

Ein photogrammetrisches Verfahren zur Kalibrierung eines Beamers

Christian MULSOW

Einleitung und Motivation

Für die Erfassung sich in Lage und Form schnell verändernder Objekte ist die Verwendung von mindestens zwei gleichzeitig erfassenden Sensoren unabdingbar. Übersteigt die Dynamik des Messobjekts die Aufnahmefrequenz von herkömmlichen Industriekameras (25 – 30 Hz), ist der Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras unumgänglich. In der Anwendung derartiger Aufnahmesysteme ergeben sich in der Regel eine Reihe von Problematiken. Zum einen ist die zur korrekten multiokularen Objektbestimmung notwendige Synchronisation der Kameras aufwendig und unter Umständen sogar unmöglich, zum anderen sind derartige Systeme sehr kostenintensiv. Daher wurden und werden andere Möglichkeiten zur Erfassung von hoch dynamischen Phänomenen entwickelt (PUTZE 2005). Eine mögliche Option ist das Ersetzen eines Sensors eines Zwei-Kamera-System durch einen Projektor, welcher die strukturierte Beleuchtung des Objekts übernimmt und damit einen Bezug zum Objektraum schafft. In der Oberflächenmesstechnik hat diese Kombination aus Projektor (aktiver Sensor) sowie einer oder mehreren Kameras (passiver Sensor) weite Verbreitung gefunden und kann für die oben genannte Messaufgabe adaptiert werden. Dabei sollte die Projektion jedoch nicht, wie sonst in Oberflächenmesstechnik üblich, in Sequenzen von Streifenmustern geschehen, sondern statisch zu erfolgen. Die Anwendung ist begrenzt auf die Aufnahme von Oberflächen.

Für die Objektrekonstruktion notwendig ist die Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung aller beteiligten Sensoren. Aufgrund der ähnlichen geometrischen Eigenschaften (Zentralperspektive) kann der Strukturprojektor in der Auswertung und Kalibrierung wie eine (inverse) Kamera behandelt werden. Dieser Umstand erlaubt den Einsatz herkömmlicher photogrammetrischer Auswertesoftware.

Als Projektoren werden in Oberflächenmesssystemen meist LCD-Linienprojektoren verwendet. Diese zeichnen sich einerseits durch eine gute geometrische Qualität aus (WOLF 1999), sind andererseits teuer und hinsichtlich der projizierbaren Inhalte unflexibel. Als Alternative bietet sich die Verwendung eines Datenprojektors („Beamer“) an, über den beliebige Inhalte projiziert werden können. Die Nutzung von Datenprojektoren in photogrammetrischen Systemen zu Messzwecken erfordert jedoch Kenntnisse über die Eigenschaften des Projektors. Dazu gehören das Wissen über den Projektionsvorgang, die innere Geometrie und deren Modellierung sowie die zeitliche Stabilität der am Messprozess beteiligten Komponenten.

In der Literatur sind in der Vergangenheit eine Reihe von Verfahren für die Kalibrierung von Projektoren vorgestellt worden (BRENNER et al. 1999, GÜHRING 2001). Diese wurden meist an speziellen photogrammetrischen Projektoren verifiziert und für diese entwickelt. Seit dem Auftauchen digitaler Projektoren für Datenprojektionszwecke sind eine Reihe von

entsprechenden Anwendungen publiziert worden. Meist wurde in diesen der Beamer ausschließlich zur strukturierten Beleuchtung eingesetzt. Einige wenige Veröffentlichungen (GÜHRING 2001, KNYAZ 2006, SADLO F. et al. 2005] stellen auch Kalibrieransätze für Beamer vor, die jedoch meist analog zu den Verfahren für photogrammetrische Projektoren sind.

Der Beitrag richtet sich primär an einen Anwenderkreis, der zum einen bereits mit einem punktuell messenden photogrammetrischen System (Kamera + Auswertesoftware) arbeitet und zum anderen einen Beamer zur Verfügung hat. Zunächst werden die relevanten Besonderheiten bei der Verwendung eines Beamers in photogrammetrischen Meßsystemen erläutert. Im Kern des Beitrages wird ein Kalibrieransatz für Datenprojektoren vorgestellt, der auf bekannte Modellierungen und gebräuchlicher photogrammetrischer Software für die punktweise Auswertung von Bildverbänden basiert. An einem konkreten Untersuchungsobjekt wird dann das vorgestellte Verfahren verifiziert und das Genauigkeitspotential des Datenprojektors abgeschätzt.

