

Korrektur der Ellipsen-Exzentrizität im Kontext von Kamerakalibrierungen

Waldemar MORDWINZEW, Burkhard TIETZ, Frank BOOCHS, Dietrich PAULUS

Zusammenfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit dem Einfluss der Zielmarkenexzentrizität während der Kamera-Kalibrierung in Kombination mit verschiedenen Kalibrierkörpern. Zunächst wird deren Einfluss auf die Resultate anhand numerischer Simulationen nachgewiesen. In diesen Simulationen wird eine Erfassung des Einflusses der Exzentrizität auf Bildmessung, Objekt- und Kamerageometrie angestrebt. Im zweiten Schritt wird eine Rekalibrierung mit vergleichbarer Aufnahmeconfiguration durchgeführt. Dabei werden Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede der erreichten Ergebnisse diskutiert sowie eine mögliche Kompensation des Einflusses in der Praxis erörtert.

1 Motivation

Während einer Kamerakalibrierung mittels Bündelblockausgleichung werden Parameter der Abbildung (Verzeichnung & Kamerakonstante) sowie die Geometrie des aufgenommenen Objektes bestimmt. Diese Berechnung basiert auf Strahlenschnittbedingungen. Um Bildstrahlen und deren Schnitte automatisch zu erfassen, werden im Bereich der optischen Messtechnik, allen voran in der Nahbereichsphotogrammetrie, auf Ebenen abgebildete, 2D-Kreiszielmarken verwendet. Diese zeichnen sich, wie in LUHMANN (2014) aufgezählt, durch eine Vielzahl positiver Eigenschaften aus. Deren Verwendung birgt jedoch auch Nachteile bzw. Besonderheiten.

ZHOU (1986) fand einen systematischen Effekt, der wie in Abb. 1 dargestellt, durch die projektive Abbildung in die Sensorebene entsteht. Dabei handelt es sich um den Widerspruch zwischen errechnetem Zentrum der elliptischen Abbildung und dem tatsächlichen virtuellen Zentrum aus der Projektion der Zielmarke im Objektraum. Dieser Widerspruch wird als Zielmarken-, Ellipsen- oder Abbildungsexzentrizität bezeichnet.

Bei Vorhaben, die sehr hohe Relativgenauigkeiten bei mehreren Metern Messvolumen anstreben, ist es oftmals notwendig Einflüsse zu untersuchen, die ein bildseitiges Fehlerpotential von $1/30\text{px}$ und weniger besitzen. Wie in DOLD (1996,1997) beschrieben zählt hierzu neben der entfernungsabhängigen Verzeichnungskorrektur im Nahbereich auch die Ellipsen-Exzentrizität. Generell gilt, dass der Nutzer die Aufnahmeconfiguration so planen muss, dass der Betrag der Exzentrizität unterhalb des Bildrauschens liegt. Als Grenzwert könnte man die Qualität der verwendeten Methode zur Detektion des Zielmarkenzentrums ansehen, welche laut LUHMANN (2003) unter günstigen Bedingungen deutlich unter $1/100$ eines Pixelelementes liegen kann.

Dies ist in der Praxis oftmals nicht möglich, da ein generelles Exzentrizitätsminimum nur dann erreichbar ist, wenn alle Zielmarken des Objektraumes stets parallel zur Sensorebene stehen. Auch sind weder Abbildungsmaßstab noch Zielmarkendurchmesser vollständig frei wählbar, was dazu führen kann, dass die Messung nicht sinnvoll am vorgegebenen Objekt durchgeführt werden kann oder die Zielmarken zu klein für die Detektionsalgorithmen im Bild werden. Zusätzlich steigt durch größer abgebildete Zielmarken auch die Anzahl verwendbarer Konturpunkte. Dadurch lässt sich das Zentrum auch bei kleinen, rauschstarken Sensoren signifikanter bestimmen.

