

# Automatisierte Verfahren der digitalen Bildverarbeitung für 3D-Objektdokumentation

## Automated methods of digital image analysis for 3D-objectdocumentation

Dipl.-Inf. (FH) Sebastian Vetter, Dipl.-Ing. Gunnar Siedler, B.- Eng. Tobias Reich  
Fokus GmbH Leipzig, 04229 Leipzig Lauchstädter Straße 20  
Tel.: 0341-2178460, Fax: 0341-2178470  
E-mail: vetter@fokus-GmbH-Leipzig.de, Internet: www.fokus-GmbH-Leipzig.de

### Zusammenfassung:

Die stereoskopische Aufnahme und Auswertung von Objekten bietet die Möglichkeit einer dreidimensionalen Erfassung und erlaubt eine räumliche Betrachtung sowie eine maßstabsgerechte Auswertung der aufgenommenen Objekte. Durch die Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung sollen die interaktive stereoskopische Bildauswertung vereinfacht, automatisiert und die Auswertegenauigkeit verbessert werden. Aufgrund der Ähnlichkeit stereoskopischer Bildpaare bieten sich hier Korrelationsverfahren zur subpixelgenauen Messung zugehöriger Bildpunkte an. Neben der Einzelpunktmessung können damit über geeignete Expansionsalgorithmen auch Profile und Objektoberflächen automatisch erfasst werden. Mit Hilfe des implementierten Triangulationsalgorithmus können daraus digitale Oberflächenmodelle generiert und im Stereomodell bearbeitet werden.

Um die Genauigkeit dieser Verfahren bewerten zu können, wurden u.a. Untersuchungen an einem Kalibrierkörper – Granitsteinplatte – durchgeführt.

### Abstract:

Digital stereoscopic examination allows users an estimation of the spatial dimension and the surface texture of objects. The integration of automated image analysis techniques simplifies the stereoscopic measurement procedure and offers an increase in accuracy. Due to the substantial similarities of stereoscopic image pairs, correlation techniques provide measurements of subpixel precision for corresponding image points. An adapted expansion algorithm for the same process even offers the possibility to measure profiles and object surfaces automatically. Digital surface models (DSM) can be created by triangulation and edited within the stereo model. For the evaluation of the accuracy of these methods there were some tests processed on a calibration substance – plate of granite.

### Bildaufnahme und Modellorientierung

Mit der Software **metigo 3D** ist der Anwender in der Lage, die mit einer bestimmten Aufnahmekonfiguration aufgenommenen Bildpaare digital zu Stereomodellen zu orientieren. Für die stereoskopischen Aufnahmen können neben klassischen Messkammern auch analoge und digitale Kameras zum Einsatz kommen.

In Abhängigkeit der erforderlichen Genauigkeit muss die verwendete Kamera kalibriert werden und kann am Objekt ein entsprechender Kalibrierkörper für den Maßstabsbezug verwendet werden.

Durch die interaktive/automatische Messung von identischen Bildpunkten im linken und im rechten Bild erfolgt die relative Orientierung der Bilder zueinander. Über Referenzpunkte am Objekt, eine Passstrecke oder eine maßlich definierte Kameraverschiebung wird das Stereomodell absolut orientiert. Dadurch wird die maßstabsgerechte Auswertung des Objektes möglich.

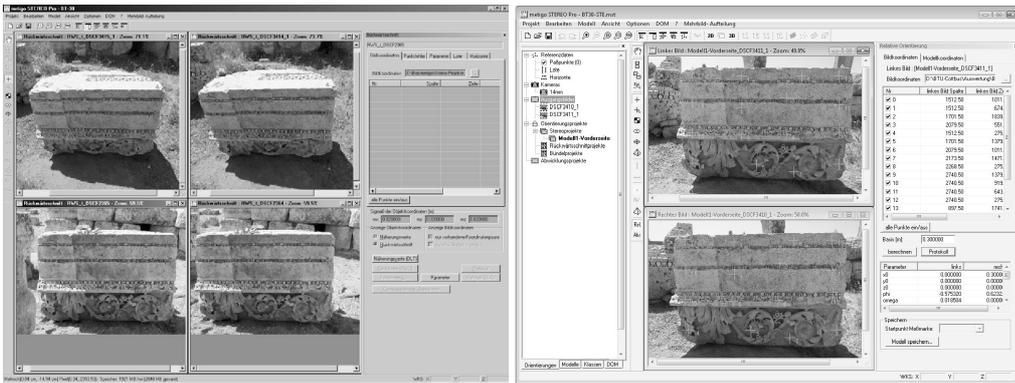


Abb. 1: Verschiedene Aufnahme Konfigurationen vor Ort  
links: Objektdokumentation einer Architravansicht mit 4 Aufnahmen  
rechts: Modellorientierung über Verknüpfungspunkte in beiden Bildern, durch Matching subpixelgenaue Messung im Bild.

