



**Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera  
für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie**

*Anmerkung: Die Aussagen in diesem Papier beziehen sich auf die speziellen Bedürfnisse und Toleranzen der High-End-Photogrammetrie. Es wurde bewusst unmodifiziertes Serien-Material verwendet. Die Resultate zeigen, dass die Präzision der ALPA auch bei dieser Ausgangslage die üblichen photographischen Anforderungen bereits deutlich übertrifft. Aussagen zur Rückteildaption unter Punkt 5 sind deshalb im Lichte der verschärften Anforderungen der High-End-Photogrammetrie zu sehen und zu relativieren.*

## Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie

DIRK RIEKE-ZAPP<sup>1</sup>, ANDRÉ OLDANI<sup>2</sup> & JÜRGEN PEIPE<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Es wird über Testmessungen mit einer Mittelformatkamera der Firma ALPA of Switzerland berichtet, an die digitale Rückteile adaptiert werden können. Erste Versuche mit einem 22 Megapixel Leaf Valeo Wi Rückteil zeigen eine hohe Genauigkeit der Objektrekonstruktion, überprüft an kalibrierten Längenmaßen eines Testfeldes (nach VDI/VDE Richtlinie 2634).*

### 1 Einleitung

In der Nahbereichsphotogrammetrie wird für die digitale Bildaufnahme schon seit einiger Zeit auf handelsübliche Kameras zurückgegriffen, die nicht speziell für die Anforderungen der Photogrammetrie entwickelt wurden. Dies hat dazu geführt, dass jede Kamera, die auf dem Markt vorgestellt wird, für den Photogrammeter ein potenzielles Messinstrument darstellt. Die digitale Kameratechnik schreitet schnell voran, die Marktpräsenz von Kameras wird immer kürzer. Der technische Fortschritt in der Fotografie umfasst: Leichtgängige Autofokusobjektive, Zoomobjektive, Retrofokuskonstruktionen, Bildstabilisatoren und viele andere Ausstattungsmerkmale, die für die Aufnahme von Messbildern nicht notwendig sind oder sich sogar negativ auf das Genauigkeitspotenzial auswirken. Die hohen Anforderungen des Photogrammeters an die optische und mechanische Qualität von digitalen Kameras können mit handelsüblichen Geräten nur schwer erfüllt werden. Ziel ist es deshalb, handelsübliche Digitalkameras durch mechanische Anpassung oder mit Hilfe von numerischen Korrekturmodellen „photogrammetrietauglich“ zu machen. Das beste Ausgangsmaterial ist in diesem Fall eine Kamera, die mit möglichst wenigen Anpassungen als Messgerät eingesetzt werden kann. Die in diesem Bericht untersuchte ALPA 12 WA ist eine Kamera, bei der vom Hersteller sehr viel Wert auf mechanische und optische Präzision gelegt wird. In Kombination mit einem digitalen Kamerarückteil und einem für die digitale Fotografie optimierten Objektiv erfüllt sie die Grundvoraussetzungen, die der Photogrammeter an eine handelsübliche, digitale Kamera stellen kann.

### 2 Das Aufnahmesystem

#### 2.1 Die Kamera – ALPA 12 WA

Die ALPA 12 WA ist das Herzstück einer ALPA Aufnahmeeinheit (Abb. 1, Tab. 1). Die Kamera besitzt zwei Auflagebereiche, in denen wahlweise das Objektiv oder ein Rückteil eingesetzt und über Klemmen fixiert werden können. Beide Auflagen sind identisch, so dass man Objektiv und Rückteil von vorne nach hinten tauschen kann. Das quadratische Design der Auflage erlaubt außerdem das Ansetzen von Objektiv oder Rückteil in vier, um jeweils 100 Gon gedrehten, Positionen. An die ALPA Kameras können Film- oder Digitalrückteile verschiedener Hersteller bis zum Format 6x9 angesetzt werden. Die effektive Bildgröße dieses Formats schwankt je nach Hersteller zwischen 56 x 82 und 56 x 84 mm.

