

Martin Ofner

Automatische Generierung von  
Kronenoberflächenmodellen in bewaldeten  
Gebieten aus hochauflösenden digitalen  
Ultracam<sub>D</sub> Luftbildern unter Verwendung  
multipler Stereobildpaare

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur/in

Masterstudium Geomatics Science



Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Forstwirt Mathias Schardt  
Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie  
Technische Universität Graz

Graz, August 2010

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

# Danksagung

Herzlicher Dank gilt all jenen, und ganz speziell meinen Eltern, die mir mein Studium möglich gemacht haben.

Weiters möchte ich auch den Mitarbeitern des Instituts für Digitale Bildverarbeitung am Joanneum Research Graz für die Unterstützung und gute Zusammenarbeit danken, speziell danke ich:

Hannes Raggam, für seine Mitbetreuung der Arbeit und prompte Hilfe bei kniffligen Fragestellungen und Wolfgang Hummelbrunner für die große Hilfe bei softwaretechnischen Problemen,

Mathias Schardt, für die Ermöglichung und Betreuung dieser Arbeit.

Weiterer Dank gilt Manuela Hirschmugl und Roland Wack.

# Kurzfassung

Digitale Oberflächenmodelle stellen wichtige Planungsgrundlagen für verschiedenste Applikationen dar. Die automatische Ableitung forstlicher Parameter wie Baumhöhe, Stammzahl und Kronendurchmesser stellt eine dieser Applikationen dar. Die Verfügbarkeit digitaler hochauflösender extrem überlappender Ultracam<sub>D</sub> Luftbilder eröffnet neue Perspektiven bezüglich einer automatischen Erstellung von Oberflächenmodellen. Ziel dieser Arbeit war die Erstellung eines Oberflächenmodelles aus dem Ultracam<sub>D</sub> Daten unter Ausnutzung der vorhandenen Mehrfachüberlappungen. Gleichzeitig wurde ein Vergleichsmodell aus zwei Bildern erstellt, das dem klassischen Ansatz eines einzelnen Stereobildpaares entspricht. Die erstellten Modelle wurden anhand von Laserscannerdaten und im Feld erhobenen Referenzdaten evaluiert. Erwartungsgemäß zeigte der Ansatz mittels MULTI-Bildkorrelation im Vergleich zum klassischen Stereobildpaar deutliche Verbesserungen in der Erfassung von vertikal stark strukturierten Bereichen wie Waldflächen. Speziell im Bereich von Waldrändern und Einzelbäumen zeigten sich deutliche Qualitätsverbesserungen in der 3D-Rekonstruktion. Im Vergleich zu 356 im Feld gemessenen Baumhöhen unterschätzt das DOM aus dem MULTI-Bildansatz die Baumhöhen im Mittel um 0.8 m, und das DOM aus dem Zwei-Bildansatz um 1.3 m. Ein Vergleich mit einem LiDAR DOM bestätigt die Konkurrenzfähigkeit des MULTI-Bildansatzes bezüglich der Nachbildung von Kronenformen und der Erfassung von Einzelbäumen und deren Höhen.

# Abstract

Digital surface models provide an important basis for various applications. The derivation of forest parameters like tree height, stem quantity and crown diameter is one of these tasks. Since high resolution digital aerial images with huge forward overlap from the Ultracam<sub>D</sub>, are available, they offer a new outlook with respect to an automated surface model generation. The aim of the master thesis was the generation of a digital surface model by using multi-overlapping Ultracam<sub>D</sub> images. Moreover, a second model was created by using only two images that implicated the typical photogrammetric approach. The evaluation was done by ground truth data as well as LiDAR data. The tested multiple image matching approach showed better results than the classic stereo approach, using two images only. Especially the quality of reconstructing vertical structured zones like forest borders or open forests is improved. A verification of tree height using 356 in situ measured heights showed an underestimation of 0.8m in case of the multi image approach, and 1.3 m underestimation with the standard configuration. The reconstruction of the crown shapes and single trees with the multi-image-approach looks quite competitive compared to the LiDAR surface model.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1	Bedeutung von Oberflächenmodellen.....	13
1.2	Zielsetzung.....	15
<b>2</b>	<b>Photogrammetrische Grundlagen</b> .....	<b>18</b>
2.1	Einleitung .....	18
2.2	Innere Orientierung .....	20
2.3	Zentralprojektion und Mehrbildauswertung .....	22
2.3.1	Mehrbild Ansätze zur Oberflächenmodellerstellung.....	25
2.4	Äußere Orientierung / Sensororientierung .....	26
2.4.1	Indirekte Sensororientierung .....	28
2.4.2	Direkte Sensororientierung .....	29
2.4.3	Integrierte Sensororientierung.....	30
2.5	Digitale vs. analoge Bilddaten.....	30
2.6	Höhenmodelle in bewaldeten Gebieten .....	35
<b>3</b>	<b>Ultracam<sub>D</sub></b> .....	<b>39</b>
3.1	Einleitung .....	39
3.2	Kamerabeschreibung .....	40
3.2.1	Technische Daten .....	40
3.2.2	Design .....	40
3.2.3	Kompensation der Vorwärtsbewegung .....	43
<b>4</b>	<b>Testdaten und Referenzdaten</b> .....	<b>44</b>
4.1	Testgebiet .....	44
4.2	Ultracam <sub>D</sub> Testdaten.....	45
4.3	Laserscanner .....	52
4.3.1	Beurteilung der Genauigkeit von Laserscanner Geländemodellen in bewaldeten Gebieten .....	53
4.3.2	Beurteilung der Genauigkeit von Laserscanneroberflächenmodellen über Wald .....	54
4.4	Erhebung von Referenzdaten .....	56
4.4.1	Lage und Höhenbestimmung der Einzelbäume.....	57

<b>5</b>	<b>Oberflächenmodellerstellung .....</b>	<b>63</b>
5.1	Bündelblockausgleich.....	65
5.2	Bildkorrelation .....	68
5.2.1	Bildregistrierung.....	68
5.2.2	Flächenhafte Bildkorrelation .....	70
5.2.3	Qualitätskontrolle der Korrelationsergebnisse (Rückkorrelation).....	72
5.2.4	Speicherung der Korrelationsergebnisse .....	74
5.3	Räumlicher Vorwärtsschnitt.....	75
<b>6</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>77</b>
6.1	Evaluierung mit Referenz- und Vergleichsdaten.....	80
6.1.1	Vertikale Profile .....	81
6.1.2	Ableitung von Baumhöhen .....	89
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>92</b>
7.1	Erstellung der Höhenmodelle .....	92
7.2	Validierung der Ergebnisse .....	92
7.3	Ausblick .....	93
	<b>Literatur .....</b>	<b>96</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Oberflächen- und Geländemodell .....	14
Abbildung 1.2: Ablaufdiagramm der Arbeitsschritte.....	16
Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten .....	18
Abbildung 2.2: Digitales Messbild .....	19
Abbildung 2.3: Ideale photogrammetrische Optik .....	20
Abbildung 2.4: Reale photogrammetrische Optik .....	21
Abbildung 2.5: Prinzipskizze Stereoauswertung (Normalfall) .....	23
Abbildung 2.6: Drehwinkel der Sensororientierung (Vergleiche Roll, Pitch und Yaw aus der Flugzeugnavigation) .....	27
Abbildung 2.7: Koordinatensysteme bei der direkten Sensororientierung .....	29
Abbildung 2.8: Bildfusionierung Perko [2005] .....	33
Abbildung 2.9: Laserscanner Mehrfachreflexion (Quelle: <a href="http://www.toposys.de">www.toposys.de</a> ) .....	36
Abbildung 3.1: Ultracam <sub>D</sub> (Quelle: Vexcel) .....	39
Abbildung 3.2: CCD Arrays Ultracam <sub>D</sub> (aus Perko [2004]) .....	41
Abbildung 3.3: Aufnahmeprinzip Ultracam <sub>D</sub> (aus Perko [2004]) .....	42
Abbildung 4.1: Testgebiet Burgau (Austrian Map digital © BEV) .....	44
Abbildung 4.2: Baumartenverteilung .....	45
Abbildung 4.3: Bildserie (Austrian Map Digital © BEV) .....	46
Abbildung 4.4: Ultracam <sub>D</sub> Aufnahme Szenario.....	47
Abbildung 4.5: Passpunktverteilung (Datengrundlage: Austrian Map digital © BEV) .....	49
Abbildung 4.6: Feldarbeiten: Passpunktmessung zur Bestimmung von Transformationsparametern (KT 122-166) .....	49
Abbildung 4.7: Passpunktmessung zur Sensororientierung des Flugstreifens Burgau.....	50
Abbildung 4.8: Übersicht und Detail eines Passpunktes.....	51
Abbildung 4.9: Unter- und Überschätzung des digitalen Geländemodelles .....	54
Abbildung 4.10: Laserpulse - Baumwipfel.....	54



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.11: Übersicht der acht Testflächen innerhalb des Kernbereiches .....	56
Abbildung 4.12: Konstellation Messung – Kontrollmessung.....	57
Abbildung 4.13: Lagemäßiger Vergleich zwischen Baumfußpunkt und höchstem Punkt der Baumkrone (aus Waldarbeitsschulen der Bundesrepublik Deutschland [1996]; abgeändert).....	58
Abbildung 4.14: Feldarbeit: Einmessen von Probekreisen .....	59
Abbildung 4.15: Prinzip Baumhöhenmessung (Hypsometer).....	59
Abbildung 4.16: Offset .....	60
Abbildung 4.17: Probleme bei der Baumhöhenmessung (aus [Hirschmugl 2008]) .....	61
Abbildung 5.1: Multiple Projektionsstrahlen, Ofner [2006] .....	63
Abbildung 5.2 : Höhenmodellerstellung: Schematischer Ablauf.....	64
Abbildung 5.3: Übersicht verwendeter Punkte bei der Blockausgleichung. ....	66
Abbildung 5.4: Passpunktverteilung im Testgebiet Burgau .....	66
Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Blockausgleichung (RSG Software Dokumentation) .....	67
Abbildung 5.6: Prinzip Bildkorrelation (RSG Software Dokumentation) .....	69
Abbildung 5.7: Registrierte Ultracam Bilder .....	69
Abbildung 5.8: Hierarchischer Ansatz (© Joanneum Research) .....	70
Abbildung 5.9: Backmatching (RSG Software Dokumentation).....	72
Abbildung 5.10: Backmatchingdistanzen in verschiedenen Stereopaaren .....	73
Abbildung 5.11: Objektverzerrung in den benachbarten Bildern am Beispiel eines Einzelbaumes .....	73
Abbildung 5.12: Beispiel: Backmatching Distanz in Abhängigkeit der Konstellation verwendeter Stereopaare. ....	76
Abbildung 6.1: Übersicht Orthophoto und Oberflächenmodelle .....	79
Abbildung 6.2: Detailansicht der Modelle .....	81
Abbildung 6.3: Ausschnitt Straßenachse.....	82
Abbildung 6.4: Beispiel: Höhenprofil einer Straßenachse .....	82
Abbildung 6.5: Höhenprofil Wasserfläche .....	83
Abbildung 6.6: Höhenprofil Bestandeslücke .....	84
Abbildung 6.7: Kleine Bestandeslücke mit eingezeichnetem Profil.....	85

## *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 6.8: Profile in den verschiedenen Modellen.....	86
Abbildung 6.9:Schmale Bestandeslücke (Oberhöhe des Bestandes etwa 30 Meter) .....	87
Abbildung 6.10: Gemessene Profile .....	87
Abbildung 6.11: Höhenprofil Kronenoberfläche.....	88
Abbildung 6.12: 3D Ansicht der Kronenoberfläche im BlockDOM .....	89
Abbildung 6.13: Differenzmodelle (VHM) .....	89

# Abkürzungen

## A

ADS-40

Aerial Digital Scanner  
(Leica Geosystems)

AT

aerial triangulation

## B

BEV

Bundesamt für Eich- und  
Vermessungswesen

BHD

Brusthöhendurchmesser

BMN34

Bundsmeldenetz Meridian 34

## C

## D

DGM

Digitales Geländemodell

DMC

Digital Mapping Kamera  
(Z/I Imaging)

DOM

digitales Oberflächenmodell

## E

## F

FMC

Forward Motion Compensation

FVM

feature vector matching

## G

GNSS

Global Navigation Satellite System

GPS

Global Positioning System

GSD

Ground Sampling Distance

## H

## I

IMU

Inertial Measurement Unit

INS

Inertial Navigation System

## J

## K

## L

## M

## N

## *Abkürzungen*

NIR	nahes Infrarot
<b>O</b>	
ÖK50	Österreichische Karte 1:50.000
<b>P</b>	
PAN	panchromatisch
<b>Q</b>	
<b>R</b>	
RANSAC	Random Sample Consensus
RC20	analoge Reihenbildkamera der Firma Leica
RGB	rot grün blau
RMSE	round mean square error
RSG	Remote Sensing Software Package Graz
<b>S</b>	
SAR	Synthetic Aperture Radar
<b>T</b>	
TDI	Time delay and Integration
<b>U</b>	
<b>V</b>	
VHM	Vegetationshöhenmodell
<b>W</b>	
<b>X</b>	
<b>Y</b>	
<b>Z</b>	

# 1 Einleitung

## 1.1 Bedeutung von Oberflächenmodellen

Digitale Oberflächenmodelle stellen sehr wichtige Basis- und Planungsdaten für verschiedenste Anwendungsbereiche dar:

- Land- und Forstwirtschaft
- Landschaftsplanung
- Erstellung von Stadtmodellen
- Kartierung (Gletscherrückgang, Katastrophenkartierung, etc.)
- Diverse Simulationen (Lärmsimulationen, etc)
- etc.

Speziell in der Forstwirtschaft, wo die genaue Erhebung wichtiger forstlicher Parameter im Feld mit sehr großem Arbeitsaufwand verbunden ist, stellen diese Modelle wichtige Ausgangsdaten für die Ableitung dieser Parameter dar. Die Möglichkeit, Parameter wie Baumhöhe, Stammanzahl, Kronengröße und Kronenform aus Oberflächenmodellen automatisiert abzuleiten, eröffnet neue Perspektiven bezüglich großflächiger Auswertungen. Grundsätzlich gilt: Je genauer oder besser das vorliegende Modell die Wirklichkeit wiedergibt, desto besser können diese Parameter abgeleitet werden. Oberflächenmodelle können beispielsweise aus optischen Luft- und Satellitenbildern (Stereo Photogrammetrie), Laserscannerdaten oder Radardaten erstellt werden. Zur Bestimmung von Objekthöhen wird

## Kapitel 1

zusätzlich zum Oberflächenmodell ein Geländemodell benötigt. Eine Differenzbildung der beiden Modelle liefert ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell DOM (nDOM) welches die Höhe von Objekten (Bäume, Vegetation, Bauwerke, etc.) wiedergibt.

Abbildung 1.1 zeigt anhand einer Waldszene schematisch den Unterschied zwischen Gelände- und Oberflächenmodell.

Durch digitales Bildmaterial und automatisierte Auswertetechniken sind solche Modelle sehr schnell verfügbar.

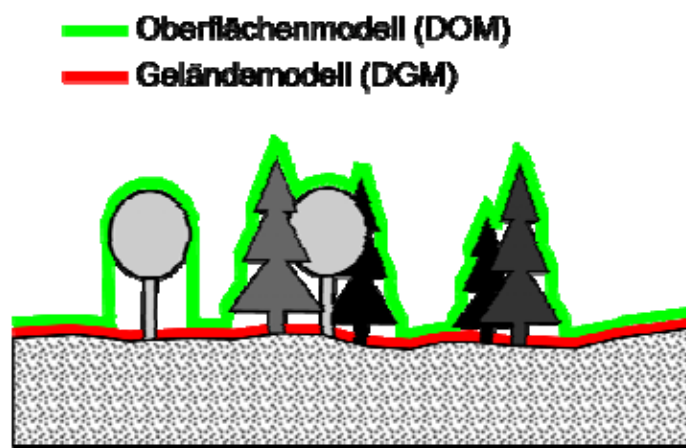


Abbildung 1.1: Oberflächen- und Geländemodell

## 1.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll anhand von hochauflösenden digitalen Ultracam<sup>1</sup> Luftbildern gezeigt werden, welches Potential diese bezüglich einer automatisierten Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen über Wald bieten. Für diese Untersuchung steht ein Bildstreifen einer Befliegung mit der Ultracam<sub>D</sub> im Gebiet Burgau zur Verfügung (Testgebiet Burgau: siehe Kapitel 4.1). Die Bilder weisen rund 90 Prozent Überdeckung in Flugrichtung auf (siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4). Der klassischen Situation der Stereobildauswertung entsprechen Bildserien, in denen sich benachbarte Bilder in Flugrichtung um 60 Prozent überlappen.

Ziel der Arbeit war es, ein Oberflächenmodell aus den Ultracam Luftbildern unter Ausnutzung der Mehrfachüberdeckungen zu erstellen. Gleichzeitig soll ein Oberflächenmodell ohne Miteinbeziehung der Mehrfachüberdeckungen erstellt werden. Eine Evaluierung der erstellten Modelle soll mittels Feldmessungen und Laserscannerdaten erfolgen.

Folgende Aufgaben gilt es in der vorliegenden Arbeit zu lösen:

- Georeferenzierung der Bilder durch Passpunktmessung und anschließender Bündelblockausgleichung
- Erstellung eines Oberflächenmodells mittels MULTI-Bildansatz
- Erstellung eines Vergleichsoberflächenmodells mittels ZWEI-Bildansatz (Standardfall der klassischen Stereoauswertung mit zwei Bildern bei 60 Prozent Überdeckung)
- Vergleich der erstellten Modelle mit den verfügbaren Laserscannermodellen
- Evaluierung der Modelle anhand im Feld erhobener Referenzdaten

---

<sup>1</sup> Großformatige digitale Luftbildkamera entwickelt von Vexcel (jetzt Microsoft)

Abbildung 1.2 zeigt den Ablauf der grundlegenden Arbeitsschritte die in dieser Arbeit behandelt wurden. Im Zuge von Feldmessungen wurden (1) Passpunkte zur Bildorientierung und (2) Probeflächen zur Verifikation der Oberflächenmodelle gemessen. Die äußeren Orientierungen der Bilder wurden mittels Bündelblockausgleich berechnet. Mit den ausgeglichenen äußeren Orientierungen und den Ergebnissen der Bildkorrelation wurden mittels eines räumlichen Vorwärtsschnittes die Oberflächenmodelle berechnet. Die Ergebnisse wurden anhand der im Feld gemessenen Referenzdaten verifiziert und mit Laserscannerdaten verglichen.

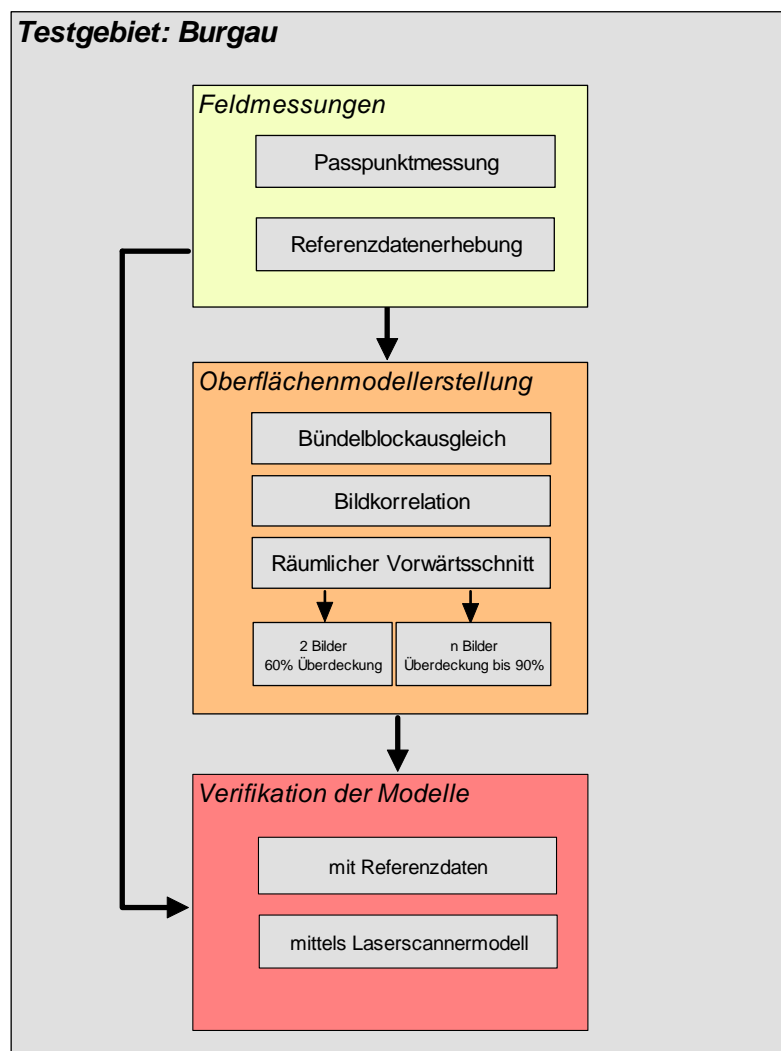


Abbildung 1.2: Ablaufdiagramm der Arbeitsschritte



## *Kapitel 1*

Zur Umsetzung der Geländemodellerstellung stand das Softwarepaket „Remote Sensing Software Package Graz“ (RSG) zu Verfügung, welches vom Joanneum Research in Graz am Institut für Digitale Bildverarbeitung entwickelt wird (*Institut für Digitale Bildverarbeitung, Wastiangasse 8, 8010 Graz, <http://www.joanneum.at>*).

Die Erfahrungen aus den durchgeführten Tests und der Modellierung der Ultracamp Bilder dienten als Grundlage für weitere Entwicklungen in RSG (Interaktion zwischen Test und Entwicklung).

Für Visualisierungen und weiterführende Untersuchungen wurde unter anderem die Software Erdas Imagine, welche von Leica Geosystems vertrieben wird, verwendet. (<http://www.leica-geosystems.com>).

Da es sich bei der verwendeten Bildserie um Einzelbilder mit bis zu 90 Prozent Überdeckung in Flugrichtung handelt, wurde ein Ansatz gewählt, welcher im Gegensatz zur klassischen Situation mit zwei Bildern (60 Prozent Längsüberdeckung) auch zusätzliche Informationen weiterer verfügbarer Bilder nutzt. Bedingt durch die hohe Überlappung des Bildmaterials soll untersucht werden, inwiefern sich verbesserte Ergebnisse durch Verwendung eines Multibildansatzes zur Oberflächenmodellerstellung ergeben.

Eine besondere Herausforderung war die Tatsache, dass die erstellten Oberflächenmodelle in einer parallel zu dieser Studie entstandenen Dissertation von Frau Manuela Hirschmugl direkt weiterverwendet wurden. Im Rahmen ihrer Dissertation mit dem Titel „*Assessment of Forest Parameters from VHR Data in Austrian and Scandinavian Forests*“ befasst sie sich unter anderem mit den Themen Segmentierung, Klassifizierung und der Ableitung von Forstparametern. Für diese Untersuchungen stellen genaue dreidimensionale Modelle wichtige Ausgangsdaten dar (siehe Hirschmugl [2008]).

## 2 Photogrammetrische Grundlagen

### 2.1 Einleitung

Ein digitales, flächenhaftes Aufnahmesystem entspricht vom grundsätzlichen Systemdesign jenem von analogen Messbildkameras. In beiden Fällen handelt es sich um zentralperspektivische Aufnahmen.

Die Beziehung zwischen Objekt und Bild wird mathematisch somit mittels strenger zentralprojektiver Abbildung durch Strahlenbündel definiert.

Folgende Abbildung 2.1 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten im  $\xi, \eta$ -System und den Objektkoordinaten im übergeordneten Koordinatensystem. Der zugehörige formale Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten ist in Formel (2.2) abzulesen.

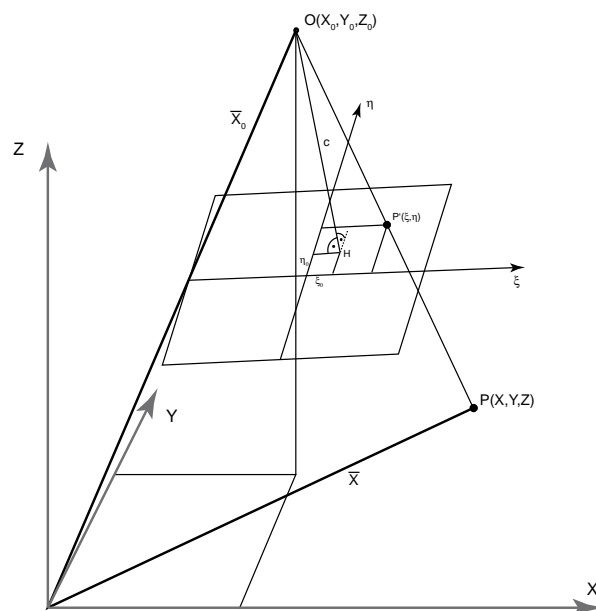


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten

## Kapitel 2

Die Abweichungen der Gegebenheiten vom mathematischen Modell der Zentralperspektive sind bei photogrammetrischen Auswertungen als Teil der inneren Orientierung zu berücksichtigen (siehe Kapitel 2.2). Für die Auswertung digitaler Bilder wird die innere Orientierung genauso benötigt wie bisher für die Auswertung analoger Bilder. Jene Bilder mit bekannter oder bestimmbarer innerer Orientierung werden als Messbilder bezeichnet.

### Digitales Messbild

Im Fall einer digitalen Messkamera sind zur Definition des Bildkoordinatensystems allerdings keine speziellen Rahmenmarken erforderlich. In Abbildung 2.2 ist ein Messbild dargestellt, das aus den Bildelementen  $g_{ij}$  besteht. Die Lokalisierung eines Bildelementes geschieht über den entsprechenden Zeilen- und Spaltenindex  $(i, j)$ . Zur Darstellung eines Bildelementes im  $\xi, \eta$  – System werden die Indizes  $i$  und  $j$  mit  $\Delta\xi$  bzw.  $\Delta\eta$  multipliziert.

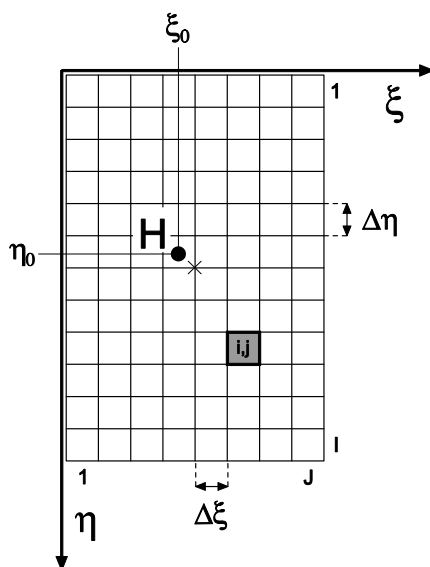


Abbildung 2.2: Digitales Messbild

Die Inhalte der folgenden Unterkapitel der photogrammetrischen Grundlagen, speziell die formalen Zusammenhänge stammen weitgehend aus Kraus [2004].

