

Linienbasierte Referenzierung zwischen Einzelbildern und Laserscannerdaten für eine bildgestützte Interpretation von Punktwolken in einer CAD-Umgebung

NADINE MEIERHOLD¹, ANNE BIENERT¹ & ARMIN SCHMICH²

Zusammenfassung: Der folgende Beitrag befasst sich mit der geometrischen Referenzierung zwischen digitalen Einzelbildern und terrestrischen Laserscannerpunktwolken auf Basis von im Bild und in der Punktwolke gemessenen Geraden. Es werden zwei linienbasierte Methoden vorgestellt. Der erste Linienansatz basiert auf einer Punkt-zu-Gerade Korrespondenz und stellt eine Erweiterung der Kollinearitätsgleichungen dar. Im Gegensatz dazu werden für den zweiten Ansatz auch im Bildraum Geradenmerkmale verwendet. Die beiden Methoden wurden implementiert und an zwei verschiedenen Datensätzen getestet. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei ihre Eignung für eine bildgestützte Interpretation der Punktwolken z.B. durch Monoplotting.

1 Einleitung

Ein Softwaresystem zur Darstellung und Auswertung von Punktwolken in *AutoCAD* ist das Produkt *PointCloud* der Firma kubit GmbH in Dresden. Neben der manuellen Auswertung der Punktwolken mit Hilfe der zur Verfügung stehenden *AutoCAD*-Befehle, ist auch eine halbautomatische Modellierung durch Ebenenfitting und Verschneidung dieser Ebenen möglich. Außerdem ist eine kombinierte Auswertung von Bild- und Laserscannerdaten nach dem Prinzip des Monoplottings integriert. Im Bild gezeichnete Elemente z.B. Punkte und Kanten werden direkt geometrisch korrekt in die Punktwolke übertragen. Hierbei werden die Vorteile beider Datentypen ausgenutzt: die hohe geometrische Auflösung und der hohe Interpretationsgrad der Bilder sowie die genauen 3D Informationen der Laserscannerpunktwolken.

Voraussetzung für die gemeinsame Nutzung von Bildern und Laserscannerpunktwolken für Messprozesse ist eine genaue geometrische Referenzierung zwischen den Daten. Aus diesem Grund bezieht sich dieser Beitrag auf die Referenzierung zwischen Laserscannerpunktwolken und unabhängig aufgenommener Einzelbilder. Das Ziel besteht darin, die äußere Orientierung eines Einzelbildes aus im Bild und in der Punktwolke identischen Punkten oder Linien zu bestimmen. Falls die Bilddaten mit einer Amateurkamera aufgenommen wurden, sollte auch eine simultane Kalibrierung der Kamera möglich sein.

Erste Auseinandersetzungen hinsichtlich der relativen und absoluten Bildorientierung mit Linien sind in KUBIK (1991) dargelegt. Seitdem wurden auf dem Gebiet der Linienphotogrammetrie zahlreiche Publikationen mit verschiedenen Ansätzen veröffentlicht (u.a. HABIB et. al, 1999; PATIAS et. al, 1995; TOMMASELLI & TOZZI, 1996; HEMKEN & LUHMANN, 2002).

1) Nadine Meierhold und Anne Bienert, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, E-Mail: Nadine.Meierhold@tu-dresden.de und Anne.Bienert@tu-dresden.de

2) Armin Schmich, kubit GmbH, Fiedlerstraße 36, 01307 Dresden, E-Mail: armin.schmich@kubit.de

In SCHENK (2004) werden zwei grundsätzliche Linienansätze unterschieden: der Kollinearitäts- und der Koplanaritätsansatz. HEUVEL (2003) stellt u.a. einen Ansatz zur Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter aus den parallelen Geraden einer Ebene vor. Mit Hilfe von 3 Eckpunkten, der sich schneidenden Geraden und dem Projektionszentrum, wird über den Volumenansatz eines Tetraeders die äußere Orientierung abgeleitet.

Das 2. Kapitel stellt zwei Methoden zur Referenzierung von Einzelbildern anhand von Linien vor, von denen der erste Ansatz auf dem Kollinearitätsmodell der Punkte beruht. Im 3. Abschnitt werden die vorgestellten Methoden an zwei Datensätzen getestet und die Ergebnisse der punkt- und linienbasierten Orientierung vorgestellt und analysiert. Ein kurzer Ausblick (Abschnitt 4) beendet den Beitrag.

