

Automatische Oberflächenrekonstruktion durch Mehrbildzuordnung auf der Basis eines verallgemeinerten 3D-Oberflächenmodells

(mit 12 Bildern)

Martin Schlüter, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main

ZUSAMMENFASSUNG: Um die Vorteile der digitalen, photogrammetrischen Mehrbildzuordnung auch in städtischen Bereichen zum Tragen zu bringen, ist der Einsatz einer allgemeinen 3D-Oberflächenbeschreibung vielversprechend: Diese erlaubt es, im Gegensatz zu den üblichen $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodellen, auch vertikale oder sogar überhängende Oberflächenbereiche als Rekonstruktionsergebnis zu gewinnen, sofern die entsprechenden Flächen in mindestens zwei der beteiligten Bilder sichtbar sind. Der Entwurf eines derartigen 3D-Modells wird hier vorgestellt, aufbauend auf einer explizit formulierten Oberflächentopologie, realisiert über eine unregelmäßige, räumliche Dreiecksvermaschung und komplettiert durch geeignete Interpolanten. Der neue Rekonstruktionsansatz selbst wird durch die explizit integrierte Selbstdetektion von Sichtbarkeit bzw. Verdeckung im Objektraum unterstützt. Abschließend werden exemplarische Ergebnisse der Mehrbildzuordnung auf der Basis von großmaßstäbigen Luftbildern bebauter Gebiete vorgestellt.

ABSTRACT: To benefit from the advantages of photogrammetric multi-image matching even in built-up areas, the use of a general 3-d surface model for automatic surface reconstruction is very promising: A 3-d model allows, unlike the most commonly used 2.5-d surface models, to reconstruct vertical or even overhanging parts of the surface in object space, just if they are visible in at least two of the participating images. The design of the 3-d surface model is introduced. It is established on the basis of an explicitly formulated surface topology which is spread by a spatial TIN (triangular irregular network) in three-dimensional space and completed by adequate interpolants. The new reconstruction approach itself is backed by an explicitly integrated self-detection of visibility and occlusion in object space, respectively. Finally, some exemplary results from multi-image matching on the basis of large-scale aerial imagery of built-up areas are given.

1 Einführung

Um das Problem der Oberflächenrekonstruktion durch photogrammetrische Mehrbildzuordnung auf allgemeine Weise zu formulieren, werden hier die Grundgedanken des sogenannten *Facetten-Stereosehens* nach (Wrobel 1987) aufgegriffen. Dem Prinzip des direkten Pixeltransfers folgend, wird die geometrische Beziehung zwischen jeder Bildpixelposition im Bildraum und der korrespondierenden Position im Objektraum wiederhergestellt. Jeder Pixelgrauwert im Bildraum wird als Beobachtung im Sinne einer Parameterschätzung nach Kleinsten Quadraten aufgefaßt, wobei die Koeffizienten der entsprechenden Verbesserungsgleichung im wesentlichen durch numerische Größen im Objektraum festgelegt werden, wie beispielsweise den Parametern der äußeren Orientierung. Die wichtigste Rolle beim Aufbau der Designmatrix spielen die Gradienten der Oberflächengrauwerte im Objektraum, (Weisensee 1992). Diese Herangehensweise an die Aufgabenstellung der photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion offeriert zunächst die Möglichkeit des nahtlosen Übergangs von der klassischen Zweibildauswertung (Stereoprinzip) zur

digitalen Mehrbildzuordnung. Aber auch weitergehende Verallgemeinerungen, wie die simultane Nutzung von Bilddaten unterschiedlicher Kamerasysteme, von digitalen Farb- oder Multi-spektラルbildern sowie von mehreren Bildserien unterschiedlicher Beleuchtungsverhältnisse wurden bereits mit Erfolg für praktische Auswertearbeiten genutzt, vgl. den Überblick in (*Schlüter* 1999).

Um möglichst unabhängig von Anforderungen an die bereitzustellenden Startwerte für die Oberflächengeometrie im Objektraum zu bleiben, greift man bei der Rekonstruktion in der Regel auf bewährte Mehrgittertechniken zurück: Einer von grob zu fein abgestuften Facettierung im Objektraum wird über die Bildpyramide ein entsprechendes Pendant im Bildraum gegenübergestellt. Zunächst wird eine sehr grobe Approximation der gesuchten Oberfläche mit sehr geringer Stützpunktdichte im Objektraum rekonstruiert, und zwar anhand von Bildern aus einer entsprechend hohen Bildpyramidenstufe. Anschließend wird die Stützpunktdichte im Objektraum sukzessive verfeinert, wobei parallel die entsprechend feiner aufgelösten Bildpyramidenstufen zum Zuge kommen. Diese allgemeine Charakteristik des Rekonstruktionsverfahrens, nämlich die schrittweise, hierarchische Verfeinerung der Oberflächengeometrie von Mehrgitter zu Mehrgitter, bei ständig zunehmender geometrischer Qualität des jeweils vorliegenden Rekonstruktions(zwischen)ergebnisses, ist der Schlüssel für die Formulierung des verallgemeinerten 3D-Rekonstruktionsansatzes.

In der Vergangenheit wurden üblicherweise $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodelle der Form $Z = f(X, Y)$ für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum eingesetzt*, meist auf der Basis von bilinearer oder bikubischer Interpolation zwischen regelmäßig angeordneten Höhenstützpunkten, vgl. (*Heipke* 1991), (*Weisensee* 1992), (*Tsay* 1996) und Bild 1(b). Diese Art der Modellierung ist im Prinzip völlig ausreichend, solange man sich auf die Verwendung von lediglich zwei Bildern für die Rekonstruktion beschränkt. Oft sind dann vertikale Teile der Objektoberfläche (vertikal im Bezug auf Bildfläche und Stereobasis) auch nur in einem Bild sichtbar und im anderen Bild verdeckt. Im Bereich des Computer Vision, vereinzelt auch in der digitalen Photogrammetrie, werden die inhaltlichen Beziehungen zwischen Verdeckung im Bildraum einerseits und Diskontinuitäten im Objektraum andererseits sogar direkt in den Rekonstruktionsansatz miteinbezogen, vgl. (*Belhumeur* 1993), (*Zheng* 1993), (*Schlüter* 1994), (*Geiger et al.* 1995), (*Luo und Burkhardt* 1995) und Bild 1(c).

Eine Reihe von Gründen spricht für die simultane Verwendung von mehr als zwei Bildern für die automatische Oberflächenrekonstruktion. Der wichtigste Grund ist wohl die generell wachsende Robustheit der automatischen Bildzuordnung, vgl. (*Schlüter und Wrobel* 1996). Dieser Trend wird beispielsweise auch für merkmalsbasierte Zuordnungsansätze beobachtet und diskutiert, vgl. (*Maas und Kersten* 1997). Hier sei das Augenmerk aber einmal darauf gerichtet, daß der konsequente und systematische Einsatz von deutlich mehr als zwei Bildern interessante Konsequenzen für die lokale Sichtbarkeit der Oberfläche im Objektraum mit sich bringt. Der Einfachheit halber sei direkt das Beispiel der Auswertung großmaßstäbiger Luftbilder von bebauten Gebieten diskutiert. Je stärker die Längs- und Querüberdeckungen der Bilder anwachsen, desto mehr vertikale Flächen sind in mindestens zwei Bildern sichtbar und damit auch nach dem Stereoprinzip rekonstruierbar. Erfolgt die Rekonstruktion aber nur auf der Basis eines $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodells im Objektraum, so verursachen vertikale oder überhängende Bereiche der Oberfläche Probleme für den automatischen Rekonstruktionsprozeß, da diese Flächen mit der gewählten Oberflächenrepräsentation prinzipiell nicht nachgeformt werden können – es liegt also ein Modellierungsdefizit vor. Die automatische Oberflächenrekonstruktion sollte aber nicht an einer unzulänglichen Modellierung scheitern. Vielmehr sollte der in allen beteiligten Bildern vor-

