

Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634

HEIDI HASTEDT, THOMAS LUHMANN & WERNER TECKLENBURG¹

Zusammenfassung: Die Abnahme und Überwachung optischer Messsysteme basierend auf der VDI/VDE Richtlinie 2634 findet zunehmend Anwendung. Die geforderten Messgenauigkeiten werden bereits nachgewiesen und reproduziert. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen dennoch Unsicherheiten in den Ergebnissen auf, die nicht eindeutig spezifiziert werden können. Längenabhängige Restunsicherheiten in den Längenmessabweichungen nach VDI/VDE 2634 werfen Fragen nach ihrer Herkunft auf, denen mit diesem Beitrag Rechnung getragen werden soll. Verschiedene Aspekte des Systemdesigns wurden dazu zur theoretischen Abschätzung und Optimierung in ein Simulationsverfahren integriert. Die Ergebnisse werden mit diesem Beitrag vorgestellt.

1 Einleitung

Die Entwicklung und Nutzung hochgenauer optischer Messsysteme steigt mit dem Anspruch an hohem Genauigkeitsniveau und Automationsgrad. Die Nachfrage besteht zunehmend in industriellen Anwendungsbereichen. Mit dem Einsatz dieser optischen Messsysteme, vor allem in der Industrie, bedarf es der Abnahme und Überwachung der Systeme anhand einer einheitlichen Richtlinie. Hierzu wurde die VDI/VDE Richtlinie 2634 (VDI 2002) für punktförmig und flächenhaft antastende optische Messsysteme, entsprechend unterteilt in Blatt 1 und 2, erstellt.

Die richtlinienbasierte Abnahme und Überwachung der auf dem Markt befindlichen optischen Messsysteme wird zunehmend bei Herstellern und Anwendern dieser Messsysteme eingesetzt. Hierzu werden an verschiedenen Stellen entsprechende Testkörper anhand der Vorgaben der Richtlinie konstruiert und installiert. Zur Gewährleistung der Rückführbarkeit sind hierzu entsprechend kalibrierte Sollstrecken integriert, die die Grundlage des Abnahmekriteriums, der Längenmessabweichung, bilden. Die geforderten Genauigkeiten der Messsysteme werden bereits nachgewiesen und reproduziert.

Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen dennoch Restfehler auf, die nicht eindeutig spezifizierbar sind. Die Unsicherheiten können zurückgeführt werden auf Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren (Messsystem, Messumgebung, Temperatur, uvm.). Diese Faktoren sind in praktischen Versuchen nicht unabhängig nachweisbar. Untersuchungen zum Einfluss der Kameraparameter und der Bildmessgenauigkeit auf die Kalibrierung und Auswertung geben bereits Aufschluss über die Größe und Auswirkung des jeweiligen Parameters (HASTEDT et al., 2004).

Längenabhängige Restunsicherheiten in den Längenmessabweichungen nach VDI/VDE 2634 werfen weiterhin Fragen nach ihrer Herkunft auf. Diese längenabhängigen Restunsicherheiten

¹ Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16, 26121 Oldenburg, Tel. 0441-7708-xxxx
Dipl.-Ing. (FH) Heidi Hastedt, phone: 3364, email: heidi.hastedt@fh-oldenburg.de
Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann, phone: 3172, email: luhmann@fh-oldenburg.de
Dipl.-Ing. Werner Tecklenburg, phone: 3164, email: tecklenburg@fh-oldenburg.de

ten ergeben sich im Vergleich von photogrammetrisch erfassten Daten, d.h. der Bezug zu einer absoluten Referenz ist dabei noch nicht näher untersucht worden. Weiterführende Untersuchungen wurden diesbezüglich auf das Systemdesign durchgeführt. Die wesentlichen Faktoren des Systemdesigns (Datum, Konfiguration, Gewichtung) (FRASER, 1996) wurden zur theoretischen Abschätzung und Verifizierung in ein Simulationsverfahren (HASTEDT, 2004) integriert. Ein Bestandteil der Untersuchungen stellt die Analyse der Aufnahme Konfiguration (Standpunktlage, Anzahl Bilder) durch Voll- und Teilverbände dar sowie die Auswirkung verschiedener Systemfestlegungen durch Datumspunkte und Systemmaßstäbe. Die Ergebnisse der simulationsbasierten Untersuchungen werden in diesem Beitrag vorgestellt.