<sup>1</sup> Dr. (USA) Dirk Rieke-Zapp, Institut für Geologie, Universität Bern, Baltzerstr. 3, CH-3012 Bern, e-mail: [zapp@geo.unibe.ch](mailto:zapp@geo.unibe.ch)

<sup>2</sup> André Oldani, ALPA of Switzerland, Neptunstr. 96, CH-8032, Zürich, e-mail: [alpa@alpa.ch](mailto:alpa@alpa.ch)

<sup>3</sup> Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr, D-85577 Neubiberg, e-mail: [j-k.peipe@unibw-muenchen.de](mailto:j-k.peipe@unibw-muenchen.de)



Abb. 1: ALPA 12 WA Kamerakörper von vorne (links) und mit angesetztem Sucher und Objektiv (rechts)

Bei Verwendung eines Objektivs mit einem Bildkreis, der größer ist als das Aufnahmeformat, kann das Objektiv so auf der Auflageplatte montiert werden, dass die Hauptpunktage um einen festen Betrag verschoben ist. Man erhält damit eine Kamera mit fixem Shift, ähnlich den früheren Aufnahmekammern P31 und P32 von WILD Heerbrugg.

Tab. 1: Spezifikationen der ALPA 12 WA

Material	<i>Aluminium</i>
Horizontierung	<i>2 Röhrenlibellen, 1 Dosenlibelle</i>
Sucher	<i>120° Sichtfeld</i>
Handgriffe	<i>Palisander oder Birnbaum</i>
Abmessungen (Kamerakörper)	<i>180 x 120 x 48 mm</i>
Gewicht (Kamerakörper je nach Ausstattung)	<i>560-580 g</i>
Gewicht mit Schneider Apo-Digitar 5.6/35 mm XL, Leaf Valeo 22 Wi und Sucher	<i>1260-1280 g</i>

Auf der Oberseite der Kamera lässt sich der Sucher befestigen. Im Gegensatz zu den üblichen high-end Digitalkameras besitzt die Kamera keinen Spiegel im Strahlengang. Dies hat den Vorteil, dass der Abstand zwischen Hinterlinsenscheitel des Objektivs und der Bildebene nicht durch eine Retrofokuskonstruktion verlängert werden muss, um Platz für einen Spiegel zu schaffen. Im Gegensatz zu solchen Objektiven für Spiegelreflexkameras besitzen die an der ALPA verwendeten Objektive eine symmetrische Konstruktion, was zu einer geringeren radial-symmetrischen Verzeichnung und zu einer Verbesserung der Bildqualität führt. Zudem sind die Objektive kleiner und leichter als retrofokale Objektive.

Neben der ALPA 12 WA gibt es noch zwei weitere ALPA Modelle. Die ALPA 12 SWA erlaubt zusätzlich ein stufenloses Shiften des Objektivs um bis zu 25 mm. Diese Verstellung ist jedoch nicht stabil genug für photogrammetrische Anforderungen. Die ALPA 12 TC ist eine sehr kompakte und leichte Version der ALPA 12 WA. Allen ALPA Kameras ist gemein, dass kein Entfernungs- oder Belichtungsmesser eingebaut ist. Der Zentralverschluss befindet sich im Objektiv und die Auslösung erfolgt am Objektiv oder über einen Fernauslöser, der je nach Verschlusstyp mechanisch oder elektrisch angesteuert werden kann. Die kürzeste Verschluss-

zeit, die mit einer ALPA und einem serienmäßigen Verschluss zur Zeit erreicht werden kann, beträgt 1/500 s.

## 2.2 Objektive

Viele Objektive, die sich an der ALPA verwenden lassen, sind ursprünglich für größere Formate als 6x9 gerechnet worden. Sie weisen entsprechend große Bildkreise von teilweise mehr als 200 mm auf, von welchen die ALPA immer den leistungsfähigsten, zentralen Bereich verwenden kann.

