

Photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion durch Mehrbildzuordnung mit dem Facetten-Stereosehen*

(mit 10 Bildern)

*Martin Schlüter, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main;
Bernhard Wrobel, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, TU Darmstadt*

ZUSAMMENFASSUNG: Das Facetten-Stereosehen ist ein modernes photogrammetrisches Verfahren zur automatischen Oberflächenrekonstruktion aus digitalen Bilddaten. Die Modellbildung im Objektraum samt der damit verbundenen Möglichkeit zur simultanen Integration einer Vielzahl von Bildern wird konsequent genutzt, um hohe Stützpunktdichten am Boden bei großer Robustheit und Genauigkeit zu erzielen. Anhand von praktischen Beispielen wird die automatische Rekonstruktion qualitativ hochwertiger, digitaler Oberflächenmodelle aus großmaßstäbigen Luftbildern erläutert. Diese Rohdaten erlauben die Erstellung hochpräziser DGMe bei minimalen interaktiven Vor- bzw. Nacharbeiten.

ABSTRACT: Facets stereo vision is an up-to-date photogrammetric method for automatic surface reconstruction from digital images. The formulation of the mathematical model directly in object space permits the integration of an arbitrary number of images as well as high point densities on the ground. High levels concerning robustness and accuracy are achieved. Exemplary results are used to explain the automatic reconstruction of high-grade digital surface models from large-scale aerial imagery. This data allows to establish precise DTMs with a minimal amount of interactive preliminary and subsequent work.

Der steigende regionale wie auch globale Bedarf an aktuellen, flächenhaften Geodaten weist bereits seit einigen Jahren auf einen ungebrochenen Wachstumsmarkt hin. Die stark zunehmende Akzeptanz der digitalen Photogrammetrie, die Ankündigungen von mehreren hochauflösenden, zivil-kommerziellen Fernerkundungssensoren, die aktuellen Entwicklungsarbeiten an digitalen, flugzeuggestützten Dreizeilenkameras, sowie natürlich auch der Durchbruch in der flugzeuggetragenen Laserscannertechnik sind Indikatoren für Trends hin zu immer kürzeren Auswerteprozessen und -zyklen sowie auch für ein steigendes Interesse an immer besserer Qualität der Ergebnisrepräsentation. Es finden gegenwärtig in der Praxis sehr interessante Entwicklungen, Erprobungen und Diskussionen statt, vgl. z.B. (Konecny 1998), welche der genannten und heftig miteinander konkurrierenden Sensoren und Verfahren den besten und kostengünstigsten Zugang zu aktuellen Geodaten der Erdoberfläche erbringen werden. Angesichts dieser noch offenen Situation erscheint es angebracht, ein besonders strenges, sehr zuverlässiges Verfahren (unter vielen anderen) der Photogrammetrie im folgenden praktisch vorzustellen und seine Eigenschaften aufzuzeigen: das Facetten-Stereosehen.

Mit dem Facetten-Stereosehen wird seit 1985 am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der TU Darmstadt ein Verfahren zur dreidimensionalen Oberflächenrekonstruktion (DGM und Orthobild) entwickelt und erprobt. Der mathematische Ansatz dieses Verfahrens zeichnet sich nicht nur dadurch aus, daß neben der Einbeziehung von mehr als zwei Bildern auch die Verwendung multisensoraler, multispektraler und multitemporaler Bilddaten problemlos möglich

*Erweiterte Fassung des in: AVN 8-9/1998, S. 295–303, erschienen Aufsatzes: *Das Dezimeter-DGM durch photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion mit dem Facetten-Stereosehen.*

ist. Vielmehr wird durch die damit erhöhte Redundanz gerade die Robustheit und Genauigkeit der automatischen Oberflächenrekonstruktion erheblich gestärkt, was konsequenterweise einen oft deutlich verringerten Nachbearbeitungsbedarf der erzielten Ergebnisse bedeutet. Die Stärke des Facetten-Stereosehens liegt also nicht allein in dem Potential, verschiedenartige Informationsquellen in einen geschlossenen Auswerteprozess bündeln zu können, sondern darin, den Informationsgehalt der vorliegenden Daten auch wirklich auszuschöpfen.

In diesem Aufsatz soll der Schwerpunkt der Betrachtung auf der Diskussion erzielter Ergebnisse liegen. Nach einer kurzen Einführung in die Methodik werden daher Beispiele für die automatische Auswertung großmaßstäbiger Luftbilder vorgestellt. Über weite Gebiete werden Genauigkeiten von deutlich unter einem Dezimeter erreicht, wobei sowohl die mit dem Facetten-Stereosehen bestimmten Standardabweichungen als auch punktuell durchgeführte Vergleichsmessungen ein stimmiges Gesamtbild ergeben. Die Ergebnisqualität spiegelt damit über weite Strecken die lokale Definitionsgenauigkeit der Erdoberfläche selbst wider. Vor diesem Hintergrund wird mit dem gesicherten Dezimeter-DGM nach unserer Einschätzung eine sinnvolle Grenze für die anzustrebende Genauigkeit von Geodaten eingehalten.

Neben den Standardabweichungen der Höhen stellt das Facetten-Stereosehen weitere aussagekräftige Indikatoren für die auf automatischem Weg erzielte Ergebnisqualität bereit, welche den Zeitbedarf für eine eventuelle manuell-interaktive Nachbearbeitung deutlich verkürzen können. In diesem Zusammenhang wird das Augenmerk exemplarisch auf die Aussagekraft von Residuenbildern gerichtet.

Ein wesentliches Charakteristikum des Facetten-Stereosehens liegt darin, die Problemlösung direkt im dreidimensionalen Objektraum zu formulieren - ein Grundgedanke, der sich in der Photogrammetrie inzwischen immer weiterer Verbreitung erfreut (*Wiman* 1998). Dies ermöglicht zum einen auf einfache Weise eine kombinierte Auswertung von Bild- und Altimeterdaten - durch die wachsende Praxisreife der Laserscanner gewinnt dieser Aspekt zur Zeit an Interesse. Zum anderen ermöglicht das objektraumzentrierte Vorgehen den einfachen Übergang auf moderne und neuartige Oberflächenmodelle. Auch hier geben wir einen kurzen Einblick in aktuelle Entwicklungen am Beispiel der innerörtlichen Gebäuderekonstruktion.

1 Einführung in das Facetten-Stereosehen

Das Facetten-Stereosehen formuliert die automatische digitale Bildzuordnung durch Rückprojektion der Grauwerte von orientierten Digitalbildern entlang ihrer Abbildungsstrahlen in den Objektraum und bestimmt simultan alle Parameter der gewünschten Objektraummodelle in Form einer vermittelnden Ausgleichung nach kleinsten Quadraten, vgl. (*Wrobel* 1987), (*Weissen-see* 1992). Auf der Basis von regelmäßigen Stützpunktrastern im Objektraum werden sowohl die geometrische Oberfläche als auch die Oberflächengrau- bzw. Oberflächenfarbwerte über Interpolationsflächen aufgespannt, vgl. Bild 1. Mit dem Facetten-Stereosehen wird also grundsätzlich eine flächenhafte Beschreibung rekonstruiert (im Unterschied zu punktweisen Verfahren wie beispielsweise den merkmalsbasierten Rekonstruktionsverfahren). Dabei entsprechen die rekonstruierten Oberflächengrauwerte dem digitalen Orthobild. Die Stützpunktwerte in den Rasterpositionen bilden die wichtigsten Gruppen an unbekanntem Parametern, während die Bildpixelgrauwerte als Beobachtungen behandelt werden, denen im Zuge der Ausgleichung je ein Residuum (im Bildraum) zugeordnet wird. Die Beziehung zwischen Bild- und Objektraum wird bei üblichen Luftbildern über das perspektive Kameramodell hergestellt. Dabei gehen die Daten der inneren und äußeren Orientierung streng ein.