2 Definitionen

2.1 Simulationsverfahren

Das Simulationsverfahren für die Untersuchungen basiert auf der Datengrundlage realer Datensätze. Diese sind Kalibrierdatensätze, die nach einem bekannten Aufnahmeverfahren (WESTER-EBBINGHAUS, 1985) anhand eines Testkörpers auf Grundlage der VDI/VDE Richtlinie 2634 erstellt wurden. Es werden innerhalb des Simulationsprozesses quasi reale Datensätze generiert.

Das Verfahren basiert auf der Monte-Carlo-Methode (MCM)(ROBERT & CASELLA, 2002) und kann in verschiedene Arbeitsschritte gegliedert werden. Die Formulierungsphase konzentriert sich auf die Wahl der Modell- und Wahrscheinlichkeitsfunktion. Die zweite Phase bildet als Berechnungsphase den Kern der Simulation nach MCM. Die Arbeitsschritte und die Bereitstellung geeigneter t-verteilter Zufallszahlen folgen den in COX et al. (2001, 2004) dargelegten Funktionen und Verfahren. Eine ausführliche Erläuterung des Simulationsverfahrens und der Implementierung ist gegeben in HASTEDT (2004).

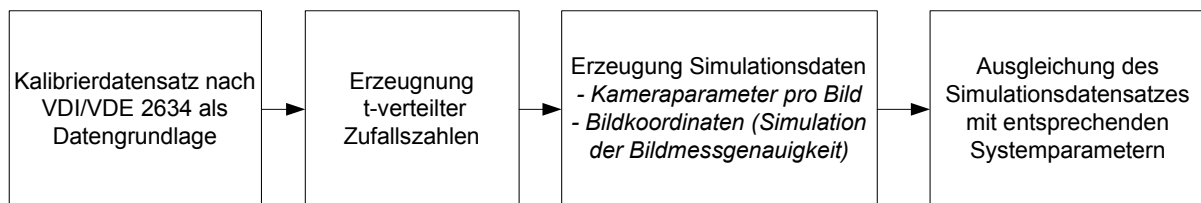


Abb. 1: Ablaufdiagramm Simulationsverfahren

Das in Abb. 1 dargestellte Ablaufdiagramm zeigt vereinfacht den Simulationsprozess für eine von M Simulationen. Die Simulationsdaten (Kameraparameter, Bildmessungen) werden nach (1) erzeugt.

$$P_{(rm)} = P_{(iv)} + (tRNG * s_p) \quad (1)$$

$P_{(rm)}$ veränderter Parameter durch Simulation

$P_{(iv)}$ Eingabewert des Parameters

$tRNG$ t-verteilte Zufallszahl

s_p Standardabweichung des Parameters

2.2 Systemdesign

Das Systemdesign eines photogrammetrischen Datensatzes bildet eine wichtige Grundlage in der Aufnahmeplanung und Erfüllung der gesetzten Spezifikationen. Das Systemdesign bein-

hältet verschiedene in Wechselbeziehung stehende Probleme, die im Falle der Nahbereichsphotogrammetrie in drei Teilbereiche gegliedert werden können (FRASER, 1984):

- Zero-Order-Design – ZOD: Datum
- First-Order-Design – FOD: Konfiguration
- Second-Order-Design – SOD: Gewichtung

Diese Stufen des Systemdesigns werden in der Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung mit entsprechenden Parametern eingeführt.

ZOD

Die Datumsfestlegung muss mindestens die 7 Unbekannten der Systemfestlegung lösen. Grundlegendes Interesse besteht zumeist an der Genauigkeit der XYZ-Koordinaten und der enthaltenen Bedingungen, wie beispielsweise Maßstab (FRASER, 1996). In der Regel wird eine freie Netzausgleichung mit Lagerung auf allen Objektpunkten oder einem definierten Teil dieser durchgeführt. Ggf. erfolgt die Integration von einem oder mehreren Systemmaßstäben.