Besonders interessant für die digitale Fotografie sind die Apo-Digitare der Jos. Schneider Optische Werke GmbH, Bad Kreuznach. Diese Objektive sind für digitale Bildsensoren optimiert und weisen einen Bildkreis zwischen 60 und 120 mm auf. Sie besitzen ein hohes Auflösungsvermögen bis zum Bildrand. Das Farbspektrum ist bis in das nahe Infrarot korrigiert. Brennweiten zwischen 24 und 210 mm sind verfügbar. Ein Bildkreis von 60 mm deckt bereits die Bildfläche üblicher digitaler Rückteile ab. Für diesen Test wurde mit einem Apo-Digital 5.6/35 mm XL Weitwinkel fotografiert (Abb. 2). Das Objektiv besitzt bei Blende 11 einen Bildkreis von 90 mm.



Abb. 2: Schneider Apo-Digital 5.6/35 mm XL mit Copal 0 Verschluss

## 2.3 Digitales Kamerarückteil

An der ALPA 12 WA wurde ein Leaf Valeo Wi Digitalrückteil mit 22 Megapixeln angesetzt (Abb. 3). Der Sensor in dem Rückteil stammt von der Firma DALSA und wird auch in Rückteilen anderer Hersteller eingesetzt. Die Rohdaten werden mit 16 Bit Farbtiefe in ungefähr 40 MB großen Dateien gespeichert. Das Leaf Valeo Wi kann Daten entweder auf einer adaptierbaren Festplatte speichern oder über eine Firewire Verbindung direkt auf einem Computer ablegen. Für diesen Versuch wurde die zweite Speichervariante gewählt. Dabei wird das Rückteil über die Firewire Verbindung auch mit Strom versorgt. Das Leaf Valeo Wi ist mit verschiedenen Kameraanschlüssen lieferbar. Für den Test stand ein Rückteil mit Hasselblad V-Anschluss zur Verfügung, welches über eine Adapterplatte an die ALPA angesetzt wurde. Zusätzlich sind Adaptionen von Digitalrückteilen mit Hasselblad H1, Mamiya 645 AFD und Contax 645 Anschluss an der ALPA möglich. Die Größe des Sensors erreicht mit 48 x 36 mm fast das so genannte 6x4.5 Format. Die effektive Bildgröße dieses Formats schwankt je nach Kamerahersteller zwischen 55 x 41 und 56 x 40.5 mm. Mittelformatkameras, die speziell auf solche digitalen Rückteile abgestimmt sind, besitzen fast ausschließlich das 6x4.5 Format.

Für größere Sensoren fehlen in der Zukunft somit die entsprechenden Kameras, während an der ALPA noch Spielraum für Sensoren bis zu einem Format von 84 x 84 mm vorhanden ist. Die Leaf Bilddateien können mit einer eigenen Software in übliche Bildformate umgewandelt werden. Die Dateien lassen sich auch mit dem Rohdaten-Konverter von Adobe Photoshop CS2 umwandeln.



Sensortyp	CCD
Sensorgroße	48 x 36 mm
Pixelgröße	5344 x 4008 Pixel
ISO	8.9 x 8.9 $\mu\text{m}$
Farbtiefe	25 - 200
Bildfrequenz	16 Bit
Rohdaten pro Bild	1.2 s pro Bild
Speicher	40 MB
Anschlüsse	10/20/30 GB Festplatte, Firewire
Gewicht	Firewire, Bluetooth
	450 g

Abb. 3: ALPA 12 WA mit angesetztem Leaf Valeo 22 Wi (links). Spezifikationen des Leaf Valeo 22 Wi Digitalrückteils (rechts)

### 3 Testmessungen

#### 3.1 Testfeld

Empfehlungen zur Abnahme und Überwachung photogrammetrischer 3D-Messsysteme sind in der VDI/VDE Richtlinie 2634 enthalten, und zwar in Blatt 1 "Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung" (LUHMANN & WENDT, 2000; VDI/VDE, 2002). Getestet werden mobile 3D-Messsysteme, bestehend aus einer oder mehreren Kameras und einem PC/Notebook mit Software zur Bildmessung, Bildorientierung und 3D-Objektrekonstruktion. Die vorgeschlagene Prozedur basiert auf der photogrammetrischen Vermessung eines räumlichen Testfeldes, in dem mindestens sieben Messlinien zu untersuchen sind, entlang derer Maßstäbe mit Messmarken zu platzieren sind (Abb. 4).