## 2.2 Innere Orientierung

Unter dem Begriff der inneren Orientierung versteht man die Lage des Bildhauptpunktes im kamerafesten Bildkoordinatensystem (siehe Abbildung 2.2), die Kamerakonstante  $c$  (siehe Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4) sowie eine radiale optische Verzeichnung, welche in Tabelle 2.1 aufgelistet sind.

Koordinaten des Bildhauptpunktes	$\xi_0$
	$\eta_0$
Kammerkonstante	$c$
radiale optische Verzeichnung	$\Delta\rho$

Tabelle 2.1: Parameter der inneren Orientierung

Formel (2.1) zeigt die sogenannte Gleichung der inneren Orientierung (vergleiche dazu die graphische Darstellung in Abbildung 2.4):

$$\rho = c \cdot \tan \tau + \Delta\rho \quad (2.1)$$

mit  $\rho = \text{Bildgröße} = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}$

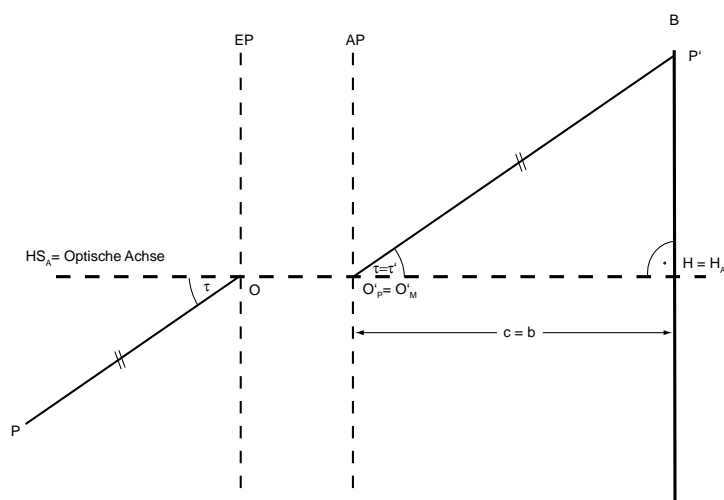


Abbildung 2.3: Ideale photogrammetrische Optik

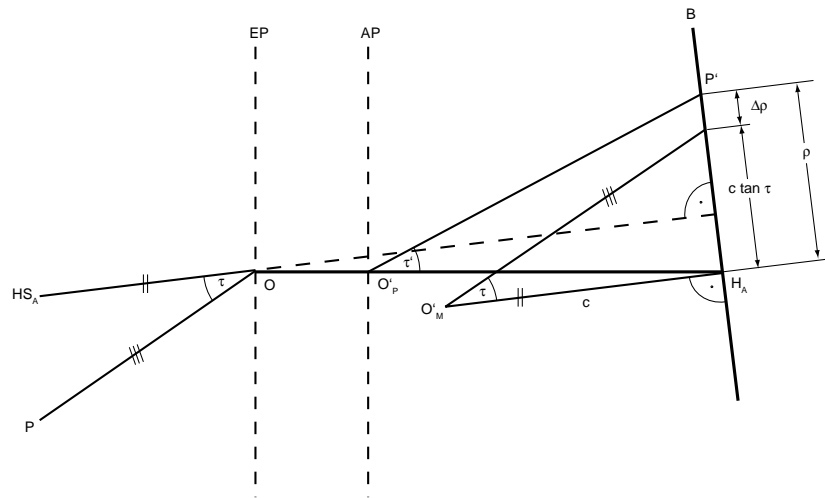


Abbildung 2.4: Reale photogrammetrische Optik

In Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 sind die idealisierte sowie die reale photogrammetrische Optik abgebildet. Die reale photogrammetrische Optik unterscheidet sich von der idealisierten Optik sehr wesentlich:

- Die Bezugsachse der Photogrammetrie ist nicht die optische Achse, sondern ein kalibrierter Hauptstrahl  $HS_A$ . Der Hauptstrahl geht durch die Mitte der Eintrittspupille und steht objektseitig senkrecht auf die Bildebene. Seine physikalische Verlängerung durchstößt die Bildebene im sogenannten Autokollimationshauptpunkt  $H_A$
- Die Winkel  $\tau$  werden in der Mitte der Eintrittspupille (EP) definiert und nicht in den Knotenpunkten
- Die durch den Bildanlegerahmen mechanisch realisierte Bildweite  $b$  weicht von der optischen Bildweite, in der die beste Schärfe eintritt um einen kleinen Betrag ab
- Die Bildebene steht nicht senkrecht zur optischen Achse

Das mathematische Projektionszentrum  $O'_M$  wird so definiert, dass es im Abstand  $c$  senkrecht vor dem Autokollimationshauptpunkt  $H_A$  liegt und die Winkel  $\tau$  und  $\tau'$  bildseitig möglich gut realisiert werden. Restfehler führen zur optischen Verzeichnung  $\Delta\rho$ .

## 2.3 Zentralprojektion und Mehrbildauswertung

Der formale Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten im  $\xi, \eta$ -System und den Objektkoordinaten im übergeordnetem  $X, Y, Z$ -System ist in Formel (2.2) dargelegt und wird als Kollinearitätsgleichung bezeichnet.

$$\begin{aligned}\xi &= \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Z_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta\xi \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Z_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta\eta\end{aligned}\quad (2.2)$$

Die Komponenten  $r_{ij}$  Formel (2.2) entsprechen den Elementen aus der Drehmatrix  $R_{\omega\phi\kappa}$  in Formel (2.8) und beschreiben die räumliche Stellung des Bildkoordinatensystems in Bezug zum Objektkoordinatensystem XYZ. Die Komponenten  $X_0, Y_0, Z_0$  beziehen sich auf die Koordinaten des Aufnahmepunktes im Objektkoordinatensystem (siehe Tabelle 2.2). Die Kamerakonstante  $c$  und die Koordinaten des Bildhauptpunktes ( $\xi_0$  und  $\eta_0$ ) im Bildkoordinatensystem sind die Parameter der inneren Orientierung (siehe Kapitel 2.2 und Abbildung 2.2). Allfällige vorhandene Bildfehler sind unter  $\Delta\xi$  und  $\Delta\eta$  zusammengefasst.

Die Auflösung von Gleichung (2.2) nach X und Y führt zur inversen Kollinearitätsgleichung:

$$\begin{aligned}X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0 - \Delta\xi) + r_{12}(\eta - \eta_0 - \Delta\eta) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0 - \Delta\xi) + r_{32}(\eta - \eta_0 - \Delta\eta) - r_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0 - \Delta\xi) + r_{22}(\eta - \eta_0 - \Delta\eta) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0 - \Delta\xi) + r_{32}(\eta - \eta_0 - \Delta\eta) - r_{33}c}\end{aligned}\quad (2.3)$$

Bei Betrachtung der rechten Seite von Gleichung (2.3) kann man erkennen, dass aufgrund der in beiden Gleichungen vorhandenen Z-Koordinate zu jedem Bildpunkt unendlich viele Objektpunkte gehören (2 Gleichungen und 3 Unbekannte). Ohne Zusatzinformation über die Z-Koordinate (zum Beispiel ein zweites Messbild des Objektes) ist keine vollständige Rekonstruktion eines räumlichen Objektes möglich.

## Kapitel 2

Abbildung 2.5 zeigt die Erweiterung des Szenarios auf  $n$  Messbilder. Die dargestellten Aufnahmen stellen den sogenannten Normalfall dar. Unter Normalfall versteht man Aufnahmen, bei denen die beiden Aufnahmerichtungen normal zur Basis und zueinander parallel stehen. (Anmerkung: Bei Luftbildaufnahmen ist es nicht immer möglich diese Bedingungen streng einzuhalten, es wird aber versucht dem Normalfall möglichst nahe zu kommen: Genäherter Normalfall.

Aus Abbildung 2.5 kann der Zusammenhang zwischen Flughöhe  $H$ , Kammerkonstante  $c$ , Aufnahmebasis  $B$  und der Horizontalparallaxe  $P_\xi$  abgelesen werden, wobei  $\xi$  der in Flugrichtung zeigenden Achse des Bildkoordinatensystems entspricht (siehe Abbildung 2.2). Der Bildmaßstab  $M_b$  errechnet sich aus dem Verhältnis der Kammerkonstanten und der Flughöhe über Grund:

$$M_b = c : H \quad (2.4)$$

Im Falle der Ultracam<sub>D</sub> ist die erreichbare Auflösung direkt von der Flughöhe abhängig, da die Kamera über eine feste Brennweite bzw. Kamerakonstante von 100 mm verfügt.

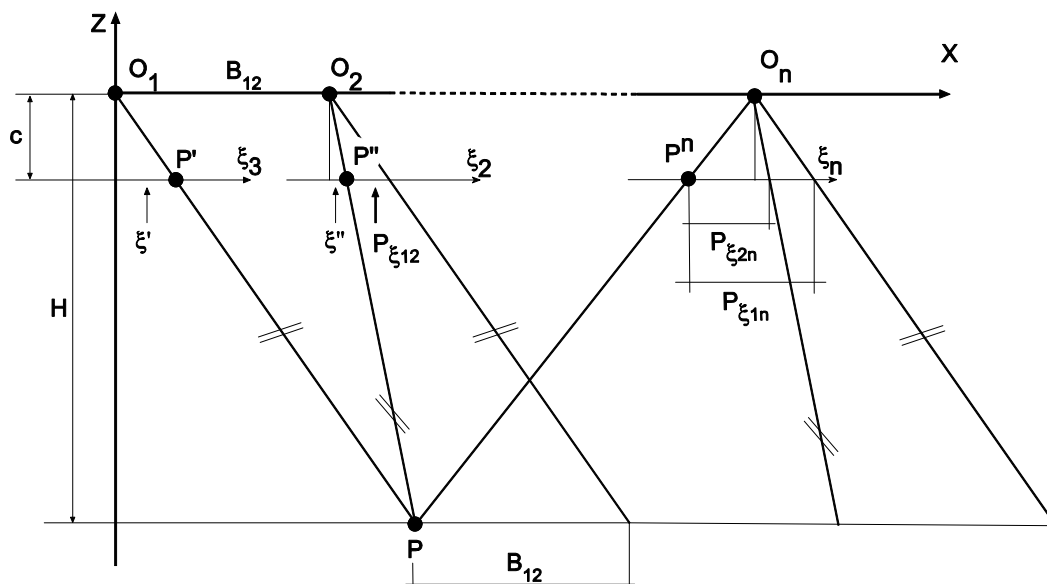


Abbildung 2.5: Prinzipskizze Stereoauswertung (Normalfall)

## Kapitel 2

Es müssen mindestens 2 Bilder zur Verfügung stehen, in denen ein Objekt abgebildet wird, um räumliche Informationen ableiten zu können. Aus Formel (2.3) ergeben sich folgende Gleichungen für die Verwendung von  $i$  Bildern für den räumlichen Vorwärtsschnitt, wobei die Elemente der inneren und äußeren Orientierung zu  $k_{xi}$  und  $k_{yi}$  zusammengefasst wurden.

$$\begin{aligned} X &= X_{01} + (Z - Z_{01}) \cdot k_{x1} \\ Y &= Y_{01} + (Z - Z_{01}) \cdot k_{y1} \\ X &= X_{02} + (Z - Z_{02}) \cdot k_{x2} \\ Y &= Y_{02} + (Z - Z_{02}) \cdot k_{y2} \\ &\quad \vdots \\ X &= X_{0i} + (Z - Z_{0i}) \cdot k_{xi} \\ Y &= Y_{0i} + (Z - Z_{0i}) \cdot k_{yi} \end{aligned} \tag{2.5}$$

Für die Koordinate  $Z$  ergibt sich beispielsweise aus Gleichung 1 und 3 folgende formale Beziehung:

$$Z = \frac{X_{02} - Z_{02} \cdot k_{x2} + Z_{01} \cdot k_{x1} - X_{01}}{k_{x1} - k_{x2}} \tag{2.6}$$

Für den Fall, dass genau zwei Bilder vorliegen, erhält man vier lineare Gleichungen zur Bestimmung der drei unbekannt Objektkoordinaten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  (siehe Gleichungen eins bis vier in Formel (2.5)). Liegen Normalfallbilder vor, wird die Überbestimmung durch einfache Mittelbildung gelöst.

Im allgemeinen Fall ist eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit den originalen Messungen (Bildkoordinaten) durchzuführen. Dazu müssen die nichtlinearen Beobachtungsgleichungen nach Taylor linearisiert werden. Formel (2.7) enthält die dazugehörigen Differentialquotienten. Die für eine Ausgleichung notwendigen Näherungswerte für die unbekannt Objektkoordinaten können aus den Formeln (2.5) und (2.6) berechnet werden.  $\xi_i^0$  und  $\eta_i^0$  sind berechnete Bildkoordinaten, die sich aus Formel (2.2) unter Verwendung von Näherungswerten für die unbekannt Objektkoordinaten und den



bekannten Parametern der inneren und äußeren Orientierung ergeben. Die Differentialquotienten für  $i$  Bilder lauten:

$$\begin{aligned}
 v_{\xi_1} &= \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial Z}\right)^0 dZ - (\bar{\xi}_1 - \xi_1^0) \\
 v_{\eta_1} &= \left(\frac{\partial \eta_1}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \eta_1}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \eta_1}{\partial Z}\right)^0 dZ - (\bar{\eta}_1 - \eta_1^0) \\
 v_{\xi_2} &= \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial Z}\right)^0 dZ - (\bar{\xi}_2 - \xi_2^0) \\
 v_{\eta_2} &= \left(\frac{\partial \eta_2}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \eta_2}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \eta_2}{\partial Z}\right)^0 dZ - (\bar{\eta}_2 - \eta_{21}^0) \\
 &\quad \vdots \\
 v_{\xi_i} &= \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial Z}\right)^0 dZ - (\bar{\xi}_i - \xi_i^0) \\
 v_{\eta_i} &= \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial X}\right)^0 dX + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial Y}\right)^0 dY + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial Z}\right)^0 dZ - (\bar{\eta}_i - \eta_i^0)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Detaillierte Beschreibungen zum Formalismus der weiteren Ausgleichsrechnung findet man bei Kraus [2004].

### 2.3.1 Mehrbild Ansätze zur Oberflächenmodellerstellung

Die Verwendung von mehr als zwei Bildern für die Bildkorrelation wird von Gruen schon 1985 beschrieben (vgl. Gruen [1985]). Gruen versteht unter Multiphoto-Korrelation die

- sequentielle Korrelation mehrerer Stereopaare (Bildkorrelation: siehe Kapitel 5.2) oder
- simultane Korrelation von mehr als zwei Bildern.

Beide genannten Möglichkeiten erhöhen die Robustheit des Ergebnisses und erlauben eine unabhängige Kontrolle des Korrelationsergebnisses.

Auch bei Okutomi [1993] wird die Verwendung multipler Stereopaare (multiple Baseline Stereo) für eine Stereoauswertung beschrieben.

In Thurgood [2004] wird die Rekonstruktion von Objekten mittels Multi-Ray Matching von Ultracam<sub>D</sub> Daten beschrieben. Er beschreibt die Vorteile, die sich aus der Verwendung von drei sich schneidenden

Projektionsstrahlen gegenüber zwei Projektionsstrahlen ergeben, was sich im Ergebnis durch weniger fehlerhafte Korrelationsergebnisse und einer Steigerung der geometrischen Genauigkeit auswirkt.

Zhang und Gruen beschreiben eine Verfeinerung des von Gruen entwickelten „*Multi-Photo Geometrically Constrained Matching*“ (MPGC) Ansatzes (Zhang [2004], Gruen [1985]). Eine sehr ausführliche Beschreibung des MPGC findet sich bei Baltsavias [1991].

Auch Zebedin et al beschreiben die Erstellung eines digitalen Oberflächenmodells durch Multi-Bild Matching mit anschließender Geländemodellableitung durch Objektklassifizierung (siehe Zebedin [2006]).

## 2.4 Äußere Orientierung / Sensororientierung

Die äußere Orientierung eines Bildes beschreibt die Lage und die Position des bildgebenden Sensors im Augenblick der Datenaufzeichnung. Insgesamt beschreiben sechs Parameter die äußere Orientierung, wobei drei Parameter die Position (translatorische Komponente) und drei Parameter die Lage (rotatorische Komponente) beschreiben (siehe Tabelle 2.2).

<b>translatorische Komponente</b>	
3 Koordinaten	$X_0$
	$Y_0$
	$Z_0$
<b>rotatorische Komponenten</b>	
erste Drehung um die X-Achse	$\omega$
zweite Drehung um die „neue“ aus der ersten Drehung entstandenen Y-Achse	$\varphi$
dritte Drehung um die Achse senkrecht zur Bildebene	$\kappa$

Tabelle 2.2 :Parameter der äußeren Orientierung

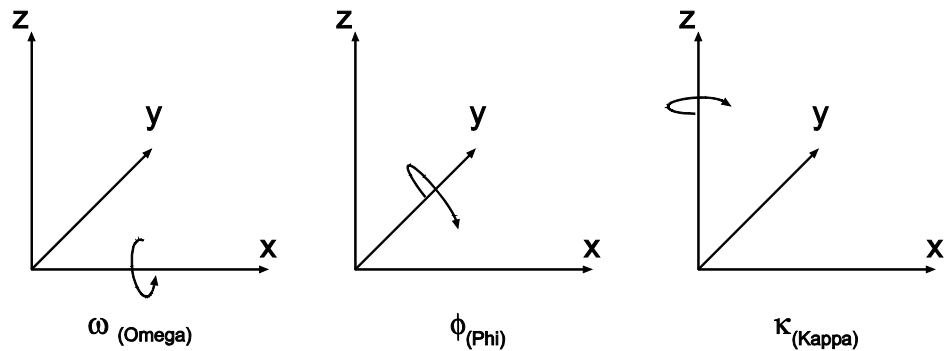


Abbildung 2.6: Drehwinkel der Sensororientierung (Vergleiche Roll, Pitch und Yaw aus der Flugzeugnavigation)

Die drei Einzeldrehungen aus Tabelle 2.2 können zu einer Gesamtdrehung zusammengefasst werden:

$$R_{\omega\phi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\kappa & -\cos\phi \sin\kappa & \sin\phi \\ \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\phi \sin\kappa & -\sin\omega \cos\phi \\ \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\phi \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Grundsätzlich werden zur Bestimmung der sechs genannten Orientierungsparameter folgende Methoden unterschieden:

- Indirekte Sensororientierung mittels Pass- und Verknüpfungspunkten (Bündelblockausgleich, Aerotriangulation)
- Direkte Sensororientierung aus Navigationsdaten (GPS/INS) der Befliegung
- Hybrider Ansatz / integrierte Sensororientierung (Stützung der Aerotriangulation mittels GPS/INS Messungen)

### 2.4.1 Indirekte Sensororientierung

Steht ein ganzer Streifen von Bildern zur Verfügung, die sich jeweils um mindestens 60 Prozent überdecken, bietet sich zur Bestimmung der äußeren Orientierungen die Bündelblockausgleichung an, welche auch in dieser Arbeit zur Orientierung der Ultracam<sub>D</sub> Bilder verwendet wurde. Weitere Methoden zur Bestimmung der äußeren Orientierungen (z.B. Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen) können bei Kraus [2004] nachgelesen werden.

#### *Bündelblockausgleichung*

Ein Strahlenbündel wird durch die Bildkoordinaten und das dazugehörige Projektionszentrum definiert. Die Parameter der äußeren Orientierung werden gleichzeitig für alle Messbilder bestimmt. Als Beobachtungen für die Ausgleichung dienen Bildpasspunkte und Verknüpfungspunkte zwischen den Bildern, die entweder manuell oder automatisch mittels Bildkorrelation in den Bildern gemessen werden. Das hinter der Ausgleichung stehende Prinzip lässt sich wie folgt beschreiben: Die vorhandenen Strahlenbündel werden so lange verschoben ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) und verdreht ( $\omega, \varphi, \kappa$ ), bis die entsprechenden Strahlen zu einem möglichst guten Schnitt kommen und mit den Passpunkten gut zusammentreffen. Der mathematische Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten ist in Formel (2.2) zu finden. Die für die Ausgleichung erforderlichen Näherungswerte der unbekannt orientierungsparameter können zum Beispiel aus einer Orientierung der Einzelbilder stammen, sofern in den Bildern genügend Passpunkte vorhanden sind, oder aus Daten der Flugplanung berechnet werden.

Als Richtwert für die erzielbare Genauigkeit im Fall von signalisierten bzw. genau definierten Punkte finden sich bei Kraus [2004] folgende Angaben:

Lage:	$\sigma_{XY}$	= $\pm 3 \mu m \cdot \text{Bildmaßstabszahl } m_B$
Höhe:	$\sigma_H$	= $\pm 0.03 \text{ ‰ der Aufnahmeentfernung (NW - WW)}$
		= $\pm 0.04 \text{ ‰ der Aufnahmeentfernung (ÜWW)}$

Tabelle 2.3: Genauigkeitsangabe Bündelblockausgleich

## 2.4.2 Direkte Sensororientierung

Bei diesem Ansatz wird die äußere Orientierung der Kamera direkt und vollständig bestimmt. Die gemessenen Orientierungselemente beziehen sich nicht direkt auf das gewünschte Projektionszentrum der Kamera, da zwischen den Sensoren räumliche Offsets und Verdrehungen existieren. Abbildung 2.7 zeigt schematisch die Koordinatensysteme zwischen den einzelnen Sensoren. Die Koordinatenoffsets ( $\Delta X_{Cam}^{GPS}$ ,  $\Delta X_{Cam}^{IMU}$ ,  $\Delta X_{IMU}^{GPS}$ ) werden häufig im Vorfeld mittels Theodolit und geodätischer Messung bestimmt.

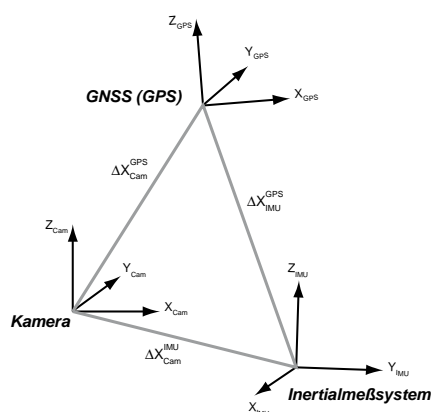


Abbildung 2.7: Koordinatensysteme bei der direkten Sensororientierung

Die Bestimmung der Verdrehungen erfolgt im Zuge einer Gesamtkalibrierung durch die Befliegung eines bekannten Testfeldes. Im Zuge der Gesamtkalibrierung können auch die Offsets bestimmt werden, sofern im Vorfeld keine geodätische Einmessung erfolgt ist (siehe Kapitel 2.4.3). Sehr kritisch ist die Verdrehung zwischen den IMU-Achsen und dem Kamerakoordinatensystem (Boresight-Misalignment). Die gemessenen IMU-Winkel müssen entsprechend korrigiert werden (Boresight Alignment). Weiters spielt bei der Kalibrierung die zeitliche Synchronisierung der Sensoren eine große Rolle.

Mit qualitativ hochwertigen GPS/INS-Systemen und entsprechender Gesamtkalibrierung kann die äußere Orientierung mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Allerdings können nicht korrigierte systematische oder grobe Fehler nicht aufgedeckt werden und die Qualität der direkten Georeferenzierung signifikant verschlechtern. Für höchste Genauigkeitsansprüche sollte die Verwendung von zumindest

einigen wenigen Kontrollpunkten im Aufnahmegebiet vorgesehen werden, um die Fehlereinflüsse im Zuge der integrierten Sensororientierung zu bereinigen. Den interessierten Leser möchte ich an dieser Stelle an weiterführende Literatur verweisen (z.B. Kaufmann [2008]).

### **2.4.3 Integrierte Sensororientierung**

Bei der integrierten Sensororientierung werden alle verfügbaren Beobachtungen wie GPS/INS Messungen, Pass- und Verknüpfungspunkte verwendet. Im Zuge einer Ausgleichung werden alle Parameter der Sensororientierung und bei Bedarf auch Kalibrierungsparameter bestimmt.

Der Vorteil gegenüber der direkten Sensororientierung ist eine erhöhte Zuverlässigkeit, da systematische und grobe Fehlereinflüsse erkannt werden können. Die integrierte Sensororientierung wird auch zur Gesamtsystemkalibrierung im Falle der direkten Sensororientierung genutzt. Weitere Informationen zur integrierten Sensororientierung können bei Cramer [2000] und Ries [2004] nachgelesen werden.

## **2.5 Digitale vs. analoge Bilddaten**

Großformatige digitale Luftbildsensoren werden seit dem Jahr 2000 operationell genutzt und haben in der Zwischenzeit einen regelrechten Durchbruch erfahren. Digitale Aufnahmesensoren bieten gegenüber analogen Systemen zahlreiche Vorteile.

Die wichtigsten Vor- und Nachteile der digitalen Technik gegenüber analoger Aufnahmetechnik sind hier angeführt, (basierend auf Ries [2004], teilweise ergänzt):

- (+) Zeitlicher Aspekt: Zeitaufwendige Filmentwicklung und anschließende Digitalisierung entfallen (voll digitaler Arbeitsfluss).
- (+) Material und Kosten: Filmmaterial und Entwicklungschemikalien entfallen. Nötig sind nur digitale

Speichermedien, die allerdings auch zur Speicherung digitalisierter analoger Luftbilder nötig sind. Abgesehen vom Speicherplatz „onboard“ gibt es keinen kostenverursachenden Faktor, der die Erstellung von digitalem, hochredundantem Bildmaterial (bis 90% Überdeckung in Flugrichtung) beeinflusst.