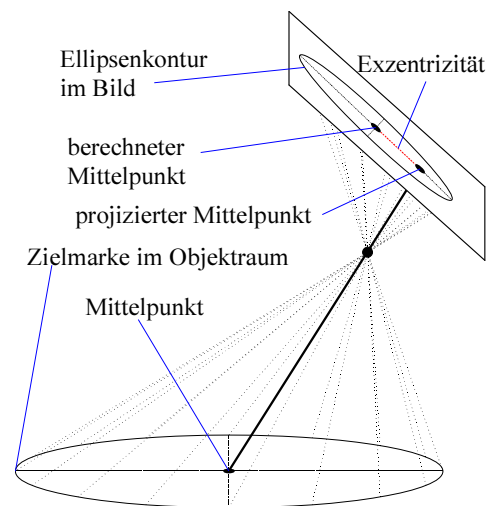


Abb. 1: Zielmarken-Exzentrizität, DOLD (1996)

2 Stand der Forschung

KAGER (1981) war einer der Ersten aus dem Feld der Photogrammetrie, der auf kreisförmige Ziele setzte. Er beschrieb ein Verfahren, um Komponenten einer Bohrplattform auszurichten, damit ein Rohr durch kreisförmige Aushebungen hindurchgeschoben werden kann. Hierzu werden 3D Koordinaten jener Kreiszentren benötigt. Die Berechnung erfolgt streng mathematisch, indem Punkte entlang des Kreisradius samt Kameraposition als Kegelschnitt ausgeglichen werden. Ein Exzentrizitätsfehler tritt dabei naturgemäß nicht auf.

ZHOU (1986) beschrieb den Exzentrizitäts-Effekt als die Bildverarbeitung Einzug in die Photogrammetrie hielt und es ermöglichte Ellipsenzentren aus ihrer Kontur im Bild zu bestimmen. In den darauf folgenden Jahren und bis heute ist die Forschung in diesem Bereich immer noch sehr aktiv. DOLD (1996) veröffentlichte eine Formel, die eine Berechnung des Betrags des Exzentrizitätsfehlers in Abhängigkeit von Kamerakonstante, Zielmarkendurchmesser, Aufnahmeabstand und Schnittwinkel mit der Zielmarkenebene ermöglicht. Der Betrag alleine, ohne eine dazu gehörige Richtungsangabe, gestattet nur die Abschätzung der Fehlergröße, nicht jedoch die Wirkungsrichtung. Damit sind auch keine korrigierenden Maßnahmen möglich. LENZ (1988) dagegen

modelliert die Exzentrizität als Vektor im Kamerasystem. Dazu notwendig sind neben äußerer Orientierung der Kamera, der Bildmarkenradius im Objektraum und der Abstand der Linse zur Abbildungsebene (Bildweite). Mit der Abschätzung aus der ersten Formel können die Parameter dennoch so festgelegt werden, dass der Exzentrizitätsfehler den Vorgaben und Zielen einer Messkampagne nicht im Wege steht.

Daneben sind vielerlei Ansätze wie AHN et al. (1999) zur Kompensation veröffentlicht, welche wie bereits in KAGER (1981) verwendet, auf projektiver Geometrie basierten und wie in OTEPKA et al. (2004) zusätzliche Parameter einführen um auch Abbildungseigenschaften der Optik und des Sensors zu berücksichtigen. Hierzu sind angepasste mathematische Formeln notwendig, die einen deutlich höheren Rechenaufwand mit sich bringen. Es wurden auch vollständig andere Wege beschritten. Dazu gehört z. B. die Verwendung von kugelförmigen Zielkörpern. Doch neueste Untersuchungen von LUHMANN (2014) belegen, dass auch Kugeln nicht frei von Exzentrizitäten sind.

Die Auswirkung von nicht behobenen Exzentrizitätsfehlern auf die einzelnen Parameter ist bis heute noch nicht vollständig untersucht. LENZ (1988) vermutet, dass es dadurch zur Verfälschung der geschätzten Parameter kommt. Diese Vermutung wird in DOLD (1996) mit Hilfe einer Simulationsrechnung nachgewiesen.

Die vorliegende Arbeit strebt eine vollständigere Erfassung des Einflusses der Exzentrizität auf Bildmessung, Objekt- und Kamerageometrie in Kombination mit ebenen- sowie quaderförmigen Kalibrierkörpern an. Dies wird zuerst anhand von numerischen Simulationen und einer darauf folgenden Realkalibrierung erreicht.

3 Simulationen

Eine Veränderung in der Bündelgeometrie, welche durch Exzentrizitätsfehler verursacht wird, lässt sich am besten in numerischen Simulationen offenlegen. Diese ermöglichen auch Effekte voneinander zu trennen, um sie separat zu betrachten. In der vorliegenden Arbeit steht die Untersuchung des Exzentrizitätseinflusses und dessen Behebung im Vordergrund. Daher sind zunächst keine weiteren Fehler/Rauschquellen modelliert. Es besteht lediglich eine numerische Limitierung durch den verwendeten Datentyp.