* Jede Oberflächenrepräsentation, die sich als Graph einer bivariaten Funktion beschreiben läßt, wird hier als $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenrepräsentation referenziert

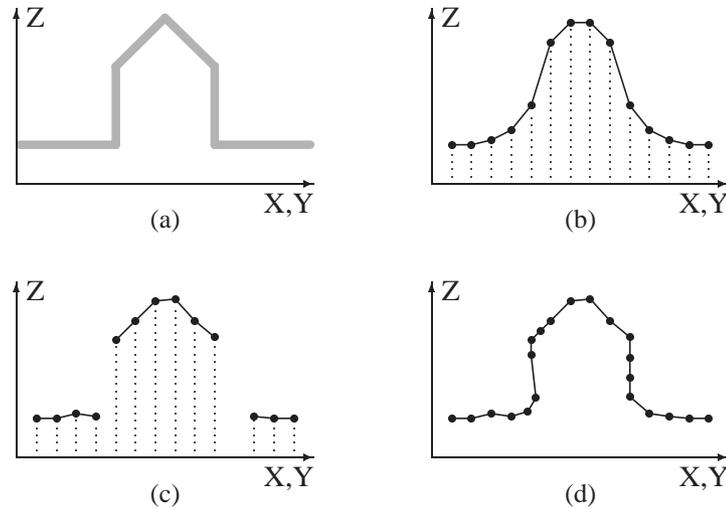


Bild 1 – Qualitätsstufen der Oberflächenrepräsentation nach (Schlüter 1997). (a): Oberfläche (Soll) im Objektraum, (b): Ergebnis einer $2\frac{1}{2}$ D-Rekonstruktion mit Glattheitshypothese, (c): Ergebnis einer $2\frac{1}{2}$ D-Rekonstruktion unter Einbeziehung von Unstetigkeiten, (d): Ergebnis einer Rekonstruktion mit einer 3D-Oberflächenrepräsentation.

liegende Informationsgehalt möglichst ausgeschöpft werden, und zwar durch den Einsatz eines entsprechend allgemein formulierten 3D-Oberflächenmodells, vgl. Bild 1(d). Damit dies gelingt, ist ferner über eine Verdeckungs- bzw. hier eher eine Sichtbarkeitsanalyse sicherzustellen, daß ein Bildgrauwert nur beim ersten Schnitt seines Abbildungsstrahles mit der Objektoberfläche zur Rekonstruktion beiträgt.

Im folgenden werden die Grundlage einer adäquaten 3D-Oberflächenmodellierung skizziert. Anschließend wird die Integration diese Modells in das Konzept der digitale Bildzuordnung im Objektraum vorgenommen. Grundsätzlich wird im hierarchisch strukturierten Rekonstruktionsablauf die Objektoberfläche Schritt für Schritt immer feiner ausdifferenziert, wobei sich die jeweilige lokale Verschiebung der Fläche stets am lokalen Flächennormalenvektor orientiert und nicht an einer global vorgegebenen Richtung. Abschließend werden einige Ergebnisbeispiele vorgestellt und diskutiert.

2 Aufbau des 3D-Oberflächenmodells

In diesem Abschnitt wird in die Grundlagen der neuen 3D-Flächenmodellierung eingeführt, Details sind in (Schlüter 1999) dargestellt. Die neue Modellierung setzt sich im wesentlichen aus einer expliziten topologischen Struktur zwischen den beliebig im \mathbb{R}^3 gelagerten Stützpunkten, vgl. Bild 2(a), und aus geeigneten Interpolanten, welche den Oberflächenverlauf im \mathbb{R}^3 unabhängig von der Lagerung des Bezugskoordinatensystems definieren, vgl. Bild 2(b), zusammen.

2.1 Explizite Stützpunkttopologie im \mathbb{R}^3

Die grundsätzliche Vorgehensweise zum Aufbau der expliziten Stützpunkttopologie im Objektraum besteht in der Verwendung von Dreiecken als Basiselemente, welche nach dem *Delaunay*-Kriterium zu einer Oberflächenvermaschung verknüpft werden.

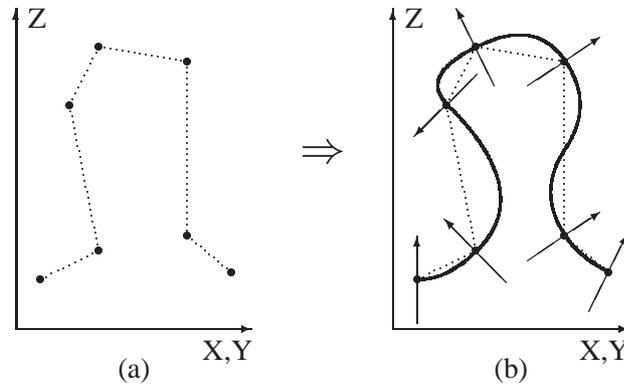


Bild 2 – Konzeptioneller Aufbau der dreidimensionalen Oberflächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion. (a): Explizite Topologiebildung zwischen im \mathbb{R}^3 gegebenen Stützpunkten (•). (b): Ergänzung der Stützpunkte durch Interpolanten mit ausgewählten Stetigkeitseigenschaften zu einer approximativen Startfläche. Die skizzierten Flächennormalenvektoren deuten Nebenbedingungen in den Stützpunkten für die Interpolation an.

Beschränkt man sich auf den Fall der Luftbildauswertung, so gestaltet sich die Vorgabe von Startwerten für die Oberflächengeometrie meist einfach, da für die oberste Mehrgitterebene in der Regel die $2\frac{1}{2}$ D-Annahme, also $Z = f(X, Y)$, gültig und ausreichend ist. Die Startfläche wird entweder als Horizontalebene in Abhängigkeit von der mittleren Flughöhe über Grund oder anhand der aus der Orientierungsphase vorliegenden Objektraumkoordinaten aufgespannt. Die Geometriestützpunkte werden regelmäßig auf dieser Startfläche angeordnet und mit einem der gebräuchlichen 2D-Algorithmen trianguliert – hier wird stets auf die *Delaunay*-Triangulation zurückgegriffen. Wie bereits angesprochen, ist die Punktdichte dieses Startgitters im Objektraum sehr gering. Die topologischen Verknüpfungen für alle folgenden Gitterebenen werden auf dem Weg der quaternären Unterteilung gewonnen, siehe Bild 3(b). Es ist wesentlich, daß eine globale Neutriangulation im Objektraum im Rahmen des gesamten Rekonstruktionsablaufes nie erforderlich wird! Auf diese Weise kann für die Oberfläche ein Wechsel von einem $2\frac{1}{2}$ D- zu einem 3D-Charakter ermöglicht werden. Im Gegensatz zur Triangulation von Stützpunkten in einer Bezugsebene ist die vollautomatische Ableitung einer Oberflächentriangulation von beliebig im \mathbb{R}^3 verstreuten Stützpunkten in vielen Fällen schwierig, vgl. zu diesem Themenkomplex die Überblicke in (Uray 1996), (Schlüter 1999). Nichtsdestotrotz ist es vorteilhaft, bei entsprechendem Handlungsbedarf während des Rekonstruktionsablaufes gewisse lokale topologische Operationen automatisch abrufen zu können, so das Einfügen oder die Elimination eines Stützpunktes. Die jeweils erforderlichen Änderungen der globalen Triangulation können sämtlich als lokale Transformationen mithilfe des *Delaunay*-Kriteriums unter Bezug auf die lokale Tangentialebene des betroffenen Stützpunktes realisiert werden, die Triangulation beschränkt sich also wieder auf den \mathbb{R}^2 bzw. wird im globalen Sinne für den \mathbb{R}^3 vermieden.

