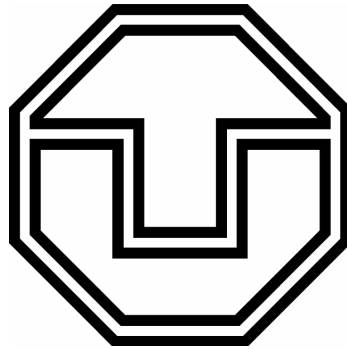


**Technische Universität Dresden**



**Diplomarbeit**

zum Thema:

**Entwicklung von Verfahren zur räumlich und  
zeitlich aufgelösten 2D-Bewegungsanalyse  
in der Glaziologie**



angefertigt an der

Professur für Photogrammetrie

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

Technische Universität Dresden

vorgelegt von

Patrick Westfeld

geboren am 18.05.1980 in Dresden

Studiengang Geodäsie

Matrikelnummer: 2705499

Betreuer:

Dipl.-Ing. Ellen Schwalbe

Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas

Beginn der Arbeit: 15.03.2005

Abgabe der Arbeit: 15.08.2005



# TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

## Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

**im Studiengang:** Geodäsie  
**Name des Diplomanden:** Patrick Westfeld

**Titel der Arbeit:**  
*Entwicklung von Verfahren zur räumlich und zeitlich aufgelösten  
2D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie*

### Zielsetzung:

Eine wichtige Aufgabenstellung in der Glaziologie besteht in der Bestimmung der Bewegungs- oder Fließgeschwindigkeit von Gletschern. In vielen Fällen sind hier zeitlich und räumlich aufgelöste Messungen erforderlich, wobei die Zeitintervalle der Messdatenerfassung von der Geschwindigkeit und dem Bewegungsverhalten des jeweiligen Gletschers abhängen. Bei sich schnell bewegenden Gletschern stellt die Aufnahme mit hochauflösenden Digitalkameras in definierten zeitlichen Intervallen eine interessante Option dar. Durch die Definition von Punkten auf dem interessierenden Gletscherbereich und deren Verfolgung in den Bildern der Zeitreihe durch Verfahren der Bildzuordnung kann die Gletscherbewegung über eine Anzahl von Trajektorien beschrieben werden. Das Ziel der Diplomarbeit ist die Auswahl, Modifizierung und Implementierung von geeigneten Matching-Verfahren zur Bestimmung von Gletscherbewegungen aus Bildsequenzen und deren Anwendung auf Bildsequenzen des Jacobshavn Isbræ Gletschers in Grönland.


In diesem Zusammenhang sind insbesondere folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Darstellung von verschiedenen Matching-Techniken und deren Bewertung in Hinblick auf Ihre Eignung zur Auswertung von Gletscheraufnahmen.
- Implementierung und Anwendung ausgewählter Matching-Verfahren
  - Anpassung der Matching-Verfahren an die speziellen Eigenschaften von Gletscherbildsequenzen
  - Anwendungsoptimierung auf die (teil-)automatische Messung einer großen Anzahl von Punkten
  - Automatische Erkennung fehlerfreier und fehlerbehafteter Trajektorien
  - Visualisierung der Trajektorien
- Entwicklung von Tests zur Genauigkeitsüberprüfung der Ergebnisse des Matchings und Bewertung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Praktikabilität der implementierten Verfahren
- Überführung der gemessenen Bildkoordinaten in den Objektraum
  - Auswertung von Stereobildpaaren
  - Integration terrestrischer Messungen

Diplomarbeit ist in 2facher Ausfertigung einzureichen. Zur Arbeit gehört die grafische Illustration der Resultate sowie die Gestaltung eines Posters (Format 70x100cm) und einer Kurzzusammenfassung auf einer Webseite. Alle Programme und Daten sind der Arbeit auf einer CD hinzuzufügen.

**Betreuer:** Prof. Dr. habil. H.-G. Maas, DI E. Schwalbe  
**Ausgehändigt am:** 15.03.2005  
**Einzureichen am:** 15.08.2005

  
**Prof. Dr. habil. Maas**  
Prüfungsausschuss

  
**Prof. Dr. habil. Maas**  
Betreuender Hochschullehrer



# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage der Diplomkommission der Fachrichtung Geowissenschaften eingereichte Diplomarbeit zum Thema

*„Entwicklung von Verfahren zur räumlich und zeitlich aufgelösten 2D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie“*

vollkommen selbstständig und nur unter Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur angefertigt habe.

Dresden, den 15.08.2005





# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b>	<b>vii</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>ix</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xxi</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xxiii</b>
<b>Kapitel 1</b>	
<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	3
1.3 Gliederung der Arbeit. . . . .	4
<b>Kapitel 2</b>	
<b>Grundlagen, Datenakquisition, Rückblick</b>	<b>5</b>
2.1 Ausgewählte Bereiche der digitalen Bildverarbeitung . . . . .	5
2.1.1 Photogrammetrische Bildzuordnungen und Bewegungsanalysen . . . . .	5
2.1.1.1 Bewegung und Bewegungsdetektion . . . . .	5
2.1.1.2 Aufgaben, Anwendungen und Probleme der Bildzuordnung. . . . .	8
2.1.1.3 Klassifizierung von Matchingalgorithmen. . . . .	11
2.1.2 Interpolationsverfahren. . . . .	13
2.1.3 Bildpyramiden. . . . .	15
2.2 Aspekte der geodätischen Ausgleichsrechnung. . . . .	18
2.2.1 Die Methode der kleinsten Quadrate . . . . .	18
2.2.2 Ausgleichsrechnung nach vermittelnden Beobachtungen . . . . .	19
2.2.3 Ausgleichsrechnung nach bedingten Beobachtungen. . . . .	22
2.2.4 Ausgleichsrechnung nach vermittelnden Beobachtungen mit Bedingungen zwischen den Unbekannten. . . . .	24
2.3 Datenakquisition. . . . .	26

2.4	Rückblick auf die Studienarbeit . . . . .	29
2.5	Aspekte der Programmierung . . . . .	30
2.5.1	Bibliotheken . . . . .	30
2.5.2	Standards für die Graphikprogrammierung . . . . .	30
2.5.2.1	Virtual Reality Modeling Language . . . . .	30
2.5.2.2	Open Graphics Library . . . . .	31

## **Kapitel 3**

### **Gesichtspunkte der Glaziologie** **33**

3.1	Glaziologie . . . . .	33
3.2	Eigenschaften von Gletschern . . . . .	35
3.3	Gletscherüberwachung . . . . .	37
3.4	Zur aktuellen Situation des Gletschers Jakobshavn Isbræ . . . . .	40

## **Kapitel 4**

### **Bildzuordnungsverfahren** **45**

4.1	Optischer Fluss . . . . .	45
4.1.1	Grundlagen des optischen Flusses . . . . .	45
4.1.2	Die 2D-Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses . . . . .	47
4.1.3	Methoden des optischen Flusses . . . . .	49
4.1.3.1	Lokale Methode . . . . .	50
4.1.3.2	Globale Methode . . . . .	51
4.1.3.3	Vergleich von lokalen und globalen Methoden . . . . .	52
4.2	Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker . . . . .	53
4.3	Kreuzkorrelation . . . . .	55
4.3.1	Prinzip . . . . .	55
4.3.2	Subpixelberechnung . . . . .	58
4.4	Least Squares Matching . . . . .	61
4.4.1	Prinzip . . . . .	61
4.4.2	Radiometrische Anpassung . . . . .	62
4.4.3	Geometrische Transformation . . . . .	65

<b>Kapitel 5</b>	
<b>Photogrammetrische Auswertungen im Bildraum</b>	<b>69</b>
5.1 Vorarbeiten für die Bildzuordnung	69
5.2 Kamerabewegungen	72
5.3 Gletscherbildzuordnungen	75
5.3.1 Allgemeine Modifikationen für das Matching der Gletscherbilder	75
5.3.2 Modifikationen der Kreuzkorrelation	77
5.3.3 Modifikationen der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate	80
5.4 Ergebnisse der Bildzuordnungsverfahren	85
5.5 Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse	89
<b>Kapitel 6</b>	
<b>Überführung der Ergebnisse in den Objektraum</b>	<b>93</b>
6.1 Überblick	93
6.2 Grundlagen der zentralperspektivischen Abbildung	95
6.2.1 Innere Orientierung eines Bildes	95
6.2.2 Äußere Orientierung eines Bildes	96
6.2.3 Kollinearitätsgleichungen	97
6.3 Einzelbildauswertung	98
6.3.1 Bestimmung der Orientierungsparameter	98
6.3.2 Projektive Transformation	102
6.4 Weitere Möglichkeiten zur Objektraumüberführung	105
6.4.1 Ebene Entzerrung	105
6.4.2 Verwendung digitaler Geländemodelle	106
<b>Kapitel 7</b>	
<b>Beurteilung der Methoden der Bildzuordnung</b>	<b>109</b>
7.1 Beurteilungskriterien	109
7.2 Beurteilung der Methoden	111
7.2.1 Genauigkeit	111
7.2.2 Zuverlässigkeit	115
7.2.3 Größe des Konvergenzradius	116
7.2.4 Effektivität	118
7.3 Anwendbarkeit der Matchingstrategien	120

<b>Kapitel 8</b>	
<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>121</b>
8.1 Zusammenfassung .....	121
8.2 Ausblick .....	124
<b>Anhang</b>	<b>I</b>
A Ergänzungen der vorangegangenen Kapitel .....	I
A.1 Bildsequenzen .....	I
A.2 Kamerabewegung .....	I
A.3 Beispiele für die Lösung des linearen Komplementaritätsproblems (LCP) .....	II
A.4 Matrizenstruktur beim temporalen LSM .....	IV
A.5 Bildzuordnung .....	V
A.6 Meereszeiten Ilulissat .....	VII
A.7 Koordinatenliste .....	IX
A.8 Genauigkeitsanalyse .....	X
A.9 Effektivität .....	XII
B Programmdokumentation .....	XIII
B.1 Datei .....	XIII
B.2 Tracking .....	XIV
B.3 Analyse .....	XVI
B.4 Extras .....	XIX
B.5 Protokolle .....	XXI
B.6 Koordinatenlisten .....	XXIV
C Inhalt des Datenträgers .....	XXVII
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XXIX</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Beziehungen zur Objektbewegung (FRANZ, 2001) . . . . .	6
Abbildung 2-2:	Dreidimensionaler Bildblock . . . . .	7
Abbildung 2-3:	Zwei aufeinander folgende Bilder a und b mit ihrem Differenzbild c (WESTFELD, 2004) . . . . .	7
Abbildung 2-4:	Differenzbild c, berechnet aus einem statischen Hintergrundbild a und einem Bild b der zu untersuchenden Bildsequenz . . . . .	8
Abbildung 2-5:	Ursachen des Korrespondenzproblems (nach BALTSAVIAS, 1999) . . . . .	9
Abbildung 2-6:	Visualisierung des Blendenproblems in der Bewegungsanalyse (nach BALTSAVIAS, 1999) . . . . .	10
Abbildung 2-7:	Klassifizierung von Matchingverfahren . . . . .	11
Abbildung 2-8:	Patches der flächenbasierten Bildzuordnung . . . . .	12
Abbildung 2-9:	Merkmalsbasierte Verfahren (MAAS, IPF, TU Dresden, 2002) . . . . .	12
Abbildung 2-10:	Grauwertinterpolation (LUHMANN, 2000) . . . . .	14
Abbildung 2-11:	Visueller Vergleich der Interpolationsergebnisse (MCGLONE, 2004) . . . . .	15
Abbildung 2-12:	Dreistufige Bildpyramide (nach WESTFELD, 2004) . . . . .	16
Abbildung 2-13:	Informationsverlust (WESTFELD, 2004) . . . . .	16
Abbildung 2-14:	Struktur einer Bildpyramide (BALLARD/BROWN, 1982) . . . . .	16
Abbildung 2-15:	Normalverteilung der Beobachtungen um den wahren Wert $\mu$ (NIEMEIER, 2002) . . . . .	18
Abbildung 2-16:	Stillvideokamera Kodak DCS 14n (url: [ <a href="http://www.dpreview.com/">http://www.dpreview.com/</a> ], 2005) . . . . .	26
Abbildung 2-17:	Aufnahmen des Jakobshavn Isbræ . . . . .	27
Abbildung 2-18:	Elektronisches Bautachymeter Elta R55 der Firma Zeiss (url: [ <a href="http://wwwgi.geo.tu-dresden.de/">http://wwwgi.geo.tu-dresden.de/</a> ], 2005) . . . . .	28
Abbildung 3-1:	Glaziologie im wissenschaftlichen Kontext (nach KFG, 2005) . . . . .	33
Abbildung 3-2:	Landsat-Satellitenaufnahme des Jakobshavn Isbræ, Grönland (PLUMMER, 2005) . . . . .	35
Abbildung 3-3:	Akkumulation und Ablation eines Gletschers (KOLENDA, 2000) . . . . .	37

Abbildung 3-4:	Satellitenbild des Gletschers Jakobshavn Isbræ, Grönland, Landsat-7 (LANDSAT, 2005) . . . . .	38
Abbildung 3-5:	Satellitenbild des Gletschers Stancomb-Wills, Antarktis, RADARSAT (TU Dresden, IPG, 2005) . . . . .	38
Abbildung 3-6:	Airborne Laser Scanning (NASA, 2005) . . . . .	39
Abbildung 3-7:	Stillvideokamera-Aufnahme des Gletschers Jakobshavn Isbræ (TU Dresden, IPF, 2004) . . . . .	39
Abbildung 3-8:	Geographische Einordnung des Gletschers Jakobshavn Isbræ. . . . .	40
Abbildung 3-9:	Farbcodiertes SAR-Satellitenbild visualisiert den Geschwindigkeitsanstieg des Gletschers Jakobshavn Isbræ, Grönland (JOUGHIN et al., 2004). . . . .	40
Abbildung 3-10:	Rückzug des Gletschers Jakobshavn Isbræ, Grönland (JOUGHIN et al., 2004). . . . .	41
Abbildung 3-11:	Graphische Darstellung der Auswirkungen einer abgebrochenen Gletscherfront auf den Jakobshavn Isbræ (url: [ <a href="http://www.nasa.gov/">http://www.nasa.gov/</a> ], 2005) . . . . .	42
Abbildung 3-12:	3D-DGM generiert aus satellitengestützten Mikrowellenmessungen (url: [ <a href="http://cires.colorado.edu/">http://cires.colorado.edu/</a> ], 2005). . . . .	43
Abbildung 3-13:	Grönlands Eisvariationen zwischen 1997-2003 ( <a href="http://nasa.gov/">http://nasa.gov/</a> , 2005). . . . .	43
Abbildung 4-1:	Optischer Fluss einer rotierenden Kugel (BALLARD/BROWN, 1982) . . . . .	45
Abbildung 4-2:	Einfache schematische Darstellung des optischen Flusses (WESTFELD, 2004) . . . . .	46
Abbildung 4-3:	Blendenproblem (nach BARRON/THACKER, 2005) . . . . .	49
Abbildung 4-4:	Geometrische Erklärung der Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (nach WU, 2002-2004) . . . . .	49
Abbildung 4-5:	Blockdiagramm zur Berechnung des lokalen optischen Flusses (nach BARRON/THACKER, 2005) . . . . .	50
Abbildung 4-6:	Template und Suchpatch bei der Kreuzkorrelation (MAAS, IPF, Dresden, 2003). . . . .	55
Abbildung 4-7:	Suchstrategie der Kreuzkorrelation (nach MAAS, IPF, Dresden, 2003) . . . . .	55
Abbildung 4-8:	Plot des Kreuzkorrelationskoeffizienten als Funktion von $x$ und $y$ . . . . .	57
Abbildung 4-9:	Ausschnitt einer Kreuzkorrelationskoeffizientenmatrix. . . . .	57
Abbildung 4-10:	Differenz $d$ und der Abstand $l$ von anderen Nebenmaxima in der Nachbarschaft (nach BALTSAVIAS, 1999) . . . . .	58
Abbildung 4-11:	Maximale Kreuzkorrelation mit Subpixelgenauigkeit (nach BALTSAVIAS, 1999) . . . . .	58

Abbildung 4-12: Ein nach unten gewölbtes Paraboloid mit seinem lokalen Koordinatensystem (nach url: [ <a href="http://www.bartleby.com/">http://www.bartleby.com/</a> , 2005]) . . . . .	59
Abbildung 4-13: Referenzpatch a und Suchpatch b (61x61 Pixel) . . . . .	64
Abbildung 4-14: Visualisierung der Ergebnisse der radiometrischen Transformation . . . . .	64
Abbildung 4-15: Visualisierung einer Punktmessung mit LSM (nach BALTSAVIAS, 1999). . . . .	65
Abbildung 5-1: Dialogfeld „Eingabedaten und Ausgabeverzeichnis“ . . . . .	69
Abbildung 5-2: Eingeschränkter Bildbereich. . . . .	70
Abbildung 5-3: Methoden der Featurewahl . . . . .	71
Abbildung 5-4: Punktverteilung zur Bestimmung der Kamerabewegung der Zoomsequenz vom 19.08.2004. . . . .	72
Abbildung 5-5: Trajektorien der Kamerabewegungen. . . . .	73
Abbildung 5-6: Geometrische Transformation eines Bildes mit anschließender Grauwertinterpolation (MAAS, IPF, Dresden, 2003). . . . .	74
Abbildung 5-7: Matchingstrategien . . . . .	75
Abbildung 5-8: Änderungen der Beleuchtungsverhältnisse. . . . .	76
Abbildung 5-9: Registerkarte „Ausschlusskriterien“ . . . . .	76
Abbildung 5-10: Patchgeometrie (unmaßstäblich). . . . .	77
Abbildung 5-11: Schematische Darstellung des Kreuzkorrelationsprinzips unter Verwendung verschiedener Prädiktionen in x- und y-Richtung. . . . .	78
Abbildung 5-12: Schlecht korreliertes Ergebnis einer Kreuzkorrelation. . . . .	78
Abbildung 5-13: Temporales LSM über drei Bilder einer Sequenz. . . . .	80
Abbildung 5-14: Spatiales LSM über drei Bilder einer Sequenz mit einer Nachbarschaft von acht Bildpunkten . . . . .	82
Abbildung 5-15: Zum Einfluss der Restriktionsgewichtung auf die Hauptbedingung der MKQ . . . . .	83
Abbildung 5-16: Auswirkungen der Ausschlusskriterien und LSM-Restriktionen . . . . .	85
Abbildung 5-17: Beispiel einer y-Trajektorie aus dem Kalbungsbereich des Jakobshavn Isbræ Gletschers . . . . .	86
Abbildung 5-18: Tidenverlauf von Ilulissat/Grönland. . . . .	87
Abbildung 5-19: Vertikale Punktbewegung eines Features des hinteren Gletscherstroms . . . . .	87
Abbildung 5-20: Geschwindigkeiten des Gletschers Jakobshavn Isbræ, 20.08.2004, Angaben in Pixel/Tag . . . . .	88
Abbildung 5-21: Visualisierung aller Trajektorien im ersten Bild der Sequenz . . . . .	89
Abbildung 5-22: Visualisierung einzelner Trajektorien. . . . .	90
Abbildung 5-23: Microsoft Office Excel-Diagramme . . . . .	90
Abbildung 5-24: Einzelne Frames eines Videofilms der Trajektorien. . . . .	91

Abbildung 6-1:	Lokales Koordinatensystem N1-N4 . . . . .	93
Abbildung 6-2:	Verteilung der Zielmarken auf dem stabilen Vordergrund des Gletscherstroms . . . . .	94
Abbildung 6-3:	Innere Orientierung eines Bildes (LUHMANN, 2000). . . . .	95
Abbildung 6-4:	Äußere Orientierung eines Bildes in der terrestrischen Photogrammetrie (nach LUHMANN, 2000) . . . . .	96
Abbildung 6-5:	Einzelbildauswertung (nach LUHMANN, 2000) . . . . .	98
Abbildung 6-6:	Messkonfiguration für die Stereobildaufnahmen. . . . .	99
Abbildung 6-7:	Bündelblockausgleichung (LUHMANN, 2000). . . . .	99
Abbildung 6-8:	Festlegung der Koordinatensysteme und der Drehreihenfolge im Programm „PhotoModeler“. . . . .	101
Abbildung 6-9:	Radialer Versatz durch Höhenunterschied. . . . .	102
Abbildung 6-10:	Soll-Ist-Vergleich der Lagekoordinaten. . . . .	103
Abbildung 6-11:	Bild- und Objektkoordinaten der Gletscherpasspunkte sowie deren Verbesserungen. . . . .	105
Abbildung 6-12:	Visualisierung der Verbesserungen der Gletscherpasspunkte . . . . .	106
Abbildung 6-13:	Räumliche Punktbestimmung im DGM (LUHMANN, 2000). . . . .	106
Abbildung 7-1:	Matchingkonfiguration für die Genauigkeitsuntersuchungen . . . . .	111
Abbildung 7-2:	A posteriori Standardabweichungen des Ausgleichungsmodells in [Pixel]; OF, KK, LSM . . . . .	111
Abbildung 7-3:	A posteriori Standardabweichungen des Ausgleichungsmodells in [Pixel]; LSM. . . . .	112
Abbildung 7-4:	Standardabweichungen des Soll-Ist-Vergleichs in x und y in [Pixel] . . . . .	113
Abbildung 7-5:	Einfluss der Patchgröße auf die Genauigkeit der Bildzuordnungsverfahren . . . . .	114
Abbildung 7-6:	Korrekte Bildzuordnungen; OF, KK, LSM . . . . .	115
Abbildung 7-7:	Korrekte Bildzuordnungen; KK, LSM. . . . .	116
Abbildung 7-8:	Soll-Ist-Vergleich zur Ermittlung des Konvergenzradius . . . . .	117
Abbildung 7-9:	Geschwindigkeiten der Bildzuordnungsverfahren im Vergleich . . . . .	118
Abbildung 7-10:	Ergebnisse der Bildzuordnungsverfahren unter Anwendung zwei verschiedener Matchingstrategien . . . . .	120
Abbildung A-1:	Differenzen zwischen Soll- und Messwerten in [Pixel]. . . . .	X
Abbildung A-2:	Ergebnisse der vermittelnden Ausgleichung in [Pixel] . . . . .	XI



