

# Genauigkeits- und Einsatzpotential des Macro-Scanning-Systems Pentacon Scan 5000

Danilo SCHNEIDER, Manuela PÖTZSCH, Hans-Gerd MAAS

## Zusammenfassung

Bei Macro-Scanning-Systemen wird durch einen sich schrittweise bewegenden Zeilen- oder Flächensensor ein großformatiges Gesamtbild simuliert. Derartige Scannersysteme bieten im Vergleich zu konventionellen Digitalkameras eine sehr hohe Auflösung zu moderaten Kosten, stellen jedoch aufgrund der geringeren Flexibilität und der eingeschränkten mechanischen Führungsgenauigkeit für photogrammetrische Anwendungen eher ein Nischenprodukt dar.

In dem Beitrag wird das Scannersystem Scan 5000 der Fa. Pentacon vorgestellt und dessen Genauigkeit untersucht. Das System arbeitet mit einer RGB-CCD-Zeile mit 8192 Bildpunkten je Farbkanal, welche in insgesamt 12000 Schritten über die Bildebene bewegt wird und somit einen 24-Bit-Flächensensor mit 94 Megapixeln simuliert.

Mit dieser Zeilenscanner-Kamera wurden mehrere Bildverbände eines Testfeldes aufgenommen und in einer Bündelblockausgleichung ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung werden in dem Beitrag vorgestellt und analysiert. In gleicher Weise erfolgte die Aufnahme des Testfeldes mit der digitalen 14-Megapixel-Kamera Kodak DCS Pro 14n, um das Genauigkeitspotential der Zeilenscanner-Kamera mit demjenigen aktueller Digitalkameras zu vergleichen. Es zeigte sich, dass beide Kameras bezogen auf das Sensorformat auf einem ähnlichen Genauigkeitsniveau liegen. Die Zeilenscanner-Kamera weist jedoch aufgrund ihrer höheren Auflösung eine höhere Detailerkennbarkeit auf und eignet sich deshalb besonders für Anwendungen, bei denen eine interaktive Interpretation und Bildpunktmessung notwendig ist. Abschließend werden einige Anwendungsbeispiele präsentiert und damit die Nutzbarkeit der Scan 5000 für verschiedene photogrammetrische Aufgabenstellungen diskutiert.

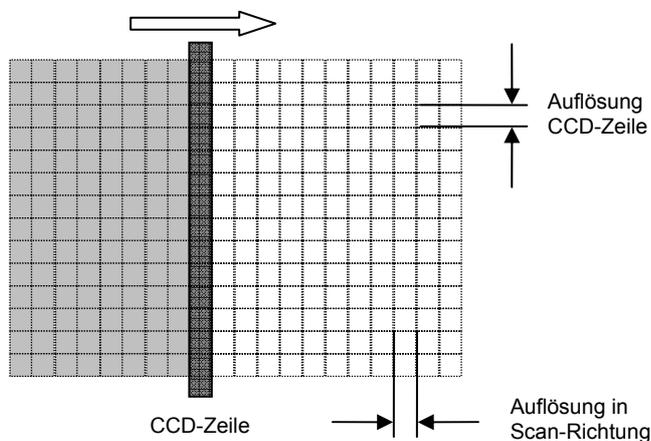


**Abb. 1:** Zeilenscanner-Kamera Pentacon Scan 5000

# 1 Die Kamera Pentacon Scan 5000

## 1.1 Macro-Scanning-Prinzip

Unter einem Macro-Scanning-System versteht man eine Kamera, bei der sich ein Zeilensensor oder ein Flächensensor in der Bildebene bewegt und damit ein großes Bildformat abdeckt (vgl. MAAS 1997). Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Scannerkamera, da das Objekt auf diese Art und Weise schrittweise abgetastet wird (vgl. Abb.2). Der Vorteil eines solchen Systems ist ein großes erreichbares Bildformat und eine hohe Auflösung zu verhältnismäßig geringen Kosten. Während die Auflösung bei einem System mit Zeilensensor in vertikaler Bildkoordinatenrichtung durch den Abstand der Sensorelemente auf der CCD-Zeile definiert ist, bestimmt sich die horizontale Auflösung durch die Geschwindigkeit bzw. die Schrittauflösung des mechanischen Antriebes. Außerdem bietet das Zeilenscanner-Prinzip die Möglichkeit, durch 3 parallel angeordnete CCD-Zeilen für jedes Bildelement einen Rot-, Grün- und Blauwert aufzunehmen, ohne eine Farbpinterpolation durchführen zu müssen.