Auf den ersten Blick mag es sehr nahe liegen, moderne Konzepte wie die datenabhängige Triangulation (= *data dependent triangulation*), vgl. (De Floriani und Puppo 1995), aufzugreifen und in den photogrammetrischen Rekonstruktionsablauf zu integrieren, um beispielsweise Bruchkanten im Gelände oder Gebäudekanten so präzise wie möglich zu erfassen. Schließlich steht sowohl die Geometrie- als auch die Grauwertinformation für diese Aufgabe im Objektraum prinzipiell zur Verfügung. Massive Änderungen der lokalen Stützpunktdichte führen jedoch stets zu schlecht bzw. dünn und länglich geformten Dreiecken. Hier wurde daher bewußt stets eine möglichst gleichbleibende, hohe Punktdichte angestrebt. Zu diesem Zweck kann pro Mehrgitter eine

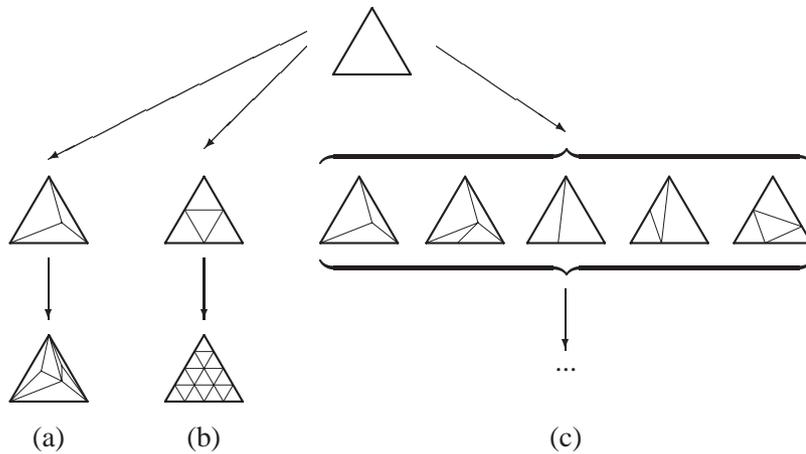


Bild 3 – Unterteilungsstrategien für hierarchische Triangulationen, nach (De Floriani und Puppo 1995). (a) Ternäre Unterteilung, (b) quaternäre Unterteilung, (c) mögliche heuristisch-hierarchische Unterteilungen.

vorab vorzunehmende *Laplace'sche Glättung*^{*}, vgl. (Cavendish et al. 1985), für die gesamte Oberflächenvermaschung durchgeführt werden. Eine datenabhängige Optimierung wäre also in einem Nachbearbeitungsschritt anzusiedeln.

2.2 Dreiecksinterpolanten für den \mathbb{R}^3

Die topologische Beschreibung der Objektoberfläche wird durch lokale Dreiecksinterpolanten ergänzt. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, daß man mit einer C^1 - anstatt einer lediglich C^0 -stetigen Oberflächenbeschreibung günstigere Konvergenzraten des iterativ ablaufenden Rekonstruktionsprozesses erhält, vgl. (Tsay 1996). Ein vergleichbarer Stetigkeitsgrad soll also auch für die 3D-Oberflächenmodellierung zur Verfügung stehen. Da für die 3D-Modellierung keine einfache globale Parameterisierung wie im Fall $Z = f(X, Y)$ vorliegt, sondern mit baryzentrischen Koordinaten in jedem einzelnen Geometriedreieck gearbeitet wird, ist im folgenden aus formalen Gründen mit G^1 - an Stelle von C^1 -Stetigkeit zu argumentieren, vgl. z.B. (Hoschek und Lasser 1992). Die grundlegende Idee zahlreicher lokaler Dreiecksinterpolanten besteht darin, daß zunächst ein Netzwerk von Randkurven zwischen den im \mathbb{R}^3 gegebenen Stützpunkten aufgespannt wird. Die eigentliche lokale Interpolation innerhalb einer Dreiecksmasche reduziert sich dann auf die Verarbeitung der entsprechenden lokalen Randbedingungen. Da hier neben der Interpolation selbst auch der Aufbau der Randbedingungen für jede Iteration des Rekonstruktionsverfahrens erneut vollzogen werden muß, liegen etwas andere Voraussetzungen als beim interaktiven Arbeiten mit Splineflächen vor. Aus diesem Grund werden hier nicht die populären *Bézier*-Dreiecksflächen gewählt, da bei diesen gerade die automatische Aufstellung des Leitpunktpolygonnetzes für die Interpolation im \mathbb{R}^3 numerisch problematisch sein kann, vgl. (Pfeifer und Pottmann 1996).

Statt dessen werden hier transfinite Interpolanten ausgewählt. Die Grundgedanken der transfiniten Interpolation werden am Beispiel des G^1 -stetigen Interpolanten nach der sog. *Kante-zu-Eckpunkt – Methode* (= *side-vertex-method*) von (Nielson 1987) kurz erläutert, siehe Bild 4. Zunächst wird für jeden Geometriestützpunkt ein Oberflächennormalenvektor festgelegt bzw.

^{*}Nicht zu verwechseln mit dem bekannten Bildverarbeitungsoperator

approximiert, vgl. Bild 4(a). Im einfachsten Fall wird dieser über das arithmetische Mittel der Normalenvektoren aller direkt benachbarten ebenen Dreiecksflächen ermittelt. Die Diskussion diverser Gewichtungsstrategien in Abhängigkeit von der Ausdehnung der jeweiligen Dreiecksfläche kann hier übergangen werden, da stets eine möglichst homogene Stützpunktdichte angestrebt wird, was auch homogene Dreiecksflächen nach sich zieht. Aufbauend auf den Stützpunktpositionen und den Normalenvektoren werden benachbarte Stützpunkte durch *Hermite*-Splines dritten Grades verbunden. Weiterhin werden auch schon die endgültigen Oberflächennormalenvektoren entlang dieser Kurven definiert. Sie interpolieren die Normalenvektoren in den Stützpunkten und stehen senkrecht auf der Randkurve. Anschließend werden auf ähnliche Weise drei Teilinterpolanten aufgespannt, indem jeweils ein Stützpunkt durch eine Schar *Hermite*-Splines dritten Grades mit den Punkten auf der gegenüberliegenden Randkurve verbunden wird. Bild 4(b) zeigt die Randkurven einer Geometriefacetten und exemplarische Kurven eines der drei Teilinterpolanten. Der endgültige G^1 -stetige Interpolant, vgl. Bild 4(c), resultiert aus einer Linearkombination der Teilinterpolanten, wobei eine auf den baryzentrischen Koordinaten des zugrundeliegenden Dreiecks aufbauende Gewichtungsfunktion verwendet wird. Die Gewichtungsfunktion stellt den gewünschten Stetigkeitsgrad sowohl innerhalb des Dreiecks als auch auf den Randkurven sicher, so daß die globale Oberfläche sich durch kontinuierlich ändernde Normalenvektoren auszeichnet – genau dies entspricht der Definition von G^1 -Stetigkeit.