### Dreidimensionale Betrachtung über Stereomodelle

Über die bekannten Farbrillen (Anaglyphenverfahren) oder spezielle Shutterbrillen (in Verbindung mit einer Open-GL fähigen Grafikkarte) können die entstandenen Stereomodelle am Monitor dreidimensional betrachtet, 3D-Einzelmaße abgegriffen und graphische Auswertungen angefertigt werden.

In Abhängigkeit der verwendeten Kamertechnik und der Größe des Filmformates bzw. der Größe des CCD- Sensors lassen sich bei Detailaufnahmen Vergrößerungen bis weit in den Macrobereich hinein erzielen. Dies ist im Bereich der Materialanalyse, Auswertung der Oberflächenstruktur bis hin zur Bewertung von Befunden und Schäden hilfreich.

### Erstellung und Texturierung digitaler Oberflächenmodelle

Aufgrund der Ähnlichkeit der Teilbilder stereoskopischer Bildpaare bieten sich hier insbesondere Korrelationsverfahren zur subpixelgenauen Messung zugehöriger Bildpunkte an. Bei dem sogenannten Matching werden ein Bild als Referenzbild und das andere als Suchbild definiert sowie zu einer Mustermatrix aus dem Referenzbild die Position einer identischen Matrix im Suchbild mittels Kreuzkorrelation (pixelgenau) und anschließend mittels Kleinste- Quadrate- Korrelation (subpixelgenau) ermittelt. Die Zentren der beiden so korrelierten Matrizen, welche den identischen Objektpunkt in beiden Bildern darstellen, fließen anschließend in die Berechnung der 3D- Objektkoordinate ein. Diese wird mit den bekannten äußeren und inneren Orientierungen der beiden Bilder durch den photogrammetrischen Vorwärtsschnitt berechnet.

Neben der Einzelpunktmessung können mit geeigneten Expansionsalgorithmen Horizontal- und Vertikalprofile sowie ganze Objektoberflächen als 3D Punktwolken (Abb. 2) erfasst werden.

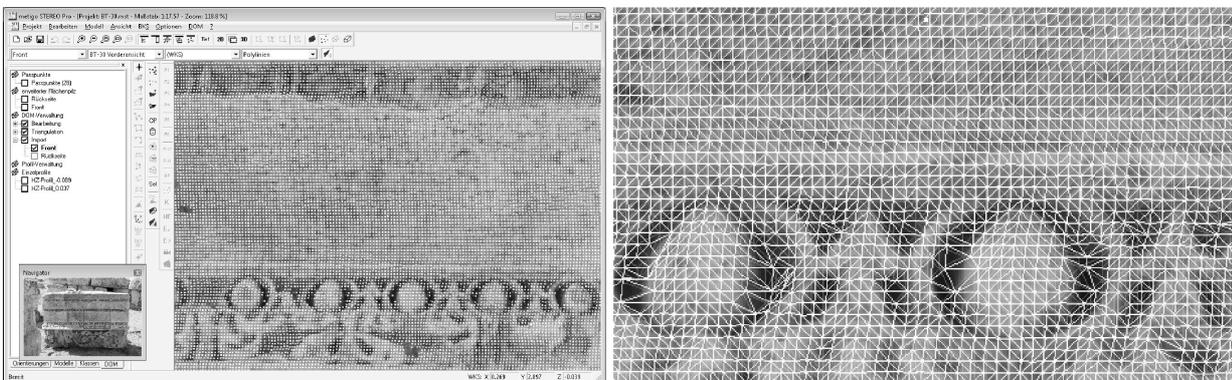


Abb. 2: durch Matching erzeugte Punktwolke (links) und Ausschnitt des generierten Oberflächenmodell (rechts)

Mit einem Triangulationsalgorithmus (Ball-Pivoting Algorithm) können digitale Oberflächenmodelle generiert und im Stereomodell bearbeitet werden. Im zweiten Schritt kann nach der Editierung des Oberflächenmodells die Bildinformation der Stereobilder als Textur auf das digitale Oberflächenmodell übertragen werden.

