

# Einsatzmöglichkeiten und Genauigkeitspotenzial eines strengen mathematischen Modells für Rotationszeilenkameras

Danilo SCHNEIDER und Hans-Gerd MAAS

## Zusammenfassung

Ein im Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden entwickeltes strenges mathematisches Modell für Rotationszeilenkameras wird im vorliegenden Beitrag beschrieben und untersucht. Die Genauigkeit des Modells konnte durch Einbeziehen zusätzlicher Parameter, welche systematische Abweichungen vom geometrischen Modellansatz beschreiben, gesteigert werden. Außerdem wurde das mathematische Modell erfolgreich in verschiedene photogrammetrische Auswerteverfahren implementiert. Zu diesen Verfahren gehört vor allem die selbstkalibrierende Bündelblockausgleichung für Panoramabilder. Damit eignen sich die Panoramakamera und deren mathematisches Modell vor allem für die genaue 3D-Modellierung von Innenräumen, Plätzen oder langen Fassaden in Verbindung mit der Auswertung hochauflösender Texturinformation.

## 1 Einleitung

Die stereoskopische Aufnahme von Innenräumen oder Plätzen mit konventionellen Kameras bereitet oft Schwierigkeiten, da sehr viele Bilder aufgenommen werden müssen, um für die Auswertung notwendige Überlappungen zu erreichen. Deshalb bieten Panoramakameras in der Photogrammetrie eine interessante Alternative zu herkömmlichen Verfahren, da innenraumähnliche Geometrien mit wenigen Bildern in Verbindung mit einer hohen Auflösung vollständig erfasst werden können (TECKLENBURG & LUHMANN 2003). Analoge Panoramakameras existieren bereits seit geraumer Zeit, wurden anfänglich jedoch ausschließlich für fotografische Zwecke genutzt.



**Abb. 1:** Panorama der Ruine der Trinitatiskirche in Dresden

Die meisten photogrammetrischen Aufnahmetechniken basieren auf dem Grundprinzip der Zentralperspektive. Dieses Prinzip gilt für Panoramakameras nicht, es handelt sich vielmehr

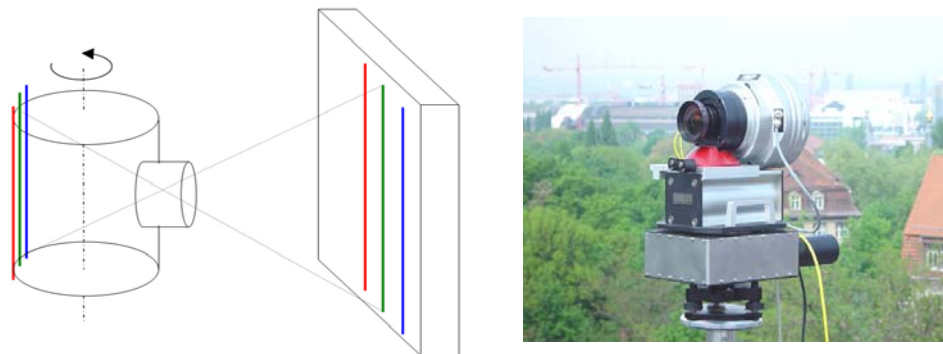
um eine Abbildung auf einen Zylindermantel. Um Panoramakameras photogrammetrisch nutzen zu können, musste deshalb ein strenges mathematisches Modell für diese Abbildungsform entwickelt werden (SCHNEIDER & MAAS 2003). Dieses Modell wurde um spezielle, für digitale Panoramakameras geltende Zusatzparameter erweitert und die Modellgenauigkeit dadurch erhöht.

Das mathematische Modell wurde zunächst zur Kamerakalibrierung im räumlichen Rückwärtsschnitt implementiert und anhand einer von der Fa. KST (Kamera System Technik Dresden GmbH) entwickelten Kamera analysiert. Aufbauend auf dem Modell wurden eine Bündelblockausgleichung für Panoramabilder entwickelt und andere photogrammetrische Methoden an die spezielle Panoramageometrie angepasst. Damit ist es nun möglich, eine genaue 3D-Erfassung von Objekten wie Innenräumen, Plätzen oder langen Fassaden unter Nutzung detailgetreuer RGB-Information der Kamera vorzunehmen.