FOD

In der Nahbereichsphotogrammetrie ist es das Ziel eine geeignete Aufnahmekonfiguration für ein gegebenes Objekt und das geforderte Auswertergebnis zu finden. Die Aufnahmekonfiguration ergibt sich aus verschiedenen Teilkomponenten, wie z.B. Standpunktwahl, Anzahl Standpunkte, Mehrfach-Erfassung (d.h. mehrere nahezu gleiche Bilder pro Standpunkt), Schnittwinkel, Kantungen, verfügbare Objektpunkte, Bildmaßstab, Kamerakonstante. Mit einer Erhöhung der Anzahl der Kamerastandpunkte erzielt man bei einer guten Konfiguration keine höheren Genauigkeiten, aber eine stärkere Zuverlässigkeit. Eine Erhöhung der Bildanzahl pro Standpunkt wirkt sich hingegen genauigkeitssteigernd aus. Dies führt zu einer Skalierung der Gewichtsmatrix P , einer Komponente des SOD (FRASER, 1984). Ein Indikator für die Systemgenauigkeit bildet die Objektpunktgenauigkeit s_{XYZ} , berechnet nach (2) mit k Anzahl Bilder pro Standpunkt (FRASER, 1996).

$$s_{XYZ} = \frac{q}{\sqrt{k}} m_b s_x \quad (2)$$

SOD

Die Gewichtung in der Bündelausgleichung beinhaltet die Optimierung von s_x , der Bildmessgenauigkeit. Die Verbesserung von s_x kann u.a. durch Mehrfach-Erfassung erzielt werden.

2.3 VDI/VDE Richtlinie

Die VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 1 regelt die Abnahme und Überwachung optischer 3D Messsysteme mit punktförmiger Antastung. In der Richtlinie wird die Anordnung der Testlängen (Abb. 2) empfohlen. Es sollten mindestens 5 Testlängen pro Messlinie (bei mindestens 7 Messlinien) im Testobjekt spezifiziert sein. Die Punkte der Messlinien müssen als Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt werden. Die Qualität der Bündelausgleichung wird angegeben mit der Längenmessabweichung (LME) als Funktion aus der Subtraktion von kalibrierter Sollstrecke und gemessener Strecke (als Funktion der ausgeglichenen Objektkoordinaten).

Die Längenmessabweichungen werden zur Anschauung in Abhängigkeit zur Sollstrecke in einem Diagramm dargestellt (Abb. 3), eine längenabhängige Restunsicherheit der LME wird im folgenden als Trend bezeichnet. Der Trend ist der Regressionskoeffizient aller LME bei der Bedingung $b = 0$ mit $y = mx + b$ für die Regressionsgerade (Trendlinie).