Simuliert werden zwei Szenarien, eine Kalibrierebene und ein Kalibrierkörper in Form eines Quaders. Die Wahl des ersten Szenarios begründet sich mit der Popularität ebener Kalibrierkörper und dem Vergleich mit den Ergebnissen in DOLD (1996). Das zweite Szenario basiert auf der Vorschrift VDI 2634 und soll durch räumliche Verteilung der Objektpunkte und Kontrollstrecken mögliche Effekte aufdecken, die mit der Kalibrierebene eventuell nicht detektierbar sind.

3.1 Setup

Während der Simulation entspricht die Aufnahmeconfiguration in etwa der später folgenden Realkalibrierung. Die Chipgröße des Aufnahmesystems beträgt 5,632x4,224mm, das Objektiv hat eine Brennweite von 8mm. Die Zielmarken haben einen Durchmesser von 30mm (≈ 30 -40px im Bild) und sind auf einem Raster aus 50mm Zellen angeordnet. Zur Erzeugung des Bildmaterials werden Konturpunkte jeder Zielmarke in den Bildraum projiziert und daraus ausgleichende Ellipsenparameter bestimmt. Der Mittelpunkt, welcher als Messwert in die Bündelblockausgleichung einfließt, beinhaltet durch diese Vorgehensweise den für die Auswertung benötigten Exzentrizitätsfehler.

Für die Beschreibung der inneren Orientierung wird das Verzeichnungsmodell nach BROWN (1971) gewählt, worin die Hauptpunktlage, die radial symmetrische, asymmetrische und tangentiale Verzerrung, sowie Affinität und Scherung berücksichtigt werden.

3.2 Korrektur der Ellipsenexzentrizität

Zur Korrektur der Ellipsenexzentrizität muss die Flächennormale der jeweiligen Zielmarke bekannt sein. Daher wird die Exzentrizität in drei Schritten behoben. Im ersten Schritt erfolgt eine Bündelblockausgleichung als Simultankalibrierung mit unkorrigierten Bildkoordinaten. Der dabei auftretende Rangdefekt der Normalgleichungsmatrix wird mittels Helmert-Bedingungen behoben. Mit den so ermittelten Werten für die äußeren Orientierungen, Objektkoordinaten und Oberflächennormalen werden Korrekturwerte für die Bildkoordinaten berechnet.

Mit den nun korrigierten Bildkoordinaten erfolgt im zweiten Schritt eine erneute Bestimmung der Näherungswerte für die Objektkoordinaten. Als letzter Schritt wird eine erneute Ausgleichung mit den korrigierten Bild- und Objektkoordinaten gestartet.

3.3 Kalibrierebene

Die simulierte Kalibrierebene entspricht im Objektraum einer Breite von 2m und einer Länge von 1.5m. Das Seitenverhältnis ist an das 4/3 Sensorformat angepasst. Um zu prüfen in wie weit sich Kontrollstrecken zur Approximation der äußeren Genauigkeit eignen, werden insgesamt sechs Kontrollstrecken modelliert. Zwei davon liegen auf den Hauptdiagonalen und jeweils eine Strecke an jeder Rechteckseite. In allen 100 Bildern zielt die optische Achse auf das Zentrum der Kalibrierplatte. Diese Ausrichtung entspricht zwar nicht exakt dem Vorgehen in der Praxis, hilft jedoch den Einfluss der Exzentrizität deutlicher hervorzuheben. Vier Bilder beschreiben gekantete Senkrechtaufnahmen. Die übrigen Bilder werden angelehnt an DOLD (1996,1997) - wie in Abb. 3 dargestellt - in 30°, 60° und 90° Orbits mit je 32 Aufnahmen simuliert. Jeder Orbit hat somit acht Standpunkte an denen die Kamera viermal gekantet wird. Mit diesem Vorgehen ist eine optimale Trennung der Verzeichnungsparameter in der resultierenden Kovarianzmatrix sichergestellt. Die Kalibrierebene liegt in der Y-Z-Ebene des Weltkoordinatensystems.