## 2 Rotationszeilenkamera

### 2.1 Aufnahmeprinzip

Das Aufnahmeprinzip einer digitalen Panoramakamera ähnelt dem eines Flachbettscanners. Bei einem Flachbettscanner wird eine RGB-CCD-Zeile linear über das aufzunehmende Objekt geführt. Bei der Panoramakamera bewegt sich die CCD-Zeile auf einer Kreisbahn um eine feste Rotationsachse und beschreibt dabei einen Zylindermantel. Man spricht daher auch von einer Rotationszeilenkamera.



**Abb. 2:** Aufnahmeprinzip einer Rotationszeilenkamera und Kamera EYESCAN M3

Auf diese Art und Weise wird der Raum, in dem sich die Kamera befindet, mit einem horizontalen Öffnungswinkel von bis zu  $360^\circ$  „gescannt“. Der vertikale Öffnungswinkel hängt neben der Sensorlänge natürlich von der Brennweite des verwendeten Objektivs ab. Da der Zeilensensor tatsächlich aus jeweils einer CCD-Zeile je Farbkanal besteht, wird die volle RGB-Information ohne Verwendung von Farbfiltern und nachträglicher Interpolation aufgezeichnet. Nachteilig an diesem Aufnahmeprinzip ist die im Vergleich zu Flächensensoren lange Aufnahmedauer, weshalb u. a. auch bewegte Objekte falsch abgebildet werden.

## 2.2 Kamera EYESCAN M3

Die verwendete Rotationszeilenkamera „EYESCAN M3“ wurde von der Kamera System Technik Dresden GmbH (KST) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt. In dieser Kamera wird ein CCD-Sensor mit  $3 \times 10200$  Pixel verwendet. Ähnliche Sensoren werden auch in Zeilenkameras auf Flugzeugplattformen eingesetzt, wie beispielsweise im ADS40 (Airborne Digital Sensor). Die Bildgröße eines 360°-Panoramas beträgt je nach verwendetem Objektiv zwischen ca. 300 und 900 Megapixel. Weitere Details zum Aufbau und der Arbeitsweise der EYESCAN M3 wurden bereits in SCHNEIDER & MAAS (2003) beschrieben. Einige der technischen Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1:** Technische Daten der Rotationszeilenkamera EYESCAN M3

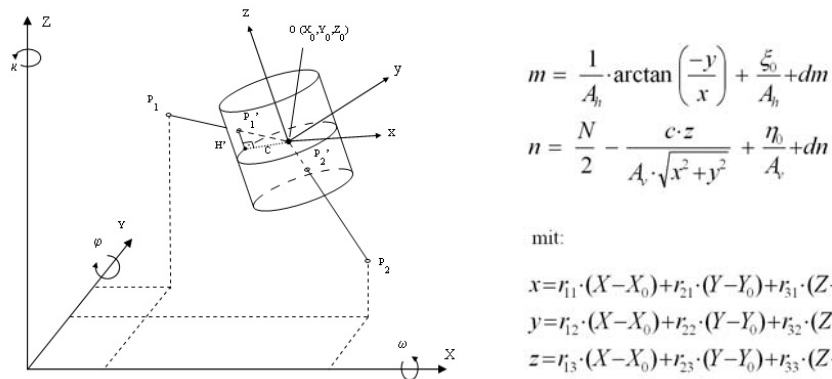
Objektiv	35 mm	45 mm	60 mm	100 mm
Sensor: RGB-CCD-Zeile mit 10200 Pixel je Farbkanal, Länge 72 mm, Radiometrische Auflösung: 16 bit je Farbkanal				
Anzahl Bildspalten (360°)	31400	40400	53800	89700
Vertikaler Öffnungswinkel	90°	80°	60°	40°
Datenvolumen (360°, 48 Bit)	1,7 GB	2,3 GB	3,1 GB	5,1 GB
Aufnahmedauer (360°, 8 ms je Spalte)	3 min	4,5 min	6 min	10 min