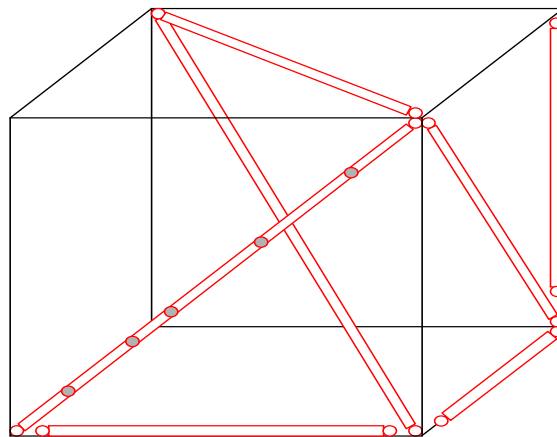


Abb. 4. Empfehlung für die Anordnung der Messlinien (aus LUHMANN & WENDT, 2000)

Auf jeder Messlinie sind mindestens fünf, zum Beispiel vom Deutschen Kalibrierdienst (DKD) kalibrierte Abstände zwischen den Messmarken (Testlängen) mit den photogrammetrisch ermittelten Werten zu vergleichen. Die Differenzen zwischen gemessenen und kalibrierten Werten sind die Längenmessabweichungen. Die maximal zulässige Längenmessabweichung, die im gesamten Messvolumen für jede beliebige Anordnung der Testlängen eingehalten werden muss, ist das Kriterium für die Qualität des eingesetzten Messsystems. Einzelheiten zum Aufbau des Testfeldes und zur Durchführung der Messungen sind der VDI/VDE Richtlinie zu entnehmen (VDI/VDE, 2002).

Das für diesen Bericht verwendete Testfeld wurde bei der Firma AICON 3D Systems in Braunschweig installiert (Abb. 5). Es enthält insgesamt 173 kreisförmige Zielmarken, 33 davon befinden sich auf sieben kalibrierten Maßstäben. Die Längenmessabweichungen werden an 58 Teststrecken ermittelt.



Abb. 5. Testfeld bei AICON 3D Systems, Braunschweig

### 3.2 Bildaufnahme und Auswertung

Es wurden 91 Messbilder des Prüfkörpers bei Raumtemperatur in einem Rundumverband aufgenommen. Dabei wurde die Kamera mehrmals um die optische Achse gewälzt, um die Bestimmung der inneren Orientierung sicherzustellen. Für den Test wurde das Schneider Apo-Digital 5.6/35 mm XL mit Copal 0 Verschluss (Abb. 2) an einer ALPA 12 WA (Abb. 1) verwendet. Bezogen auf das verwendete Digitalrückteil ergibt sich ein diagonalen Öffnungswinkel von  $79^\circ$ . Dieser Winkel entspricht ungefähr dem eines 24/25 mm Weitwinkelobjektivs an einer Kleinbildkamera. Für diesen Test wurde die Entfernungseinstellung auf 2 m, die Blende auf den Wert 11 und die Belichtungszeit auf 1 s eingestellt. Die Kamera wurde auf einem Stativ befestigt und die digitalen Bilder wurden über eine Firewire Verbindung in einem Laptop gespeichert. Der Sensor wurde auf 25 ISO eingestellt. Die Bilddaten wurden mit Leaf Software ohne Nachschärfen konvertiert. Die Kalibrierung wurde mit dem Bündelausgleichungsprogramm DPA Pro der Firma AICON vorgenommen. Der mittlere Bildmaßstab beträgt 1: 95. Die Systemfestlegung basiert auf einem Referenzmaßstab, der in der Mitte des Testkörpers platziert wurde.