1 Untersuchungsobjekt

Viele mobile Projektoren für Präsentationszwecke, wie auch der für die Untersuchungen verwendete Datenprojektor EPSON EMP 710, arbeiten nach dem LCD-Prinzip. Die Projektionsträger sind Liquid Crystal Displays (auch LCD-Panels genannt), ähnlich denen, die in TFT-Flachbildschirmen zum Einsatz kommen. Das Licht einer Lichtquelle wird durch die LCD-Matrix geleitet. Dabei passiert nun, je nach Schaltungszustand jedes Pixels, mehr oder weniger Licht das Element und sorgt damit für einen helligkeitsmodulierten Punkt auf der Projektionsfläche. Die meisten Multimedia LCD-Projektoren arbeiten mit drei LCD-Matrizen zur Farbdarstellung. Jedes dieser drei Panels steht für jeweils eine Grundfarbe des RGB-Farbraumes. Systeme aus dichroitischen Spiegeln trennen das Lampenlicht in seine Rot-, Grün- und Blauanteile auf. Dabei lassen die teildurchlässigen Spiegel jeweils einen der RGB-Farbanteile durch und leiten den verbliebenen Rest zum nächsten Spiegel. Die einzelnen Lichtanteile durchleuchten das jeweilige Panel und es entstehen hinter den Matrizen Teilbilder in der jeweiligen Grundfarbe. Diese werden in einem Prisma zu einem einzigen Bild vereinigt und gelangen dann in die Projektionsoptik.

Epson EMP 710	3-Panel LCD Beamer
Projektion	Dichroitisches Spiegel- und Linsensystem
Projektionseigenschaften	
Auflösung	1024 x 768 Pixel
Projektionsformat	0,6 - 7,6 m
Projektionsabstand	1,1 - 13,8 m
Bildhelligkeit	1000 ANSI Lumen
Kontrastverhältnis	400:1



Tab. 1: Eigenschaften des Untersuchungsobjektes

Abb. 1: Epson EMP 710

Die konstruktiv notwendigen Abstände zwischen den LCD-Elementen führen zu sichtbaren Gitterlinien im Projektionsbild. Außerdem geht ein großer Anteil der Lichtenergie verloren, da die Leiterbahnen zwischen den Pixeln nicht transparent sind. Daher werden sehr oft spezielle Mikro-Linsen für jedes einzelne Pixel verwendet, die diese Effekte minimieren (HESS 2003).

Für den Einsatz in der Photogrammetrie sind diese Geräte im Allgemeinen gut geeignet. Mit einem Gewicht von bis zu unter 2 kg sind LCD-Projektoren sehr leicht zu transportieren. Die Kosten für die Anschaffung liegen in der Regel deutlich unter denen für Projektoren, welche nach anderen Prinzipien arbeiten (DLP, LCOS...). Der für die Untersuchungen verwendete Projektor EMP 710 der Fa. Epson ist ein auf der 3-Panel-LCD-Technik basierendes Gerät mit einer maximalen Auflösung von 1024 x 768 Pixel (XVGA). Die wichtigsten technischen Eigenschaften sind in obiger Tabelle (Tab. 1) aufgeführt.

2 Besondere Eigenschaften von Multimedia-Projektoren

Die räumliche Anordnung des Projektionsbildes relativ zum Projektor weicht bei den meisten Multimedia-Projektoren im starken Maße von denen anderer Projektoren ab. Die optische Achse durchstößt die Projektorebene nicht mittig, sondern oberhalb bzw. unterhalb der Ebenenmitte. Betrachtet man den Projektor als inverse Kamera, bedingt diese konstruktive Maßnahme eine stark exzentrische Hauptpunktlage.