---

Abbildung B-1:	Dialogfeld „Eingabedaten und Ausgabeverzeichnis wählen“ . . . . .	XIII
Abbildung B-2:	Dialogfeld „Punktraster“ . . . . .	XIV
Abbildung B-3:	Dialogfeld „Kreuzkorrelation“ . . . . .	XV
Abbildung B-4:	Dialogfeld „Avi's der einzelnen Trajektorien“ . . . . .	XVI
Abbildung B-5:	Visualisierung der Kreuzkorrelationskoeffizienten . . . . .	XVII
Abbildung B-6:	Dialogfeld „Features entfernen“ . . . . .	XVIII
Abbildung B-7:	Dialogfeld „Einstellungen“ . . . . .	XX
Abbildung B-8:	Protokoll der Kreuzkorrelation . . . . .	XXI
Abbildung B-9:	Protokoll eines LSM ohne Restriktionen . . . . .	XXII
Abbildung B-10:	Koordinatenliste im *.koo-Format . . . . .	XXIV
Abbildung B-11:	Koordinatenliste im *.dat-Format . . . . .	XXV



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Technische Spezifikationen der Stillvideokamera Kodak DCS 14n . . . . .	26
Tabelle 2-2:	Merkmale der Bildsequenzen #5 und #6. . . . .	27
Tabelle 6-1:	Elemente der inneren Orientierung (Kodak DCS 14n, Normalwinkelobjektiv) . . . . .	99
Tabelle 6-2:	Elemente der äußeren Orientierung des Bildes „M.jpg“. . . . .	101
Tabelle 7-1:	Parameter des Bildresamplings. . . . .	113
Tabelle A-1:	Übersicht der aufgenommenen Bildsequenzen. . . . .	I
Tabelle A-2:	Matchingkonfiguration zur Bestimmung der Kamerabewegungen . . . . .	I
Tabelle A-3:	Matchingkonfiguration der Bildzuordnungen. . . . .	V
Tabelle A-4:	Meereszeiten Ilulissat vom 20.08.2004. . . . .	VII
Tabelle A-5:	Meereszeiten Ilulissat vom 21.08.2004. . . . .	VIII
Tabelle A-6:	Koordinatenübersicht der Passpunkte und Tachymeterstandpunkte. . . . .	IX
Tabelle A-7:	Rechenzeiten der Bildzuordnungsverfahren in Sekunden/Bildsequenz . . . . .	XII



# Abkürzungsverzeichnis

1D	Eindimensional
2D	Zweidimensional
2-DMA	2-dimensional motion analysis (Zweidimensionale Bewegungsanalyse)
3D	Dreidimensional
ALS	Airborne Laser Scanning
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BCCE	Brightness Constancy Constraint Equation
CCD	Charge-coupled Device
CCD	Charge-coupled Device
CFC	Compact Flash Card
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CV	Computer Vision
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGM	Digitales Geländemodell
DVD	Digital Versatile Disc
ERS	European Remote Sensing Satellites
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GMM	Gauß-Markov-Modell
GPS	Globales Positionierungssystem (engl.: global positioning system)
H.O.T.	higher-order terms (Glieder höherer Ordnung)
HTML	Hypertext Markup Language
INS	Inertiales Navigationssystem
IPL	Image Processing Library
KK	Kreuzkorrelation
KLT	Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker
LCA	Linearer Komplementaritätsalgorithmus
LCP	Lineares Komplementaritätsproblem
LSM	Least Squares Matching
MB	Megabyte
MKQ	Methode der kleinsten Quadrate, Kleinste-Quadrate-Ausgleichung
MMC	Multi Media Card
MPEG	Moving Picture Experts Group
NASA	National Aeronautics and Space Administration

OF	Optischer Fluss (engl.: optical flow)
OFCE	Optical Flow Constraint Equation
OLE	Object Linking and Embedding
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
OpenGL	Open Graphics Library
RAM	Random Access Memory
RGB	Rot-Grün-Blau-Farbmodell
S/N	Signal/Rausch-Verhältnis (engl.: signal to noise ratio)
SAR	Synthetic Aperture Radar
SSD	Sum of Square Differences
URL	Uniform Resource Locator
VRML	Virtual Reality Modeling Language
VV	Verschiebungsvektor
WGS	World Geodetic System
WWW	World Wide Web

# Kapitel 1

## Einführung

Die Erfassung der Gletscherdynamik stellt eine wichtige Aufgabenstellung in der Glaziologie dar. Insbesondere die Überwachung von Gletschergebieten in Hinblick auf die zeitlichen Variationen ihrer Geometrie sowie die Erstellung von Massenbilanzen ist für das Verständnis des Zusammenhanges zwischen dem weltweiten Gletscherschwund und den lokalen sowie globalen klimatischen Wandlungsprozessen von großer Bedeutung.

Der Jakobshavn Isbræ, der größte Gletscher Grönlands und einer der aktivsten Ausflussgletscher der Welt, ist Untersuchungsgegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Aktivitäten. Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Institute Planetare Geodäsie und Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden in Kooperation mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) konnte im Jahr 2004 eine Expedition nach Grönland realisiert werden. Die Ziele des Projektes „Untersuchung gezeiteninduzierter Variationen der Ausflussgeschwindigkeit am Jakobshavn Isbræ, Grönland“ sind, Aussagen über die Fließgeschwindigkeit sowie den Einfluss der Meereszeiten auf das Bewegungsverhalten des Jakobshavn Isbræ zu treffen. Diese Geschwindigkeitsmessungen sind ein Bestandteil der Massenbilanz des Gletschers. Eine solche Massenbilanz liefert Informationen über den Eismassenausstoß und dadurch über den Vorstoß bzw. den Rückzug des Gletscherstroms.

### 1.1 Motivation

Die Methoden der terrestrischen Photogrammetrie (Nahbereichsphotogrammetrie) verstehen sich als ein Teilgebiet der optischen 3D-Messtechnik und 3D-Bildverarbeitung. Sie ermöglichen die hochgenaue und berührungslose Erfassung beliebiger räumlicher Objekte aus reflektierter oder emittierter Strahlung.

Die Nahbereichsphotogrammetrie weist einen ausgeprägt interdisziplinären Charakter auf. Sie ist fest verbunden mit Methoden aus Mathematik, Physik und Informatik. Darüber hinaus mit den Bereichen Computer Vision, Computergraphik, digitale Bildverarbeitung, Geoinformationssysteme und Kartographie (LUHMANN, 2000). Die Nahbereichsphotogrammetrie konnte sich in den letzten Jahrzehnten durch das Aufkommen digitaler Bildaufnahmeverfahren und Bildverarbeitungstechniken sowie durch die gewaltigen Fortschritte im Bereich der Computerperformance vielfältige interdisziplinäre Einsatzmöglichkeiten erschließen. Die Anwendungsgebiete reichen von Automobil-, Maschinen- und Schiffbau über Architektur, Denkmalpflege und Archäologie bis hin zu Bewegungsanalysen in Bereichen der Strömungsmesstechnik, Ballistik oder menschlichen Ganganalyse.

Die Vorteile der Nahbereichsphotogrammetrie als dreidimensionale Messtechnik werden im Folgenden aufgezeigt:

- Es können, in Abhängigkeit von der Bildauflösung, praktisch beliebig viele Messpunkte in einem Bild erfasst werden.
- Die Aufnahmezeit ist hierbei unabhängig von der Anzahl der Messpunkte.
- Die zeitliche Auflösung ist sehr hoch und kann unter der Verwendung von Hochgeschwindigkeitskameras bei einer Aufnahme Frequenz von mehreren tausend Bildern pro Sekunde liegen. Somit ist die Erfassung kinematischer Vorgänge möglich.

- Die Nahbereichsphotogrammetrie ist ein berührungsloses Messverfahren und gewährleistet die Vermessung schwer zugänglicher oder gar nicht erreichbarer Objekte.
- Die Wahl des Aufnahmestandpunktes ist sehr flexibel.
- Die Lösung komplexer photogrammetrischer Aufgabenstellungen vor Ort ist möglich.
- Die Nutzung von rechnergestützten Verfahren macht die Anschaffung und Verwendung spezieller Auswertegeräte überflüssig.
- Eine Automatisierung der Bildmessung und -auswertung konnte in vielen Bereichen der Nahbereichsphotogrammetrie erreicht werden und ermöglicht somit wirtschaftliche und genaue Messvorgänge.

Unter anbeacht der aufgeführten Vorteile sind die Messanordnungen und Auswertestrategien der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie für die Detektion von Gletscherbewegungen eine interessante Option. Durch den Einsatz einer digitalen Stillvideokamera besteht die Möglichkeit, monokulare räumlich und zeitlich hochaufgelöste Bildsequenzen des Gletschers zu generieren, ohne den Eiskörper betreten zu müssen. Die Ergebnisse der photogrammetrischen Messungen liegen als Trajektorien von prinzipiell beliebig vielen Punkten der Gletscheroberfläche bzw. als Bewegungsvektorfelder vor. Diese können im Anschluss auf ihre zeitlichen Variationen sowie auf die Korrelationen mit dem vorliegenden Gezeitensignal von Ilulissat/Grönland untersucht werden. Die photogrammetrische Bestimmung räumlich und zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder bildet damit die Interpretationsgrundlage des Fließverhaltens am Jakobshavn Isbræ Gletscher in Grönland.

Eng verknüpft mit der Nahbereichsphotogrammetrie ist der Wunsch nach einer vollautomatischen Zuordnung korrespondierender Bildmerkmale zwischen zwei oder mehr Bildern. Die digitale Bildzuordnung ist eine der ältesten, aber dennoch auch aktuellsten Problemstellungen des Computerehens (engl.: computer vision). Im Gegensatz zur bereits hochgenauen und schnellen automatischen Detektion signalisierter Zielmarken ist die Analyse beliebiger Objektszenen noch Bestandteil nachhaltiger Forschung. Ein weiterer Schritt zur Lösung des Korrespondenzproblems soll Gegenstand dieser Arbeit sein.



## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit zum Thema „Entwicklung von Verfahren zur räumlich und zeitlich aufgelösten 2D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie“ beschäftigt sich mit der photogrammetrischen Verfolgung und Analyse der Bewegungen des grönländischen Gletschers Jakobshavn Isbræ. Hierzu gehören die Auswahl, Modifizierung und Softwareimplementierung von geeigneten digitalen Bildzuordnungsverfahren.

Vor Beginn der praktischen Arbeit werden verschiedene Bildzuordnungsalgorithmen hinsichtlich ihrer Eignung für die Gletscherauswertung zusammengestellt und bewertet. Das umfasst die Analyse der theoretischen Prinzipien, der Anwendungsbereiche sowie der Vor- und Nachteile.

Eine fundamentale Grundlage für die Modifikationen der Bildzuordnungsalgorithmen ist das a priori Wissen einer gleichmäßigen Gletscherbewegung in einer Richtung. Darauf aufbauend werden in dieser Arbeit verschiedene Vorgehensweisen zur Abwandlung der ursprünglichen Berechnungen für die Bildzuordnung dokumentiert und implementiert. Da für eine repräsentative Quantifizierung der Gletscherbewegung mehrere hundert Punkte der Gletscheroberfläche verfolgt werden müssen, sind weitere Schwerpunkte die Anwendungsoptimierung zur Messung großer Punktzahlen sowie die automatische Bestimmung fehlerfreier und fehlerbehafteter Trajektorien. Außerdem werden Möglichkeiten zur Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse aufzuzeigt.

Im Anschluss an die Auswertungen im Bildraum sind die gemessenen Bildkoordinaten über Stereobildpaare und terrestrische Messungen in den Objektraum zu überführen.

Neben der Bearbeitung der Gletscherbildszenen ist die Entwicklung von Testverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung der verwendeten Matchingverfahren ein weiterer Gegenstand der vorliegenden Arbeit, insbesondere die Untersuchung der Algorithmen betreffend ihrer Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Praktikabilität ist von Interesse.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel und vermittelt einen theoretischen Einblick in die verwendeten Bildzuordnungsverfahren sowie einen Überblick über die notwendigen Arbeiten für die Auswertung der Bilder des Jakobshavn Isbræ Gletschers.

Zunächst wird als Einführung und Motivation die Notwendigkeit von Überwachungsmessungen im Untersuchungsgebiet des Gletschers Jakobshavn Isbræ beschrieben und das Potential einer photogrammetrischen Herangehensweise an die Thematik vorgestellt.

Das sich anschließende Kapitel 2 befasst sich mit den benötigten Grundlagen. In diesem Zusammenhang werden insbesondere ausgewählte Bereiche der digitalen Bildverarbeitung in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie (Kapitel 2.1), Aspekte der geodätischen Ausgleichsrechnung (Kapitel 2.2) und der Softwareprogrammierung (Kapitel 2.5) behandelt. Des Weiteren wird die photogrammetrische Datenakquisition (Kapitel 2.3) erörtert und eine bereits erarbeitete Studienarbeit vorgestellt (Kapitel 2.4).

Im dritten Kapitel folgt eine Einführung in die Glaziologie als Wissenschaft (Kapitel 3.1) sowie in die Entstehung, den Aufbau und die Möglichkeiten der Überwachung von Gletschern (Kapitel 3.2 und Kapitel 3.3). Der Abschluss des Kapitels 3 zeigt die aktuelle Situation des grönländischen Gletschergebietes Jakobshavn Isbræ (Kapitel 3.4).

Die verwendeten Bildzuordnungsverfahren werden im Kapitel 4 theoretisch betrachtet. Hierzu zählt das Verfahren des optischen Flusses (Kapitel 4.1), der Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker (Kapitel 4.2), die Kreuzkorrelation (Kapitel 4.3) und die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Kapitel 4.4).

Das fünfte Kapitel beschreibt die erforderlichen Prozeduren für die photogrammetrische Auswertung im Bildraum, das heißt die Vorarbeiten für die Bildzuordnung (Kapitel 5.1), die Bestimmung der Kamerabewegungen (Kapitel 5.2) und die eigentliche Gletscherbildzuordnung (Kapitel 5.3). Darüber hinaus folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Bildzuordnungsverfahren (Kapitel 5.4) sowie eine Dokumentation der verschiedenen Möglichkeiten für die Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse (Kapitel 5.5).

Die Überführung der Resultate der Bildraumauswertungen in den Objektraum erfolgt in Kapitel 6. Nach einem Überblick (Kapitel 6.1) werden die Grundlagen der zentralperspektivischen Abbildung diskutiert (Kapitel 6.2) und das Vorgehen bei einer Einzelauswertung erläutert (Kapitel 6.3).

Im Kapitel 7 steht die Analyse der Bildzuordnungsverfahren unter verschiedenen Gesichtspunkten im Zentrum des Interesses. Hierzu gehören die Genauigkeit, die Zuverlässigkeit, die Größe des Konvergenzradius und die Effektivität.

Das achte Kapitel fasst abschließend die Ergebnisse zusammen, die im Laufe der Arbeit realisiert werden konnten. Es wird eine Einschätzung des Erreichten gegeben. Weiterhin werden aufgetretene Probleme, Grenzen der Methodik und Verbesserungsmöglichkeiten zur Thematik angeführt.

## Kapitel 2

# Grundlagen, Datenakquisition und Rückblick

In dem folgenden Kapitel werden die Grundlagen im Bereich der digitalen Bildverarbeitung in der Nahbereichsphotogrammetrie (Kapitel 2.1), insbesondere der photogrammetrischen Bewegungsanalyse (Kapitel 2.1.1), der Interpolationsverfahren (Kapitel 2.1.2) sowie der Verwendung von Bildpyramiden als Daten- und Prozessstruktur (Kapitel 2.1.3) behandelt. Des Weiteren werden die für die Auswertung der Gletscherbildfolgen benötigten Kenntnisse der Ausgleichsrechnung aufgeführt (Kapitel 2.2). Kapitel 2.3 beschäftigt sich mit der photogrammetrischen Datenakquisition am grönländischen Gletscher Jakobshavn Isbræ. Da die Softwarelösung der im weiteren Verlauf folgenden Auswertungen auf einer im Vorfeld bearbeiteten Abhandlung beruht, soll Kapitel 2.4 eine Zusammenfassung dieser vorangegangenen Arbeiten geben. Grundlegende Aspekte der Programmierarbeit sind Gegenstand des Abschnittes 2.5.

## 2.1 Ausgewählte Bereiche der digitalen Bildverarbeitung in der Photogrammetrie

### 2.1.1 Photogrammetrische Bildzuordnungen und Bewegungsanalysen

#### 2.1.1.1 Bewegung und Bewegungsdetektion

Die Bewegung von Objekten ist eines der wichtigsten Merkmale von Bildfolgen und offenbart deren dynamische Abläufe, also die Beziehung zwischen räumlichen Bildmerkmalen und zeitlichen Veränderungen. Die Analyse der Bewegung beinhaltet unter anderem folgende Punkte (MCGLONE, 2004):

- Bewegungsdetektion für Überwachungsaufgaben
- Datenkompression (MPEG)
- Bewegungsbasierte Bildsegmentierung
- Tiefenrekonstruktion aus Bewegungen
- Bildregistrierung
- Bildmosaikierung

Eine der grundlegendsten Tatsachen in der Bewegungsbestimmung ist, dass eine Bewegung nur dort detektiert und im Anschluss numerisch erfasst werden kann, wo sich auch die Grauwerte des Bildes ändern (JÄHNE, 2002). Über die Ausnutzung der zeitlichen Redundanz durch die Beobachtung der Veränderungen der Grauwerte ist eine Bewegungsdetektion innerhalb der Szene möglich. Intensitätsänderungen bewirken folglich die Visualisierung der stattgefundenen Bewegung. Der Umkehrschluss ist in der Praxis jedoch nicht gegeben: Bewegungen können zwar Bildänderungen hervorrufen, allerdings wird nicht jede Bildänderung durch eine Objektbewegung verursacht. Die Beziehungen zwischen der Bewegung in der Bildebene und der tatsächlichen Bewegung im Objektraum sind genau dann äquivalent, wenn die Objekte während ihrer Bewegung in der Szene nicht die Beleuchtung in der Bildebene verändern, was lediglich in wenigen Fällen vorkommt. Intensitätsänderungen können zum Beispiel durch eine sich ändernde Lichtquelle hervorgerufen werden. Ebenso möglich ist eine indirekt ausgelöste Variation der Beleuchtungsverhältnisse durch das sich bewegende Objekt selbst.

Es stellt sich nun die Frage, wie bedeutend die Abweichungen zwischen der realen und der durch den Sensor aufgenommenen Bewegung sind und ob sie in der Praxis vernachlässigt werden können. Ein Beispiel (HORN, 1981) mit zwei Extrempositionen zeigt Abbildung 2-1. Es wird eine Kugel mit gleichmäßiger Oberfläche angenommen. In Abbildung 2-1a rotiert die Kugel um jede beliebige Achse, ohne dass sich Intensitäten im Bild ändern. Demnach ist keine Bewegung im Bild erkennbar, obwohl das reale Bewegungsfeld ungleich Null ist. Es existiert also eine tatsächliche Bewegung, die jedoch durch den Sensor nicht sichtbar erfasst wurde. Im Gegensatz dazu befindet sich die gleiche Kugel in Ruhe (Abbildung 2-1b) und es kommt zu einer Veränderung der Grauwerte durch eine sich bewegende Lichtquelle. Diese Variationen werden durch die Kamera erfasst und bewirken ein optisches Strömungsfeld einer nicht existierenden Objektbewegung.

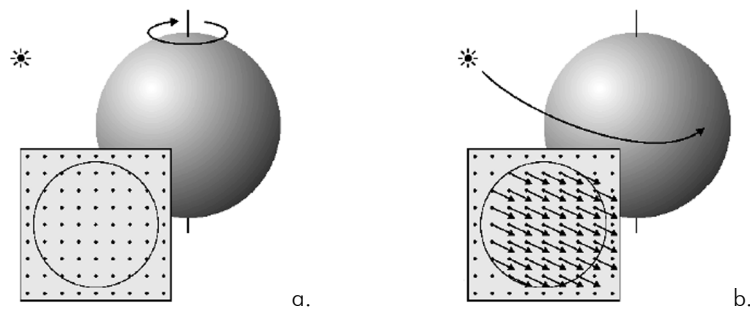


Abbildung 2-1: Beziehungen zur Objektbewegung (FRANZ, 2001)

- a. Optisches Strömungsfeld, trotz Objektbewegung, gleich Null (keine Intensitätsänderungen)
- b. Bewegungsfeld, aber nicht das aufgenommene optische Strömungsfeld, gleich Null

Ein weiteres Beispiel für den ersten Fall ist, neben den bereits erwähnten Unterschieden in der Beleuchtung während einer Aufnahme, eventuell vorhandenes Bildrauschen. Der zweite Fall wird durch homogene Objektflächen hervorgerufen und zeigt die Notwendigkeit von Textur, welche das zu verfolgende Objekt aufweisen sollte.

Für praktische Anwendungen wird meist angenommen, dass sich das tatsächliche Bewegungsfeld nur in geringer Größenordnung von der erfassten Bewegung unterscheidet. Ist dies nicht der Fall oder sind die Genauigkeitsanforderungen der praktischen Auswertung zu hoch, müssen die Lichtquelle sowie die Sensorposition zusätzlich berücksichtigt werden. In den vorliegenden Bildsequenzen des grönländischen Gletschers Jakobshavn Isbræ verursacht die Sonne als natürliche Lichtquelle stark ausgeprägte und zeitlich variable Schatten. Diese werden nicht modelliert, sondern ihre Auswirkungen durch geeignete Modifikationen der implementierten Matchingalgorithmen reduziert (siehe Kapitel 5.3).

Die bereits oben angeführte temporale Bildfolge ist als eine sequentielle Mehrbildaufnahme (Abbildung 2-2) der Form

$$g_n = g_n(x, y, t) \quad \text{mit} \quad n = 1 \dots N \quad (2.1)$$

$N$  : Anzahl der Bilder innerhalb der Bildsequenz

zu verstehen und ermöglicht eine Erfassung zeitabhängiger räumlicher Objektbewegungen, wie zum Beispiel Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorgänge. Ein Mehrbildverband ist nach Gleichung (2.1) dreidimensional definiert (MAAS, 1997). Neben den diskret auftretenden Pixelkoordinaten  $(x, y)$  wird die Zeitkoordinate  $t$  eingeführt. Die Zeitintervalle  $\Delta t$  zwischen aufeinander folgenden Bildern einer Bildfolge werden durch die Framerate des Sensors und/oder die vorliegende Problemstellung, also die geforderte Höhe der zeitlichen Auflösung, bestimmt.



Abbildung 2-2: Dreidimensionaler Bildblock

Zur Aufnahme werden im Allgemeinen statische digitale Stillvideokameras oder (Hochgeschwindigkeits-)Videokameras verwendet. Soll eine dreidimensionale Analyse betrieben werden, ist die vorherige Synchronisation und Kalibrierung der verwendeten Kameras notwendig.