**Abb. 2:** Prinzip einer Zeilenscanner-Kamera

Das Aufnahmeprinzip ist jedoch auch mit Nachteilen gegenüber konventionellen Digitalkameras mit Flächensensor verbunden. Die hohe Auflösung im Bild wird durch eine entsprechend lange Aufnahmedauer erreicht, da die eingestellte Integrationszeit für jede einzelne Bildspalte gilt. Die Aufnahmedauer beträgt dadurch bis zu mehreren Minuten bei schlechten Beleuchtungsverhältnissen, weshalb vor allem keine bewegten Objekte aufgenommen werden können und grundsätzlich ein Stativ zum Einsatz kommen muss. Außerdem ist zu vermuten, dass die Genauigkeit durch äußere Einflüsse, wie z.B. Vibrationen durch Wind oder vorbeilaufende Personen, und durch die bewegten Elemente innerhalb der Kamera eingeschränkt wird. Eine zusätzliche Schwierigkeit, bedingt durch das Aufnahmeprinzip, ist die Beleuchtung des Objektes, da zum einen kein Blitzlicht verwendet werden kann und zum anderen wechselnde Lichtverhältnisse zu Helligkeitsschwankungen im Bild führen.

Neben den Zeilenscanner-Kameras als eigenständige Systeme, wie der Pentacon Scan 5000, werden auch Zeilenscanner-Rückteile für Mittelformatkameras angeboten. Die Bildformate für einige derzeit verfügbare Systeme sind exemplarisch in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1:** Beispiele für Zeilenscanner-Kameras und -Rückteile

Zeilenscanner-Rückteile	
Rollei Gamma S12	3 500 × 3 500 Pixel
Rollei ScanPack	5 850 × 5 000 Pixel
Anagramm picture gate 8000 daguerre	7 250 × 6 000 Pixel
Anagramm picture gate 8000 david	17 400 × 14 400 Pixel
Zeilenscanner-Kameras	
Pentacon Scan 3000	5 363 × 5 363 Pixel
Pentacon Scan 5000	12 000 × 8 192 Pixel

Nach einem ähnlichen Aufnahmeprinzip arbeiten Rotationszeilenkameras, die ein vergleichbar hohes Auflösungspotential bieten. Allerdings bewegt sich hier nicht die Sensorzeile in Bezug zur Kamera, sondern die gesamte Kamera wird um eine vertikal angeordnete Rotationsachse gedreht. Das Bildformat in horizontaler Richtung wird somit nicht durch das Objektiv limitiert, sondern es kann das volle 360°-Gesichtsfeld rund um die Kamera aufgezeichnet werden (SCHNEIDER & MAAS 2004).

## 1.2 Technische Daten

Für die in diesem Beitrag beschriebenen Untersuchungen wurde die Zeilenscanner-Spiegelreflexkamera Scan 5000 der Fa. Pentacon eingesetzt. Die Kamera wurde erstmals zur Photokina 2002 vorgestellt und zeichnet sich durch eine verhältnismäßig hohe Auflösung von bis zu 94 Megapixeln aus. Weitere Spezifikationen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Spezifikationen der Pentacon Scan 5000

Objektivanschluss	Nikon, Schneider-Kreuznach, Rodenstock, u. a.
Sensor	Trilineare CCD-Zeile mit 3 × 8192 Pixeln
Farbtiefe	3 × 12 Bit
Scannfläche	43,0 × 28,7 mm
Scandauer	40 sek – 3 min
Dateigröße	24 Bit: 288 MB
Steuerung/Stromversorgung	FireWire (IEEE 1394)
Steuersoftware	Scansoftware SilverFast Ai