- (+) Filmverzug: Der bei photographischen Aufnahmen auftretende Filmverzug aufgrund mechanischer Beanspruchung der Filmfolie oder aufgrund von Temperatureinflüssen während der Entwicklung entfällt bei digitalen Aufnahmen.
- (+) Die Herstellung von Kopien digitaler Aufnahmen kann ohne Qualitätsverlust erfolgen, während die Kopie von analogen Aufnahmen praktisch immer mit Qualitätsverlusten behaftet ist.
- (+) Spektrale Auflösung:
  - \* Ein photographisches Luftbild ist auf maximal 3 Filmschichten beschränkt (3 spektrale Kanäle), während bei digitalen Aufnahmesystemen theoretisch keine Beschränkung der Anzahl der Kanäle besteht.
  - \* Spektrale Bandbreiten können bei digitalen Sensoren sowohl enger als auch strenger abgegrenzt werden, während bei photographischen Luftbildern keine Trennung zwischen den einzelnen Kanälen möglich ist.
  - \* Die Möglichkeit der Aufnahme eines größeren Bereichs des elektromagnetischen Spektrums.
- (+) Geringeres Kornrauschen. Digitale Aufnahmen weisen durch Wegfall der Körnigkeit der Filmschicht deutlich geringeres Rauschen auf, was sich auf automatische Analyseverfahren positiv auswirkt.
- (+) Panchromatische und multispektrale Informationen (zum Beispiel RGB oder Infrarot) können gemeinsam aufgenommen werden. Dadurch entstehen keine zusätzlichen Kosten für Filmmaterial.
- (+) Im Falle von flächenhaften digitalen Aufnahmesystemen kann die innere Geometrie (Lage des Bildhauptpunktes, Brennweite, radialsymmetrische und andere Verzerrungen, Position jedes CCD Sensors innerhalb der Brennebene) durch Kalibrierung im

Labor bestimmt werden. Die digitalen Bilder können dann entsprechend der inneren Geometrie korrigiert werden.

- (-) Trotz Einsparungen bei Filmmateriel und Filmentwicklungskosten belaufen sich die Kosten von Befliegungen mit digitalen Kameras meist im Bereich von analogen Befliegungen oder sind gar noch höher.
- (-) **Ultracam<sub>D</sub>-spezifisch:** Probleme bezüglich nicht immer stabiler innerer Geometrie zwischen Laborbedingungen (Kalibrierung) und Flugbedingungen. Systematische Unterschiede zwischen verschiedenen Messtagen wurden nachgewiesen (siehe Honkavaara [2005] und Jacobsen [2007]).

Grundsätzlich betrifft diese Problematik fast alle digitalen Aufnahmesysteme, bei denen Teilbilder einzelner flächenhafter Sensoren zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Aus diesem Grund geht der aktuelle Trend in der Digitalphotogrammetrie vermehrt in die Richtung einer projektbegleitenden bzw. in situ Kalibrierung der Sensoren (siehe Cramer [2009]).

### *Digitales Farbbild - Bildfusionierung (pansharpening)*

Bei hochauflösenden digitalen Luftbilddaten stehen meist verschiedene Produkte zur Verfügung:

- hochauflösender panchromatischer Kanal
- multispektrale Kanäle mit etwas geringerer Auflösung

Die Idee bei der Bildfusionierung ist die Ausnutzung der spezifischen Vorteile der einzelnen Kanäle. Die Auflösung des panchromatischen Kanals wird mit der Farbinformation des multispektralen Kanals zu einem hochauflösenden Multispektralbild vereint. Dieses Prinzip wird auch zur Erstellung von hochauflösenden multispektralen Satellitenbilddaten verwendet. Zur Durchführung der Bildfusionierung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Gängige Methoden sind zum Beispiel die multiplikative Fusionierung (Brovey Transformation) oder die Fusionierung mittels Wavelets. Hirschmugl et al [2005] beschreiben die



## Kapitel 2

einzelnen Fusionierungsmethoden und untersuchen unter anderem inwiefern sich die unterschiedlichen fusionierten Bilder unterscheiden. Die Eignung für eine visuelle Interpretation und weitere digitale Auswertungen wurde getestet. Der Vergleich des digitalen panchromatischen Kanals mit dem fusionierten Bild zeigt, dass die Qualität in Bezug auf die durchgeführten Tests in der Studie gleich ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die fusionierten Bilddaten qualitativ besser bzw. mindestens gleichwertig mit digitalisierten analogen Photographien sind (aus Perko [2005]).

Abbildung 2.8 zeigt anhand eines Bildbeispiels die Ausgangsdaten und das Ergebnis der Bildfusionierung:

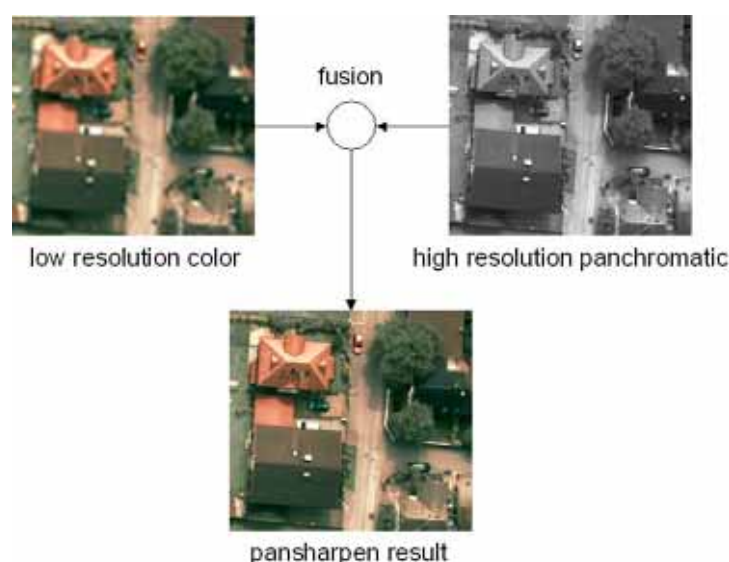


Abbildung 2.8: Bildfusionierung Perko [2005]

### *Untersuchungen der Bildqualität*

Einen Vergleich von eingescannten analogen Luftbildern und digitalen Luftbildern in Bezug auf ihre Eigenschaften und Qualität findet man bei Perko [2005]. Perko untersuchte die Qualität der Bilder in Bezug auf ihre geometrische Genauigkeit, ihr Kantenverhalten (Unschärfe in den Kantenbereichen), ihr Rauschverhalten und ihr Verhalten bei einer automatischen Klassifizierung. Er kam zum Schluss, dass der panchromatische Kanal und das fusionierte Bild gleichartige

## *Kapitel 2*

Eigenschaften bezüglich ihrer Qualität aufweisen. Der Vergleich mit analogen Farbbildern zeigt, dass fusionierte Bilder qualitativ besser oder zumindest gleich gut sind.

Honkavaara et al [2005] machten ebenfalls Vergleiche zwischen analogem Bildmaterial (aufgenommen mit der RC20) und digitalen Ultracam<sub>D</sub> Luftbildern. Für diese Studie standen zahlreiche, sich überschneidende Bildstreifen aus verschiedenen Flughöhen und Messtagen zur Verfügung.

Bezüglich radiometrischer Qualität sind die Ultracam<sub>D</sub> Daten den analogen Bildern überlegen. Probleme wurden bezüglich der inneren Bildgeometrie festgestellt (siehe Kapitel 3.2.2). Ohne die Verwendung von zusätzlichen Parametern im Bündelblockausgleich wird die erreichte Höhengenaugkeit mit 0.08-0.15‰ der Aufnahmeentfernung angegeben. Durch die Verwendung von zusätzlichen Parametern können Honkavaara et al die Höhengenaugkeit auf 0.06-0.07‰ der Objektentfernung steigern, was die erwartete Genauigkeit immer noch leicht überschreitet (siehe Tabelle 2.3). Die zusätzlichen Parameter wirkten sich hauptsächlich auf die Höhengenaugkeit aus. Die festgestellte Lagegenauigkeit entsprach in beiden Fällen der erwarteten Genauigkeit von 2-4 µm im Bild. Im Vergleich dazu wurden für die RC20 für die Höhengenaugkeit 0.03-0.04‰ der Objektentfernung, und für die Lagegenauigkeit 2-3 µm im Bild ermittelt. Im Zuge der Studie wurden im Fall der Ultracam<sub>D</sub> leichte Performanceunterschiede zwischen den verschiedenen Messtagen nachgewiesen. Innerhalb eines Tages bzw. Fluges konnten keine Unterschiede bezüglich Performance nachgewiesen werden.

Ähnliche Untersuchungen machte Jacobsen [2007]. In dieser Studie wurden digitale Luftbilder der DMC von Intergraph Z/I und der Ultracam<sub>D</sub> genauer untersucht. Durch eine detaillierte Auswertung mittels Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung wurden systematische Bildfehler, bedingt durch die Zusammensetzung der Subbilder festgestellt (siehe Kapitel 3.2.2). Durch manuelle Messungen wurden Höhenfehler im Bereich von 25 cm festgestellt, entgegen der erwarteten Fehler im Bereich von 10 cm. Zurückgeführt wurden diese großen Fehler auf die unterschiedliche innere Geometrie zwischen Laborbedingungen und

Flugbedingungen, verursacht durch äußere Einflüsse wie Vibrationen und Temperaturschwankungen. Die Untersuchungen zeigten, dass die festgestellten Abweichungen von der Laborkalibrierung innerhalb eines Fluges stabil sind, und durch Bündelblockausgleich mit Selbstkalibrierung, unter Verwendung von zusätzlichen Parametern weitgehend kompensiert werden können.

## **2.6 Höhenmodelle in bewaldeten Gebieten**

Die Höhe der Vegetation stellt für die Forsteinrichtung einen Eingangsparameter für die Ableitung wichtiger forstwirtschaftlicher Kennzahlen dar. Zur Ermittlung dieser Höhen wird sowohl ein Geländemodell als auch ein Oberflächenmodell benötigt (vgl. Abbildung 1.1). Die maßgebenden flugzeug- und satellitengetragenen Sensorsysteme, deren Daten aktuell zur Erstellung genauer digitaler Gelände- und Oberflächenmodelle verwendet werden, lassen sich in folgende Kategorien aufteilen:

- Optische Aufnahmesysteme (Luft- und Satellitenbilder)
- Laser Aufnahmesysteme (auch Laserscanner oder LiDAR Systeme) (LiDAR=light detection and ranging)
- Radarbasierte Aufnahmesysteme (synthetic aperture radar) (RADAR=radio detection and ranging)

### **Optische Daten (Luft- und Satellitenbilder)**

Die Erstellung eines Oberflächenmodells aus Luft- oder Satellitenbilddaten erfolgt nach den, in den Kapiteln 2.1 bis 2.4 sowie im Kapitel 5, vorgestellten Verfahren der Photogrammetrie. Die Erstellung eines Geländemodells in bewaldeten Bereichen ist kaum möglich, da in optischen Daten kaum Bodensicht vorhanden ist. Die Kombination mit einem Geländemodell aus Laserscannerdaten ermöglicht die Berechnung der für die Forstwirtschaft wichtigen Vegetationshöhen.

## **Laserscanner**

Für luftgestützte Anwendungen kommen zwei verschiedene Systeme zum Einsatz, die in den folgenden Absätzen näher erläutert werden.

### *Diskrete Laserscanner*

Moderne Scanner dieser Bauart können pro ausgesandten Laserpuls meist neben dem ersten und letzten Echo noch dazwischenliegende Echos aufzeichnen (siehe Abbildung 2.9). Das erste Echo ist jene Reflexion wo der Laserpuls das erste Mal reflektiert wird (zum Beispiel an einem Ast). Das letzte Echo entspricht der Reflexion am Boden. Zur Erstellung eines Geländemodelles wird deshalb das letzte Echo verwendet. Befliegungen während der Wintermonate gewährleisten eine bessere Durchdringung der Laserstrahlen durch fehlende Belaubung. Zur Erstellung von Oberflächenmodellen wird hingegen das erste Echo verwendet. Im Gegensatz zu Befliegungen für die Geländemodellerstellung werden diese Daten in der Regel bei voller Belaubung der Vegetation aufgenommen. Das Aufnahme Prinzip eines diskreten Laserscanners wird bei Betrachtung von Abbildung 2.9 deutlich:

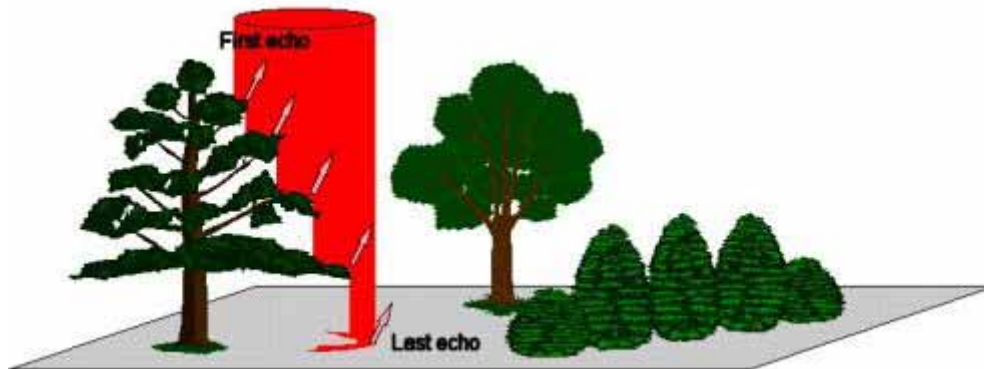


Abbildung 2.9: Laserscanner Mehrfachreflexion (Quelle: [www.toposys.de](http://www.toposys.de))

### *Full-waveform Laserscanner*

Diese relativ neuen Laserscanner ermöglichen die Speicherung des gesamten Echos (full-waveform). Diese Echos erlauben weitergehende Analysen über die vertikalen Strukturen entlang des ausgesendeten Laserstrahls. An dieser Stelle verweise ich auf Wagner [2007], der sich mit den Analysemethoden von full-waveform Daten beschäftigt.

### Vergleich zwischen Bilddaten und Laserscanner

Jedes dieser Systeme hat seine systemspezifischen Vor- und Nachteile. In den folgenden zwei Tabellen (Tabelle 2.4 und Tabelle 2.5) werden die spezifischen Vor- und Nachteile Bild- und Laserscannerdaten gegenübergestellt:

Vorteile Bilddaten	Nachteile LiDAR
hohe Redundanz	keine unmittelbare Redundanz
reich an semantischen Information	semantische Informationen schwer herzuleiten
hohe Dichte an Positionsinformationen entlang Bruchlinien von Objekten	wenig Information entlang Bruchlinien
Lagegenauigkeit ist höher als die Höhengenaugigkeit	Lagegenauigkeit ist schlechter als die Höhengenaugigkeit

Tabelle 2.4: Vorteile Photogrammetrie, Nachteile LiDAR (aus Kim [2006])

Nachteile Bilddaten	Vorteile LiDAR
sehr wenig Positionsinformationen entlang homogener Oberflächen	sehr dichte Positionsinformationen entlang homogener Oberflächen
Datenerhebung ist prinzipiell an gute Sichtverhältnisse (Tag) gebunden	Datenerhebung am Tag oder in der Nacht möglich
3D Koordinaten erst nach Bildkorrelation und Vorwärtschnitt	„direkte“ Messung von 3D Koordinaten
Höhengenaugigkeit ist schlechter als die Lagegenauigkeit	Höhengenaugigkeit ist besser als die Lagegenauigkeit

Tabelle 2.5: Nachteile Photogrammetrie, Vorteile LiDAR (Kim [2006])

### Synthetic aperture radar (SAR)

Bei einem SAR-System handelt es sich um ein Fernerkundungssystem, dass den Frequenzbereich der Mikrowellen nutzt. Da es sich um ein

## Kapitel 2

aktives System handelt, kann es auch in der Nacht verwendet werden. Ein SAR-System kann nahezu bei jedem Wetter eingesetzt werden, da Mikrowellen durch Regen, Nebel oder anderen Trübungen der Atmosphäre nur wenig abgeschwächt werden.

Zur Gelände- bzw. Oberflächenmodellerstellung nutzt man die verschiedenen verfügbaren Frequenzbereiche (siehe Tabelle 2.6). Je länger die Wellenlänge ist, desto tiefer kann das Signal in die Vegetation eindringen. Deshalb werden zur Erstellung von Geländemodellen zum Beispiel das L oder das P-Band genutzt, während zur Erstellung von Oberflächenmodellen kurzwellige Frequenzbänder wie das X-Band genutzt werden. Die Methoden zur Ableitung dieser Modelle werden sind die Stereo Radargrammetrie und die Interferometrie (inSAR).

Das Grundprinzip der Radargrammetrie ist jenem der Stereo Photogrammetrie sehr ähnlich. Für eine Herstellung eines Oberflächenmodelles sind mindestens zwei Bilder mit unterschiedlicher Aufnahmegeometrie (anderer Orbit) notwendig. In den Intensitätsbildern werden mittels Bildkorrelation korrespondierende Punkte gesucht.

Im Gegensatz dazu nutzt die Interferometrie die Phasendifferenzen der Signale. Dazu sind mindestens zwei Aufnahmen vom (möglichst) selben Aufnahmeort notwendig. Mittels Interferometrie ist es möglich sowohl Oberflächen- als auch Geländemodelle zu erstellen.

Weitere Informationen und verschiedene Techniken zur Erstellung dieser Modelle in Waldbereichen können bei Gutjahr [2006] nachgelesen werden.

Frequenzband	Frequenzbereich	Wellenlänge
X-Band	8-12.5 [GHz]	2.4-3.75 [cm]
L-Band	1-2 [GHz]	15-30 [cm]
P-Band	0.3-1 [GHz]	30-100 [cm]

Tabelle 2.6: Beispiele für typische SAR Frequenzbänder

## 3 Ultracam<sub>D</sub>

### 3.1 Einleitung

Mit der Ultracam<sub>D</sub> brachte die Firma Vexcel im Jahr 2003 ihren ersten großformatigen digitalen Luftbildsensor auf den Markt. Die ersten Befliegungen mit der Ultracam<sub>D</sub> fanden ebenfalls im Jahr 2003 statt. Inzwischen gehört Vexcel zur Microsoft Corporation und hat mit UltracamX und UltracamX<sub>p</sub> bereits die Nachfolger der Ultracam<sub>D</sub> präsentiert. Das grundlegende Sensordesign der Nachfolgekameras beruht auf jenem der Ultracam<sub>D</sub>, allerdings mit verbesserter Auflösung. Abbildung 3.1 zeigt eine Ultracam<sub>D</sub> inklusive benötigtem Zubehör.



Abbildung 3.1: Ultracam<sub>D</sub> (Quelle: Vexcel)

Eine umfangreiche Zusammenstellung verschiedener aktueller klein-, mittel-, und großformatiger digitaler Luftbildkameras, geordnet nach Aufnahmeprinzip, findet man bei Petrie [2007].

## 3.2 Kamerabeschreibung

### 3.2.1 Technische Daten

In nachstehender Tabelle findet sich eine Auflistung der wichtigsten technischen Daten der Ultracam<sub>D</sub>:

<b>panchromatisch</b>	
Bildgröße	11500*7500 [Pixel]
physikalische Pixelgröße	9 [µm]
physikalische Größe der Brennebene	103.5*67.5 [mm]
Brennweite <sup>2</sup>	100 [mm]
Blende	f=1/5.6
Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung	55 [°]
Öffnungswinkel in Flugrichtung	37 [°]
<b>Farbe</b>	
Kanäle	4 Kanäle – RGB & NIR
Bildgröße	4008*2672 [Pixel]
physikalische Pixelgröße	9 [µm]
Brennweite	28 [mm]
Blende	f=1/4.0
Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung	65[°]
Öffnungswinkel in Flugrichtung	46[°]
Verschlusszeit	1/500 bis 1/60 [s]
FMC	mittels TDI
maximales FMC Leistungsvermögen	50 [Pixel]
Pixelauflösung bei 500 Meter Flughöhe	5 [cm]
Ultracam <sub>D</sub> Technical Specifications, <a href="http://www.vexcel.co.at">www.vexcel.co.at</a> (2005)	

Tabelle 3.1: Technische Spezifikation der Ultracam<sub>D</sub>

### 3.2.2 Design

Das Design der Ultracam<sub>D</sub> beruht, wie in Abbildung 3.1 ersichtlich, insgesamt auf acht Linsen, wobei die vier mittleren Linsen für die Aufnahme des panchromatischen Kanals und die vier äußeren Linsen für

---

<sup>2</sup> Für die Auswertung wurde eine Brennweite von 101.4 mm verwendet.  
(laut Informationen von Vexcel Graz)



### Kapitel 3

die Aufnahme der multispektralen Kanäle (Rot, Grün, Blau, nahes Infrarot) zur Verfügung stehen (siehe Tabelle 3.2).

Kanal	Wellenlängen
PAN	390-690 nm
Blau	390-530 nm
Grün	470-660 nm
Rot	570-690 nm
NIR	670-940 nm

Tabelle 3.2: Spektrale Auflösung Ultracam<sub>D</sub>

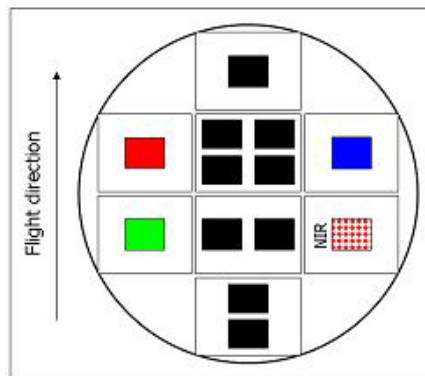


Abbildung 3.2: CCD Arrays Ultracam<sub>D</sub> (aus Perko [2004])

Die Anordnung der flächigen CCD-Sensoren hinter den einzelnen Linsen ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Die vier mittleren Linsen enthalten insgesamt neun CCD-Arrays, es stehen somit neun Einzelbilder für die Generierung des hochauflösenden panchromatischen Gesamtbildes zur Verfügung. Diese einzelnen Bilder müssen in einem Nachbearbeitungsschritt zusammengefügt werden, der in der Literatur als „Image Stitching“ bezeichnet wird. Sofern sich die Kamerageometrie zwischen Kalibrierung und Befliegung nicht verändert hat, erhält man ein geometrisch korrektes Gesamtbild.

Weitere Details bezüglich des „Image-Stitching“-Prozesses können bei Perko [2004] nachgelesen werden, der sich umfassend mit dieser Problematik befasst.

### Kapitel 3

Abbildung 3.3 zeigt den genauen schematischen Ablauf einer Ultracam<sub>D</sub>-Aufnahme: Die mittleren vier Linsen nehmen zeitsynchronisiert (synoptic exposure) den panchromatischen Kanal auf. Durch diese Technik wird gewährleistet, dass sich die vier Linsen zum Aufnahmezeitpunkt jeweils am selben Ort befinden. Es befindet sich zwar jede dieser vier inneren Linsen an verschiedenen Positionen innerhalb der Brennebene, dennoch haben sie dasselbe Blickfeld während der Aufnahme. Die vier äußeren Linsen zur Aufnahme der multispektralen Kanäle werden ebenfalls in Flugrichtung zeitversetzt aufgenommen.

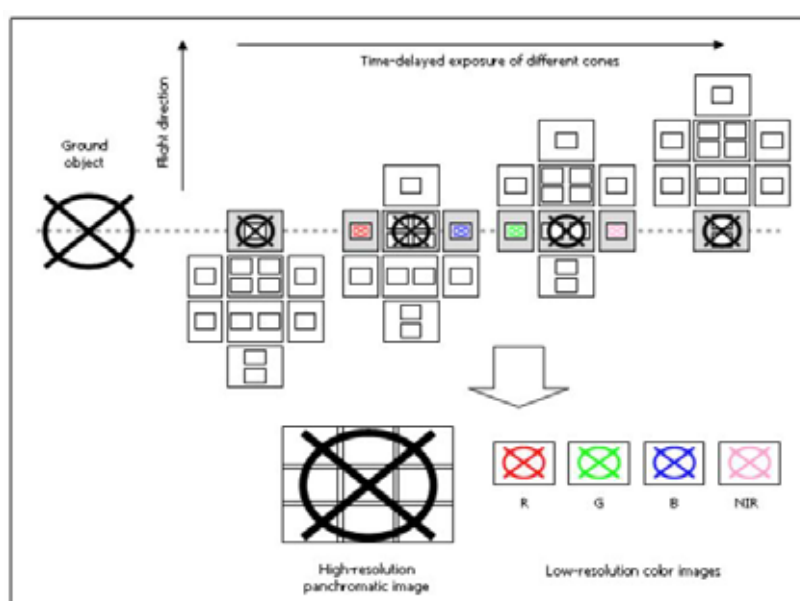


Abbildung 3.3: Aufnahmeprinzip Ultracam<sub>D</sub> (aus Perko [2004])

In der folgenden Tabelle werden die Verarbeitungsstufen der Ultracam<sub>D</sub> Daten aufgelistet.

Level_00	Rohe Bildsegmente aus den CCD Sensoren ausgelesen
Level_0	Verifizierte Bildsegmente
Level_1	Bildsegmente radiometrisch korrigiert und neu geordnet für effizientes zusammenfügen (Stitching)
Level_2	Zusammengefügte Bilder, Farbbilder separat
Level_3	Fertiges fusioniertes Farbbild (Falschfarbe oder Infrarot)

Tabelle 3.3: Verarbeitungsstufen der Ultracam<sub>D</sub> Daten (Gruber [2004])

### 3.2.3 Kompensation der Vorwärtsbewegung

Durch die Kompensation der Vorwärtsbewegung wird ermöglicht, bei schlechteren Belichtungsverhältnissen die Belichtungszeit zu vergrößern und auftretende Bewegungsunschärfen zu unterdrücken.

Bei einer Fluggeschwindigkeit von 70 Meter pro Sekunde beträgt diese Vorwärtsbewegung während der Belichtungsphase 56 Zentimeter (siehe Leberl [2003]).

Die theoretische Bildwanderung kann aus dem formalen Zusammenhang in (3.1) berechnet werden (Kraus [2004]).

$$u_{th} = v \cdot t \cdot \frac{c}{h} \quad (3.1)$$

$v$  ... Fluggeschwindigkeit  
 $t$  ... Belichtungszeit

$\frac{c}{h}$  ... Bildmaßstab

Bei analogen Kamerasystemen erfolgt diese Kompensation durch eine rechnergesteuerte Verschiebung der Filmrolle während der Belichtungsphase. Die Kompensation ist abhängig von der Flugzeugbewegung.

Bei digitalen Aufnahmesystemen, die mit flächigen CCD Sensoren arbeiten, wird die Kompensation mittels *Time-Delay and Integration* (TDI) realisiert. Dabei werden in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit (vergleiche Formel (3.1)) die Ladungszustände innerhalb einer Belichtung getaktet. Die nach dem ersten Takt ausgelesenen Ladungszustände werden jenen nach dem zweiten, dritten, usw. Takt zu einem einzigen Ladungszustand für das jeweilige Pixel zusammengeführt. Die Ladungszustände des zweiten Takts werden einer Detektorzeile entnommen, die jener des ersten Taktes, in Flugrichtung, benachbart ist. Innerhalb der Belichtungszeit müssen also alle Elemente des CCD-Feldes mehrmals ausgelesen werden, was hohe Anforderungen an den Auslesevorgang stellt (siehe Kraus [2004] und Kapitel 3.7.4).

