genauen Maßverkörperung im Vergleich zur Verwendung kurzer, hochgenauer Maßstäbe steigt. Alternativ zur langen Maßverkörperung können stabile Passpunkte im Messvolumen definiert werden, die beispielsweise mit einem Lasertracker vermessen werden. Die Messgenauigkeit verfügbarer Lasertracker ist jedoch derzeit nicht signifikant höher als die erzielbare Genauigkeit der photogrammetrischen Lösung. Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass die Systemlagerung unter Zwang auf nicht signifikant genauer bestimmten Passpunkten als nicht unkritisch einzustufen ist.

¹ Jade Hochschule Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Straße 16/19, D-26121 Oldenburg, E-Mail: [Jan.Reznicek, Heidi.Hastedt, Tanja.Ekkel, Thomas.Luhmann, Christian.Jepping]@jade-hs.de

Aus wirtschaftlichen Aspekten ist es zudem wünschenswert, den Einsatz eines Lasertrackers in Kombination mit einer photogrammetrischen Erfassung zu vermeiden.

Im Rahmen eines umfangreichen Praxistests sollen die Ergebnisse aus KAHMEN (2015) verifiziert und vertieft analysiert werden. Ein großvolumiges Testszenario konnte dazu aufgebaut werden, um zu ermitteln, inwieweit die Wahl und Anordnung von Systemmaßstäben in photogrammetrischen Projekten großer Volumina Einfluss auf die äußere Genauigkeit haben. In REZNICEK et al. (2016) wurden die Ergebnisse der Genauigkeitsevaluation verschiedener Konfigurationen zur Maßstabs- und Systemfestlegung beschrieben und analysiert. Geprüft wurde die äußere Genauigkeit durch die Bestimmung von Längenmessabweichungen (LME, nach VDI/VDE 2002). Es wurden Ist-Soll-Vergleiche in Bezug auf Referenzlängen herangezogen, die mit einer interferometrischen Lasertrackermessung bestimmt wurden. Die Ergebnisse in REZNICEK et al. (2016) verweisen darauf, dass die alleinige Betrachtung der Längenmessabweichungen nicht ausreichend ist. Verschiedene Auffälligkeiten konnten im Hinblick auf die Standardabweichungen im Objektraum, Korrelationen zwischen den Prüflängen sowie die Datumsfestlegung ermittelt werden. Diese Auffälligkeiten werden in weiterführenden Analysen näher betrachtet, die Ergebnisse und Erkenntnisse werden im Folgenden erläutert.

2 Voruntersuchungen

2.1 Testszenario

Den nachfolgenden Analysen liegt ein Testszenario zu Grunde, welches schematisiert in Abb. 1 dargestellt wird. Im Messvolumen von (20m x 20m x 4m) werden 116 kalibrierte, photogrammetrische Maßstabslängen, die in verschiedenen Konfigurationen für die Maßstabsfestlegung herangezogen wurden, platziert.

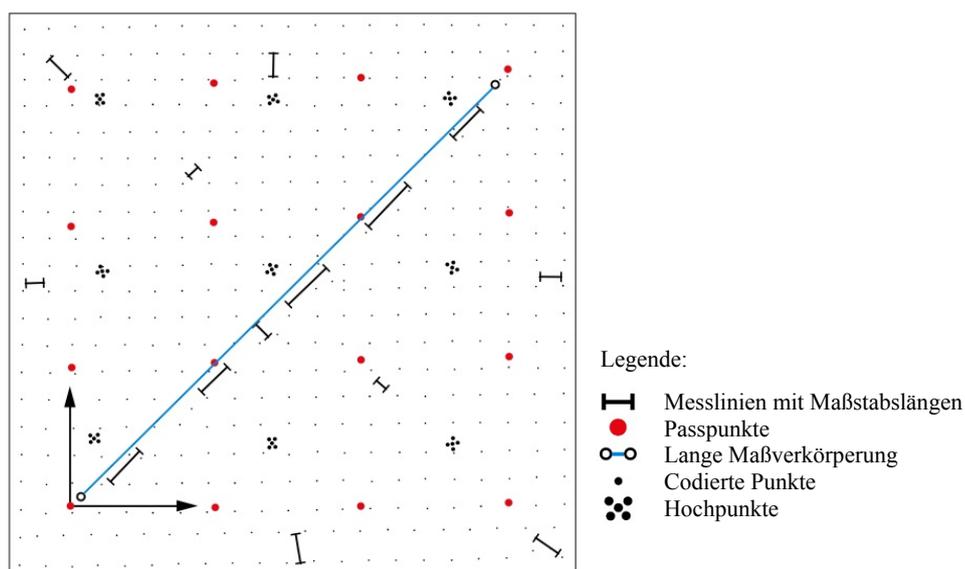


Abb. 1: Grundriss der Testumgebung und Verteilung der Maßverkörperungen und Passpunkte

Zudem wurde eine lange Maßverkörperung in die Diagonale des Messvolumens platziert, deren Länge durch interferometrische Messung mit einem API T3 Lasertracker bestimmt wurde. Für die Untersuchungen wurde eine ALPA 12 WA metric mit einem Leaf Aptus 75 Sensorrückteil eingesetzt (vgl. RIEKE-ZAPP et al. 2005).