### 1.3 Anwendungen

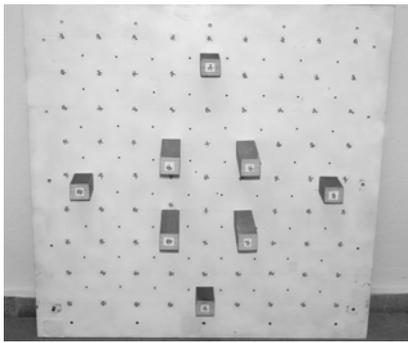
Zeilenscanner-Systeme werden ursprünglich eingesetzt um große Vorlagen, wie beispielsweise Pläne, Luftbilder oder Gemälde, berührungslos zu digitalisieren, d.h. überall dort, wo Flachbett- und Trommelscanner nicht verwendet werden können bzw. dürfen. Weitere Anwendungsbereiche sind Beweissicherungsaufnahmen in der Kriminalistik, die Produktfotografie für Werbezwecke, Makrofotografie in der Medizintechnik oder das Aufnehmen von 2D- und 3D-Vorlagen in Museen und Archiven. In photogrammetrischen Anwendungsbereichen, wie z.B. der Architekturphotogrammetrie zur Dokumentation und Schadenskartierung von historischen Fassaden wurden solche Systeme wegen der eingeschränkten Genauigkeit bislang eher selten eingesetzt.

## 2 Untersuchungen zur Genauigkeit

In der photogrammetrischen Praxis muss zwischen der Auflösung und Genauigkeit eines Messsystems unterschieden werden. In vielen Fällen, z.B. beim interaktiven Messen von natürlichen Punkten im Bild, ist eine hohe Auflösung Voraussetzung für eine hohe geometrische Genauigkeit bei der eigentlichen Auswertung. Jedoch lässt sich nicht automatisch von der Auflösung auf die Genauigkeit des Messsystems schließen, da weitere Faktoren wie die Kalibrierung der Kamera und deren Stabilität sowie die Gültigkeit des zugrunde liegenden mathematischen Modells eine entscheidende Rolle spielen. Besonders bei einem bewegten Aufnahmesystem sind genauigkeitsbeschränkende Einflüsse zu erwarten. Aus diesem Grunde wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, um das Genauigkeitspotential der Scan 5000 zu analysieren.

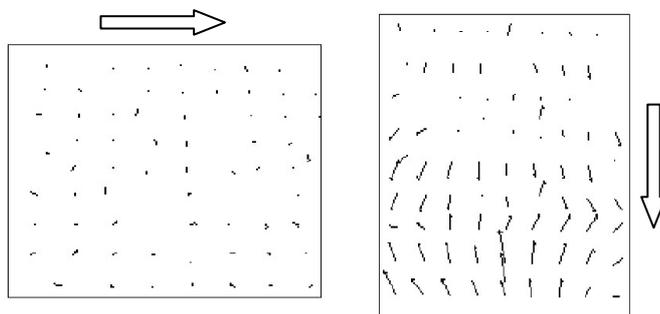
### 2.1 Selbstkalibrierung

Zur Abschätzung der Genauigkeit des Marco-Scanning-Systems wurde ein Bildverband von einem räumlichen Testfeld aufgenommen (vgl. GODDING, 1993) und im Rahmen einer Bündelblockausgleichung ausgewertet. Das Testfeld ist ca. 1 m<sup>2</sup> groß und enthält 150 signalisierte Zielmarken (vgl. Abb. 3). Die Aufnahme von 12 Bildern (8 Konvergent- und 4 jeweils um 90° gedrehte Frontalaufnahmen) dauerte etwa 1 Stunde. Die resultierende Standardabweichung der Gewichtseinheit betrug  $\sigma_0 = 0,51 \mu\text{m}$ . Das entspricht 1/7 der Pixelgröße und einer relativen Genauigkeit von 1 : 70 000 bezogen auf das Sensorformat. Die durchschnittliche Standardabweichung der Objektpunktkoordinaten wurde in einer freien Netzausgleichung mit  $\text{RMS}_X = \text{RMS}_Z = 7 \mu\text{m}$  und in Aufnahmerichtung mit  $\text{RMS}_Y = 20 \mu\text{m}$  ermittelt.