Es besteht die Möglichkeit, ein Beleuchtungssystem auf der Kamera zu montieren, welches einen sich mit der Kamera mitdrehenden Lichtstreifen an das Objekt projiziert. Dieses System besteht aus einer Lichtquelle und einem Lichtleiterkabel, welches das Licht zu 3 Querschnittswandlern leitet. Für die Aufnahme retro-reflektierender Zielmarken, beispielsweise zur Kamerakalibrierung, ist eine solche Beleuchtung aus Aufnahmerichtung zwingend notwendig.

## 3 Mathematisches Modell

### 3.1 Modellansatz

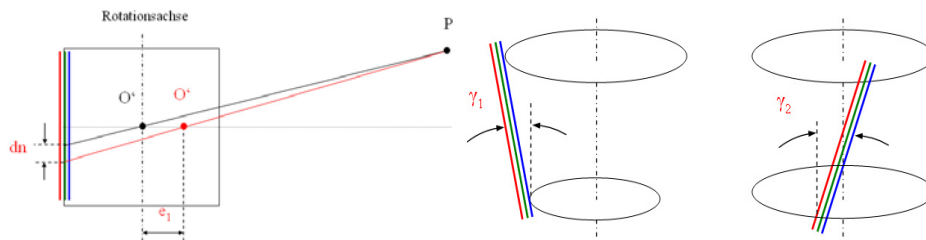
Die Abbildung von Objektpunkten auf dem durch die Rotationszeilenkamera beschriebenen Zylindermantel entspricht nur in einer Bildkoordinatenrichtung dem bekannten Prinzip der Zentralperspektive. Deshalb musste ein mathematisches Modell für die Abbildung auf die Zylindergeometrie entwickelt werden. Für diese Modellierung werden verschiedene Koordinatensysteme verwendet. Wie auch in LISOWSKI & WIEDEMANN (1998) werden neben kartesischem Objekt- und dem Pixelkoordinatensystem ein kartesisches und ein zylindrisches Kamerakoordinatensystem, angepasst an die spezielle Geometrie der Abbildung, definiert. Durch die gegenseitige Transformation der Systeme erhält man das Grundmodell in Form von Beobachtungsgleichungen (vgl. Abbildung 3). Diese Gleichungen sind als Beobachtungsgleichungen ähnlich aufgebaut wie die Kollinearitätsbeziehungen der Zentralperspektive, d.h. die Beobachtungen (Bildkoordinaten) werden in Abhängigkeit der Objektkoordinaten, der Orientierung der Kamera und möglicher Zusatzparameter beschrieben.



**Abb. 3:** Abbildungsprinzip einer Rotationszeilenkamera und mathematisches Modell (Definition der verwendeten Variablen in SCHNEIDER & MAAS 2003)

### 3.2 Zusatzparameter und Genauigkeitspotenzial

Der physikalische Abbildungsvorgang entspricht nur näherungsweise dem entwickelten mathematischen Grundmodell. Entscheidend für die Genauigkeit des Modells sind deshalb die Korrekturterme  $dm$  und  $dn$ , in denen Zusatzparameter zur Kompensation von Restsystematiken berücksichtigt werden. Zusatzparameter, die Abweichung vom mathematischen Modellansatz der Rotationszeilenkamergeometrie beschreiben, wurden bereits in SCHNEIDER & MAAS (2003) erläutert. Abbildung 4 veranschaulicht drei der berücksichtigten Parameter.