Unter Berücksichtigung der Richtungen der Dreiecksnormalen und der Bildhauptstrahlen sowie einer vom Nutzer frei wählbaren Winkeltoleranz (zwischen Dreiecksnormalen und Bildhauptstrahlen) kann für jedes Dreieck der optimale Bildausschnitt aus der Menge der orientierten Bilder als Dreieckstextur bestimmt werden. Auf diese Weise ist eine realitätsnahe digitale Dokumentation des Objektes möglich (Abb. 3).

Die Oberflächenmodelle können über eine STL- und VRML- Schnittstelle mit oder ohne Texturinformationen exportiert werden.

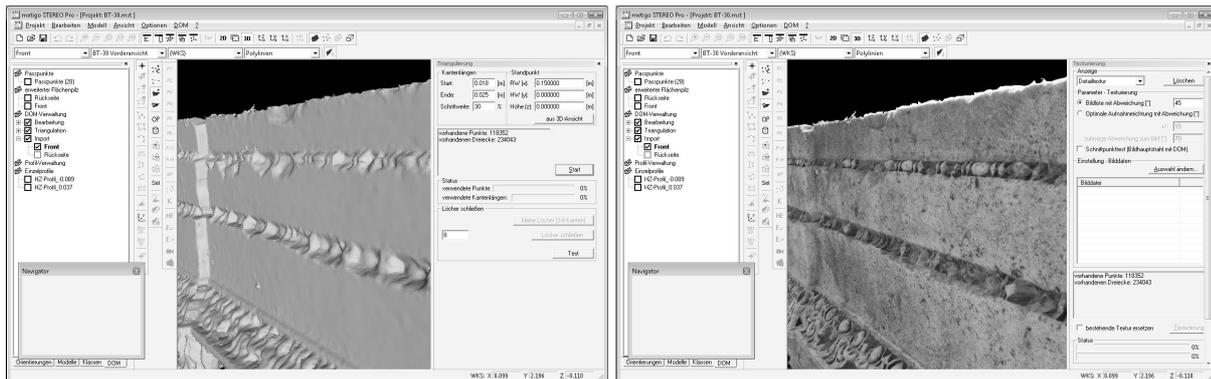


Abb. 3: Digitales Oberflächenmodell des gewählten Architravs  
 links: Digitales Oberflächenmodell (Dreiecksvermaschung) im 3D Anzeigefenster,  
 rechts: Texturiertes Oberflächenmodell für die Dokumentation der Objektoberfläche

### Weiterentwicklung der Oberflächengenerierung

Die Algorithmik zur Punktwolken generierung, welche anfangs nur Stereo- Bildpaare verarbeiten konnte, wurde für die Verwendung einer Liste orientierter Einzelbilder erweitert. Auf diese Weise können ergänzend zum Stereomodell z.B. weitere Schrägaufnahmen für das Matching berücksichtigt werden. D.h. für einen Punkt in einem Bild (Referenzbild) wird dessen identische Punktstruktur in den anderen verwendeten Bildern (Suchbilder) gesucht. Die dadurch erhaltenen Bildkoordinaten (mind. 2) werden für die Berechnung der Objektkoordinate mittels ausgleichendem Vorwärtsschnitt verwendet.

Auf diese Weise liegt zum Einen eine verbesserte Schnittkonfiguration für die Objektkoordinatenberechnung vor und zum Anderen ist eine verbesserte Fehlerinterpretation der Ergebnisse des ausgleichenden Vorwärtsschnittes möglich. So können Ausreiser- / Fehlerpunkte erkannt und beseitigt werden, was eine höhere Qualität der Punktwolke und einen geringeren Nachbearbeitungsaufwand zur Folge hat.