**Abb. 3:** Testfeld (110 × 110 cm, 150 signalisierte Zielmarken)

Im Zuge der Berechnung der Bündelblockausgleichung wurden zusätzliche Parameter für die Modellierung der radial-symmetrischen bzw. tangentialen und asymmetrischen Objektivverzeichnung schrittweise hinzugefügt. Dabei konnte keine signifikante Verzeichnung des Objektivs (Nikkor 50 mm) festgestellt werden. Von besonderem Interesse bei der Auswertung sind die Zusatzparameter für Affinität und Scherung des Bildkoordinatensystems. Bedingt durch das Aufnahmeprinzip der bewegten Sensorzeile könnten ungleichmaßstäbige Bildkoordinatenachsen (Affinität) durch eine ungenaue Abstimmung zwischen Scanngeschwindigkeit und Auslesetakt des Sensors auftreten, was zu einer Stauchung oder Streckung des Bildes führen würde. Ebenso wären eventuell nicht rechtwinklig aufeinander stehende Bildkoordinatenachsen (Scherung) mit einer nicht senkrecht geführten Sensorzeile zu begründen. Beide Parameter erwiesen sich jedoch als nicht signifikant. Dies spricht für eine hohe geometrisch-mechanische Qualität der untersuchten Kamera.



**Abb. 4:** Residuen der Bildkoordinaten – Aufnahme mit horizontal (links) und vertikal (rechts) geführtem Sensor

Zusätzlich wurden die Residuen der Bildkoordinaten nach der Ausgleichung in den einzelnen Bildern betrachtet. Dabei fielen markante Unterschiede zwischen den Aufnahmen mit horizontal geführter Sensorzeile und den Aufnahmen bei gedrehter Kamera mit vertikaler Scannrichtung auf (vgl. Abb. 4). Während die Residuen bei den horizontalen Aufnahmen zufällig verteilt sind, sind bei den Vertikaltaufnahmen systematisch vertikal gerichtete Residuen in der Größenordnung von etwa 1 Pixel zu erkennen. Dies könnte auf ein mechani-

ches Spiel bei der Führung des CCD-Sensors hindeuten, was durch weitere Untersuchungen geklärt werden muss. Die in industriellen Anwendungen übliche Strategie, bei der Selbstkalibrierung das Kalibrierfeld statt der Kamera zu drehen, erscheint angesichts der mit Kameras dieser Bauart üblicherweise aufgenommenen Objekte nicht realisierbar.

## 2.2 Vergleich mit der Kamera Kodak DCS Pro 14n

Um die bei der Bündelblockausgleichung ermittelten Werte für die Genauigkeit der Kamera mit den entsprechenden Werten aktueller Flächensensorkameras zu vergleichen, wurde das Testfeld in gleicher Weise mit der 14-Megapixel-Kamera Kodak DCS Pro 14n aufgenommen und mittels Bündelblockausgleichung ausgewertet. Diese Kamera ist eine der Kleinbild-Spiegelreflexkameras mit der zurzeit höchsten Auflösung (vgl. PEIPE & QUIFENG 2004).

**Tabelle 3:** Vergleich Zeilenscanner mit Flächensensorkamera

	Pentacon Scan 5000	Kodak DCS Pro 14n
		
Sensor	Trilineare CCD-Zeile „Scanner-Kamera“	CMOS-Flächensensor „One-Shot-Kamera“
Auflösung	94 Megapixel (für jede Farbe)	14 Megapixel (RGB aus Bayer-Muster)
Pixelgröße	3,5 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$
Bildbeispiel		

Zum visuellen Vergleich der unterschiedlichen Auflösungen wurde mit beiden Kameras aus etwa 3 m Entfernung und dem gleichen Objektiv eine Testtafel aufgenommen, auf der unter anderem ein Ausschnitt einer Weltkarte angebracht ist. Die Bildbeispiele in Tabelle 3 zeigen jeweils den gleichen Kartenausschnitt. Der Auflösungsunterschied wird im originalen

Farbbild noch deutlicher, da die Farbinformation bei der Zeilenscanner-Kamera nicht durch Interpolation entsteht.

Im Gegensatz zum frappierenden Unterschied in der Auflösung liegen die durch Bündelblockausgleichung ermittelten Genauigkeitsparameter der beiden Kameras auf vergleichbarem Niveau (vgl. Tabelle 4).