Ein einfaches Beispiel für die Analyse von Bewegungen ist die Generierung von Differenzbildern zwischen zwei zeitlich benachbarten Bildern einer Bildsequenz (Abbildung 2-3). Sie detektieren Bereiche, in denen die Bewegung stattfindet, allerdings eignen sie sich aufgrund der Rauschanfälligkeit nicht für pixel- oder subpixelgenaue Anwendungen. Die Vorschrift zur Erstellung des binären Differenzbildes  $g_{Diff}(x, y)$  aus Abbildung 2-3c lautet:

$$g_{Diff}(x, y) \begin{cases} 255 & \text{für } |g_n(x, y, t) - g_{n+1}(x, y, t + \Delta t)| \leq \varepsilon \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.2)$$

Sobald der Betrag der Grauwertdifferenzen zweier Bilder an der Stelle  $(x, y)$  einen zuvor definierten Schwellwert  $\varepsilon$  überschreitet, wird eine Bewegung detektiert. Der sich bewegende Arm in Abbildung 2-3 wird so korrekt, allerdings auch doppelt, registriert. Wie bereits oben aufgeführt, ist die Differenzbildung aufgrund dieser indirekten Bewegungslokalisierung für die Bewegungsdetektion lediglich eingeschränkt anwendbar (zum Beispiel für Änderungsdetektionen bei einfachen Überwachungs- und Sicherheitsanwendungen).

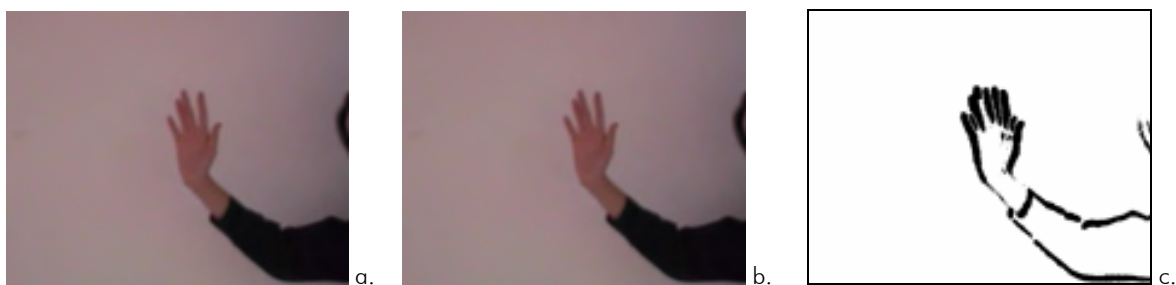


Abbildung 2-3: Zwei aufeinander folgende Bilder a und b mit ihrem Differenzbild c (WESTFELD, 2004)

Eine weitere einfache Möglichkeit zur Erfassung kinematischer Vorgänge ist die Differenzbildung zwischen dem aktuellen Bild und einem statischen Hintergrundbild (Abbildung 2-4). Problematisch hierbei ist, dass sich während der Aufnahmen die Beleuchtungsverhältnisse in der Szene ändern können und dadurch Fehlzuordnungen entstehen (vgl. WESTFELD, 2004). Des Weiteren ist es in der Praxis teilweise unmöglich ein statisches Hintergrundbild zu generieren, sobald das zu untersuchende Objekt fester Bestandteil der Szene ist (z.B. der Gletscher Jakobshavn Isbræ).

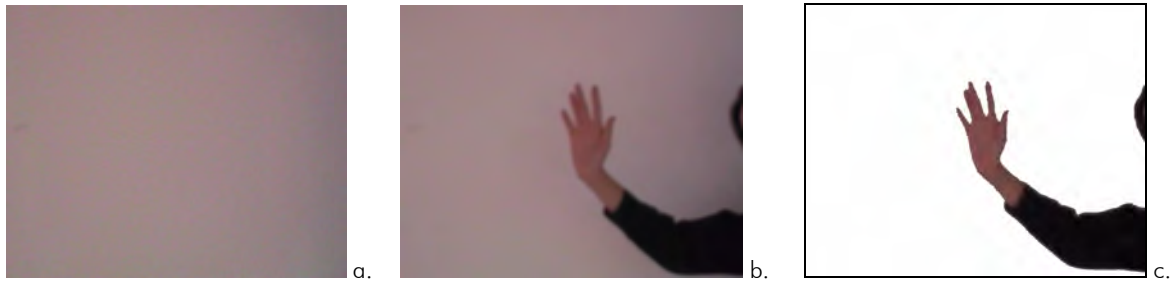


Abbildung 2-4: Differenzbild c, berechnet aus einem statischen Hintergrundbild a und einem Bild b der zu untersuchenden Bildsequenz

Die aus photogrammetrischer Sicht geeigneten Methoden der Bewegungsanalyse werden im Abschnitt 2.1.1.3 vorgestellt.

### 2.1.1.2 Aufgaben, Anwendungen und Probleme der Bildzuordnung

Das Ziel der Bildzuordnung (engl.: matching) ist das Auffinden homologer, also korrespondierender, Punkte aus den Intensitätswerten von zwei oder mehr Bildern und die anschließende Speicherung der zugehörigen Bildkoordinaten. Sie gilt als einer der Schwerpunkte in der digitalen Photogrammetrie und stellt ein zentrales Problem im Bereich der Computer Vision (CV) dar. Im Weiteren wird zur Vereinfachung stets von einem Matching zwischen lediglich zwei Bildern ausgegangen.

Die Registrierung und Auswertung kinematischer Vorgänge kommen in allen ingenieurtechnischen Bereichen und darüber hinaus zur Anwendung. Neben

- Bildsequenzanalysen,
- Bewegungsschätzungen aus Bildern,
- autonomer Fahrzeug- und Flugzeugnavigation,
- Robotersteuerungen,
- Qualitätskontrollen,
- Detektionen im Umweltbereich sowie
- Analysen menschlicher Bewegungsvorgänge

spielt die Bildzuordnung insbesondere für folgende Bereiche der Photogrammetrie, Fernerkundung und Kartographie eine große Rolle (BALTSAVIAS, 1999):

- Messung von Rahmenmarken zur Bestimmung der inneren Orientierung,
- Messung von natürlichen Punkten (relative Orientierung, Aerotriangulation, Berechnung digitaler Geländemodelle (DGM), Objektverfolgung),
- Messung von signalisierten Punkten (absolute Orientierung, Aerotriangulation, Sensor- und Instrumentenkalibrierung),
- Merkmalsextraktion (Kartierung oder Kartennachführung),
- Symbolerkennung.

Eine automatische Zuordnung korrespondierender Bildmerkmale ist, trotz intensiver Forschung seit den fünfziger Jahren, bis dato noch nicht vollständig gelöst. Auch existiert noch kein vollautomatisiertes, hoch präzises, zuverlässiges und effektives Verfahren, welches sich an die verschiedensten Bildinhalte anpassen kann. Im Folgenden werden die wichtigsten Einflüsse, welche mehr oder weniger auf alle Matchingverfahren wirken, aufgeführt (siehe dazu HEIPKE, 1990; BALTSAVIAS, 1999; LUHMANN, 2000; MCGLONE, 2004):

- Geometrische und radiometrische Unterschiede zwischen den Bildern

Unterschiedliche perspektive Projektionen entstehen meist durch Stellungs- und Standpunktabweichungen des Sensors, Geländeneigungen und Höhendifferenzen. Des Weiteren kommt es durch die Bewegung des Objektes zu Abweichungen in der Stärke des reflektierten und durch den Sensor aufgezeichneten Lichtes. Ebenso führen Variationen der Beleuchtungsverhältnisse zwischen den Aufnahmezeitpunkten zu Problemen bei der Bildpunktzuordnung.

- Das allgemeine Korrespondenzproblem

Das Korrespondenzproblem beinhaltet die Problematik von Mehrdeutigkeiten, also multiplen Lösungen. Die Lösung des Korrespondenzproblems ist eine der schwierigsten Aufgaben und somit ein allgemeines Ziel der Bewegungsanalysen. Abbildung 2-5a zeigt die Translation eines hochfrequenten Musters (Gitternetz). Solange nur ein Ausschnitt des Objektes sichtbar ist, wäre auch eine Verschiebung um ein Vielfaches der Gitterweite denkbar und würde zu einer scheinbar richtigen Lösung führen. Das Problem hierbei ist, dass die reale (physikalische) Korrespondenz realer Objekte nicht mit der sichtbaren Korrespondenz im Bildausschnitt übereinstimmt. Obwohl also eine reale Korrespondenz besteht, kann diese visuell, aufgrund der periodischen Objekttextur, nicht bestimmt werden. Ein lokaler Zuordnungsalgorithmus wird demzufolge an einer falschen Stelle konvergieren und somit werden inkorrekte Verschiebungsvektoren bestimmt. Demzufolge können Bilder mit einer hochfrequenten Textur nur von Trackingalgorithmen einander zugeordnet werden, die eine bestimmte globale Konsistenz erzwingen. Das Korrespondenzproblem in dem eben diskutierten Beispiel kann analog auf nicht unterscheidbare Elemente (z.B. Partikel in einer Flüssigkeit) oder deformierbare Körper angewandt werden (Abbildung 2-5b und 2-5c).

Die Wahrscheinlichkeit für Fehlkorrespondenzen wird in der Praxis durch die Aufstellung von Restriktionen, die die zu ermittelnden Verschiebungsvektoren erfüllen müssen, verringert. Beispiele hierfür sind die Bewegungsrichtung und die Größenordnung der erwarteten Bewegungen. Eine vollständige Kompensation ist damit jedoch nicht möglich.

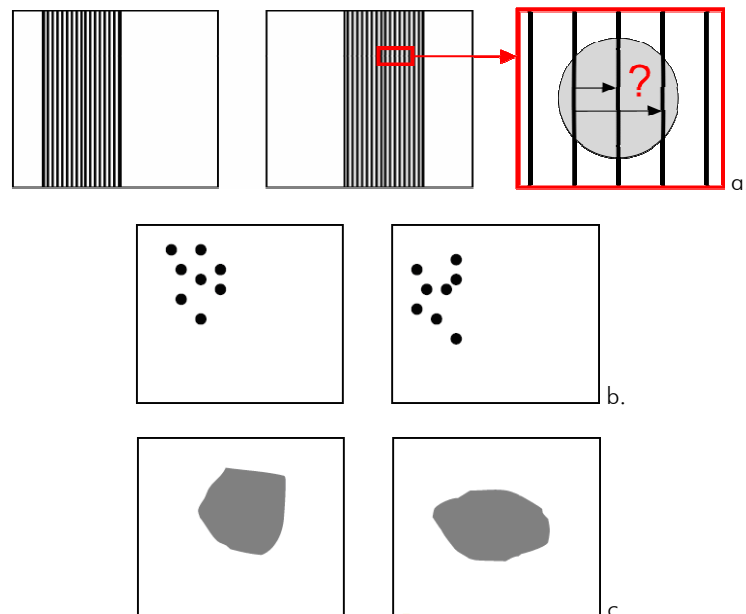


Abbildung 2-5: Ursachen des Korrespondenzproblems (nach BALSAVIAS, 1999)

- Periodische Strukturen
- Nicht unterscheidbare Elemente
- Deformierbare Objekte

- Das Blendenproblem

Es wurde bereits ausgeführt, dass die Bewegungsanalyse mit räumlichen und zeitlichen Grauwertänderungen verknüpft ist, wobei diese zwei Größen über lokale Operatoren erhalten werden (siehe u.a. Kapitel 4). Solch ein Operator betrachtet bei der Analyse jedoch nur einen Ausschnitt des Objektes, als ob eine Blende über jenes gelegt wurde. Abbildung 2-6a zeigt eine Kante, die von der durchgezogenen zu der gestrichelten Linie parallel verschoben wurde. In diesem Fall ist die Translation, beschrieben durch einen Verschiebungsvektor (VV), nicht eindeutig, da der Vektor von einem Punkt der Kante im ersten Bild zu einem beliebigen Punkt auf der verschobenen Kante im nächsten Bild zeigen kann. Es ist lediglich möglich, die senkrecht zur Kante liegende Komponente des Verschiebungsvektors zu bestimmen (vgl. Abbildung 2-6a, roter VV). Die parallele Komponente kann hingegen nicht eindeutig ermittelt werden. Diese Mehrdeutigkeit heißt Blendenproblem (Aperturproblem, engl.: aperture problem) und tritt bei allen lokal arbeitenden Bildzuordnungsverfahren auf. Eine eindeutige Bestimmung wird nur dann möglich, wenn die Operatormaske so verschoben wird, dass sie die Ecke des Objektes einschließt (Abbildung 2-6b).

Das oben beschriebene Blendenproblem ist ein Sonderfall des allgemeinen Korrespondenzproblems.

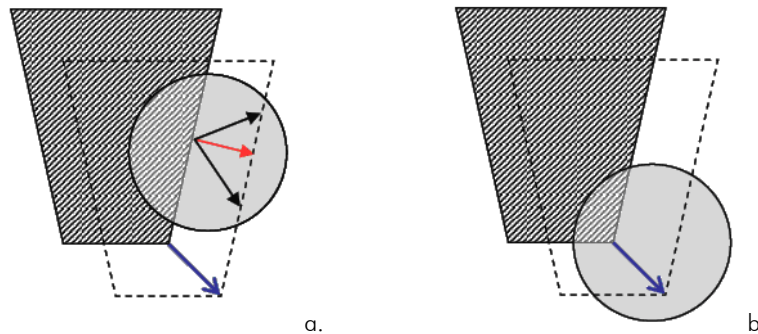


Abbildung 2-6: Visualisierung des Blendenproblems in der Bewegungsanalyse (nach BALTSAVIAS, 1999):

a. Mehrdeutigkeit der Verschiebungsvektoren an einer Kante:

- Blau: Tatsächliche Objektbewegung
- Rot: Sicher bestimmbare Bewegung
- Schwarz: Ebenfalls mögliche Bewegungen

b. Eindeutigkeit des Verschiebungsvektors an einer Ecke

- Falsche Näherungswerte

Näherungswerte finden zur Eingrenzung des Suchbereichs optional Verwendung (z.B. beim Verfahren der Kreuzkorrelation; Kapitel 4.3) oder werden im Verlauf der Berechnungen aufgrund der Linearisierung von Gleichungen zwingend benötigt (z.B. im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung bei der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate; Kapitel 4.4). Insofern die Prädiktionen zu schlecht sind, konvergiert der Algorithmus an der falschen Position.

- Ungünstiges Signal/Rausch-Verhältnis (S/N)

Da die Bildelemente lediglich anhand ihrer Grauwerte bzw. ihrer Nachbarschaftsbeziehungen lokalisiert werden, ist ein guter Bildkontrast für ein statistisch sicheres Matching unabdingbar. Ein niedriges S/N verringert die Ähnlichkeit zwischen zwei korrespondierenden Bildausschnitten und somit die Erfolgsrate der Bildzuordnung.



- Falsches Kameramodell

Zur Einschränkung des Suchbereiches werden häufig geometrische Restriktionen aufgestellt. Bei bekannter innerer und äußerer Orientierung der Bilder ist zum Beispiel die Epipolarlinie bekannt. Der Suchbereich kann in diesem Fall auf eine Dimension reduziert werden. Sind die Orientierungsparameter falsch, ist eine richtige Zuordnung korrespondierender Bildelemente nicht mehr möglich.

Weitere Fehler beim Matchingprozess werden hervorgerufen durch

- fehlende Objektteile (Verdeckungen, Schatten o.ä.; Sonderfall des allgemeinen Korrespondenzproblems),
- Matching am Bildrand sowie
- ungenügende Zuverlässigkeit (automatische Detektion und Eliminierung zumindest grober Fehler ist wünschenswert).

### 2.1.1.3 Klassifizierung von Matchingalgorithmen

Die automatischen Bildzuordnungsverfahren können in drei Kategorien klassifiziert werden (Abbildung 2-7): flächen- oder intensitätsbasierte Verfahren, merkmalsbasierte Verfahren und relationale Verfahren.

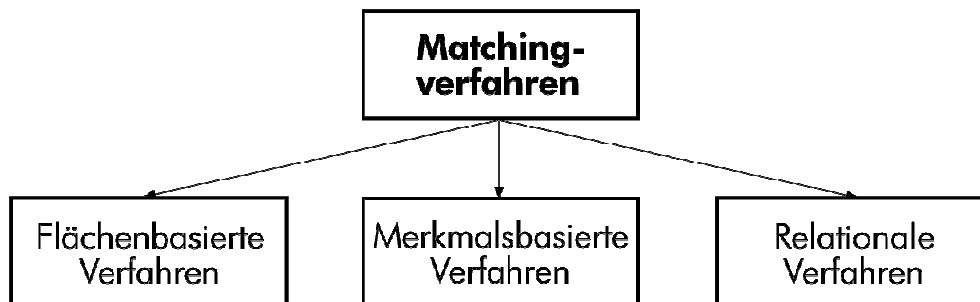


Abbildung 2-7: Klassifizierung von Matchingverfahren

Die Eingabewerte eines flächenbasierten Ansatzes sind die Grauwerte bzw. Funktionen der Grauwerte von kleinen Flächen (Bildausschnitt, engl.: patch) aus zwei Bildern, wobei das erste Bild als Referenzbild und das zweite Bild als Suchbild bezeichnet wird. Ziel dieses Verfahrens ist die Berechnung von Transformationsparametern zwischen diesen zwei Bildausschnitten über die Suche nach Regionen mit ähnlichen Grauwertmustern. Der Bildausschnitt im Referenzbild (Vorlage, engl.: template) repräsentiert das Muster, das in dem anderen Bild zu lokalisieren ist. Das Template kann entweder ein synthetisch generiertes (und somit rauschfreies) Bild sein (Abbildung 2-8b) oder die Nachbarschaft um einen zuvor ausgewählten Punkt (Abbildung 2-8a). Die zu verfolgenden Bildpunkte werden manuell (interaktiv am Bildschirm) oder automatisch lokalisiert (vgl. Kapitel 5.1).

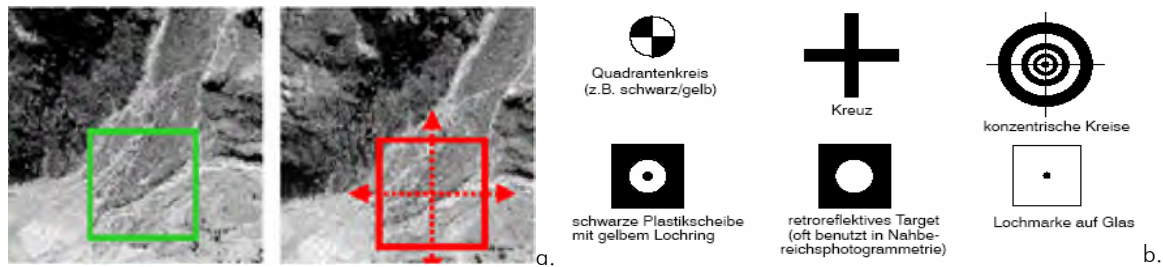


Abbildung 2-8: Patches der flächenbasierten Bildzuordnung

a. Reale Bildausschnitte (MAAS, IPF, TU Dresden, 2002):

- Grün: Template im Referenzbild
- Rot: Suchpatch im Suchbild

b. Synthetische Templates (BALSAVIAS, 1999)

Bildzuordnungsverfahren, die nach einem intensitätsbasierten Ansatz arbeiten, sind zum Beispiel die Kreuzkorrelation und die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (engl.: least squares matching, LSM). Das Verfahren der Kreuzkorrelation verwendet als zu maximierendes Ähnlichkeitsmaß zwischen zwei Bildausschnitten den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten, wohingegen beim Least Squares Matching ein Differenzmaß (Summe der quadrierten Grauwertdifferenzen) minimiert wird. Die flächenbasierten Verfahren zeichnen sich besonders durch ihre hohe Genauigkeit im Subpixelbereich aus. Problematisch hingegen ist die korrekte Zuordnung bei geometrischen Unterschieden zwischen den Bildern, schwacher Textur oder Oberflächendiskontinuitäten. Eine ausführliche Behandlung dieser Trackingalgorithmen ist Bestandteil des Kapitels 4.

Das Verfahren der merkmalsbasierten Zuordnung unterteilt sich in zwei Stufen. Zunächst werden durch die Merkmalsextraktion (z.B. Interestoperator, Kantenoperator) geeignete Merkmale, wie zum Beispiel Punktmuster, Kanten oder Ecken, extrahiert. Die Form der Beschreibung sowie der Typ der Features ist abhängig von der jeweils zu lösenden Aufgabenstellung. Im weiteren Verlauf muss nun das Korrespondenzproblem dieser Features gelöst werden (Abbildung 2-9). Als Ergebnis erhält man nicht nur einen einzelnen Verschiebungsvektor, sondern ein Verschiebungsvektorfeld des gesamten Merkmals. Die Vorteile dieses Ansatzes liegen in einem besseren Umgang mit Oberflächendiskontinuitäten sowie einer vereinfachten Bildanalyse durch die vorherige Extraktion interpretierbarer Merkmale. Im Vergleich zu flächenbasierten Methoden ist die merkmalsbasierte Zuordnung allerdings rauschempfindlicher und weniger genau. Ebenso bereiten Bilder mit zu stark ausgeprägter Textur Probleme bei einer eindeutigen Merkmalszuordnung.

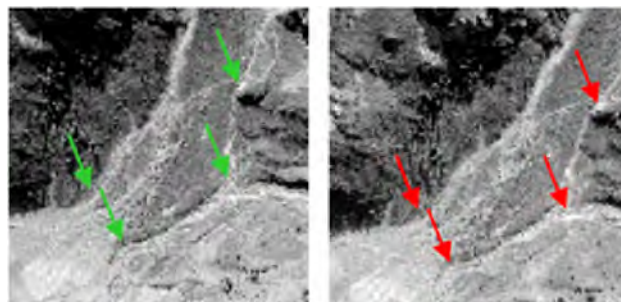


Abbildung 2-9: Merkmalsbasierte Verfahren (MAAS, IPF, TU Dresden, 2002)

Relationale Verfahren basieren auf der Ähnlichkeit von topologischen Relationen. Vorteilhaft ist, dass die Topologie invariant gegenüber perspektiven Transformationen ist und somit die Robustheit gesteigert werden kann. Da die rechnerische Komplexität aufgrund der Verwendung von

Baumsuchverfahren sehr hoch ist und die Genauigkeit nicht an die beiden zuvor vorgestellten Verfahren anknüpft, ist die relationale Bildzuordnung in der Bewegungsanalyse praktisch nicht vertreten.