**Abb. 4:** Abweichungen vom Modellansatz ( $e_1$  – Exzentrizität des Projektionszentrums von der Rotationsachse;  $\gamma_1, \gamma_2$  – Neigung/Kantung der Sensorzeile)

Das mathematische Modell wurde zunächst in einem räumlichen Rückwärtsschnitt implementiert. Dabei wurde unter anderem die resultierende Standardabweichung der Gewichtseinheit zur Beurteilung der Wirkung einzelner Zusatzparameter herangezogen. Tabelle 2 zeigt, wie sich  $\hat{\sigma}_0$  verändert, wenn einzelne Parameter schrittweise dem Modell hinzugefügt werden. Dem Rückwärtsschnitt liegen ca. 360 Referenzpunkte zugrunde, die sich in einem Kalibrierraum befinden, der freundlicherweise von der Fa. Aicon zur Verfügung gestellt wurde.

**Tabelle 2:**  $\hat{\sigma}_0$  aus Räumlichem Rückwärtsschnitt (links)

Parameter	$\hat{\sigma}_0$ [Pixel]
Äußere Orientierung	25,20
Innere Orientierung	5,88
Exzentrizität Projektionszentrum	5,63
Neigung/Kantung Sensorzeile	1,15
Verzeichnung	0,60
Affinität	0,45
sonstige	0,24

Überträgt man die nach Berücksichtigung aller Parameter aus dem räumlichen Rückwärtsschnitt erhaltene Standardabweichung der Gewichtseinheit von 0,24 Pixel in den Objekt-raum, ergibt sich eine Lagegenauigkeit zwischen 0,1 und 0,5 mm im Entfernungsbereich bis zu 10 m (bei Verwendung eines Objektivs mit  $c_k = 35$  mm). Bezogen auf die Länge der CCD-Zeile von 10200 Pixel entspricht der erreichte Wert ca. 1 : 42000.

In AMIRI PARIAN & GRÜN (2003) werden neben physikalisch definierten Zusatzparametern, weitere Parameter zur Kompensation lokaler Systematiken verwendet. Dazu wird jedes zu korrigierende Panorama mittels Wavelet-Analyse in Teilstücke aufgeteilt, in denen dann ein Polynomansatz zur Kompensation lokaler Restsystematiken verwendet wird. Dadurch wurde  $\hat{\sigma}_0 = 0,23$  Pixel erreicht, was der hier gezeigten Größenordnung entspricht.

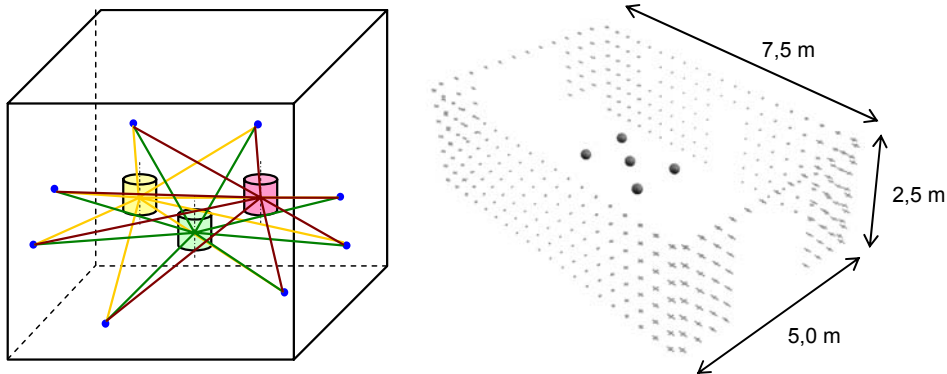
## 4 Implementierung des Modells

### 4.1 Bündelblockausgleichung

Nachdem das entwickelte mathematische Modell erfolgreich getestet werden konnte, wurde es in verschiedene photogrammetrische Anwendungen implementiert. Dazu gehört vor allem die Bündelblockausgleichung für Panoramabilder. Damit ist es möglich, aus zwei oder mehr Panoramen Objektpunkte, Orientierungen und Kameraparameter simultan in einer Berechnung zu ermitteln. Im Vergleich zur Bündelblockausgleichung zentralperspektivischer Aufnahmen bietet sie den Vorteil, dass innenraumähnliche Objektgeometrien mit sehr wenigen Bildern und einer hohen Auflösung erfasst werden können.

