

# Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem

FRANK HENZE<sup>1</sup>, GUNNAR SIEDLER<sup>2</sup> & SEBASTIAN VETTER<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist die Kombination photogrammetrischer Auswerteverfahren und digitaler Bildverarbeitung für ein anwendungsnahes System zur stereoskopischen Auswertung im Bereich Architektur, Bauforschung und Archäologie. Die stereoskopische Betrachtung am Computer ermöglicht dem Anwender die Wahrnehmung und Beurteilung der räumlichen Gestalt und Oberflächenstruktur von Objekten. Durch die Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung kann darüber hinaus die interaktive stereoskopische Bildauswertung vereinfacht und die Auswertegenauigkeit verbessert werden. Aufgrund der Ähnlichkeit stereoskopischer Bildpaare bieten sich hier Korrelationsverfahren zur subpixelgenauen Messung zugehöriger Bildpunkte an. Bereits im Zuge der Bildorientierung können damit natürliche Objektpunkte genutzt werden, so dass auf eine Signalisierung von Referenzpunkten am Objekt weitgehend verzichtet werden kann. Der stereoskopische Messvorgang wird mit einer automatisierten Tiefenfindung durch Bildkorrelation für den Anwender erheblich vereinfacht. Neben der Einzelpunktmessung können damit über geeignete Expansionsalgorithmen auch Profile und Objektoberflächen automatisch erfasst werden. Eine Schnittstelle für das codierte tachymetrische Aufmaß sowie die Integration von Punktwolken von Laserscannern erlauben eine kombinierte Auswertung. Mit Hilfe des implementierten Triangulationsalgorithmus können daraus digitale Oberflächenmodelle generiert und im Stereomodell bearbeitet werden. In Kombination mit dem zumeist hochaufgelösten Stereobildmaterial können damit qualitativ hochwertige Abwicklungen, Orthobilder oder texturierte 3D-Modelle für Visualisierung und Präsentation erzeugt werden. Durch Berücksichtigung verschiedener Ansätze für die Kameramodellierung können für die stereoskopischen Aufnahmen neben klassischen Messkammern auch analoge und digitale Amateur- sowie Panoramakameras zum Einsatz kommen..*

## 1 Einleitung

Die Dokumentation kulturhistorisch wertvoller Objekte mit photogrammetrischen Verfahren hat für die Bereiche Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege nach wie vor eine große Bedeutung. Die bildhafte Dokumentation bietet gegenüber diskreten Messverfahren, wie Handaufmaß, Tachymetrie oder Laserscanning, den großen Vorteil einer kontinuierlichen Abbildung der sichtbaren Objektoberfläche in einer sehr hohen Auflösung zum Zeitpunkt der Aufnahme. Sie entspricht einer weitgehend interpretationsfreien Objekterfassung. Bei entsprechender Archivierung können fotografische Aufnahmen auch für spätere photogrammetrische Auswertungen als originäre Messdaten verwendet werden.

Die projektive Entzerrung hat sich mit der Bereitstellung anwendungsnaher Software als ein einfaches Verfahren für 2D-Dokumentationen für Auswertung und Kartierung etabliert. Das

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing. Frank Henze, Lehrstuhl für Vermessungskunde, BTU Cottbus, 03046 Cottbus, e-mail: [frank.henze@tu-cottbus.de](mailto:frank.henze@tu-cottbus.de)

<sup>2</sup> Dipl.-Ing. Gunnar Siedler, fokus GmbH Leipzig, Lauchstädter Str. 20, 04229 Leipzig, e-mail: [home@fokus-gmbh-leipzig.de](mailto:home@fokus-gmbh-leipzig.de)

<sup>3</sup> Dipl.-Inf. (FH) Sebastian Vetter, fokus GmbH Leipzig, Lauchstädter Str. 20, 04229 Leipzig, e-mail: [home@fokus-gmbh-leipzig.de](mailto:home@fokus-gmbh-leipzig.de)

Verfahren ist jedoch bei nicht ebenen Objektoberflächen ungeeignet, so dass hier nach wie vor klassische geodätische Messverfahren oder Handaufmaßtechniken zum Einsatz kommen. Weiterführende photogrammetrische Verfahren zur räumlichen Auswertung von Objekten (Mehrbildauswertung) werden auf Grund ihrer Komplexität von den Anwendern nur selten eingesetzt.

Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie können nicht-ebene Objekte und Freiformoberflächen dreidimensional dokumentiert und auch zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet werden. Der Betrachter kann das aufgenommene Objekt räumlich wahrnehmen und erhält so Informationen über Oberflächenzustand, Bearbeitungsqualität und Tiefengliederung. Der anwendungsnahe Einsatz der Stereophotogrammetrie und der Bildverarbeitung in baugeschichtlich-archäologischen Projekten ist ein Forschungsschwerpunkt am Lehrstuhl für Vermessungskunde der BTU Cottbus. Die hier vorgestellten Arbeiten basieren auf einer langfristigen Kooperation des Lehrstuhls mit der fokus GmbH Leipzig. Ein großer Teil der entwickelten Algorithmik entstand im Rahmen des Verbundprojektes "Integriertes 3-D Panoramamesssystem" für die kombinierte photogrammetrische Auswertung von digitalen Panoramabildern und Laserscanndaten (TU Dresden (IPF), KST Pirna und fokus GmbH Leipzig).

## 2 Integration von Bildzuordnungsverfahren

Bildzuordnungsverfahren spielen in der digitalen Photogrammetrie eine große Rolle bei automatisierten Auswerteprozessen und eignen sich insbesondere aufgrund der Ähnlichkeit stereoskopischer Bildpartner für eine Integration in ein Stereoauswertesystem.

Die manuelle stereoskopische Auswertung kann bei wenig erfahrenen Anwendern sehr schnell zu falschen Ergebnissen bei der Tiefenmessung führen, so dass der Auswerteprozess als zu schwierig empfunden und damit das gesamte Verfahren verworfen wird. In einer ersten Stufe wurde daher zunächst eine unterstützende Tiefenmessung über Bildkorrelation realisiert, die ein sicheres Aufsetzen der Messmarke auf der Objektoberfläche ermöglicht. In Anlehnung an das als Vertical Line Locus bezeichnete Verfahren (COGAN & HUNTER) werden entlang einer orthogonal zur aktuellen Projektionsfläche verlaufenden Geraden für diskrete Punkte im Objektraum in einem festgelegten Abstand  $\Delta h$  die zugehörigen Positionen in den digitalen Bildern bestimmt. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Objektoberfläche wird aus den Bildkoordinaten mit der größten Ähnlichkeit zwischen beiden Bildfenstern berechnet. Als Ähnlichkeitsmaß kann der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen den jeweiligen Bildausschnitten berechnet werden (siehe u.a. PIECHEL, 1991). Dieser liefert zunächst die Position der besten Übereinstimmung beider Bildausschnitte auf ein Pixel genau.

Die subpixelgenaue Lokalisierung erfolgt anschließend mit Hilfe einer Kleinste-Quadrate-Anpassung (siehe u.a. ACKERMANN, 1984, FÖRSTNER, 1982, GRUEN, 1996), bei der aus den Grauwertdifferenzen zwischen Muster- und Suchmatrix die Parameter einer geometrischen und radiometrischen Transformation zwischen beiden Bildausschnitten bestimmt werden. Insbesondere bei größeren perspektiven Unterschieden zwischen Muster- und Suchbild liefert dieses Verfahren eine verbesserte Zuordnung und erlaubt darüber hinaus statistische Aussagen über die erreichte innere Genauigkeit der Anpassung.