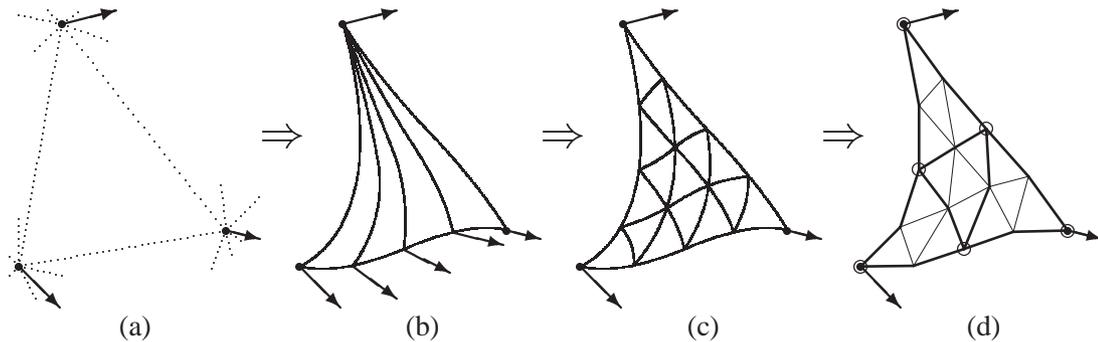


Bild 4 – G^1 -stetige transfinite Interpolation. (a): Approximation von Oberflächennormalenvektoren für die Geometriestützpunkte (\bullet) im \mathbb{R}^3 auf der Basis der topologischen Nachbarschaften. (b): Definition der Randkurven. Zusätzlich sind ausgewählte Kurven eines Teilinterpolanten dargestellt. (c): Ausgewählte Parameterlinien der resultierenden Interpolationsfläche. (d): Unterteilung des geometrischen Interpolanten in sechzehn ebene Teildreiecke sowie in vier Oberflächenrauwertfacetten (\circ = Stützpunkte der Oberflächenrauwerte).

Das Konzept der transfiniten Interpolation garantiert, daß der gesamte vorzunehmende Prozeß numerisch unempfindlich und stabil abläuft. Transfinite Interpolanten arbeiten strikt lokal und sind somit eine geeignete Ergänzung der zugrundeliegende Dreieckstopologie, gerade auch im Hinblick auf erforderliche Rechenzeiten. Eine Ausdehnung des vorgestellten Konzeptes auf G^2 -Stetigkeit ist grundsätzlich möglich, vgl. (Hagen und Pottmann 1989).

Die resultierenden G^1 -stetigen Dreiecksfacetten werden aus rechentechnischen Gründen in kleine, linear interpolierte Teildreiecke zerlegt. Diese Unterteilung beschleunigt nicht nur die Berechnung der Koeffizienten für die Verbesserungsgleichungen des Rekonstruktionsansatzes, sondern stellt auch für die Verdeckungsanalyse im Bildraum eine entscheidende Vereinfachung dar. Bild 4(d) zeigt ein Beispiel für diese Zerlegung. Weiterhin gibt Bild 4(d) eine zweite Unterteilung in vier Rauwertfacetten wieder. Da die Auflösung der Oberflächenrauwerte im Objektraum üblicherweise feiner als die der Geometrie im Objektraum gewählt wird, ist es empfehlenswert, die Triangulation der Oberflächenrauwerte im Objektraum direkt auf der geometrischen Ver-

maschung aufzubauen. Diese Vorgehensweise basiert wieder auf dem Grundgedanken der sog. hierarchischen Triangulationen. Für die Beispiele in Abschnitt 4 wird stets eine regelmäßige Unterteilung mit einem Verhältnis von sechzehn Grauwertdreiecken und gleichermaßen von sechzehn linearen Geometriesubdreiecken pro Geometriedreieck eingesetzt.

3 Bildinversion im Objektraum

Die photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion im Objektraum wird nun im Hinblick auf die 3D-Oberflächenrepräsentation verallgemeinert, vgl. Bild 5(a). Die geometrischen Unbekannten, deren Berechnung im Rahmen einer iterativ ablaufenden Parameterschätzung nach Kleinsten Quadraten erfolgt, werden nicht mehr mit Bezug auf eine global vorgegebene Richtung, wie z.B. $\Delta Z = \Delta Z(X, Y)$, sondern mit Bezug zur Ausrichtung der lokalen Flächennormalenvektoren N_i , vgl. Bild 5(b), angesetzt.

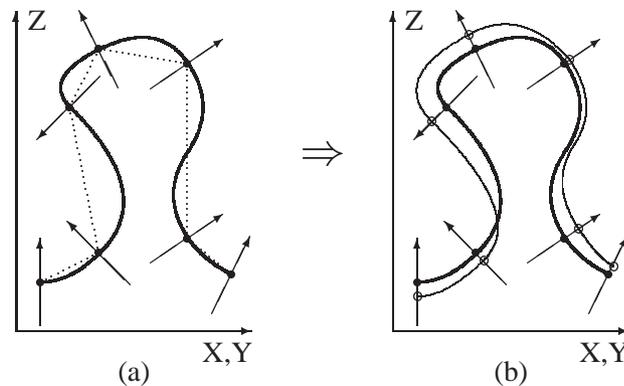


Bild 5 – 3D-Oberflächenrepräsentation für die Mehrbildzuordnung im Objektraum. (a): 3D-Oberflächenmodell, (b): Stützpunktpositionen (o) nach einem Iterationsschritt der photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion.

Die Korrespondenzbedingung zwischen den Bildpixelgrauwerten $G^i(x^i, y^i)$, $G^{ii}(x^{ii}, y^{ii})$, ... in verschiedenen, einander überlappenden Bildern und der Oberflächengrauwertfunktion $G(t_1, t_2)$ im Objektraum stellt den Ausgangspunkt für die Formulierung der Verbesserungsgleichung dar, vgl. (Weisensee 1992), mit den Residuen v_{G^i} , $v_{G^{ii}}$, ... der Pixelgrauwerte im Bildraum und den bildweise angesetzten radiometrischen Transferparametern h_0 und h_1 :

$$\begin{aligned}
 \left(G^i(x^i, y^i) + v_{G^i}(x^i, y^i) \right) \cdot h_1^i + h_0^i &= \\
 \left(G^{ii}(x^{ii}, y^{ii}) + v_{G^{ii}}(x^{ii}, y^{ii}) \right) \cdot h_1^{ii} + h_0^{ii} &= \\
 \dots = G(\tilde{t}_1, \tilde{t}_2) & \\
 = G(t_1, t_2) . &
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Die Beziehung zwischen den baryzentrischen Koordinaten \tilde{t}_1, \tilde{t}_2 mit Bezug auf ein Dreieck der Grauwertrepräsentation und t_1, t_2 mit Bezug zum Geometriedreieck, vgl. noch einmal Bild 4(d), kann einfach hergestellt werden, wenn die Unterteilung des Geometriedreiecks bereits auf der Basis der baryzentrischen Koordinaten t_1, t_2 vorgenommen wird. Die baryzentrischen Koordinaten t_1, t_2 bilden dann das Verbindungsglied zwischen der Grauwertfunktion im Objektraum

und der geometrischen Oberflächenbeschreibung, welche mit den oben eingeführten G^1 -stetigen transfiniten Interpolanten modelliert wird, hier notiert in der Form

$$\mathbf{X}(t_1, t_2) = \mathbf{f}_{G^1}[\mathbf{X}_i, \mathbf{N}_i](t_1, t_2) . \quad (2)$$

Der Inhalt der eckigen Klammern in (2) zeigt an, daß der geometrische Oberflächenverlauf ausschließlich von den drei Stützpunktpositionen \mathbf{X}_i des entsprechenden Geometriedreiecks und den Normalenvektoren \mathbf{N}_i in diesen Punkten festgelegt wird. Unter der Annahme, daß die innere und äußere Orientierung der Bilder bekannt sind, kann die Beziehung zwischen jeder Pixelposition und ihrem Abbildungsstrahl im Objektraum, bzw. ihrem zugehörigen Schnittpunkt $\mathbf{X}(t_1, t_2)$ mit der Oberfläche im Objektraum über das perspektive Kameramodell angegeben werden. Die *Taylor-Linearisierung* der Grauwertfunktion im Objektraum wird für die Umgebung des näherungsweise bekannten Schnittpunktes $\mathbf{X}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$ mit dem Strahl eines einzelnen Bildpixels vorgenommen*. Anschließend erfolgt der Übergang von den partiellen Ableitungen nach baryzentrischen Koordinaten $\partial G^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)/\partial t_1$ und $\partial G^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)/\partial t_2$ zu den Richtungsableitungen $dG^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)/ds_1$, $dG^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)/ds_2$ entlang der entsprechenden Raumkurven entlang der Oberfläche im Objektraum nach der Bogenlänge s_i . Die Geradengleichung des Abbildungsstrahls eines Pixels erlaubt den Übergang von kleinen, tangential zur Oberfläche ausgerichteten Wegstücken auf ein senkrecht zur Oberfläche ausgerichtetes Wegstück. Zu diesem Zweck werden hier noch die Tangenteneinheitsvektoren $\mathbf{T}_1^\circ(t_1, t_2)$ und $\mathbf{T}_2^\circ(t_1, t_2)$ entlang der Parameterlinien auf der Oberfläche eingeführt, vgl. Bild 6.