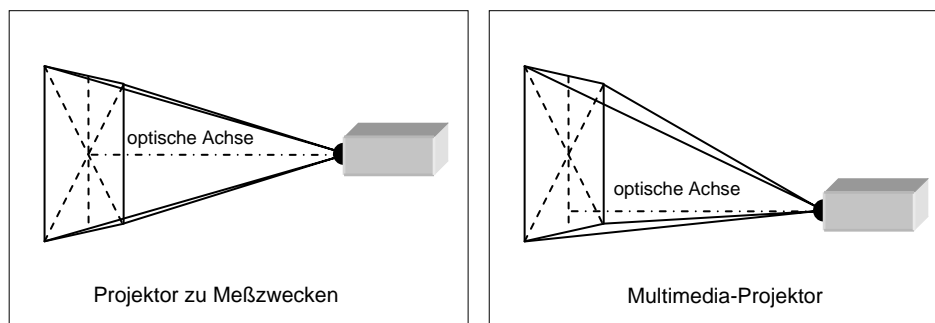


Abb. 2: Projektionsachsenlage von Projektoren im Vergleich

Die exzentrische Lage der Projektionsachse relativ zum Projektionsbild ermöglicht bei Über-Kopf-Montage des Gerätes die Projektion über die Köpfe der Betrachter hinweg bzw. bei Platzierung des Projektors zwischen den Betrachtern und der Leinwand kann über das Gerät hinweg auf das Projektionsbild geschaut werden. Der verwendete Projektor EPSON EMP 710 weist ebenfalls diese starke Exzentrizität des Hauptpunktes auf.

Die Möglichkeit der Farbdarstellung von LCD-Multimedia-Projektoren führt zu Problemen in der Projektion, welche bei Projektoren zu photogrammetrischen Zwecken nicht auftreten. Die LCD-Panels des Epson EMP 710 sind nach der POP (Panel on Prism) -Technologie mit dem Prisma, welches die Teilbilder einander überlagert, fest verbunden. Damit soll die korrekte Ausrichtung der LCD-Panels über lange Zeiträume gewährleistet und damit Fehlüberlagerungen der Teilbilder vermieden werden. Trotz dieser konstruktiven Maßnahme

werden die Teilbilder nicht einhundertprozentig stimmig überlagert und es verbleiben Restfehler. Optische Einflüsse der Projektionsoptik, wie z.B. die chromatische Abberation, sorgen zusammen mit der Fehlüberlagerung für eine nicht korrekte Darstellung des generierten Bildes auf der Objektoberfläche. Dabei sind beide Effekte nicht klar voneinander trennbar und werden hier gemeinsam behandelt. Fehldarstellungen äußern sich als Farbsäume zwischen verschiedenen gefärbten Pixeln. Die Art und Ausprägung dieser Effekte sind vom Projektionsabstand und von der Zoomeinstellung abhängig. Die Lage des Pixels im Bild hat keinen sichtbaren Einfluss. Falschabbildungen können bei der Nutzung als inverse Kamera Probleme bereiten, da der Schwerpunkt eines aufprojizierten Punktes nicht mit dessen Schwerpunkt im Ausgangsbild zusammenfällt.

Eine weitere Besonderheit von Multimedia-Projektoren ist die geringe Tiefenschärfe gegenüber in der Oberflächenmesstechnik eingesetzten Geräten. Ein großer Tiefenschärfebereich ist für die Datenprojektion nicht notwendig, da ausschließlich auf Ebenen, wie z.B. Leinwände, projiziert wird. Dieser Umstand ist bei der Verwendung zu Messzwecken zu beachten, da dies die erfassbare Objektoberfläche hinsichtlich der Tiefe limitiert.

Ebenfalls von Interesse ist die zeitliche Stabilität der inneren Geometrie des Projektors für entsprechende Anwendungen. In Versuchen konnte ein Einlaufverhalten innerhalb der ersten 10min (MULSOW 2003) nach Inbetriebnahme beobachtet werden. Dieser äußerte sich in einer vertikalen Bewegung des Projektionsbild um ~ 0.5 Pixel. Wahrscheinliche Ursachen sind Deformationen während der Erwärmung des Gerätes durch die eingebaute Lampe. Nach 7-8 Minuten stagniert diese Drifterscheinung und über die folgenden 50 min blieb das Bild stabil. Ein Bewegungstrend während dieser Zeit ist nicht signifikant erkennbar. Bei der Anwendung des Projektors zu Messzwecken sollte daher das Gerät mindestens 10 min vor Beginn der Datenaufnahme eingeschaltet werden.