2.2 Auswertemethoden

Die Konfiguration der Bilddatenerfassung ist vergleichbar zu üblichen luftgestützten Anordnungen. Die Bündelblockausgleichung mit Simultankalibrierung als freie Netzausgleichung mit Gesamtpurminimierung erfolgte mit dem AICON 3D Studio sowie AXIOS Ax.Ori. In Bezug auf die Verzeichnung wurden Parameter der radial-symmetrischen und der radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnung sowie Affinität und Scherung mitgeschätzt. Der komplette Bilddatensatz umfasst ca. 2200 Bilder und wird nachfolgend als „erweiterter“ Datensatz bezeichnet. Ein reduzierter Datensatz mit etwa 380 Bildern stellt den Standarddatensatz dar.

Als Maß zur Beurteilung der erzielten photogrammetrischen Ergebnisse dienen Längenmessabweichungen (LME, nach VDI/VDE 2002). Diese wurden anhand von Soll-Distanzen ermittelt, die mittels interferometrischer Lasertrackermessung zu 16 im Messvolumen verteilten Objektpunkten (vgl. Abb. 1, Passpunkte) mit einer Genauigkeit von 10 µm bestimmt wurden. Die verschiedenen Untersuchungsszenarien sind in Tab. 1 zusammengefasst. Für die nachfolgenden, weiterführenden Analysen werden u.a. die Konfigurationen E bis I näher untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Einbringung eines kurzen Maßstabs zu höheren Abweichungen und systematischen Maßstabseffekten im vorliegenden Testszenario führen.

Tab. 1 : Untersuchungsszenarien

Symbol	Anzahl Maßstäbe	Länge [m]	Std.abw. Maßstäbe [µm]	Symbol	Anzahl Maßstäbe	Länge [m]	Std.abw. Maßstäbe [µm]		
A		116	0.15–2.2	10 ⁶	F		1	1.4	10
B		116	0.15–2.2	10	G		1	2.0	10
C		1	21.0	20	H		1	2.2	10
D		5	1.4–2.2	10	I		1	1.5	10
E		1	1.6	10	J		0	–	20

Aufgrund der weiterführenden Analyse der im System verbleibenden Korrelationen wurde ein internes Bündelausgleichungsprogramm erweitert und eingesetzt. Für die Bündelausgleichung werden als Eingangsgrößen die Ergebnisse der Bündelausgleichung mit dem AICON 3D Studio bzw. AXIOS Ax.Ori verwendet. Die Ausgleichungsverfahren basieren alle auf der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Neben geringfügigen Abweichungen in den Ausgleichungsergebnissen, die unterschiedlichen Verfahren der Ausreißerelimination zugeschrieben werden können, sind die Ergebnisse direkt vergleichbar und übertragbar.

2.3 Ergebnisse

In Tab. 2 werden die erzielten Ergebnisse der Voruntersuchungen (REZNICEK et al. 2016) für die in Tab. 1 aufgeführten Konfigurationen zusammengefasst. Betrachtet werden dabei die maximale Längenmessabweichung (Max LME) sowie der RMS LME aller Längenmessabweichungen einer Konfiguration. Die geringsten Abweichungen sind in Blau markiert, die höchsten in Rot.

Tab. 2: Ergebnisübersicht der verschiedenen Konfigurationen

[μm]	A 	B 	C 	D 	E 
Max LME (Standardsatz)	-389	-236	-217	293	551
Max LME (erweiterter Satz)	-251	-164	-155	204	289
RMS LME (Standardsatz)	125	69	62	111	227
RMS LME (erweiterter Satz)	99	66	62	93	133
mittlere Anzahl Strahlen (Standardsatz / erweiterter Satz)	35/166	35/166	25/129	44/208	53/244
[μm]	F 	G 	H 	I 	J 
Max LME (Standardsatz)	201	318	-197	679	119
Max LME (erweiterter Satz)	226	193	164	223	114
RMS LME (Standardsatz)	70	121	57	287	47
RMS LME (erweiterter Satz)	105	87	70	104	44
mittlere Anzahl Strahlen (Standardsatz / erweiterter Satz)	48/230	43/195	42/210	32/162	-

3 Analysen

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen (REZNICEK et al. 2016) zeigen das erzielte Genauigkeitsniveau des vorliegenden Testszenarios. Die unterschiedlichen Konfigurationen verweisen jedoch auch auf Auffälligkeiten und Restsystematiken in den Ausgleichungsergebnissen, die sich allein in der Betrachtung der Längenmessabweichungen nicht wiederfinden. Die Standardabweichungen der Objektpunkte resultieren in ihren Z-Komponenten so, dass minimale Standardabweichungen bei ca. 2/3 des maximalen radialen Abstands zum Schwerpunkt auftreten. Weiterhin ist zu untersuchen, inwiefern die Wahl der Datumsfestlegung Einfluss auf das Bündelausgleichungsergebnis hat. Je nach gewählter Aufnahmekonfiguration ergeben sich erhebliche Korrelationen zwischen den Prüflängen. Es ist zu untersuchen, inwiefern sich die benannten Effekte begründen lassen.