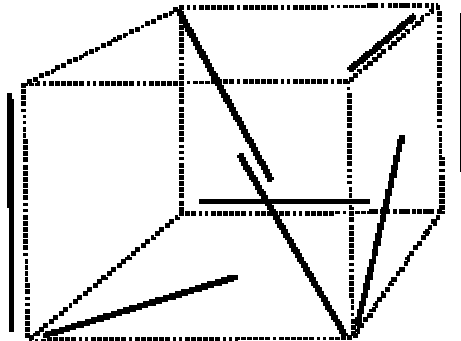


Abb. 2: Anordnung der Testlängen nach VDI/VDE 2634

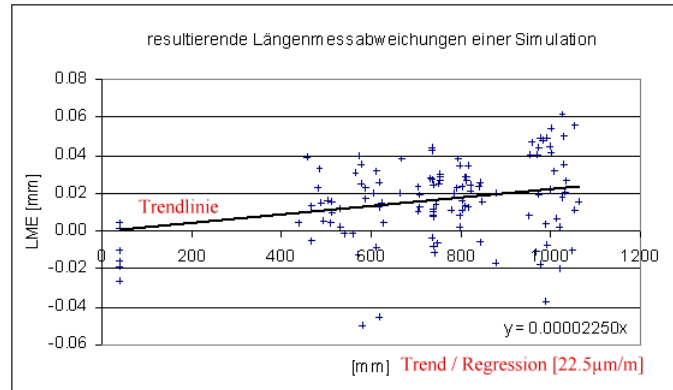


Abb. 3: Diagramm Längenmessabweichung

3 Untersuchungen und Ergebnisse

Für die Untersuchungen werden die in Tab. 1 aufgelisteten Datensätze als Simulationsgrundlage und damit als Näherungswerte für die Bündelausgleichung hinzugezogen. Es wurden jeweils 200 Simulationen pro Untersuchungsschritt, wobei die Simulationsdaten nach (1) lediglich Werte bis 3 Sigma annehmen, durchgeführt. Abb. 4 zeigt die Objektpunktwolke des Testkörpers, die die Datensätze abbilden.

ID	Datensatz	c [mm]	Anzahl Bilder Vollverband	Anzahl gekantete Bilder			Standpunkt-höhen
				Kantung	Bilder je Kantung	% aller Bilder	
1	DCS645M	35	60	$\pm 90^\circ$	16	10	L1 \approx 2.0m L2 \approx 1.5m L3 \approx 0.4m
				180°	4	2.5	
2	DCS645M	35	54	$\pm 90^\circ$	15	8	
				180°	4	2.1	
3	Fuji S1 Pro	28	85	$\pm 90^\circ$	24	20	
				180°	11	9	

Tab. 1: Übersicht der Simulationsdatensätze

Zur Beurteilung werden im Allgemeinen die Längenmessabweichungen (LME), deren RMS_{LME} -Werte (3) sowie die resultierenden Trends (s. 2.3) der Simulationsergebnisse zum Ausgangsdatsatz betrachtet.

$$RMS_{LME} = \sqrt{\frac{\sum L^2}{n}} \quad (3)$$

Zur Zeit wird ausschließlich das photogrammetrische System betrachtet (mit der Einschränkung eingeführter unabhängig kalibrierter Systemmaßstäbe), d.h. die LME ergeben sich im Vergleich von photogrammetrisch erfassten Daten ohne Bezug zu einer absoluten Referenz. Die quadratische Markierung in Abb. 4 zeigt die Lage der Punkte (LME-Punkte), die zur Bestimmung der Längenmessabweichungen verwendet werden.

Zur Bestimmung von Einflüssen unterschiedlichen Systemdesigns wurden verschiedene Konfigurationen getestet und Bedingungen in die Bündelausgleichung eingeführt:

ZOD	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtpurminimierung mit Rangdefekt 6 und 7 (Systemmaßstäbe in den drei Koordinatenrichtungen) • Teilspurminimierung mit Rangdefekt 6 und 7
FOD	<ul style="list-style-type: none"> • Vollverband • Halbverband mit 35 Bildern • Teilverband ohne 180° Bilder und Hälfte an $\pm 90^\circ$ Bildern • Teilverband ohne L3 (Standpunkthöhe) • Simulation von Kugeltargets für Systemmaßstäbe
SOD	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrfach-Erfassung mit Simulation von 5 Bildern pro Standpunkt