Bei der Entwicklung der Bündelblockausgleichung wurde vor allem Wert auf Anwenderfreundlichkeit gelegt, d.h. die Berechnung sollte mit möglichst wenigen Näherungswerten auskommen. Mit nur 3 Objektpunkten ist es deshalb möglich, Näherungswerte für die Orientierung der Panoramen und daraus folgend für alle Objektpunkte zu beschaffen. Diese 3 Objektpunkte können beispielsweise durch ein in das Objekt gestelltes Referenzdreieck realisiert werden. Die Ausgleichung kann alternativ mit minimalem Datum, einer bestimmten Anzahl von Passpunkten oder als freie Ausgleichung durchgeführt werden. In Tabelle 3 sind die Resultate zweier Berechnungen, einer Ausgleichung mit minimalem Datum und einer freien Ausgleichung zusammengetragen. Verwendet wurden dabei insgesamt 364

Objektpunkte und 5 Kamerastandpunkte. Abhängig von der Punktverteilung der zur Datumsfestlegung verwendeten Punkte werden die RMS-Werte der Objektkoordinaten durch die freie Ausgleichung entscheidend verbessert und betragen ca. 0,1 bis 0,4 mm. Vor allem die Z-Komponente wurde durch die freie Ausgleichung verbessert, da alle Standpunkte auf gleicher Höhe lagen und deshalb die Strahlenschnittgeometrie relativ schlecht war.



**Abb. 5:** Prinzipskizze der Bündelblockausgleichung für Panoramen (links) Punkte im Kalibrierraum der Fa. Aicon inkl. Standpunktverteilung (rechts)

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Bündelblockausgleichung

	Minimales Datum	Freie Ausgleichung
$\hat{\sigma}_0$ [Pixel]	0,22	
RMS <sub>x</sub> [mm]	0,97	0,39
RMS <sub>y</sub> [mm]	0,85	0,28
RMS <sub>z</sub> [mm]	2,28	0,16

Sollten noch Restsystematiken der Kamera vorhanden sein, würden sich diese möglicherweise in „falschen“ Objektpunktkoordinaten niederschlagen und könnten allein durch die Analyse der Standardabweichungen nicht aufgedeckt werden. Deshalb wurden die berechneten Objektkoordinaten mit den Referenzkoordinaten des Kalibrierraums verglichen. Zur Stärkung der Geometrie wurden für die Berechnung 4 gut im Raum verteilte Passpunkte herangezogen. Aus Tabelle 4 wird deutlich, dass das Mittel aller Abweichungen für alle Koordinatenrichtung ca. 0,5 mm beträgt. Dabei ist allerdings nicht sicher, ob die verbleibenden Abweichungen als mögliches Genauigkeitspotenzial der Rotationszeilenkamera interpretiert werden können, oder ob die Abweichungen auf Unsicherheiten der Referenzkoordinaten zurückzuführen sind. Dies muss durch weitere Testmessungen untersucht werden, wobei es prinzipiell schwierig sein wird, ausreichend genaue Referenzkoordinaten zur Verfügung zu stellen.

**Tabelle 4:** Mittlere Abweichungen berechneter Objektpunkte zu Referenzkoordinaten

$\overline{\Delta X}$	0,58 mm	$\overline{\Delta Y}$	0,44 mm	$\overline{\Delta Z}$	0,36 mm
-----------------------	---------	-----------------------	---------	-----------------------	---------

## 4.2 Kernliniengeometrie

Das entwickelte mathematische Modell wurde weiterhin verwendet, um die Epipolarlinien-geometrie für Panoramabilder zu beschreiben. Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, handelt es sich eigentlich nicht um Linien sondern vielmehr um „Epipolarcurven“ im Bildraum.