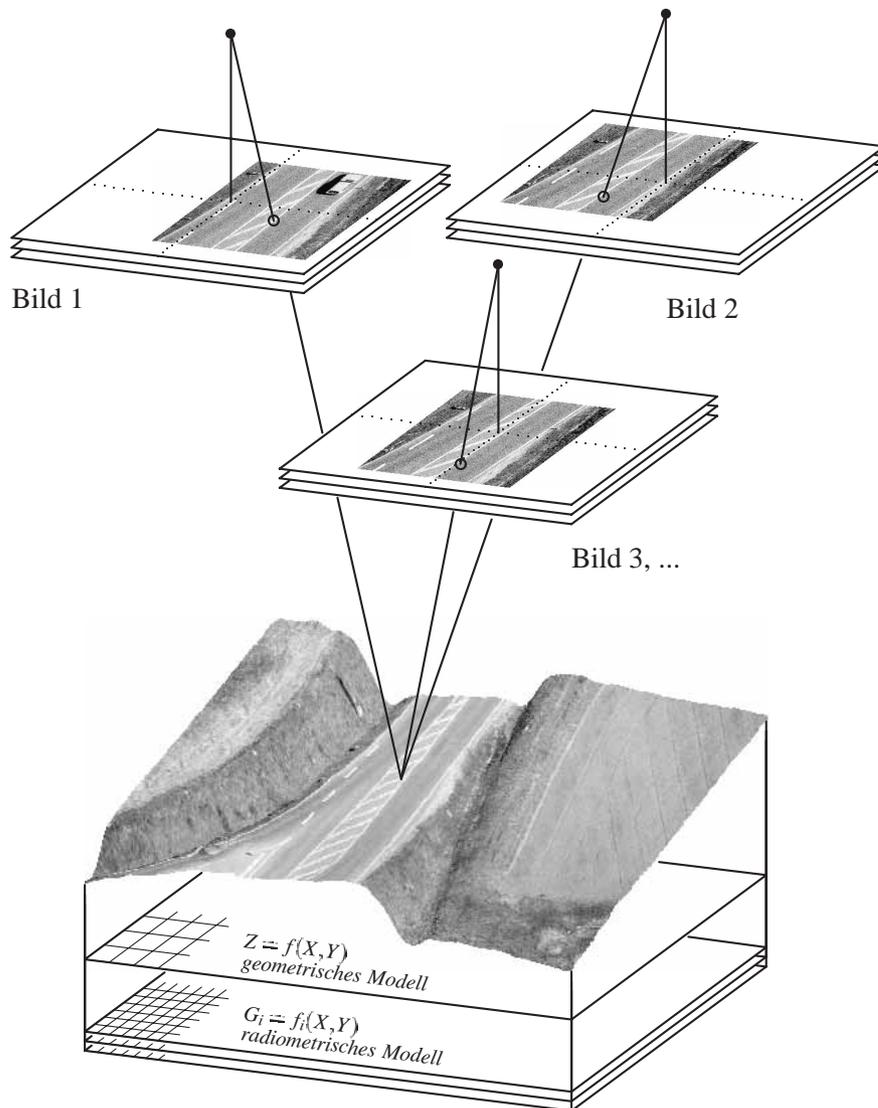


Bild 1 – Prinziplskizze zur photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion im Objektraum.

Pro Verbesserungsgleichung wird also jeweils ein Bildpixelgrauwert mit den unbekannt Parametern der im Objektraum unmittelbar beteiligten Rastermaschen verknüpft. Die Position im Objektraum ergibt sich dabei aus dem Projektionsstrahl des jeweiligen Bildpixels, geschnitten mit der approximativ vorliegenden Startfläche. Dabei stellen die Gradienten der Oberflächengrauwerte einen entscheidenden Bestandteil der Koeffizienten der Geometrieunbekannten dar. Sie können direkt im Objektraum abgelesen werden. Die erforderliche Linearisierung der Beziehung Bild – Objekt bedingt eine iterative Vorgehensweise.

Durch diese Strukturierung können beliebig viele Bilder in einen simultanen Auswerteprozess einbezogen werden. Es ist lediglich dafür Sorge zu tragen, jeden Pixelgrauwert anhand 'seiner' Bildkoordinaten, Kalibrierungs- und Orientierungsdaten in den Objektraum zu projizieren. Offensichtlich können so auch Bilder unterschiedlicher Kamerasysteme kombiniert werden, wir

sprechen dann von multisensoraler Rekonstruktion. Die Integration von Farb- oder Multispektralbildern mit mehreren Kanälen erfolgt, indem pro Farbkanal auch im Objektraum eine entsprechende radiometrische Oberflächenbeschreibung angesetzt wird, vgl. wieder Bild 1. Auch die simultane Auswertung multitemporaler antarktischer Luftbilddaten - die stark unterschiedlichen Aufnahmezeiten bedingten stark variierte Schattenverläufe - konnte über diesen Weg erfolgreich durchgeführt werden, (*Wrobel und Schlüter 1997*), (*Schlüter 1999*).

Die im folgenden dargestellten Beispiele belegen, daß die Startwertproblematik mithilfe eines auf Bildpyramiden aufbauenden Konzepts vollkommen ansatzimmanent gelöst werden kann. Sukzessive wird dabei der iterative Rekonstruktionsprozeß dahingehend erweitert, daß zunächst eine sehr grob aufgelöste Oberflächenbeschreibung rekonstruiert wird, deren Stützpunktdichte dann im weiteren Verlauf bis zur angestrebten Ergebnisauflösung immer wieder vervierfacht wird. Für das in Bild 2 skizzierte Berechnungsgebiet war die Vorgabe einer Horizontalebene, der mittleren Flughöhe entsprechend, vollkommen ausreichend.

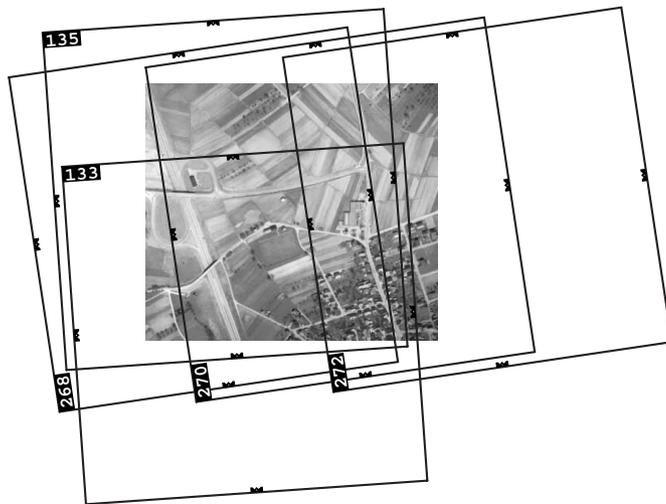
Wege zur drastischen Reduzierung der bislang nicht unerheblichen Rechenzeiten haben uns in der Vergangenheit immer wieder beschäftigt. Als erfolgreich haben sich u.a. die Verwendung der sog. indirekten Methode, vgl. (*Weisensee 1992*), die Strukturierung als Mehrgitterverfahren, die Einführung von Wavelets zur Repräsentation der Oberflächengrauwerte, vgl. (*Tsay 1996*), und der Einsatz iterativer Gleichungslöser (SSOR mit CG-Beschleunigung) im Zusammenhang mit neuen 3D-Oberflächenmodellen, vgl. (*Schlüter 1999*), erwiesen.

2 Oberflächenrekonstruktion mit großmaßstäbigen Luftbildern

In Bild 2 ist die Aufnahmekonfiguration des Testgebiets 'Walddorfhäslach' skizziert, wie sie den unten diskutierten Ergebnisbeispielen zugrundeliegt. Als Geobezug ist das rekonstruierte Orthobild dargestellt. Ferner werden dort die wichtigsten Kamera- und Flugdaten angegeben. Die Luftbilddaten entstammen einer üblichen Kreuzbefliegung des Landesamtes für Flurneueordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg. Wie man sieht, ist jeder Objektpunkt in drei bis fünf Bildern erfaßt. Bedingt durch den Aufnahmezeitpunkt ist die winterkahle Vegetation noch nahezu laubfrei. Die Szenerie ist recht vielseitig, sie enthält u.a. von landwirtschaftlichem Ackerbau geprägte, flache bis mittelmäßig stark bewegte Gebiete, steile Böschungen, verschiedene Arten sowohl immergrüner als auch laubfreier Vegetation, zwei Straßenbrücken, freistehende Gebäude und einen Teil einer ländlichen Ortslage.