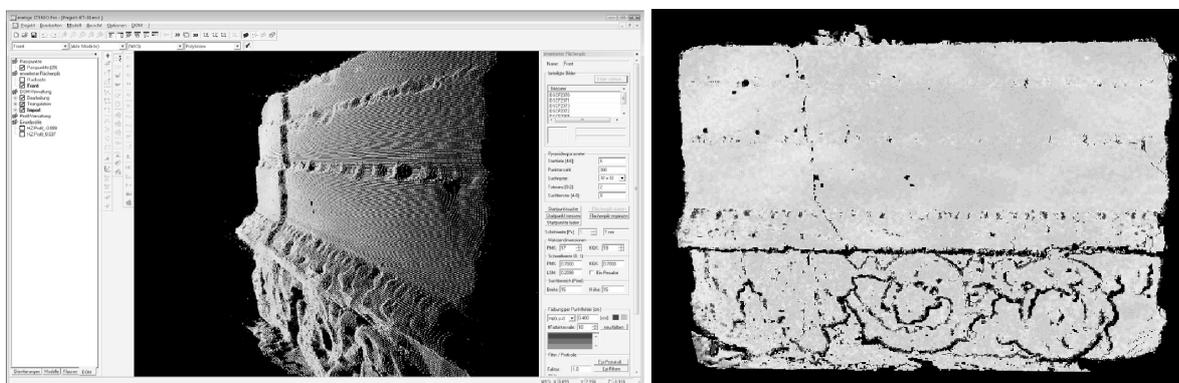


Abb. 4: durch Matching erzeugte Punktwolke mit Fehlereinfärbung, Farbintervalle können vom Anwender variabel definiert werden

Die Fehlerberechnungen des ausgleichenden Vorwärtsschnittes werden für eine Einfärbung der Punktwolke zur Genauigkeitskontrolle angewendet. Somit kann der Anwender das Ergebnis der Punktwolke visuell kontrollieren und evtl. fehlerhafte Punkte über Fehlerschranken (Farbselektion) beseitigen.

### Berechnung von Orthophotos aus texturiertem Oberflächenmodell

Aus den texturierten Oberflächenmodellen können unter Verwendung geeigneter Benutzerkoordinatensysteme Orthophotos abgeleitet werden. Diese Benutzerkoordinatensysteme lassen sich z.B. mit Hilfe von ausgleichenden Ebenen aus einer oder mehrere Mengen selektierter Punkte erstellen.

Da für die Texturierung des Oberflächenmodells für jedes Dreieck jeweils das Bild mit der günstigsten Aufnahmeorientierung verwendet wird, kann so ein optimiertes Orthophoto erzeugt werden.

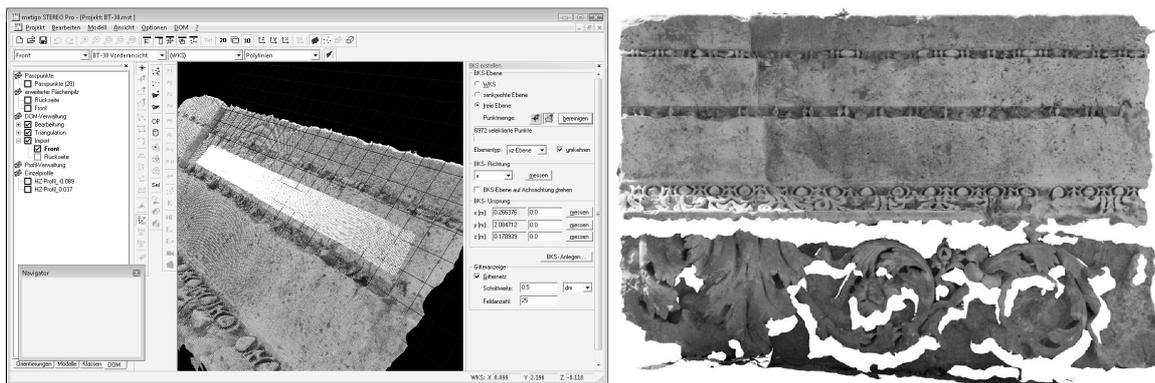


Abb. 5: Definition einer Benutzerkoordinatensystem- Ebene (links) und daraus errechnetes Orthophoto (rechts)

### Genauigkeitsuntersuchung an einem Kalibrierkörper (Granitsteinplatte)

Bei der Generierung eines Oberflächenmodells können Ausreißer auftreten, wenn im Matchingprozess ähnliche Oberflächenstrukturen fälschlicherweise einander zugeordnet werden, die nicht den gleichen Objektpunkt beschreiben.

Unter Verwendung eines Referenzkörpers sollten die Genauigkeiten sowie die Zuverlässigkeiten der oben vorgestellten Verfahren zur Generierung von Punktwolken untersucht werden.

Dafür wurden eine Granitplatte (siehe Abb. 6) mit einer nachgewiesenen Ebenheit von 2 µm mehrfach unter verschiedenen Aufnahmeanordnungen (Abb. 7) erfasst und die Punktabstände zu einer mittleren Ebene als Genauigkeitsaussage bestimmt.