3.1 Analyse der Standardabweichungen der Objektpunkte

Die Standardabweichungen der Objektpunkte einer Bündelausgleichung hängen maßgeblich von der a priori Bildmessgenauigkeit, der Maßstabsdefinition und dem funktionalen Zusammenhang

der zu bestimmenden Parameter ab. Die theoretisch zu erwartende Kurve für die Standardabweichungen im Objektraum, basierend auf Erfahrungswerten, zeigt Abb. 2 in Rot. Die Standardabweichungen sollten aufgrund der geringer werdenden Dichte der Beobachtungen zum Testfeldrand steigen, als erwartete Höhe der Abweichungen wird das mittlere Minimum der Abweichungen angesetzt. Abb. 2 zeigt ergänzend einen typischen Verlauf der Standardabweichungen (Blau) für das vorliegende Testszenario.

Zunächst werden für die Analyse die Standardabweichungen der Objektpunkte in der Z-Komponente in Abhängigkeit zum Schwerpunkt des quadratischen Testfeldes (Mitte) dargestellt. Da insbesondere Auffälligkeiten in der Z-Komponente zu erkennen sind, wird die nähere Analyse in X- und Y-Richtung in diesem Zusammenhang vernachlässigt.

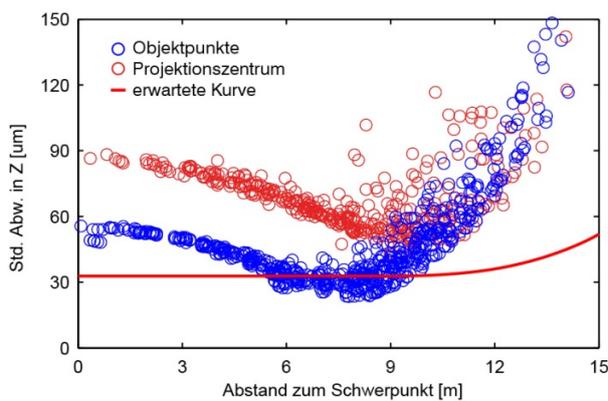


Abb. 2: Abhängigkeiten der Standardabweichungen der Z-Komponenten der Objektpunkte sowie der Projektionszentren vom Schwerpunkt des Messvolumens

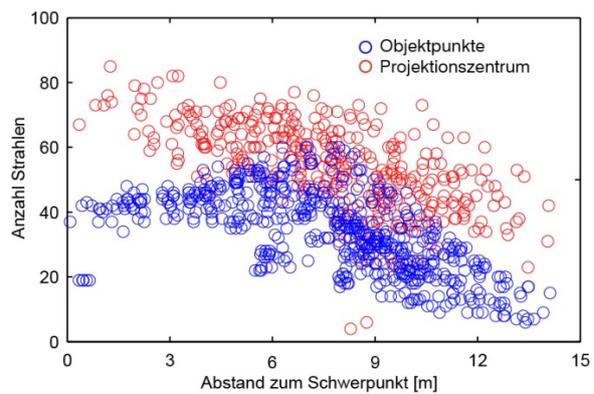


Abb. 3: Anzahl der Strahlen pro Objektpunkt und Projektionszentrum in Abhängigkeit vom Abstand zum Schwerpunkt

In der Z-Komponente stellt sich dabei in Abb. 2 eine ungewöhnliche Systematik dar. Wider Erwarten sind die Standardabweichungen der Objektpunkte (blaue Kreise) in der Mitte des Testfeldes höher als bei einer Entfernung von etwa 8 Meter zum Schwerpunkt. Ein ähnlicher Effekt kann bei den Standardabweichungen in den Z-Komponenten der Projektionszentren (rote Kreise) beobachtet werden. Diese Charakteristiken, welche in allen getesteten Konfigurationen, außer Konfiguration J (Einführung von Passpunkten, vgl. Tab. 1), zu sehen sind, lassen auf eine hohe Korrelation der Parameter schließen.

Zur Analyse dieses Effektes wird Konfiguration C (Standarddatensatz) gewählt. Hier liegt die a priori Genauigkeit des langen Maßstabs bei $0,1 \mu\text{m}$, um den Einfluss einer Maßstabsungenauigkeit auszuschließen. Einer der größten Anteile an der Größe einer Standardabweichung ist die Anzahl der Bildstrahlen pro Punkt. Um diesen Einfluss näher zu untersuchen, wurde in Abb. 3 die Anzahl der Strahlen pro Objektpunkt und Projektionszentrum in Abhängigkeit vom Abstand zum Schwerpunkt aufgetragen. Signifikante Korrelationen können zwischen der Strahlendichte und den Standardabweichungen der Objektpunkte (vgl. Abb. 2) beobachtet werden, wo die höchste Dichte nahe 8m liegt. Dies ist jedoch nicht der Fall zwischen der Strahlendichte und den Projektionszentren. Dies lässt darauf schließen, dass die Strahlendichte nicht die beobachteten

Systematiken in den Standardabweichungen verursacht, da für Objektpunkte und Projektionszentren die gleichen Auffälligkeiten (vgl. Abb. 2) vorherrschen.