Das gesamte in Bild 2 dargestellte Auswerteggebiet wurde in einem geschlossenen Berechnungszyklus rekonstruiert. Bis auf Bild 9 handelt es sich bei den unten dargestellten Beispielen also stets um Ausschnitte aus diesem Gesamtergebnis ohne jegliche Nachbearbeitung.

Ausgehend von einer Horizontalebene im Objektraum als Startfläche wurden neun Bildpyramidenstufen durchlaufen. Bei dem tendenziell flachen Geländeverlauf hätten auch weniger Pyramidenstufen ausgereicht. Da der Rechenzeitaufwand mit jeder gröber aufgelösten Pyramidenstufe um etwa den Faktor vier abnimmt, lohnt der Gedanke an mögliche Einsparungen hier nicht. Die Maschenweite der Geometriefacetten variiert von 128m auf der obersten Pyramidenstufe bis zu 0.5m im Endergebnis. Pro Geometriefacette wurden jeweils vier mal vier Grauwertfacetten angesetzt. Damit trägt jedes Bild mit ca. 4 Pixeln zur Rekonstruktion einer Grauwertfacette bei, sofern es den jeweiligen Objektraumausschnitt abbildet (daher variiert die Anzahl der an den dargestellten Rekonstruktionsbeispielen beteiligten Bilder fließend von drei bis fünf). Sowohl für die geometrische als auch die radiometrische Oberflächenbeschreibung wurde hier die Bilinearinterpolation gewählt. Als zusätzliche Bedingungen für die Oberflächengeometrie wurden Regularisierungsgleichungen via gewichteter Krümmungsminimierung nach



Aufnahmedatum:	11.4.1988
Flughöhe:	600m über Grund
Bildmaßstab:	$M_b \approx 1 : 4000$
Kamera und Film:	ZEISS RMKA, Negativ s/w
Bildformat:	$23 \times 23 \text{cm}^2$
Kamerakonstante:	$c_a = 153 \text{mm}$
Scanner:	ZEISS PS1
Pixelgröße:	ca. $6 \times 6 \text{cm}^2$ am Boden $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ in den Bildern
Quantisierung:	8Bit pro Pixel

Bild 2 – Aufnahmekonfiguration Walddorfhäslach.

(Wrobel *et al.* 1992) eingesetzt. Insgesamt wird mit dem Auswertebereich eine Fläche von ca. $800 \times 720 \text{m}^2$ abgedeckt. Es wurden also ca. 2.3 Mio. Geometriestützpunkte und 36 Mio. Grauwertstützpunkte ausgeglichen.

Sicher ist eine derart hohe Auflösung samt dem damit verbundenen Aufwand an Rechenzeit und Speicherplatz nicht immer erforderlich. Dennoch zeigt der Blick auf das stark vergrößert dargestellte Beispiel in Bild 3, daß durch die hohe Auflösung auch kleinräumige Geländestrukturen morphologisch richtig rekonstruiert werden. Dies betrifft insbesondere den Verlauf der Böschungskanten und die geometrisch einwandfreie Herausbildung der Gräben, siehe auch in den Bildern 5 und 8 die flachen Grenzfurchen zwischen benachbarten Feldern.

Für den eingerahmten Orthobildbereich in Bild 3 ist dort einer der beteiligten Luftbildausschnitte samt seines Residuenbildes dargestellt. Man erkennt deutlich, daß die im Bildausschnitt weiß abgebildeten Härchen, welche aus Verunreinigungen beim Scannen des Negativs stammen, im Orthobild kaum auszumachen sind. Bei der Objektrekonstruktion mit mindestens drei Bildern haben sich die Residuenbilder als gute Indikatoren für potentielle Störungen bei der Bildzuordnung erwiesen, s.u. Hier belegen sie zunächst nur, daß Störungen in nur einem der Bilder nahezu vollständig durch sein Residuenbild aufgefangen werden und damit das Zuordnungsergebnis nicht spürbar verfälschen. Eine solche Fehlerbereinigung läßt sich mit zwei Bildern allein nicht erzielen, da dann immer unklar bleibt, in welchem Bild die Störung anzusiedeln ist und in welchem das unverfälschte Grauwertsignal. Ab der simultanen Verwendung von vier Luftbildern haben auch ausgedehntere Störungen in einzelnen Bildern, wie beispielsweise durch fahrende Autos, keine nennenswerten Auswirkungen mehr, vgl. (Schlüter und Wrobel 1996). Das Facetten-Stereosehen besitzt also von sich aus bei hinreichender Zahl an Bildern in guter Anordnung (z.B. 60% Überdeckung längs und quer zum Flugstreifen, Bild 2) sehr gute fehler-tolerante Eigenschaften, ohne einen robusten Schätzer einzusetzen.

Da die Residuenbilder nur auf potentielle Störungen hinweisen können, aber längst nicht immer auch wirklich Nachbearbeitungsbedarf besteht, sei auf einen zweiten wichtigen Indikator der Ergebnisqualität hingewiesen: Dies sind die Standardabweichungen σ_{Z_i} des DGM, welche streng nach dem Konzept der vermittelnden Ausgleichung aus den ursprünglichen Grau-

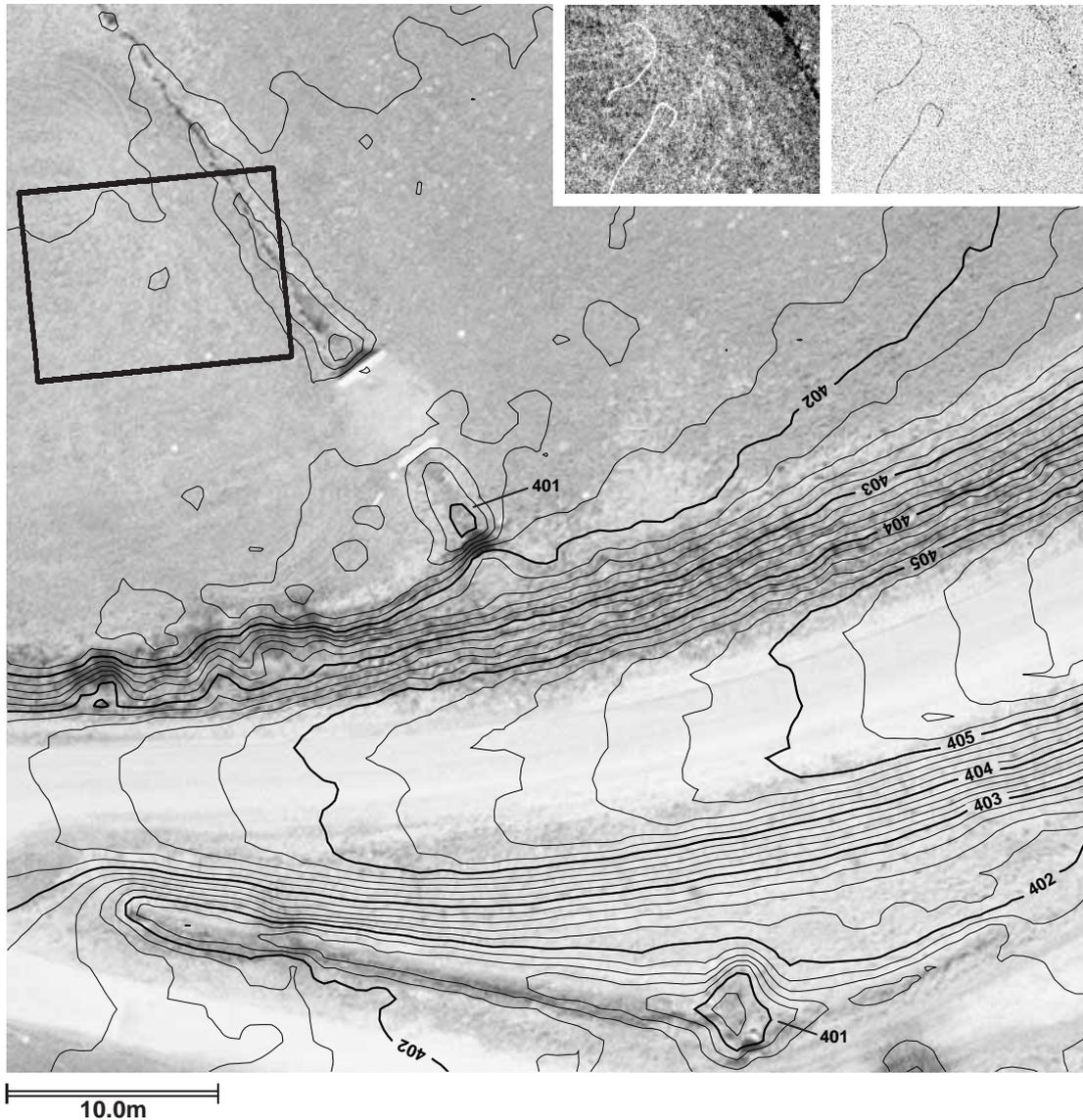


Bild 3 – Oberflächenrekonstruktion mit 3 Bildern: Orthobild und Höhenlinien (Äquidistanz 0.20m) des Beispiels 'Wiese'. Oben, Mitte: Luftbildausschnitt mit Störungen durch Härchen. Oben, Rechts: Residuenbild zum nebenstehenden Luftbildausschnitt.