2 Methoden zur linienbasierten Referenzierung von Einzelbildern

Die Orientierung eines Bildes zu einer Punktwolke kann auf im Bild und in der Punktwolke identischen Punkten oder Linien basieren. Bei Verwendung von Passpunkten kann diese durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt realisiert werden. Die Notwendigkeit der Messung diskreter Punkte in der Punktwolke stellt sich bei der punkt-basierten Referenzierung als Nachteil heraus, da aufgrund der Unterabtastung des Laserscanners ein markanter Punkt nicht immer durch einen Messpunkt repräsentiert wird. Linienbasierte Verfahren haben dagegen den großen Vorteil, dass es nicht notwendig ist, im Bild und in der Punktwolke identische Punkte zu detektieren, was zum Beispiel bei Objektverdeckungen Probleme bereitet. Der Übergang von einem punkt-basierten Ansatz zu linienbasierten Methoden stützt sich auch auf die Tatsache, dass viele anthropogene Objekte (z.B. Fassaden in der Architektur) zahlreiche geradlinige Merkmale aufweisen, die für die Aufgabe der Bildorientierung genutzt werden können. Dazu kommt, dass Linien sowohl aus Punktwolken als auch aus Bildern einfacher automatisch zu extrahieren sind als diskrete Punkte. Aus den in der Literatur bereits vorhandenen Ansätzen zur Linienphotogrammetrie wurden zwei Methoden ausgewählt, die in den nächsten Abschnitten näher beschrieben werden.

2.1 Linienmethode mit Punkt-zu-Linie Korrespondenz

Ein Linienansatz mit einer Punkt-zu-Linie Beziehung wurde bereits von KUBIK (1991) zur Bestimmung der sieben Transformationsparameter bei der absoluten Orientierung verwendet. Hierbei wurden die Passpunkte des übergeordneten Zielsystems durch „Passgeraden“ ersetzt. Als Passpunkte im Ausgangssystem dienten dann zu den Passgeraden korrespondierende Punkte. Zur Auswertung von Bildverbänden bei der Aerotriangulation führte SCHENK (2004) erweiterte Kollinearitätsgleichungen als Beobachtungsgleichungen in die Bündelblockausgleichung ein. Diese Arbeit liefert den im Weiteren dargestellten Ansatz zur Orientierung eines Einzelbildes.

2.1.1 Mathematisches Modell

Diese erste Linienmethode basiert auf der Definition von Objektgeraden in der Punktwolke und Messung von Punkten auf den zugehörigen Linien im Bild. Für die Objektgeraden wurde eine 4-Parameter-Beschreibung gewählt, die aus 2 Lageparametern (x_0 , y_0) und 2 Orientierungsparametern (α , θ) besteht (s. Abschnitt 2.1.2).

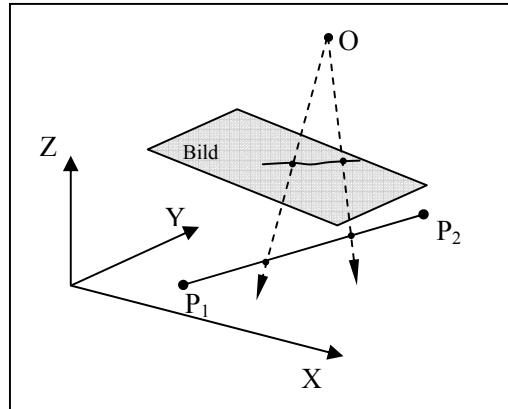


Abb. 1: Prinzip der Linienmethode mit Punkt-Gerade Beziehung

Das Prinzip dieses Ansatzes besteht darin, die Projektionsstrahlen von den Bildpunkten durch das Projektionszentrum mit den zugehörigen Objektgeraden zum Schnitt zu bringen (s. Abbildung 1).