Durch weitere Untersuchungen des beobachteten Effekts wurde der Einfluss der Verzeichnungsparameter auf die Standardabweichung in der Z-Komponente analysiert. Durch eine Deaktivierung der radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter (A1, A2, A3) während der Simultankalibrierung wird ein großer Teil des beobachteten Effekts eliminiert (Abb. 4).

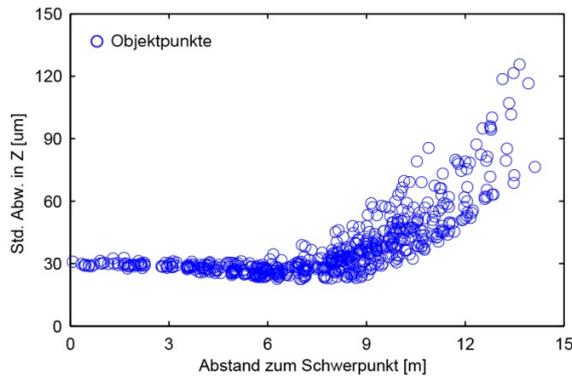


Abb. 4: Abhängigkeit der Standardabweichungen der Objektpunkte in Z vom Abstand zum Schwerpunkt unter Berücksichtigung der Deaktivierung der radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter (A1 bis A3) im Ausgleichsprozess

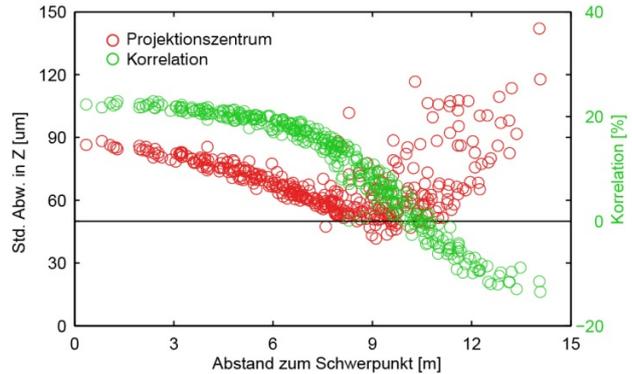


Abb. 5: Standardabweichungen der Projektionszentren in Z (rot) und deren Korrelation mit dem Verzeichnungsparameter A1 (grün)

Darüber hinaus ist festzustellen, dass der Parameter A1 eine erhöhte Korrelation zur Z-Komponente der Projektionszentren aufweist und vom Abstand zum Schwerpunkt abhängig ist. Der Verlauf der Kurven (Abb. 5) könnte den Effekt in der Z-Komponente der Standardabweichungen in den Objektpunkten erklären, ein höherer Korrelationskoeffizient führt zu einer höheren Standardabweichung.

Um die experimentell ermittelten Ergebnisse zu verifizieren wurde die gleiche Analyse an einem simulierten Datensatz durchgeführt, um unbekannte Einflüsse und Fehler auszuschließen. Die Konfiguration dieser simulierten Messung entspricht dem Aufbau der realen Messung. Die Objektpunkte liegen rasterförmig in einem Abstand von 1m in der XY-Ebene. Die Anzahl der Objektpunkte beträgt 360 (20×18). Die Anzahl und die Anordnung der Kamerastandpunkte entsprechen denen der Objektpunkte, jedoch mit einer Z-Koordinate von 7 m. Je Kamerastandpunkt werden vier um 90° gekantete Aufnahmen simuliert, was eine Gesamtanzahl von 1440 simulierten Bildern ergibt. Die Objektkoordinaten sowie die Kamerastandpunkte wurden zufällig verrauscht (± 50 mm für die Koordinaten und $0,01$ rad für die Drehwinkel). Zur Berechnung der Bildkoordinaten sind die Parameter der inneren Orientierung aus dem praktischen TestszENARIO zum Einsatz gekommen. Die Bildkoordinaten unterliegen einem normalverteilten Rauschen von $0.5 \mu\text{m}$.

Im Gegensatz zur realen Messung basieren die simulierten Daten auf einem planaren Testfeld ohne Hochpunkte, welche jedoch für eine gute Bestimmung der Kamerakonstante notwendig wären. Diese Konfiguration ist gewählt worden, damit vor allem die bisher beobachteten Systematiken hervorgehoben werden und mögliche Effekte der Hochpunkte auszuschließen sind. Es ist zu beachten, dass im praktischen Testszenario die Hochpunkte genau wie die Objektpunkte mit minimalen Standardabweichungen um etwa 8 m vom Schwerpunkt des Testfelds entfernt positioniert sind. Aufgrund des gewählten Simulationsszenarios wird deshalb zunächst auf eine simultane Schätzung der Kamerakonstante in der Prozessierung verzichtet. Ihre Berücksichtigung ergab keinen erkennbaren Einfluss. Alle weiteren Prozessierungen wurden dem des praktischen Testszenarios angepasst. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt.