wertmeßwerten berechnet werden, ein Potential, über das viele der existierenden DGM-Bestimmungsverfahren nicht verfügen. Eine geeignete Einfärbung der Standardabweichungen in die drei Ampelfarben vermittelt dem Operateur einen raschen Überblick über die Notwendigkeit manuell-interaktiver Korrekturen, vgl. Bild 4 und die später diskutierten Bilder 6 und 8. Typischerweise werden an Stellen guter Grauwertextur optimale Höhengenaugkeiten erzielt. So fallen die Höhengenaugkeiten auf dem texturarmen Fahrweg in Bild 4 erwartungsgemäß etwas ab, allerdings ohne daß hier echter Korrekturbedarf entsteht.

Das Beispiel in Bild 5 erlaubt die Diskussion einiger Phänomene, welche als typische Problemfälle der Zweibildzuordnung bekannt sind. So ist der Umgang mit ausgedehnten texturarmen Bereichen vielfach problematisch. Im Hinblick auf die hier vorhandene Pixelgröße am Boden

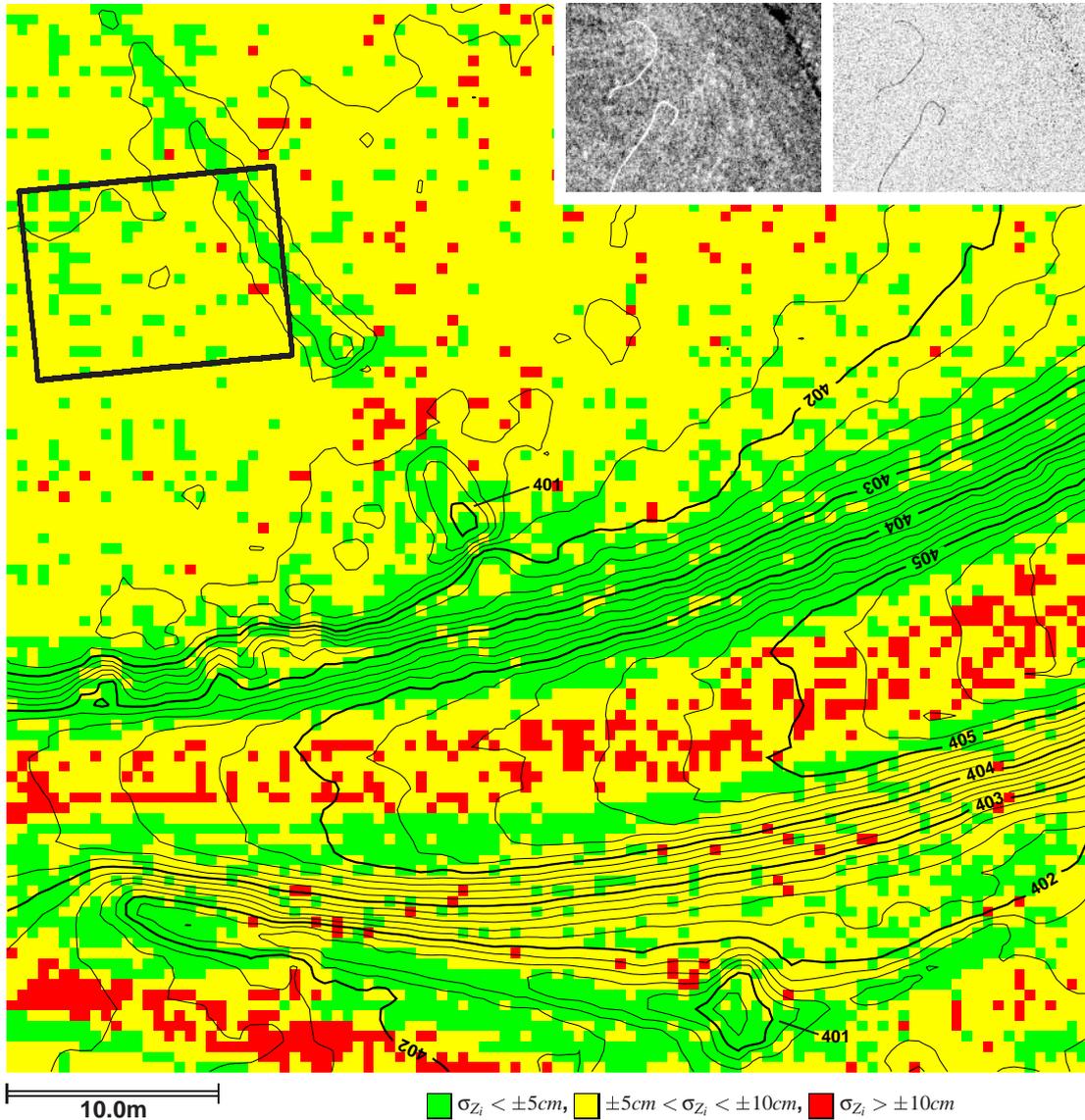


Bild 4 – Oberflächenrekonstruktion mit 3 Bildern: Standardabweichungen σ_{Z_i} und Höhenlinien (Äquidistanz $0.20m$) des Beispiels 'Wiese'. Oben, Mitte: Luftbildausschnitt mit Störungen durch Härchen. Oben, Rechts: Residuenbild zum nebenstehenden Luftbildausschnitt.

von $6 \times 6m^2$, enthält das Fußballfeld zwischen den weißen Markierungslinien einige äußerst ausgedehnte texturarme Bereiche. Dennoch wird der komplette Sportplatz mit einer Toleranz von ca. einem Dezimeter als geneigte Ebene rekonstruiert, ein plausibles und überzeugendes Ergebnis, welches auch für die benutzte Regularisierungsstrategie spricht, zumal sich gleichzeitig die angrenzenden Böschungen geometrisch scharf abgegrenzt präsentieren. Die erzielte Ergebnisqualität spiegelt sich in den berechneten Standardabweichungen der Höhen gut wider, vgl. Bild 6. Aus den Rekonstruktionsergebnissen für die Gebäude lassen sich zwar durchaus akzeptable Dachfirsthöhen ablesen, im Bereich der Gebäudeseitenwände sind aber noch deutliche Defizite zu erkennen, wie auch die σ_{Z_i} anzeigen. Für den Fall, daß genügend Bildinformation vorliegt, läßt sich dieses Manko über eine verallgemeinerte Oberflächenrepräsentation in Kom-