## 2.1.2 Interpolationsverfahren

Die Interpolation des Grauwertes (Grauwertinterpolation, engl.: resampling) für die Position eines Pixels spielt in vielen Bereichen der Bildverarbeitung eine Rolle. Eine Grauwertinterpolation ist in der Regel nach der geometrischen Transformation (z.B. Bildentzerrung, Anwendung von Bildpyramiden, Subpixelinterpolation) eines Bildes, eines Bildausschnittes bzw. eines einzigen Bildelementes notwendig, da die Koordinaten eines Bildpunktes nach der Transformation meist nicht wieder auf einem diskreten Raster liegen. Die geometrische Transformation  $T$  bildet jedes Pixel  $(x, y)$  des Eingabebildes auf die neue Position  $(x', y')$  im Ausgabebild ab:

$$(x', y') = T(x, y) \quad (2.3)$$

Wie bereits aufgeführt, sind die berechneten Positionen der Bildelemente im Ausgabebild mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Integerwerte. Die zugehörigen Intensitätswerte können nicht für die neuen (nichtganzzahligen) Positionen übernommen werden. Es ist demzufolge notwendig, die Grauwerte für die Pixelpositionen zwischen den Integerwerten zu berechnen.

In vielen Fällen wird die geometrische Transformationsvorschrift umgekehrt. Es wird nun, von den ganzzahligen Pixelpositionen des Ausgabebildes ausgehend, der zugehörige Grauwert des Eingabebildes interpoliert. Diese indirekte geometrische Transformation lautet:

$$(x, y) = T^{-1}(x', y') \quad (2.4)$$

In der Praxis werden zahlreiche Verfahren zur Interpolation eines Grauwertes aus der ihm umgebenden Nachbarschaft angewandt. Die folgenden Methoden sind die Verbreitetsten:

- Nächster Nachbar (Interpolation 0. Ordnung)
- Bilineare Interpolation (Interpolation 1. Ordnung)
- Bikubische Interpolation (Interpolation 2. Ordnung)

Die einfachste und schnellste Interpolationsfunktion ist die Interpolation unter Verwendung der nächsten Nachbarschaft. Bei dieser Methode wird die Bildintensität eines Pixels durch den Grauwert seines am nächsten liegenden Nachbarpunktes im Referenzbild ersetzt. Die Gleitkommakordinaten der transformierten Position werden, je nach Transformationsrichtung, entweder auf- oder abgerundet (LUHMANN, 2000):

$$g' = g(\text{round}(x), \text{round}(y)) \quad (2.5)$$

Es werden also ausschließlich Grauwerte verwendet, die auch im Eingabebild vorhanden sind. Die Interpolation 0. Ordnung führt so zu starkem Detailverlust, da keine neuen Intensitäten berechnet, sondern lediglich durch Pixelwiederholung generiert werden. Der kurzen Rechenzeit steht somit ein optisch schlechtes Ergebnis gegenüber. Es entstehen unstetige Übergänge zwischen den Pixeln, die in einer schlechten Bildgeometrie und einer geringen photogrammetrischen Genauigkeit resultieren.

Die bilineare Interpolation (Interpolation 1. Ordnung) bezieht beide Nachbarn in beiden Koordinatenrichtungen einer neu berechneten Pixelposition in die Interpolation ein. Die zugehörige Interpolationsvorschrift soll im Folgenden an einem Beispiel hergeleitet werden.

In der folgenden Abbildung 2-10 ist zu erkennen, dass es notwendig ist, den Grauwert an einer Position zwischen den Bildelementen  $(i, j)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j)$  und  $(i+1, j+1)$  zu bestimmen. Zur Berechnung des Grauwertes an der Stelle  $(x', y')$  wird eine Fläche durch die Vierernachbarschaft gelegt. Im Anschluss ist der jeweilige Grauwert als gewichtetes Mittel dieser ersten Nachbarschaft zu berechnen, wobei die Gewichtungsfaktoren die Größe der überlappenden Gebiete  $F_1$  bis  $F_4$  repräsentieren und so der unterschiedlich starke Einfluss auf die Nachbarschaft berücksichtigt wird.

$$g' = F_1 \cdot g(i, j) + F_2 \cdot g(i+1, j) + F_3 \cdot g(i, j+1) + F_4 \cdot g(i+1, j+1) \quad (2.6)$$

mit

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 1$$

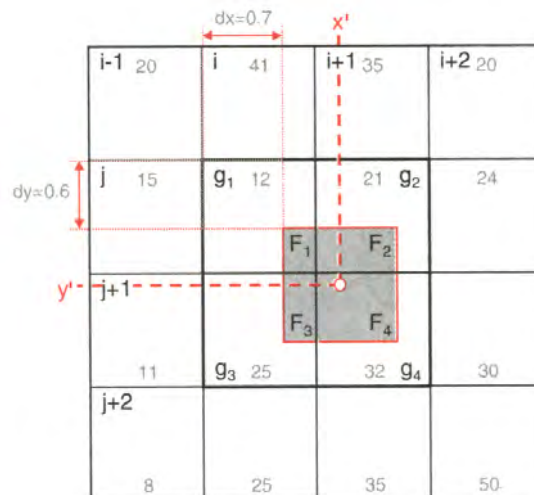


Abbildung 2-10: Grauwertinterpolation (LUHMANN, 2000)

Die bilineare Interpolation liefert ein leicht geglättetes und qualitativ gutes Ergebnis bei einem adäquaten Rechenaufwand. Im Gegensatz zur Interpolation unter Verwendung der nächsten Nachbarschaft kommt es zu stegigen Übergängen zwischen den Bildelementen, da über (2.6) neue Bildintensitäten ermittelt werden können.

Die bikubische Interpolation (auch bikubische Faltung, Lagrange Polynome) findet bei geometrischen Transformationen mit höchster Grauwertqualität Anwendung (LUHMANN, 2000). Sie berechnet den neuen Grauwert zeilenweise durch Einpassung eines Polynoms dritten Grades in die Grauwerte der vier Pixel der jeweiligen Zeile. Die Rechenvorschrift (nach u.a. LUHMANN, 2000) lautet:

$$g' = a(1) \cdot df(dy+1) + a(2) \cdot df(dy) + a(3) \cdot df(dy-1) + a(4) \cdot df(dy-2) \quad (2.7)$$

mit

$$df(x) = \begin{cases} |x|^3 - 2|x|^2 + 1 & \text{für } |x| < 1 \\ -|x|^3 + 5|x|^2 - 8|x| + 4 & \text{für } 1 \leq |x| < 2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases},$$

$$a(n) = g(i-1, j+n-2) \cdot df(dx+1) \\ + g(i, j+n-2) \cdot df(dx) \\ + g(i+1, j+n-2) \cdot df(dx-1) \\ + g(i+2, j+n-2) \cdot df(dx-2)$$

sowie einer ersten und zweiten Nachbarschaft mit  $n = 1 \dots 4$ .

Dieses Interpolationsverfahren liefert das visuell beste Ergebnis, benötigt allerdings auch eine bis Faktor 10 längere Rechenzeit (LUHMANN, 2000).

In Abbildung 2-11 ist die resultierende Bildqualität der drei oben beschriebenen Algorithmen dargestellt, wobei das Original um drei Grad gedreht wurde. Bei genauerer Betrachtung sind die oben erwähnten Treppeneffekte (unstetiger Übergang zwischen den Pixeln, verursacht durch Pixelwiederholung) in Abbildung 2-11a und der Glättungseffekt in Abbildung 2-11b zu erkennen. In der vorliegenden Arbeit wird für Interpolationen während des Trackingprozesses (Subpixelinterpolationen) auf die bilineare Interpolation zurückgegriffen, da sie bei kurzen Rechenzeiten ein akzeptables Ergebnis vorweist.



Abbildung 2-11: Visueller Vergleich der Interpolationsergebnisse (MCGLONE, 2004)

- a. Interpolation 0. Ordnung
- b. Interpolation 1. Ordnung
- c. Interpolation 2. Ordnung

### 2.1.3 Bildpyramiden

Zahlreiche Matchingverfahren haben einen eingeschränkten Konvergenzradius, in dem der Algorithmus zu einer Lösung führt. Dementsprechend sind Näherungswerte für die Lösung innerhalb des Konvergenzradius notwendig. Least Squares Matching zum Beispiel hat einen sehr kleinen Konvergenzradius und benötigt Näherungen, die deutlich besser als die halbe Patchgröße sind (vgl. Kapitel 7.2.3). Eine einfache Lösung dieses Korrespondenzproblems besteht in der sukzessiven Verminderung der Auflösung eines Bildes. Die so entstehenden Einzelbilder mit einer exponential fallenden Auflösung werden in einer Bildpyramide (Abbildung 2-12) gespeichert. Die unterste Stufe ist das Originalbild. Die jeweils folgenden Bilder werden gegenüber dem Vorherigen durch Zusammenfassung benachbarter Bildelemente (z.B. mittels Gauß-Filter) um, in der Regel, die

Hälfte verkleinert. Abbildung 2-14 zeigt die Korrespondenz zwischen den Pixeln der verschiedenen Pyramidenstufen.

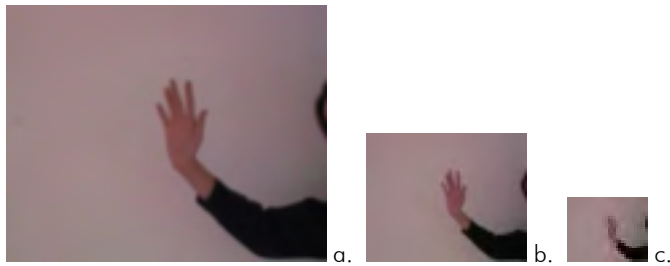


Abbildung 2-12: Dreistufige Bildpyramide (nach WESTFELD, 2004)

- a. Original
- b. Faktor 2
- c. Faktor 4

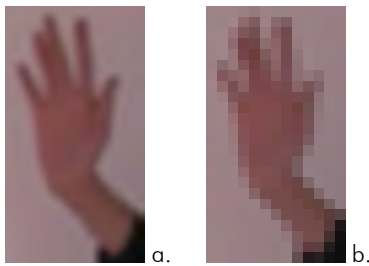


Abbildung 2-13: Informationsverlust (WESTFELD, 2004)

- a. Original
- b. Faktor 4

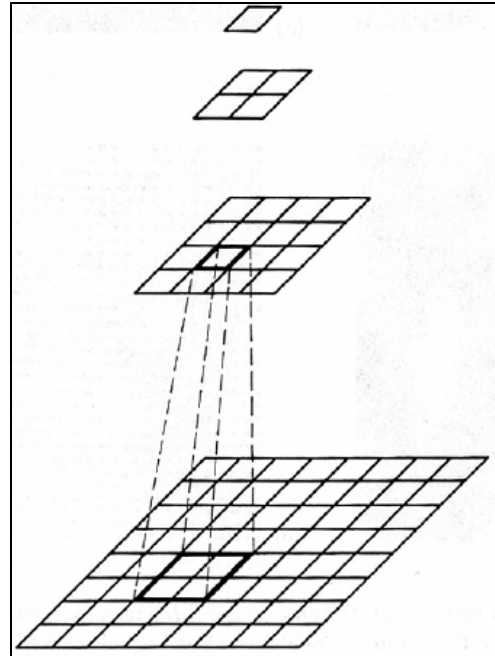


Abbildung 2-14: Struktur einer Bildpyramide (BALLARD/BROWN, 1982)

Durch die Reduzierung der geometrischen und teilweise radiometrischen Auflösung sinkt der Informationsgehalt mit abnehmender Auflösungsstufe (Abbildung 2-13). Obwohl der Detaillierungsgrad dementsprechend abnimmt, bleiben wichtige Bildmerkmale dennoch erhalten und bilden den Ansatz der hierarchischen Bildzuordnung. Die Suche nach groben Bildmerkmalen beginnt auf der untersten Auflösungsstufe. Es wird dann von der geringsten Auflösungsstufe sukzessiv in der nächst Höheren nach dem Bildmuster gesucht, wobei nur noch der ermittelte Bildbereich der vorangegangenen Verkleinerung Verwendung findet. Die Bildposition markanter Strukturen kann so iterativ verbessert werden. Diese schrittweise Reduzierung des Suchraums ermöglicht eine schnellere Konvergenz des Matchingalgorithmus durch eine scheinbar indirekte Erhöhung des Konvergenzradius. Eine Pyramidenrepräsentation des Eingabebildes kann folglich den Rechenalgorithmus beschleunigen bzw. die Konvergenzrate erhöhen und das Problem einer zu geringen Suchfenstergröße ausschließen. Die Pyramidengrundlage ermöglicht eine gute lokale Genauigkeit in Kombination mit einer hohen Robustheit, da die Möglichkeit der Verarbeitung großer Verschiebungen, ohne das Fenster zu vergrößern und so die Rechenzeiten zu erhöhen, gegeben ist. Des Weiteren wird die Pyramide des jeweiligen Suchbildes gespeichert und dient als Ausgangspyramide für das folgende Bildpaar. Somit kann eine weitere Verkürzung der Rechenzeit erreicht werden, da lediglich für die ersten zwei Bilder beide Pyramidenstufen berechnet werden müssen.

Die äußerst effektive hierarchische Daten- und Prozessstruktur von Bild- bzw. Auflösungspyramiden werden in der vorliegenden Arbeit teilweise verwendet, um ein hierarchisches Matching zu

ermöglichen. Weitere Anwendungsbeispiele für die Verwendung von Bildpyramiden finden sich in (KRAUS, 1982; KRAUS, 1984; LUHMANN, 2000; MCGLONE, 2004).

## 2.2 Aspekte der geodätischen Ausgleichsrechnung

Dieser Abschnitt betrachtet die grundlegendsten Aspekte der Ausgleichsrechnung sowie die verwendeten Ausgleichsmodelle, da in der vorliegenden Arbeit viele Problemstellungen über Ausgleichsansätze gelöst werden.

Die Methoden der Ausgleichsrechnung finden bei der Lösung überbestimmter und teilweise nichtlinearer Gleichungssysteme Anwendung. Sie bestimmen aus beobachteten, also zum Beispiel gemessenen Größen eine bestimmte Anzahl unbekannter Parameter. Dabei stehen die Beobachtungen mit den Unbekannten in einem funktionalen Zusammenhang. Die Voraussetzung für eine Lösung im Sinne der Statistik ist das Vorhandensein überschüssiger Beobachtungen. Die Anzahl der Messungen muss stets größer sein als die Anzahl der gesuchten Größen. Es besteht nun die Aufgabe, die wahrscheinlichsten Werte für die Beobachtungen und die Unbekannten zu schätzen sowie zugehörige Genauigkeitsmaße im Rahmen einer Fehlerrechnung zu ermitteln. Als weiterführende Literatur sind (REISSMANN, 1976; NIEMEIER, 2002) zu nennen.

### 2.2.1 Die Methode der kleinsten Quadrate

Die Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) oder auch Ausgleichsmodell nach Gauß-Markov (Gauß-Markov-Modell, GMM) wurde nach der heutigen Auffassung von Carl Friedrich Gauß um etwa 1797 entwickelt, im Jahr 1809 publiziert und ist das am meisten angewandte Verfahren unter allen statistischen Schätzverfahren in den Ingenieurwissenschaften.

Wie oben bereits vorgestellt, liegt nur dann eine Ausgleichsaufgabe vor, wenn die Anzahl  $n$  der Beobachtungen größer ist als die Anzahl  $u$  der zu bestimmenden unbekannt Parameter:

$$f = n - u > 0 \quad (2.8)$$

In Gleichung (2.8) gibt  $f$  die Anzahl der überschüssigen Beobachtungen (Freiheitsgrade) an. Der Vorteil von Freiheitsgraden größer Null liegt in der Genauigkeitssteigerung, der Detektion grober Fehler sowie der möglichen Angabe von Genauigkeitsmaßen. Der beste Wert der gesuchten Größen ist der Wert, dem unter Berücksichtigung aller Beobachtungen die höchste Wahrscheinlichkeit zukommt. Die Lösung kann nur unter der Voraussetzung berechnet werden, dass das Verteilungsgesetz der Beobachtungen bekannt ist. In der Praxis wird hierfür in der Regel eine Normalverteilung in Form einer Gauß'schen Glocke (Abbildung 2-15) nach dem Gauß'schen Fehlergesetz angenommen.

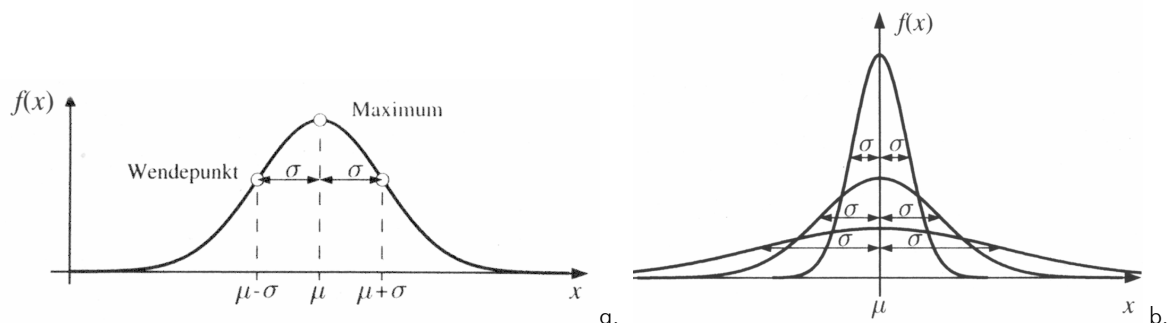


Abbildung 2-15: Normalverteilung der Beobachtungen um den wahren Wert  $\mu$  (NIEMEIER, 2002)

a. Kurvenverlauf und Parameter einer Normalverteilung

b. Dichtefunktion  $f(x)$  der Normalverteilung bei verschiedenen Werten des Parameters  $\sigma$



Somit stellen die Beobachtungen stochastische Größen, das heißt Zufallsvariablen, dar. Entsprechend dem Prinzip der Methode der kleinsten (Fehler-)Quadrate, ist eine Ausgleichung so durchzuführen, dass

$$\underline{v}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v} \rightarrow \text{Minimum.} \quad (2.9)$$

Die zufallsbedingten Widersprüche der Beobachtungen  $\underline{L}$  kommen in der Berechnung als Residuen oder Verbesserungen  $\underline{v}$  vor und sind in ihren Quadraten nach (2.9) zu minimieren. Die Matrix  $\underline{P}$  wird als Gewichtsmatrix bezeichnet und enthält die a priori Gewichte der Beobachtungen, also deren geschätzte Genauigkeiten.

Das Ausgleichungsmodell beinhaltet ein funktionales und ein stochastisches Modell zur Schätzung der Unbekannten sowie der Verbesserungen der Beobachtungen. Das funktionale Modell beschreibt die mathematischen Relationen zwischen den Beobachtungen, Unbekannten und eventuell vorhandenen konstanten bekannten Größen. Innerhalb eines stochastischen Modells sind die Varianzen und Kovarianzen der beobachteten Parameter zu untersuchen. Es beschreibt so die Streuung der Beobachtungen um den wahren Wert entsprechend der Normalverteilung sowie deren Korrelationen untereinander.

In Abhängigkeit der Aufgabenstellung werden verschiedene Verfahren der mathematischen Behandlung entwickelt, wobei die Wahl des Verfahrens grundsätzlich keinen Einfluss auf das Ergebnis hat (REISSMANN, 1974). Die Bekanntesten sind

- die Ausgleichung direkter Beobachtungen,
- die Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen,
- die Ausgleichung bedingter Beobachtungen,
- die vermittelnde Ausgleichung mit Bedingungen zwischen den Unbekannten und
- die Ausgleichung bedingter Beobachtungen mit Unbekannten.

In dieser Arbeit finden die Verfahren der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Kapitel 2.2.2) und nach vermittelnden Beobachtungen mit Bedingungsgleichungen zwischen den Unbekannten (Kapitel 2.2.4) Anwendung.