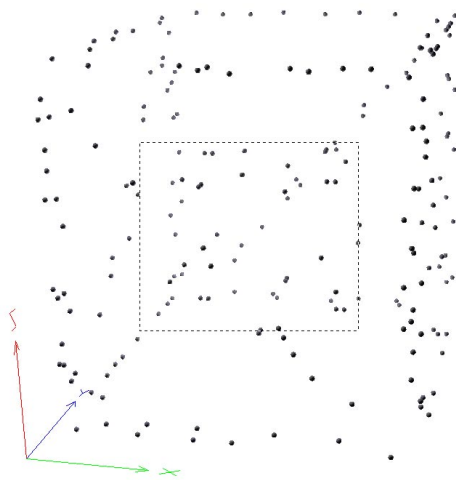


Abb. 4: Punktwolke aller Objektpunkte

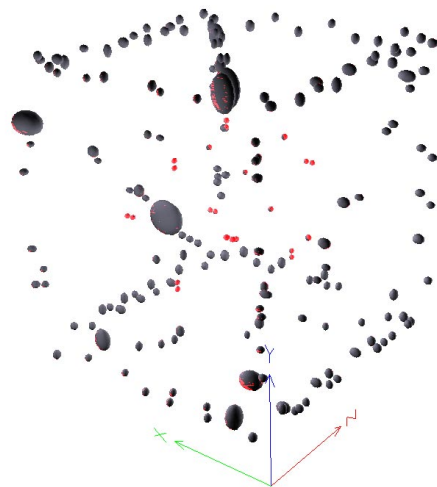


Abb. 5: Fehlerellipsendarstellung (hier Überlagerung verschiedener Datumsfestlegungen)

3.1 Untersuchung der Datumsfestlegung

Für die aufgeführten Datensätze wurden zum Einen der Einfluss von Systemmaßstäben untersucht. Hierzu ist jeweils nur ein Maßstab (in X, Y der Z-Koordinatenrichtung) als Systemmaßstab bei einer Gesamtpurminimierung festgelegt, zusätzlich wurde die Festlegung des Systemmaßstabes über alle drei Maßstäbe gelöst. Im Vergleich dazu wurde das System mit Rangdefekt (r) 7 bestimmt, einschränkend muss hier erwähnt werden, dass die Näherungswerte für die Ausgleichung den Systemmaßstäben unterliegen. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Die Resultate zeigen, dass sich die Trends für die einzelnen Koordinatenrichtungen kaum unterscheiden. Mit der Maßstabsfestlegung in allen drei Richtungen optimiert sich das Gesamtsystem zu $< \pm 50 \mu\text{m}/\text{m}$ längenabhängiger Restunsicherheit bei RMS_{LME} -Werten $< 40 \mu\text{m}$.

Im Vergleich zur Systemlagerung auf allen Objektpunkten wurde eine Teilspurminimierung mit Lagerung auf den LME-Punkten durchgeführt. Hierbei bestätigt sich die Theorie, dass bei der Lagerung auf die LME-Punkte bei einem Rangdefekt $r = 7$ ein Trend von etwa $2.5 \mu\text{m}/\text{m}$ verbleibt. Somit hat die Bestimmungsgenauigkeit der Maßstabspunkte bzw. die Übertragung auf die Näherungswerte durch die Photogrammetrie einen so signifikanten Einfluss, dass sich ein Trend nicht eindeutig eliminieren bzw. kontrollieren lässt. Eine Maßstabsfestlegung in

Kombination mit der Teilspurminimierung ergibt den gleichen Trend wie bei der Gesamtspurminimierung.

Abb. 5 zeigt hierbei in Form einer Fehlerellipsendarstellung den Einfluss auf die Genauigkeit der Objektpunkte bei unterschiedlicher Systemfestlegung. Die helleren (bzw. roten) Ellipsen in der Systemmitte basieren auf der Systemlösung mittels Gesamtspurminimierung.

ID		1	2	3
MX	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 75	± 75	-
	RMS_{LME} [mm]	0.01 – 0.07	0.015 – 0.06	-
MY	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 75	± 75	± 70
	RMS_{LME} [mm]	0.01 – 0.07	0.015 – 0.07	0.01 – 0.06
MZ	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 45	± 60	± 70
	RMS_{LME} [mm]	0.01 – 0.05	0.015 0.05	0.01 – 0.07
MXYZ	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 45	± 40	± 50
	RMS_{LME} [mm]	0.01 – 0.04	0.015 – 0.04	0.01 0.04
r7	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 30	± 30	± 25
	RMS_{LME} [mm]	0.005 – 0.016	0.01 – 0.03	0.01 – 0.025

Tab. 2: Ergebnisübersicht Datumsfestlegung

3.2 Untersuchungen zur Konfiguration

Im Vergleich zur Auswertung eines Vollverbandes wurden ebenfalls abweichende Konfigurationen des Datensatzes 1 (s. Tab.1) mit Hilfe des Simulationsverfahrens getestet. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst.