# 4 Testdaten und Referenzdaten

## 4.1 Testgebiet

Die in dieser Studie gemachten Untersuchungen haben im Testgebiet Burgau stattgefunden. Das Gebiet mit einer durchschnittlichen Seehöhe von 300 Metern liegt etwa 50 Kilometer östlich Graz und gehört zum Stadtforst Burgau.

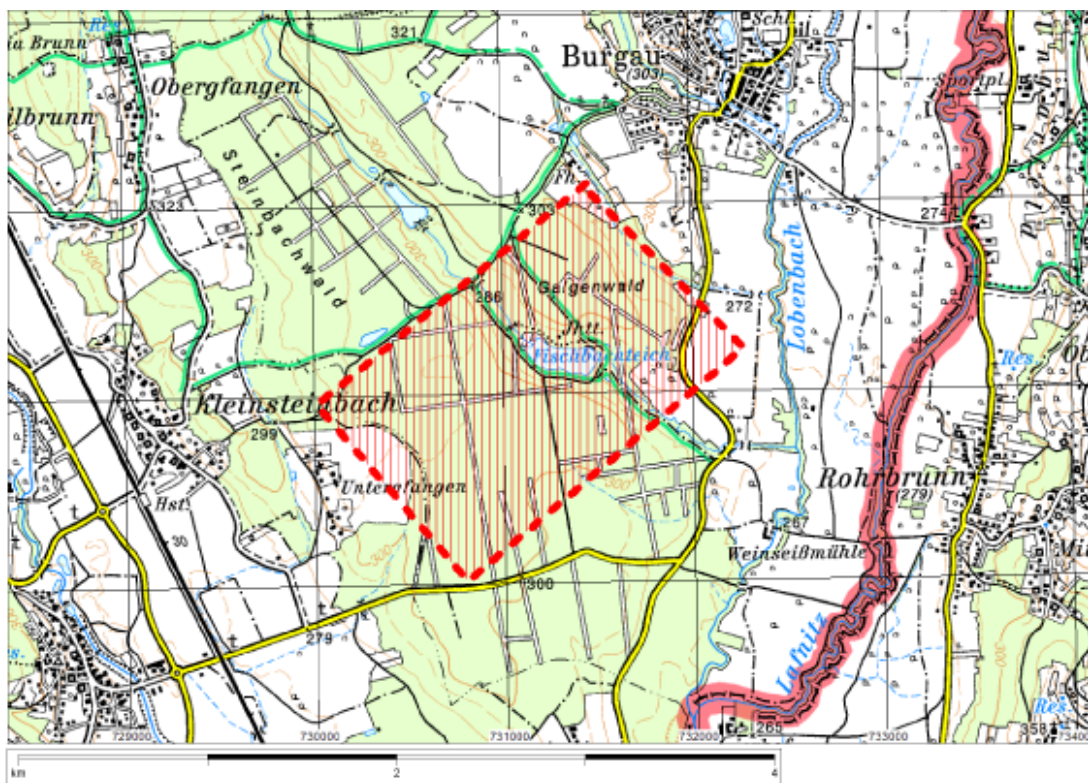


Abbildung 4.1: Testgebiet Burgau (Austrian Map digital © BEV)

Das Gebiet setzt sich zum Großteil aus unterschiedlich strukturierten bewaldeten Flächen zusammen. Die Waldbestände sind größtenteils Nadel- und Laubholz Mischbestände in verschiedenster Mischung und

## Kapitel 4

Struktur. Aus den gemessenen Testflächen ergibt sich folgende Verteilung der Baumarten:

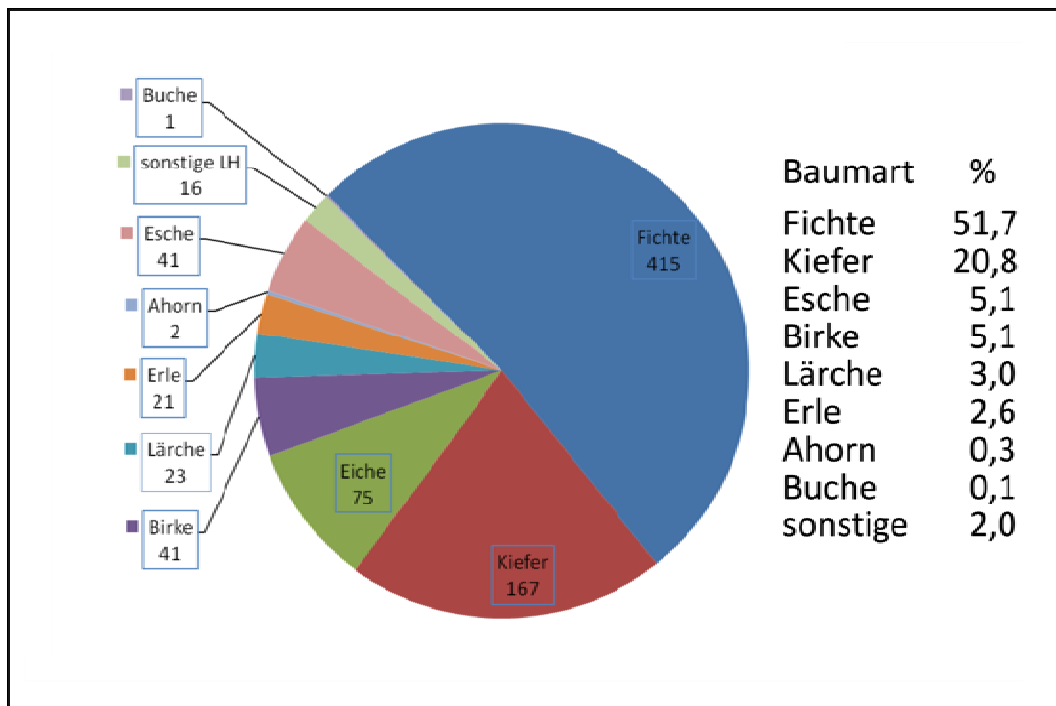


Abbildung 4.2: Baumartenverteilung

## 4.2 Ultracam<sub>D</sub> Testdaten

Für die vorliegende Arbeit stand ein Streifen sogenannter „level 3“-Daten (fusionierte Daten aus PAN und nahem Infrarot) aus einer Befliegung mit der Ultracam<sub>D</sub> der Firma Vexcel zur Verfügung (siehe Tabelle 3.3).

Flugdatum	21.07.2004
Flughöhe	2080 [m]
Flughöhe über Grund	~1780 [m]
Längsüberdeckung	~90%
Pixelauflösung panchromatisch	~15 [cm]
Pixelauflösung multispektral	~55 [cm]
Radiometrische Auflösung	12 bit

Tabelle 4.1: Daten der Ultracam<sub>D</sub> Befliegung Burgau

## Kapitel 4

Bei einer mittleren Flughöhe von 1780 m über Grund und einer Brennweite von 100 Millimetern ergibt sich aus der formalen Beziehung in (2.4) ein Bildmaßstab  $B_M$  von 1:17800. Im Fall des digitalen Luftbildes hat dieser Bildmaßstab aber keine große Bedeutung. Vielmehr kommt es auf die erreichte Bodenauflösung (GSD, ground sampling distance) an. Bei einer physischen Auflösung von neun Micrometern ergibt sich eine GSD von etwa 15 Zentimetern für den panchromatischen Kanal (vgl. Leberl [2003]).

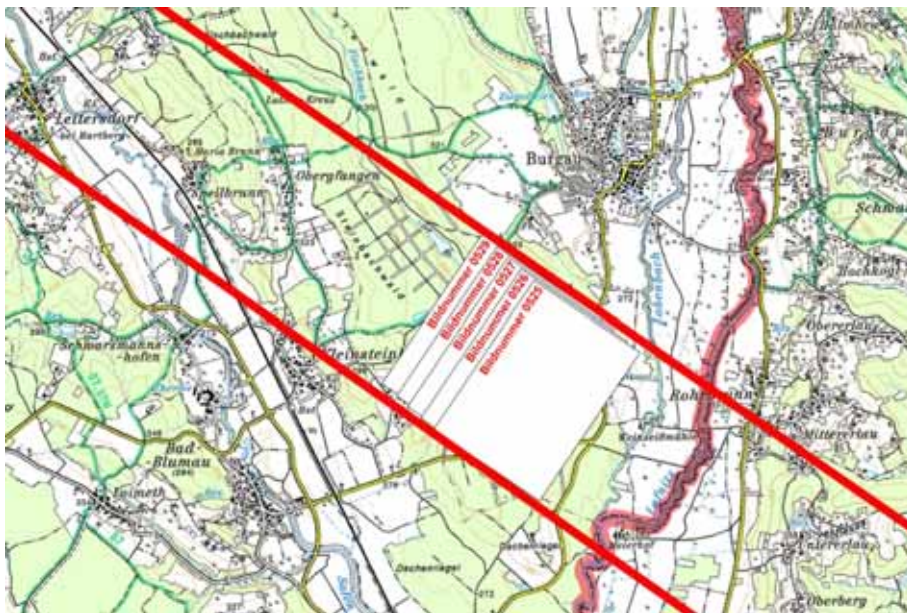


Abbildung 4.3: Bildserie (Austrian Map Digital © BEV)

Aus dem gesamten Streifen der Befliegung wurden insgesamt fünf benachbarte Bilder für die Untersuchung ausgewählt. Die Abbildung 4.3 zeigt schematisch den Ausschnitt des gewählten Streifens inklusive der Bildnummern aus der Befliegung, welche in weiterer Folge zur Identifizierung der einzelnen Bilder verwendet werden.

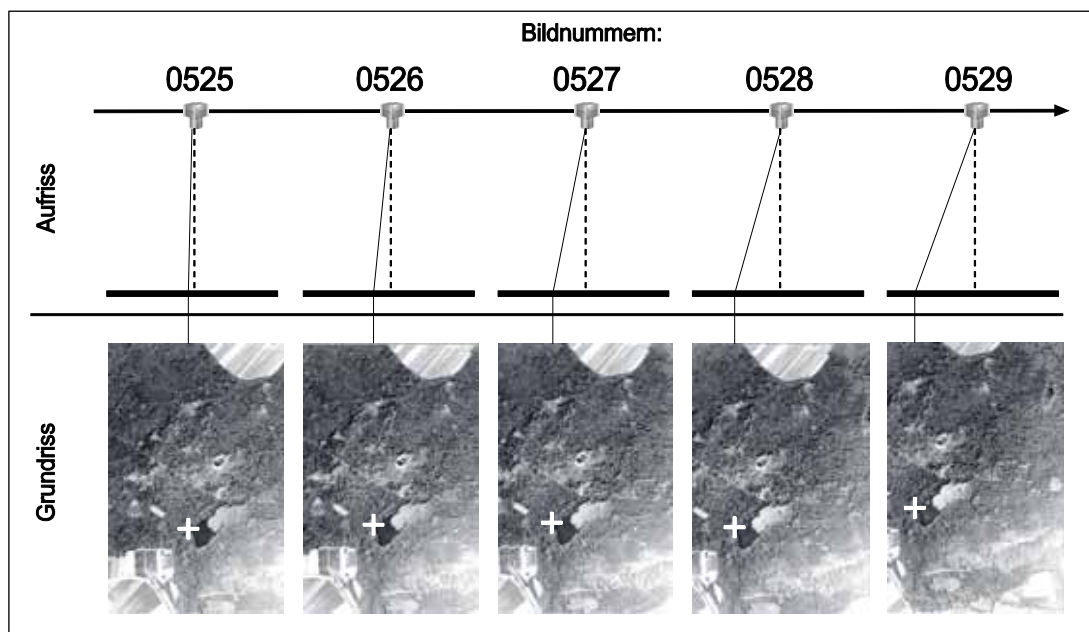


Abbildung 4.4: Ultracam<sub>D</sub> Aufnahme Szenario

Abbildung 4.4 zeigt die fünf ausgewählten Bilder und das entstehende Szenario. Die äußersten Bilder 0525 und 0529 weisen eine Überdeckung von 60 Prozent in Flugrichtung auf. Direkt benachbarte Bilder überdecken sich um 90 Prozent. Die detaillierten Überdeckungen der gewählten Stereopartner sowie die daraus resultierenden Basis- zu Höhenverhältnisse können aus Tabelle 4.2 abgelesen werden:

Bildnummern		Überdeckung	B/H Verhältnis
0525	0526	90%	0.06
	0527	80%	0.11
	0528	70%	0.17
	0529	60%	0.22

Tabelle 4.2: Basis / Höhenverhältnisse der Testdaten

Der räumliche Abstand zwischen zwei benachbarten Aufnahmeorten beträgt etwa 100 Meter, die Flughöhe über Grund liegt bei 1780 m. Eine Abschätzung der zu erwartenden Lage- und Höhengenaugigkeiten sowie Überlegungen zur Schnittgüte finden sich im Kapitel 5. Sämtliche

Vergleichs- und Referenzdaten lagen in Landeskoordinaten vor, weshalb eine Datumstransformation von WGS84<sup>3</sup> nach MGI<sup>4</sup> nötig war.

### Koordinatentransformation

Für eine Transformation der gemessenen Koordinaten im System WGS84 in das Landessystem standen regionale Transformationsparameter zur Verfügung. Zur lokalen Anpassung der Transformationsparameter wurden im Nahbereich um das Testgebiet idente Punkte gemessen (siehe Abbildung 4.5). Kriterien für die Auswahl der GPS-Punkte waren die Nähe zum Testgebiet eine möglichst freie Sicht in alle Richtungen (wenig Abschattungen). Die GPS-Messungen erfolgten in Form von statischen Beobachtungen während insgesamt drei Sessionen. Abbildung 4.6 zeigt einen der Passpunkte während der statischen Messung.

Für eine Lösung des Gleichungssystems mit sieben Unbekannten Transformationsparametern würden theoretisch zwei Vollpasspunkte (je 3 Koordinaten) und eine einzelne Koordinate eines dritten Punktes reichen. In der Praxis werden normalerweise mehr als diese drei Punkte gemessen, um eventuelle schlechte Punkte detektieren zu können. Die daraus resultierende Überbestimmung wird mittels Parameterausgleichs gelöst. Im Testgebiet Burgau wurden fünf idente Punkte gemessen. Für sämtliche GPS-Messungen am 02.12.2004 und 10.12.2004 standen Zweifrequenzreceiver der Firma *Novatel* vom Typ *DL4+* in Verbindung mit Antennen des Typs *GPS-702-GGL* zur Verfügung. Technische Informationen zum verwendeten Equipment können auf der Homepage des Herstellers eingesehen werden (<http://www.novatel.com>).

Die Abbildung 4.5 zeigt die Verteilung der Passpunkte um das Testgebiet.

---

<sup>3</sup> World Geodetic System 1984

<sup>4</sup> Militärgeographisches Institut Österreich



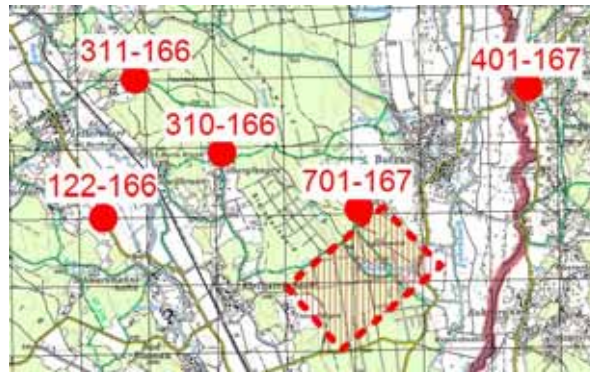


Abbildung 4.5: Passpunktverteilung (Datengrundlage: Austrian Map digital © BEV)



Abbildung 4.6: Feldarbeiten: Passpunktmessung zur Bestimmung von Transformationsparametern (KT 122-166)

### Sensororientierung

Eine gute äußere Orientierung der Luftbilder ist unerlässlich, vor allem wenn, wie hier, Vergleiche mit anderen Fernerkundungsdaten erstellt werden.

Da zum vorliegenden Ultracamp<sub>D</sub> Bildmaterial keine Informationen über Lage und Position der Aufnahmezentren in Form von GPS/INS Daten zur Verfügung standen, wurde zur Georeferenzierung der indirekte Ansatz über die Aerotriangulation gewählt (siehe Kapitel 2.4.1).

## Kapitel 4

Die notwendigen Bildpasspunkte für die Aerotriangulation wurden nachträglich gesucht, und mit GPS (relative Positionierung) koordinativ bestimmt. Dazu wurden in den vorliegenden Bildern eindeutig erkennbare Punkte gesucht, welche bei einer Feldbegehung auf ihre Tauglichkeit als Bildpasspunkt sowie als GPS Punkt beurteilt wurden. Mehrere Faktoren sind für die Tauglichkeit als Bildpasspunkt maßgebend:

- Eindeutige und genaue Identifizierung des Punktes im Bild und in der Natur (Pixel- bzw. Subpixelgenauigkeit)
- Die Punkte müssen GPS tauglich sein (keine Abschattungen, usw.)

Im Nachhinein war es durchaus nicht einfach, im bewaldeten Testgebiet eine ausreichende Anzahl geeigneter Punkte eindeutig zu identifizieren und in den Bilddaten entsprechend genau zu messen. Die Einmessung der ausgewählten Passpunkte erfolgte mittels GPS (relative Positionierung). Dazu wurde etwa in der Mitte des Testgebietes ein Punkt vermarktet, der als Referenzpunkt für alle weiteren GPS-Messungen dienen soll. Die koordinative Bestimmung der Referenzstation erfolgte mittels mehrmaliger statischer GPS-Messung (siehe Abbildung 4.7 (b)).



(a) Baumstumpf

(b) Referenzstation

Abbildung 4.7: Passpunktmessung zur Sensororientierung des Flugstreifens Burgau.

## Kapitel 4

Ein Beispiel für einen Bildpasspunkt ist in Abbildung 4.7 (a) bzw. Abbildung 4.8 zu sehen. Es handelt sich um einen Baumstumpf der im linken Übersichtsbild etwas rechts der Bildmitte als kleiner Fleck zu erkennen ist. Durch den Infrarotkanal in den Ultracamdaten können vegetationslose Bildbereiche (Forststrassen, Baumstümpfe, etc.) gut erkannt werden.

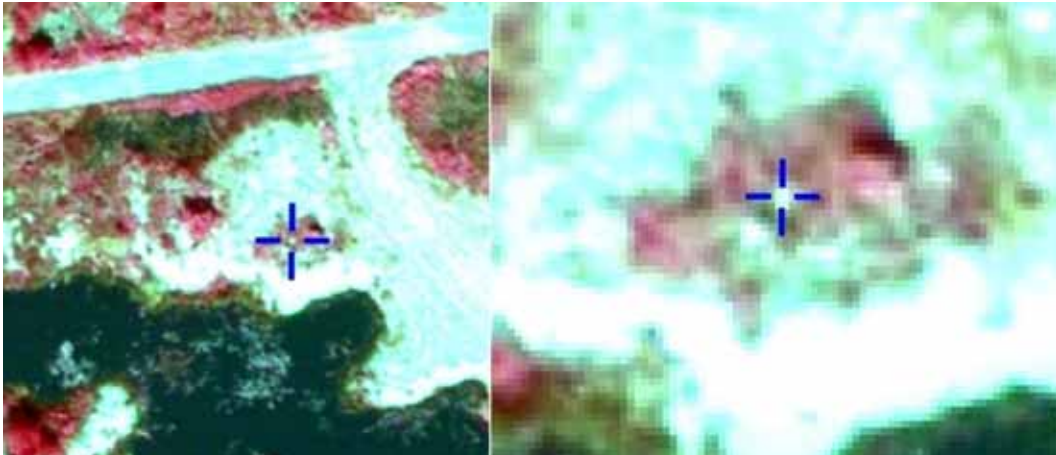


Abbildung 4.8: Übersicht und Detail eines Passpunktes

Mit Hilfe der gemessenen Passpunkte und den bekannten Sensorparametern der verwendeten Ultracam<sub>D</sub> konnte die äußere Orientierung der Einzelbilder bestimmt werden. Diese Orientierungsparameter dienten in weiterer Folge als Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung. Details zur Aufsetzgenauigkeit der Bündelblockausgleichung sind in Kapitel 5.1 ersichtlich.

## 4.3 Laserscanner

Für das Testgebiet Burgau standen verschiedene Gelände- und Oberflächenmodelle Laserscannerbefliegungen zur Verfügung. Diese Daten dienen in der vorliegenden Studie zur teilweise zur Evaluierung der aus den Ultracam-Daten erstellten Oberflächenmodelle. Folgende Laserscannermodelle aus Befliegungen in den Jahren 1999 und 2005 standen für das Testgebiet Burgau zur Verfügung:

<b>„First pulse“ Befliegung 1999</b>	
Scannertyp	Toposys Falcon I
Messgenauigkeit des Falcon I	~ 15-20 cm
Flugdatum	23.08.1999
Flughöhe	850 [m]
Pulsrate	83000 [Hz]
Pulsdichte	4 Punkte / m <sup>2</sup>
<b>„Last pulse“ Befliegung 1999</b>	
Scannertyp	Toposys Falcon I
Flugdatum	26.03.1999
Pulsrate	83000 [Hz]
Flughöhe	850 [m]
Pulsdichte	4 Punkte / m <sup>2</sup>
<b>„First pulse“ Befliegung 2005</b>	
Scannertyp	Toposys Falcon I
Flugdatum	07.07.2005
Flughöhe	~1000 [m]
Pulsrate	83000 [Hz]
Pulsdichte	4 Punkte / m <sup>2</sup>

Tabelle 4.3: Laserscannerbefliegungen 1999 und 2005

### 4.3.1 Beurteilung der Genauigkeit von Laserscanner Geländemodellen in bewaldeten Gebieten

Das verwendete Geländemodell aus dem Jahr 1999 wurde in der Diplomarbeit von Herrn Dipl. Ing. Wack R. verifiziert. Dazu wurden drei etwa 100 x 30 m große repräsentative Flächen terrestrisch vermessen (Tachymeteraufnahme). Aus den Punktwolken der terrestrischen Vermessungen wurden Geländemodelle erstellt (Delauney-Triangulation). Eine Differenzbildung mit dem Laserscannermodell ergab folgende Statistiken im Bereich der Testflächen:

Fläche	BG_1	BG_2	BG_3
Minimum [m]	-0.97	-0.51	-1.52
Maximum [m]	0.92	0.91	0.75
Mittelwert [m]	-0.08	-0.11	-0.04
Standardabweichung [m]	0.16	0.11	0.16
Varianz[m]	0.02	0.01	0.03
Anteil Bodenpunkte [%]	~ 85	~ 82	~ 60

Tabelle 4.4: Höhengenaugigkeit des Laserscannermodelles im Bereich von drei Testflächen, Wack [2000]

Wack kommt zum Schluss, dass bei einer ausreichenden Anzahl von Bodenpunkten (>35%) qualitativ gute Geländemodelle erstellt werden können. Die Standardabweichung in solchen Bereichen liegt etwa bei ein bis zwei Dezimetern (siehe Tabelle 4.4). Die Größenordnung der angegebenen Abweichungen entspricht etwa jener Genauigkeit, die mit dem verwendeten Laserscanner erreicht werden kann (siehe Tabelle 4.3). In sehr dichten Waldbeständen, in denen keine ausreichende Anzahl an Bodenpunkten (<35%) vorliegt, muss abhängig von der Geländebeschaffenheit auch mit größeren Abweichungen gerechnet werden (siehe Abbildung 4.9 (a) und (b)).

Zu einer Überschätzung der Geländehöhe kann es auch bei sehr dichtem Unterholz kommen, wenn das Gelände dadurch komplett verdeckt wird (siehe Abbildung 4.9 (c)). Hier können die letzten Echos fälschlicherweise dem Gelände zugeordnet werden (Lefsky [2002]).

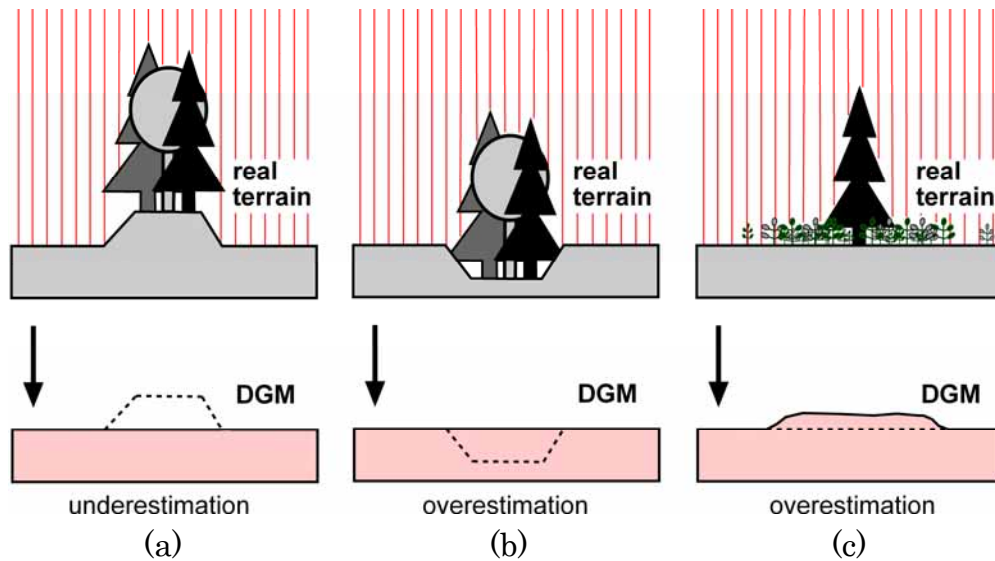


Abbildung 4.9: Unter- und Überschätzung des digitalen Geländemodelles

### 4.3.2 Beurteilung der Genauigkeit von Laserscanneroberflächenmodellen über Wald

Trifft die Ausleuchtungszone (footprint) des Laserpulses den Baumwipfel nicht, kommt es zu einer Unterschätzung der Oberfläche (siehe Abbildung 4.10). Das Ausmaß der Unterschätzung ist von der Pulsdichte und der Größe des Footprints abhängig. Eine Unterschätzung der Baumhöhe tritt auch auf, wenn der Baumwipfel zwar vom Laserpuls getroffen wird, aber zu wenig reflektierendes Material bietet. Der Scanner kann gültiges reflektiertes Signal empfangen (Lefsky [2002]). Generell wird das Oberflächenmodell im Wald unterschätzt.