## 2.2.2 Ausgleichsrechnung nach vermittelnden Beobachtungen

Die vermittelnde Ausgleichung wird bei der gleichzeitigen Bestimmung mehrerer Unbekannten angewendet. Diese Unbekannten werden in der Regel nicht selbst gemessen, sondern stehen in einem funktionellen Zusammenhang mit den Beobachtungen. Das funktionale Modell, welches gleichzeitig  $n$  Beobachtungen und  $u$  Unbekannte enthält, beschreibt folglich den Zusammenhang  $\Phi$  zwischen den wahren Beobachtungswerten  $\underline{\tilde{L}}$  und den wahren Werten der Unbekannten  $\underline{\tilde{X}}$ :

$$\underline{\tilde{L}}_{(n,1)} = \Phi(\underline{\tilde{X}}) = \begin{bmatrix} \Phi_1(\underline{\tilde{X}}) \\ \Phi_2(\underline{\tilde{X}}) \\ \vdots \\ \Phi_n(\underline{\tilde{X}}) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

mit dem Beobachtungsvektor

$$\underline{L}_{(n,1)} = [L_1, L_2, \dots, L_n]^T$$

sowie dem Unbekanntenvektor

$$\underline{X}_{(u,1)} = [X_1 X_2, \dots, X_u]^T.$$

Generell muss davon ausgegangen werden, dass alle Beobachtungen fehlerbehaftet sind, da es in der Praxis eine statistisch einhundertprozentig richtige Messung nicht gibt. Dementsprechend sind die wahren Beobachtungen durch die tatsächlichen (fehlerbehafteten) Beobachtungen  $\underline{L}$  zu ersetzen und die Messunsicherheiten durch kleine Verbesserungen  $\underline{v}$  zu modellieren. In der Gleichung 2.10 wird der wahre Unbekanntenvektor durch die geschätzten Unbekannten  $\hat{\underline{X}}$  ersetzt. Daraus ergeben sich die ursprünglichen Verbesserungsgleichungen:

$$\hat{\underline{L}} = \underline{L} + \underline{v} = \Phi(\hat{\underline{X}}), \quad (2.11)$$

wobei  $\hat{\underline{L}}$ , in Analogie zu  $\hat{\underline{X}}$ , den ausgeglichenen Beobachtungsvektor darstellt. Die aufgestellten Verbesserungsgleichungen (2.11) sind in der Regel nichtlineare Gleichungen. Dies führt zur Einführung von Näherungswerten  $\underline{X}^0$  für die Unbekannten und zu einer Zerlegung des Unbekanntenvektors:

$$\hat{\underline{X}} = \underline{X}^0 + \hat{\underline{x}} \quad (2.12)$$

Der Vektor  $\hat{\underline{x}}$  beinhaltet die Zuschläge für die Startwerte nach der Ausgleichung. An den Stellen dieser Näherungswerte werden nun die Funktionen der Unbekannten nach Taylor entwickelt (Funktion an der Stelle der Näherungswerte partiell nach allen Unbekannten ableiten), wobei die Entwicklung nach dem ersten Glied abgebrochen wird ( $\underline{v} \ll \underline{L}$ ):

$$\underline{L} + \underline{v} = \Phi(\underline{X}^0) + \left( \frac{\partial \Phi(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_{\underline{X}^0} \cdot (\hat{\underline{X}} - \underline{X}^0) = \underline{L}^0 + \left( \frac{\partial \Phi(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_{\underline{X}^0} \cdot \hat{\underline{x}} \quad (2.13)$$

mit  $\underline{L}^0$ : Funktionswert, berechnet an der Stelle der Näherungen

Die Koeffizientenmatrix

$$\underline{A}_{n,u} = \left( \frac{\partial \Phi(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_{\underline{X}^0} = \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial \Phi_1(\underline{X})}{\partial \underline{X}_1} \right)_{\underline{X}^0} & \left( \frac{\partial \Phi_1(\underline{X})}{\partial \underline{X}_2} \right)_{\underline{X}^0} & \dots & \left( \frac{\partial \Phi_1(\underline{X})}{\partial \underline{X}_u} \right)_{\underline{X}^0} \\ \left( \frac{\partial \Phi_2(\underline{X})}{\partial \underline{X}_1} \right)_{\underline{X}^0} & \left( \frac{\partial \Phi_2(\underline{X})}{\partial \underline{X}_2} \right)_{\underline{X}^0} & \dots & \left( \frac{\partial \Phi_2(\underline{X})}{\partial \underline{X}_u} \right)_{\underline{X}^0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{\partial \Phi_n(\underline{X})}{\partial \underline{X}_1} \right)_{\underline{X}^0} & \left( \frac{\partial \Phi_n(\underline{X})}{\partial \underline{X}_2} \right)_{\underline{X}^0} & \dots & \left( \frac{\partial \Phi_n(\underline{X})}{\partial \underline{X}_u} \right)_{\underline{X}^0} \end{bmatrix},$$

gebildet aus den partiellen Ableitungen nach allen Unbekannten, führt zu dem linearisierten funktionalen Modell (umgeformte Verbesserungsgleichungen)

$$\hat{\underline{l}}_{n,1} = \underline{l}_{n,1} + \underline{v}_{n,1} = \underline{A}_{n,u} \cdot \hat{\underline{x}}_{n,u} \quad (2.14)$$

mit den gekürzten Beobachtungen

$$\underline{l} = \underline{L} - \underline{L}^0 \quad (2.15)$$

Das stochastische Modell, welches die Genauigkeitsinformationen des vorliegenden funktionalen Modells enthält, wird durch die Kovarianzmatrix  $\underline{\Sigma}_{ll}$  beschrieben:

$$\underline{\Sigma}_{ll} = \sigma_0^2 \underline{Q}_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n2}\sigma_n\sigma_2 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

mit  $\sigma_0^2$ : Varianzfaktor (Quadrat der Standardabweichung)  
 $\underline{Q}_{ll}$ : Kofaktormatrix der Beobachtungen

Liegen unkorrelierte Beobachtungen vor, sind alle Elemente von  $\underline{\Sigma}_{ll}$ , ausgenommen der Hauptdiagonalen, gleich Null (Korrelationskoeffizient  $\rho_{ij} = 0$ ). Die bereits oben beschriebene Gewichtsmatrix  $\underline{P}$  lautet nun:

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & & & 0 \\ & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_2^2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Des Weiteren gilt folgender Zusammenhang:

$$\underline{Q}_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} \underline{\Sigma}_{ll} = \underline{P}^{-1} \quad (2.18)$$

Über die Berechnungen der Normalgleichungen nach

$$\underline{N} = \underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{A} \quad (2.19)$$

$\begin{matrix} u,u & u,n & n,n & n,u \end{matrix}$

sowie dem Absolutgliedvektor der Normalgleichungen

$$\underline{n} = \underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{l} \quad (2.20)$$

$\begin{matrix} u,l & u,n & n,n & n,l \end{matrix}$

kann der gesuchte Unbekanntenvektor ermittelt werden:

$$\hat{\underline{x}} = \underline{N}^{-1} \underline{n} \quad (2.21)$$

$\begin{matrix} u,l & u,u & u,l \end{matrix}$

Entsprechend der Gleichung (2.14) ergeben sich die umgeformten Verbesserungen zu:



nach Taylor linearisiert:

$$\Phi(\hat{\underline{L}}) = \Phi(\underline{L}) + \frac{\partial\Phi(\underline{L})}{\partial L_1} v_1 + \frac{\partial\Phi(\underline{L})}{\partial L_2} v_2 + \dots + \frac{\partial\Phi(\underline{L})}{\partial L_n} v_n = 0 \quad (2.25)$$

Durch die Vereinbarung

$$\underline{w} = \Phi(\underline{L}) = [\Phi_1(\underline{L}), \Phi_2(\underline{L}), \dots, \Phi_n(\underline{L})],$$

wobei  $\underline{w}$  als Widerspruchsvektor bezeichnet wird, erhält man die umgeformten (linearen) Bedingungsgleichungen:

$$\Phi_{L_1} v_1 + \Phi_{L_2} v_2 + \dots + \Phi_{L_n} v_n + \underline{w} = 0 \quad \text{mit} \quad \Phi_{L_i} = \frac{\partial\Phi(\underline{L})}{\partial L_i} \quad (2.26)$$

$i = 1 \dots n$

Die Koeffizientenmatrix beinhaltet die partiellen Ableitungen der Gleichungen (2.26) und erlaubt die Aufstellung der umgeformten Bedingungsgleichungen in Matrizenform:

$$\underline{A} \cdot \underline{v} + \underline{w} = 0 \quad (2.27)$$

$\begin{matrix} \underline{A} & \underline{v} & \underline{w} \\ f,n & n,1 & f,1 \end{matrix}$

Für die Bestimmung der unbekanntenen Verbesserungen (Korrelatengleichungen)

$$\underline{v} = \underline{P}^{-1} \cdot \underline{A} \cdot \underline{k} \quad (2.28)$$

$\begin{matrix} \underline{v} & \underline{P}^{-1} & \underline{A} & \underline{k} \\ n,1 & n,n & f,n & f,1 \end{matrix}$

sowie der ausgeglichenen Beobachtungen

$$\hat{\underline{L}} = \underline{L} + \underline{v}$$

$\begin{matrix} \hat{\underline{L}} & \underline{L} & \underline{v} \\ n,1 & n,1 & n,1 \end{matrix}$

ist die Einführung von Korrelaten  $\underline{k}$  (Lagrangemultiplikatoren) notwendig. Über die Normalgleichungen

$$\underline{N} = \underline{A}^T \cdot \underline{P}^{-1} \cdot \underline{A} \quad (2.29)$$

$\begin{matrix} \underline{N} & \underline{A}^T & \underline{P}^{-1} & \underline{A} \\ f,f & n,f & n,n & f,n \end{matrix}$

können diese bestimmt werden:

$$\underline{k} = -\underline{Q} \cdot \underline{w} \quad \text{mit} \quad \underline{Q} = \underline{N}^{-1} : \text{Kofaktormatrix der Unbekannten} \quad (2.30)$$

$\begin{matrix} \underline{k} & \underline{Q} & \underline{w} \\ f,1 & f,f & f,1 \end{matrix}$

Die anschließende Berechnung der a posterior Standardabweichung ist äquivalent zur vermittelnden Ausgleichung (vgl. Gleichung (2.23)). Der mittlere Fehler der ausgeglichenen Beobachtungen ergibt sich zu:

$$\hat{\sigma}_j = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\bar{q}_{jj}} \quad \text{mit} \quad \bar{q}_{jj} : \text{Diagonalelement der Gewichtskoeffizientenmatrix} \quad (2.31)$$

$\underline{\bar{Q}} = \underline{P}^{-1} \underline{A} \underline{N}^{-1} \underline{A}^T \underline{P}^{-1}$

### 2.2.4 Ausgleichsrechnung nach vermittelnden Beobachtungen mit Bedingungen zwischen den Unbekannten

Im Folgenden wird der Ansatz der vermittelnden Ausgleichung aus Kapitel 2.2.2 um Nebenbedingungen zwischen den Unbekannten in Form von Bedingungsgleichungen erweitert (LAWSON/HANSON 1995; BJÖRCK, 1996; SNOW, 2002). Sogenannte Restriktionen sind exakt spezifizierte Relationen zwischen verschiedenen unbekanntem Parametern und beschränken den möglichen Wertebereich, den diese Variablen annehmen können. Die Einführung von Restriktionen ist in der Praxis genau dann möglich, wenn a priori Informationen über die Unbekannten bzw. Relationen der Unbekannten zueinander vorliegen. Durch diese anwendungsspezifisch aufgestellten Nebenbedingungen wird das Gesamtmodell besser an den jeweiligen Sachverhalt angelehnt und damit genauer. Die gesamte Ausgleichung wird stabiler, da weniger gute Beobachtungen durch gute Beobachtungen nebst Restriktionen gestützt werden.

Die Aufstellung der Verbesserungsgleichungen entspricht Gleichung (2.11). Zusätzlich kommt eine Anzahl  $r$  von, meist nichtlinearen, Bedingungsgleichungen hinzu:

$$\Psi_{(r,1)}(\tilde{\underline{X}}) = \begin{bmatrix} \Psi_1(\tilde{\underline{X}}) \\ \Psi_2(\tilde{\underline{X}}) \\ \vdots \\ \Psi_r(\tilde{\underline{X}}) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.32)$$

Die Linearisierung der Restriktionen an der Stelle der Näherungswerte  $\underline{X}_0$  führt zur Koeffizientenmatrix  $\underline{B}$  der Bedingungsgleichungen:

$$\underline{B}_{r,u} = \left( \frac{\partial \Psi(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_{\underline{X}_0} \quad (2.33)$$

Das linearisierte funktionale Modell dieses erweiterten Ausgleichungsmodells lautet somit:

$$\begin{aligned} \underline{l}_{n,1} + \underline{v}_{n,1} &= \underline{A}_{n,u} \cdot \hat{\underline{x}}_{u,1} \\ \underline{w}_{r,1} &= \underline{B}_{r,u} \cdot \hat{\underline{x}}_{u,1} \end{aligned} \quad \text{mit } \underline{w}: \text{Widerspruchsvektor} \quad (2.34)$$

Ziel ist nun die Bestimmung der Unbekannten unter der Minimierung der Fehlerquadrate und Einhaltung der aufgestellten Restriktionsgleichungen. (2.9) erweitert sich damit zu:

$$\underline{v}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v} + 2\underline{k} \cdot (\underline{B} \cdot \hat{\underline{x}} + \underline{w}) \rightarrow \text{Minimum} \quad (2.35)$$

Der Korrelatenvektor  $\underline{k}$  wurde bereits in Kapitel 2.2.3 eingeführt, ist allerdings für dieses Verfahren nicht von Interesse. Das erweiterte Normalgleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \underline{A}^T \underline{P} \underline{A} & \underline{B}^T \\ \underline{B} & -\underline{P}_{Res}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\underline{x}} \\ \underline{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}^T \underline{P} \underline{l} \\ \underline{w} \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

mit der  $(r \times r)$ -Gewichtsmatrix  $\underline{P}_{Res}$  der Restriktionen, vereint die aufgestellten Beobachtungsgleichungen sowie die Bedingungsgleichungen in einem Gleichungssystem und führt zur Lösung des Unbekanntenvektors:

$$\begin{bmatrix} \underline{\hat{x}} \\ \underline{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}^T \underline{P} \underline{A} & \underline{B}^T \\ \underline{B} & -\underline{P}_{Res}^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \underline{A}^T \underline{P} \underline{l} \\ \underline{w} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Die Fehlerrechnung entspricht, bis auf die Standardabweichung nach der Ausgleichung

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\underline{v}^T \underline{P} \underline{v}}{n - u + r}}, \quad (2.38)$$

dem einfachen Modell der vermittelnden Ausgleichung (vgl. Kapitel 2.2.2).

Die stochastischen Restriktionen können in Form von Gleichungen und Ungleichungen, abhängig von der zu lösenden Aufgabenstellung, auftreten. Der oben beschriebene Algorithmus ist auf lineare und nichtlineare Gleichungen anwendbar. Die Integration von Ungleichungen in einem Ausgleichungsmodell wird in Kapitel 5.3.3 an einem anwendungsspezifischen Beispiel erläutert.

## 2.3 Datenakquisition

Die photogrammetrische Datenakquisition am grönländischen Gletscher Jakobshavn Isbræ erfolgte durch die hochauflösende digitale Spiegelreflexkamera Kodak DCS 14n (Abbildung 2-16). Durch die rasante technologische Entwicklung im Bereich der digitalen Kameras können die Vorteile der Digitalphotographie mit der präzisen Optik einer analogen Spiegelreflexkamera verknüpft werden. Die für diese Arbeit wichtigsten technischen Daten dieser Stillvideokamera sind der Tabelle 2-1 zu entnehmen.



Abbildung 2-16: Stillvideokamera Kodak DCS 14n (url: [<http://www.dpreview.com/>], 2005)

Sensorgroße [mm]	24 × 36
Auflösungsvermögen [Pixel]	4.500 × 3.000
Farbtiefe [Bit]	36
Aufnahmefrequenz [Bilder/s]	1,7
Aufnahmen/Akkuladung	400
Datenspeicherung	CFC, MMC
Datenübertragung	FireWire

Tabelle 2-1: Technische Spezifikationen der Stillvideokamera Kodak DCS 14n

Die verwendete Kamera kam zum Einsatz, da sie ein autonomes Messsystem darstellt und so unabhängig von einer Stromversorgung sowie einem Steuerrechner in der Feldarbeit eingesetzt werden kann. Aus der Tabelle 2-1 ist ersichtlich, dass bis zu 400 Aufnahmen pro Akkuladung möglich sind, wobei diese Größenordnung für die zu generierenden Bildsequenzen des Jakobshavn Isbræ mehr als ausreichend ist. Die vollkommene Unabhängigkeit der Kamera von einem separaten Computer wird durch die interne Speicherung der aufgenommenen Bilder auf sogenannten Multi-Mediakarten (engl.: multi media cards, MMC) gewährleistet. Die Bilder müssen nur am Ende einer Messepoche ausgelesen werden. Die Kodak DCS 14n weist eine relative Genauigkeit von 1:100.000 bis 1:200.000 auf. Dies ruft zum Beispiel bei einem  $1\text{ km}$ -Gesichtsfeld  $s$  über das Verhältnis

$$\frac{\sigma_s}{s} \quad (2.39)$$

eine Standardabweichung  $\sigma_s = 0,5 \dots 1,0\text{ cm}$  im Objektraum hervor. Aufgrund der Verwendung eines hochauflösenden CCD-Sensors ist mit dem Einsatz geeigneter Bildzuordnungsverfahren eine subpixelgenaue Auswertung im Bildraum sowie die anschließende Übertragung dieses Genauigkeitspotentials in den Objektraum realisierbar. Ein weiterer Vorteil dieser Stillvideokamera ist im Vergleich zu anderen geodätischen Messsystemen der günstige Preis von derzeit circa 5.500,- Euro.

Die dem Anhang zu entnehmende Tabelle A-1 zeigt die während der Feldarbeit vor Ort aufgenommenen Bildsequenzen. Folgende Kriterien werden für die Quantität und Qualität der einzelnen Bilder bzw. Bildsequenzen aufgestellt:



- Die Anzahl der Bilder muss mindestens 24 Stunden abdecken, um den tagesperiodischen Gezeiteneinfluss nachzuweisen.
- Die Kamerabewegung ist zu minimieren.
- Gleiche Beleuchtungsverhältnisse für alle Bilder innerhalb einer Sequenz sind anzustreben.
- Alle Passpunkte müssen in den Bildern detektiert werden können.
- Die Bilder sollen bei der Verwendung eines Normalwinkelobjektives den gesamten relevanten Gletscherstrom abdecken.

Die aufgeführten Bedingungen sind in der Praxis allerdings nicht vollständig in einer Bildsequenz zu vereinen. Als bester Kompromiss wird für eine Normalwinkelsequenzbewertung die Aufnahme vom 20.08.2004 (Tabelle 2-2, #6; Abbildung 2-17a; DVD:\Bildsequenzen\Normalwinkel) ausgewählt. Jedoch sind die Bilder während der Nacht recht dunkel und der Übergang von Tag zu Nacht aufgrund der geographischen Lage des Gletschergebietes sowie der gewählten Aufnahmefrequenz von zwei Bildern pro Stunde sprunghaft. Dabei sind Kamerabewegung und Wolkschatten im Vergleich weniger stark ausgeprägt. Die Auswertung einer Zoomsequenz erfolgt mit dem Bildblock vom 19.08.2004 (Tabelle 2-2, #5; Abbildung 2-17b; DVD:\Bildsequenzen\Zoom), da die Reihe vom 22.08.2004 zwar weitaus länger, in den Nachtstunden allerdings sehr dunkel und somit für eine genaue Bildzuordnung unzureichend ist.

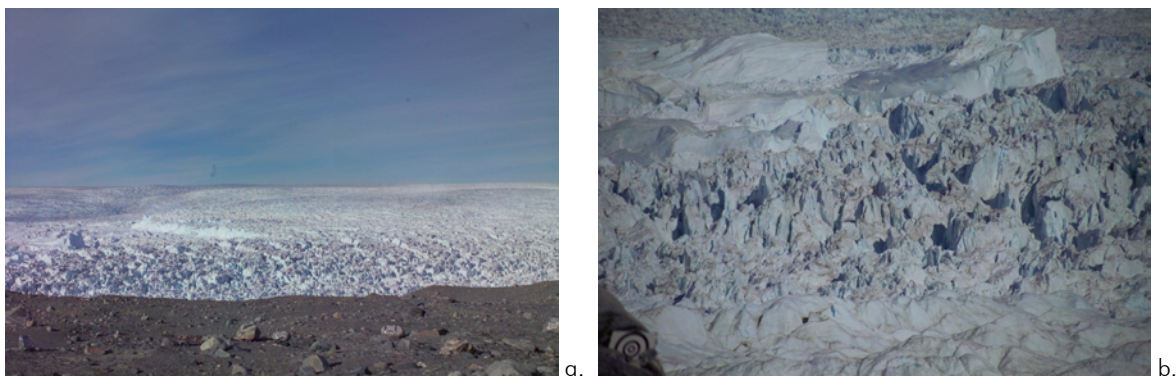


Abbildung 2-17: Aufnahmen des Jakobshavn Isbræ  
 a. Normalwinkelaufnahme vom 20.08.2004  
 b. Zoomaufnahme vom 19.08.2004

#	Datum	Bildanzahl	Zeitliche Auflösung [min]	Zeitraum [h]	Startzeit [h:min]	Brennweite [mm]
5	19.08.04	21	30	10	11:30	200
6	20.08.04	53	30	26	18:00	50

Tabelle 2-2: Merkmale der Bildsequenzen #5 und #6

Eine Überführung der gewonnenen Bildkoordinaten in den Objektraum ist über die Bestimmung der inneren und äußeren Orientierungsparameter der Bilder möglich (siehe Kapitel 6.2). Die Definition eines minimalen Datums (Festlegung von Ursprung, Rotation und Maßstab eines Koordinatensystems) zur Georeferenzierung der Kamera (Position und Ausrichtung) erfolgt über die simultane Aufnahme von Passpunkten. Die Zielmarken auf dem stabilen Vordergrund des Gletschers wurden durch Tachymetermessungen mit dem Bautachymeter Elta R55 von Zeiss (Abbildung 2-18) in ein lokal angelegtes Koordinatensystem integriert. Eine Einmessung ihrer

absoluten Position im globalen erdfesten Koordinatensystem WGS 84 (World Geodetic System, 1984) geschah vor Ort durch differentielles GPS (Globales Positionierungssystem, engl.: global positioning system). Des Weiteren wurden die lokalen Koordinaten von markanten Punkten auf der Gletscheroberfläche bestimmt.



Abbildung 2-18: Elektronisches Bautachymeter Elta R55 der Firma Zeiss (url: [<http://www.gi.geo.tu-dresden.de/>], 2005)

## 2.4 Rückblick auf die Studienarbeit

Im Rahmen einer Studienarbeit zum Thema „Monokulare menschliche Bewegungsanalyse in Bildsequenzen“ (WESTFELD, 2004) wurden bereits wichtige Grundlagen der digitalen Bildzuordnung erarbeitet. Die vorliegende Arbeit bezieht sich vielfach auf die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Studienarbeit. Insbesondere die erstellte Softwarelösung wurde als Grundlage für die Auswertung genutzt.

Die Studienarbeit beschäftigte sich mit der Detektion von zweidimensionalen menschlichen Bewegungen in Bildfolgen. Das Ziel war, der berührungslosen Photogrammetrie einen Schritt näher zu kommen und ausgewählte Punkte von Testpersonen lediglich anhand ihrer durch den Sensor aufgenommenen Grauwerte über eine Bildsequenz zu verfolgen. Folgende unveränderte Trackingalgorithmen kamen zur Anwendung:

- Optischer Fluss
- Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker
- Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate

Es wurde eine benutzeroberflächenorientierte Softwarelösung erarbeitet, die zahlreiche selbst-programmierte Module mit Open Source-Bildverarbeitungsbibliotheken verknüpft. Die Ausgangsdaten entstammten einer mit der digitalen Amateurvideokamera GR-DV 1800 der Firma JVC generierten digitalen Videosequenz. Das Programm ermöglicht das Einlesen und die Teilung der Videosequenz, die Aufbereitung der Eingabedaten in Hinblick auf die anschließende manuelle oder automatische Wahl der zu verfolgenden Bildelemente. Die Bildzuordnung erfolgte mit den oben genannten Matchingverfahren. Im Anschluss können optional die gewonnenen Bildkoordinaten über die Zeit durch eine Dreiecksvermaschung in einem VRML-Modell (engl.: virtual reality modeling language) visualisiert werden.

Neben Virtual Reality – Applikationen, wie zum Beispiel Motion Capturing, ermöglichen menschliche Bewegungsanalysen, unter anderem Vitalitätsuntersuchungen in der Sportmedizin, klinisch-wissenschaftliche Betrachtungen während Lokomotionstherapien, die Weiterentwicklung bzw. Verbesserung orthopädischer Produkte und die Datengenerierung für pädagogische sowie psychologische Untersuchungen. Die photogrammetrische Herangehensweise sowie die Ergebnisse der Studienarbeit können folglich für die Registrierung und Auswertung kinematischer Vorgänge interdisziplinäre Anwendung finden.