## 4 Ergebnisse

In der Bündelausgleichung wurden die Parameter der inneren Orientierung (Kamerakonstante und Hauptpunktlage), die radial-symmetrische und tangentielle Verzeichnung sowie Affinität und Scherung durch Simultankalibrierung ermittelt. Hauptpunktlage und Kamerakonstante variieren signifikant im Bildverband. Die Auswertung wurde deshalb mit bildvarianter innerer Orientierung gerechnet. Die Hauptpunktlage variiert um  $\pm 1.5$  Pixel auf dem Sensor. Es lässt sich erkennen, dass sich die Hauptpunktlage vor allem bei den Kantungen der Kamera verändert. Für die letzten 53 Bilder des Verbandes wurde die Kamera nicht mehr gekantet. Die Hauptpunktlage variiert für diese Bilder nur noch um  $\pm 0.5$  Pixel. Die Kamerakonstante variiert im ganzen Bildverband um  $\pm 1.2$  Pixel. Die maximale radial-symmetrische Verzeichnung beträgt am Bildrand bei einer Bildhöhe von 30 mm weniger als 0.1 mm (Abb. 6).

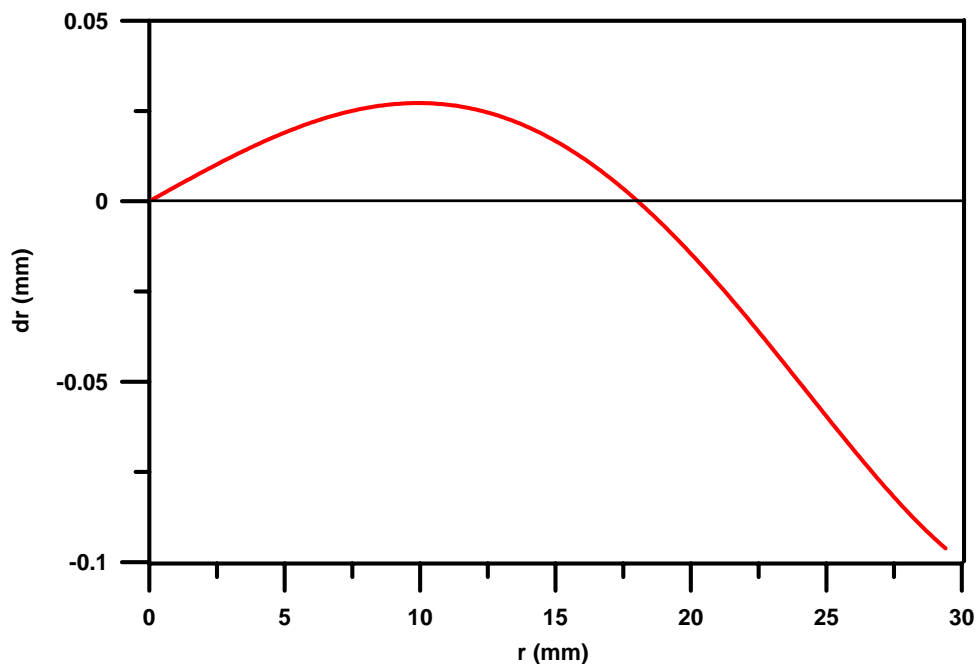


Abb. 6. Radial-symmetrische Verzeichnung ( $dr$ ) des Schneider Apo-Digital 5.6/35 mm XL in Abhängigkeit von der Bildhöhe ( $r$ )

Der sehr gute visuelle Qualitätseindruck der Bilder spiegelt sich in einer Bildmessgenauigkeit ( $\sigma_0$ ) von  $0.24 \mu\text{m}$ , beziehungsweise 0.027 Pixel, wider. Sie ist besser als für andere handelsübliche Kameras, die einem ähnlichen Test unterzogen wurden (PEIPE & YU, 2004). Die Längenmessabweichungen im Objektraum zeigen ebenfalls relativ gute Werte. Sie bewegen sich in einem Bereich von -0.053 bis +0.057 mm. Die Spanne der Abweichungen beträgt somit 0.110 mm. Ohne Korrekturparameter für Scherung und Affinität nehmen die Längenmessabweichungen allerdings stark zu.

Die Bilder wurden in der Leaf Software in TIFF Dateien konvertiert. Eine Konvertierung der Rohdaten in dieser Software führt zu sichtbar besseren Bildresultaten als eine Konvertierung mit Photoshop CS2. Vergleicht man die Messgenauigkeit von gut messbaren Punkten in TIFF Bildern aus Photoshop CS2 und aus der Originalsoftware, ergeben sich Unterschiede von  $\pm 0.2 \mu\text{m}$ . Außerdem werden die Leaf Bilder in Photoshop CS2 an allen Rändern um jeweils 4 Pixel beschnitten.