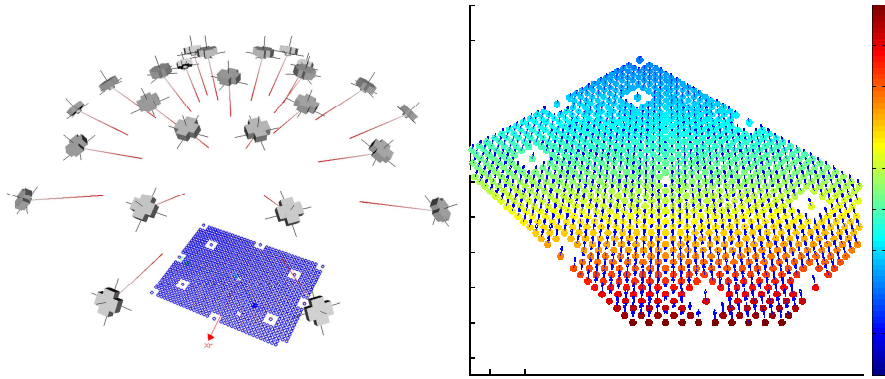


Abb. 3: Ergebnis der Ebenensimulation. Residuen stark überzeichnet.

Abb. 3: Betrag und Richtung der Exzentrizität der Kalibrierebene in 1/100px.

Die Erfassung des Exzentrizitätsvektors ist nur dann möglich, wenn aus dem Bildmaterial bzw. der Epipolargeometrie die Oberflächennormale der Zielmarke berechnet werden kann. Dies gestaltet sich im Fall der Kalibrierebene als besonders einfach, da alle Zielmarken ungefähr die gleiche Orientierung besitzen. In solchen Fällen bietet sich z. B. die Berechnung einer Best-Fit Ebene durch Bestimmung des Eigensystems über alle Objektpunkte nach GEISE et al. (1974) an.

Tabelle 1 enthält die Genauigkeitsangaben der simulierten Bildmessungen. Durch die Exzentrizität erfahren diese ein RMS von 1/35 Pixel. Nach durchgeführter Berechnung ergibt sich aus dem Ergebnisprotokoll ein RMS von null. Die Widersprüche sind somit vollständig durch das Modell kompensiert. Damit bestätigt sich auch hier die Aussage von LENZ (1988), dass sich der Einfluss der Exzentrizität nicht zwangsläufig in der Ausgleichung detektieren lässt. Für einen Nachweis über die innere Genauigkeit muss das Design der Kalibrierebene und der Aufnahmeverlauf in künftigen Untersuchungen so geändert werden, dass sich der Exzentrizitätsfehler, wie in Abb. 3 veranschaulicht, nicht mehr symmetrisch in den Bildmessungen äußert und sich damit widerspruchsfrei durch das Modell kompensieren lässt.

Tabelle 1: Kalibrierebene, Residuen der Bildmessungen.

Angaben in [px]	RMS _x	RMS _y	MAX _x	MAX _y
Simulierte Exzentrizität	1/35	1/35	1/9	1/10
Kalibrierprotokoll n. Ausgleichung	0	0	1/2200	1/2200

Das objektseitige Residuenbild zum Referenzwert deckte sich mit den Ergebnissen die schon in DOLD (1996) erzielt wurden, wobei der Einfluss auf die innere Orientierung nicht verglichen werden kann, da dieser nicht dokumentiert ist. Gemäß Tabelle 2 verschieben sich die Objektkoordinaten und die Kamerapositionen ähnlich einer Maßstabskomponente zum Zentrum. Allerdings unterscheiden sich die einzelnen Beträge deutlich. In den Objektkoordinaten liegen sie nur im Mikrometer- bzw. Submikrometerbereich, während die Veränderung der Kamerapositionen in Zusammenhang mit der inneren Orientierung betrachtet werden muss.

Tabelle 2: Kalibrierebene, äußere Genauigkeit.

Äußere Genauigkeit	RMS _x	RMS _y	RMS _z	MAX _x	MAX _y	MAX _z
Kamera Positionen [µm]	62	78	78	88	146	146
Objektkoordinaten [µm]	6	1	1	6	2	2

Der Exzentrizitätsfehler verändert die Verzeichnungparameter kaum. Die Differenzen aller Koeffizienten liegen nahe bei null und sind größtenteils nicht signifikant. Die Kamerakonstante verändert sich von 8.0 auf 7.99977 und verursacht getrennt betrachtet, wie in Abb. 4 dargestellt, einen maßstäblichen Fehler von 29ppm. Der vergleichbar hohe Betrag liegt zum einen an den symmetrisch in der Ebene angeordneten Kreismarken aber auch an der bewusst gewählten Aufnahmesituation, in der alle Kameras auf den Plattenmittelpunkt zielen. Die Exzentrizitäts-Vektoren (Abb. 3) sind damit in jeder Aufnahme fast richtungshomogen, mit den größten Fehlerbeträgen am Bildrand. Rechnerisch kompensieren sie sich in der Ausgleichung überwiegend durch die Kamerakonstante und Verschiebungen der Kamerapositionen, die sich, wie in Abb. 1 gezeigt, konzentrisch zum Punktfeld hin verschieben. Bei Ebenen wird dies zusätzlich durch die hohe Korrelation zwischen der äußeren und inneren Orientierung begünstigt (LUHMANN (2010)). In den Objektkoordinaten kommt es rechnerisch zu nachweisbaren und ebenfalls systematischen Veränderungen. In der Praxis spielen diese jedoch nur dann eine Rolle, wenn hier Genauigkeiten unter 6µm angestrebt werden.