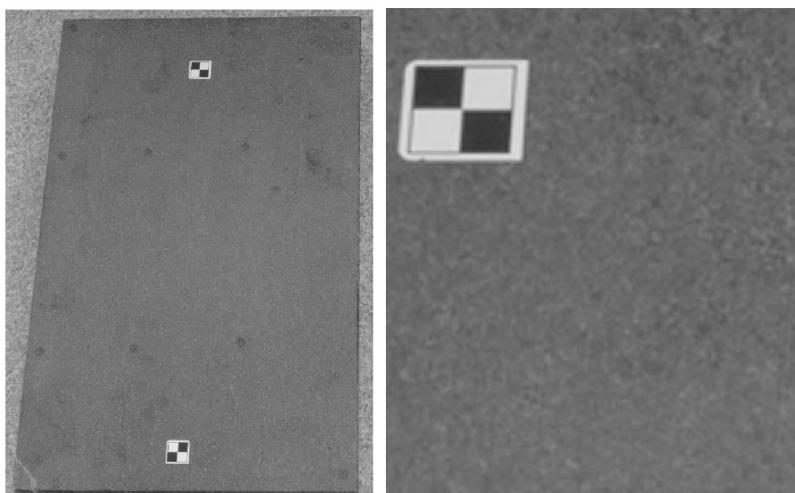


Abb. 6: Kalibrierkörper (Granitsteinplatte), Ausschnitt (100%)



Abb. 7: Aufnahmeanordnung (senkrecht und 20° verschwenkt zur Platte)

Um den Einfluss der Oberflächenbewegung (Oberflächenneigung) des auszuwertenden Objektes bezüglich der Aufnahme­richtung auf die Ergebnisgenauigkeiten festzustellen, wurden in einer ersten Testreihe Stereomodelle angelegt, die unterschiedliche Aufnahme­richtungen zum Messobjekt besitzen – einmal orthogonal zur Messplatte und einmal um  $20^\circ$  verschwenkt (siehe Abb. 7).

Für diese beiden Stereomodelle wurden Punktwolken generiert und anschließend daraus jeweils die ausgleichenden Ebenen berechnet. Zu diesen ausgleichenden Ebenen wurden die Punktabstände der jeweils zu Grunde liegenden Punkte berechnet und miteinander verglichen.

Unter Verwendung eines Aufnahmeabstands von einem Meter und eines 35 mm Festobjektivs sind dabei keine nennenswerten Unterschiede in der Ergebnisgenauigkeit eingetreten. Dies lässt sich mit der Kleinste-Quadrate-Korrelation erklären, welche eine Affintransformation zur Anpassung der Perspektive in geringem Maße enthält.

In der zweiten Testreihe wurden die Ergebnisgenauigkeiten im Stereonormalfall (rechtwinklige Ausrichtung der Kameras zur Stereobasis  $b$  und parallel zueinander, siehe Abb. 8a) sowie im leicht konvergenten Fall (siehe Abb. 8b) untersucht. In diesem Versuch wurden ein 35 mm Festobjektiv und eine Aufnahmeentfernung von 0,7 m verwendet.

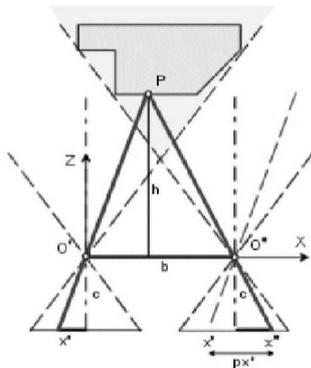


Abb. 8a: Stereonormalfall

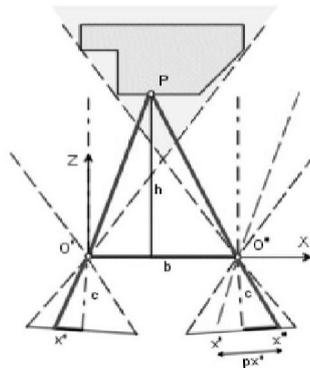


Abb. 8b: leicht konvergenter Fall

Hier ergeben sich im Vergleich zwischen den beiden Aufnahme­konfigurationen (konvergent und Stereonormalfall) geringfügige Unterschiede, wobei eine minimal höhere Genauigkeit in der Punktbestimmung des konvergenten Falls auf die besseren Schnittbedingungen (Vergrößerung der Basis bei gleicher Entfernung) zurück zu führen ist.