### 3 Modellorientierung

Durch Berücksichtigung verschiedener Ansätze für die Kameraorientierung sollen für die Aufnahme und Orientierung der Stereomodelle neben klassischen Messkammern auch analoge und digitale Amateur- sowie digitale Rotationszeilenkameras zum Einsatz kommen können. Die Orientierung erfolgt in drei Schritten über die innere Orientierung, die relative Orientierung der Bilder sowie die absolute Orientierung.

Bei der relativen Orientierung werden aus den homologen Bildstrahlen zweier Bilder zunächst Orientierungselemente in einem Modellsystem berechnet. Die Messung identischer Bildpunkte in beiden Aufnahmen wird dabei durch die integrierte Bildkorrelation erheblich vereinfacht. Der Anwender ist nicht mehr auf die Messung markanter oder gar signalisierter Verknüpfungspunkte festgelegt, sondern kann vielmehr interaktiv eine optimale Punktverteilung ausschließlich über natürliche Objektpunkte erreichen. Beim manuellen Messvorgang werden hierzu in einem der beiden Bilder Punkte mit genügend Texturinformation in der Punktumgebung gemessen. Im Bildpartner werden bis zur Berechnung erster Orientierungsdaten zugehörige Suchbereiche für die Bildkorrelation zunächst manuell zugewiesen, danach kann der Suchbereich mit Hilfe der Epipolargeometrie als schmales Band definiert werden.

Im Anschluss an die relative Orientierung wird das Modellsystem über Passpunkte ins Objektkoordinatensystem transformiert oder mit Hilfe von Referenzstrecken auf einen Objektmaßstab skaliert. Als Referenzstrecke kann hier auch die bekannte Aufnahmebasis bei Verwendung einer Basisschiene dienen, so dass im Objektraum keinerlei Referenzinformationen eingebracht werden müssen. Somit können maßstäbliche Auswertungen auch von unzugänglichen Objekten einfach erstellt werden. Alternativ dazu können die Einzelbilder auch durch räumlichen Rückwärtseinschnitt orientiert werden.

Die Messung von signalisierten Passpunkten wird in verschiedenen Varianten unterstützt. Während kreisförmige Punktmuster mit Hilfe von Schwerpunktverfahren subpixelgenau detektiert werden, erfolgt die automatische Messung kreuzförmiger Muster, wie sie bei Segmentmarken oder Reséaukreuzen vorkommen, durch Anwendung des Ringoperators (LUHMANN, 1986).

Die Parameter der inneren Orientierung für die verwendete(n) Kamera(s) sollten im Vorfeld durch eine Kalibrierung mit einem Testfeld bestimmt werden oder, bei geeigneter Objektgeometrie, über räumlichen Rückwärtsschnitt näherungsweise vor Ort ermittelt werden.

Abweichend von der Bildorientierung zentralperspektiver Aufnahmen ist die Modellorientierung von Bildern digitaler Rotationszeilenkameras. Die Panoramabilder werden zuerst über Rückwärtsschnitt photogrammetrisch orientiert. Im zweiten Schritt erfolgt die Umrechnung des ausgewählten Bildbereiches auf die Zentralperspektive (Tangentialbild). Dabei werden die Kameraparameter berücksichtigt und ein korrigiertes Stereobildpaar mit paralleler Aufnahmerichtung übergeben (SCHNEIDER, 2003). Ohne Kenntnis der erweiterten Kameraparameter können die Tangentialbilder auch ohne Orientierungsdaten berechnet werden und über die relative und absolute Orientierung die Stereomodelle erstellt werden.

## 4 Aufnahmesysteme

Digitale Spiegelreflexkameras bieten eine gute Kombination aus hoher Sensorauflösung, guter Objektivqualität und hinreichender geometrischer Stabilität. Im Bezug auf die erreichte Bildauflösung können diese Kameras bereits mit analogen Mittelformatkameras konkurrieren. Im Idealfall stehen analoge, großformatige Messkameras zur Verfügung. Verschiedene Untersuchungen haben auch die prinzipielle Eignung kompakter digitaler Zoomkameras für die photogrammetrische Auswertung aufgezeigt (u.a. HASTEDT, LUHMANN, TECKLENBURG, 2004). Aufgrund der instabilen inneren Orientierung dieser Kameras ist der praktische Einsatz in den genannten Anwendungsbereichen bezüglich der erreichbaren Genauigkeit nicht zu empfehlen.