ID	Spezifikation ($r = 6$ mit Systemmaßstab XYZ)	Anzahl Bilder	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	RMS_{LME} [mm]
1a	Vollverband (Abb. 6)	60	± 45	0.01 – 0.04
1b	Halbverband (Abb. 7)	32	± 65	0.01 – 0.06
1c	Teilverband [keine 180° gekantete Bilder und 8 Bilder mit Kantung $\pm 90^\circ$]	48	± 70	0.01 – 0.07
1d	Teilverband [keine Bilder aus Standpunkthöhe $\approx 0.4\text{m}$]	52	± 50	0.01 – 0.05

Tab. 3: Ergebnisübersicht Konfiguration

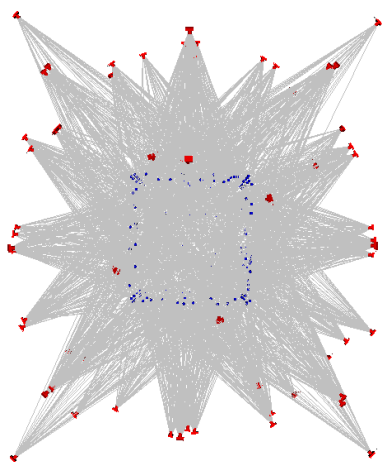


Abb. 6: Vollverband

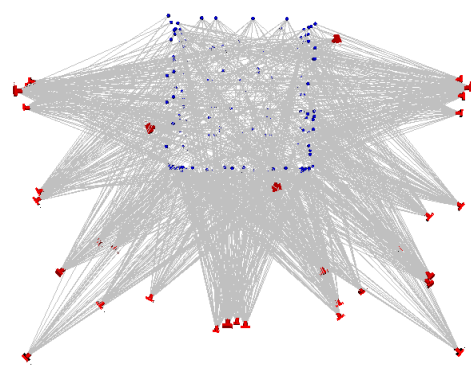


Abb. 7: Halbverband

Die Trends zeigen deutlich die Verschlechterung des Systems bei der Erfassung durch einen Halbverband (Abb. 7). Aufgrund der Erfassung der LME-Punkte ohne Rundumverband verschlechtert sich die Genauigkeit des Ergebnisses, hierbei auch als Einfluss auf die längenabhängige Restunsicherheit. Der Trend über alle Simulationen steigt um $\pm 20\mu\text{m}/\text{m}$, die RMS_{LME} -Werte pro Simulation steigen entsprechend an.

Eine Verdopplung der Restunsicherheit, d.h. eine signifikante Verschlechterung des Ergebnisses, ergibt sich bei einem Bildverband mit wenigen gekanteten Bildern. In diesem Fall wurde die Hälfte aller $\pm 90^\circ$ gekanteten und alle 180° gekanteten Bilder in der Ausgleichung ignoriert. Zur Stabilisierung und genaueren Auflösung des Gleichungssystems sind demzufolge gekantete Aufnahmen $>10\%$ aller Bilder erforderlich.

Die Aufnahmen der Standpunkthöhe $\approx 0.4\text{m}$ hingegen haben keinen sichtbaren Einfluss auf das Ergebnis.

Im Hinblick auf den signifikanten Einfluss der Maßstabspunkte wurden Aufnahmesituationen simuliert, die alle Maßstabspunkte in allen Bildern abbilden. Damit kann die Verwendung von Kugeltargets an Systemmaßstäben simuliert werden. Es ergaben sich keine Änderungen bei den Simulationsergebnissen. Es kann angenommen werden, dass die Erfassung eines Maßstabspunktes in etwa 5% aller Bilder, unter Annahme guter Strahlenschnitte, ausreichend ist.