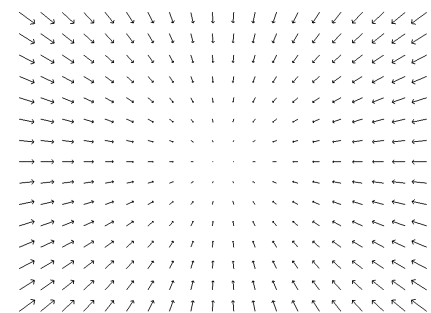


Abb. 4: Verzeichnungsbild der Kalibrierebene. Maßstab: 0.1px.

Wird die so bestimmte innere Orientierung in einem weiterführenden Verbund, dann führen Abweichungen in der Kamerakonstante nicht zwangsläufig zu Fehlern im Objektraum, da diese, wie schon bei der Kalibrierung, je nach Konfiguration durch äußere Orientierungen aufgefangen werden können. Findet diese Art von Kompensation nicht statt, so können durch den maßstäbli-

chen Fehler bei gleich gewähltem Messvolumen Objektraumdeformationen von ca. $70\mu\text{m}$ entstehen, die wohlgermerkt allein der Kalibrierung ohne Exzentrizitätskorrektur zuzuschreiben sind.

Alle Kontrollstrecken liegen geometrisch betrachtet in der Kalibrierebene. Im Kalibrierprotokoll ist das Vorzeichen des Fehlers durchgehend negativ und deren Betrag identisch zur Kontrollstrecke auf der gegenüberliegenden Seite. Die größten Fehlbeiträge mit jeweils $3.2\mu\text{m}$ liegen beide auf den Hauptdiagonalen und repräsentieren rein rechnerisch betrachtet tatsächlich die in dieser Ebene erreichte äußere Genauigkeit. Die theoretisch erreichte äußere Relativgenauigkeit liegt insgesamt bei 1:400.000.

3.4 Quaderförmiger Kalibrierkörper

Der zweite simulierte Kalibrierkörper ist wie in Abb. 5 zu sehen an die VDI 2634 angelehnt. Die Maße des Quaders sind $2 \times 2 \text{m}$ in der Grundfläche und $1,5 \text{m}$ in der Höhe. An den Seiten und der Hauptdiagonale befinden sich neun Kontrollstrecken. Simuliert werden 96 Aufnahmen aus acht Standpunkten und drei verschiedenen Höhen mit jeweils vier Kantungen.

Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen zusammengefasst die in der Bündelblockausgleichung erzielten Resultate. In vielen Aufnahmen sind sowohl parallele als auch stark geneigte Kreismarken sichtbar. Entsprechend kommen vergleichbar kleine oder große Exzentrizitätsfehler mit unterschiedlichen Richtungen in jedem Bild vor. Mit $1/47\text{px}$ ist der Einfluss der Exzentrizität in diesem Szenario deutlich geringer. Die dadurch entstehenden Fehler lassen sich dennoch nicht wie bei der Kalibrierebene vollständig im Abbildungsmodell kompensieren.

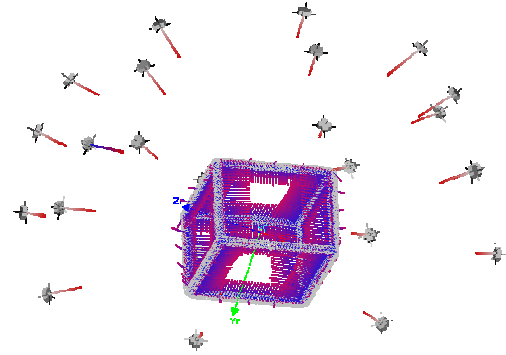


Abb. 5: Stark überzeichnete Wirkung der Exzentrizität beim quaderförmigen Kalibrierkörper.

Tabelle 3: quaderförmiger Kalibrierkörper, Residuen der Bildmessungen.