In Anlehnung an bekannte Stereomesskameras mit fester kalibrierter Basis kann über eine einfache Basisschiene (siehe Abb. 1) ein definierter Abstand für beide Kamerastandorte realisiert werden. Die Verwendung einer solchen Basisschiene ermöglicht mit nur einer Kamera eine Aufnahmeconfigurationen, die dem genäherten Stereonormalfall entspricht. Über die bekannte Basis kann das Modellsystem einer relativen Orientierung ohne zusätzliche Passinformationen in den Objektraum skaliert werden. Kleinere Objekte, wie einzelne Bauteile, Bauornamentik oder archäologische Fundstücke, können somit ohne zusätzlichen Messaufwand für Passpunkte vor Ort schnell dokumentiert und später maßstabsgerecht ausgewertet werden.

Alternativ dazu können am Objekt eine Maßstableiste oder ein Rahmen mit vorher bestimmten 3D-Koordinaten aufgestellt werden. Auf diese Weise können die Modelle der verschiedenen Ansichten in einem Koordinatensystem absolut orientiert werden.



Abb. 1: Aufnahmeconfiguration vor Ort  
(links: Kameraschiene als Basis, rechts: Rahmen als 3D-Maßbezug)

## 5 Automatisierte Messung von Punktwolken und Schnittprofilen

Über Matching-Algorithmen können ähnliche Strukturen in digitalen Bildern automatisch bestimmt werden, wobei ein Bild als Referenz- und das andere als Suchbild dient. Für die Zuordnung wird die Grauwertstruktur des Referenzbildes im näherungsweise bestimmten

Suchbereich des Suchbildes zunächst mit Hilfe des normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten (auch Produktmomentkorrelation - PMK) analysiert. Die hiermit gefundene pixelgenaue Position wird im zweiten Schritt über eine Kleinste-Quadrate-Korrelation (KQK) im Subpixelbereich verbessert. Mit den bekannten Orientierungsparametern der Bilder kann über den räumlichen Vorwärtseinschnitt die 3D-Koordinate im Objektraum berechnet werden.

Ausgehend von einem Startpunkt erfolgt über einen Expansionsalgorithmus die Generierung einer Punktwolke auf der Objektoberfläche. In Abhängigkeit der Bildauflösung und der Objektstruktur kann der Anwender die Schrittweite und die Größe des Suchbereiches für das Matching definieren. Der auszuwertende Bereich im Stereomodell kann durch den Nutzer eingeschränkt werden. Die in Abb. 2 erzeugte Punktwolke eines Prunkkratérs aus Baalbek / Libanon besteht aus 130.000 Punkten, deren Berechnung auf einem Standard-PC ca. 25 min in Anspruch nahm.