Mathematisch wird diese Punkt-zu-Gerade Korrespondenz durch Erweiterung der Kollinearitätsgleichungen beschrieben, indem die Objektkoordinaten durch die jeweilige Zeile der Objektgeraden ersetzt werden (s. Gleichung 1).

$$\begin{aligned}
 x &= x_h - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dx \\
 y &= y_h - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dy
 \end{aligned}
 \tag{eq. 1}$$

$$\text{mit } \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \cos \alpha \cos \theta - y_0 \sin \alpha + t \cos \alpha \sin \theta \\ x_0 \sin \alpha \cos \theta + y_0 \cos \alpha - t \sin \alpha \sin \theta \\ -x_0 \sin \theta + t \cos \theta \end{pmatrix}$$

Die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$) erfolgt wie beim punkt-basierten Rückwärtsschnitt in einem iterativen Ausgleichsprozess, bei dem die Residuen der Bildkoordinaten minimiert werden. Zusätzlich muss für jeden Bildpunkt der Geradenparameter t als Unbekannte mitgeschätzt werden.

Bei der Verwendung von zwei Bildpunkten pro Objektgerade, sind mindestens drei bekannte nichtparallele Objektgeraden notwendig, um die Parameter der äußeren Orientierung des Bildes zu bestimmen. Wie auch beim räumlichen Rückwärtsschnitt über korrespondierende Punkte ist es möglich, die innere Orientierung (x_h, y_h, c) sowie die Verzeichnungsparameter simultan zu bestimmen.

Wird nur die radial-symmetrische Verzerrung berücksichtigt, sind mindestens 6 Objektgeraden mit jeweils zwei korrespondierenden Bildpunkten zur Lösung des Gleichungssystems erforderlich. Eine Steigerung der Redundanz und damit der Genauigkeit der Ausgleichung kann durch Erhöhung der Bildpunktanzahl je Objektgerade erreicht werden.

2.1.2 Mathematische Beschreibung der Objektgeraden

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Geraden im Raum mathematisch zu beschreiben. Für diese Linienmethode wurde eine 4-Parameter-Beschreibung gewählt, die erstmals von ROBERTS (1988) vorgestellt und von SCHENK (2004) aufgegriffen und variiert wurde. Diese Beschreibung hat den Vorteil, dass sie mathematisch eindeutig und frei von Singularitäten ist, so dass keine Spezialfälle extra behandelt werden müssen. Die zwei Lageparameter (x_0, y_0) sowie die zwei Orientierungsparameter (α, θ) sind geometrisch gut vorstellbar.

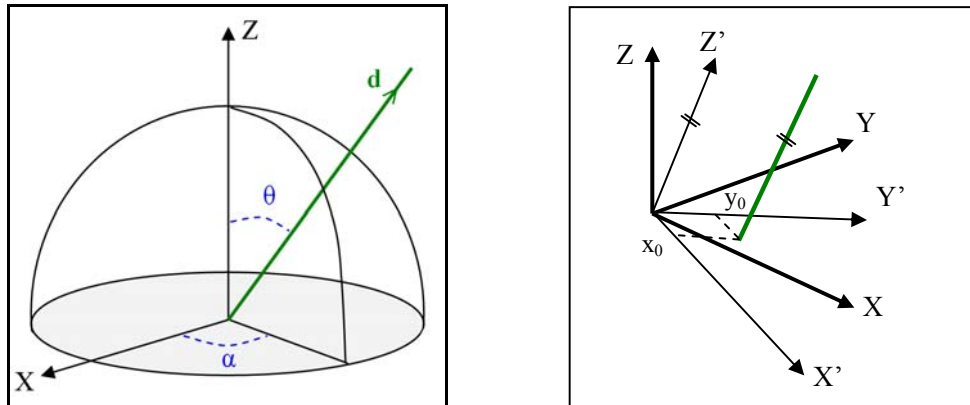


Abb. 2: Parameter der Geradenbeschreibung (nach SCHENK, 2004)

Das Azimut α und der Zenitwinkel θ können aus den sphärischen Koordinaten des Richtungsvektors \mathbf{d} der Geraden abgeleitet werden (s. Abbildung 2 links). Um eine eindeutige Beschreibung der Geraden zu gewährleisten, sind die Wertebereiche der Winkel mit $0 < \alpha < 360^\circ$ und $0 < \theta < 90^\circ$ zu definieren, was einer Beschränkung auf die Halbkugel der positiven Z-Achse entspricht.