Unabhängig vom Stetigkeitsgrad der Oberflächengrauwertfunktion reicht für die Formulierung der differentiellen Grauwertparameter $dG(t_1, t_2)$ im Objektraum ein linearer, also ein G^0 -stetiger Interpolationsansatz aus. Die Parameter $dG(t_1, t_2)$ der Oberflächengrauwerte im Objektraum sind abhängig von den Grauwertänderungen dG_i in den Grauwertstützpunkten des jeweiligen Grauwertdreiecks:

$$\begin{aligned} dG(t_1, t_2) &= t_1 \cdot dG_1 + t_2 \cdot dG_2 + (1 - t_1 - t_2) \cdot dG_3 \\ &= \mathbf{f}_{G^0}[dG_i](t_1, t_2) . \end{aligned} \quad (3)$$

Für die geometrischen Parameterzuschläge wird ähnlich verfahren. Prinzipiell unabhängig vom Stetigkeitsgrad der Oberflächenmodellierung wird der neue, verfeinerte Oberflächenverlauf anhand von

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t_1^\circ, t_2^\circ) &= \mathbf{X}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ) + \mathbf{f}_{G^0}[dn_i](t_1^\circ, t_2^\circ) \cdot \bar{\mathbf{N}}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ) \\ &\approx \mathbf{f}_{G^1}[\mathbf{X}_i^\circ + dn_i \cdot \mathbf{N}_i^\circ, \mathbf{N}_i^\circ](t_1, t_2) , \end{aligned} \quad (4)$$

mit

$$\bar{\mathbf{N}}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ) = \mathbf{f}_{G^0}[\mathbf{N}_i^\circ](t_1^\circ, t_2^\circ) . \quad (5)$$

gefunden. Formel (5) zeigt auf, daß innerhalb eines einzelnen Geometriedreiecks nicht der geometrische Normalenvektor $\mathbf{N}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$, sondern ein linear interpolierter Pseudonormalenvektor $\bar{\mathbf{N}}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$ benutzt wird. Bild 7 zeigt, daß zunächst weder durch die Verwendung der $\mathbf{N}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$ noch der $\bar{\mathbf{N}}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$ eine mathematisch strenge Beziehung zwischen Φ° und dem neuen Oberflächenverlauf $\Phi^\circ + d\Phi$, wie er sich aus den Verschiebungen in den Stützpunkten ergibt, hergestellt wird. Aber wenn man alle möglichen Fälle des Oberflächenverlaufs innerhalb einer Dreiecksfacette in Betracht zieht, so erkennt man, daß die Verwendung der Pseudonormalenvektoren die wesentlich günstigere Approximation liefert. Dies wiederum läßt auch günstigere Konvergenzraten für den gesamten Rekonstruktionsprozeß erwarten. Darüber hinaus benötigt die Berechnung der $\bar{\mathbf{N}}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$ natürlich auch erheblich weniger Rechenzeit als die strenge Berechnung der

*Der kreisförmige Index weist hier stets auf Startwerte vor einem Iterationsschritt der Parameterschätzung nach Kleinsten Quadraten hin.

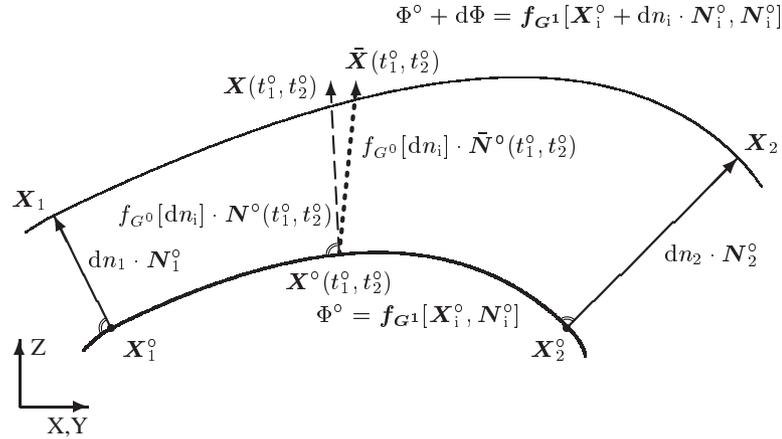


Bild 7 – Definition der Oberflächenverschiebung während eines Iterationsschrittes über die lokalen Oberflächennormalen $\mathbf{N}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$ oder die linear interpolierten Pseudonormalen $\bar{\mathbf{N}}^\circ(t_1^\circ, t_2^\circ)$.

les und den Richtungsableitungen der Oberflächengrauwerte im Objektraum abhängen. Letztere, also $dG^\circ(\tilde{t}_1^\circ, \tilde{t}_2^\circ)/ds_i$, sollten über eine numerische Approximation der Ableitung berechnet werden. Nach Bild 4(d) kann die Ableitung der Grauwerte durch den Übergang von der Bogenlänge auf ein kurzes, geradliniges Streckenelement vereinfacht werden. Zusätzliche Verbesserungsgleichung zur Regularisierung sind ergänzend zu formulieren. Hiervon sind nur die geometrischen Parameter betroffen, vgl. (Wrobel et al. 1992) für die Gleichungen bezüglich der $2\frac{1}{2}$ D- und (Schlüter 1999) bezüglich der 3D-Oberflächenmodellierung.

Zu Beginn des Aufsatzes wurde bereits angedeutet, daß der Rekonstruktionsablauf als Mehrgitterverfahren in Verbindung mit der Nutzung von Bildpyramiden im Objektraum gestaltet wird. Für jede Mehrgitterebene wird das komplette Auswertgebiet durch einander überlappende Quader unterteilt. Die resultierenden Auswertefenster, welche in der Regel einige hundert Geometriedreiecke enthalten, werden separat ausgeglichen. Dieser Gesamtprozeß ist in eine Achterbaumstruktur eingebettet, welche auch für die Sichtbarkeitsanalyse von Vorteil ist, insbesondere um die an jedem Auswertefenster potentiell beteiligten Luftbilder zu ermitteln. Die endgültige, pixelweise Sichtbarkeits- bzw. Verdeckungsanalyse wird über die perspektiven Bild-Objekt Abstände (=distance buffer) erlangt, wobei stets der aktuelle Stand der rekonstruierten Oberfläche zugrundegelegt wird.

Die für jedes Auswertefenster resultierenden Normalgleichungen werden direkt in einem Speicherschema für dünnbesetzte Matrizen abgelegt (MRS = modified compressed row storage format), vgl. (Saad 1996), da kein streng regelmäßiges Besetzungsschema mehr vorliegt. Iterative Gleichungslöser können sehr effizient direkt auf einem solchen Schema arbeiten, hier wird SSOR (= symmetric successive overrelaxation) in Verbindung mit Konjugierten Gradienten verwendet. Da der überwiegende Teil des Lösungsvektors normalerweise durch Parameterzuschläge mit hochfrequenten Charakteristika geprägt ist, denn die Anteile an der Lösung mit niederfrequenten Charakteristika werden in der Regel bereits auf den vorherigen Mehrgitterebenen bestimmt, ist die Anzahl an benötigten Iterationen bis zur Lösung des linearen Systems mit einem an die jeweilige Mehrgitterebene angepaßten Genauigkeitsgrad äußerst gering. Insgesamt gesehen erhält man hier eine gewaltige Rechenzeiterparnis im Vergleich zur direkten Lösung der Normalgleichungen, so daß diese Variante der iterativen Gleichungslösung inzwischen auch für die $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodellierung mit Erfolg eingesetzt wird.