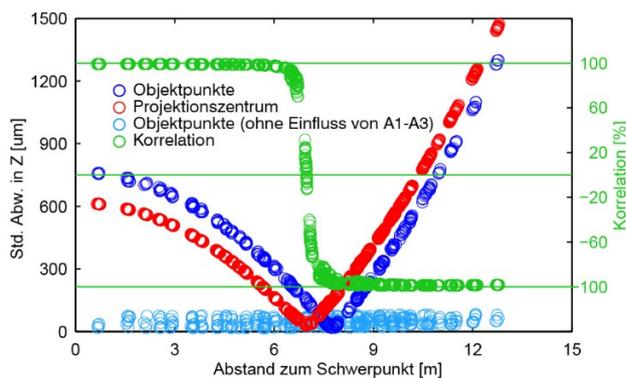


Abb. 6: Abhängigkeit der Standardabweichungen der Objektpunkte (dunkelblau, hellblau) sowie der Projektionszentren (rot) vom Abstand zum Schwerpunkt, Korrelation der Projektionszentren zu A1 (grün)

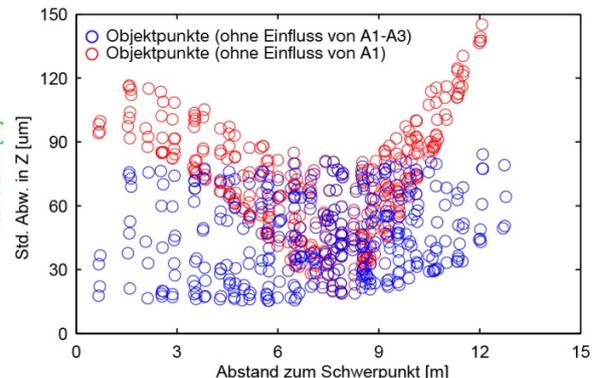


Abb. 7: Abhängigkeit der Standardabweichungen der Objektpunkte in Z vom Abstand zum Schwerpunkt (blau: ohne Einfluss von A1-A3, rot: ohne Einfluss von A1)

Die Graphik in Abb. 6 zeigt ähnliche Effekte wie die Ergebnisse der realen Messung. Die Kurve der Standardabweichungen der Objektpunkte (dunkelblau) nimmt bis zu einem bestimmten Abstand zum Schwerpunkt (etwa 8 m) ab und steigt danach wieder an. Ein annähernd gleicher Verlauf kann für die Standardabweichungen der Projektionszentren beobachtet werden (rot). Die grüne Kurve kennzeichnet die Korrelation zwischen den Standardabweichungen der Projektionszentren und des Verzeichnungsparameters A1. Der Kurvenverlauf zeigt eindeutig den Zusammenhang, dass die geringste Korrelation (0%) und die niedrigste Standardabweichung der Z-Komponenten im Objektraum im gleichen radialen Abstand zum Schwerpunkt vorliegen. Die in hellblau abgetragenen Daten zeigen die Standardabweichungen der Objektpunkte, wenn die Verzeichnungsparameter A1 bis A3 bei der Simultankalibrierung deaktiviert und dementsprechend nicht bestimmt werden. Wie in Abb. 6 zu sehen, ist der untersuchte systematische Effekt eliminiert und erhöht gleichzeitig die Präzision in der Z-Komponente der Objektpunkte. Gegenübergestellt werden in Abb. 7 die Standardabweichungen der Objektpunkte aus Auswertungen ohne Einfluss von A1-A3 sowie ohne Einfluss von A1 in einer kleineren Achsskalierung. Verbleibende Systematiken zeigen, dass alle radial-symmetrischen

Verzeichnungsparameter einen Einfluss auf die Standardabweichung in der Z-Komponente der Objektkoordinaten haben. Basierend auf diesen Analysen kann darauf geschlossen werden, dass der beobachtete Effekt durch die simultane Schätzung der radial-symmetrischen Verzeichnisparameter hervorgerufen wird.

3.2 Einfluss der Datumsfestlegung

In diesem Kapitel wird der Einfluss verschiedener Datumsfestlegungen auf die Genauigkeit der resultierenden Objektpunktkoordinaten untersucht. Für diese Untersuchungen wurde die Konfiguration C (Standarddatensatz) gewählt. Die a priori Genauigkeit der langen Maßverkörperung liegt hier bei 100 μm , um einen deutlichen Effekt durch eine ungenaue Skalierung hervorzurufen. Insgesamt werden drei verschiedene Datumsdefinitionen untersucht, bei denen die Lagerung auf

- I. allen Objektpunkten,
- II. drei Objektpunkten in einer Ecke des Testfelds und
- III. den vier äußeren Eckpunkten

definiert ist (Abb. 8). Datum II. und III. wurden so gewählt, dass Unterschiede möglichst gut aufgedeckt und sichtbar gemacht werden können. Die Prozessierung erfolgt mit der bereits erwähnten eigenen Implementierung einer Bündelausgleichung. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Auswertungen vorgestellt.