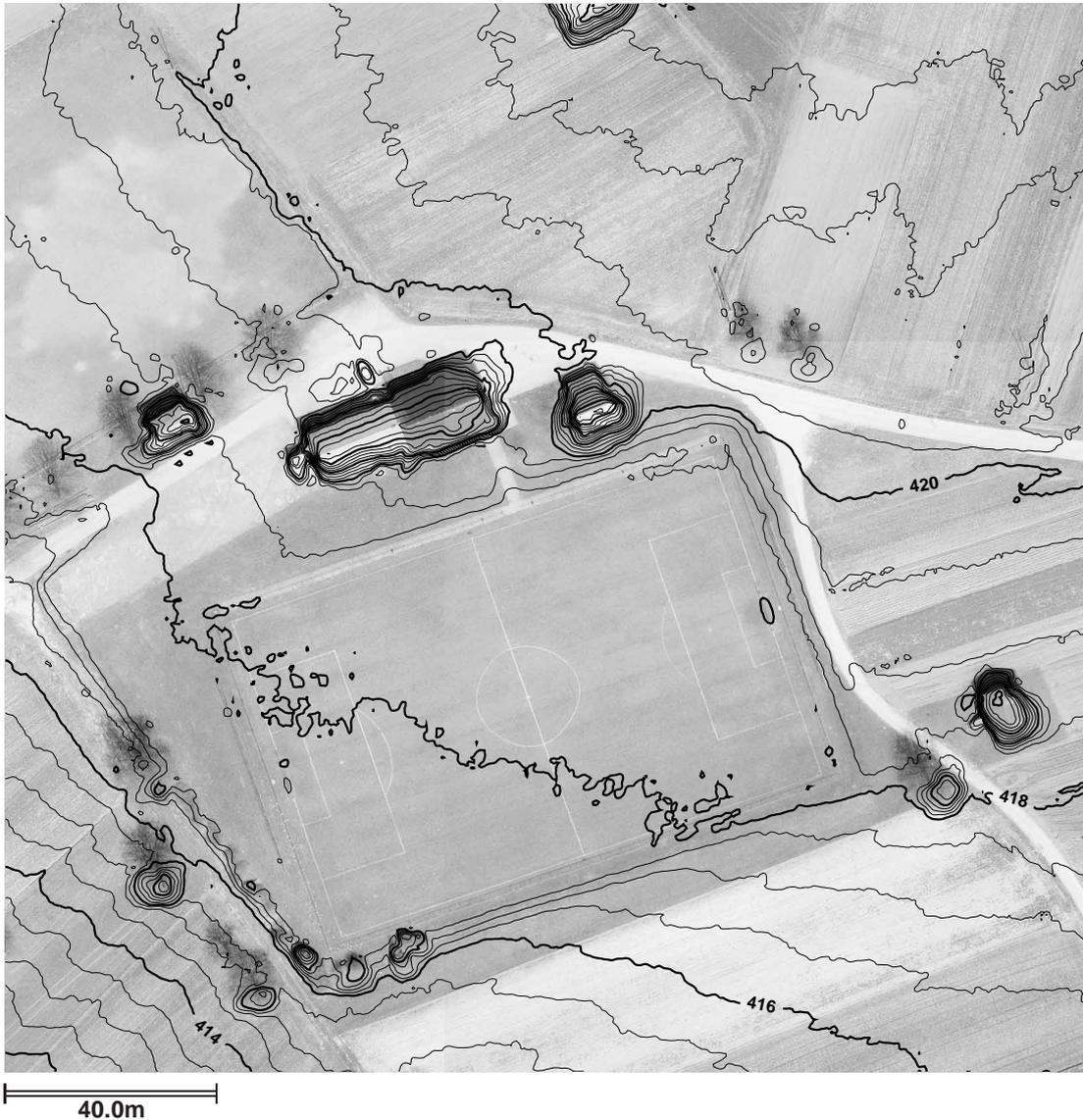


Bild 5 – Oberflächenrekonstruktion mit 4 Bildern: Orthobild und Höhenlinien (Äquidistanz 0.50m) des Beispiels 'Fußballplatz'.

bination mit einer integrierten Verdeckungsanalyse beheben, siehe Kap. 4. Über diesen Weg können auch vertikale bzw. überhängende Oberflächenverläufe rekonstruiert werden.

Bei belaubten Büschen und Bäumen wird stets die sichtbare Oberfläche rekonstruiert, eine prinzipielle Eigenschaft des Facetten-Stereosehens, vgl. die immergrünen Büsche nahe der süd-westlichen Fußballplatzecke. Dies gilt natürlich auch für andere Objekte, sofern sie groß genug sind, um flächenhaft aufgelöst zu werden, wie beispielsweise parkende Fahrzeuge. Hier handelt es sich im Sinne der automatischen Bildzuordnung im Objektraum nicht um Störungen. Diese Effekte müssen daher, falls der Anwender dies verlangt, mit gesonderten Nachbearbeitungsschritten beseitigt werden, um vom Digitalen Oberflächenmodell, das das Facetten-Stereosehen rekonstruiert, zum Digitalen Geländemodell zu gelangen.

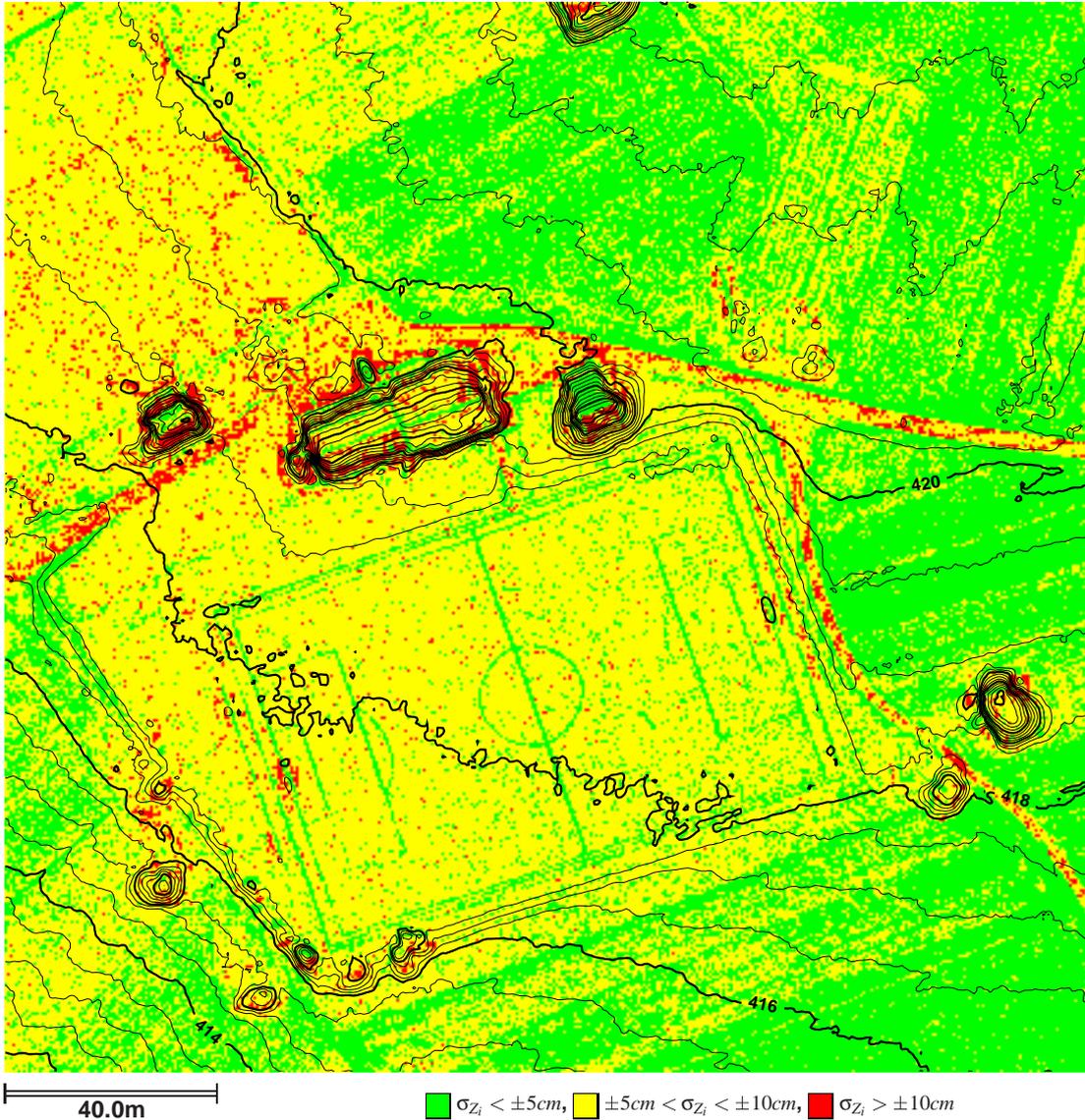


Bild 6 – Oberflächenrekonstruktion mit 4 Bildern: Standardabweichungen σ_{Z_i} und Höhenlinien (Äquidistanz 0.50m) des Beispiels 'Fußballplatz'.