4 Ergebnisse mit großmaßstäbigen Luftbildern

Der neue Ansatz für die Oberflächenrekonstruktion wird mit fünf Luftbildern der Szene *Walddorfhäslach* erprobt. Die Aufnahmekonfiguration und einige Rahmendaten finden sich in Bild 8. Frühere Veröffentlichungen mit diesem Datenmaterial haben ganz allgemein die Vorzüge der Mehrbildzuordnung im Visier und beschränken sich auf den Einsatz der klassischen $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodelle, vgl. (*Schlüter und Wrobel 1996*) und (*Schlüter und Wrobel 1998*). Es werden für weite Objektraumbereiche Standardabweichungen der Höhen von unter einem Dezimeter erreicht und bestätigt. Der in Bild 8 durch das Orthobild angezeigte Objektraumausschnitt wird hier nun auch mit der vorgestellten 3D-Oberflächenmodellierung rekonstruiert. Vergleiche der je nach Ansatz errechneten Höhen zeigen, daß sich die Beträge der Höhendifferenzen überwiegend in den nach den jeweiligen Standardabweichungen zu erwartenden Bereichen bewegen. Diese Übereinstimmung gilt für zahlreiche lokale Oberflächentypen, für offenes Gelände mit geringer Textur ebenso wie für steile Böschungen. Auch potentielle Störungen wie fahrende Autos, Telegraphenmasten, etc. haben selten Einfluß auf das Rekonstruktionsergebnis, die typischen Stärken der Mehrbild- gegenüber der Zweibildzuordnung bleiben erhalten. Da sich auch die Berechnungszeiten nur unerheblich ($\approx 10\%$) unterscheiden, spricht nichts gegen den globalen Einsatz der 3D-Oberflächenmodellierung.

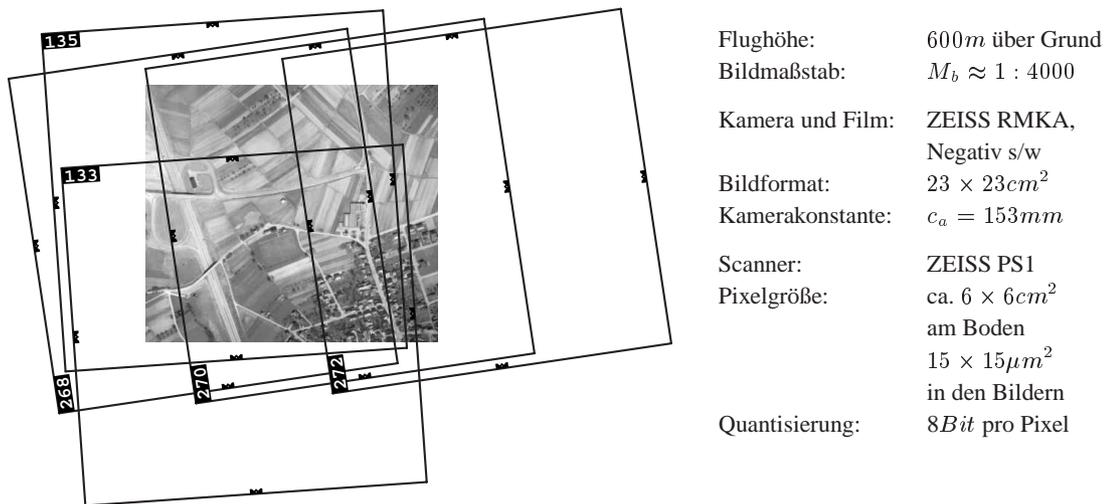
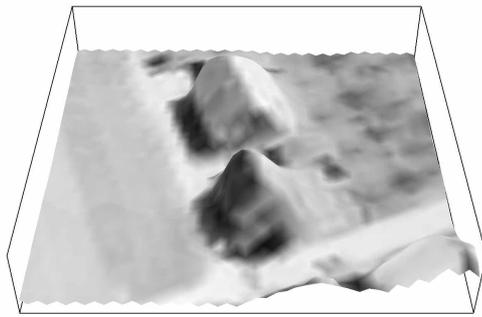


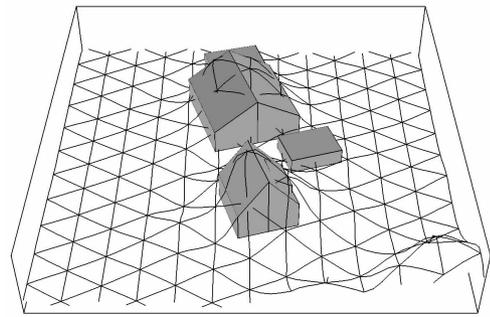
Bild 8 – Überblick der Szene *Walddorfhäslach* (Baden-Württemberg). Die Bildüberdeckung wird im Bezug auf das rekonstruierte Orthobild dargestellt.

Die 3D-Oberflächenmodellierung kann natürlich nur dort zu einer Qualitätssteigerung des geometrischen Ergebnisses beitragen, wo ein entsprechender Modellierungsbedarf besteht und auch die entsprechenden Bildinformationen vorliegen. Die im folgenden gezeigten Ergebnisausschnitte konzentrieren sich daher auf den Bereich der Ortschaft *Walddorfhäslach-Gniebel*. Im hierarchischen Rekonstruktionsablauf treten erste Ergebnisunterschiede je nach Modellierung ab der vierten Mehrgitterebene bzw. der vierten Bildpyramidenstufe auf. Ein Eindruck von dem entsprechenden Zwischenergebnis gibt Bild 9. Hier wird einerseits die resultierende Oberfläche samt Oberflächengrauwerten im Objektraum dargestellt (links), andererseits nur die Randkurven der Geometriefacetten (rechts). Zum Vergleich werden hier manuell-interaktiv gemessene Gebäudeumrisse ergänzend eingeblendet (in grau). Offensichtlich wäre für das Zwischenergebnis prinzipiell noch eine $2\frac{1}{2}$ D-Modellierung ausreichend. Die dargestellten Geometriefacetten haben eine Kantenlänge von jeweils ca. 4m. Weiterhin kann man in Bild 9(a-d.2) ablesen, daß



(a.1)

Blick von Westen

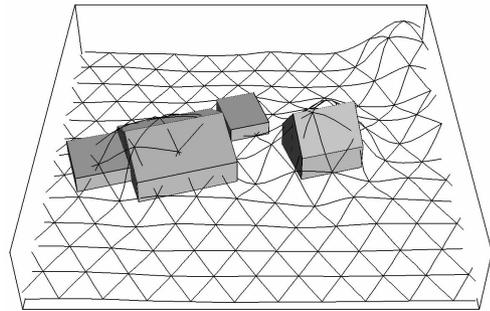


(a.2)

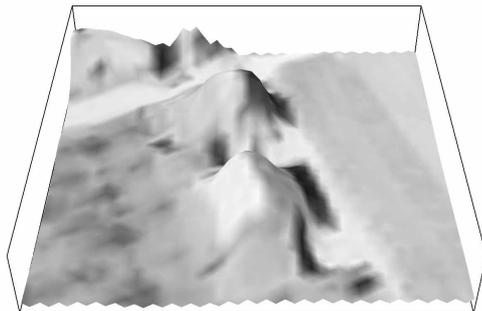


(b.1)