## 5 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung zeigen, dass mit der ALPA 12 WA in der getesteten Konfiguration eine hohe Genauigkeit am Objekt erreicht wird. Die variable innere Orientierung lässt sich zum Großteil auf Verschiebungen innerhalb des Rückteils und der Kameraanschlüsse zurückführen. Die Verbindung zwischen Digitalrückteil und Kamera erschien etwas „wackelig“. Bessere Ergebnisse lassen sich vermutlich mit einer anderen Adaption des Rückteils erreichen. Ein stabilerer Rückteiladapter ist für Digitalrückteile mit Mamiya 645 AFD und Hasselblad H1 Anschluss verfügbar. Ein solcher Adapter wird in zukünftigen Tests zum Einsatz kommen. Mit dieser Maßnahme sollte das vorhandene Genauigkeitspotenzial noch besser genutzt werden können. Eine weitere Möglichkeit zur Genauigkeitssteigerung besteht darin, den Schneckengang zur Entfernungseinstellung im Objektiv auszubauen, um sicher zu stellen, dass die Linsen im Objektiv nicht verstellt werden. Diese Überlegungen setzen voraus, dass der Sensor fest im Rückteil fixiert ist, sich nicht thermisch ausdehnt und dass die Klemmen der ALPA eine stabile Einheit von Kamera, Objektiv und Rückteil herstellen.

Eine Konvertierung der digitalen Rohdaten in der Originalsoftware von Leaf ist einer schnelleren Konvertierung in Photoshop CS2 vorzuziehen. Optimale Bildqualität und Bildmessgenauigkeit sind nur mit der Rohdatenkonvertierung in der Originalsoftware sichergestellt.

Der Testaufbau mit dem Leaf Valeo Wi Rückteil ist nur bedingt für den Einsatz in der Praxis geeignet. An das Rückteil lässt sich für mobile Messungen eine Festplatte ansetzen. Maximale Mobilität und Aufnahmen ohne Stativ ermöglicht das neue Leaf Aptus Rückteil. Es erlaubt den Einschub von Compact Flash Speicherkarten für die Bildspeicherung und besitzt ein 60 x 70 mm großes TFT Display auf der Rückseite, an dem Bilder direkt kontrolliert und Einstellungen vorgenommen werden können. Der Sensor im Aptus ist der gleiche wie im Valeo. Die maximale Empfindlichkeit, die am Aptus eingestellt werden kann, soll in Zukunft 400 ISO betragen. Damit lassen sich auch bei schlechteren Lichtbedingungen Aufnahmen aus der freien Hand machen.

Weitere Tests mit der ALPA 12 WA sind geplant, um die Genauigkeit im Objektraum zu steigern, verschiedene Objektive und Rückteile zu testen und um die Freihandtauglichkeit der Kamera zu untersuchen. Der modulare Aufbau der Kamera erlaubt auch den Einsatz der ALPA als terrestrische Messkammer mit oder ohne Shift des Objektivs sowie die Verwendung als Luftbildkamera. Diese Anwendungsbereiche sind Bestandteil weiterer Untersuchungen.

## 6 Dank

Die Autoren danken der Firma AICON 3D Systems GmbH aus Braunschweig für die Unterstützung bei der Durchführung der Kalibrierungsmessungen sowie der Firma GraphicArt aus Bern für die Bereitstellung verschiedener digitaler Kamerarückteile.

## 7 Literaturverzeichnis

LUHMANN, T. & K. WENDT, 2000: Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3D measurement systems. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **33** (B5): 493-499.

PEIPE, J. & Q. YU, 2004: Wie viele Pixel braucht der Mensch? Kameras und ihre Anwendung. Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004 (Hrsg. T. LUHMANN): 116-123.

VDI/VDE, 2002: VDI/VDE Richtlinie 2634 Blatt 1, Optische 3D-Messsysteme mit punktförmiger Antastung. 10 S., Beuth Verlag, Berlin.