Mit Hilfe dieser Winkel erfolgt die Rotation des Koordinatensystems, in der Art, dass die Z-Achse parallel zur Geraden verläuft. Die resultierenden X' - und Y' -Achsen liegen anschließend in der Ebene, die den Ursprung des Koordinatensystems enthält und senkrecht zur Geraden verläuft. Der Durchstoßpunkt der Geraden durch diese Ebene liefert die beiden Lageparameter x_0 und y_0 (s. Abbildung 2 rechts). Er entspricht dem zum Ursprung nächstgelegenen Geradenpunkt \mathbf{p} und muss die Bedingung $\mathbf{p} \cdot \mathbf{d} = 0$ erfüllen.

$$\mathbf{p}' = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{\alpha\theta} \mathbf{p} \quad \text{eq. 2}$$

Gleichung 2 beschreibt die Transformation eines Geradenpunktes \mathbf{p} in das neue Koordinatensystem. Die Rotation jedes Punktes $\mathbf{p}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ der Geraden führt auf die gleichen Lagekoordinaten x_0 und y_0 , aber zu unterschiedlichen Z-Koordinaten. Der z-Wert hat demzufolge die gleiche Bedeutung wie der Geradenparameter t der Punkt-Richtungsdarstellung einer Geraden. Die Objektkoordinaten eines Geradenpunktes ergeben sich aus der Umkehrung dieser Rotation (s. Objektpunktvektor in Gleichung 1).

2.2 Linienmethode mit Gerade-zu-Gerade Korrespondenz

In diesem Abschnitt wird eine Linienmethode behandelt, die von SCHWERMANN (1995) vorgestellt wurde. Sie beruht auf einer Bildgerade-zu-Objektgerade Korrespondenz, d.h. die Orientierung eines Einzelbildes basiert auf in der Punktwolke definierten Objektgeraden und der Messung der zugehörigen Geraden im Bild. Die Beschreibung der Bildgeraden erfolgt über die Koordinatendarstellung (s. Gleichung 3). Im Unterschied zu SCHWERMANN (1995), der für die Objektgeraden ebenfalls die Koordinatendarstellung verwendet, wird zur Reduzierung von Fallunterscheidungen in diesem Beitrag die Punkt-Richtungsdarstellung eingeführt (s. Gleichung 4). Die dadurch bedingte Überparametrisierung der Objektgeraden bringt für den Rückwärtsschnitt keine Nachteile. Die Verwendung der in Abschnitt 2.1.2 eingeführten Geradenbeschreibung würde diese Überparametrisierung beseitigen.

$$g : y = m \cdot x + n \quad \text{oder} \quad x = m^* \cdot y + n^* \quad \text{eq. 3}$$

$$G : \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad \text{eq. 4}$$

Das Prinzip dieses Ansatzes besteht darin, durch geeignete Umformung der Kollinearitätsgleichungen, Beobachtungsgleichungen für die Parameter der Bildgeraden aufzustellen, die nur von den Parametern der inneren und äußeren Orientierung und von den Parametern der Objektgeraden abhängig sind. Diese Gleichungen sind nachfolgend dargestellt.

$$m = \frac{V_2 W_1 - V_1 W_2}{U_2 W_1 - U_1 W_2}$$

$$n = y_h - x_h \frac{V_2 W_1 - V_1 W_2}{U_2 W_1 - U_1 W_2} + c \frac{U_1 V_2 - U_2 V_1}{U_2 W_1 - U_1 W_2} \quad \text{eq. 5}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= r_{11} d_x + r_{21} d_y + r_{31} d_z & U_2 &= r_{11} (X_p - X_0) + r_{21} (Y_p - Y_0) + r_{31} (Z_p - Z_0) \\ \text{mit } V_1 &= r_{12} d_x + r_{22} d_y + r_{32} d_z & V_2 &= r_{12} (X_p - X_0) + r_{22} (Y_p - Y_0) + r_{32} (Z_p - Z_0) \\ W_1 &= r_{13} d_x + r_{23} d_y + r_{33} d_z & W_2 &= r_{13} (X_p - X_0) + r_{23} (Y_p - Y_0) + r_{33} (Z_p - Z_0) \end{aligned}$$

Bezüglich der Bildgeraden ist jedoch eine Fallunterscheidung notwendig (s. Gleichung 3), um zu verhindern, dass der Anstieg m der Geraden unendlich wird (senkrechte Gerade). In diesem Fall sind die inversen Beziehungen aus Gleichung 6 als Beobachtungsgleichungen einzuführen.