3 Geometrische Modellierung eines Projektors

Die Nutzung eines Projektors zu Messzwecken erfordert die geometrische Modellierung des Projektionsprozesses und die Ermittlung der Parameter in diesem Model. Die angestrebte Verwendung von photogrammetrischen Standardverfahren und Softwarepaketen bedingt die Modellierung des Projektors als inverse Kamera. Die gleichen Festlegungen und Bedingungen im Kameramodell gelten also auch für Projektoren. Die Parametrisierung der Abbildungsfehler des Projektors erfolgte nach Brown entsprechend dem verwendeten Modell innerhalb der verwendeten Auswertesoftware (AICON DPA-Win).

4 Kalibrierung

Die Kalibrierstrategie für Projektoren kann aus dem Grundgedanken der Testfeldkalibrierung von Kameras abgeleitet werden. Die rechnerische Ermittlung der Modellparameter erfolgt danach auf Basis der Objektkoordinaten einer aufprojizierten Struktur und den zugehörigen Projektorkoordinaten.

Für Projektoren kann die Testfeldmethode in der Weise adaptiert werden, dass die auf ein geeignetes räumliches Objekt aufprojizierte Struktur als zeitlich stabiles Testfeld angesehen wird (vgl. Abschnitt 2). Die besondere Eigenschaft dieses Testfeldes ist, dass es nur für eine

„Aufnahme“ des Projektors (inverse Kamera) zur Verfügung steht. Wenn die Orientierung oder Position des Projektors gegenüber dem Objekt verändert wird, ändert sich damit auch das Testfeld. Dieser Umstand ist entscheidend für die Wahl der Projektorposition, der Orientierung gegenüber dem Kalibrierobjekt und der Anzahl der benötigten Informationen über die aufprojizierten Strukturelemente (Objektkoordinaten). Theoretisch ist die Bestimmung von 16 Parametern der inneren und äußeren Orientierung eines Projektors mit Hilfe der Objektkoordinaten von 8 aufprojizierten Strukturelementen möglich, wobei diese nicht zusammen auf einer räumlichen Ebene liegen dürfen und das Strukturmuster auf der Projektorebene formatfüllend verteilt sein muss. Die Objektkoordinaten der aufprojizierten Strukturelemente können durch geodätische Verfahren (z.B. Tachymetermessung) und/oder photogrammetrisch bestimmt werden. Die Projektorkoordinaten des Musters gehen als „Bildkoordinaten“ zusammen mit den entsprechenden Objektkoordinaten als Passpunktkoordinaten in die Berechnung der Projektorparameter ein.

Erfolgt die Bereitstellung der Objektrauminformationen durch einen Kamera-Bildverband, so lässt sich die Testfeldkalibrierung des Projektors zu einer Simultankalibrierung aller beteiligten Sensoren erweitern. Aufnahmen, die der 3D-Bestimmung von aufprojizierten Strukturelementen dienen, werden gleichzeitig zur Ermittlung der Kameraparameter verwendet. Als Eingangswerte in die simultane Kalibrierung im Rahmen einer Bündelblockausgleichung gehen dann die Bildkoordinaten der Strukturelemente aus den Kamerabildern und aus dem Projektorbild ein.

4.1 Testfeld

An das Testfeld, in diesem Fall ein strukturiert beleuchteter Körper, werden besondere Anforderungen gestellt, wie z.B. die Tiefenausdehnung und die Oberflächenbeschaffenheit. Für die Simultankalibrierung von Kameras (mehrere Aufnahmen) sind diese Anforderungen weitaus geringer als die für Projektoren (eine „Aufnahme“). Für den Kamerafall kann eine mangelnde Tiefenausdehnung des Messobjektes durch eine geeignete Aufnahmeanordnung und eine entsprechende Anzahl von Bildern kompensiert werden; dies ist im Rahmen der gewählten Kalibrierstrategie jedoch nicht möglich. Selten kann ein Messobjekt selbst als Projektionsfläche dienen, da dessen Beschaffenheit und Form den Anforderungen nicht genügt. Meist wird ein spezieller Testkörper benötigt werden. Die Konzeption eines Testkörpers ist an verschiedene Kriterien gebunden und ist im Ergebnis immer ein Kompromiss.