Blick von Norden

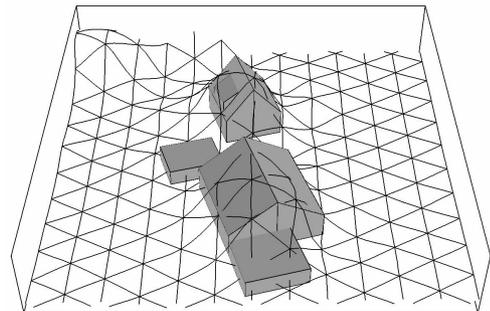


(b.2)

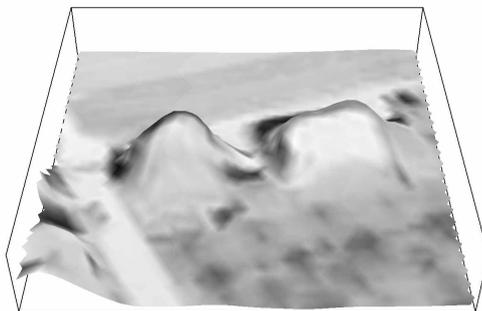


(c.1)

Blick von Osten

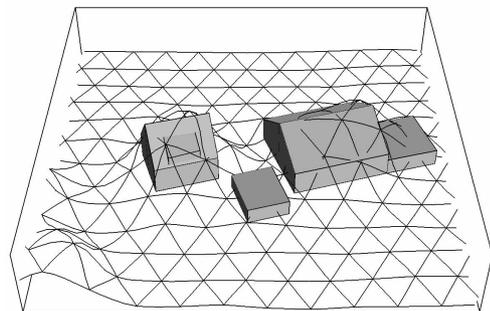


(c.2)



(d.1)

Blick von Süden



(d.2)

Bild 9 – Zwischenergebnisse (4. Mehrgitterebene), Beispiel 1. (a-d.1): Rekonstruierte Oberfläche und Oberflächenrauwerte im Objektraum. (a-d.2): Resultierende Dreiecksmaschen im Vergleich zu interaktiv gemessenen Gebäudeumrissen (in grau).

die geometrische Oberflächenbeschreibung nicht aus ebenen Dreiecken besteht, sondern einen, wie oben beschrieben, G^1 -stetigen Charakter besitzt. Durch regelmäßige quaternäre Unterteilung jedes Geometriedreiecks in sechzehn Grauwertsdreiecke erhält man die Stützpunkte der in Bild 9(a-d.1) dargestellten Oberflächengrauwerte. Die Fläche eines Grauwertsdreiecks entspricht damit ca. 2×2 Pixeln im Bildraum, dieses Verhältnis gilt auf jeder Mehrgitterebene. Bei einer derart hohen Auflösung wurde eine G^0 -stetige Interpolation für die Oberflächengrauwerte als ausreichend erachtet.

Bild 10 zeigt das endgültige Resultat der automatischen Oberflächenrekonstruktion des Szenenausschnittes von Bild 9. Zusätzlich zeigen die Bild 11 und 12 zwei weitere Ausschnitte, wiederum von verschiedenen virtuellen Standpunkten aus betrachtet. Die Positionen der Ausschnitte sind in Bild 8 markiert. In der Ergebnisauflösung haben die Geometriedreiecke eine Kantenlänge von ca. $0.5m$ im Objektraum, das Verhältnis von ca. vier Pixeln pro beteiligten Bild zu einer Grauwertfacette im Objektraum gilt weiterhin.

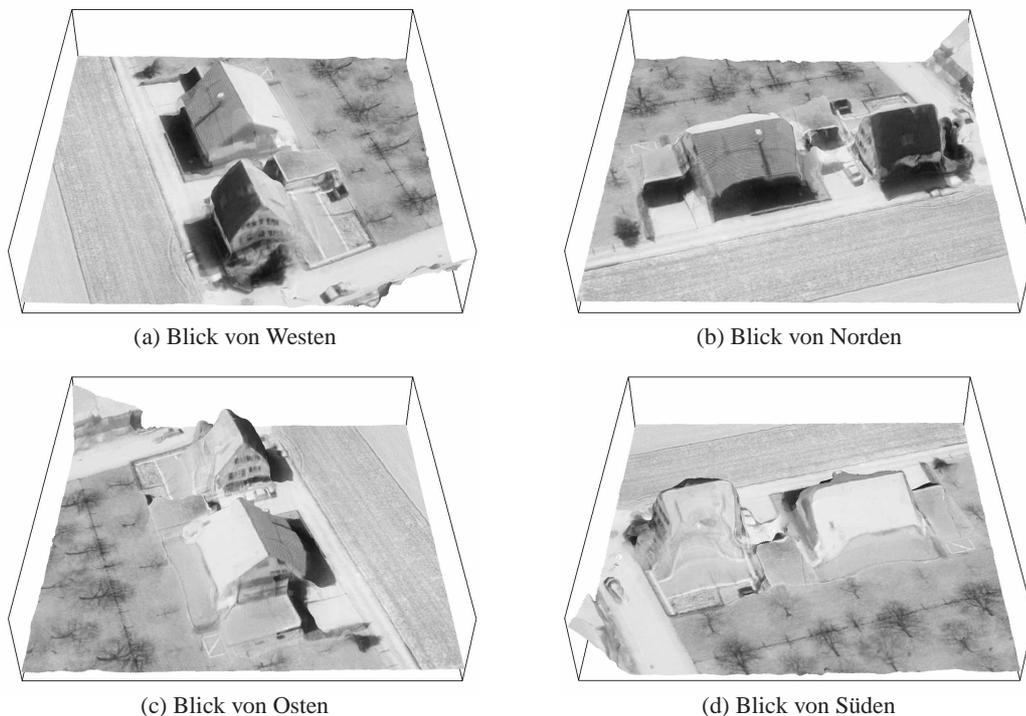


Bild 10 – Ergebnis der 3D-Oberflächenrekonstruktion (1. Mehrgitterebene), Beispiel 1.

Man muß sich zur Bewertung der Ergebnisse vergegenwärtigen, daß bei der vorliegenden Aufnahmeanordnung lediglich die west- und nördlichen Gebäudeseiten in mindestens zwei Luftbildern sichtbar sind, vgl. Bild 8. Die süd- und östlichen Gebäudewände sind dagegen sichtbar abgewandt oder nur in einem Bild sichtbar, was natürlich für eine Bildzuordnung bzw. eine geometrische Rekonstruktion nicht ausreicht. Das vorliegende Bildmaterial ist also nicht optimal, denn nur eine neunfache Bildüberdeckung, wie sie aus einem Bildflug mit Längs- und Querüberdeckung von je 70 % resultiert, ist in der Lage, eine weitgehende Sichtbarkeit aller Gebäudeseitenwände in mindestens zwei oder drei Bildern sicherzustellen. Trotzdem erweist sich das vorliegende Bildmaterial als recht instruktiv, denn fehlende Sichtbarkeit durch Verdeckung im Objektraum wird man selten vollkommen vermeiden können – daher ist das Verhalten des neuen Algorithmus' natürlich auch in diesen Fällen von Interesse.

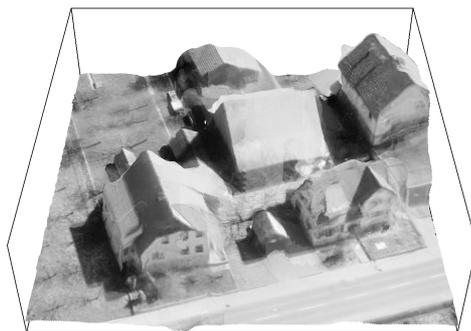


(a) Blick von Westen



(b) Blick von Norden

Bild 11 – Ergebnis der 3D-Oberflächenrekonstruktion (1. Mehrgitterebene), Beispiel 2.