Angaben in [px]	RMS _x	RMS _y	MAX _x	MAX _y
Simulierte Exzentrizität	1/47	1/48	1/13	1/13
Kalibrierprotokoll n. Ausgleichung	1/200	1/200	1/58	1/48

Entsprechend ist die Verfälschung der Kamerakonstante von 8.0 auf 8.00004 insgesamt geringer als bei der Kalibrierebene. Der dadurch verursachte, maßstäbliche Fehler liegt bei 5ppm. Die Verzeichnungsparameter sind zwar im Betrag größer als bei der Kalibrierebene, bleiben aber überwiegend nicht signifikant. Aus Abb. 6 geht hervor, dass auch diesem Fall hauptsächlich die Kamerakonstante das Verzeichnungsbild verändert.

Für den Fall, dass die fehlerhaft bestimmte innere Orientierung in einem Bildverbund mit gleicher Ausdehnung nicht durch äußere Orientierungen kompensiert werden soll, würde es zu einem Objektraumfehler von $\approx 15\mu\text{m}$ kommen können. Aus dieser Betrachtung heraus ist der räumliche Aufbau eine deutlich bessere Wahl, wenn der Exzentrizitätsfehler während der Kalibrierung eine nicht zu vernachlässigende Fehlergröße ist. Die fehlende Kompensation durch das Abbildungsmodell zeigt sich auch in den äußeren Genauigkeiten. Verglichen mit dem ebenen Kalibrierkörper werden die Objektkoordinaten, wie zu erwarten, bei diesem Kalibrierkörper stärker beeinflusst, während die Kamerapositionen einen geringeren Einfluss erfahren.

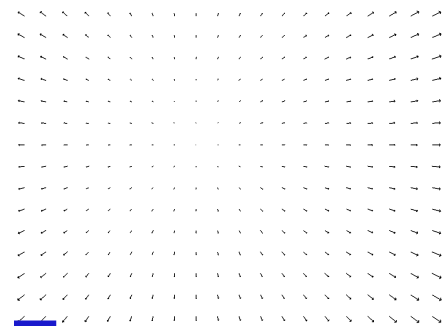


Abb. 6: Verzeichnungsbild des Kalibrierquaders. Maßstab: 0.1px.

Tabelle 4: Ergebnisse des quaderförmigen Kalibrierkörpers

Äußere Genauigkeit	RMS _x	RMS _y	RMS _z	MAX _x	MAX _y	MAX _z
Kamera Positionen [μm]	20	37	37	32	47	47
Objektkoordinaten [μm]	13	24	24	40	61	61

Die Kontrollstrecken haben einen mittleren quadratischen (RMS) Fehler von $13\mu\text{m}$. Die größte Abweichung von $34\mu\text{m}$ liegt auf der Hauptdiagonale, während seitlich angebrachte Kontrollstrecken nur Abweichungen von wenigen μm besitzen. Gemäß Tabelle 4 sollte der der RMS Wert bei ca. $50\mu\text{m}$ ¹ liegen, womit Kontrollstrecken in dieser Konfiguration weniger in der Lage sind Deformationen des Verbunds nachzuweisen. Aus Abb. 5 ist ersichtlich wie diese Diskrepanz zustande kommt. Die äußeren Seiten des Quaders sind bevorzugt zum Schwerpunkt parallelverschoben ohne dabei eine vergleichbar große Längenkontraktion zu erfahren. Da der Exzentrizitätsfehler sich in diesem Szenario auch in den Objektkoordinaten äußert, liegt die theoretisch erreichbare, äußere Relativgenauigkeit bei 1:88:000.

¹ $50\mu\text{m} \approx \sqrt{2} \cdot \sqrt{(\text{RMS}_x^2 + \text{RMS}_y^2 + \text{RMS}_z^2)}$

4 Realkalibrierung

Für den Nachweis der Wirkung und Korrektur des Exzentrizitätsfehlers wird eine Realkalibrierung mit einem quaderförmigen Kalibrierkörper durchgeführt, wie er von der VDI 2634 vorgeschlagen wird. Die Ausmaße des Quaders betragen $2 \times 2 \times 1,5$ m. Die verwendete Kamera verfügt über einen $5,332 \times 4,224$ mm CMOS Sensor. Für die Optik wird ein 8 mm Objektiv verwendet. Der Zielmarkendurchmesser für alle Objektpunkte, die nicht auf Kontrolltrecken liegen, beträgt 30 mm. Damit entspricht diese Konfiguration näherungsweise den zuvor verwendeten Simulationsparametern.