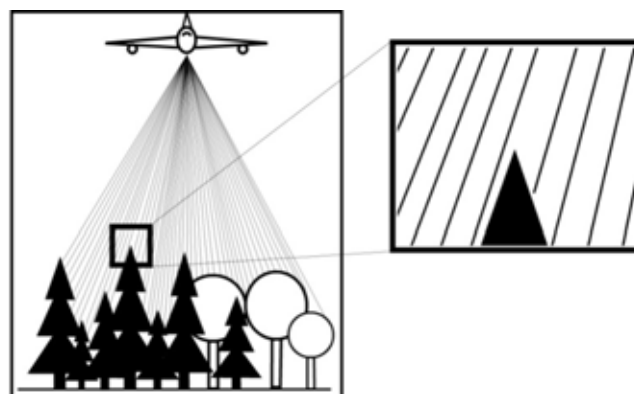


Abbildung 4.10: Laserpulse - Baumwipfel

## Kapitel 4

Bei der Bestimmung von Baumhöhen durch Differenzbildung von Gelände- und Oberflächenmodell fließen auch die Fehler des Geländemodelles ein.

In der Studie Wack [2003] wurden sowohl Über- als auch Unterschätzungen der Baumhöhen festgestellt. Tabelle 2.1 enthält den Mittelwert und die Standardabweichung zwischen dem Laserscannermodell und den im Feld gemessenen Referenzhöhen. Auffällig ist die leichte tendenzielle Überschätzung der Baumhöhen durch das Laserscannermodell.

Anzahl der Bäume	Mittelwert	Standardabweichung
82	0.69	1.24

Tabelle 4.5: Unterschied zwischen dem Höhen Laserscannermodell und den gemessene Referenzhöhen von Eukalyptusbäumen (aus Wack [2003])

Erklärt wurden die Effekte durch ein zu niedriges Geländemodell (siehe Abbildung 4.9 (a)) bzw. durch ein zu niedriges Oberflächenmodell (siehe Abbildung 4.10).

Laut Hyypä [2004] kommt es weitaus häufiger zu einer Unterschätzung der Baumhöhen als zu einer Überschätzung. Zusammenfassend wird diese Unterschätzung durch folgende Faktoren beeinflusst (Hyypä [2004]):

- Dichte und Abdeckung der Laserpulse
- Algorithmus zur Berechnung des Kronenmodells
- Algorithmus zur Berechnung des Geländemodell
- Dichte und die Höhe des Unterholzes
- Empfindlichkeit der verwendeten Scanner
- Schwellwertalgorithmus in der Signalverarbeitung
- Eindringtiefe der Laserpulse in die Vegetation
- Baumart und Baumform

Aufgrund der Abhängigkeit von Sensorsystem, Flughöhe, Waldtyp und den verwendeten Algorithmen, ist es schwierig einen universellen Korrekturfaktor für die Unterschätzung zu finden. Innerhalb eines

Projektes (gleicher Sensor, gleiche Flughöhe) ist es aber möglich Korrekturfaktoren für unterschiedliche Baumarten zu finden.

## 4.4 Erhebung von Referenzdaten

Zur Verifikation der erstellten Oberflächenmodelle wurden in situ Referenzdaten erhoben. Die Referenzmessungen in Form von Probekreisen wurden gemeinsam mit Manuela Hirschmugl im Zeitraum vom 26.11.2004 bis 09.03.2005 durchgeführt. Auf 13 Testflächen wurden insgesamt 802 Einzelbäume erhoben. In ausgewählten Waldbeständen wurden repräsentative Testflächen mit einem Durchmesser von 50 Metern abgesteckt. In besonders jungen und dichten Beständen wurde der Durchmesser aufgrund der hohen Stammzahl auf 20 Meter reduziert. Alle Bäume innerhalb der abgesteckten Testflächen wurden lagemäßig eingemessen. Zusätzlich zur Lagebestimmung wurden die Parameter

- Baumhöhe
- Brusthöhendurchmesser (Baumstammdurchmesser in 1.3m Höhe)
- Baumart

erhoben.

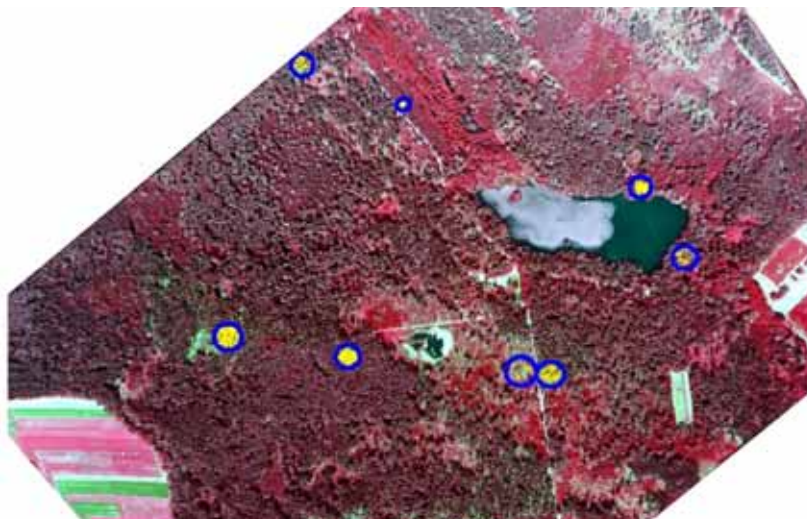


Abbildung 4.11: Übersicht der acht Testflächen innerhalb des Kernbereiches



#### 4.4.1 Lage und Höhenbestimmung der Einzelbäume

##### Lagebestimmung

Die koordinative Lagebestimmung der Einzelbäume wurde mittels Tachymeteraufnahme durchgeführt. Anschlusspunkte zur Bestimmung der Stationskoordinaten wurden mittels GPS (relative Positionierung) geschaffen. Zur Kontrolle der Lagegenauigkeit einzelner Bäume wurden 140 Bäume wiederholt koordinativ bestimmt. Ein Vergleich der Koordinaten zwischen der ursprünglichen Messung und der Kontrollmessung ergab eine mittlere Abweichung von 0.23 Meter, wobei ein einzelner Ausreißer von 12 m detektiert wurde (mit großer Wahrscheinlichkeit verursacht durch Probleme bei der reflektorlosen Distanzmessung). Unter Ausschließung des detektierten Ausreißers ergab sich eine mittlere Abweichung von 0.14 m. Die Größenordnung des Fehlers kann unter anderem auf die unterschiedliche Messkonstellation zwischen Erstaufnahme und Kontrollmessung zurückgeführt werden. Bei der Kontrollmessung war es nicht möglich, die zuvor verwendeten Instrumentenstandpunkte genau zu rekonstruieren, weil diese nicht permanent in der Natur markiert wurden, und die Kontrollmessungen an einem anderen Tag durchgeführt wurden. Bedingt durch die reflektorlose Entfernungsmessung, bei der jeweils die Rinde der Bäume angezielt wurde, konnte es deshalb zu Koordinatendifferenzen im Bereich des halben Stammdurchmessers kommen.

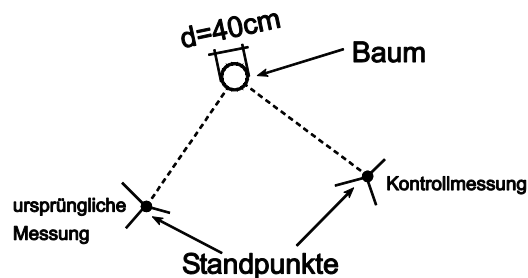


Abbildung 4.12: Konstellation Messung – Kontrollmessung

Die Lagegenauigkeit einzelner Bäume ist für diese und weiterführende Arbeiten ausreichend, wie im folgenden Text erläutert wird.

Verschiedene Studien (z. B. Fuchs [2003]) ergaben eine Lagedifferenz zwischen tachymetrisch aufgenommenen Koordinaten des Stammesfußes und photogrammetrisch bestimmten Koordinaten der Baumspitze von 2.2 Metern für Eichen und 2.7 Metern für Buchen. Heurich [2003] schreibt von 0.88 Metern Differenz für Nadelbäume und 1.54 Metern für Laubbäume. Abbildung 4.13 veranschaulicht die Problematik anhand einer typischen Situation.

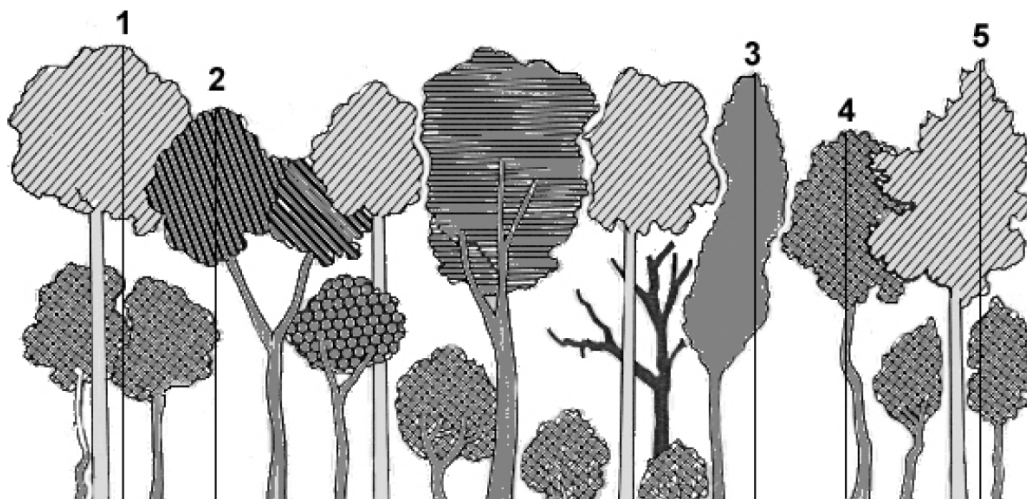


Abbildung 4.13: Lagemäßiger Vergleich zwischen Baumfußpunkt und höchstem Punkt der Baumkrone (aus Waldarbeitsschulen der Bundesrepublik Deutschland [1996]; abgeändert).

Eine Zuordnung von terrestrisch gemessenen Stammkoordinaten und Kronenspitzen aus dem Luftbild gestaltet sich schwierig. Die Lageunterschiede zwischen Stammfußpunkt und Kronenspitze machten eine Korrektur der tachymetrisch gemessenen Koordinaten notwendig, damit die Lage der Stämme mit den höchsten Punkten des Oberflächenmodelles bzw. Vegetationsmodelles übereinstimmte. Geht man von etwa 2.7 Metern maximaler Abweichung für Laubbäume aus (laut Fuchs), müsste ein möglicher Puffer von 5.4 Metern berücksichtigt werden. In dichten Waldbeständen würde dieser große Puffer zu mehrdeutigen Ergebnissen führen, und ist deshalb nicht einfach anzuwenden. Eine weitere hier angewandte Methode für die Zuordnung zwischen Stammfußpunkt und Kronenspitze ist eine sorgfältige manuelle Korrektur. Dazu wurden das Laserscanneroberflächenmodell, das erstellte DOM aus Luftbildern und True Orthophotos verwendet.



Abbildung 4.14: Feldarbeit: Einmessen von Probekreisen

### Baumhöhenmessung

Die Messung der Baumhöhen erfolgte mittels eines Vertex III des schwedischen Herstellers Haglofs ([www.haglofsweden.com](http://www.haglofsweden.com)), welcher nach demselben Prinzip arbeitet, wie die in der Forsteinrichtung üblichen Hypsometer. Das Messprinzip beruht auf der Bestimmung der Horizontalentfernung zum Baum und des Höhenwinkels zur Baumspitze. Die Höhe des Baumes erhält man durch Auflösung des zugehörigen rechtwinkligen Dreiecks (vgl. Abbildung 4.15).

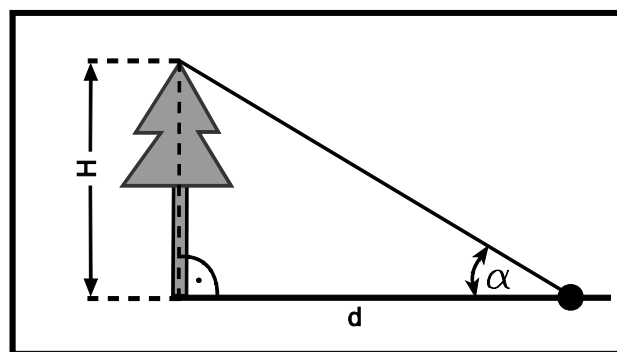


Abbildung 4.15: Prinzip Baumhöhenmessung (Hypsometer)

Genauigkeit Winkel	0,1 [°]
Genauigkeit Entfernung	1 [%] oder besser <sup>5</sup>

Tabelle 4.6: Spezifikation der Strecken- und Winkelgenauigkeit des Vertex III (Quelle: <http://www.haglofsweden.com>)

Nach Barron [2001] liefert der Vertex III, verglichen mit anderen nach dem gleichen Prinzip funktionierenden Messgeräten, die besten Ergebnisse. Die gemessenen Baumhöhen weichen um  $\pm 0.5\text{m}$  von der wahren Höhe ab.

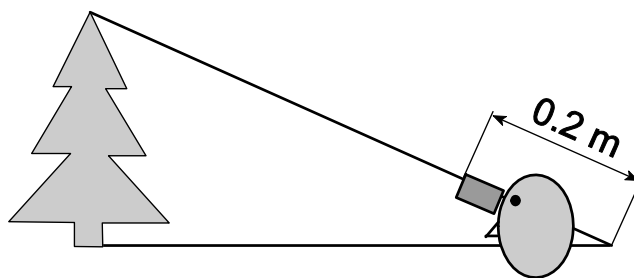


Abbildung 4.16: Offset

Für die besseren Ergebnisse des Vertex III spricht unter anderem eine zusätzliche automatische Korrektur eines Offsets im Bezug zum virtuellen Drehpunkt (siehe Abbildung 4.16). Der Offset entsteht durch Kippung bzw. Neigung des Kopfes zwischen den Visuren zu Baumwipfel und Bodenpunkt. Werksseitig ist dieser Offset mit 0.2 m eingestellt, und wird durchschnittlich mit 0.2 bis 0.3 m angegeben (Quelle: <http://www.haglofsweden.com>).

Die Berechnung der Baumhöhe erfolgt mit der Formel:

$$H = \tan \alpha \cdot d \quad (4.1)$$

Durch einfache Fehlerrechnung ergibt sich aus Formel (4.1) folgender mathematischer Zusammenhang für den zu erwartenden Fehler in der Baumhöhenbestimmung:

---

<sup>5</sup> Sofern die Entfernungsmessung des Vertex III durch einfache Kalibrierung im Feld justiert wird, beträgt der zu erwartende Messfehler für die Entfernung sogar unter einem Prozent (Quelle: <http://www.haglofsweden.com>).

$$\Delta H = \sqrt{\left(\frac{d}{\tan^2 \alpha} \cdot \Delta \alpha\right)^2 + (\tan \alpha \cdot \Delta d)^2} \quad (4.2)$$

Aus Formel (4.2) wird deutlich, dass der Fehleranteil der Entfernung ( $\Delta d$ ) über die Tangensfunktion des Höhenwinkels eingeht. Bei einem Winkel von beispielsweise  $45^\circ$  würde ein zusätzlicher Streckenfehler von 20 cm direkt in den Höhenfehler einfließen (unter Annahme eines Offsets von 20-30cm).

Pyysalo [2002] gibt für Hypsometermessungen ebenfalls eine typische erreichbare Genauigkeit von  $\pm 0.5$  m an, allerdings mit dem Zusatz, dass der zu erwartende Höhenmessfehler für Bäume größer 25 m durchaus bis zu einem Meter betragen kann.

Obwohl das Prinzip bei Hypsometermessungen sehr einfach ist, wird hier kurz auf Aspekte eingegangen, die Probleme bereiten können. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 4.17 typische Situationen bei der Baumhöhenmessung dargestellt.

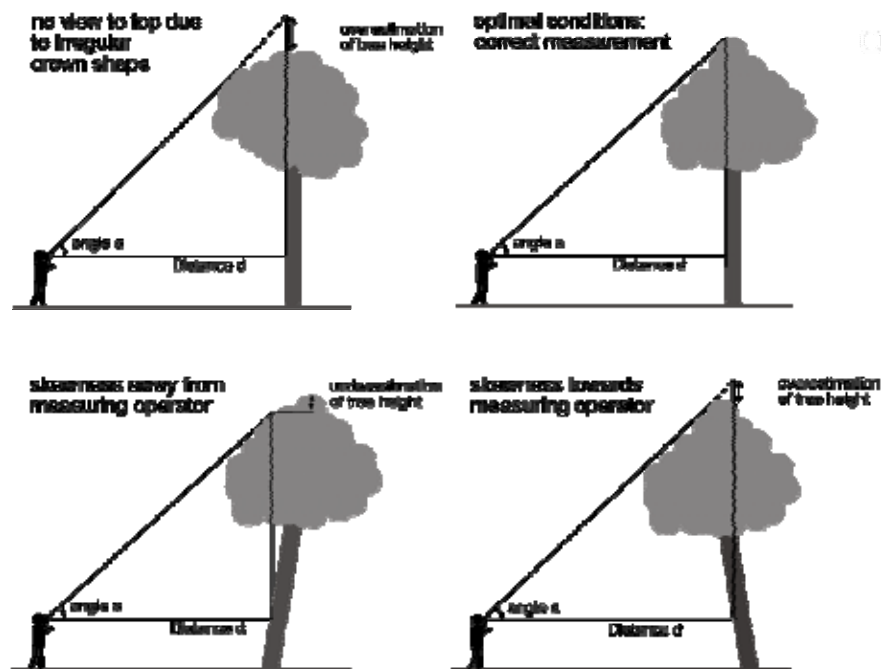


Abbildung 4.17: Probleme bei der Baumhöhenmessung (aus [Hirschmugl 2008])

## *Kapitel 4*

Die Schwierigkeit, eine möglichst genaue Baumhöhe zu messen, liegt weniger an den technischen Möglichkeiten des Vertex III, Entfernung und Winkel in adäquater Genauigkeit zu messen (vergleiche Tabelle 4.6), sondern vielmehr darin, den richtigen höchsten Punkt eines Baumes anzuzielen. Oft ist es vom Boden gar nicht möglich, den höchsten Punkt eines Baumes eindeutig zu erkennen, in anderen Fällen liegt der höchste Punkt des Baumes nicht auf der selben Lotlinie wie der Bodenpunkt zu dem die Entfernung gemessen wurde. In diesem Fall kommt es zu einer Über- bzw. Unterschätzung der gemessenen Baumhöhe.

Durch Messung der Bäume von verschiedenen Seiten und entsprechender Mittelbildung kann die zu erwartende Genauigkeit gesteigert werden. Weitere Informationen über Vergleiche von Baumhöhenmessungen von verschiedenen Seiten können bei Hirschmugl [2008] nachgelesen werden.

# 5 Oberflächenmodellerstellung

Mit der Erstellung eines digitalen Oberflächenmodells aus Luftbildern sowie auch aus Satellitenbildern impliziert man häufig ein einzelnes Stereobildpaar. Dieser Gedanke ist in der klassischen Photogrammetrie begründet, wo es aufgrund von technischen Möglichkeiten und dem Fehlen von hochgradig überlappendem Bildmaterial oft gar nicht möglich war, mehr als zwei Bilder für eine Stereoauswertung zu verwenden. In der hier vorliegenden Studie wurde jedes Objekt innerhalb eines Flugstreifens aus fünf verschiedenen Winkeln (d.h. in fünf Bildern) aufgenommen.

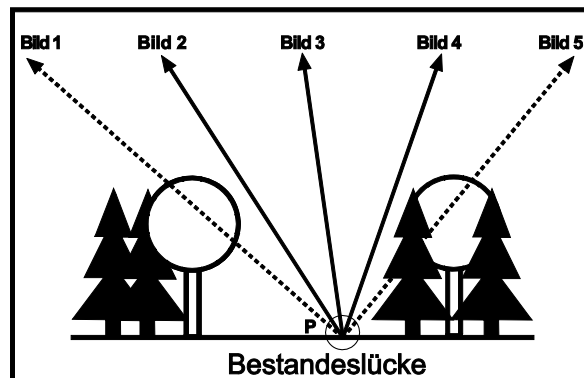


Abbildung 5.1: Multiple Projektionsstrahlen, Ofner [2006]

Abbildung 5.1 zeigt schematisch, welche Vorteile die größere Überlappung der Bilder bringt. Die verschiedenen Blickwinkel bieten Vorteile gegenüber einem klassischen Stereobildszenario (Projektionsstrahlen 1 und 5) mit 60% Längsüberlappung. Würden nur die Projektionsstrahlen 1 und 5 zur Verfügung stehen, so könnte der Objektpunkt  $P$  wegen der Abschattung durch Bäume nicht rekonstruiert werden. Stehen wie in diesem Beispiel mehrere Projektionsstrahlen aus verschiedensten Blickwinkeln zur Verfügung, können die räumlichen Koordinaten des Objektpunktes  $P$  bestimmt werden. Zur Rekonstruktion

eines Punktes muss dieser in mindestens zwei Bildern sichtbar sein. Im gezeigten Beispiel können die Sehstrahlkombinationen  $2 \cap 3$ ,  $3 \cap 4$  und  $2 \cap 4$  zur Rekonstruktion von  $P$  verwendet werden.

Abbildung 5.2 zeigt schematisch den Arbeitsablauf zur Erstellung eines digitalen Oberflächenmodelles. Aus den ausgeglichenen äußeren Orientierungen der Bilder und den flächenhaft berechneten Parallaxen aus der Bildkorrelation kann mittels eines räumlichen Vorwärtsschnittes ein Oberflächenmodell berechnet werden.

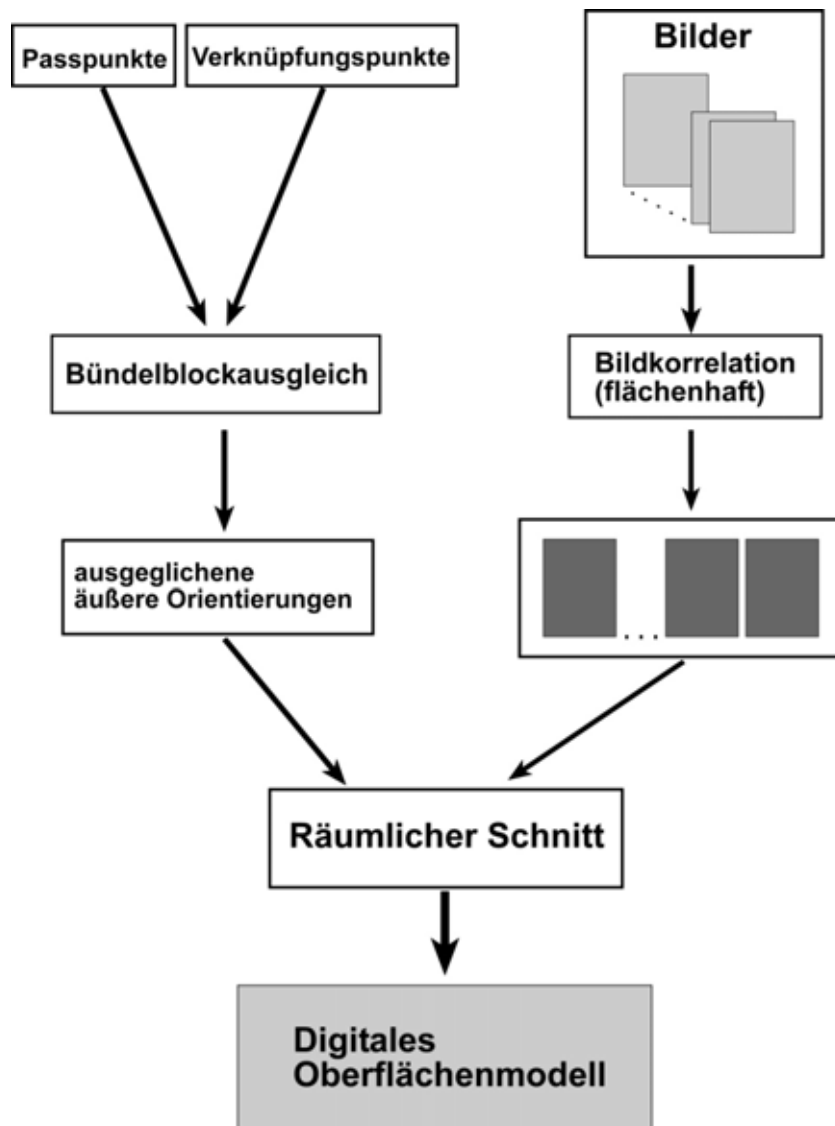


Abbildung 5.2 : Höhenmodellerstellung: Schematischer Ablauf



## 5.1 Bündelblockausgleich

Zur Berechnung der äußeren Orientierung der Bilder konnte aufgrund des Fehlens von GPS/INS Daten nur der indirekte Weg über die Bündelblockausgleichung gewählt werden. Als Bezugssystem wurde das Landessystem (hier BMN34) gewählt.

Meridian	östl. Länge des Mittelmeridians	False Easting	False Northing
M28	E10°20'	150000 [m]	-5000000 [m]
M31	E13°20'	450000 [m]	-5000000 [m]
M34	E16°20'	750000 [m]	-5000000 [m]

Tabelle 5.1: Bundesmeldenetz Österreich

Zur Verfügung stehende Informationen für den Blockausgleich:

- Manuell gemessene Bildkoordinaten für die Verknüpfungspunkte
- Manuell gemessene Bildkoordinaten und terrestrische Koordinaten der Passpunkte
- Näherungswerte der äußeren Orientierungselemente
  - \* Position: mittels ÖK50, Flughöhe bekannt
  - \* Lage: Normalfallbilder angenommen

Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft, welche Beobachtungen bei der Blockausgleichung in die Berechnung eingehen. In der Ausgleichung fand keine spezielle Gewichtung der einzelnen Beobachtungen statt.

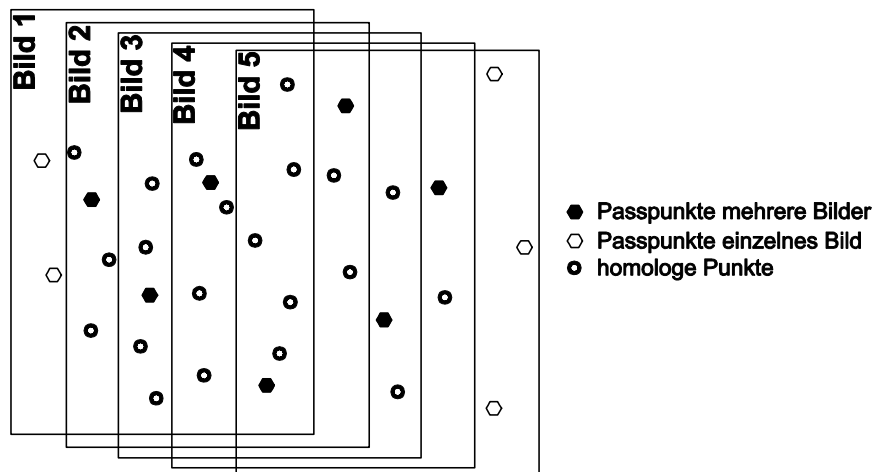


Abbildung 5.3: Übersicht verwendeter Punkte bei der Blockausgleichung.