Einen geeigneten Grundaufbau stellt die Anordnung von mehreren parallelen Ebenen dar (siehe Abb. 3). Die Struktur kann dadurch ohne größere Verzerrungen gegenüber dem Original-„Bild“ (repräsentiert durch die Struktur auf der Projektorfläche) auf dem gesamten Körper abgebildet werden. Die Mindestanzahl der Ebenen beträgt zwei, da neben Punktinformationen quer zur optischen Achse des Projektors noch mindestens eine in Projektionsrichtung wirkende Maßstabsinformation bereitzustellen ist. Auf Grund der Tatsache, dass innerhalb des Kalibrier- und Testverfahren die Bestimmung der 3D-Koordinaten der aufprojizierten unmittelbar durch die Kameraaufnahmen erfolgt, werden an die globale Ebenheit des Kalibrierkörpers keine Anforderungen gestellt. Zusätzlich können auf dem Testkörper Messmarken zur Maßstabsfestlegung angebracht werden. Sind diese in den Kameraaufnahmen zur Bestimmung der aufprojizierten Struktur sichtbar und zuvor vermessen worden, kann die Maßstabsproblematik gelöst werden.

4.2 Beleuchtungsstruktur

Die einfachste Beleuchtungsstruktur ist der Punkt, auf die Fläche bezogen folgt daraus das Punktmuster. Die möglichst effektive Nutzung des verwendeten Auswerteprogramms DPA-Win der Fa. AICON zur Testpunktfeldbestimmung bedingt die Nutzung der firmeneigenen Punktcodierung. Das zu projizierende Punktmuster muss dem Datenprojektor als digitales Bild vorliegen, welches dann via Datenkabel an das Gerät übergeben wird. Dieses wurde in einem CAD-Programm generiert und enthält codierte und uncodierte Kreismarken (schwarze Marken auf weißem Hintergrund, siehe Abb. 3).

Das Format des Bildes (Pixelreihen und Spalten) sollte mit dem Panelformat des Projektors übereinstimmen um Verluste bei ansonsten notwendigen Formatumrechnungen zu vermeiden. Insgesamt wurden 80 Messmarken in 8 Reihen und 10 Spalten regelmäßig angeordnet.

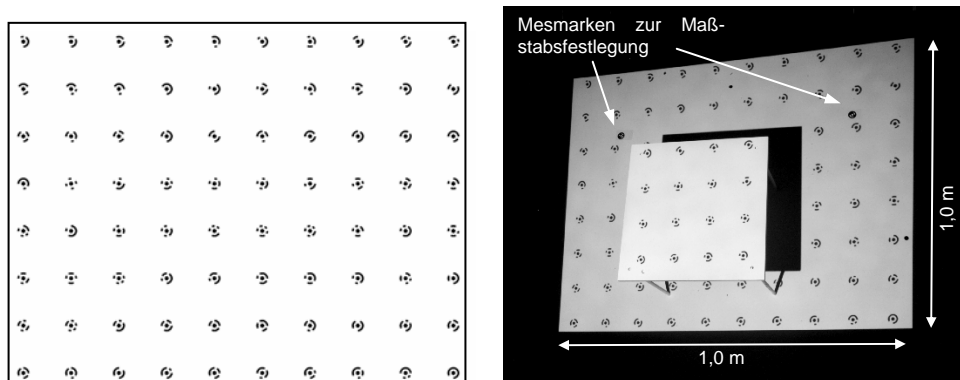


Abb. 3: Generierte Struktur und Testkörper mit aufprojiziertem Punktmuster und fest aufgebraachten Messmarken (Abstand der Ebenen ca. 25 cm)

Der weiße Hintergrund ermöglicht die Beleuchtung physischer Messmarken (weiße Marke auf schwarzem Kreis) auf dem Testkörper (Abb. 4). Die Positionen der codierten Marken im generierten Bild wurden im Programm AICON DPA-Win automatisch gemessen und dem Auswerteprozess zur Verfügung gestellt.

4.3 Datenaufnahme

Der Projektor wurde in einem Abstand von 1-2 m vor dem Testkörper positioniert und die Projektionsachse senkrecht zu den Testkörperflächen orientiert. Dann erfolgte die Akquise von 10 -15 Bilder durch eine Digitalkamera (Kodak DCS-660) entsprechend den Grundsätzen einer stabilen Aufnahmeconfiguration für Simultankalibrierungen (WESTER-EBBINGHAUS 1985) (siehe Abb. 4). Die Positionen der codierten Marken in den Bildern (aufprojiziert und physisch) wurden im Programm DPA-Win automatisch gemessen und dem Auswerteprozess zur Verfügung gestellt.