3.3 Untersuchung der Gewichtung

Unter Berücksichtigung einer Mehrfach-Erfassung pro Standpunkt, in diesem Fall einer Simulation von 5 Bildern pro Kamerastandpunkt, konnte erwartungsgemäß eine Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Für die hier betrachteten Datensätze liegen die Parameter $m_b = 60$, $q = 0.7$ und $s_x = 0.6\mu\text{m}$ vor und ergeben nach (3) eine zu erwartende Genauigkeit von $s_{XYZ} = 0.0252\text{mm}$ für $k = 1$ sowie $s_{XYZ} = 0.0113\text{mm}$ für $k = 5$. Der Theorie folgend ergeben sich diese Genauigkeiten aus den Simulationsdaten nur geringfügig ($2\mu\text{m}$) schlechter. Mit der höheren Genauigkeit der Objektpunkte durch die Bündelausgleichung ergeben sich nur noch Trends von $\pm 20\mu\text{m}/\text{m}$ mit entsprechend geringeren RMS_{LME} -Werten von $0.005 - 0.02\text{mm}$, das entspricht einer Minimierung der Restunsicherheit von 200%. Dieses Ergebnis bezieht sich auf eine Gesamtspurminimierung mit drei festgelegten Systemmaßstäben. Bei der Ergebnisbetrachtung der Bündelausgleichung mit jeweils einem Systemmaßstab zeigt sich ebenfalls eine Ergebnisverbesserung um Faktor 2.

4 Zusammenfassung

Längenabhängige Restunsicherheiten in den Längenmessabweichungen von Simulationsreihen untereinander wurden in diesem Beitrag hinsichtlich des Systemdesigns analysiert. Hierzu wurde ein bekanntes Simulationsverfahren mit unterschiedlichen Systemparametern verwendet.

Unter Berücksichtigung verschiedener Systemmaßstäbe konnte gezeigt werden, dass das Ergebnis einer photogrammetrischen Auswertung durch Maßstabsfestlegung in allen drei Koordinatenrichtungen optimiert werden kann hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Datensätzen. Der signifikante Einfluss der in der Regel schlechter bestimmten Maß-

stabsstrecken aus der Ausgleichung im Vergleich zu unabhängig kalibrierten Längen bestimmt den verbleibenden Trend.

Die Objekterfassung durch einen Halbverband verschlechtert das Ergebnis. Ebenso verhält es sich bei der Erfassung durch zu wenig gekantete Bilder. Etwa 10% aller Bilder sollten eine Kantung $>\pm 90^\circ$ unterliegen. Im Bezug auf die Bestimmung von Maßstabspunkten kann zusammenfassend vermerkt werden, dass ein Maßstabspunkt durch Abbildung in etwa 5% aller Bilder, gute Schnitte vorausgesetzt, ausreichend bestimmbar ist.

Abschließend wird empfohlen für Kalibrierungen und Auswertungen eine Mehrfach-Erfassung durchzuführen. Eine Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit ist hiermit durch nur gering höheren Aufwand möglich, sofern automatische Mess- und Auswertalgorithmen eingesetzt werden können.

Literaturverzeichnis

COX, M. G., DAINTON, M. P., HARRIS, P. M., 2001: Software Specifications for Uncertainty Calculation and Associated Statistical Analysis; NPL Report CMSC 10/01

COX, M. G., DAINTON, M. P., 2004: Software Specifications for Uncertainty Evaluation; NPL Report CMSC 40/04 (CMSC 10/01 revised)

FRASER, C.S., 1984: Network Design Considerations for Non-Topographic Photogrammetry; PE&RS Vol. 50, No. 8, pages 1115 - 1125

FRASER, C.S., 1996: Network design. In: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, pages 256 – 281, Edited by K.B. Atkinson, WHITTLES Publishing

HASTEDT, H., LUHMANN, T., TECKLENBURG, W., 2004: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation, Publikationen der DGPF, Band 13, S. 359-366

HASTEDT, H., 2004: Monte-Carlo-Simulation in Close-Range Photogrammetry, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. 35, part B5, pages 18 – 23

ROBERT, C. P., CASELLA, G., 2002: Monte Carlo Statistical Methods; Springer-Verlag

VDI/VDE 2634, BLATT 1, 2002: Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung, VDI/VDE-Handbuch Messtechnik II

WESTER-EBBINGHAUS, W., 1985: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich. In Kupfer/Wester-Ebbinghaus (ed.): Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 275, S. 106 - 114