Die in der Studienarbeit gezeigten Beispiele veranschaulichten das Potential, welches in der Analyse von Bewegungsvorgängen zu finden ist. Es wurden allerdings auch Probleme und Grenzen des reflektorlosen Trackings aufgezeigt. Diese konnten teilweise in der hier vorliegenden Arbeit gelöst werden. Des Weiteren soll das der Studienarbeit zugrunde liegende Programmkonzept einer im Bereich der monokulare Bewegungsanalysen und darüber hinaus allgemein anwendbaren Software weiter verfolgt werden.

## 2.5 Aspekte der Programmierung

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Programm „2-DMA“, welches als Erweiterung der in Kapitel 2.4 vorgestellten Software bezüglich einer Auswertung der vorliegenden Bildsequenzen des Gletschers Jakobshavn Isbræ angesehen werden kann, wurde in der Programmiersprache C++ unter Microsoft Visual C++ 6.0 erstellt. Der vollständig kommentierte Quelltext (DVD:\2-DMA\Quelltext\ ) sowie ein Setup des Programms (DVD:\2-DMA\2-DMA.exe) ist der dem Anhang beigelegten DVD zu entnehmen. Im weiteren Verlauf werden zwei Open Source-Bildverarbeitungsbibliotheken, die neben den Standardbibliotheken des C++-Compilers Verwendung finden, vorgestellt sowie die Gesichtspunkte der Graphikprogrammierung zusammengefasst.

### 2.5.1 Bibliotheken

Wie bereits einleitend erwähnt, kommen für Standardbildverarbeitungsrountinen die Bibliotheken IPL und OpenCV zum Einsatz.

Die Open Source Computer Vision Library (OpenCV) ist eine frei verfügbare Sammlung von C/C++-Algorithmen für unterschiedliche Problemstellungen im Bereich der Computer Vision (VA SOFTWARE CORPORATION, 2003). OpenCV wurde im Jahr 2000 von der Firma Intel Corporation veröffentlicht und gilt als Nachfolger der Image Processing Library (IPL). Ziel der Publikation war eine Innovationsbeschleunigung im Bereich der Bilderkennung durch die Verbreitung kostenloser und anwendungsspezifisch optimierbarer Bildbearbeitungs- und Bildverarbeitungsrountinen. In der derzeit aktuellen Version OpenCV 4-Beta stehen dem Anwender zahlreiche Funktionen der Bildbearbeitung sowie zur Bild- und Strukturanalyse und einsatzfähige Funktionalitäten, welche Bewegungsanalysen und Objekt-Tracking ermöglichen, zur Verfügung. An dieser Stelle sei insbesondere die auf einer pyramidenbasierten lokalen Methode aufgebauten Funktion zur Schätzung des optischen Flusses genannt (siehe Kapitel 4.1).

Ein Softwarepaket zur Implementierung des Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker wird unter (BIRCHFIELD, 2005) zum kostenlosen Download angeboten. Jenes wird genutzt, um Bewegungsvorgänge, wie in Kapitel 4.2 erläutert, zu detektieren.

Außerdem liegen die Quelltexte für die Kreuzkorrelation<sup>1</sup> (Kapitel 4.3) sowie für die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate<sup>2</sup> (Kapitel 4.4) vor, welche beide als Bildzuordnungsverfahren in das Programm „2-DMA“ implementiert wurden.

### 2.5.2 Standards für die Graphikprogrammierung

#### 2.5.2.1 Virtual Reality Modeling Language

Die HTML-Erweiterung VRML (engl.: virtual reality modeling language) ist eine Skriptsprache (Beschreibungssprache) für dreidimensionale Objekte sowie deren Formen, Größen, Farben, Positionen, Animationen und Interaktionsmöglichkeiten. Die Virtual Reality Modeling Language wird als objektorientierte, interaktive, netzwerkfähige und multimediale Modellierungssprache verstanden und ermöglicht die vollständige Darstellung komplexer 3D-Szenen mithilfe eines geeigneten Browsers oder eines Standardbrowser-Plugins.

---

<sup>1</sup> Der Quelltext wird in seiner originalen Form von Dipl. Ing. Ellen Schwalbe (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden) zur Verfügung gestellt.

<sup>2</sup> Der Quelltext wird in seiner originalen Form von Prof. Dr. habil Hans-Gerd Maas (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden) zur Verfügung gestellt.

Die erste Version dieser frei verfügbaren Skriptsprache (VRML 1.0) entstand im Jahr 1995 aus dem Dateiformat HTML, um 3D-Objekte bzw. -Szenen im Internet laden und darin navigieren zu können. Der Grundgedanke lag darin, langwierige Ladezeiten bei der Betrachtung von 3D-Modellen im World Wide Web (WWW) zu umgehen und lediglich die nötige Beschreibung in Skriptform zu laden. Das daraus resultierende Modell wird im Anschluss von jedem Nutzer selbst generiert, wobei hierfür bis heute ein VRML-Plugin für den Standardbrowser (z.B. Cortona VRML Client für den Internet Explorer sowie den Netscape Navigator) oder ein Stand-Alone-Browser (z.B. GL-View) benötigt wird.

Mit dem Erscheinen der auch gegenwärtig aktuellen Version 2.0 wurde das VRML-Konsortium (VRML Consortium, Inc.) aus ursprünglich 35 Firmen und Organisationen gegründet. Ziel dieser Kooperation ist die nichtkommerzielle Unterstützung und Verbreitung von VRML als offene Sprache für 3D-Multimedia und virtuelle Welten im WWW sowie die Pflege und Weiterentwicklung des VRML-Standards als Industrienorm. Im Jahr 1997 etablierte sich die Skriptsprache endgültig als internationaler Standard (VRML97). Die wichtigsten Erweiterungen gegenüber VRML 1.0 sind eine weitreichendere Interaktivität der Objekte untereinander und die Möglichkeit der animierten Darstellung. Neben der Darstellung statischer Modelle besteht so die Möglichkeit der Visualisierung von Translationen und Rotationen. Dabei wird die zeitliche Steuerung der Animation durch einen Zeitsensor und der gleitende Übergang zwischen den einzelnen Objektzuständen mit einem linearen Interpolator realisiert.

Eine VRML-Datei setzt sich aus mehreren ineinander verschachtelten Knoten zusammen. Diese ergeben einen streng hierarchisch aufgebauten Szenengraphen. Die wichtigsten Knotentypen definieren Punkte, Linien und Flächen sowie geometrische Grundformen, wie zum Beispiel Quader, Zylinder und Kugel. Des Weiteren beschreiben die Knoten Transformationsoperationen wie Skalierung, Rotation und Translation. Es besteht die Möglichkeit, Materialeigenschaften der Objekte festzulegen und Beleuchtungsmodelle zu erstellen.

Zur Vertiefung dieser Thematik können (WALTER, 2003; SMITH, 2004; WESTFELD, 2004) herangezogen werden.

### 2.5.2.2 Open Graphics Library

Die Open Graphics Library (OpenGL) der Firma Silicon Graphics (SGI) ist ein plattform- und programmiersprachenunabhängiges Application Programming Interface (API) zur Entwicklung und Darstellung dreidimensionaler Objekte. Durch das Auslassen von betriebssystem- und hardwareabhängigen Bestandteilen ist diese Spezifikation zu einem 2D- und 3D-Industriestandard herangewachsen. OpenGL ist demnach lediglich ein Standard und keine Implementierung oder Programmiersprache. Alle OpenGL-Befehle werden von der entsprechend kompatiblen Graphikkarte bearbeitet (Hardware- oder Direct Rendering) bzw. auf der Central Processing Unit (CPU) ausgeführt (Software Rendering). Die zugehörigen Implementierungen werden vom Hardwarehersteller zur Verfügung gestellt.

Der Standard dieser Graphikbibliothek wird von dem seit 1992 bestehenden OpenGL Architecture Review Board (ARB) festgelegt. Das ARB ist ein Zusammenschluss von im Bereich der Hard- und Softwareentwicklung arbeitenden Firmen, wie zum Beispiel ATI, Dell, Hewlett-Packard, IBM, Intel, NVidia, SGI und Sun. Aufgrund seiner Plattformunabhängigkeit ist OpenGL im professionellen Bereich als 3D-Standard nach wie vor führend. Die aktuelle Version ist OpenGL 2.0.

Neben der Plattformunabhängigkeit ist dank global gehaltener Variablen, die so nicht bei jedem Aufruf neu übergeben werden müssen, eine Echtzeitanwendung möglich. Ein weiterer Vorteil dieser Graphikbibliothek ist, dass sie frei, also kostenlos, zur Verfügung steht und anwendungsspezifisch manipuliert werden kann. Seit der Einführung der Version OpenGL 2.0 besteht zum

Beispiel die Möglichkeit, nicht nur vordefinierte Funktionen der Graphikkarte zu nutzen, sondern eigene Anwendungen direkt auf der Hardware zu generieren.

## Kapitel 3

# Gesichtspunkte der Glaziologie

Das folgende Kapitel beschäftigt sich zunächst mit der Glaziologie als Wissenschaft (Kapitel 3.1). Es geht auf die allgemeinen Aufgabenstellungen der Glaziologie ein und soll einen Überblick über die Eigenschaften sowie das Verhalten von Gletschern vermitteln (Kapitel 3.2). Dies ist erforderlich, um die gegenwärtige Situation des grönländischen Gletschers Jakobshavn Isbræ und die Notwendigkeit geodätischer Messungen an diesem Ausflussgletscher zu verdeutlichen (Kapitel 3.4). Ausgewählte Möglichkeiten der geodätischen Gletscherüberwachung sind in Kapitel 3.3 aufgeführt.

Zur Darstellung der Tragweite interdisziplinärer Wissenschaften und dem Zusammenspiel unabhängiger Fachgebiete wird bewusst ein eigenständiges Kapitel für den Bereich der Gletscherkunde vorgesehen. Des Weiteren besteht so die Gelegenheit, die in Kapitel 1.1 angesprochenen fachübergreifenden Aufgabenstellungen der terrestrischen Photogrammetrie an einem konkreten Beispiel nachzuvollziehen.

### 3.1 Glaziologie

Die Glaziologie, eine der wichtigsten Disziplinen der Polarforschung, ist die Lehre von Formen, Auftreten und Eigenschaften von Eis und Schnee samt ihren Ausformungen als Gletscher, Permafrost und Schelfeis sowie den temporalen Abfolgen von Eis- und Warmzeiten (BENN/EVANS, 1998). Als interdisziplinäres Fachgebiet arbeitet sie vor allem mit Methoden der Meteorologie, Klimatologie, Hydrologie und nicht zuletzt mit Verfahren der Geodäsie und Kartographie (Abbildung 3-1).

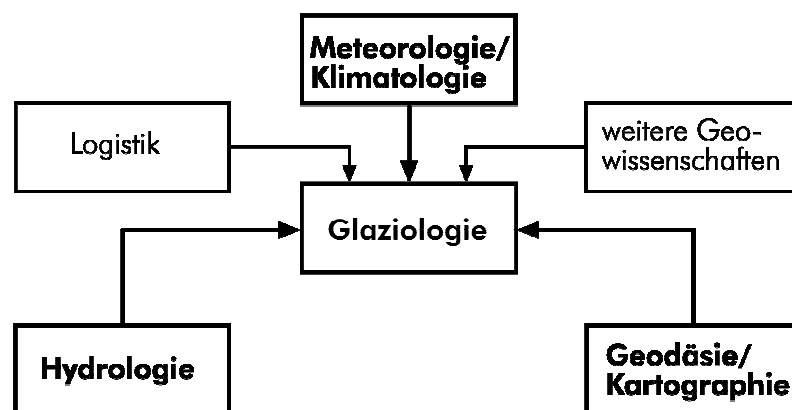


Abbildung 3-1: Glaziologie im wissenschaftlichen Kontext (nach KFG, 2005)

Einzelgebiete dieser Wissenschaft umfassen die Gletscherhistorie und die Rekonstruktion historischer Gletscherausbildungen, Auswirkungen der Gletscher auf das Klima, den Beitrag von Gletschern zur Erosion und der Lebensformen im Eis. Das Vorhandensein von Eis auf dem Mars gibt der Gletscherkunde auch eine extraterrestrische Komponente (NASA, 2005). Die Glaziologie untersucht das Gefüge und den Haushalt rezenter Gletscher sowie deren reliefgestaltende Wirkungen

durch Glazialerosion und glazigene Ablagerung. Aus dem Aufbau und der Zusammensetzung von Eismassen lassen sich zum Beispiel Schlüsse über den Ablauf von Eiszeiten ziehen, aber auch über die momentane Kontamination eisbedeckter Meere sowie die Folgen der Klimaveränderung. Nicht zuletzt besteht eine der wichtigsten Aufgabenstellungen in der Bestimmung der Bewegungs- oder Fließgeschwindigkeit von Gletschern.

Zur Vertiefung können zum Beispiel (BENN/EVANS, 1998; KFG, 2005; AWI, 2005) herangezogen werden.



## 3.2 Eigenschaften von Gletschern

Zur besseren Beschreibung der Entstehung sowie der Physik der Bewegung von Gletschern werden die Gletscher zunächst in zwei Grundtypen klassifiziert: Talgletscher und Inlandeis. Die Talgletscher sind der bekannteste Gletschertyp. Sie strömen in Gebirgstälern langsam talab und nehmen oft die gesamte Talbreite ein. Inlandeise oder kontinentale Eisschilde, zu denen auch der grönländische Jakobshavn Isbræ zählt, bewegen sich in der Regel langsam und haben die Form einer mächtigen Eisdecke (vgl. Abbildung 3-2).

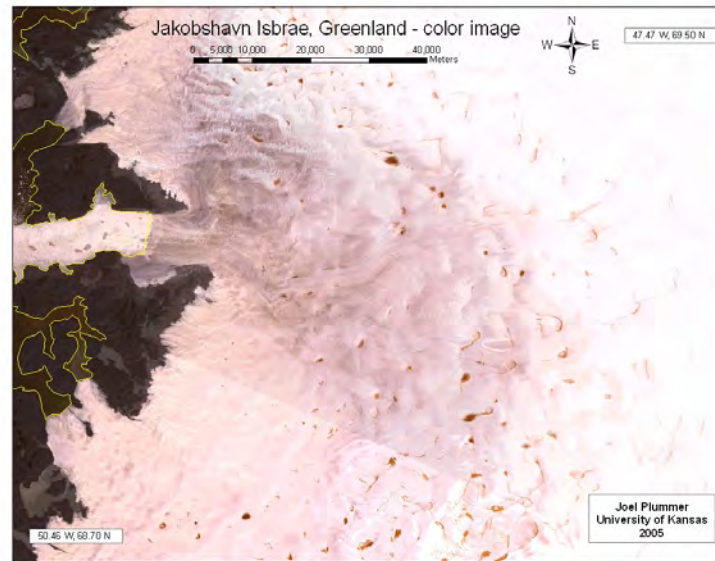


Abbildung 3-2: Landsat-Satellitenaufnahme des Jakobshavn Isbræ, Grönland (PLUMMER, 2005):

- Coloriertes Bild
- Küstenlinien in Gelb
- Auflösung: 30 m

Die Entstehung eines Gletschers beginnt mit Schneefall im Winter. Im Nährgebiet, oberhalb der Schneegrenze, taut der gefallene Niederschlag im Sommer nicht mehr vollständig ab. Der Überschuss an Neuschnee wird als Akkumulation bezeichnet und führt durch Überlagerungsdruck, verursacht durch Eigengewicht, zu einem Übergang des Schnees zu Eis. Die so aufgebauten Eismassen verhalten sich wie eine viskose Flüssigkeit und bewegen sich, primär verursacht durch Gravitation und Deformation des Eises, vom Zentrum der Inlandseismassen weg in Richtung Küste. Die Deformation ist das Ergebnis von Spannungen, die durch das Eigengewicht des Gletschers auf sein Bett hervorgerufen werden. Unter den auftretenden Spannungen verschieben sich die Eiskristalle in Nähe des Gletscherbettes relativ zueinander, was zu ruckartigen Bewegungen an den Berührungsflächen der Kristalle führt. Die Bewegung basiert also auf der Plastizität des Eises. Dementsprechend ist die Fließgeschwindigkeit eines Gletschers an der Oberfläche der Gletschermitte am höchsten und nimmt zur Sohle sowie den Wandungen hin ab. Der Vollständigkeit halber sei ein zweiter bewegungsverursachender Mechanismus genannt, der jedoch nur bei warmtemperierten Gletschern (Gletschertemperatur in Gefrierpunktnähe) auftritt. Da das Eis an der Grenze zum Untergrund unter hohem Druck steht, sinkt der Gefrierpunkt aufgrund der Druckerhöhung des Wassers. Das Eis schmilzt und der Gletscher gleitet auf dem entstandenen Wasserfilm. Der Jakobshavn Isbræ zählt zu den kalten Gletschern. Seine Temperatur liegt weit unter dem Gefrierpunkt, was lediglich ein plastisches Fließen zulässt.

Die Fließgeschwindigkeit eines Gletschers ist abhängig von

- dem Gefälle der Sohle,
- dem Druck des Firnfeldes, also dem obersten Teil des Gletschers,
- der Untergrundbeschaffenheit sowie
- dem Querschnitt des fließenden Eises.

Auf dem Weg von höher gelegenen Bereichen und kontinentalem Inland zu den Abtragungsgebieten passieren die Eismassen das Zehrgebiet. Dieser Abschnitt befindet sich unterhalb der Schneegrenze, indem ein Gletscher durch Abschmelzen und Verdunstung an Masse verliert (Ablation). Sobald ein Gletscher in das Meer oder einen größeren See strömt, schwimmt das Eis auf. Dadurch kommt es zu einem Abbrechen von Teilen der Gletscherfront. Dieser Vorgang wird als Gletscherkalben bezeichnet.

### 3.3 Gletscherüberwachung

Gletscher stellen eine wichtige Süßwasserressource dar und sind wertvolle Indikatoren für lokale und globale klimatische Wandlungsprozesse. Ihr weltweiter Rückzug gehört zur sichersten Evidenz dafür, dass sich das Klima der Erde seit dem Ende der „Kleinen Eiszeit“ um die Mitte des 19. Jahrhunderts markant verändert hat. Die Erforschung der Gletscher fördert das Verständnis von den Wechselwirkungen zwischen Eis und Klima unseres planetarischen Systems. Durch Reflexion eines großen Anteils der Sonnenenergie zurück ins All sowie durch die Anhebung der Meeresspiegel, verursacht durch das Schmelzen oder die Neuentstehung von Eisbergen an kontinentalen Rändern, reguliert das Gletschereis signifikant das Erdklima (RAMANUJAN, 2004). Dementsprechend ist eine genaue Erfassung von Gletscherverschiebungen notwendig, um die Dynamik und deren steuernde Parameter der Eismassen zu verstehen.

Neben der direkten Beobachtung der Gletschergeometrie und deren zeitliche Variation ist die Generierung einer Massenbilanz eine weitere Methode zur Überwachung und Untersuchung der Gletscher. Die Massenbilanz eines Gletschers ist definiert über die Differenz zwischen Akkumulation und Ablation, also dem Massenverhältnis zwischen Schneefall im Nährgebiet und Schneeschmelze im Zehrbereich (vgl. Kapitel 3.2). Ein Betrachtungszeitraum (Haushaltsjahr) erstreckt sich üblicherweise von Oktober bis Oktober des Folgejahres. Auf der Einnahmeseite einer Massenbilanz steht, wie oben bereits erwähnt, die Ansammlung von festem Niederschlag. Die Ausgabeseite wird von der Verfügbarkeit an Energie, notwendig für die Ablation von der Gletscheroberfläche, bestimmt. In Abbildung 3-3 sind die unterschiedlichen Auswirkungen eines Bilanzjahres dargestellt. Es wird von einem negativen Bilanzjahr gesprochen, wenn die sommerliche Abschmelzung die winterliche Schneeakkumulation übertrifft. In diesem Fall kommt es zu einem Rückzug des Gletschers (Abbildung 3-3, Punkt 2). Bei einem positiven Haushaltsjahr überwiegt die Akkumulation, was zu einem Vorstoß des Gletscherstroms führt (Abbildung 3-3, Punkt 3). Sind Winter- und Sommerbilanz gleich groß, entsteht ein Gleichgewicht und der Gletscher stößt weder vor, noch zieht er sich zurück (Abbildung 3-3, Punkt 1).

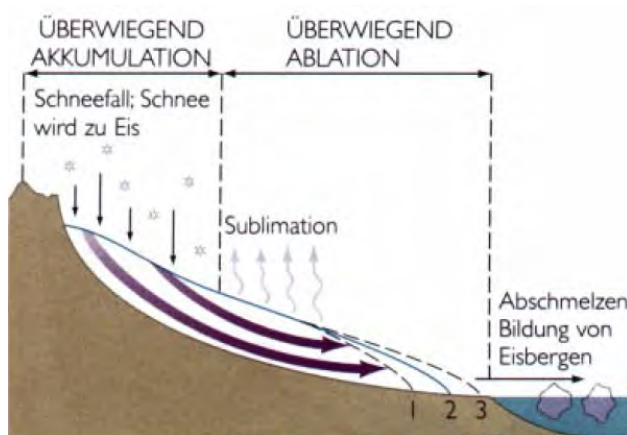


Abbildung 3-3: Akkumulation und Ablation eines Gletschers (KOLENDA, 2000):

- 1: Akkumulation = Ablation
- 2: Akkumulation < Ablation
- 3: Akkumulation > Ablation

Die aus einer Massenbilanz erhaltenen Massenänderungen spiegeln so die klimatischen Verhältnisse des vergangenen Jahres direkt wider, wobei die Reaktionszeiten auf veränderte Bedingungen dennoch sehr unterschiedlich sind. Diese beginnt bei einem Jahr für kleinere Gletscher und kann mehreren Jahrzehnten bei Großen betragen. Weiterführende Informationen zu glazialen Massenbilanzen finden sich in (BENN/EVANS, 1998; KOLENDA, 2000; DITTRICH, 2004).

Die bis heute etablierten Verfahren zur Gletscherüberwachung haben folgende nachteilige Charakteristika (BALTSAVIAS et al, 2001):

- Die Verfahren sind zu langsam, schwerfällig und kostspielig.
- Die Vermessungsdichte sowie -genauigkeit sind unzureichend.
- Der Zyklus von Wiederholungsmessungen ist zu lang.
- Die Beobachtungszeiträume sind zu kurz.