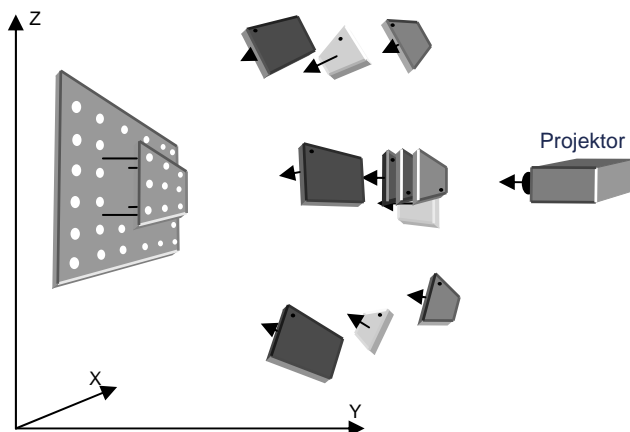


Abb. 4: Datenaufnahme

4.4 Parameterberechnung

Die rechnerische Bestimmung der Kalibrierparameter erfolgte durch Bündelausgleichung im Programm AICON DPA-Win. Aufgrund der extremen Hauptpunktlage ergaben sich Probleme bei der Prozessierung der Daten innerhalb des verwendeten Softwarepakets. Diese wurden durch eine Modifizierung der Eingangsdaten umgangen. Um die Hauptpunktlage in die Mitte des Projektorbildbereiches zu verlagern wurde zunächst die Sensorgröße des Projektors verdoppelt. Zur Wahrung der geometrischen Verhältnisse im Bild, erfolgte eine Verschiebung der Projektorkoordinaten um die ursprüngliche Sensorhöhe in y-Richtung („nach oben“). Mit diesem modifizierten Sensor- und Bilddaten konnte, ohne Beschränkung der Gültigkeit der Resultate, eine konvergierende Bündelausgleichung durchgeführt werden. In einem zweiten Lösungsverfahren unterblieb die klassische Modellierung über die Kollinearitätsgleichungen. Es wurde stattdessen der Ansatz der direkten linearen Transformation (DLT) verwendet. Dieser ist aufgrund der Linearität der Gleichungen und damit einhergehender Unabhängigkeit von Näherungswerten für die Unbekannten viel weniger anfällig gegenüber (unbekannt) stark exzentrischen Hauptpunktlagen (KWON 1998). Von der simultanen Ausgleichung aller Sensor-Parameter (Kamera und Projektor) wurde daher abgesehen und stattdessen die Berechnung der Unbekannten stufenweise durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die Objektkoordinaten und Kameraparameter über eine herkömmliche Bündelausgleichung berechnet und die Objektkoordinaten der aufprojizierten Strukturelemente der weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt. Die Berechnung der Projektorparameter erfolgte dann zunächst über den klassischen 11-parametrischen DLT-Ansatz. Dieser erlaubte die Bestimmung der äußeren Orientierungselemente, der Hauptpunktlage sowie der Affinverzeichnung. Zur Berechnung der Parameter der radial-symmetrischen und radial-asyymmetrischen Verzeichnung wurden die DLT-Gleichungen um entsprechende Terme erweitert (11+5) und die abschließende Berechnung aller Projektorparameter iterativ gestaltet (MULSOW 2003).

5 Resultate

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Parameterberechnung nach den vorgestellten zwei Ansätzen (erweiterte DLT, Bündelausgleichung) anhand eines Beispieldatensatzes untersucht. Der Testdatensatz wurde mit einem Projektionsabstand von 1.3m und mit minimaler Zoomeinstellung erstellt. Die Aufnahme der aufprojizierten Struktur erfolgte durch einen Bildverband aus 11 Bildern und aus einem durchschnittlichen Abstand von 1m. Der Kamera-Bildverband wurde in der Software DPA-Win ausgewertet und die 3-D-Koordinaten der Passpunkte mit einer dem Messsystem entsprechenden (Kodak DCS 660) Standardabweichung bestimmt ($\sim 0.01\text{mm}$ in X-, Y- und Z-Richtung). Die Passpunktkoordinaten wurden dann zusammen mit den Projektorkoordinaten der Strukturelemente innerhalb der erweiterten 16-Parameter DLT prozessiert. Im Rahmen der Ausgleichung konnten die Parameter A_3 , B_1 und B_2 als nicht signifikant erkannt und deshalb von der weiteren Berechnung ausgeschlossen werden. Die Resultate sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die simultane Bestimmung von Kamera- und Projektorparametern, sowie der 3-D Koordinaten der aufprojizierten Strukturelemente erfolgte nach der in Abschnitt 4.4 erläuterten Vorgehensweise. Die Parameter A_3 , B_1 und B_2 wurden, wie bei der Bestimmung über DLT, wegen mangelnder Signifikanz von der Ausgleichung ausgeschlossen. Die Standardabweichung der Punktbestimmung konnte durch die Nutzung des Projektors als zusätzliche Informationsquelle leicht gesteigert werden ($\sim 10\%$).