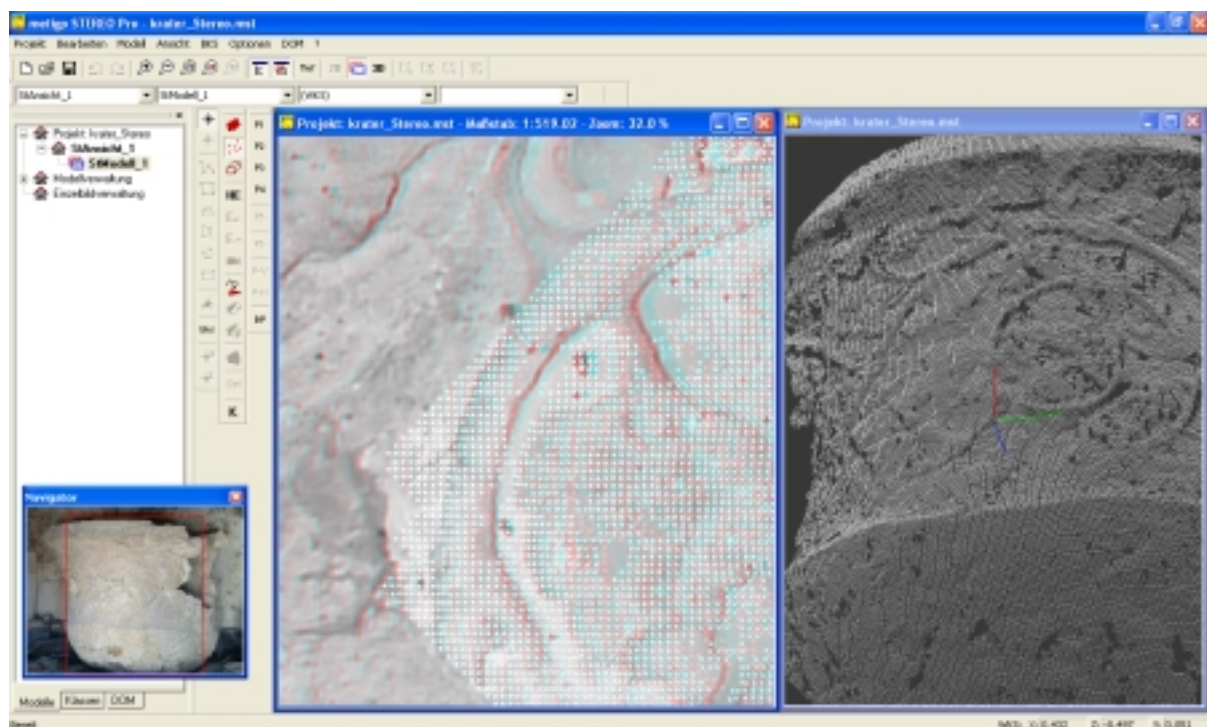


Abb. 2: Durch Matching erzeugte 3D-Punktwolke  
(links: Anaglyphendarstellung im Stereoanzeigefenster, rechts: 3D Anzeigefenster)

Bei der Auswertung von Schnittprofilen werden durch den Anwender die Horizontalschnitte über die Höhe und die Vertikalschnitte über senkrechte Benutzerkoordinatensysteme definiert. Ähnlich der flächenhaften Auswertung von Objekten durch Matching wird bei den Profilen über einen Expansionsalgorithmus ein Schnittprofil des Objektes abgetastet. Alternativ dazu können über eine freie ASCII- und STL- Schnittstelle Daten von 3D-Laserscannern in das Profil eingelesen werden, wobei über einen Koordinatenfilter nur die Punkte Verwendung finden, die in einem bestimmten Toleranzbereich des Schnittprofils liegen.

Über einen Separierungsalgorithmus können Punkte zu Objekten gruppiert bzw. Ausreißer bereinigt werden (SCHELLER & SCHNEIDER, 2006). Mit einem Glättungsalgorithmus können der Profilverlauf generalisiert und Störungen aufgrund des Messrauschens korrigiert werden.



Im zweiten Schritt werden die geglätteten Profile vektorisiert (BIENERT, 2006) und können schließlich über eine DXF-Schnittstelle direkt an ein CAD-System übergeben werden.

## 6 Triangulation von DOM

Auf der Grundlage der vorhandenen Punktwolke kann ein digitales Oberflächenmodell mittels Ball-Pivoting Algorithmus (BERNARDINI, 1999) generiert werden. Das Vorgehen dieses Algorithmus ist mit einer über die Oberfläche der Punktwolke rollenden Kugel vergleichbar. Diese Kugel besitzt einen festen Radius, welcher groß genug sein muss, um nicht durch die Oberfläche der Punktwolke zu fallen. Ausgehend von drei Punkten, auf denen die Kugel zu Beginn aufliegt, wird die Kugel um zwei dieser Punkte geschwenkt um einen neuen dritten Punkt zu finden. Somit rollt die Kugel solange auf der Oberfläche der Punktwolke entlang, bis keine neuen Dreiecke gefunden werden können. Aufgrund der ungleichen Verteilung der Punkte innerhalb einer Punktwolke kann nicht sichergestellt werden, dass diese mittels Ball-Pivoting Algorithmus und genau einem Kugelradius trianguliert werden kann. Zur Lösung dieses Problems wurde der Algorithmus so erweitert, dass Punktwolken mit unregelmäßiger Punktverteilung mit mehreren Radien trianguliert werden (VETTER, 2005).