Unter Verwendung von geodätischen Verfahren zur großflächigen Bestimmung von Gletscherbewegungen können diese Nachteile ausgeräumt werden. Moderne Fernerkundungsmethoden liefern, unter dem Einsatz verschiedener Sensoren, großflächige und teilweise räumlich hochauflösende Informationen über den Zustand der Gletscher. Verschiedene Institutionen stellen Satellitenbilder (Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5) zur Verfügung und ermöglichen so Auswertungen der Gletscherdynamiken. Im operationellen Einsatz für die Gletscherbeobachtung sind zum Beispiel

- „Landsat 7“ der National Aeronautics and Space Administration (NASA), ausgestattet mit einem Enhanced Thematic Mapper Plus-Sensor (ETM+), sowie
- die Radarsatelliten „European Remote Sensing Satellites“ (ERS-1, -2) der europäischen Raumfahrtbehörde European Space Agency (ESA) und
- der kanadische „RADARSAT“ (Sensoren: Synthetic Aperture Radar, SAR).

Problematisch für die anschließende Auswertung der gewonnenen Daten ist die konfigurationsbedingte Repetitionsrate der Satelliten. Landsat-7 benötigt 16, RADARSAT 24 und ein ERS 35 Tage, um die selbe Stelle der Erdoberfläche erneut zu erfassen. Sind die Wiederholraten zu lang und die Bewegung der beobachteten Gletscher zu groß, liefert ein digitaler Bildvergleich zum Auffinden korrespondierender Bildpunkte im ungünstigsten Fall falsche oder gar keine Ergebnisse (vgl. Kapitel 7.2.3). Studien zur Extraktion der Bewegungsvorgänge von Gletschern aus Satellitenbildern sind unter anderem in (JIABING/DONGCHEN, 2002; JOUGHIN et al., 2004; BERTHIER et al., 2005) zu finden.

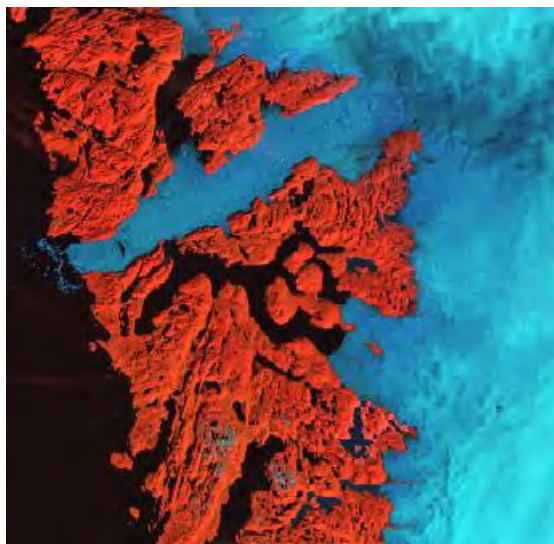


Abbildung 3-4: Satellitenbild des Gletschers Jakobshavn Isbræ, Grönland, Landsat-7 (LANDSAT, 2005)

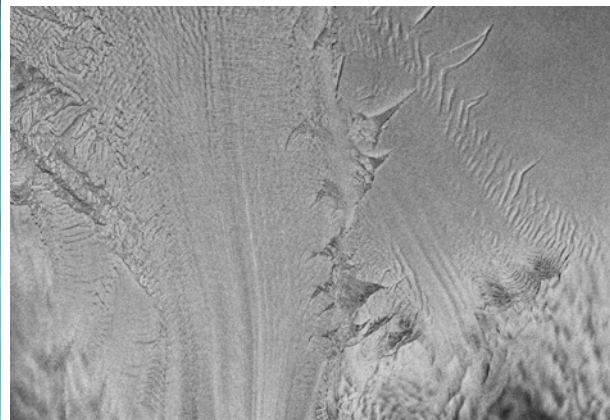


Abbildung 3-5: Satellitenbild des Gletschers Stancomb-Wills, Antarktis, RADARSAT (TU Dresden, IPG, 2005)

Für die Erfassung der Gletschergeometrie und -bewegung werden immer häufiger Methoden der Photogrammetrie angewendet. Eine flugzeuggestützte Abtastung der Erdoberfläche mittels Laserstrahlung (engl.: Airborne Laser Scanning, ALS) erlaubt die automatische Erfassung großflächiger digitaler Geländemodelle (DGM) mit einer hohen Punktdichte (Abbildung 3-6). Liegen

Befliegungen aus mehreren Epochen vor, können multitemporale DGM generiert und zur anschließenden Ableitung der Massenverluste bzw. -gewinne verwendet werden. Weiterführende theoretische Erläuterungen und Erfahrungsberichte liefern (BALTSAVIAS et al., 1996; KÄÄB/VOLLMER, 2000; BALTSAVIAS et al.; 2001; KÄÄB, 2001; GEIST et al., 2003).

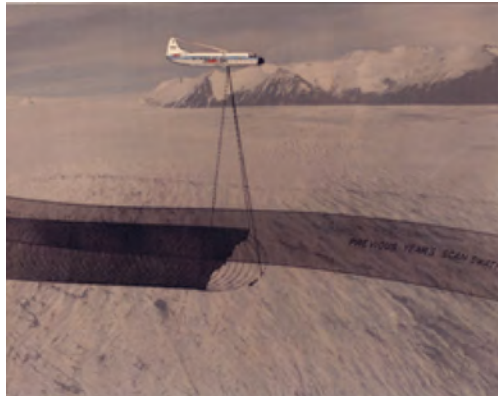


Abbildung 3-6: Airborne Laser Scanning (JOUGHIN et. al, 2004):

Ein Laserscanner sendet Impulse zum Boden, wo sie reflektiert und im Flugzeug wieder empfangen werden. Die Berechnung der Distanz zwischen der Plattform und der Oberfläche erfolgt über die Laufzeitmessung der Laserimpulse. Zur kontinuierlichen Bestimmung der Flugzeugposition wird das globale Positionierungssystem GPS in Verbindung mit einem inertialen Navigationssystem (INS) eingesetzt.

Ebenso bieten digital terrestrische Gletscheraufnahmen eine interessante Option für die Generierung zeitlich und räumlich hochauflösender Bildsequenzen (Abbildung 3-7). Diese Methode zeichnet sich besonders durch die Flächenhaftigkeit und Berührungslosigkeit sowie den hohen Grad der Automatisierung während der Datenauswertung aus. Ein Vorteil gegenüber dem ALS ist die äußerst kostengünstige und somit wirtschaftliche Datenakquisition (vgl. Kapitel 2.3). Das Potential dieses Verfahrens ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Nicht zuletzt ermöglichen die traditionell geodätischen Einzelpunktaufnahmen mit Theodolit und differentiellem GPS eine punktuell hochgenaue Gletscherüberwachung.



Abbildung 3-7: Stillvideokamera-Aufnahme des Gletschers Jakobshavn Isbræ (TU Dresden, IPF, 2004)

### 3.4 Zur aktuellen Situation des Gletschers Jakobshavn Isbræ

Der Ausflussgletscher Jakobshavn Isbræ ist der größte und dynamischste Gletscher Grönlands. Er befindet sich an der Westküste der Insel mit Abfluss in Davis Strait (Abbildung 3-8) und nimmt circa 6,5 Prozent der gesamten Eisfläche Grönlands ein.



Abbildung 3-8: Geographische Einordnung des Gletschers Jakobshavn Isbræ

- a. Übersichtskarte Grönland (url: [<http://www.lib.utexas.edu/>], 2005)
- b. Detailkarte des Ausflussgebietes (TU Dresden, IPG, 2003)

Eine von der NASA finanzierte Studie (JOUGHIN et al., 2004) verwendet von Landsat-Satelliten aufgenommene Bilder und mit Laserscanning generierte Daten, um Größenordnungen für das Bewegungsverhalten dieses grönländischen Gletschers abzuleiten. Im Jahr 1985 bewegte sich der Jakobshavn Isbræ mit 6.700 Metern pro Jahr in Richtung Ozean. Aus bislang noch nicht vollständig geklärten Ursachen verlangsamte sich die Ausflussgeschwindigkeit bis 1992 auf 5.700 Meter pro Jahr (Abbildung 3-9a) und blieb weitere 5 Jahre konstant. Dieser relativ stabilen Phase folgte ein gewaltiger Anstieg der Fließgeschwindigkeit. Bis zum Jahr 2000 erhöhte sich die Dynamik auf 9.400 Meter pro Jahr und verdoppelte sich 2003 im Vergleich zu 1997 auf 12.600 Meter pro Jahr (Abbildung 3-9b).

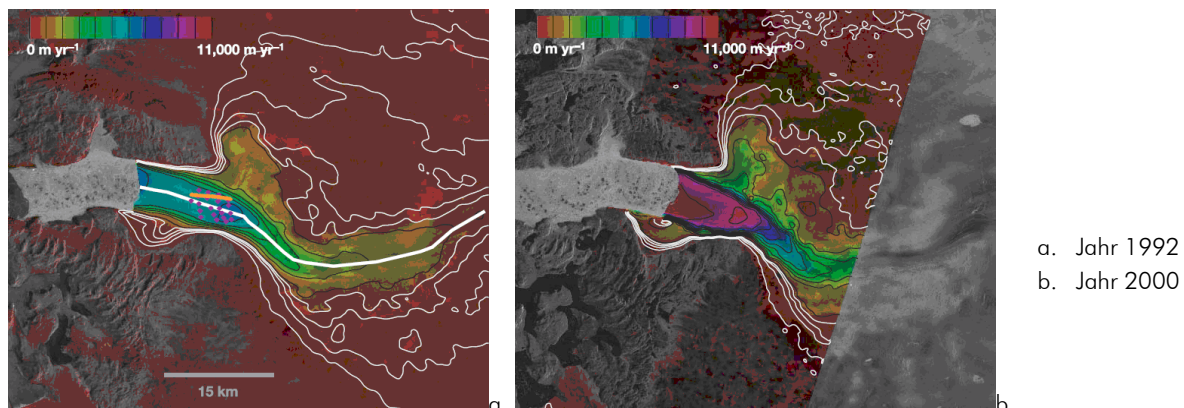


Abbildung 3-9: Farbcodiertes SAR-Satellitenbild visualisiert den Geschwindigkeitsanstieg des Gletschers Jakobshavn Isbræ, Grönland (JOUGHIN et al., 2004)

Die Ursachenforschung für dieses Verhalten ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Aktivitäten, zum Beispiel (JOUGHIN et al., 2004; KRABILL et al., 2004; THOMAS, 2004; LUCKMAN/MURRAY, 2005). Die bis dato erlangten Erkenntnisse werden im Folgenden näher erläutert.

Das Landsat-Satellitenbild aus dem Jahr 2003 (Abbildung 3-10) vermittelt einen Überblick über das Ausflussgebiet des Jakobshavn Isbræ und zeigt die sich zurückziehende Abbruchfront. Der Gletscher befindet sich mittig rechts im Bild und hat ein bläulich gefärbtes Aussehen. Die unregelmäßig geformten und bläulich gefärbten Gebilde sind gekalbte Eisberge und treiben, umgeben von schwimmendem Eis, auf dem Ozean. Die Abbildung 3-10 zeigt die Richtung des glazialen Stroms von rechts nach links.

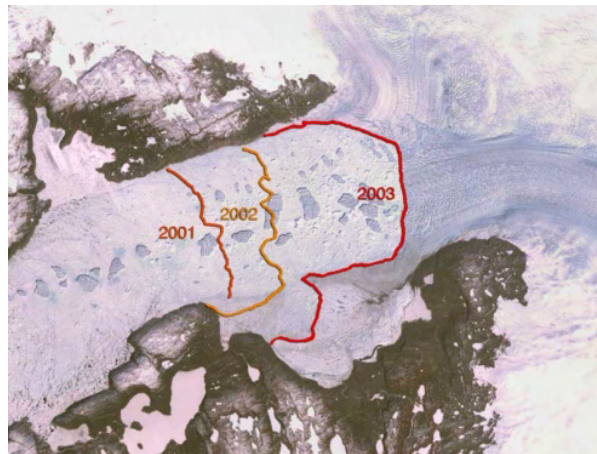


Abbildung 3-10: Rückzug des Gletschers Jakobshavn Isbræ, Grönland (JOUGHIN et al., 2004):

Die farbigen Linien symbolisieren die Abbruchkante des Gletschers aus den Jahren 2001 (orange), 2002 (gelb) und 2003 (rot).

Trotz der relativen Stabilität zwischen 1950 bis 1980 und 1992 bis 1997 begann die Gletscherzunge ab 1997 auseinander zu brechen, bis sie im Jahr 2000 vollständig abgetragen war. Die Auswirkungen der fehlenden Gletscherzunge sind in den Abbildungen 3-11a bis 3-11d graphisch dargestellt. Abbildung 3-11a zeigt die natürliche Ausgangssituation mit einer intakten und stabilen Gletscherzunge. Aufgrund ansteigender Temperaturen sickert Schmelzwasser im Zehrgebiet durch die Oberfläche. Das sonst lediglich bei warmtemperierten Gletschern beobachtete „Gleiten“ des Gletscherstroms auf einem Wasserfilm (vgl. Kapitel 3.2) bewirkt eine Erhöhung der Geschwindigkeit in warmen Sommern (Abbildung 3-11b). Dieser jahreszeitliche Schmelzwasserabfluss in das Gletscherbett verursacht demzufolge Schwankungen der nahe gelegenen Binneneisgeschwindigkeit. Dennoch sind diese Schwankungen kleiner als die durch Messungen nachgewiesenen Änderungen von (JOUGHIN et al., 2004).

Ein weiterer Effekt der Erderwärmung ist eine von der Oberfläche der Gletscherzunge ausgehende Spaltenbildung. Die Spalten füllen sich langsam mit Wasser, was zu einer Zersetzung und dem Auseinanderbrechen der gesamten Gletscherfront führt (Abbildung 3-11b, c). Außer dem Wasserstand im Abflussgebiet wirkt die Gletscherzunge wie eine natürliche Barriere auf den ihr folgenden Gletscherstrom. Wenn die Zunge fehlt, fehlt auch deren bremsende Wirkung auf den Jakobshavn Isbræ. Folglich flacht der gesamte Strom ab, erhöht seine Geschwindigkeit, kalbt schneller und verliert an Masse (Abbildung 3-11d). Fließt eine große Eismasse mit konstanter Geschwindigkeit in den Ozean und bricht anschließend auseinander, hat dies keine Auswirkungen auf den Meeresspiegel. Anders verhält es sich, wenn das Auseinanderbrechen der Eismassen zu einer Erhöhung der Fließ- und Kalbungsgeschwindigkeit führt. In diesem Fall ist der Aufprall auf den Ozean signifikant. Allein der grönländische Jakobshavn Isbræ führt einen globalen Anstieg der

Meeresspiegel um jährlich 0,06 Millimeter herbei (JOUGHIN et al., 2004). Das sind vier Prozent des Anstiegs, der im vergangenen 20. Jahrhundert beobachtet wurde. Des Weiteren konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit der Beschleunigung auch die Dicke des Gletschers seit 1997 jährlich um 15 Meter abnimmt (JOUGHIN et al., 2004).

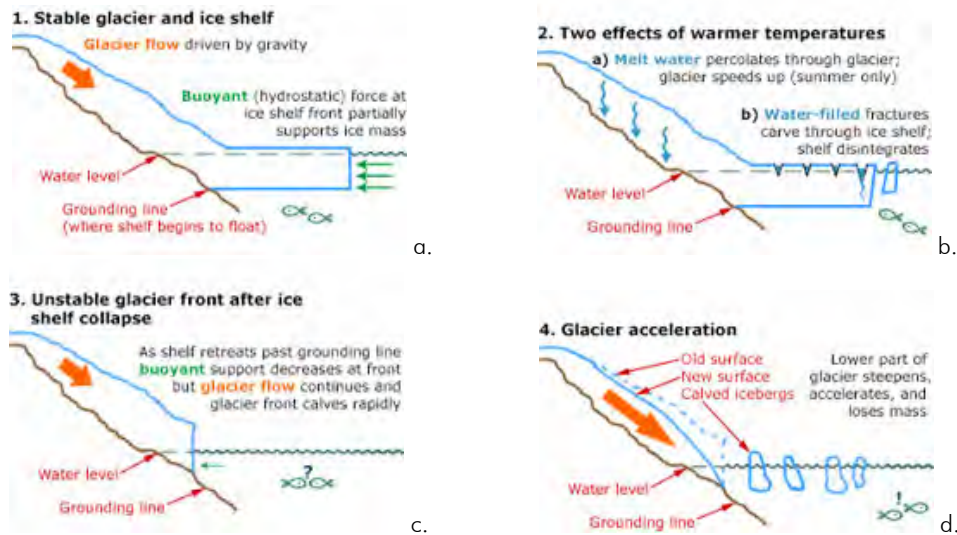


Abbildung 3-11: Graphische Darstellung der Auswirkungen einer abgebrochenen Gletscherfront auf den Jakobshavn Isbræ (url: [<http://www.nasa.gov/>], 2005)

- a. Stabiler Gletscher und Eisschelf
- b. Zwei Effekte, ausgelöst durch wärmere Temperaturen
- c. Instabile Gletscherfront nach dem Zusammenbruch des Eisschelfes
- d. Beschleunigung des Gletschers

In vielen klimatischen Modellen wurden Gletscher bisher als langsam reagierend behandelt. In der oben genannten Darstellung ist erkennbar, dass diese Annahme für den Jakobshavn Isbræ nicht zutrifft und die Eismassen sehr schnell auf klimatische Variationen reagieren. Die Abbildungen 3-12 und 3-13 zeigen, dass der Jakobshavn Isbræ repräsentativ für andere grönländische Ausflussgletscher steht. Die saisonale Oberflächenschmelze des grönländischen Eisschildes wird seit 1979 beobachtet und weist einen ansteigenden Trend auf. Abbildung 3-12 zeigt die Ausdehnung aus dem Jahr 1992 (Abbildung 3-12a) im Vergleich zu 2002 (Abbildung 3-12b). Die Daten wurden durch satellitengestützte Mikrowellenmessungen ermittelt und veranschaulichen den deutlichen Vorstoß der Schmelzzone in Richtung Inland. Die Eisvariationen Grönlands sind in Abbildung 3-13 durch farbcodierte Laserhöhenmessungen dargestellt und lassen ebenfalls einen Rückgang der Mächtigkeit, insbesondere an den Küstenbereichen, erkennen. Die auffallende Verdickung des Eises im Inland ist auf die Ansammlung atmosphärischer Feuchtigkeit durch schmelzendes Eis an den Rändern der Insel zurückzuführen.



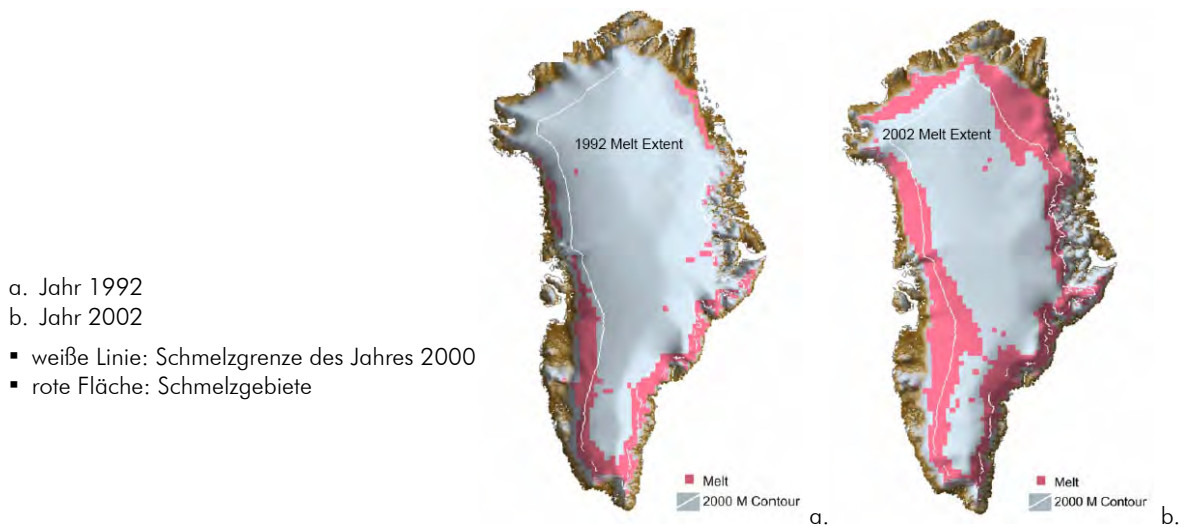
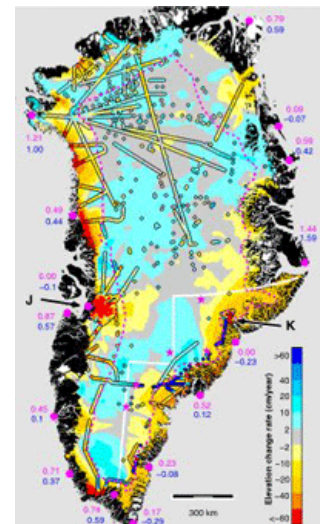


Abbildung 3-12: 3D-DGM generiert aus satellitengestützten Mikrowellenmessungen (url: [http://cires.colorado.edu/], 2005)

Abbildung 3-13: Grönlands Eisvariationen zwischen 1997-2003 (http://nasa.gov/, 2005):

Raten der Höhenänderungen, gemessen mit Laserscanning zwischen 1997-2003, überlagert mit einer Karte von Messungen aus den Jahren 1993-1999.

Warme Farben signalisieren Höhenverluste, kalte Farben Höhenzuwächse. Der Wertebereich erstreckt sich auf  $\pm 60$  cm/Jahr.





## Kapitel 4

# Bildzuordnungsverfahren

In diesem Kapitel werden die verwendeten Bildzuordnungsverfahren näher erläutert. Hierzu gehören der optische Fluss mit seiner lokalen und globalen Methode (Kapitel 4.1), der Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker (Kapitel 4.2), die Kreuzkorrelation (Kapitel 4.3) und die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Kapitel 4.4). Besonderer Bedeutung gelten dem lokalen optischen Fluss, der Kreuzkorrelation sowie dem Least Squares Matching (LSM), da ausschließlich diese Verfahren zur Auswertung der Bildsequenzen des Gletschers Jakobshavn Isbræ Anwendung finden. Der optische Fluss und die Kreuzkorrelation werden zur Bestimmung von Näherungswerten für die Kleinste-Quadrate-Anpassung genutzt, wobei diese jedoch auch allein akzeptable Ergebnisse liefern.