Da im Gegensatz zur Simulation i.d.R. keine Sollwerte für Objektpunktfeld, innere sowie äußere Orientierung zur Verfügung stehen, wird der Nachweis indirekt geführt. Hierzu wird die Kalibrierung zwei Mal ausgewertet, mit und ohne Korrektur der Exzentrizitätsfehler. Die Differenz der Ergebnisse entspricht der in Abb. 7 dargestellten Visualisierung. Nach Behebung des Exzentrizitätsfehlers ergibt sich wie erwartet ein inverses Muster zur Abb. 5, wobei Abweichungen hauptsächlich auf den leicht unterschiedlichen Aufbau und zufällige Messfehler zurückzuführen sind, sich aber die in den Simulationen beobachteten Veränderungen durch die praktische Messung auch wiederfinden.

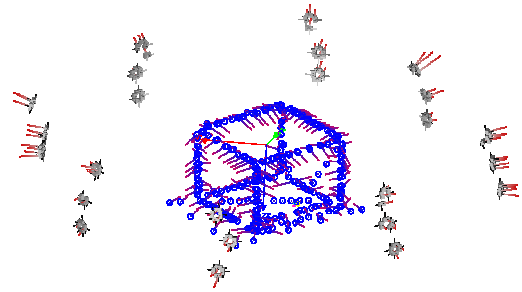


Abb. 7: Realkalibrierung -Vergleich zwischen korrigiertem und regulär berechnetem Verbund.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Auswirkung der Ellipsenexzentrizität in Kombination mit zwei Kalibrierkörpern mit Hilfe von künstlich erzeugten Bildern untersucht. Die absichtlich eingeführten Fehler verursachen Widersprüche im Datenmaterial. Bei Verwendung der Kalibrierebene kommt es in der gewählten Aufnahmeanordnung zu einer Kompensation durch das Modell. Die Abweichungen verlagern sich bevorzugt in die Parameter der äußeren sowie inneren Orientierung. Deren innere Genauigkeit bleibt davon unberührt und wird im Kalibrierprotokoll als nahezu fehlerfrei ausgewiesen. In den Objektkoordinaten bleibt die Abweichung zur Referenz im Mikrometer- bzw. Submikrometerbereich. Als Konsequenz dieser Kompensation entsteht in der Kamerakonstante ein Maßstabsfehler von 29 ppm. In den Verzeichnungsparametern kommt es zu sehr kleinen, vernachlässigbaren Fehlbeträgen. Auch sind diese überwiegend nicht signifikant.

Beim quaderförmigen Kalibrierkörper kommt es ebenfalls zu einer Kompensation durch das Modell. Allerdings in einem deutlich geringeren Ausmaß. Es kommt zu Abweichungen in der inneren-, äußeren Orientierung und in den Objektkoordinaten. Die Widersprüche zeigen sich auch in den Standardabweichungen der Bild- und Objektkoordinaten des Kalibrierprotokolls. In den Bildmessungen wäre allerdings ein Nachweis über die innere Genauigkeit erst ab $RMS_{XY} \approx 1/141$ px möglich. Die Kamerakonstante besitzt mit 15 ppm einen deutlich geringeren Maßstabsfehler. Die Beträge der Verzeichnungscoeffizienten sind zwar höher als bei der Kalibrierebene, ihr Einfluss ist aber immer noch nicht signifikant und vernachlässigbar.

Die Korrelationen in den Parametern der inneren und äußeren Orientierung führen also dazu, dass das Risiko einer Verfälschung der inneren Orientierung zunimmt, je systematischer die Exzentrizität in den Bildern ausgeprägt ist. Aus diesem Grund besteht insbesondere für ebene Testfelder das Risiko fehlerhafter Ergebnisse, die sich nicht aufdecken lassen. Im ungünstigsten Fall hätte die Weiterverwendung der in den gezeigten Beispielen kalibrierten Kameras das Potenzial für einen Fehler von 15 ppm beim Quader bzw. 29 ppm bei der Ebene.

An dieser Stelle muss allerdings betont werden, dass sich die beschriebenen Einflüsse und Systematiken je nach gewählter Aufnahme-Konfiguration und Wahl des Datums abweichen können. Wenn die Aufnahme-Konfiguration größere Kreiszielmarken erfordert um die Detektionsgenauigkeit zu steigern, wie es z. B. bei großen Öffnungswinkeln und Maßstabsunterschieden, günstiger Optik, kleinen oder rausch-starken Sensoren der Fall ist, dann führt die Korrektur des Exzentrizitätsfehlers zur Steigerung der äußeren Genauigkeiten.