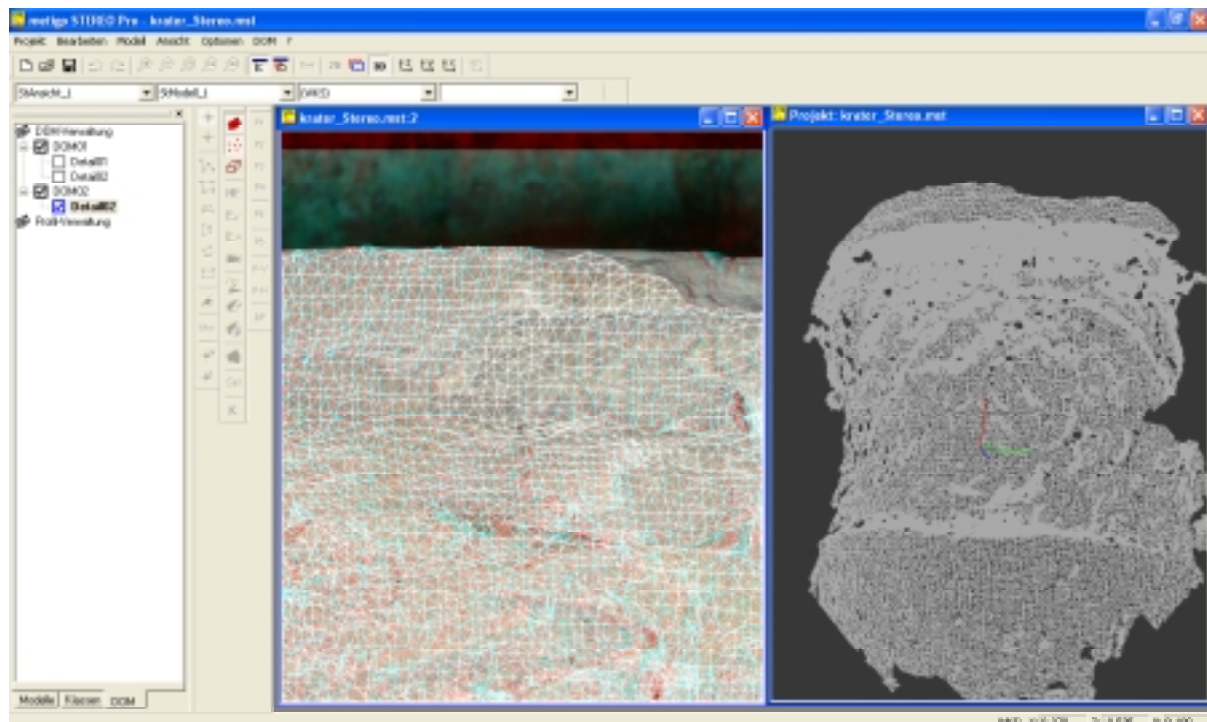


Abb. 3: Mit Ball-Pivoting Algorithmus trianguliertes Oberflächenmodell

Durch das Einblenden der Triangulation im Stereoanzeigefenster kann der Nutzer die Passgenauigkeit des Oberflächenmodells zum Objekt visuell kontrollieren.