$$m^* = \frac{1}{m} \quad \text{und} \quad n^* = -\frac{n}{m} \quad \text{eq. 6}$$

Zur Bestimmung der äußeren Orientierung sind mindestens 3 nichtparallele Geraden erforderlich. Dieses Modell enthält keine Korrekturterme für die Verzeichnung des Objektivs. Um die Verzeichnung trotzdem zu berücksichtigen, könnte diese zuvor z.B. durch eine plumb-line Kalibrierung (LERMA & CABRELLES, 2007) bestimmt werden. Die Messung der Bildgeraden würde dann im entzeichneten Bild stattfinden.

3 Analyse der Methoden

3.1 Interaktion in der CAD-Umgebung

Die beschriebenen punkt- und linienbasierten Verfahren zur Bildorientierung wurden in das Softwaresystem *PointCloud* der kubit GmbH implementiert. Der typische Ablauf der Bildorientierung in *PointCloud* ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

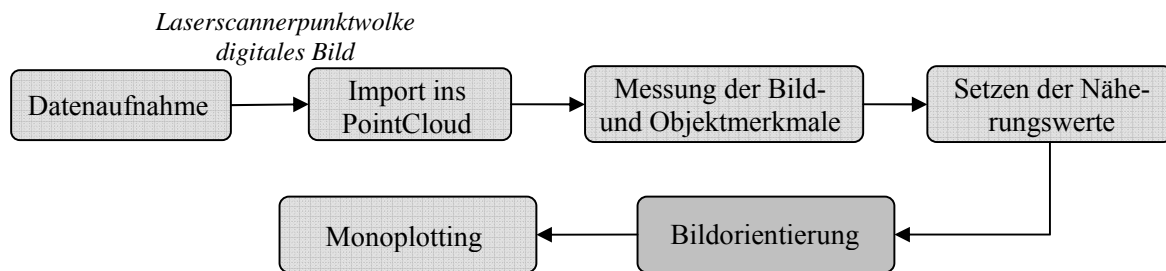


Abb. 3: Ablauf der Bildorientierung mit *PointCloud*

Nach dem Import der terrestrischen Laserscannerpunktwolke und des digitalen Bildes finden die, für die Bildorientierung notwendigen, Interaktionen des Benutzers in der CAD-Umgebung statt. Diese Interaktion beinhaltet das manuelle Messen der Punkt- oder Linienmerkmale im Bild und in der 3D Punktwolke sowie das Setzen der näherungsweise äußeren Orientierung des Bildes. Nach der Referenzierung der Daten wird das orientierte und entzeichnete Bild in *PointCloud* durch ein speziell dafür entwickeltes *AutoCAD-Tool* angezeigt, und der Benutzer hat die Möglichkeit der 3D Auswertung anhand des orientierten Bildes oder direkt in der Punktwolke.

3.2 Datensätze

Die vorgestellten Methoden zur Orientierung eines Bildes wurden an zwei verschiedenen Datensätzen getestet. Der erste Datensatz ist ein räumliches Testfeld mit einer Ausdehnung von ca. 2x3m bestehend aus insgesamt 27 Geraden (8 horizontal; 10 vertikal; 9 schräg, davon 3 raumdiagonal), die durch jeweils 4 uncodierte Punkte signalisiert wurden. Die Laserscanneraufnahmen beider Datensätze erfolgten mit dem Riegl LMS Z-420i. Für das Testfeld wurde zusätzlich ein Bildverband mit 23 konvergenten Bildern aufgenommen (3 verdrehte Aufnahmen aus der Mitte). Bei der Auswertung des Bildverbandes mit dem *AICON 3D Studio*, über codierte Passpunkte höherer Genauigkeit, wurden die Objektkoordinaten der uncodierten Geradenpunkte mitbestimmt. Die in der Bündelblockausgleichung ermittelten äußeren Orientierungen der Bilder dienen als Referenz für die später durchgeführten Einzelbildorientierungen in *PointCloud*.