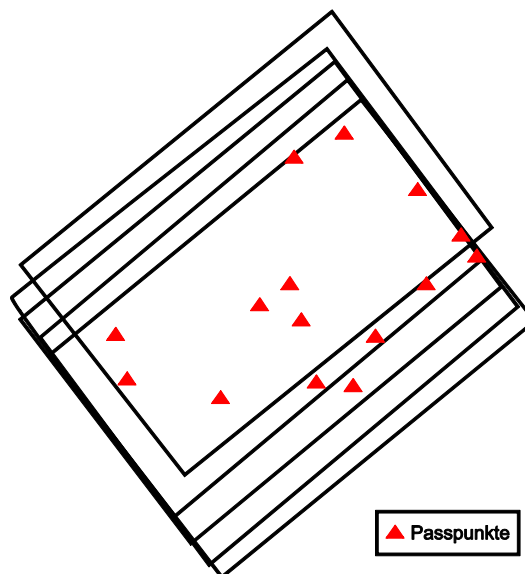


Abbildung 5.4: Passpunktverteilung im Testgebiet Burgau

Bild	Passpunkte	Verknüpfungspunkte
0525	10	19
0526	14	19
0527	15	17
0528	14	16
0529	14	11

Tabelle 5.2: Anzahl der Pass- und Verknüpfungspunkte

Abbildung 5.5 zeigt eine schematische Darstellung der Blockausgleichung im Programmpaket RSG. Als Input dienen Verknüpfungspunkte, Passpunkte und Näherungswerte der äußeren Orientierungselemente. In einem Ausgleichsverfahren nach kleinsten Quadraten werden die Strahlenbündel bildhaft so lange verschoben und gedreht, bis die entsprechenden Strahlen an den Passpunkten möglichst gut zusammentreffen und an den Verknüpfungspunkten möglichst gut zum Schnitt kommen („Set up and Optimisation“). Die Elemente der Äußeren Orientierung werden so für alle Bilder gleichzeitig bestimmt („Optimised Model“).

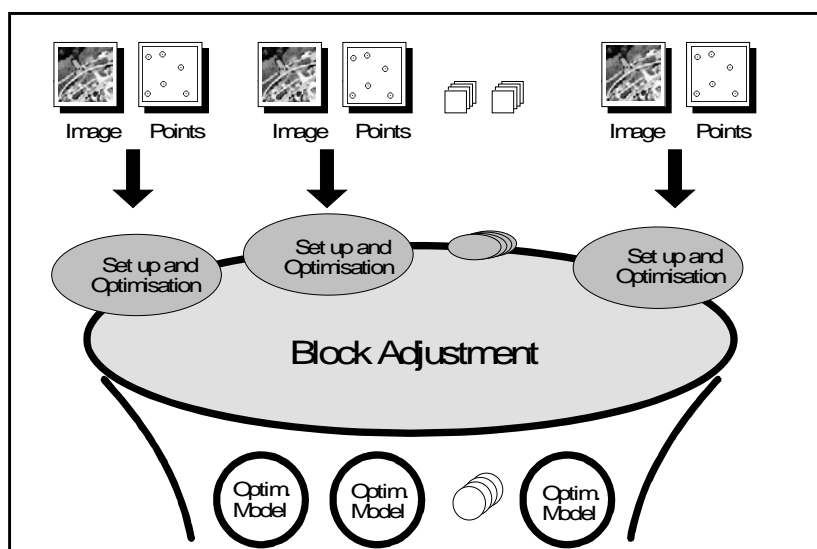


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Blockausgleichung (RSG Software Dokumentation)

In Tabelle 5.3 sind die ausgeglichenen äußeren Orientierungen zusammengefasst:

Bild	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]
0525	731212.13	220910.86	2099.99	-0.179	-0.008	229.686
0526	731158.12	221016.33	2084.68	-1.268	-0.089	229.852
0527	731102.31	221110.64	2081.03	-0.441	-0.647	229.752
0528	731055.83	221186.30	2079.51	-2.203	0.921	230.538
0529	731001.81	221253.21	2051.99	1.789	-1.028	230.754

Tabelle 5.3: Ausgeglichenene äußere Orientierungen

### Aufsetzgenauigkeit

Die folgende Tabelle zeigt die apriori abgeschätzte Genauigkeit der Oberflächenrekonstruktion. Die Fehler wurden aus dem räumlichen Vorwärtsschnitt zu den bekannten Passpunkten, unter Verwendung der ausgeglichenen Parameter der äußeren Orientierung, berechnet.

	Ost	Nord	Höhe
RMS [m]	<b>0.15</b>	<b>0.13</b>	<b>0.70</b>
Min [m]	-0.28	-0.11	-1.05
Max [m]	0.19	0.28	0.78

Tabelle 5.4: A priori Aufsetzgenauigkeit durch die Blockausgleichung

Die im Verhältnis zur Lagegenauigkeit schlechte Genauigkeit in der Höhe kann unter anderem auf die kleinen Basis / Höhenverhältnisse (B/H Verhältnis) zurückgeführt werden. Das größte B/H Verhältnis beträgt 0.22 (siehe Tabelle 4.2). Der Faktor zwischen Lage- und Höhengenaugigkeit beträgt dementsprechend etwas 1:5. Die angesprochene Problematik der systematischen Verzeichnungen der Bilddaten und die Schwierigkeit, optimale idente Bildpasspunkte zu finden, beeinflussen natürlich auch die erreichbare Genauigkeit. Eine entsprechende Selbstkalibrierung<sup>6</sup> zur Korrektur möglicher Verzeichnungen durch Einführen zusätzlicher Parameter wurde nicht vorgenommen.

## 5.2 Bildkorrelation

### 5.2.1 Bildregistrierung

Zur Verkleinerung der Suchfenster für die flächenhafte Bildkorrelation wurden die einzelnen Bilder auf ein Referenzbild transformiert. Als Transformationsvorschrift diente ein affines Polynom, das aus den

---

<sup>6</sup> Zum Zeitpunkt der Auswertung waren noch keine Informationen bezüglich Kalibrierungsproblemen bei digitalen Luftbildkameras bekannt.

vorhandenen Pass- und Verknüpfungspunkten berechnet wurde. In Abbildung 5.6 sind beispielhaft Such- und Referenzbild sowie der entsprechende Suchbereich graphisch dargestellt. Die Größe der Residuen in Zeilen- und Spaltenrichtung aus der Berechnung des affinen Polynoms dienen als Maß für die Definition der Größe des entsprechenden Suchbereiches. Aufgrund der vereinfachten affinen Transformationsvorschrift ist eine Ausdehnung des Suchbereiches in Spalten- und Zeilenrichtung sinnvoll. Die Grauwerteberechnung während des Resamplingschrittes erfolgte mittels kubischer Faltung.

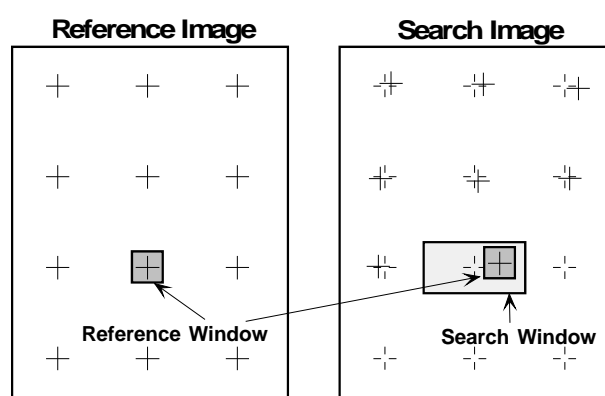


Abbildung 5.6: Prinzip Bildkorrelation (RSG Software Dokumentation)

Anmerkung: Eine Möglichkeit den Suchbereich weiter einzuschränken, wäre die Herstellung einer echten epipolaren Geometrie zwischen den perspektiven Bildern. Der Suchbereich für die Bildkorrelation kann so auf eine Gerade (den Kernstrahl) reduziert werden.

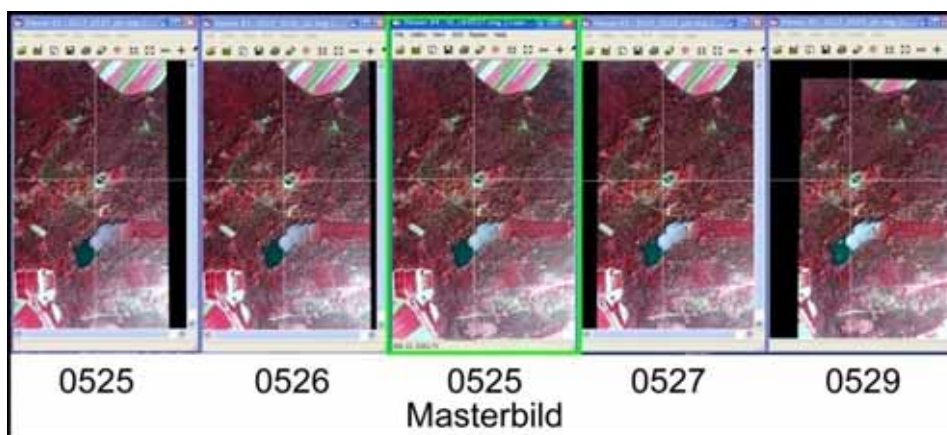


Abbildung 5.7: Registrierte Ultracam Bilder

Abbildung 5.7 zeigt das Ergebnis der Bildregistrierung: Alle beteiligten Bilder sind auf das zentrale Masterbild hin transformiert worden.

## 5.2.2 Flächenhafte Bildkorrelation

Für die automatische Bildkorrelation der Ultracam<sub>D</sub>-Daten wurde ein am Joanneum Research entwickelter hierarchischer Feature-Vektor-Ansatz verwendet (vgl. Paar [1992] und Caballo-Perucha [2003]).

Bei dem gewählten hierarchischen Ansatz werden ausgehend vom Originalbild Bildpyramiden berechnet, wobei das ursprüngliche Bild den untersten Level darstellt. Beginnend beim obersten Level, der entsprechend große Suchbereiche für jedes Pixel verwendet, werden nacheinander die einzelnen Stufen der Pyramide korreliert. Die Ergebnisse jedes Pyramidenlevels werden als Prädiktion für das jeweils nächste Level verwendet, um die Suchfenstergröße und somit die Rechenzeit möglichst gering zu halten. Dieser hierarchische Ansatz führt zu gesteigerter Robustheit und Effizienz des Korrelationsprozesses.

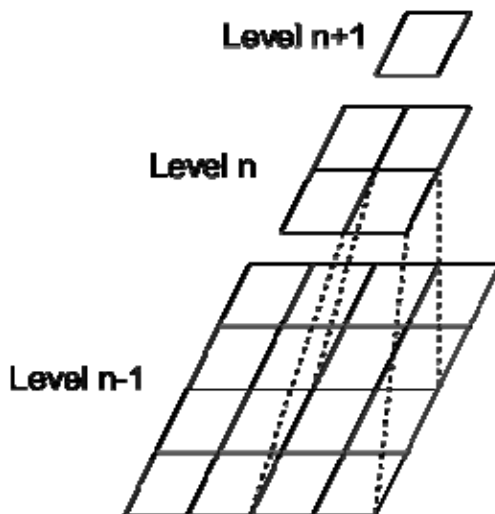


Abbildung 5.8: Hierarchischer Ansatz (© Joanneum Research)

Die Methode der merkmalsbasierten Korrelation kann im Gegensatz zu anderen Korrelationsmethoden mehrere Merkmale (Features) miteinander kombinieren. Die Idee, die hinter diesem sogenannten „feature vector matching“ (FVM) steckt, ist die Kombination mehrerer

Bildmerkmale. Ein Merkmal oder Feature ist ein numerischer Wert, aus der die Umgebung eines Pixels hergeleitet wird. Bei einem Großteil dieser Merkmale beim FVM handelt es sich um Faltungen und Varianzfilter.

Berechnet man für alle Pixel eines Bildes ein spezielles Merkmal, erhält man als Ergebnis ein Merkmalsbild. Bei der Verwendung mehrerer Merkmale wird für jedes einzelne Merkmal ein solches Merkmalsbild erzeugt. Aus diesen Merkmalsbildern wird in weiterer Folge für jedes Bildpixel ein Merkmalsvektor  $\vec{m}$  erstellt, in dem die entsprechenden Merkmale gesammelt werden.

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ m_n \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Dieser Merkmalsvektor (Referenzvektor) des Referenzbildes wird mit allen Vektoren innerhalb eines definierten Suchbereichs im Suchbild verglichen, um ein Korrelationsergebnis (match) zu erhalten. Dazu wird die Feature Distanz zwischen den beiden Vektoren berechnet, die ein Maß für die Ähnlichkeit der Merkmale darstellt. Zur Bestimmung der Feature Distanz wird jede Komponente der Vektoren gewichtet und der Euklidische Abstand berechnet:

$$|\vec{m}_{ref} - \vec{m}_{such}| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [(\vec{m}_{i\ ref} - \vec{m}_{i\ such}) \cdot g_i]^2}{\sum_{i=1}^m g_i^2}} \quad (5.2)$$

Durch lineare Interpolation der benachbarten Featurevektordistanzen wird der beste Suchvektor in Subpixel-Genauigkeit bestimmt.

Ein sehr wichtiges Merkmal stellt der Kreuzkorrelationskoeffizient dar, welcher früher für sich allein zur Bildkorrelation benutzt wurde. (vgl. Pearson Produkt-Moment-Korrelation):

$$p(x, y) = \frac{Cov(x, y)}{\sqrt{Var(x)} \cdot \sqrt{Var(y)}} \quad (5.3)$$

Im vorliegenden Fall des Bildblocks wurde jedes Bild einzeln mit dem gewählten Referenzbild korreliert. Diese Technik wird als Multi-Bild-Korrelation bezeichnet (vgl. Gruen [1985]). Dadurch entstehen hier insgesamt vier Korrelationsergebnisse, die in weiterer Folge als Grundlage für den räumlichen Vorwärtsschnitt dienen (siehe Kapitel 5.3). Vergleiche dazu auch Kraus [2004] und Baltasvias [1991], die von Multi-Bild-Korrelation schreiben, wenn mehr als zwei Bilder in einem Schritt korreliert werden. Nach der Wahl eines Masterbildes werden die restlichen Bilder simultan miteinander korreliert.

### 5.2.3 Qualitätskontrolle der Korrelationsergebnisse (Rückkorrelation)

Entspricht der gefundene Punkt im Suchfenster nicht dem korrespondierenden Punkt im Referenzfenster, ist die Korrelation fehlerhaft. Damit solche Fehler besser erkannt werden können, wird eine Methode angewandt, die auf die Qualität bzw. die Konsistenz der erzielten Ergebnisse schließen lässt. Ausgehend vom gefundenen Punkt  $P_S$  im Suchbild, wird versucht, den entsprechenden Punkt im Referenzbild durch Rückkorrelation (Backmatching) zu finden. Diese Distanz zwischen dem Ausgangspunkt  $P_r$  und dem durch Backmatching gefundenen Punkt  $P'_r$  wird als Backmatchingdistanz bezeichnet (siehe Abbildung 5.9).

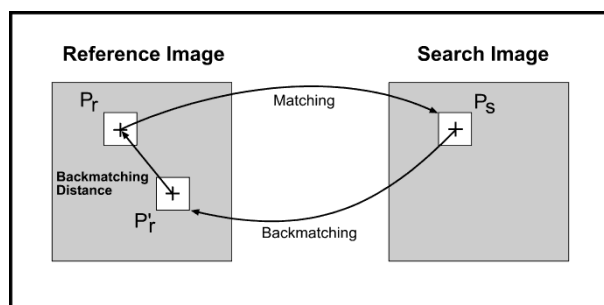


Abbildung 5.9: Backmatching (RSG Software Dokumentation)



## Kapitel 5

Ein Korrelationsergebnis wird für ungültig erklärt, wenn die Backmatchingdistanz einen definierten Schwellwert übersteigt. Durch die Schwellwertbildung besteht die Gefahr, richtige Korrelationsergebnisse fälschlicherweise zu verwerfen. In Bereichen mit sehr ähnlichen Strukturen kann es vorkommen, dass falsche Ergebnisse aufgrund einer fälschlichen geringen Backmatchingdistanz nicht erkannt werden.

Abbildung 5.10 zeigt einen Vergleich, von berechneten Backmatchingdistanzen zwischen zwei benachbarten Bildern mit 90 Prozent Überlappung in (b) und zwei Bildern die sich um 60 Prozent überdecken in (c), wobei rote Bereiche einer großen Backmatchingdistanz entsprechen.

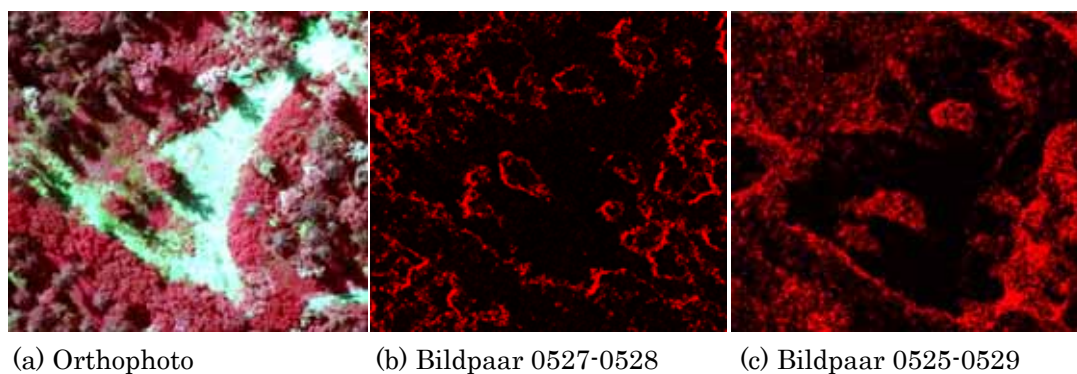


Abbildung 5.10: Backmatchingdistanzen in verschiedenen Stereopaaren

Folgende Abbildung zeigt im Detail einen Einzelbaum in allen beteiligten Bildern:

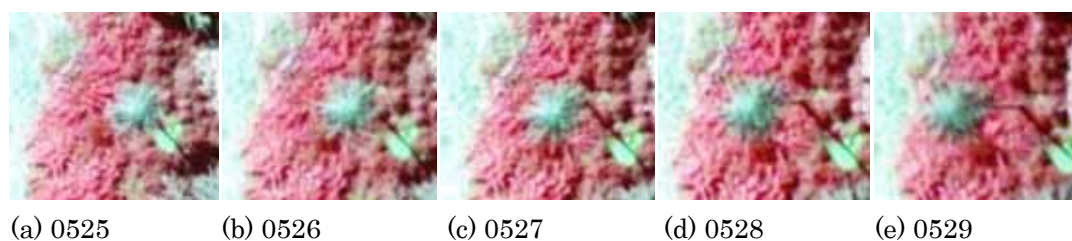


Abbildung 5.11: Objektverzerrung in den benachbarten Bildern am Beispiel eines Einzelbaumes

## Kapitel 5

Tabelle 5.5 zeigt einen statistischen Vergleich der Backmatchingdistanzen im Bildblock und für die Standardkonfiguration mit zwei Bildern. Im Falle des Bildblocks wurden für diese Statistik jeweils die kleinsten Backmatchingdistanzen aus den vier verfügbaren Korrelations-Ergebnissen zur Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung verwendet. Im Falle des überbestimmten räumlichen Vorwärtsschnittes wurde als Qualitäts- und Auswahlkriterium zusätzlich zur Backmatchingdistanz das Punktresiduum verwendet. Bei der Standardkonfiguration steht ohnehin nur ein einzelnes Korrelationsergebnis ohne Überbestimmung zur Verfügung.

	Bildblock	Standardkonfiguration
Mittelwert [Pixel]	0.24	2.09
Standardabw. [Pixel]	0.39	2.95

Tabelle 5.5: Statistik der Backmatchingdistanzen

### 5.2.4 Speicherung der Korrelationsergebnisse

Die Korrelationsergebnisse werden jeweils in einem Rasterbild mit vier Layern („disparity-map“) gespeichert. Die 4-Layerstruktur der flächenhaften Darstellung der Korrelationsergebnisse ist in Tabelle 5.6 ersichtlich. Die ersten beiden Layer enthalten die Parallaxen in Spalten- und Zeilenrichtung. Der Qualitätsparameter in Layer 3 wird unter anderem über den Korrelationskoeffizienten berechnet, wurde aber nicht für die weiterführenden Berechnungen verwendet.

Layer	Inhalt
1	Parallaxen in Spaltenrichtung
2	Parallaxen in Zeilenrichtung
3	Qualitätsparameter
4	Backmatchingdistanz

Tabelle 5.6: Layerstruktur "disparity map"

## 5.3 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Aus den Ergebnissen der automatischen Bildkorrelation werden mittels eines räumlichen Vorwärtsschnittes für jeden Bildpunkt die räumlichen Koordinaten im übergeordneten Koordinatensystem (Ost, Nord, Höhe) berechnet. (vgl. Kapitel 2.3)

Für jedes Bildpaar stehen nach erfolgreicher Korrelation zwei Paare an Bildkoordinaten je Bildpixel zur Verfügung ( $\xi$ ,  $\eta$ ). Im Fall von vier Bildpaaren stehen den drei unbekanntem Parametern (X,Y,Z) bis zu 16 Beobachtungen gegenüber.

Bei der Standardkonfiguration mit einem einzelnen Bildpaar steht nur ein einzelnes Korrelationsergebnis für die Berechnung der Unbekannten zur Verfügung (4 Beobachtungen, 3 Unbekannte).

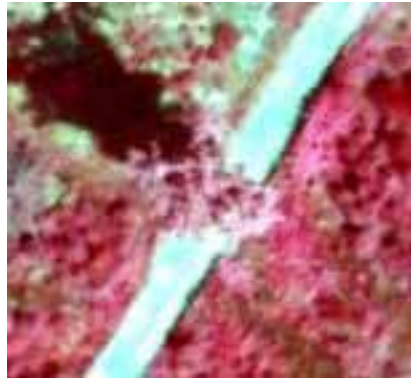
Als Qualitätskriterium werden sowohl das berechnete Punktresiduum, als auch ein Schwellwert für die Backmatchingdistanz beachtet.

Im Falle des Bildblocks werden aus den vorhandenen Korrelationsergebnissen jene verworfen, in denen der Schwellwert der Backmatchingdistanz überschritten wird und das Punktresiduum (Deplazierung des Sehstrahles) zu groß ist. Werden alle vier Ergebnisse verworfen, können keine gültigen Koordinaten berechnet werden. Erhält man ein einziges gültiges Korrelationsergebnis, ist dieses eindeutig. In jedem Fall erfolgt eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten der gültigen Korrelationsergebnisse, um die unbekanntem Bodenkoordinaten zu berechnen.

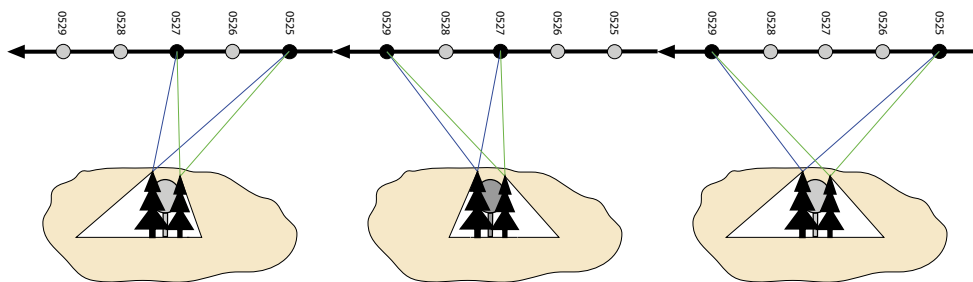
Abbildung 5.12 zeigt am Beispiel eines einzelnen Baumes den Zusammenhang zwischen verschiedenen Bildkonstellationen für die Bildkorrelation, und der zugehörigen Qualität der Korrelationsergebnisse in Form der Backmatchingdistanz. Hier gilt: Je heller ein Pixel, desto schlechter das Korrelationsergebnis bzw. desto größer ist die Backmatchingdistanz. Die Korrelation liefert für die Standardkonfiguration oft kein brauchbares Ergebnis. Für den Bildblock wird deutlich sichtbar, dass die einzelnen zur Verfügung stehenden Korrelationsergebnisse immer nur für eine Seite des Baumes niedrige Backmatchingdistanzen liefern. Durch eine entsprechende Kombination

## Kapitel 5

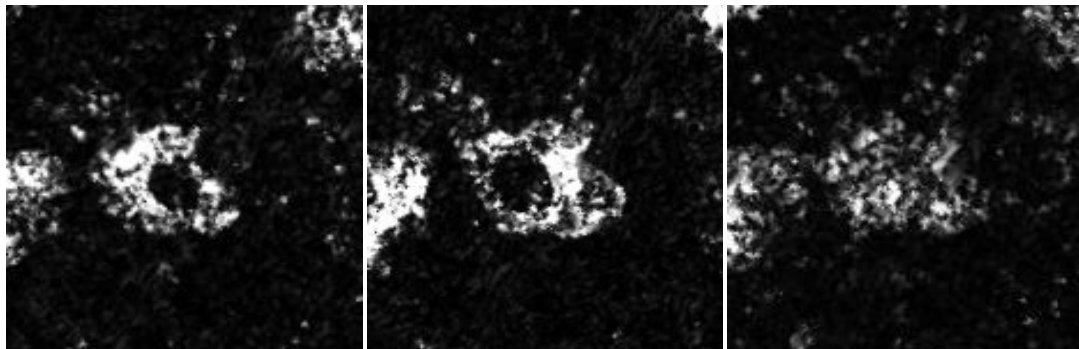
aller zur Verfügung stehenden Ergebnisse können im Falle des Bildblocks gute Ergebnisse erzielt werden.



(a) Ausschnitt im Luftbild



(b) Schematische Darstellung verschiedener Stereobildkonstellationen



(c)  $0525 \cap 0527$

(d)  $0527 \cap 0529$

(e)  $0525 \cap 0529$

Abbildung 5.12: Beispiel: Backmatching Distanz in Abhängigkeit der Konstellation verwendeter Stereopaare.