Auf Grundlage der beiden oben genannten Testreihen wurden mehrere Stereomodelle aufgenommen und daraus Punktwolken über Matching mit mehreren Bildern (am gezeigten Beispiel mit vier Bildern) erzeugt und deren Resultate verglichen. Dabei wurden für die Modellanordnungen ein Aufnahmeabstand von 1 m und ein 35 mm Festobjektiv verwendet.

Im Vergleich zum Matching mit 2 Bildern (Stereomodell mit zwei Aufnahmen) entstehen dabei Genauigkeitsunterschiede (siehe Tabelle 9). Die Verschlechterung bei der Verwendung von mehreren Bildern lässt sich durch Maßstabsunterschiede in den verwendeten Bildern erklären.

Die Vorteile des Matchings mit mehreren Bildern im Vergleich zum Matching mit nur 2 Bildern liegen in der besseren bzw. vollständigeren Erfassung des Messobjektes (abgeschattete Bereiche werden durch zusätzliche Stereomodelle vermieden) sowie einer besser möglichen Fehlerinterpretation der Ergebnisse des Vorwärtsschnittes.

Bei allen Versuchen gibt es immer zwei Möglichkeiten zur Einschätzung der erreichten Matchinggenauigkeit. Dabei stellen die Punktabstände zur ausgleichenden Ebene eine realistischere Kontrolle der erreichten Punktgenauigkeit dar als die Punktfehler des photogrammetrischen Vorwärtsschnittes. Dieser wird beeinflusst durch die Güte des Strahlenschnittes und ist daher eher ein theoretischer Wert.

Die Standardabweichung der Punkte zu der ausgleichenden Ebene des Prüfkörpers lag über alle Versuche hinweg im Durchschnitt bei 0,05 mm (siehe Tabelle 9).

<i>Testreihe</i>	<i>Aufnahmeabstand</i>	<i>Aufnahmeanordnung</i>	<i>Standartabweichung von der ausgl. Ebene</i>
1	1 m	- Stereonormalfall - senkrecht zur Granitplatte	0,045 mm
1	1 m	- Stereonormalfall - 20° verschwenkt zur Granitplatte	0,056 mm
2	0,7 m	- Stereonormalfall - senkrecht zur Granitplatte <b>(höhere Auflösung !)</b>	0,032 mm
2	0,7 m	- leicht konvergent - senkrecht zur Granitplatte <b>(höhere Auflösung !)</b>	0,023 mm
3 (Mehrfachmatching)	1 m	- vier Bilder (zwei Stereomodelle) - jeweils um 20° verschwenkt zur Granitplatte (gegenüberliegend) - Stereonormalfall	0,071 mm
3 (Mehrfachmatching)	1 m	- vier Bilder (zwei Stereomodelle) - jeweils um 20° verschwenkt zur Granitplatte (gegenüberliegend) - leicht konvergent	0,069 mm

Tabelle 9: Standardabweichungen von der ausgl. Ebenen bei verschiedenen Aufnahmekonfigurationen

## Zusammenfassung und Ausblick

Für die Aufnahmen der oben gezeigten Modellbeispiele des Architravs wurde eine Fuji FinePix S2 Pro (Objektiv : 14mm Festbrennweite) verwendet.

Anhand der Aufnahmen wurden Stereomodelle orientiert, welche wiederum die Grundlage zur Punktwolkengenerierung bildeten. Aus diesen Punktwolken wurden Oberflächenmodelle generiert, aus denen nach einer anschließenden Texturierung ausgewählte Orthophotos abgeleitet wurden.

Für die Aufnahmen der Granitsteinplatte wurde die Spiegelreflexkamera *Nikon D2Xs* verwendet. Diese wurde im Zuge des Auswerteprozesses mit Hilfe eines ebenen Passpunktfeldes kalibriert.

Die hier gezeigten Auswertebeispiele (Architrav und Granitsteinplatte) wurden mit der Software **metigo 3D** der fokus GmbH Leipzig bearbeitet. Die künftige Arbeitsschwerpunkte liegen u.a. darin, die oben beschriebene Prozesskette der Modellorientierung, Generierung von Punktwolken (mit Fehleranalyse) und Oberflächenmodellgenerierung weiter zu automatisieren.

## Literaturhinweise:

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*, 5(4), Oct-Dec, 1999, pp. 349-359.

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

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.

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

Henze, F., Siedler G., Vetter, S., 2006: *Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem*, 26. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Berlin, Band 15, S.239 - 246