Das Nymphenbad (ein Teil des Zwingers in Dresden) ist Gegenstand des zweiten Datensatzes. Die südöstliche Fassade wurde mit einer Auflösung von 0,04° gescannt, woraus sich ein Punkt- abstand je nach Aufnahmeentfernung von 1,4 mm bis 1,3 cm ergibt. Die gesamte Punktwolke umfasst etwa 3 Mio. Punkte. Die Bildaufnahme erfolgte für beide Datensätze mit einer digitalen Spiegelreflexkamera mit einer Auflösung von 3008x2000 Pixeln (6 MegaPixel) und einer Pixelgröße von etwa 7,8 µm. Für das Testfeld wurde ein 28mm und für das Nymphenbad ein 14mm Objektiv verwendet.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Datensatz „Testfeld“

Aufgrund von großen Streuungen der Laserscannerpunkte im Bereich der retroreflektierenden Marken war es nicht möglich, die Objektkoordinaten der signalisierten Geradenpunkte zuverlässig in der Punktwolke zu erfassen. Stattdessen wurden die im Zuge der Bündelblockausgleichung bestimmten Objektkoordinaten für die Auswertung dieses Datensatzes herangezogen. Für drei aus dem Bildverband ausgewählte Bilder wurden die äußeren Orientierungen ermittelt. Hierbei gingen die signalisierten Geradenpunkte zum einen direkt als Passpunkte in den photogrammetrischen Rückwärtsschnitt ein. Die Linienmerkmale wurden jeweils durch die beiden äußeren Geradenpunkte definiert. Die nachfolgende Tabelle zeigt die gemittelten Differenzen zwischen den Einzelbildorientierungen und der Bündelblockausgleichung für jeden geschätzten Parameter.

Tab. 1: Vergleich der Parameter der äußeren Orientierung aus Einzelbildorientierungen und der Bündelblockausgleichung

Vergleich	Mittel der Differenzen der Parameter					
	X ₀ [mm]	Y ₀ [mm]	Z ₀ [mm]	ω [°]	φ [°]	κ [°]
Bündel - RS mit Punkten	1,316	2,442	2,743	0,051	0,009	0,006
Bündel - RS mit Strecken (Modell 1)	4,539	3,290	4,018	0,072	0,084	0,004
Bündel - RS mit Strecken (Modell 2)	2,623	8,527	2,722	0,050	0,051	0,048

Tab. 2: Mittelwerte der Genauigkeiten der geschätzten Parameter

Verfahren	m ₀ [mm]	Mittel der mittlere Fehler der Parameter					
		m _{x0} [mm]	m _{y0} [mm]	m _{z0} [mm]	m _ω [°]	m _φ [°]	m _κ [°]
Bündelblockausgleichung	0,00039	0,0623	0,0962	0,0551	0,002	0,002	0,007
RS mit Punkten	0,00365	0,517	0,264	0,533	0,006	0,006	0,006
RS mit Strecken (Modell 1)	0,00740	2,884	1,038	1,603	0,026	0,030	0,031
RS mit Strecken (Modell 2)	0,01602	7,469	2,848	3,890	0,065	0,081	0,080

In Tabelle 2 sind die mittleren Gewichtseinheitsfehler (m₀) der Ausgleichungen sowie die mittleren Fehler der geschätzten Orientierungsparameter zusammengefasst (gemittelt für alle 3 Bilder). Anhand der erreichten Genauigkeiten lässt sich eine Abstufung der verschiedenen Verfahren zur Einzelbildorientierung erkennen. Wie zu erwarten war, wurden mit dem punktbasierten Rückwärtsschnitt die besten Ergebnisse erzielt (m₀ ≈ ½ Pixel). Dies zeigt sich auch in den mittleren Absolutabweichungen der Orientierungsparameter gegenüber dem Bündel (s. Tabelle 1). Der mittlere Gewichtseinheitsfehler der Punkt-zu-Gerade Methode (Modell 1) war um den Faktor zwei größer als bei der Orientierung mit Punkten (m₀ ≈ 1 Pixel). Der zweite Linienansatz (Modell 2) erreichte nochmals eine geringere Genauigkeit mit einem m₀ von etwa 2 Pixeln. Da die geschätzten Parameter variieren und korreliert sind, ist es schwierig aus ihren mittleren Abweichungen eine Aussage über die Güte / Richtigkeit der Abbildungsmodelle zu treffen. Deshalb

wurden mit Hilfe der für jedes Bild bestimmten Orientierungsparameter 32 Objektpunkte, die nicht in die Einzelbildorientierung eingegangen sind, in den jeweiligen Bildraum projiziert. Die resultierenden Bildpunktkoordinaten wurden mit der automatischen Bildpunktmessung des Bildverbandes im *Aicon 3D Studio* verglichen. Die Standardabweichungen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tab. 3: Standardabweichungen der Bildpunktkoordinaten