## 6 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die aus Ultracam-Daten berechneten Modelle

- Oberflächenmodell mittels Multi-Bildansatz (BlockDOM) (Projektionsstrahlen 1 bis 5 in Abbildung 5.1)
- Oberflächenmodell mittels Zwei-Bildansatz (StandardDOM) (Projektionsstrahlen 1 und 5 in Abbildung 5.1)

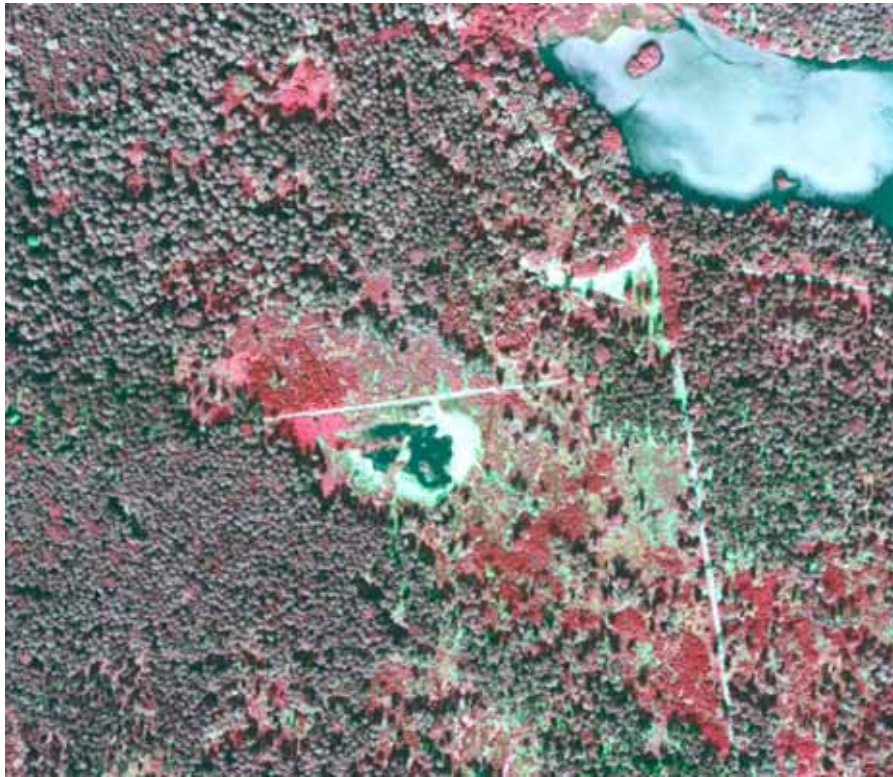
mit den verfügbaren Referenz- und Vergleichsdaten evaluiert bzw. verglichen. Folgende Daten standen für diese Analyse zur Verfügung:

- „ground-truth“ Daten (gemessene Baumhöhen auf den Probekreisen)
- „first-pulse“ Laserscanneroberflächenmodell aus dem Jahr 2005 (Laser2005DOM)
- „last-pulse“ Laserscannergeländemodell aus dem Jahr 1999 (Laser1999DGM)

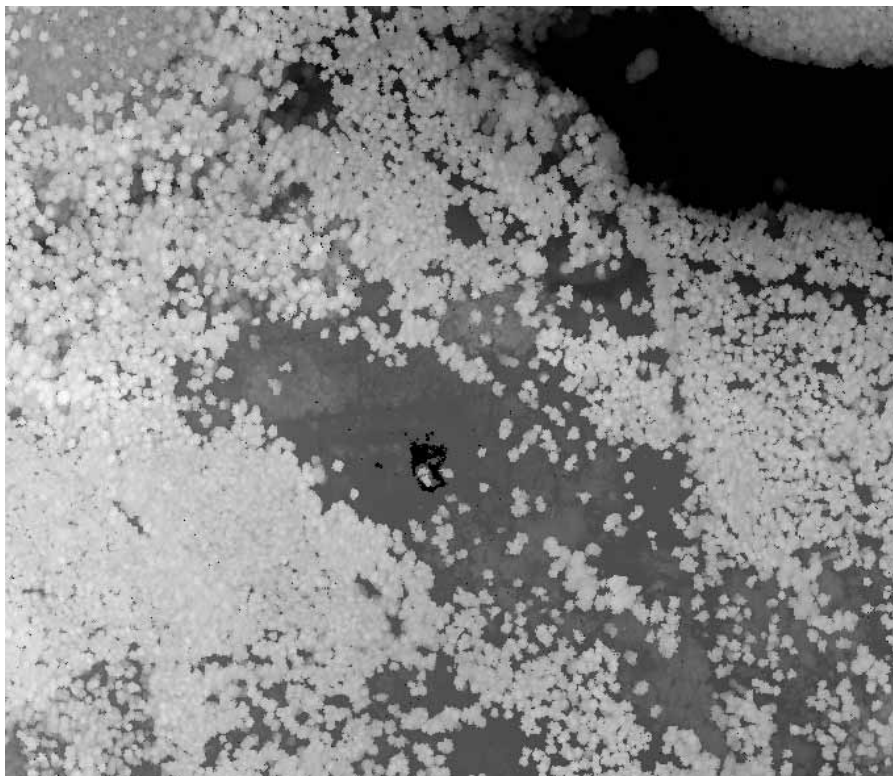
Die Abbildung 6.1 (a) bis (d) auf den folgenden zwei Seiten stellt jeweils einen Ausschnitt im Kernbereich des Testgebiets Burgau dar. Gezeigt werden (a) das erstellte Orthophoto, (b) das Laser2005DOM, (c) das BlockDOM und (d) das StandardDOM. Vergleicht man das BlockDOM und das StandardDOM, kann man im BlockDOM deutlich mehr Strukturen und Einzelbäume erkennen. Die einzelnen Bäume können im StandardDOM zum Teil gar nicht erkannt werden. Bei Betrachtung des Bestandes oben auf der rechten Seite kann sowohl im BlockDOM als auch im Laser2005DOM ein Teil des Bestandes mit geringerer Überschildung abgegrenzt werden. Im StandardDOM kann dieser Teil nicht abgegrenzt werden. Hier werden bereits erste Vorteile des Multi-Bildansatzes

## *Kapitel 6*

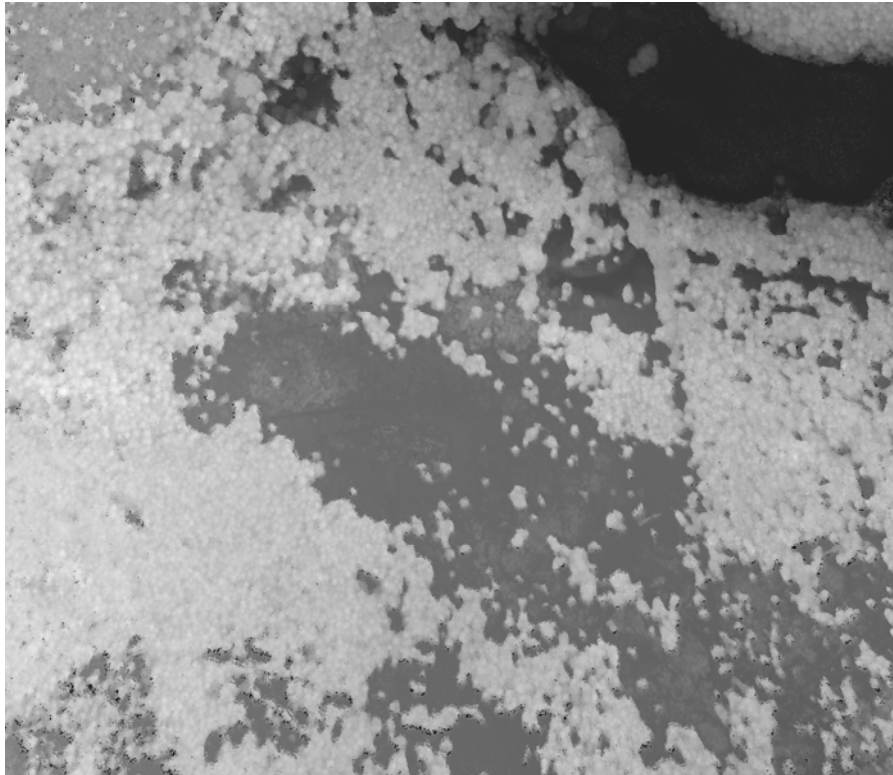
gegenüber dem Zwei-Bildansatz sichtbar. In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse weiter evaluiert.



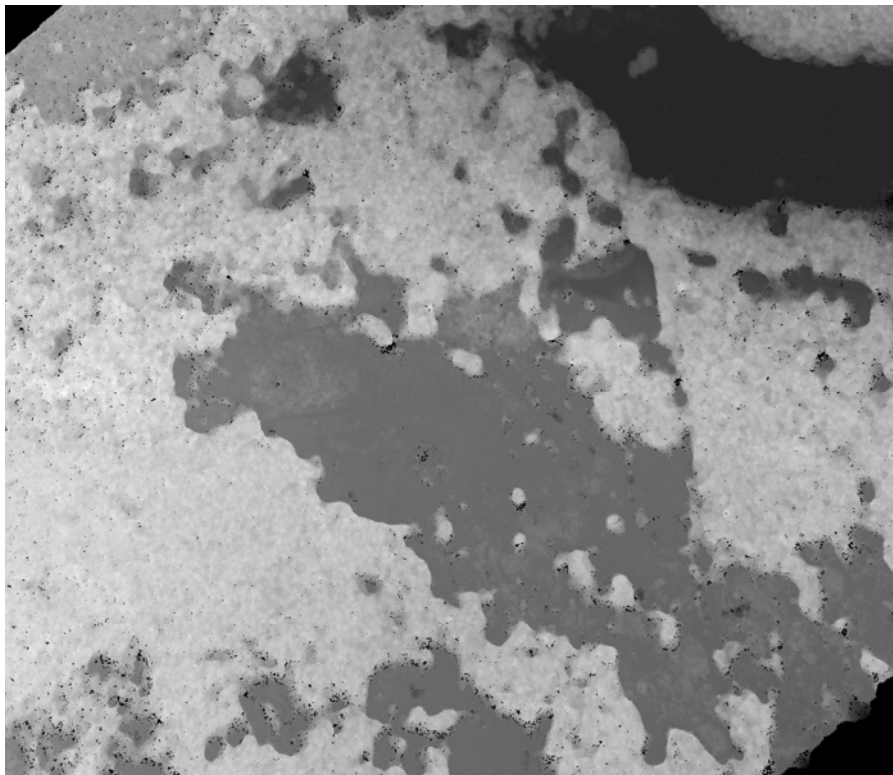
(a) Orthophoto



(b) Laser2005DOM



(c) BlockDOM



(d) StandardDOM

Abbildung 6.1: Übersicht Orthophoto und Oberflächenmodelle

## Kapitel 6

Zur näheren Untersuchung der Aufsetzgenauigkeit wurde folgender Vergleich durchgeführt:

Die absoluten Höhen der LiDAR Modelle und der generierten Modelle aus den Ultracam-Daten wurden mit den gemessenen Bildpasspunkten verglichen. Folgende Tabelle zeigt Mittelwert und Standardabweichung von den gemessenen Höhen der Bildpasspunkte:

	Laser2005 DOM	Block DOM	Standard DOM	Laser1999 DGM
Mittelwert	0.12	-0.39	-0.11	-0.13
Standardabw.	0.23	0.50	0.54	0.14

Tabelle 6.1: Höhenvergleich mit 14 gemessenen Passpunkten

Der Vergleich zwischen Tabelle 5.4 und Tabelle 6.1 zeigt, dass die Laserscannermodelle gut mit den gemessenen Punkten zusammenpassen. Als Richtwert für die absolute Genauigkeit der Laserscannerdaten in vegetationslosen Gebieten kann von einigen wenigen Dezimetern ausgegangen werden. BlockDOM und StandardDOM liegen innerhalb der abgeschätzten Höhengenaugigkeit.

### 6.1 Evaluierung mit Referenz- und Vergleichsdaten

Zur Verifikation der erstellten Modelle wurden verschiedene Ansätze gewählt, die in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben werden.

Kapitel 6.1.1 zeigt vertikale Profile und die Form der Kronenoberfläche im Vergleich zu Laserscannerdaten. Für diese Analyse standen keine Referenzdaten in Form von „ground truth Daten“ zur Verfügung. Die Laserscannerdaten waren deshalb für diese Analysen die geeignetsten zur Verfügung stehenden Vergleichsdaten, wobei aber diese Daten nicht automatisch als richtig und fehlerfrei angenommen werden dürfen.

In Kapitel 6.1.2 werden Baumhöhen aus den Ultracam-Modellen abgeleitet und mit in situ gemessenen Referenzdaten verglichen. Die höchsten Punkte im Oberflächenmodell entsprechen den Spitzen der Bäume.



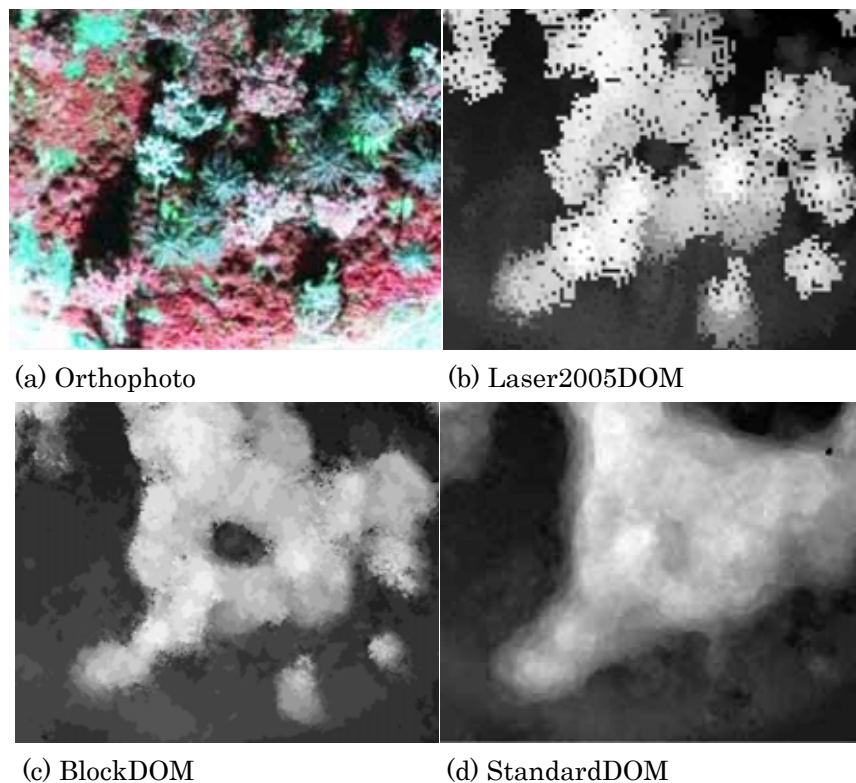


Abbildung 6.2: Detailansicht der Modelle

Abbildung 6.2 zeigt einen ausgewählten Detailausschnitt einer kleinen Baumgruppe. Die deutlich sichtbare kleine Lücke in Bildmitte kann sowohl im BlockDOM als auch im Laser2005DOM gut erkannt werden, während die Lücke im StandardDOM nur ansatzweise zu erkennen ist. Gut zu erkennen ist auch die schärfere Abgrenzung von Objektgrenzen im Block- und Laser2005DOM.

### 6.1.1 Vertikale Profile

#### Homogene vegetationslose Bereiche

In einem ersten Schritt wurde überprüft, wie die Modelle, bezogen auf die absolute Höhe, übereinstimmen. Hierzu wurden homogene, vegetationslose Bereiche (Forststrassen etc.) ausgewählt, um die Modelle BlockDOM, StandardDOM und Laser2005DOM mit dem Laser1999DGM zu vergleichen.

## Kapitel 6

Die Ausschnitte in Abbildung 6.3 zeigen ein Profil entlang einer Forststraße. Das dazugehörige Höhenprofil und die entsprechende Statistik können Abbildung 6.4 und Tabelle 6.2 entnommen werden.

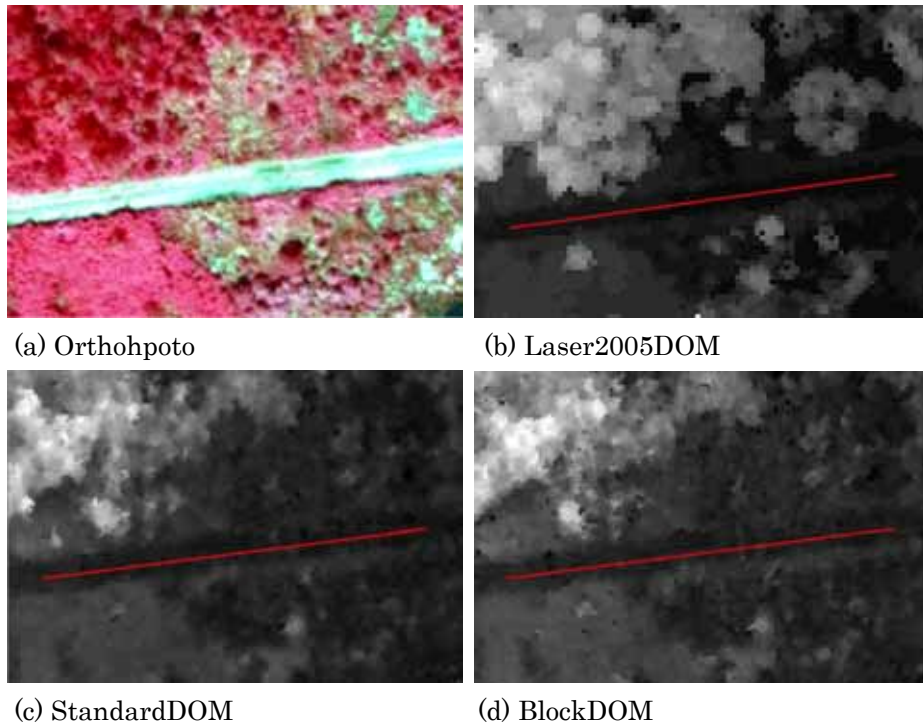


Abbildung 6.3: Ausschnitt Straßenachse

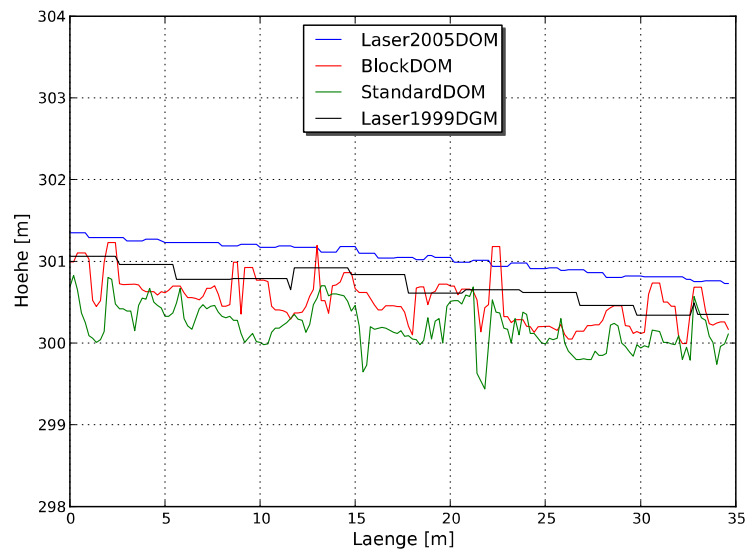


Abbildung 6.4: Beispiel: Höhenprofil einer Straßenachse

	Laser2005DOM	BlockDOM	StandardDOM
Mittelwert [m]	0,34	-0,17	-0,49
Std. Abw. [m]	0,08	0,23	0,24

Tabelle 6.2: Abweichung der Oberflächenmodelle vom Geländemodell im Höhenprofil entlang von Straßenachsen

Die Standardabweichung zwischen den Laserscannermodellen liefert mit 8cm die besten Ergebnisse. Die Überschätzung von 34 cm liegt noch innerhalb der zu erwartenden Genauigkeit. Auffällig sind die gleichen Standardabweichungen des BlockDOM und des StandardDOM. Die beiden Modelle liegen trotz der etwas größeren Unterschätzung der Höhe durch das StandardDOM noch innerhalb der apriori Aufsetzgenauigkeit (vgl Kapitel 5.1.).

### Wasserflächen

Wasserflächen wie Teiche oder Seen stellen die Bildkorrelation aufgrund des Fehlens jeglicher Textur vor eine schwierige Aufgabe. Folgende Abbildung und die daraus resultierende Statistik verdeutlicht diese Problematik.

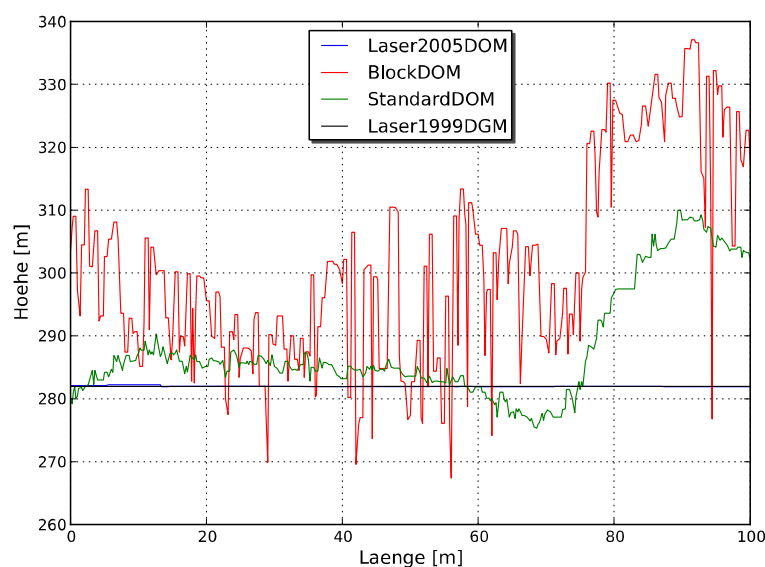


Abbildung 6.5: Höhenprofil Wasserfläche

	Laser2005DOM	BlockDOM	StandardDOM
Mittelwert [m]	-0,03	20,7	6,9
Std. Abw. [m]	0,1	15,5	8,9

Tabelle 6.3: Abweichung der Oberflächenmodelle vom Geländemodell im Höhenprofil entlang der Wasseroberfläche

BlockDOM und StandardDOM liefern aufgrund fehlender Texturen keine brauchbaren Ergebnisse. Das Laser2005DOM und das Laser1999DEM liefern erwartungsgemäß ähnliche Ergebnisse (siehe Abbildung 6.5).

### Übergänge (Waldrand, Bestandeslücken)

In einem weiteren Vergleich wurde überprüft, wie sich die erstellten Oberflächenmodelle in der Umgebung von steilen Kanten verhalten, wie etwa im Bereich von Waldrändern und Bestandeslücken.

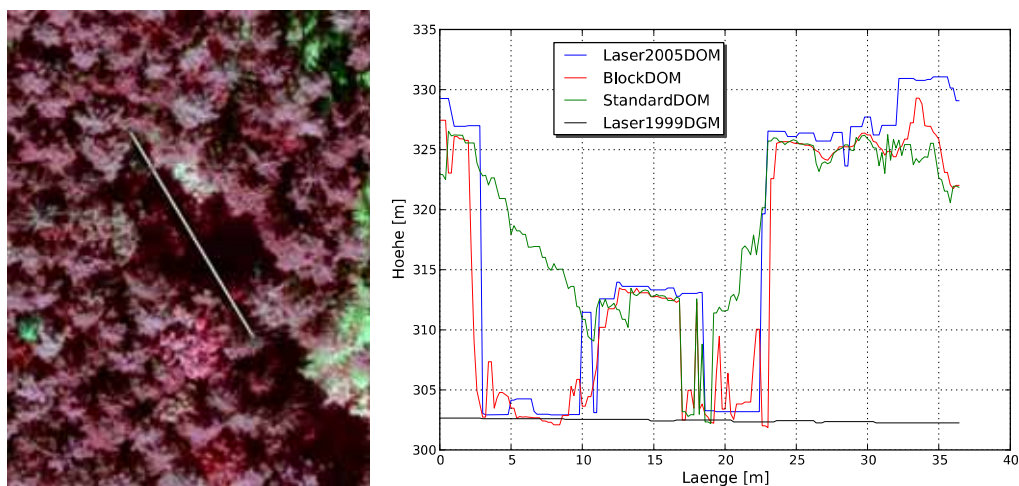


Abbildung 6.6: Höhenprofil Bestandeslücke

In Abbildung 6.6 zeigt sich sehr deutlich der Unterschied zwischen BlockDOM und StandardDOM. Im BlockDOM wird die Bestandeslücke relativ gut rekonstruiert, während die Lücke im StandardDOM nur verlaufend dargestellt werden kann.

	BlockDOM <i>minus</i> Laser2005DOM	StandardDOM <i>minus</i> Laser2005DOM
Mittelwert [m]	-1,8	3,7
Std. Abw. [m]	5,0	7,8

Tabelle 6.4: Statistik Höhenprofil Bestandeslücke

Im Bereich von kleineren Lücken im Wald werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen am deutlichsten sichtbar. Die Abbildung 6.7 zeigt einen repräsentativen Ausschnitt inklusive einem grün eingezeichneten Profil im Orthophoto (a), Laser2005DOM (b), BlockDOM (c) und StandardDOM (d). Zwischen dem Einzelbaum links und dem Bestand rechts im Profil lässt sich eine kleine Lücke erkennen.

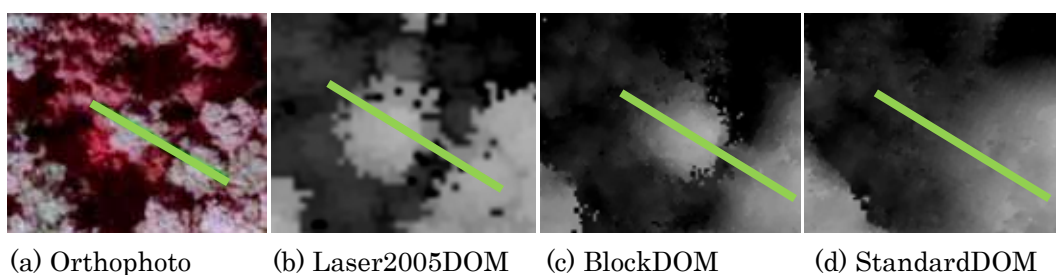


Abbildung 6.7: Kleine Bestandeslücke mit eingezeichnetem Profil

Der Baum in Bildmitte steht wenige Meter vom geschlossenen Bestand entfernt. Wie in der Abbildung deutlich zu erkennen ist, wird der Baum im Fall des StandardDOM mehr oder weniger überhaupt nicht registriert. Abbildung 6.8 und Tabelle 6.5 beziehen sich auf die in Abbildung 6.7 dargestellte Situation und zeigen eine Darstellung der Profile in den zugehörigen Oberflächenmodellen sowie die dazugehörige Statistik. Das bessere Ergebnis des BlockDOM, verglichen mit dem Laser2005DOM, wird in Tabelle 6.5 bestätigt.