Anders verhält es sich mit Objekten, welche nicht flächenhaft aufgelöst werden können, wie beispielsweise unbelaubte Büsche und Bäume, Telegraphenmasten, etc. Solche 'vektorartigen' Gebilde haben in der Regel kaum einen störenden Einfluß auf das Rekonstruktionsergebnis, vgl. z.B. die beiden Telegraphenmasten nördlich der Sportplatzzufahrt im rechten, oberen Teil von Bild 5. Hier wirken sich im Gegenteil die zugehörigen, oft stark gegliederten Schattenbilder am Boden äußerst positiv auf die Bildzuordnung aus, da sie eine zusätzliche, kontrastreiche Oberflächentextur darbieten. Das Residuenbild zum Luftbildausschnitt in Bild 7 zeigt klar auf, daß die Oberflächenrekonstruktion im Schattenbereich problemlos verlaufen ist, lediglich für den Kronenbereich (rechts unten) wird eine mögliche Störung des Rekonstruktionsergebnisses angezeigt. (Oben am Bildrand von Bild 7 ist wieder ein Staubfussel vom Scannen zu erkennen).

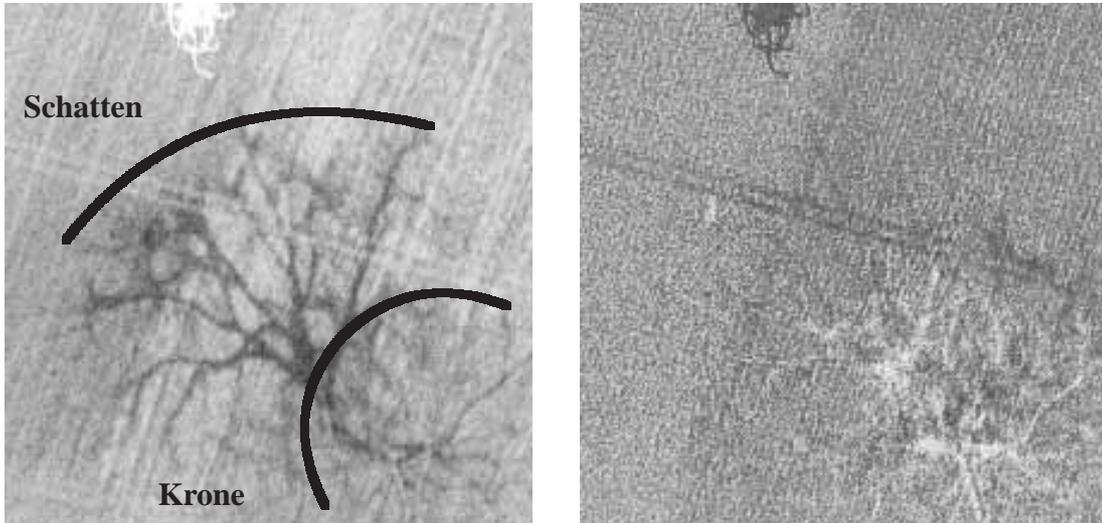


Bild 7 – Beispiel 'Baum'. Links: Luftbildausschnitt eines Baumes (seine Krone im Bild rechts unten) samt seinem Schatten (Bildmitte). Rechts: Residuenbild zum nebenstehenden Luftbildausschnitt.

Für die mächtigeren der unbelaubten Bäume ist in Bild 5 meist eine deutliche Oberflächenerhebung auszumachen, welche aber bei weitem nicht an die tatsächliche Wipfelhöhe heranreicht. Von seiten des Rekonstruktionsansatzes her ist dies zu erwarten, da die feinen Aststrukturen im Kronenbereich keine flächenhafte Zuordnung erlauben, ein mächtiger Stamm- bzw. Kronenansatz dagegen schon. Hier bietet es sich an, auf der Basis einer halbautomatischen Analyse der Residuenbilder die in Bild 7 dargestellten, typischen Strukturen der Kronenbereiche zu selektieren und in einem semiautomatischen Nachbearbeitungsschritt den Oberflächenverlauf in der nahen Umgebung bei Bedarf zu revidieren. Um Irritationen vorzubeugen sei abschließend darauf hingewiesen, daß im Orthobild in der Regel nur der Schatten eines Baumes bzw. eines Mastes klar zu erkennen ist - die beschriebenen Oberflächenerhebungen treten folgerichtig am Fuße des Baumschattens auf.

In Bild 8 wird eine Situation im Umfeld einer mehrspurigen Fernverkehrsstraße dargestellt. Erneut werden DGM und Orthobild den erzielten Standardabweichungen in den Höhenstützstellen gegenübergestellt. Die markierten Fahrbahnflächen bieten prinzipiell eine Definitionsgenauigkeit im Zentimeterbereich. Auf eindrucksvolle Art und Weise arbeitet hier das Facetten-Stereosehen die jeweilige Fahrbahneigung heraus. Zahlreiche Fahrzeuge auf der Schnellstraße, welche durch ihre Bewegung meist nur in einem Luftbild abgebildet sind, verursachen einen unbedeutenden, lokalen Genauigkeitsabfall.

Die in den obigen Abbildungen wiedergegebenen Höhenlinien sollen eine Beurteilung des Auswertergebnisses ermöglichen, stehen aber in der Regel noch nicht für ein fertiges Produkt. Ergänzend wird daher in Bild 9 das Ergebnis einer manuell-interaktiven Überarbeitung des Auswertergebnisses nach den Richtlinien für die Luftbildkarte LK 1:5000 präsentiert. Die graphische Ausgestaltung wurde direkt auf der Basis des automatisch generierten Höhenlinienlayers nach Art des Monoplotting-Verfahrens am PC erstellt. Dabei reichte der direkte Bezug zum Orthobild fast immer zur Erkennung und Bereinigung von Störstellen aus, in wenigen Zweifelsfällen wurde zur Klärung ergänzend die 'Ampelfarbendarstellung' der Standardabweichungen