In der verwendeten Simultankalibrierung wird der Rangdefekt durch die Einführung von Helmert-Bedingungen behoben. Da hierzu die Objektkoordinaten als Datumspunkte einfließen, werden diese wie in Absatz 3.2 beschrieben, vor ihrer Verwendung von der Exzentrizitäts-Systematik bereinigt. Die vollständige Kompensation dieses Fehlers konnte in der numerischen Simulation direkt nachgewiesen werden. Während der Realkalibrierung fehlte die Referenzinformation. Die Wirkung der Korrektur lässt sich jedoch indirekt über die Beträge und Richtungen der Verschiebungen der Kamerapositionen und Objektkoordinaten bestätigen.

Durch den Exzentrizitätsfehler entsteht ein konfigurationsabhängig variierendes Einflussmuster. Daher sollten künftige Untersuchungen den Einfluss des Exzentrizitätsfehlers weiter differenzieren. Hierzu gehören Simulationen zur Einführung von alternativ ausgerichteten bzw. festgehaltenen Kontrollstrecken oder von festen Objektkoordinaten, deren Positionen mit übergeordneter Genauigkeit bestimmt sind. Auch trägt das Design der verwendeten Kalibrierkörper zur entstehenden Systematik bei. Prüfkörper mit alternativer Bauweise oder zufälliger Anordnung von Zielmarken mit variierenden Radien sollten daher ebenfalls in Betracht gezogen werden. Gleichzeitig sollte die numerische Simulation weitere Fragen aufklären, z. B. wie zusätzlich modellierte, physikalische Sensoreigenschaften das Fehlerbild beeinflussen. Damit kann insbesondere abgeschätzt werden ab welchem Niveau diese Unsicherheiten Effekte der Exzentrizität betragsmäßig überlagern, wodurch die Exzentrizitäts-Korrektur womöglich wirkungslos verbleibt.

Danksagung

An dieser Stelle bedanken sich die Autoren bei der Stiftung Rheinland-Pfalz, die diese Untersuchungen im Rahmen des Projektes Optimierte geometrisch/physikalische Modellierung digitaler Industriemesskameras im Einsatz der industriellen Qualitätskontrolle (MinKam), Förderkennzeichen: (961 – 386261 / 1055) finanziert.

Literatur

- Ahn, S. J. & Warnecke, H.-J. (1999): *Systematic geometric image measurement errors of circular object targets: Mathematical formulation and correction*. Photogrammetric Record, Vol 16(93), S. 485-502
- Brown, D. C. (1971): *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering, Vol 37, S. 855-866
- Dold, J. (1996): *Influence of target size on the results of photogrammetric bundle adjustment*. IAPRS, Vol. 26, Part B5, S. 119-123.
- Dold, J. (1997): *Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.
- Otepka, J. O. & Fraser, C. S. (2004): *Accuracy enhancement of vision metrology through automatic target plane determination*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV Teil B5, S. 873-879.
- Geise, G. & Schipke, S. (1974): *Ausgleichsgerade, -kreis, -ebene und -kugel im Raum Dem 25. Jahrestag der DDR gewidmet*. Mathematische Nachrichten, Vol. 62, S. 65-75.
- Kager, H. (1981): *Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren*. Dissertation, Technische Universität Wien.
- Lenz, R. (1988): *Zur Genauigkeit der Videometrie mit CCD-Sensoren*. Mustererkennung 1988, 10. DAGM Symposium, Springer-Verlag, S. 179-189.
- Luhmann, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie. 2., überarbeitete Auflage*. Verlag Wichmann.
- Luhmann, T. (2010): *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. Habilitationsschrift, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck.
- Luhmann, T. (2014): *Eccentricity in images of circular and spherical targets and its impact to 3D object reconstruction*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5, 2014 ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy.
- Zhou, G. (1986): *Accurate determination of ellipse centres in digital imagery*. ASPRS-ACSM Annual Convention, Volume 3, S. 278-286.

Mordwinzew, Waldemar

i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik Hochschule Mainz - University of Applied Sciences

waldemar.mordwinzew@hs-mainz.de

Tietz, Burkhard

i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik Hochschule Mainz - University of Applied Sciences

burkhard.tietz@hs-mainz.de

Boochs, Frank

i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik Hochschule Mainz - University of Applied Sciences

frank.boochs@hs-mainz.de

Paulus, Dietrich

Institut für Computervisualistik

Universität Koblenz-Landau

paulus@uni-koblenz.de