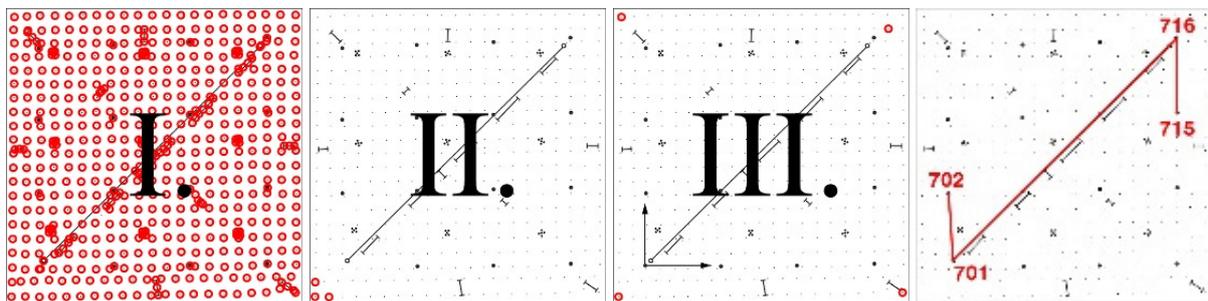


Abb. 8: von links: Schematische Darstellung der drei verschiedenen Datumsdefinitionen sowie die Lage der drei Prüfstrecken. Die roten Kreise repräsentieren die Objektpunkte, welche als Datumpunkte in die Ausgleichung eingeführt werden.

Die Lage der Objektpunktkoordinaten der Definitionen II. und III. werden zunächst mit der Lage der Objektpunktkoordinaten von Definition I. durch Differenzenbildung verglichen. Die Datensätze II. und III. unterliegen dabei einer Best-fit-Transformation in das Koordinatensystem des ersten Datensatzes. Die Analyse der Koordinatendifferenzen zeigt einen vernachlässigbaren Einfluss der Datumsdefinition auf die absolute Lage der Objektpunktkoordinaten (vgl. Tab. 3).

Tab. 3: Statistische Analyse des Koordinatenvergleichs der Objektpunkte zwischen den Datensätzen (I.) - (II.) und (I.) - (III.).

[μm]	RMS		ABS MAX		Mittel	
	I.-II.	I.-III.	I.-II.	I.-III.	I.-II.	I.-III.
d_x	0.09	0.09	0.18	0.11	-0.08	-0.09
d_y	0.05	0.05	0.14	0.15	0.03	0.04
d_z	0.04	0.04	0.11	0.10	0.01	0.01
d_{xyz}	0.11	0.11	0.22	0.19	-	-

Tab. 4: Objektpunktgenauigkeit pro Datumsdefinition; Standardabweichungen der Objektpunkte s_x , s_y , s_z und Eigenwert der großen Halbachse s_e

[mm]	RMS			ABS MAX		
	I.	II.	III.	I.	II.	III.
s_x	0.03	0.29	0.04	0.07	0.56	0.07
s_y	0.03	0.55	0.04	0.07	0.99	0.07
s_z	0.05	2.22	0.11	0.14	4.03	0.14
s_e	0.05	2.28	0.11	0.14	4.12	0.14

Der Einfluss auf die erreichte a posteriori Genauigkeit kann durch Konfidenzellipsoide dargestellt werden, die Ausrichtung wird durch den Eigenwert der großen Halbachse des Ellipsoids bestimmt. Die maximalen statistischen Werte für die Standardabweichungen sowie die maximalen Eigenwerte pro Datensatz sind in Tab. 4 zusammengefasst. Generell sind hohe Genauigkeitsunterschiede feststellbar, die höchsten Abweichungen sind bei der zweiten Datumsdefinition zu sehen (vgl. Abb. 9). Sie werden durch hohe Korrelationen zwischen den Objektkoordinaten hervorgerufen. Der Einfluss dieser hohen Korrelationen soll anhand einer Streckenanalyse näher spezifiziert werden.

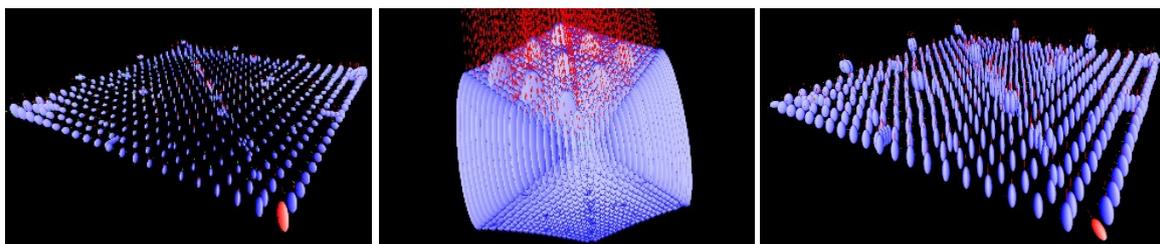


Abb. 9: Darstellung der Konfidenzellipsoide für die Datumsdefinitionen I. (links), II. (Mitte) und III. (rechts). Alle Graphiken weisen den gleichen Skalierungsfaktor für die Ellipsen auf. Die mittlere Graphik zeigt neben den extrem hohen Eigenwerten die Systematiken, die aufgrund von hohen Korrelationen zwischen den Objektkoordinaten hervorgerufen werden.