Vergleich	s_x [Pixel]	s_y [Pixel]	s_{xy} [Pixel]
Bündel -RS mit Punkten	0,9	0,8	0,9
Bündel - RS mit Strecken (Modell 1)	1,0	1,1	1,1
Bündel - RS mit Strecken (Modell 2)	1,9	1,9	1,9

In diesen Standardabweichungen spiegelt sich die gleiche Abstufung der Verfahren wieder. Die Standardabweichungen liegen für die linienbasierten Verfahren in der Größenordnung der mittleren Gewichtseinheitsfehler der Bildorientierung. Auffällig ist die Standardabweichung, die sich für das Modell aus der punktbasieren Referenzierung ergibt. Diese entspricht etwa der Genauigkeit der Punkt-Gerade Methode.

3.3.2 Datensatz „Nymphenbad“

Dieser Datensatz wurde ausgewählt, um die verschiedenen Methoden zur Bildorientierung unter realen Bedingungen zu testen. Die Orientierung des Einzelbildes erfolgte zum einen über 22 natürliche Punkte (z.B. markante Gebäudeecken, Fensterkreuze), die gleichmäßig über das Bild verteilt und in Bild und Laserscannerpunkt看ke gemessen wurden. Die linienbasierte Referenzierung beruht auf 16 nichtparallelen Geraden mit jeweils 2 zugehörigen Bildpunkten, so dass für beide Linienmethoden die gleichen Geraden verwendet werden konnten. Aufgrund der unbekannt inneren Orientierung der Kamera wurde diese einschließlich der radial-symmetrischen Verzeichnung (beschränkt auf A_1 und A_2) mitbestimmt.

Die Differenzen der geschätzten Parameter zwischen den Linienmethoden und der punktbasieren Orientierung sind in Tabelle 4 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Abweichungen für den größten Teil der Parameter bei der Punkt-zu-Gerade Methode geringer sind als beim zweiten Streckenmodell. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler lag für die Bildorientierung mit Punkten und für das erste Streckenmodell bei etwa 1 Pixel. Die mittleren Fehler der geschätzten Parameter waren jedoch für den punktbasieren Rückwärtsschnitt im Mittel um das Zweifache besser. Die dennoch geringeren Genauigkeiten des punktbasieren Rückwärtsschnittes bei diesem Datensatz resultieren aus der Messung diskreter Punkte in der Laserscannerpunkt看ke.

Tab. 4: Abweichungen der geschätzten Parameter der inneren und äußeren Orientierung (ohne geschätzte Verzeichnungsparameter)

Verfahren	X_0 [m]	Y_0 [m]	Z_0 [m]	ω [°]	φ [°]	κ [°]	c [mm]	x_h [mm]	y_h [mm]
Differenz Punkt-Strecke (Modell 1)	-0,024	0,045	-0,001	-0,084	0,197	0,017	-0,030	-0,072	-0,081
Differenz Punkt-Strecke (Modell 2)	0,046	0,081	0,004	0,067	0,706	-0,172	-0,223	-0,133	-0,057

Mit zunehmender Entfernung des Objektes zum Scanner (hier: 2 m - 18 m) verringert sich die Punktdichte und verschlechtert sich die Genauigkeit der gemessenen Objektpunkte. Die Genauigkeit des zweiten Linienmodells sowie die mittleren Fehler der Orientierungsparameter sind um eine Zehnerpotenz schlechter als bei der Verwendung von Passpunkten.

Im Weiteren wurde untersucht, welche Genauigkeiten beim Monoplotting in *PointCloud* mit den ermittelten Bildorientierungen möglich sind. Hierzu wurden 18 Einzelpunktmessungen im Bild durchgeführt, und die aus der Interpolation in der Laserscannerpunktswolke resultierenden 3D Objektkoordinaten wurden anschließend mit manuell in der Punktswolke gemessenen Koordinaten verglichen, da keine anderen Referenzdaten (z.B. Tachymeteraufnahmen) zur Verfügung standen.