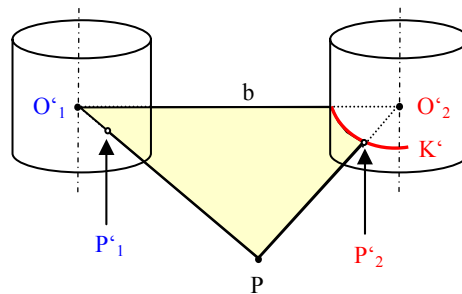


Abb. 6: Kernliniengeometrie für Panoramabilder

Die Kernliniengeometrie unterstützt die Suche korrespondierender Punkte und ist für die semi- bzw. vollautomatische Auswertung von Panoramen unabdingbar. Wird zu einem im ersten Panorama gefundenen Punkt der entsprechende homologe Punkt im zweiten Panorama gesucht, kann die Epipolarlinie berechnet und entlang dieser gesucht werden. Im dritten Panorama kann sich der Suchalgorithmus auf den Schnittbereich der Epipolarcurven der ersten beiden Panoramen beschränken.

## 4.3 Tangentialprojektion

Bei einer Tangentialprojektion wird die RGB-Information vom Zylindermantel auf eine an diesen angelegte Tangentialebene projiziert. Das Panoramabild wird damit unter Nutzung des entwickelten geometrischen Modells in eine zentralperspektivische Abbildung umgewandelt und kann schließlich in konventionellen photogrammetrischen Auswerteprogrammen verwendet werden. Jedoch können damit nur Panoramaausschnitte abgebildet werden, deren Winkelbereich deutlich kleiner als  $180^\circ$  ist. Dieses Verfahren kann beispielsweise in der Architektur zur Fassadenaufnahme genutzt werden, was durch die Beispiele in Abbildung 7 demonstriert wird.



Abb. 7: Panoramaausschnitt, Tangentialprojektion, Entzerrung auf die Fassadenebene

Das auf die Tangentialebene projizierte Panorama wurde zusätzlich noch mittels einer Projektivtransformation auf die Fassadenebene entzerrt. Der Vorteil gegenüber der Verwendung von Flächensensoren besteht hier in der sehr hohen Auflösung und damit der Detailtreue des auszuwertenden Bildes. Das Original des in Abbildung 7 dargestellten Panoramaausschnitts besteht aus ca. 64 Millionen Pixel.

## 5 Ausblick

Die vorgestellten Algorithmen zur photogrammetrischen Auswertung von Panoramabildern wurden in Form von Funktionen programmiert und diese bereits teilweise in Anwender-Software der Fa. fokus GmbH Leipzig integriert. Diese Integration wird in den nächsten Monaten weiter vervollständigt werden, so dass letztendlich eine umfassende Software zur hochgenauen zwei- und dreidimensionalen Verarbeitung von Panoramabildern zur Verfügung stehen wird.

## Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des Projektes „Terrestrische Rotationszeilen-Weitwinkelkamera für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie“, das mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2000 – 2006 und mit Mitteln des Freistaates Sachsen gefördert wird. Die Autoren danken den am Projekt beteiligten Firmen KST (Kamera System Technik Dresden GmbH) und der fokus GmbH Leipzig. Besonderer Dank gilt außerdem der Aicon 3D-Systems GmbH für die Bereitstellung des Kalibrierraumes.

## Literatur

- Amiri Parian, J. & Grün, A. (2003): *A sensor model for panoramic cameras*. In: Grün/Kahmen (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques VI, Volume II*, S. 130-141
- Lisowski, W. & Wiedemann, A. (1998): *Auswertung von Bilddaten eines Rotationszeilen-scanners*. In: *Publikationen der DGPF, Nr. 7/1998*, S. 183-189
- Schneider, D. & Maas, H.-G. (2003): *Geometrische Modellierung und Kalibrierung einer hochauflösenden digitalen Rotationszeilenkamera*. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003*, S. 57-64. Wichmann Verlag, Heidelberg
- Schneider, D. & Maas, H.-G. (2003): *Geometric modelling and calibration of a high resolution panoramic camera*. In: Grün/Kahmen (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques VI, Volume II*, S. 122-129
- Tecklenburg, W. & Luhmann, T. (2003): *Potential of panoramic view generated from high-resolution frame images and rotation line scanners*. In: Grün/Kahmen (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques VI, Volume II*, S. 114-121