## 7 Texturierung von Punktwolken und DOM

Für die Texturierung von Punktwolken und Dreiecksvermaschungen wurden verschiedene Ansätze realisiert. Punktwolken können auf der Grundlage der vorhandenen Bildinformation der orientierten Stereomodelle und orientierter Einzelbilder eingefärbt werden. Alternativ

dazu können Einfärbungen über Distanzen, bezogen auf die Koordinatenebene oder den Scannerstandpunkt, generiert werden.

Bei der Texturierung der Dreiecksflächen auf der Grundlage der vorhandenen Bildinformation wurden die folgenden Prüfkriterien berücksichtigt: das Verschneiden des Bildstrahls mit der Objektoberfläche, der Abgleich der Flächennormale eines Dreieckes mit der Aufnahme­richtung der Kameras sowie die Berücksichtigung von Nachbarschaftsbeziehungen der Dreiecke. Zusätzlich kann der Benutzer in den ausgewählten Bildern Auswertebereiche für die Texturierung definieren und somit Verdeckungen und Bildstörungen ausschließen.

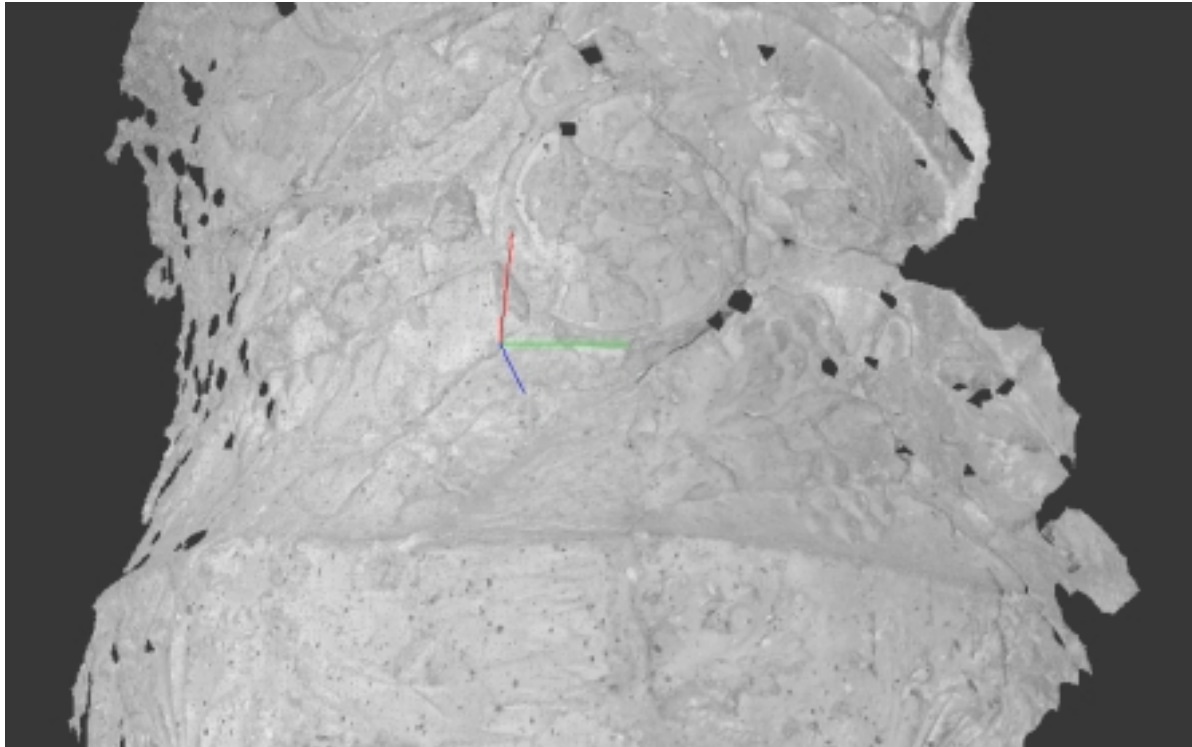


Abb. 4: Texturiertes Oberflächenmodell

## 8 Zusammenfassung

Die Integration von Bildzuordnungsverfahren in ein Stereoauswertesystem für die terrestrische Nahbereichsphotogrammetrie ermöglicht Anwendern aus den Bereichen Architektur, Bauforschung und Denkmalpflege Objekte räumlich zu erfassen und auszuwerten. Die besonderen Belange der Architekturphotogrammetrie werden dabei ebenso berücksichtigt wie der Einsatz von Amateur- und Panoramakameras für die Bilderfassung. Durch erste Automatisierungen bei der relativen Orientierung können stereoskopische Bildpaare bereits jetzt sehr schnell und ohne vertiefte photogrammetrische Kenntnisse für eine Auswertung erstellt werden.

Die vorgestellten Funktionalitäten sind in der Software metigo *STEREO* der fokus GmbH Leipzig eingebunden.

## **9 Danksagung**

Die Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Verbundprojektes "Integriertes 3-D Panoramamesssystem" wurden gefördert durch Mittel des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) 2000 –2006.

Des Weiteren danken die Autoren Herrn Prof. Dr. K.-U. Jahn der HTWK Leipzig sowie Herrn Prof. Dr. H.-G. Maas und den Mitarbeitern des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden.



## Literatur

ACKERMANN, F., 1984: Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetric Record* 11 (64):429-439.