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Bündelblockausgleichung beider Kameras

	Pentacon Scan 5000	Kodak DCS Pro 14n
$\sigma_0$	0,51 $\mu\text{m}$ (ca. 1 / 7 Pixel, 1 : 70 000)	0,38 $\mu\text{m}$ (ca. 1 / 20 Pixel, 1 : 95 000)
Objektkoordinaten (freie Ausgleichung)	RMS <sub>Lage</sub> = 7 $\mu\text{m}$ RMS <sub>Tiefe</sub> = 20 $\mu\text{m}$	RMS <sub>Lage</sub> = 5 $\mu\text{m}$ RMS <sub>Tiefe</sub> = 9 $\mu\text{m}$

Wie zu erwarten, konnte der Unterschied in der Auflösung der Zeilenscanner- und der Flächensensor-Kamera nicht in einen entsprechenden Genauigkeitsunterschied umgesetzt werden. Dies ist auf innere Einflüsse (z.B. eingeschränkte mechanische Führungsgenauigkeit des Sensors) und äußere Einflüsse (z.B. Vibrationen, die über den Untergrund übertragen werden), bedingt durch die im Vergleich zu einer „One-Shot-Kamera“ sehr langen Aufnahmezeiten, zurückzuführen. Dennoch ist das Ergebnis als positiv zu werten, da die Genauigkeit der Pentacon Scan 5000 absolut betrachtet sehr hoch ist. Bei interaktiver Bildpunktmessung ist primär die hohe Auflösung entscheidend für die Genauigkeit, da interaktiv kaum eine Messgenauigkeit von besser als 1/7 Pixel erreichbar sein wird.

### 3 Potential in der Photogrammetrie

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Untersuchungen, d.h. die dreidimensionale Koordinatenbestimmung signalisierter Punkte, stellt nicht das Hauptanwendungsfeld einer Zeilenscanner-Kamera dar, da hier die hohe Auflösung nur eine untergeordnete Rolle spielt, solange die Zielmarken mit subpixelgenauen Bildanalyseverfahren bestimmt werden können. Außerdem dauert die Aufnahme großer Bildverbände verhältnismäßig lange und kann nur unter Verwendung eines Stativs erfolgen.



**Abb. 5:** Architekturphotogrammetrie – digitale Entzerrung einer Fassade

Vielmehr kann dieses Aufnahmeprinzip vor allem bei Anwendungen eingesetzt werden, bei denen hohe Anforderungen an Farbtreue und Detailerkennbarkeit erfüllt werden müssen, beispielsweise bei der berührungslosen Digitalisierung großformatiger Vorlagen in Museen und Archiven.

Traditionelle photogrammetrische Aufgaben, bei denen die Zeilenscanner-Kamera eine sinnvolle Alternative zu konventionellen Verfahren darstellt, sind großmaßstäbige Dokumentationen im Innenraumbereich. Des Weiteren erschließt sich der Bereich der Architekturphotogrammetrie als weites Einsatzgebiet, da hier die Auflösung oft wichtiger ist als die Genauigkeit, wie z.B. bei der Schadenskartierung historischer Fassaden (vgl. Abb. 5). Hier konkurriert die Kamera mit analogen Großformatkameras, jedoch ergeben sich zahlreiche Vorteile durch die digitale Bildaufnahme (Beurteilung des Bildes vor Ort, kein Entwicklungsprozess) und durch die Möglichkeit der Verwendung von Kleinbildobjektiven. Auf Hebebühnen bzw. bei schnell wechselnden Lichtverhältnissen kann die Kamera allerdings nicht bzw. nur eingeschränkt verwendet werden.

## 4 Danksagung

Die Autoren danken der Fa. Pentacon GmbH, Foto- und Feinwerktechnik Dresden, für die Bereitstellung der Zeilenscanner-Kamera Scan 5000.

## 5 Literatur

- Godding, R. (1993): *Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme*. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 2/1993
- Maas, H.-G. (1997): *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. Habilitationsschrift ETH Zürich. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 62
- Peipe, J. & Quifeng Yu (2004): *Wieviel Pixel braucht der Mensch? Kameras und ihre Anwendungen*. Optische 3D-Messtechnik - Photogrammetrie - Laserscanning. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Wichmann Verlag, Heidelberg
- Schneider, D. & Maas, H.-G. (2004): *Einsatzmöglichkeiten und Genauigkeitspotential eines strengen mathematischen Modells für Rotationszeilenkameras*. Optische 3D-Messtechnik - Photogrammetrie - Laserscanning. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Wichmann Verlag, Heidelberg