Tab. 5: Standardabweichungen der Distanzen zwischen modellierten Objektpunkten und Referenzdaten

Verfahren	RS mit Punkten	RS mit Strecken (Modell 1)	RS mit Strecken (Modell 2)
Standardabweichungen der Punktabstände [m]	0,030	0,030	0,151

Tabelle 5 zeigt, dass mit dem punktbasieren Rückwärtsschnitt und dem ersten Streckenansatz für diesen Datensatz die gleichen Genauigkeiten beim Monoplotting erreichbar sind.



Abb. 4: Orientiertes Bild mit überlagelter Laserscannerpunktswolke (gelb) und modelliertem Fensterbereich (rot)

3.3.3 Fazit

Die Ergebnisse zeigten, dass der Punkt-zu-Gerade Ansatz der zweiten vorgestellten Streckenmethode überlegen ist. Neben den besseren Genauigkeiten hat die erste Linienmethode durch ihre Bildpunkt-zu-Objektgerade Korrespondenz einen wesentlichen praxisrelevanten Vorteil: Geraden müssen im Bild nicht als Geraden abgebildet sein. D.h. der Bildorientierung müssen keine Bestimmung der Verzeichnungskorrekturen und kein anschließendes Resampling vorausgehen, so dass die Bildmessung im Originalbild stattfinden kann. Werden die Abbildungsfehler des op-

tischen Systems nicht berücksichtigt, sind auf Bildgeraden beruhende Ansätze nur für eine näherungsweise Bildorientierung einsetzbar.

Dagegen zeigt der Linienansatz basierend auf Bildpunkten und Objektgeraden beim Monoplotting mit 3 cm ein Genauigkeitspotential, das dem der punktbasierten Referenzierung entspricht und für viele Anwendungen ausreichend ist.

4 Ausblick

Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der automatischen Linien- /Kantendetektion in Bild- sowie Laserscannerdaten. Dabei ist zunächst eine einseitige Automatisierung (entweder nur im Bild oder nur in der Punktwolke) angestrebt, die vom Nutzer durch Zuordnen und Definieren der korrespondierenden Kanten vervollständigt wird. Der nächste Schritt wäre die vollautomatische Bildorientierung anhand von Linien, welche durch geeignete Verfahren der Linienzuordnung in Bild und Punktwolke das interaktive Messen des Bearbeiters umgeht. Zur Detektion grober Fehler in der Punkt- bzw. Linienzuordnung ist ein Ausreißertest vorgesehen. Außerdem soll eine weitere Methode, welche den Koplanaritätsansatz nach TOMMASELLI & TOZZI (1996) verfolgt, implementiert und getestet werden.

5 Literaturverzeichnis

- HABIB, A., ASMAMAW, A., KELLEY, D. & MAY, M., 1999: Linear Features in Photogrammetry. Department of Civil and Environment Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University. Department Report No. 450.
- HEMKEN, H. & LUHMANN, T., 2002: Mehrbildorientierung mit geometrischen Elementen. Abschlussbericht Forschungsschwerpunkt Raum-Rohr-Boden, Teilprojekt 3, Wissenschaftlicher Bericht der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Nr. 2.
- HEUVEL, F. 2003: Automation in Architectural Photogrammetry. PhD thesis, Publication on Geodesy 54, NCG, Netherlands Geodetic Commission, Delft
- KUBIK, K., 1991: Relative and absolute orientation based on linear features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46 (1991), pp. 199-204.
- LERMA, J. L. & CABRELLES, M., 2007: A review and analyses of plumb-line calibration. *The Photogrammetric Record*, 22 (118) (June 2007), pp. 135-150.
- PATIAS, P., PETSAS, E. & STREILEIN, A., 1995: Digital Line Photogrammetry. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 252.
- ROBERTS, K. S., 1988: A New Representation for Lines. *IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, (1988), pp. 635-640.
- SCHENK, T., 2004: From point-based to feature-based aerial triangulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58 (2004), 315-329, 2004.
- SCHWERMANN, R., 1995: Geradengestützte Bildorientierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation, Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr 52.
- TOMMASELLI, A. M. G., & TOZZI, C. L., 1996: A recursive approach to space resection using straight lines. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 1, January 1996, pp. 57-66.