BERNARDINI, F., MITTLEMAN, J., RUSHMEIER, H., SILVA, C., TAUBIN, G., 1999: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*

BIENERT, A. 2006: Glättung von aus Laserscannerpunktwolken extrahierten Profilen. *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006, Hrsg. Th. Luhmann)*, Verlag Herbert Wichmann, S. 214 - 221

COGAN, L., HUNTER, D., 1984: "Kern DSR1/DSR11: DTM Erfassung und der Kern Korrelator", Kern & Co AG, Aarau.

FÖRSTNER, W., 1982: On the geometric precision of digital correlation, *IAPRS Vol. 24, No. 3*, pp. 176-189.

GRUEN, A., 1996. Least squares matching: a fundamental measurement algorithm. In: K. Atkinson (ed.), *Close Range Photogrammetry & Machine Vision*, Whittles, pp. 217-255.

GRUEN, A., ZHANG, L., VISNOVCOVA, J., 2001. Automatic Reconstruction and Visualization of a Complex Buddha Tower of Bayon, Angkor, Cambodia. *Proceedings 21. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Konstanz, 4-7 September 2001*, pp. 289-301

HASTEDT, H., LUHMANN, T., TECKLENBURG, W., 2004: Modellierung hochauflösender digitaler Kameras im Hinblick auf ihre Verifizierung nach VDI/VDE 2634. Luhmann (ed.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der 3. Oldenburger 3D-Tage*, Wichmann Verlag, Heidelberg.

HENZE, F., 2000: Koordinatenbestimmung in stereoskopischen Bildpaaren für die Anwendung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Diplomarbeit (unveröffentlicht), TU Berlin.

LUHMANN, T., 1986: Ein Verfahren zur Rotationsinvarianten Punktbestimmung, *Bildmessung und Luftbildwesen*, Heft 4/1986, pp. 147-154

PIEHEL, J., 1991: Stereobild-Korrelation. In: Bähr/Vögtle (Herausgeber): *Digitale Bildverarbeitung - Anwendung in Photogrammetrie, Karthographie und Fernerkundung*, Seiten 96–132. Wichmann Verlag, Heidelberg.

SHELLER, S., SCHNEIDER, D., 2006: Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik. Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006*, Hrsg. Th. Luhmann, Verlag Herbert Wichmann.

SCHNEIDER, D.; MAAS, H.-G., 2003: Geometrische Modellierung und Kalibrierung einer digitalen hochauflösenden Rotationszeilenkamera. Luhmann, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003*. pp. 57-64, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

VETTER, S., 2005: Generierung digitaler Oberflächenmodelle (DOM) im Bereich der Architekturphotogrammetrie, Diplomarbeit (unveröffentlicht), HTWK Leipzig.