Für die Untersuchung des Einflusses der Datumsfestlegung auf die Prüflängen wurden drei Längen zwischen vier Objektpunkten ausgewählt, anhand derer der Einfluss der hohen Korrelationen zwischen den einzelnen Objektpunktkoordinaten gezeigt werden soll. Für die berechneten Längen wurde die komplette Kovarianzmatrix hinzugezogen. Die resultierenden Längen und deren Standardabweichungen sind jedoch bis auf einen numerischen Fehler identisch (vgl. Tab. 5).

Tab. 5: Standardabweichungen sowie Längen der ausgewählten Prüflängen

[μm]	Standardabweichungen der Prüflängen			Länge [mm]
	I.	II.	III.	
701–702	0.87	0.87	0.87	4111.11
701–716	8.99	8.99	8.99	21886.80
715–716	1.25	1.25	1.25	4431.60

Die Prozessierung der Datensätze wurde über eine Simultankalibrierung durchgeführt. Die ermittelten Parameter der inneren Orientierung einschließlich der Korrelationen zwischen diesen sind für alle Datensätze identisch. Für die Parameter der äußeren Orientierung trifft dies nicht zu, die Korrelationen zwischen diesen und den Parametern der inneren Orientierung sinken für den Datensatz II. signifikant.

Zusammenfassend ergibt sich, dass verschiedene Datumsdefinitionen nicht die relative Lage der Objektkoordinaten zueinander ändern, aber zu einer unterschiedlichen Genauigkeit a posteriori führen. Die Auswertung der vollständigen Kovarianzmatrix verweist darauf, dass die a posteriori Genauigkeit von Prüflängen für alle Datumsdefinitionen identisch ist. Insgesamt führt eine hohe Anzahl an Datumpunkten in einer guten Testfeldkonfiguration zu niedrigen Korrelationen. Höhere Korrelationen werden durch Unsicherheiten in der Datumsfestlegung verursacht.

3.3 Analyse von Korrelationen zwischen Referenzlängen

Im Rahmen der Ergebnisanalyse der verschiedenen Konfigurationen und insbesondere der damit einhergehenden unterschiedlichen Systemfestlegungen werden Korrelationen zwischen den zur Bestimmung der Längenmessabweichungen definierten Referenzlängen bestimmt und analysiert. Insgesamt liegen 60 Referenzlängen vor, die zwischen 16 rasterförmig angeordneten Objektpunkten aufgespannt sind. Zur Korrelationsbestimmung wird die Kovarianzmatrix der Strecken, bestimmt durch eine Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung, der Bündelausgleichung hinzugezogen.

In der Betrachtung wird angenommen, dass eine höhere Korrelation zwischen Strecken vorliegen kann, wenn diese über mindestens einen gleichen Objektpunkt aufgespannt werden. Aus diesem Grund werden zur Analyse der in den verschiedenen Konfigurationen vorliegenden Korrelationen lediglich diejenigen näher betrachtet, bei denen die korrelierten Strecken jeweils zwischen vier unterschiedlichen Objektpunkten aufgespannt werden. Mit dieser Selektion ergeben sich 1408 zu betrachtende Streckenkombinationen. In Tab. 6 sind die Ergebnisse der Korrelationen der Streckenkombinationen aus den Referenzlängen zusammenfassend aufgeführt. Betrachtet wird jeweils die Anzahl der Streckenkombinationen, die eine Korrelation größer 75% bzw. >90% aufweisen.

Die Korrelationsergebnisse verdeutlichen, dass eine Konfiguration mit Passpunkten (J) neben der besten äußeren Genauigkeit, gemessen an den Längenmessabweichungen an den Referenzlängen, auch die geringsten Streckenkorrelationen mit maximal 25% aufweisen. Die geringen Korrelationen bei der Wahl einer langen, hochgenauen Maßverkörperung (C) festigen die Ergebnisse der Längenmessabweichungen und unterstützen die Schlussfolgerung, dass diese Konfiguration alternativ zu sehr guten und zuverlässigen Ergebnissen führt. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Korrelationen in Abhängigkeit zur a priori Standardabweichung der Maßverkörperung zu betrachten sind. Werden die weiteren untersuchten Konfigurationen näher betrachtet, so kann festgestellt werden, dass die Wahl nur einer kurzen Maßverkörperung (~10% des Messvolumens) am Rande des Messvolumens dazu führt, dass alle vermeintlich unabhängigen Referenzlängen zu über 75% miteinander korreliert sind. Davon sind 64% der Streckenkombinationen zu >90% miteinander korreliert. Beim erweiterten Datensatz, d.h. unter Berücksichtigung zusätzlicher gekanteter und schräger Aufnahmen, steigt die Korrelation der

Streckenkombinationen. 98% aller möglichen Streckenkombinationen, die über verschiedene Objektpunkte aufgespannt werden, sind in diesem Fall zu >90% korreliert.