(a) Blick von Westen



(b) Blick von Norden

Bild 12 – Ergebnis der 3D-Oberflächenrekonstruktion (1. Mehrgitterebene), Beispiel 3.

Konsequenterweise variiert die jeweils erzielte geometrische Qualität der rekonstruierten Objekt-oberfläche, wie Bild 10 - 12 deutlich erkennen lassen und wie es ferner auch die zugehörigen Standardabweichungen anzeigen: In den Gebieten mit unsichtbaren Gebäudewänden werden lediglich Ergebnisse erzielt, die denen bei Verwendung eines $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodells entsprechen – ein stark geglätteter Oberflächenverlauf mit relativ hohen geometrischen Standardabweichungen. Aber für die Gebäudeseitenwände, wo zwei oder mehr beteiligte Bilder ihre Grauwertinformationen für die vertikalen Bereiche zur Verfügung stellen, wird ein signifikant verbessertes geometrisches Ergebnis erzielt. Der eingesetzte Regularisierungsansatz (nicht-adaptive Krümmungsminimierung mit global konstanter Gewichtung) führt hier zu einer etwas übersteigerten Glattheit der rekonstruierten Oberfläche, wobei die eingesetzte Methode grundsätzlich das Potential für eine schärfere Herausbildung der geometrischen Kanten besitzt, vgl. (Wrobel *et al.* 1992). Trotz dieser Vereinfachung zeigen die berechneten Ergebnisse deutlich, daß für die nörd- und östlichen Gebäudeseiten über weite Bereiche ein streng vertikaler und vereinzelt sogar leicht überhängender Oberflächenverlauf erzielt wird, vgl. (Schlüter 1999). Die Einführung des verallgemeinerten 3D-Oberflächenmodells erweist sich damit als erfolgreich.

5 Fazit

Das Konzept der digitalen Mehrbildzuordnung im Objektraum gilt zu Recht als einer der allgemeinsten Ansätze für die automatische photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion. Die Möglichkeit zur simultanen Mehrbilddauswertung wird hier genutzt, um eine möglichst naturgetreue Oberflächenbeschreibung auch für vertikale bzw. überhängende Flächenbereiche zu erreichen. Als Anwendungsbeispiel wird die erfolgreiche Rekonstruktion bebauter Gebiete aus großmaßstäbigen Luftbildern demonstriert.

Insbesondere die Gebäudedetektion und -rekonstruktion sollte von der gesteigerten geometrischen Ergebnisqualität in bebauten Gebieten profitieren. Auch für Nahbereichsanwendungen erscheint der neue Ansatz vielversprechend, insbesondere wenn durch flexible Aufnahmebedingungen das Potential der Mehrbild- an Stelle der reinen Zweibildzuordnung ausgeschöpft wird. Die resultierenden Dreiecksstrukturen können beispielsweise in VRML (= virtual reality modeling language) ausgegeben werden, damit wird an aktuelle Standards für die 3D-Visualisierung angeknüpft.

6 Literatur

Bellhumeur, P. N.: A binocular stereo algorithm for reconstructing sloping, creased, and broken surfaces in the presence of half-occlusion. In Proc. Fourth International Conference on Computer Vision, 431–438. IEEE Computer Society Press, Berlin, 1993.

Cavendish, J. C.; D. A. Field und W. H. Frey: An approach to automatic three-dimensional finite element mesh generation. IJNME, 21: 329–347, 1985.

De Floriani, L. und E. Puppo: Hierarchical triangulation for multiresolution surface description. ACM Transactions on Graphics, 14(4): 363–411, 1995.

Geiger, D.; B. Ladendorf und A. Yuille: Occlusions and binocular stereo. IJCV, 14: 211–226, 1995.

Hagen, H. und H. Pottmann: Curvature continuous triangular interpolants. In *T. Lyche und L. L. Schumaker* (Hg.), *Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design*, 373–384. Academic Press, San Diego, 1989.

Heipke, C.: Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie. Dissertation, TU München, DGK C 366, München, 1991.

Hoschek, J. und D. Lasser: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Teubner, Stuttgart, 2. Aufl., 1992.

Luo, A. und H. Burkhardt: An intensity-based cooperative bidirectional stereo matching with simultaneous detection of discontinuities and occlusions. IJCV, 15: 171–188, 1995.

Maas, H.-G. und T. Kersten: Aerotriangulation and DEM/orthophoto generation from high-resolution still-video imagery. PE&RS, 63(9): 1079–1084, 1997.

Nielson, G. M.: A transfinite, visually continuous, triangular interpolant. In *G. E. Farin* (Hg.), *Geometric Modelling: Algorithms and New Trends*, 235–246. SIAM, Philadelphia, 1987.

Pfeifer, N. und H. Pottmann: Surface models on the basis of a triangular mesh – surface reconstruction. In ISPRS 18th Congress, Bd. IAPRS 31(B3) Comm. III, 638–643. Wien, 1996.

Saad, Y.: Iterative Methods for Sparse Linear Systems. PWS publishing, New York, 1996.

Schlüter, M.: Object space based surface reconstruction with discontinuities – an approach. In ISPRS Comm. III Symposium 'Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision', Bd. IAPRS 30(3/2), 737–744. München, 1994.

Schlüter, M.: 3D-Modelle für die photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion. In 16. Wissenschaftlich–Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) 1996, Oldenburg, Bd. 5 von *Publikationen der DGPF*, 271–278. 1997.

Schlüter, M.: Von der $2\frac{1}{2}$ D-zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum. Dissertation, TU Darmstadt, DGK C 506, München, 1999.

Schlüter, M. und B. P. Wrobel: High resolution surface reconstruction of a landscape from large scale aerial imagery by Facets Stereo Vision – an extended test. In ISPRS 18th Congress, Bd. IAPRS 31(B3) Comm. III, 758–763. Wien, 1996.

Schlüter, M. und B. P. Wrobel: Das Dezimeter-DGM durch photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion mit dem Facetten-Stereosehen. AVN, 105(8/9), 1998.

Tsay, J.-R.: Wavelets für das Facetten-Stereosehen. Dissertation, TH Darmstadt, DGK C 454, München, 1996.

Uray, P.: From 3D Point Clouds to Surfaces and Volumes. Dissertation, TU Graz, 1996.

Weisensee, M.: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. Dissertation, TH Darmstadt, DGK C 374, München, 1992.

Wrobel, B. P.: Digital image matching by facets using object space models. In Fourth International Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering 'Advances in Image Processing', Bd. 804 von *SPIE*, 325–333. Den Haag, Niederlande, 1987.

Wrobel, B. P.; B. Kaiser und J. Hausladen: Adaptive regularization of surface reconstruction by image inversion. In *W. Förstner und S. Ruwiedel* (Hg.), *Robust Computer Vision*, 351–371. Wichmann, Karlsruhe, 1992.

Zheng, Y. J.: Inverse und schlecht gestellte Probleme bei der digitalen photogrammetrischen Objekt-Rekonstruktion. Dissertation, Universität Stuttgart, DGK C 390, München, 1993.

Die vorgestellten Forschungsarbeiten wurden am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der TU Darmstadt durchgeführt. *Prof. B. Wrobel* bin ich für seine Unterstützung, sein Vertrauen und seine genaue und konstruktive Kritik sehr dankbar. Auch den ehemaligen Kollegen am Institut, insbesondere *Dr. R. Düppe, M. Friehl, Dr. M. Kempa, M. Schmolla, M. Schreyer, Dr. J.-R. Tsay* und *Dr. M. Weisensee* danke ich herzlich für wichtige Diskussionen und wertvolle Zusammenarbeit. Das komplette digitale Bildmaterial wurde freundlicherweise von *Dr. Kiefer* und Herrn *Weiser*, Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, zur Verfügung gestellt.