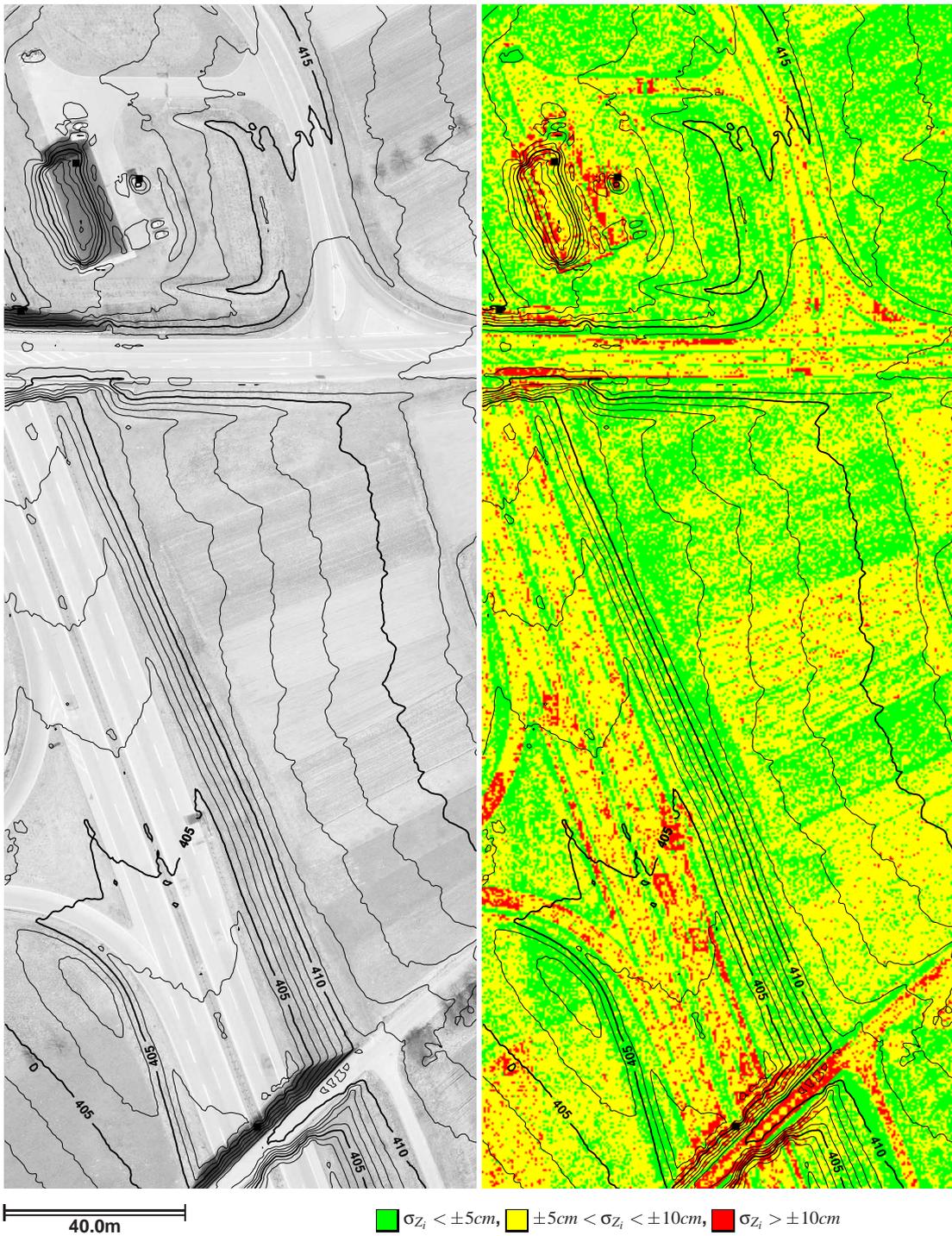
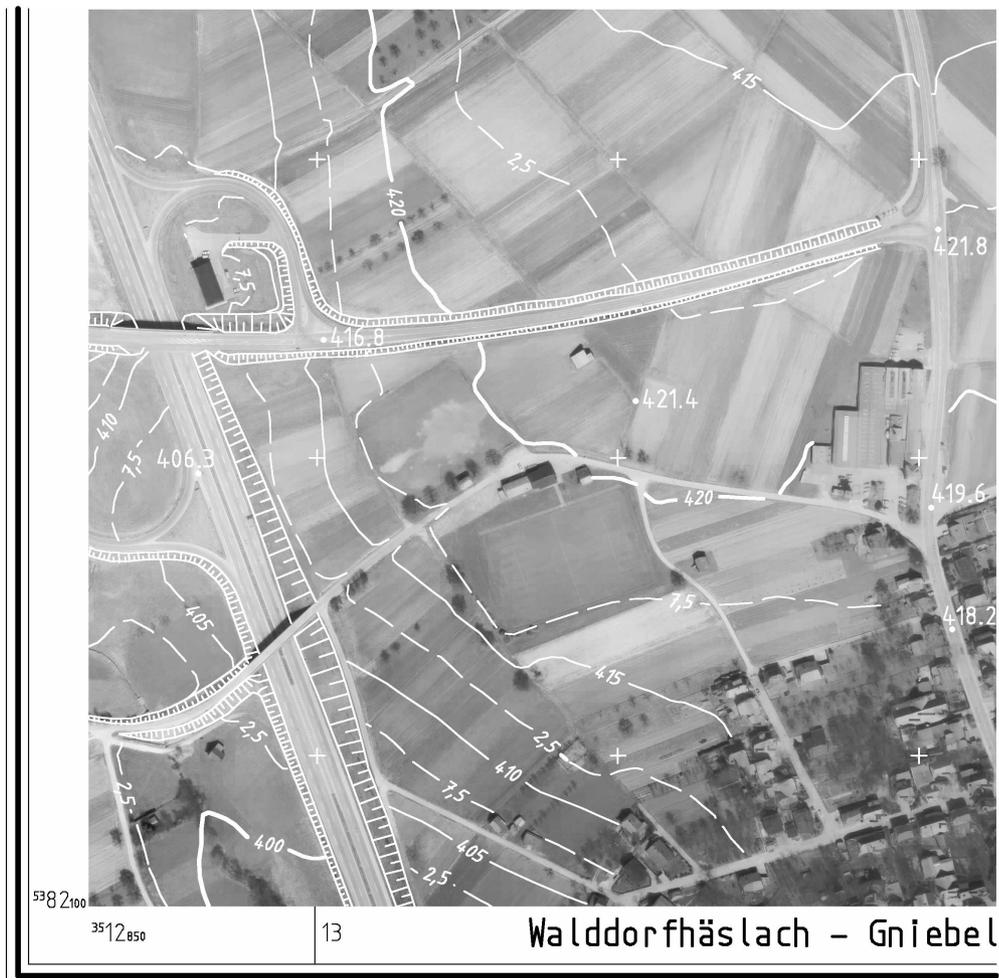


Bild 8 – Oberflächenrekonstruktion des Beispiels 'Schnellstraße' mit 3-4 Bildern: Orthobild (links) mit Höhenlinien (Äquidistanz 1m). Kodierte Standardabweichungen (rechts).

herangezogen. Durch Interpretation des erzeugten Oberflächenmodells als Tiefenbild läßt sich über die Anwendung einfacher Bildverarbeitungstechniken eine Neigungskarte erstellen, anhand der all jene Gebiete eingefärbt wurden, welche als Kandidaten für Böschungsschraffuren in Frage kommen. Die eigentliche Positionierung der Böschungsschraffuren wurde interaktiv vorgenommen.

Geht man einmal davon aus, daß das fertige Endprodukt in jedem Fall einer abschließenden Nachbearbeitung bedarf, z.B. zur Beschriftung mit Ortsnamen udgl., so erscheint der Mehraufwand durch die manuelle Höhenlinienbearbeitung in diesem Arbeitsschritt als tragbar. Er ist stark von geeigneten Werkzeugen zur Vektordatenverarbeitung abhängig.



Grundriss: Orthophotokarte
Luftaufnahme: 11.04.1988

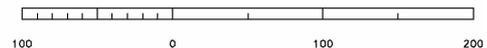


Bild 9 – Ergebnisdarstellung im Stil der Luftbildkarte 1:5000 (LK5).

3 Aktuelle Entwicklungen

Die Anforderungen der Funknetzbetreiber haben in der jüngsten Vergangenheit eine temporär verstärkte Nachfrage nach Geodaten speziell innerstädtischer Bereiche ausgelöst. In diesem Zusammenhang hat sich gezeigt, daß semi- und vollautomatische Ansätze zur Gebäudedetektion und -rekonstruktion vielfach von einer vorgegebenen, qualitativ hochwertigen, geometrischen Oberflächenerfassung profitieren. Da es mit einer $2\frac{1}{2}$ D-Oberflächenmodellierung in der Form $Z = f(X, Y)$ nicht möglich ist, allgemeine dreidimensionale Flächen im Raum zu beschreiben, wurden am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der TU Darmstadt Entwicklungsarbeiten und Untersuchungen zum Einsatz allgemeinerer Oberflächenmodelle durchgeführt. Eine adäquate Lösung wird im Übergang auf Dreieckselemente, der Mitführung einer expliziten Stützpunktopologie im dreidimensionalen Raum sowie der Integration transfiniter Interpolanten gesehen, vgl. (Schlüter 1999). Bild 10 (links) veranschaulicht diese Art der Modellierung am Beispiel eines Zwischenergebnisses auf der 4. Bildpyramidenstufe, wobei die 3D-Eigenschaften erst im Endergebnis, Bild 10 (rechts), wirklich zum Tragen kommen. Durch die Aufnahmeconfiguration nach Bild 2 sind nur jeweils zwei der vier Gebäudeseitenwände in mindestens zwei Bildern sichtbar, von daher können auch nur zwei der Außenseiten optimal rekonstruiert werden. Für diese werden aber auch tatsächlich vertikal verlaufende Flächenbereiche rekonstruiert, eine signifikante Verbesserung der bisherigen Ergebnisse. Im übrigen, ein optimal auf die Gebäuderekonstruktion ausgelegter Bildflug läßt noch bessere Ergebnisse erwarten.

Interessanterweise läßt sich das allgemeine 3D-Oberflächenmodell ohne spürbare Änderungen in der Robustheit oder Genauigkeit des Rekonstruktionsverfahrens für eine Vielfalt von Oberflächen einsetzen. Durch den flexiblen Umgang mit vielerlei Bilddaten auf der einen und komplizierten Objektoberflächen auf der anderen Seite könnte dieser neue Ansatz auch für Aufgabenstellungen im photogrammetrischen Nahbereich wegweisend sein. Die resultierenden Dreiecksdaten lassen sich problemlos in moderne Modellierungssprachen, wie beispielsweise VRML (= Virtual Reality Modeling Language), überführen - auch in diesem Umfeld erscheinen zukünftige Einsatzgebiete denkbar.