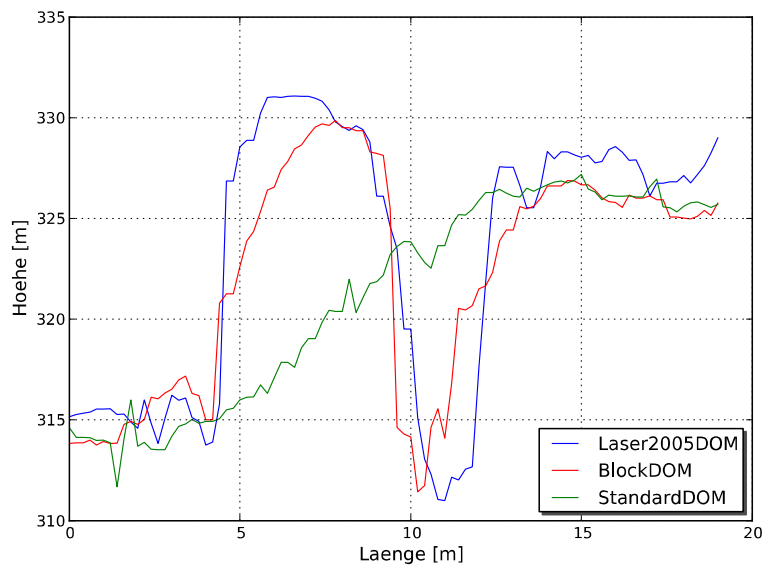


Abbildung 6.8: Profile in den verschiedenen Modellen

	BlockDOM <i>minus</i> Laser2005DOM	StandardDOM <i>minus</i> Laser2005DOM
Mittelwert [m]	-0,9	-2,1
Std. Abw. [m]	2,9	6,5

Tabelle 6.5: Statistik der Höhenprofile in den Differenzmodellen

Abbildung 6.9 zeigt ein weiteres Beispiel einer typischen schmalen Bestandeslücke. Im Vergleich zum BlockDOM wird die Lücke im StandardDOM nur ansatzweise rekonstruiert. Zur Verdeutlichung der qualitativen Unterschiede in der Oberflächenrekonstruktion wurden in den einzelnen Modellen Höhenprofile gemessen, und die entsprechenden Statistiken berechnet. Sowohl Abbildung 6.10 als auch Tabelle 6.6 bestätigen wiederholt die Stärken des verwendeten Multibildansatzes gegenüber dem Zweibildansatz, gemessen am Oberflächenmodell des Laserscanners.

## Kapitel 6

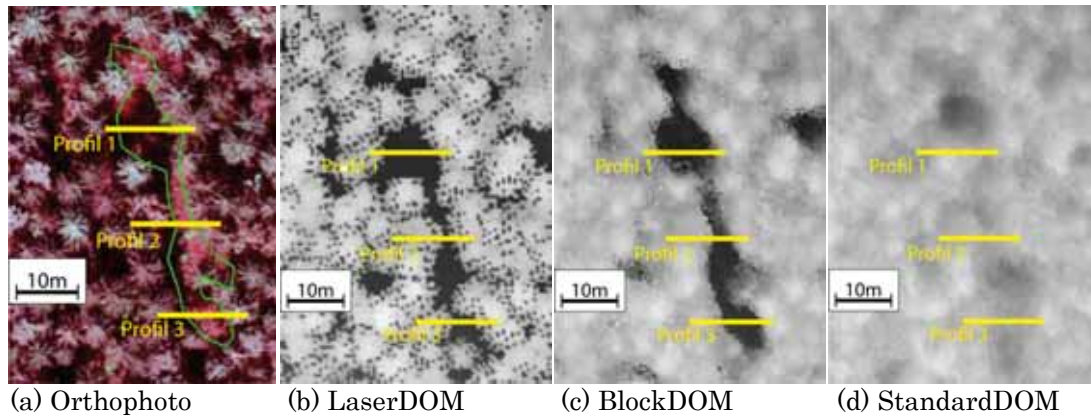


Abbildung 6.9: Schmale Bestandeslücke (Oberhöhe des Bestandes etwa 30 Meter)

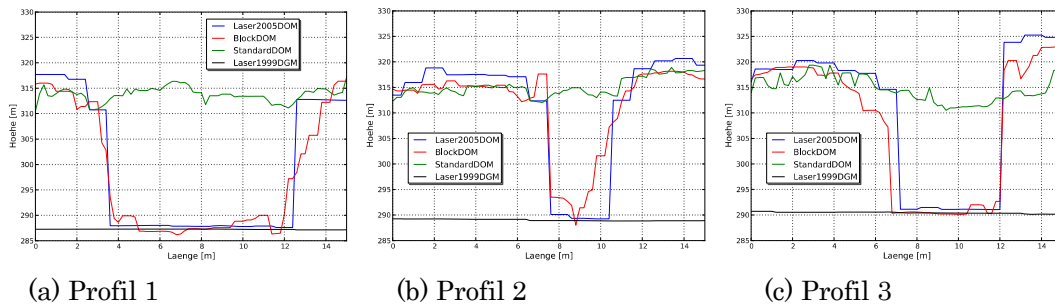


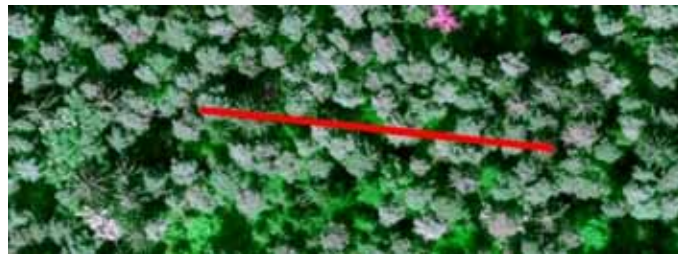
Abbildung 6.10: Gemessene Profile

	Profil 1		Profil 2		Profil 3	
	Mittelw. [m]	Std. [m]	Mittelw. [m]	Std. [m]	Mittelw. [m]	Std. [m]
BlockDOM minus Laser2005DOM	-0,9	3,7	-0,3	4,0	-2,4	4,0
StandardDOM minus Laser2005DOM	12,7	14,0	2,8	10,1	3,6	11,6

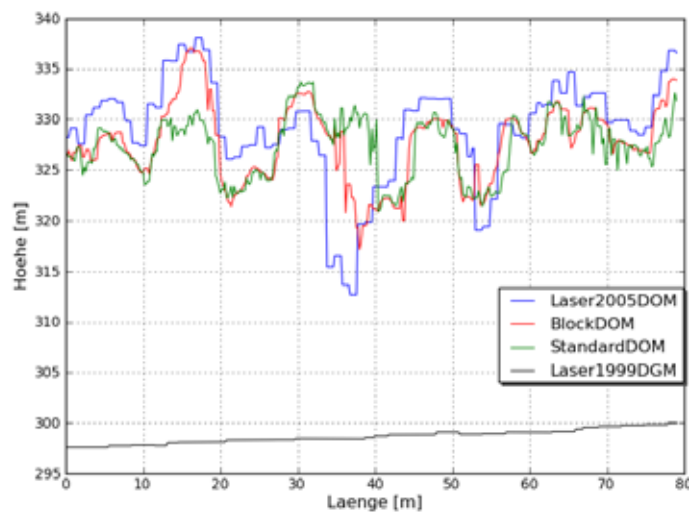
Tabelle 6.6: Statistik der gemessenen Profile in den Differenzmodellen

### Geschlossene Kronendecke

Sowohl BlockDOM als auch StandardDOM liegen im Mittel etwa 1.5 Meter unter dem Laser2005DOM. Ein wahrscheinlicher Grund für diese große Unterschätzung gegenüber dem Laserscannermodell ist die Tatsache, dass zwischen den Aufnahmezeitpunkten die Wachstumsperiode fast eines ganzen Jahres liegt. In Kapitel 6.1.2 wird näher auf diese Problematik eingegangen.



(a) Orthophoto



(b) Profil

Abbildung 6.11: Höhenprofil Kronenoberfläche

	BlockDOM <i>minus</i> Laser2005DOM	StandardDOM <i>minus</i> Laser2005DOM
Mittelwert [m]	-1,3	-1,6
Std. Abw. [m]	3,7	5,3

Tabelle 6.7: Statistik Höhenprofil Kronenoberfläche



Folgende Abbildung zeigt die 3D Ansicht der Kronenoberfläche im BlockDOM in einem Teil des Testgebiets.



Abbildung 6.12: 3D Ansicht der Kronenoberfläche im BlockDOM

### 6.1.2 Ableitung von Baumhöhen

Für die Berechnung von Baumhöhen wurden aus den zur Verfügung stehenden Oberflächenmodellen durch Subtraktion des Geländemodelles Differenzmodelle berechnet. Diese normalisierten, digitalen Oberflächenmodelle werden in der Literatur häufig als nDSM oder „normalized digital surface model“ bezeichnet. In Waldbereichen stellen diese Differenzmodelle die Vegetation dar und werden in weiterer Folge als Vegetationshöhenmodelle (VHM) bezeichnet.

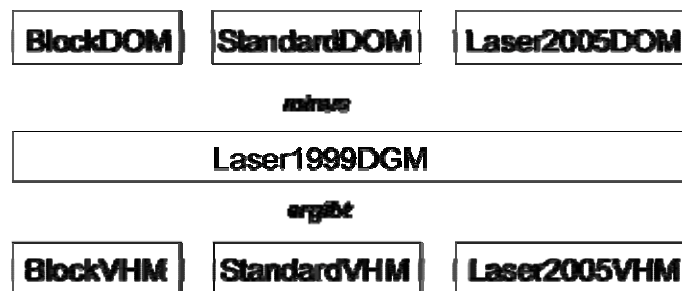


Abbildung 6.13: Differenzmodelle (VHM)

## Kapitel 6

Für die Genauigkeitsanalyse wurden aus den terrestrisch vermessenen Referenzbäumen jene Bäume ausgewählt, deren Höhe zwei Drittel der Oberhöhe in der jeweiligen Testfläche übersteigt. Diese Selektion ist notwendig, da unterdrückte Bäume von größeren Nachbarbäumen verdeckt werden, und deshalb in den Luftbildern nicht sichtbar sind. Insgesamt blieben nach der Selektion von anfangs 802 terrestrisch gemessenen Bäumen noch 356 Bäume übrig.

Tabelle 6.8 zeigt einen Vergleich der Baumhöhen zwischen den terrestrischen Referenzdaten und den verschiedenen VHMs. Im Laserscannermodell werden die Baumhöhen um 0.6 Meter überschätzt, während die Baumhöhen sowohl im BlockVHM als auch im StandardVHM unterschätzt werden.

	Laser2005VHM	BlockVHM	StandardVHM
<b>Mittelwert [m]</b>	0.62	-0.77	-1.34
<b>Std. Abw. [m]</b>	2.0	2.39	4.52

Tabelle 6.8: Mittelwert und Standardabweichung gegenüber der ausgewählten 356 Baumhöhen der Oberschicht (vergleiche Hirschmugl [2008])

Neben den in Kapitel 4.3 genannten Gründen lässt sich die Überschätzung im Laser2005VHM durch die Aufnahmezeitpunkte erklären. Die Referenzdaten wurden im Winter 2004/2005 erhoben, während die Laserscannerbefliegung im Juni 2005 stattfand. Der größte Anteil des jährlichen Wachstums eines Baumes liegt zwischen April und Juni. Somit liegt zwischen den beiden Aufnahmen fast das ganze Höhenwachstum eines Jahres. In jungen Beständen kann das jährliche Höhenwachstum je nach Baumart bis zu einem Meter betragen. Zwischen der Ultracam<sub>D</sub>-Aufnahme im Juli 2004 und den Referenzmessungen fand im Vergleich dazu fast kein Höhenwachstum stattgefunden. Ein weiterer möglicher Grund für Überschätzung der Laserscannerdaten ist die Punktdichte der Aufnahme im Vergleich zu den meist sehr feinen Strukturen der Bäume im Bereich der Baumspitze (siehe Abbildung 4.10). Aus diesem Grund kann es passieren, dass bei sehr eng stehenden Bäumen die Baumkronen im Oberflächenmodell nicht richtig

## *Kapitel 6*

unterschieden werden können, und somit einem niedrigeren Baum die maximale Höhe des höheren Nachbarn zugewiesen wird.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1 Erstellung der Höhenmodelle

Im Zuge dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Oberflächenmodelle aus Ultracam-Daten abgeleitet. Ein Modell (BlockDOM) wurde aus fünf Bildern eines Flugstreifens erstellt, die sich um 90 Prozent überlappen. Zur Berechnung des Höhenmodells standen multiple Stereobildpaare zur Verfügung. Durch die Überbestimmung konnte die Robustheit des Ergebnisses gesteigert werden. Die Lösung des überbestimmten Systems erfolgte durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten. Das zweite Modell (StandardDOM) wurde aus einem Stereobildpaar erstellt, das sich um 60 Prozent überlappt. Die äußeren Orientierungen aller Bilder wurden mittels Bündelblockausgleich berechnet. Durch die flächenhafte Bildkorrelation und den anschließenden räumlichen Vorwärtsschnitt wurden die Höhenmodelle berechnet.

## 7.2 Validierung der Ergebnisse

Die erstellten Oberflächenmodelle wurden in Kapitel 6 mit terrestrisch gemessenen Referenzdaten verifiziert und in weiterer Folge mit einem Laserscannermodell verglichen.

Zusammenfassend lassen sich daraus folgende Schlüsse ziehen:

Bezüglich der absoluten Höhe liegen sowohl das BlockDOM als auch das StandardDOM tendenziell etwas unter dem Laserscanneroberflächenmodell. Mit einer Abweichung von  $-0.17\text{m}$  für das BlockDOM bzw.  $-0.49\text{m}$  für das StandardDOM liegen beide Modelle höhenmäßig im Bereich der a priori Aufsetzgenauigkeit.

In stark strukturierten Bereichen wie Waldrändern, Bestandeslücken, im Kronendach oder im Bereich von einzelnen Bäumen werden die Vorteile

des Multibildansatzes deutlich sichtbar. Der Multibildansatz ist in der Lage, solche Bereiche deutlich besser zu rekonstruieren als der Zweibildansatz.

Bei der Ableitung von Baumhöhen aus den Vegetationshöhenmodellen liefert die Statistik des Multibildansatzes mit einem Mittelwert von -0,8 m und Standardabweichung von 2.4 m bessere Ergebnisse, als die Statistik des Zweibildansatzes mit Mittelwert -1.3 m und einer Standardabweichung von 4.5 m (vgl. Tabelle 6.8). Beide Statistiken zeigen, wie erwartet, einen negativen Mittelwert, also eine tendenzielle Unterschätzung durch die photogrammetrischen Ergebnisse. Im Vergleich des Multibildansatzes mit dem Laserscannermodell kann von einer ähnlichen Genauigkeit gesprochen werden. Die tendenzielle Überschätzung des Laserscannermodells (Mittelwert +0.6 m) kann zum Teil auf die Zeitpunkte der Aufnahmen zurückgeführt werden. Zwischen den Referenzmessungen und der Aufnahme des Laserscannermodells liegt nahezu das volle jährliche Höhenwachstum der Bäume. Bei sehr eng stehenden Bäumen kann einem niedrigerem Baum versehentlich die Höhe des Nachbarbaumes zugeordnet werden (Für weitere Informationen siehe Kapitel 6.1.2).

Weiters ist die Erhebung von Baumkennzahlen (Höhe, Lage) im Feld mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Eine ausführliche Beschreibung ist in Kapitel 4.4.1 zu finden. Im Fall vom gemessenen Baumhöhen kann die Messungengenauigkeit, für Bäume bis 25 Meter Höhe, bis zu 0.5 Metern betragen. Für Bäume, die höher als 25 Meter sind, kann die Abweichung bis zu einem Meter betragen.

### **7.3 Ausblick**

In der vorliegenden Arbeit standen Luftbilder eines einzelnen Ultracam<sub>D</sub>-Flugstreifens zur Verfügung. Durch die Verwendung eines zusätzlichen benachbarten Flugstreifens, mit entsprechender Querüberlappung, könnte das Ergebnis mit großer Wahrscheinlichkeit noch weiter verbessert werden. Diese mögliche Verbesserung des Ergebnisses sollte in zukünftigen weiterführenden Arbeiten noch genauer untersucht werden. Weitere Untersuchungen mit noch höher auflösendem Bildmaterial

wären in jedem Fall zielführend, um das volle Potential der digitalen Luftbildtechnik ausschöpfen zu können.

Weiteres Forschungspotential liegt auch in Richtung einer vollautomatischen und großflächigen Auswertung mit einer höheren Anzahl von Inputbildern, nachdem in dieser Arbeit nur ein kleiner Bildblock prozessiert wurde. Diese Erweiterung auf fast beliebig viele Inputbilder wurde in der Zwischenzeit in RSG umgesetzt. Die Anzahl der Luftbilder wird lediglich durch den verfügbaren Speicherplatz begrenzt. Eine mögliche Erweiterung wäre hier auch eine automatische Selektion idealer Konstellationen, wodurch die Rechenzeit weiter optimiert werden könnte. Auch die Auswertung wurde in RSG inzwischen flexibler gestaltet, wodurch die Notwendigkeit, ein Referenzbild zu wählen, entfällt. Verfügbare Bildpaare mit entsprechendem Überlappungsbereich können automatisch berücksichtigt und korreliert werden. Anschließend werden zur Berechnung des räumlichen Vorwärtsschnittes alle verfügbaren Korrelationsergebnisse mit einbezogen (vgl. Raggam [2007]). Was die Rekonstruktion der Oberfläche mit dem Multibildansatz betrifft, kann man mit den Ergebnissen jenen eines Laserscanners teilweise recht nahe kommen. Dies wurde anhand zahlreicher Beispiele in der vorliegenden Arbeit gezeigt. Natürlich wird es mit optischen Fernerkundungsdaten auch weiterhin nicht möglich sein, durch Objekte wie Bäume „durchzusehen“ um darunterliegende Strukturen oder das Gelände zu erfassen. Aus diesem Grund wird es zur Erstellung eines genauen Geländemodelles unter Wald auch in Zukunft notwendig sein, eine Laserscannerbefliegung durchzuführen. Man kann davon ausgehen, dass sich das Gelände in den meisten Bereichen mit der Zeit nicht oder nur minimal verändert. Ist also einmal ein gutes Geländemodell vorhanden, sollten wiederholte Befliegungen zum Update des Geländemodelles prinzipiell nicht notwendig sein. Anders verhält es sich mit der Oberfläche in bewaldeten Bereichen. Bedingt durch das natürliche Wachstum, die Holznutzung oder Naturkatastrophen wird es durchaus sinnvoll sein, in kürzeren zeitlichen Abständen ein aktuelles Oberflächenmodell abzuleiten.

Als ein Anwendungsbeispiel aus dem forstwirtschaftlichen Bereich möchte ich hier die Forsteinrichtung mit ihren spezifischen Aufgabenstellungen ansprechen. Man denke an die Ableitung

## *Kapitel 7*

forstwirtschaftlicher Parameter wie Anzahl der Bäume pro Fläche, Baumhöhen, Baumartenverteilung, etc., welche vom Forstmann traditionell stichprobenweise vor Ort erhoben werden müssen.

Ich möchte an dieser Stelle noch einmal auf die Dissertation von Frau Manuela Hirschmugl [2008] verweisen, welche sich eingehend mit Kronendetektion, Segmentierung und Klassifizierung beschäftigt.

# Literatur

- Baltsavias [1991]      Baltsavias E.-P. (1991): Dissertation: *Multiphoto Geometrically Constrained Matching*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie. Eidgenössische Technische Hochschule. Zürich
- Barron [2001]      Barron R.J. (2001): *Precision of three tree height measuring devices in forest conditions*. Forest Research Branch, Loughgall.
- Caballo-Perucha [2003]      Caballo-Perucha M. (2003): Master thesis: *Development and analysis of algorithms for the optimisation of automatic correlation*, Post-graduate Course Space Science, Karl-Franzens-University Graz.
- Cramer [2000]      Cramer M., Stallmann D., Haala N. (2000): *Direct georeferencing using GPS/Inertial exterior orientations für Photogrammetric Applications*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33 Part B3.
- Cramer [2009]      Cramer M., Krauß H., Jacobsen K., Schönermark M., Haala N., Spreckels V. (2009): *Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme*. DGPF Tagungsband 18/2009
- Fuchs [2003]      Fuchs H.J. (2003): *Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbilddauswertung*. Ph D. thesis, Georg August University Göttingen.



- Gruen [1985] Gruen A. (1985): *Adaptive Least Squares Correlation: A powerful Image Matching Technique*. Institute of Geodesy and Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Gruber [2004] Gruber M., Perko R., Ponticelli M. (2004): *The all digital photogrammetric workflow: Redundancy and Robustness*. XX Kongress ISPRS, Istanbul
- Gutjahr [2006] Gutjahr K.H., Schardt M. (2006): *Retrieval of forest parameters from multi-polarimetric, multi frequency interferometric SAR data*. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th – 15th Feb. 2006, Vienna.
- Hirschmugl [2005] Hirschmugl M., Gallaun H., Perko R., Schardt M. (2005): „*Pansharpening*“ – *Methoden für digitale, sehr hoch auflösende Fernerkundungsdaten*. In Beiträge zum 17. AGIT Symposium, Salzburg.
- Hirschmugl [2008] Hirschmugl M. (2008): *Dissertation: Assessment of Forest Parameters from VHR Data in Austrian and Scandinavian Forests*. Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie. Technische Universität Graz.
- Honkavaara [2005] Honkavaara E., Markelin L., Savolinen P., Vilhomaa J., Ahokas E., Jaakola J., Kaartinen H. (2005): *In-flight performance evaluation of digital photogrammetric sensors*. Hannover Workshop 2005
- Hyyppä [2004] Hyyppä J., Hyyppä H., Litkey P., Yu X., Haggrén H., Rönholm P., Pyysalo U., Pitkänen J., Maltamo M. (2004): *Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI -8/W2

- Jacobsen [2007] Jacobsen K. (2007): *Geometric handling of large size digital airborne frame camera images*. [http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx\\_tkpublikationen/ZurichDigCam07\\_KJ.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/ZurichDigCam07_KJ.pdf)
- Kaufmann [2008] Kaufmann V.: *Bildmessung*. Vorlesungsskriptum. Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie. Technische Universität Graz
- Kim [2006] Kim C., Ghanma M., Habib A. (2006): *Integration of Photogrammetric and LIDAR data for realistic 3D model generation*. [Online], [http://regard.crg.ulaval.ca/proceedings/13-kim\\_et\\_al.pdf](http://regard.crg.ulaval.ca/proceedings/13-kim_et_al.pdf)
- Kraus [2004] Kraus K. (2004): *Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7. Auflage, Walter de Gruyter Lehrbuch. ISBN: 3-11-01-017708-0
- Leberl [2003] Leberl F., Gruber M. (2003): *Flying the Large Format Digital Aerial Camera Ultracam*. Proceedings of the 49th Photogrammetric Week.
- Lefsky [2002] Lefsky M., Cohen W., Parker G., Harding D. (2002): *Lidar remote sensing for ecosystem studies*. *Bioscience* 52. pp. 10-30
- Ofner [2006] Ofner M., Hirschmugl M., Raggam H., Schardt M. (2006): *3D Stereo Mapping with Ultracam<sub>D</sub> Data*, Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th – 15th Feb. 2006, Vienna.
- Okutomi [1993] Okutomi M., Kanade T. (1993): *A Multiple-Baseline Stereo*. *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, 1993, pp.353-363.
- Paar [1992] Paar G., Pölzleitner W. (1992): *Robust disparity estimation in terrain modelling for spacecraft navigation*. Proc. 11th ICPR, International Association für Pattern Recognition, 1992

- Perko [2004] Perko R. (2004): Dissertation: *Computer Vision For Large Format Digital Aerial Cameras*. Institute for Computer Graphics and Vision, Technische Universität Graz.
- Perko [2005] Perko R. (2005): *Image quality: Digital pansharpening versus color film*. Institute for Computer Graphics an Vision, Technische Universität Graz.
- Petrie [2007] Petrie G., Walker S. (2007): *Airborne digital imaging Technology: A new overview*. The Photogrammetrie Record 22(119): 203-225 (September 2007)
- Pyysalo [2002] Pyysalo U., Hyyppä H. (2002): *Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction*. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, University of Technologie Helsinki
- Raggam [2007] Raggam J., Wack R., Gutjahr K.H. (2007): *Mapping Capability of a Low Cost Aerial Data Acquisition Platform – First Results*. ISPRS Commission VI, WG VI/4, Hannover, Germany.
- Ries [2004] Ries C. (2004): Dissertation: *Ein allgemeiner Ansatz zur Georeferenzierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen*. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- Thurgood [2004] Thurgood J., Gruber M., Karner K. (2004): *Multi-ray matching for automated 3D Object Modeling*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume XXXV, Istanbul, Turkey.
- Wack [2000] Wack R. (2000): Diplomarbeit: *Verifizierung von digitalen Geländemodellen aus Laserscannerdaten*. Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz

- Wack [2003] Wack R., Schardt M., Barrucho L., Lohr U., Oliveira T. (2003): *Forest inventory for eucalyptus plantations based on airborne laserscanner data*. ISPRS III/3. „3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data“, 8-10 October 2003, Dresden, Germany. XXXIV, Part 3/W13
- Wagner [2007] Wagner, W., Roncat, A., Melzer, T. & Ullrich A. (2007): *Waveform Analysis Techniques in Airborne Laser Scanning*. Proc. ISPRS III/3, III/4, V/3 and VIII/11. “LaserScanning 2007 and SilviLaser 2007”, 12–14 September 2007, Espoo, Finland. XXXVI, Part 3/W52 :413–419.
- Zebedin [2006] Zebedin L., Klaus A., Gruber-Geymayer B., Karner K. (2006): *Towards 3D map generation from digital aerial images*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 60.
- Zhang [2004] Zhang L., Gruen A. (2004): *Automatic DSM Generation from linear array imagery data*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXV, Part B3, Commission III, S. 128-133.
- RSG Software Dokumentation: Institut für Digitale Bildverarbeitung. Joanneum Research Graz.
- Waldarbeitsschulen der Bundesrepublik Deutschland (1996). Der Forstwirt. Verlag Ulmer. 2. und überarbeitete Auflage.