Parameter	Simultankalibrierung		16-Parameter DLT	
	Wert	Sigma	Wert	Sigma
Kamerakonstante C_v [mm]	-40.1796	0.0170	-40.5294	0.0061
Hauptpunkt u_H [mm]	-0.1299	0.0057	-0.1291	0.0027
Hauptpunkt v_H [mm]	-0.0873	0.0131	-6.9406	0.0058
Rad. Sym. Verz. A_1	-6.4339E-05	1.1543E-06	-6.3000E-05	5.6671E-07
Rad. Sym. Verz. A_2	5.4209E-08	3.0252E-09	4.8999E-08	1.4901E-09
Affinität und Scherung C_1	8.0353E-04	3.7735E-05	1.4311E-04	1.6423E-04
Affinität und Scherung C_2	9.5808E-05	3.4384E-05	8.7120E-05	1.6061E-05
Mittlerer Projektorpunktfehler in x-Richtung y-Richtung	0.000376 [mm] 0.000339 [mm]	$\sim 2/100$ [Pixel] $\sim 2/100$ [Pixel]	0.000385 [mm] 0.000378 [mm]	$\sim 2/100$ [Pixel] $\sim 2/100$ [Pixel]

Tab. 2: Resultate der Projektor-Parameterbestimmung über Simultankalibrierung und DLT

Die Differenzen zwischen den Parameter- und Genauigkeitswerten beider Berechnungen sind außerordentlich klein. Eine Beeinflussung der Kamera-Kalibrierdaten durch die Integration des Projektorbildes in die Berechnung ist nicht signifikant nachweisbar (siehe Tab.2). Auf der Grundlage der ermittelten Resultate kann das Genauigkeitspotential des verwendeten Datenprojektors mit $2/100$ Pixel angegeben werden. In den Objektraum übertragen entspricht dies einer Genauigkeit von 0.01 mm bei einer Projektionsentfernung von 1 m . Dieser Wert ist ausgesprochen hoch und entspricht nahezu dem Genauigkeitspotential der verwendeten Kamera Kodak DCS 660.

Im Rahmen der Untersuchungen konnten ebenfalls Restsystematiken nachgewiesen werden, womit bei Berücksichtigung dieser die Genauigkeit sogar noch gesteigert werden könnte. Aus dem Vergleich der Restklaffungen in den Projektorbildpunkten zweier Bestimmungen können diese Systematiken anhand der Restklaffungen verdeutlicht werden (siehe Abb. 5). Die Richtungen und Beträge der Vektoren der Restklaffungen beider Bestimmungen sind ähnlich verteilt und weisen eine gewisse Regelmäßigkeit auf. Ursachen für diese Systematik können im strukturerzeugenden System des Datenprojektors vermutet werden. Auf der Grundlage einer hohen Anzahl von Projektorkalibrierungen wäre eine Konkretisierung dieses Effektes möglich. Die Projektorbildkoordinaten könnten dann unter der Berücksichtigung dieser Systematik auf der Basis einer Look-up Table vorverbessert der nachfolgenden Berechnungen übergeben werden. Hier besteht der Bedarf an weiteren Untersuchungen.