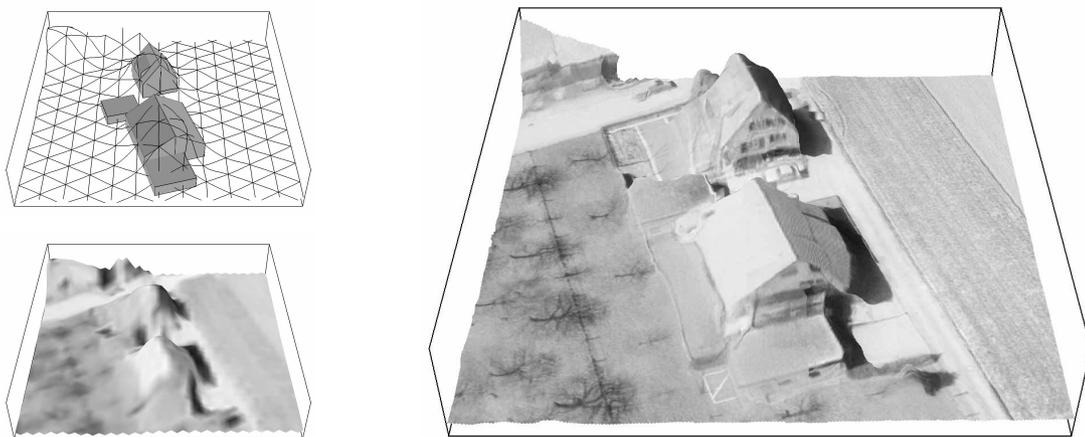


Bild 10 – Rekonstruktion mit einer allgemeinen 3D-Oberflächenrepräsentation. Links: Geometrisches Zwischenergebnis auf der 4. Bildpyramidenstufe, Dreiecksvermaschung und zum Vergleich Gebäudeumrisse (grau) aus manuell-interaktiver Messung (oben), Oberflächenrauhwerte (unten). Rechts: Endergebnis auf der 1. Bildpyramidenstufe.

4 Wertung und Ausblick

In diesem Aufsatz wurde das Facetten-Stereosehen als ein modernes Verfahren zur photogrammetrischen Bestimmung der Geodaten DGM und digitales Orthobild erläutert. Es wurden die herausragenden Eigenschaften des Facetten-Stereosehens hinsichtlich der erzielbaren Bodenauflösung und Rekonstruktionsgenauigkeit dargestellt und exemplarisch mit einem praktischen Fall belegt. Diese Ergebnisgrößen lassen sich durch Wahl des jeweiligen Aufnahmemaßstabes und der Anordnung der Bilder in einer Befliegung nahezu beliebig steuern, um mit möglichst geringem Aufwand ein angestrebtes Ergebnis zu erzielen.

Drei Punkte seien abschließend besonders betont:

- Das photogrammetrische Verfahren besitzt wegen seines redundanten Einsatzes vieler Bilder die systemimmanente Möglichkeit zur durchgreifenden Genauigkeitskontrolle. Als Indiz für die gelungene automatische Bildzuordnung im Objektraum mit dem Facetten-Stereosehen reicht der optische Eindruck eines gestochen scharf rekonstruierten digitalen Orthobildes bereits fast immer aus. Darüber hinaus belegen die erzielten Standardabweichungen quantitativ und individuell an jeder Stelle am Objekt die tatsächlich erzielte Genauigkeit, wobei bei verlässlichen Orientierungsdaten auch stets verlässliche Absolutgenauigkeiten geliefert werden. Es erscheint zur Zeit noch fraglich, ob eine derart durchgreifende, flächenhafte Selbstkontrolle von alternativen Verfahren, wie beispielsweise dem Laserscanning, welches in Waldgebieten sicher attraktive Vorteile bietet, geleistet werden kann.
- Andererseits drängt sich der Gedanke auf, das Laserscanning mit seinen Altimeterdaten durch Kombination mit synchron aufgenommenen Bilddaten in seiner Selbstkontrolle zu verbessern, um so die totale Abhängigkeit der Orientierung des Lasersensors vom einwandfreien Funktionieren von GPS und INS zu kontrollieren und sogar zu stützen. Benötigt werden hierzu Bilddaten (mitfliegende photographische Meßkamera oder CCD-Kamera) in höherer Ortsauflösung als sie die Laserdaten besitzen. Ein größeres Gebiet kann auf diese Weise durch Aneinanderfügen sich überlappender Streifen zu einem Gebilde neuer Art, einem Altimeter-Bündelblock, vereinigt und gemeinsam zu einem DGM und Orthobild ausgewertet werden. Als Auswertekonzept hierfür bietet sich in natürlicher Weise das Facetten-Stereosehen an. Es erlaubt interessanterweise neben der Bestimmung der in diesem Artikel vorgeführten Objektmodelle DGM und Orthobild auch die Bestimmung von Elementen der Sensororientierung, (Kempa 1995), wenigstens aber von Driftpolynomen jedes Streifens. Das gesamte Berechnungsverfahren sieht umfangreich aus, wird aber dadurch erleichtert, daß durch die direkt gemessenen Altimeter, GPS- und INS-Daten bereits recht gute Näherungen der gesuchten Modellparameter vorliegen.
- Die vom Facetten-Stereosehen automatisch bestimmten, digitalen Oberflächenmodelle stellen in aller Regel nur ein Zwischenergebnis auf dem Weg zu einem angestrebten Endprodukt dar. Je nach Zielrichtung auf analoge oder digitale Produkte, auf spezielle $2\frac{1}{2}$ D- oder 3D-GIS-Ausprägungen, auf die automatische Gebäuderekonstruktion, auf flächenhafte Deformationsmessungen, auf Simulationsmodelle, ..., wird man unterschiedliche Nachbearbeitungsstrategien heranziehen. Für diesen Zweck ist eine gute Kenntnis der Charakteristika des digitalen Oberflächenmodells unabdingbar, soll eine Nachbearbeitung so automatisiert wie möglich ablaufen können. Hier werden die angesprochenen Qualitätsmaße in vielen Fällen Hilfestellung leisten, aber auch ein gewisser 'Genauigkeits- und Auflösungsüberschuß' kann von einigen automatisierten Nachbearbeitungsstrategien effektivitätssteigernd in Anspruch genommen werden.

5 Literatur

Kempa, M. (1995): Hochaufgelöste Oberflächenbestimmung am Beispiel von Natursteinen und Orientierung von Bildern mit dem Facetten-Stereosehen. Dissertation TH Darmstadt, Institut für Photogrammetrie und Kartographie.

Konecny, G. (Hrsg.) (1998): Sensors and mapping from space. Workshop der ISPRS, Hannover, Okt. 1997. Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, Deutschland, Bd. 17.

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

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

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

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

Wiman, H. (1998): Automatic generation of digital surface models through matching in object space. Photogrammetric Record 16 (91), S. 83-91.

Wrobel, B.P. (1987): 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', vol. 804, SPIE, Den Haag, Niederlande, S. 325-333.

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

Wrobel, B.P., Schlüter, M. (1997): Digital terrain model generation in the Antarctic - a challenging task for digital photogrammetry. In: Altan, M.O. und L. Gründig (Hrsg.): Proceedings of the 2nd Turkish-German Geodetic Days, 28.-30. Mai, Berlin, S. 407-416.

Dieses Projekt des Instituts für Photogrammetrie und Kartographie der TU Darmstadt (IPK) wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter WR 18/1-1 bis 4 unterstützt. Wir bedanken uns herzlich bei Herrn *Dr. Kiefer* und Herrn *Weiser* vom Landesamt für Flurneueordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, welche uns die kompletten Ausgangsdaten zugänglich gemacht haben. Für die Böschungsschraffuren in Bild 9 wurde uns von Herrn *Dr. Lin* (Kreller KG, Dreieich) freundlicherweise die MDL-Application SLOPE zur Verfügung gestellt, die Bearbeitung des LK5-Musters erfolgte durch Dipl.-Ing.(FH) *Steineck* am IPK.