Tab. 6: Anzahl korrelierter Streckenkombinationen zwischen Referenzlängen (aufgespannt über vier unterschiedliche Objektpunkte)

Konfiguration		Korrelation		Konfiguration		Korrelation	
		>75%	>90%			>75%	>90%
B standard		181	0	E standard		1408	904
C standard (a priori 20µm)		2	0	E erweitert		1408	1376
C standard (a priori 100µm)		342	11	G standard		1386	590
C erweitert (a priori 20µm)		3	0	I standard		1408	1324
D standard		423	27	J standard		0	0
D erweitert		895	176				

Die graphische Auswertung der korrelierten Streckenkombinationen zeigt, dass kein eindeutiges Korrelationsmuster zu erkennen ist. Es kann festgestellt werden, dass sich die korrelierten Streckenkombinationen häufig kreuzen und vermehrt Streckenkombinationen hoch korreliert sind, die entweder in der Mitte des Messvolumens angeordnet sind oder dieses abdecken. Es kann bei Konfiguration C eine leicht homogenere Anordnung der korrelierten Streckenkombinationen im Messvolumen beobachtet werden. Bei der Betrachtung der erweiterten Datensätze mit einem kurzen Maßstab lässt sich erkennen, dass die innere Genauigkeit des Systems bei gleichbleibender Genauigkeit des Maßstabs steigt. Es resultieren jedoch deutlich höhere Korrelationen zwischen den Prüflängen. Die Anzahl der Beobachtungen für die Maßstabspunkte übt diesbezüglich keinen besonderen Einfluss auf die Ergebnisse aus. Wird die Anzahl der Beobachtungen im erweiterten Datensatz soweit reduziert, dass sie der des Standarddatensatzes entspricht, so erhöht sich der Korrelationsanteil weiter.

Insgesamt führen die Analysen zu dem Ergebnis, dass ein kurzer Maßstab einen hohen Einfluss auf das Bildbündel ausübt und dieser das Messvolumen nicht ausreichend repräsentiert. Die Genauigkeit des Maßstabs ist in diesen Fällen (Konfiguration E-I) nicht ausreichend.

4 Fazit & Ausblick

Die statistische Analyse der Bündelausgleichungsergebnisse eines großvolumigen Testszenarios ergab bei unterschiedlichen Maßstabfestlegungen besondere Effekte im Objektraum. Eine eingehende Untersuchung der Standardabweichungen der Objektpunkte deckt eine von simultan geschätzten radial-symmetrischen Verzeichnungsparametern beeinflusste Bestimmung der Z-Komponenten auf. Minimale Standardabweichungen resultieren bei Simultankalibrierung der radial-symmetrischen Verzeichnung sowohl für die Objektpunkte als auch die Projektionszentren

in Z bei ca. $\frac{2}{3}$ des maximalen radialen Abstands zum Systemschwerpunkt. Ein Zusammenhang zur Anzahl der Bildstrahlen kann ausgeschlossen werden. Die Untersuchungen zum Einfluss der Datumsdefinition konnten keine relativen Lageänderungen der Objektpunktkoordinaten verschiedener Lagerungen aufdecken, jedoch wird eine schwankende a posteriori Genauigkeit der Objektpunktkoordinaten ermittelt. Insgesamt führt eine hohe Anzahl Datumpunkte bei einer guten Testfeldkonfiguration zu niedrigen Korrelationswerten. Im vorliegenden Testszenario konnten des Weiteren hohe Korrelationen in Abhängigkeit von der Maßstabsfestlegung aufgedeckt werden. Ein kurzer Maßstab im Objektraum verbunden mit einem hochredundanten Bündel führt zwar zu besseren Genauigkeiten im Objektraum, repräsentiert jedoch nicht das komplette Messvolumen, da erhebliche Korrelationen zwischen den Prüflängen vorliegen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wahl der Maßverkörperung, deren Länge und Lage einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse in großvolumigen Körpern ausübt. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die radial-symmetrische Verzeichnung im vorliegenden Experiment die innere Genauigkeit des Systems maßgeblich bestimmt. Die Untersuchungsergebnisse führen zu der weiterführenden Fragestellung, inwieweit der Einfluss der radial-symmetrischen Verzeichnung und die Bestimmbarkeit der Kamerakonstante näher spezifiziert werden können.

5 Danksagung

Wir danken Ralph Rosenbauer und der ALPA Ltd. für die Bereitstellung der ALPA metric Kamera. Die vorliegenden Arbeiten wurden unter anderem durch die Forschungsprofessur des Landes Niedersachsen unterstützt.

6 Literaturverzeichnis

- KAHMEN, O., 2015: Entwicklung einer großen Invardraht-Maßverkörperung zur Anwendung in der Industriephotogrammetrie. Bachelorarbeit Jade Hochschule Oldenburg, unveröffentlicht.
- KAHMEN, O. & LUHMANN, T., 2016: Entwicklung einer großen Invardraht-Maßverkörperung zur Anwendung in der Industriephotogrammetrie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 25, T. Kersten (Hrsg.), Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Bern, 7.-9. Juni 2016, 538-544.
- REZNICEK, J., EKKEL, T., HASTEDT, H., LUHMANN, T., KAHMEN, O. & JEPPIING, C., 2016: Zum Einfluss von Maßstäben in photogrammetrischen Projekten großer Volumina. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage, T. Luhmann & C. Schumacher (Hrsg.), VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 286-295.
- RIEKE-ZAPP, D., OLDANI, A. & PEIPE, J., 2005: Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 14, E. Seyfert (Hrsg.), 263-270.
- VDI/VDE, 2002: Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 1, Beuth Verlag, Berlin.