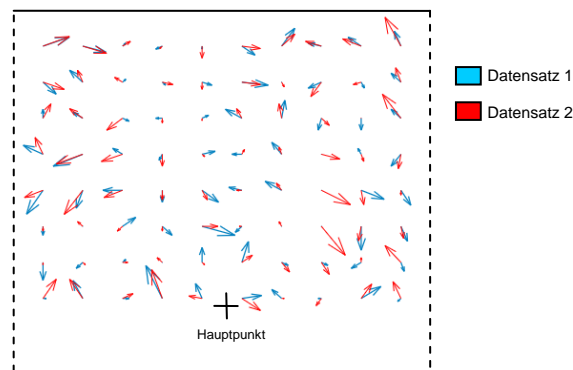


Abb. 5: Vergleich der Restklaffungen der Projektorbildpunkte (Datensatz 1 und Datensatz 2)

6 Fazit und Anwendungen

Der Nachweis der Verwendbarkeit eines Multimedia-Projektors in entsprechenden photogrammetrischen Messsystemen konnte im Rahmen der Untersuchungen erbracht werden. Die für eine eigentliche Messaufgabe notwendige Ermittlung der Kalibrierparameter erfolgte auf der Basis des im Projektor erzeugten Musterbildes und den 3-D-Koordinaten der aufprojizierten Musterelemente und konnte innerhalb von gebräuchlichen Auswerteprogrammen der Nahbereichsphotogrammetrie durchgeführt werden. Dabei wurden simultan auch die Kalibrierparameter der verwendeten Kamera bestimmt.

Auf der Grundlage von diversen Tests wurde das Genauigkeitspotential des verwendeten Datenprojektors mit 2/100 Pixel verifiziert. Dieser Wert erreicht nahezu das Genauigkeitspotential der verwendeten Kamera Kodak DCS 660. Die Genauigkeit könnte durch die Berücksichtigung von vermuteten Restsystematiken sogar noch gesteigert werden. In weiteren Untersuchungen muss nun geprüft werden, in welchem Maße sich das hohe Genauigkeitspotential des Projektors in entsprechenden Systemen zur Punktmessung umsetzen lässt. Generelle Aussagen hinsichtlich der Verwendung von Datenprojektoren können anhand eines untersuchten Gerätes nicht getroffen werden. Es müssen daher eine Reihe ver-

schiedener Datenprojektortypen hinsichtlich ihrer Eignung für photogrammetrische Messsysteme geprüft werden. Einige Firmen sind von der Anwendbarkeit in kommerziellen Systemen überzeugt, wie z.B. (RSI GmbH 2000) mit ihrem Digitalisiersystem DigiScan 2000.

7 Literatur

- Brenner, C., Böhm, J. & Gühring, J. (1999): *Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector*. 'Photonics West, Videometrics VI', Vol. 3641, SPIE, San Jose, USA, 1999.
- Gühring, J. (2001): *Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components*. 'Photonics West, Videometrics VII', Vol. 4309, SPIE, San Jose, USA, 2001.
- Hess, A. (2003): *Projektor: Sonstige Projektionstechniken*. HCinema, Marienheide.
Internet: <http://www.hcinema.de/dila.htm>
- Knyaz, V. A. (2006): *Automated Calibration Technique for Photogrammetric System based on a multi-media projector and a CCD Camera*. Proceedings of the Commission V Symposium, Dresden 2006
- Kwon, YOUNG-HOO (1998): *Direct Linear Transformation (DLT) – Method*. Texas Woman's University, Denton, USA.
Internet: <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html>
- Mulsow, C. (2003): *Photogrammetrische Verfahren zur Kalibrierung eines Beamers*. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU-Dresden
- Putze, T. (2005): *Geometric modelling and calibration of a virtual four-headed high speed camera-mirror system for 3-D motion analysis*. Grün, A.; Kahmen H. (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques VII*. Vol. II, pp. 167-174, TU Vienna.
- RSI GmbH (2000): *Optische 3D – Digitalisierer DigiScan 2000*. RSI GmbH, Oberursel.
Internet: http://www.rsi.gmbh.de/digiscan2000_d.htm
- Sadlo F. et al. (2005): *A Practical Structured Light Acquisition System for Point-Based Geometry and Texture*. Proceedings of the Eurographics Symposium on Point-Based Graphics 2005
- Wester – Ebbinghaus, W. (1985): *Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich*. DGK Reihe B, Heft Nr.275, pp. 106 – 114.
- Wolf, H. (1999): *Systematische Zusammenstellung der Projektionstechniken zur strukturierten Beleuchtung*. 6. ABW - Workshop zur 3D – Bildverarbeitung, Technische Akademie Esslingen.