### 4.1 Optischer Fluss

#### 4.1.1 Grundlagen des optischen Flusses

Im Folgenden werden zunächst die Begriffe „Bewegungsfeld“ und „Optischer Fluss“ erläutert. Dies dient dem Verständnis der verschiedenen Algorithmen des optischen Flusses.

Das Bewegungsfeld eines Bildes ist die Projektion der dreidimensionalen physikalischen Bewegungen im Objektraum durch die Optik des Sensors auf die Bildebene. Dementsprechend wird jedem Bildelement ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet. Die Gesamtheit dieser Geschwindigkeitsvektoren bildet das 2D-Bewegungsfeld.

Ziel dieser Bildzuordnung ist es, das Bewegungsfeld aus der Bildsequenz zu extrahieren. Diese Größe kann jedoch, solange nicht bekannt ist, wie sich die Bildpunkte bewegen, nicht direkt beobachtet werden. Um dennoch kinematische Vorgänge erfassen zu können, wird der optische Fluss (engl.: optical flow), eine Approximation des 2D-Bewegungsfeldes, eingeführt. In Analogie zur Hydrodynamik werden Grauwerte als eine strömende Flüssigkeit behandelt und „fließen“, äquivalent zum Fließen von Volumenelementen in Flüssigkeiten, über die Bildebene. Als optischer Fluss wird der „Grauwertefluss“, also die sichtbare Bewegung, in der Bildebene verstanden (Abbildung 4-1).

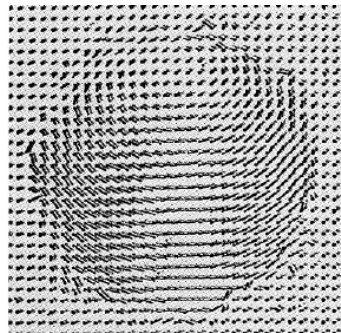


Abbildung 4-1: Optischer Fluss einer rotierenden Kugel (BALLARD/BROWN, 1982)

Er entsteht durch die relative Bewegung von Objekten und Beobachter zueinander, besitzt die Dimension der Geschwindigkeit und entspricht einer Projektion des Bewegungsfeldes. Der optische Fluss liefert also wichtige Informationen über die räumliche Anordnung von Objekten und die Größe der Veränderungen dieser Anordnungen und geht als Beobachtung in die unter Kapitel 4.1.2 aufgeführten Berechnungen ein.

In Kapitel 2.1.1.1 werden die Beziehungen zwischen Bild- und Objektbewegung beschrieben. Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass sich eine Bewegung in der Praxis nicht zwangsläufig äquivalent zu den Grauwertänderungen in der Bildebene verhält. Die Beziehungen zwischen dem optischen Fluss in der Bildebene und den Geschwindigkeiten von Objekten im Objektraum sind nicht klar ersichtlich. Das Flussfeld ist genau dann gleich dem Bewegungsfeld, wenn die Objekte während ihrer Bewegung in der Szene nicht die Beleuchtung in der Bildebene verändern, was lediglich in wenigen Fällen vorkommt. Der optische Fluss ist demzufolge eine Scheinbewegung in einer Bildsequenz. Diese entsteht aus der zeitlichen Änderung von Intensitätsmustern. Für praktische Anwendungen wird allerdings angenommen, dass sich der beobachtete optische Fluss nur in geringer Größenordnung vom Bewegungsfeld unterscheidet und somit alle zeitlichen Intensitätsänderungen ausschließlich durch die Objektbewegung hervorgerufen werden.

Für zwei Bilder erscheint der optische Fluss als Verschiebungsvektor und repräsentiert die Verschiebung von jedem Pixel des Bildes  $g_n$  zum Zeitpunkt  $t$  zu dem im Zeitabstand  $\Delta t$  folgenden Bild  $g_{n+1}$ . Klassisch entstammen diese gleich großen Graustufenbilder einer Bildfolge der Form  $g_n = g_n(x, y, t)$  mit  $n = 1 \dots N$  zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t + \Delta t$ . Hierbei stellen  $(x, y)$  die Pixelkoordinaten zum Zeitpunkt  $t$  dar. Die Intensitätsfunktion  $g(x, y, t)$  liefert den entsprechenden Grauwert des Bildelements.

Ziel der Schätzung ist es nun, den korrespondierenden Bildpunkt  $\underline{x}' = [x', y']^T$  zu einem im ersten Bild gelegenen Punkt mit der Position  $\underline{x} = [x, y]^T$  im zweiten Bild zu detektieren. Der optische Fluss ist also definiert durch die Verschiebungsvektoren  $\underline{v} = [v_x, v_y]^T$ , welche für Bildpaare die zu einander korrespondierenden Punkte aufeinander abbilden (Abbildung 4-2).

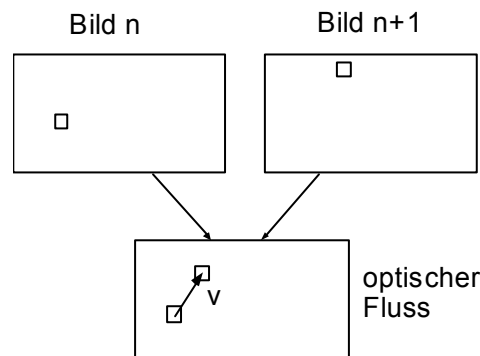


Abbildung 4-2: Einfache schematische Darstellung des optischen Flusses (WESTFELD, 2004)

Die Berechnung des optischen Flusses lässt sich im Wesentlichen auf die folgenden zwei Prozeduren, welche in den weiteren Kapiteln mathematisch hergeleitet werden, reduzieren:

- Die Bestimmung der zweidimensionalen räumlichen und zeitlichen Intensitätsableitungen (Grauwertgradienten). In der Regel werden diese durch die iterative Verwendung von Tief- und Hochpassfiltern berechnet.
- Die Integration der Normalkomponente des optischen Flusses in einen vollständigen Verschiebungsvektor durch die Kleinste-Quadrate-Anpassung (lokale Methode) oder über globale Regularisierung (globale Methode).

Es wird, wie oben bereits beschrieben, ein konstantes Helligkeitsprofil (die Intensität  $g(x, y, t)$  eines Pixels bleibt während  $\Delta t$  unverändert, also invariant gegenüber der Zeit) angenommen. Dieses Helligkeitsprofil soll sich mit einem konstanten Geschwindigkeitsvektor und kleinen Verschiebungen über die Bildebene bewegen.

Zur weiteren Vertiefung der Begriffsdefinitionen sei für das „Bewegungsfeld“ auf (STROPPE, 1974; JÄHNE, 2002) und für den „Optischen Fluss“ auf (LAPLANTE/STOYENKO, 1996; PAPADEMETRIS/BELHUMEUR, 1996; DAVIES, 1997; GIROD et al., 2000; WAGNER, 2001) verwiesen.

### 4.1.2 Die 2D-Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses

Bewegt sich ein Bildelement  $g(x, y, t)$  in einer Zeit  $t$  um  $\Delta x$  und  $\Delta y$  zu einer neuen Position  $g(x', y', t')$ , gilt

$$g(x, y, t) = g(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t), \quad (4.1)$$

mit  $g(x, y, t)$  als Funktion der Intensitätsverteilung eines Bildes am Punkt  $(x, y)$  zur Zeit  $t$ , den Verschiebungen

$$\begin{aligned} \Delta x &= v_x(x, y) \cdot \Delta t \\ \Delta y &= v_y(x, y) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (4.2)$$

sowie dem Geschwindigkeitsvektorfeld (optischer Fluss)

$$\underline{v}(x, y) = \begin{bmatrix} \Delta x / \Delta t \\ \Delta y / \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Die Bewegung wird somit durch eine kontinuierliche Variation von Intensitäten in Abhängigkeit von Position und Zeit modelliert, wobei die Annahme aus (4.1) für eine erste Annäherung, unter der Voraussetzung kleiner Translationen und einem geringen zeitlichen Unterschied, wahr ist. Die Entwicklung der Gleichung (4.1) mittels Taylorreihe um  $g(x, y, t)$  führt zu

$$g(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = g(x, y, t) + \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy + \frac{\partial g}{\partial t} dt + H.O.T. \quad (4.4)$$

Die Glieder quadratischer und höherer Ordnung (H.O.T.) werden bei der Reihenentwicklung in der Regel vernachlässigt. Durch Gleichsetzen der Gleichungen (4.1) und (4.4) ergibt sich

$$\frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy + \frac{\partial g}{\partial t} dt = 0, \quad (4.5a)$$

bzw.

$$\frac{\partial g}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial g}{\partial t} \underbrace{\frac{dt}{dt}}_{=1} = 0. \quad (4.5b)$$

Die räumlichen und zeitlichen Ableitungen der Intensität  $\left(\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}, \frac{\partial g}{\partial t}\right)$  sind messbare Größen und werden im Folgenden vereinfacht mit

$$g_x = \frac{\partial g}{\partial x}, \quad g_y = \frac{\partial g}{\partial y}, \quad g_t = \frac{\partial g}{\partial t}$$

bezeichnet. Die zwei unbekanntenen Geschwindigkeitsvektoren  $v_x$  und  $v_y$  treten in Gleichung (4.5b) in der Form

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}$$

auf.

Schließlich ergibt sich die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (engl.: optical flow constraint equation, OFCE), auch als Helligkeitskonstanzgleichung (engl.: brightness constancy constraint equation, BCCE) bezeichnet, zu

$$g_x v_x + g_y v_y + g_t = 0 \quad (4.6a)$$

bzw.

$$\underline{v} \nabla g + g_t \equiv 0 \quad (4.6b)$$

mit

$$\nabla g = \left[ \frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y} \right]^T$$

als Bildgradienten im Bildpunkt.

Das in Kapitel 2.1.1.2 erläuterte Blendenproblem bei der Bildzuordnung tritt auch bei der Schätzung des optischen Flusses auf. In Abbildung 4-3 ist nur die Bestimmung des senkrecht zur Kante verlaufenden Verschiebungsvektors möglich. Übertragen auf den optischen Fluss bedeutet dies:

$$\underline{v} \nabla g = \underline{v}_n |\nabla g| \quad (4.7)$$

Es kann folglich nur die Normalkomponente des Flusses  $\underline{v}_n$ , welche senkrecht zur lokalen Grauwertkante verläuft, ermittelt werden. Es ist nicht möglich, den kompletten Vektor über Ableitungen erster Ordnung an einem einzelnen Punkt zu berechnen. Aus (4.7) folgt:

$$\underline{v}_n = -\frac{\partial g}{\partial t} / |\nabla g|$$

Abbildung 4-4 veranschaulicht diese Thematik geometrisch und lässt erkennen, dass die Unbekannten  $v_x$  und  $v_y$  auf einer Geraden, der sogenannten „optical constraint line“, liegen müssen.

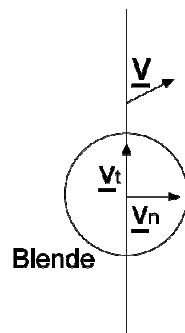


Abbildung 4-3: Blendenproblem  
(nach BARRON/THACKER, 2005):

Lediglich die Normalkomponente  $v_n$ , nicht aber der tangentielle Vektor  $v_t$ , kann bestimmt werden.

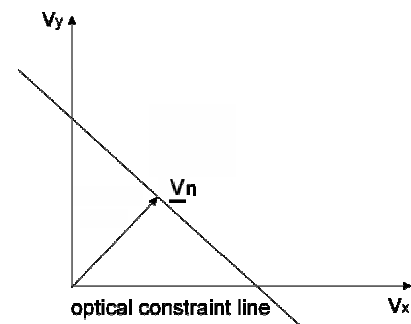


Abbildung 4-4: Geometrische Erklärung der Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (nach WU, 2002-2004):

Der optische Fluss für ein gegebenes Bildelement kann jeder Punkt der Geraden (optical constraint line) in der durch  $v_x$  und  $v_y$  aufgespannten Ebene sein.

Die Kontinuitätsgleichung (4.6) enthält  $n$  unbekannte Vektorkomponenten im  $n$ D-Raum. Bereits bei zwei Dimensionen ( $n = 2$ ) kann der optische Fluss  $\underline{v}(x, y) = [v_x, v_y]^T$  nicht eindeutig geschätzt werden, da für jedes Pixel nur eine OFCE vorliegt. Es handelt sich hierbei um ein klassisch unterbestimmtes Problem, welches zur Lösung der Aufgabe zusätzliche Beziehungen benötigt. Solche Bedingungen sind zum Beispiel eine gleichförmige Beleuchtung, eine Lambert'sche Objektoberfläche bzw. eine reine Translation parallel zur Bildebene. In der Praxis sind diese Bedingungen niemals vollständig realisierbar. Anstelle dessen wird unterstellt, dass die Bedingungen lokal in der Szene, also auch lokal in der Bildebene, erfüllt werden.

### 4.1.3 Methoden des optischen Flusses

Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichsten Algorithmen, um den optischen Fluss zu berechnen. Eine mögliche Kategorisierung nach (BARRON et al., 1994) ist folgende: Differentielle Methoden erster Ordnung, frequenzbasierte Methoden, phasenbasierte Methoden und flächenbasierte Ansätze. Basierend auf der oben genannten Kategorisierung, wurden in den letzten 20 Jahren zahlreiche arbeitsfähige Verfahren präsentiert. Die meisten bauen auf der differentiellen Methode auf.

Gradientenbasierte Verfahren bilden so den klassischen Ansatz für die Bestimmung von Bewegungen in zwei aufeinander folgenden Bildern. Die differentielle Form der Kontinuitätsgleichung

$$\nabla g(x, y, t) \cdot (v_x, v_y, 0) + g_t(x, y, t) = 0 \quad (4.8)$$

soll gelöst und so die Bildgeschwindigkeit über räumliche und zeitliche Ableitungen der Intensität berechnet werden. Hierfür wird die Bildebene als kontinuierlich (differenzierbar) angesehen.

Im Folgenden werden zwei Näherungsverfahren (global und lokal) für die Berechnung des optischen Flusses beschrieben. Globale Verfahren basieren, ebenso wie die lokalen Methoden, auf (4.8). Es wird als zusätzliche Bedingung eine globale Glättungsbedingung eingeführt. Bei lokalen Verfahren wird die Annahme getroffen, dass der optische Fluss von Nachbarn Punkten etwa gleich ist. Die Idee besteht darin, mehrere Punkte in einer kleinen Umgebung zu betrachten, welche sich mit der gleichen Geschwindigkeit  $\underline{v}$  bewegen.

### 4.1.3.1 Lokale Methoden

Das in der Praxis verbreitetste lokale Modell der Geschwindigkeitsschätzung entwickelten (LUCAS/KANADE, 1981). Anstelle eines einzigen Punktes wird die Nachbarschaft des Centerpixels verwendet und angenommen, dass der optische Fluss in dieser konstant ist. Den zwei unbekanntem Geschwindigkeitsvektoren im Center stehen die Kontinuitätsgleichungen der Nachbarschaft gegenüber. Damit ist das Gleichungssystem überbestimmt. Dementsprechend ist auch hier keine exakte Bestimmung des Flusses möglich, da die Nachbarschaft in die Berechnung mit einbezogen wird. Das Blockdiagramm dieses lokalen Verfahrens ist in Abbildung 4-5 zu sehen. Jeder Bildausschnitt wird zunächst durch einen räumlich-zeitlichen Filter geglättet, um Alias-Effekte und systematische Fehler in der Gradientenberechnung zu kompensieren. Die räumlichen und zeitlichen Gradienten werden, wie oben bereits angeführt, durch lokale Filteroperatoren bestimmt.

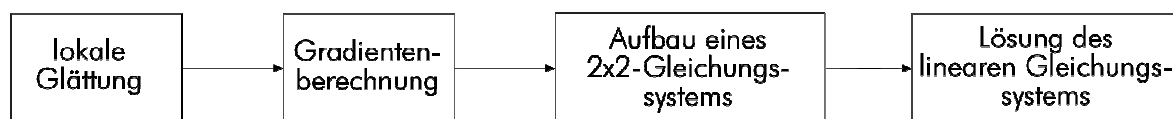


Abbildung 4-5: Blockdiagramm zur Berechnung des lokalen optischen Flusses (nach BARRON/THACKER, 2005)

(LUCAS/KANADE, 1981) verwenden eine gewichtete Methode der kleinsten Quadrate (MKQ). Dabei wird die Geschwindigkeitsapproximation für jedes Pixel unter Minimierung von

$$\sum_{\underline{x} \in \Omega} W^2(\underline{x}) [\underline{v} \nabla g(\underline{x}, t) + g_t(\underline{x}, t)]^2 \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \Omega : \text{ Räumliche Nachbarschaft} \\ W(\underline{x}) : \text{ Fensterfunktion bezüglich der} \\ \text{ Nachbarschaft } \Omega \text{ des zu} \\ \text{ betrachtenden Pixels} \end{array} \quad (4.9)$$

berechnet. Die MKQ soll also die Kontinuitätsgleichung innerhalb einer lokalen Nachbarschaft minimieren. Die Fensterfunktion  $W(\underline{x})$  besteht in der Regel aus den Koeffizienten eines zweidimensionalen Gauß-Filters. Dadurch wird der Einfluss des Centerpixels im Vergleich zu der Nachbarschaft erhöht.

Die Reduzierung zu einer geschlossenen Lösung ergibt über

$$\underline{A}^T \underline{W}^2 \underline{A} \underline{v} = \underline{A}^T \underline{W}^2 \underline{b} \quad (4.10a)$$

bzw.

$$\begin{bmatrix} \sum W^2 g_x^2 & \sum W^2 g_x g_y \\ \sum W^2 g_x g_y & \sum W^2 g_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum W^2 g_x g_t \\ \sum W^2 g_y g_t \end{bmatrix} \quad (4.10b)$$

die Schätzung des Flusses:

$$\underline{v} = \left[ \underline{A}^T \underline{W}^2 \underline{A} \right]^{-1} \underline{A}^T \underline{W}^2 \underline{b} \quad \text{mit} \quad \underline{A} = \begin{bmatrix} \partial g_1 / \partial x_1 & \partial g_1 / \partial y_1 \\ \vdots & \vdots \\ \partial g_n / \partial x_n & \partial g_n / \partial y_n \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\underline{W} = \text{diag} \left[ W(\underline{x}_1), \dots, W(\underline{x}_n) \right]$$

$$\underline{b} = - \left[ \partial g_1 / \partial t, \dots, \partial g_n / \partial t \right]^T$$



Das Gleichungssystem (4.11) ist jedoch nur lösbar, wenn  $\underline{A}^T \underline{A}$  invertierbar ist. Des Weiteren steht die Zuverlässigkeit der Schätzung von  $\underline{v}$  in Verbindung mit den Eigenwerten  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  (Annahme:  $\lambda_1 \leq \lambda_2$ ) der Matrix

$$\underline{A}^T \underline{W}^2 \underline{A} = \begin{bmatrix} \sum W^2 g_x^2 & \sum W^2 g_x g_y \\ \sum W^2 g_x g_y & \sum W^2 g_y^2 \end{bmatrix}.$$

Solange beide Eigenwerte groß sind, kann der optische Fluss bestimmt werden. Wenn  $\lambda_1 \gg \lambda_2$ , ist lediglich die Bestimmung des normalen Flusses möglich. Tritt  $\lambda_2 = 0$  auf, ist eine Berechnung nicht möglich.

Um auch für größere Verschiebungen ein arbeitsfähiges Verfahren sicherzustellen, muss der Algorithmus mehrmals iterativ durchlaufen werden. Bei jeder Iteration erhält man einen Verbesserungswert. Dieser wird zu dem aktuellen Schätzwert addiert und der Algorithmus mit der neuen Näherung wiederholt. Das Abbruchkriterium in dem im Rahmen dieser Arbeit erstellten Programm „2-DMA“ wird entweder durch eine festgelegte maximale Iterationsanzahl oder die Unterschreitung eines zuvor definierten Schwellwertes für die Korrektur bestimmt.

#### 4.1.3.2 Globale Methoden

Eines der bedeutendsten globalen Verfahren wurde von (HORN/SCHUNCK, 1981) aufgestellt. Hier wird die gradientenbasierte Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (4.6b) mit einem zusätzlichen Term, welcher die globale Glättung bedingt, kombiniert und dementsprechend eine langsame Variation des Strömungsfeldes unterstellt. Die sogenannte „Smoothness Constraint“ stellt die im Kapitel 4.1.2 geforderte zweite Gleichung zur Lösung des unterbestimmten Gleichungssystems dar und bewirkt, dass alle Bewegungen weich und gleichmäßig verlaufen. Die Grauwerte sind somit differenzierbar. In dieser Kombination entsteht ein Funktional. Dieses wird über den Bildbereich minimiert, um so das Geschwindigkeitsfeld, bestehend aus  $v_x(x, y, t)$  und  $v_y(x, y, t)$ , abschätzen zu können:

$$\iint_W \left( (\underline{v} \nabla g + g_t)^2 + \lambda^2 \left( \|\nabla v_x\|_2^2 + \|\nabla v_y\|_2^2 \right) \right) dx dy \quad (4.12)$$

Hierbei charakterisiert  $W$  den Bildbereich und der Parameter  $\lambda$  die Auswirkung des Glättungsterms (je größer  $\lambda$ , desto glatter das Flussfeld).

Zu Gleichung (4.12) sei noch angemerkt, dass an Stellen mit  $|\nabla g| \approx 0$  kein zuverlässiger Fluss berechnet werden kann. Über den Glättungsterm erhält man allerdings Informationen aus der Nachbarschaft des zu betrachtenden Pixels (engl.: filling-in effect). Das führt zu einem dichten Flussfeld und macht zusätzliche Informationen überflüssig.

Um (4.12) zu minimieren und so eine Approximation des Flusses zu erhalten, wird folgendes Paar rekursiver Gleichungen (Euler-Lagrange Gleichungen) aufgestellt. Die sich ergebende iterative Verbesserung des Verschiebungsvektors lautet dann:

$$v_x^{k+1} = \bar{v}_x^k - \frac{g_x (g_x \bar{v}_x^k + g_y \bar{v}_y^k + g_t)}{\alpha^2 + g_x^2 + g_y^2} \quad v_y^{k+1} = \bar{v}_y^k - \frac{g_y (g_x \bar{v}_x^k + g_y \bar{v}_y^k + g_t)}{\alpha^2 + g_x^2 + g_y^2} \quad (4.13)$$

mit  $k$  : Iterationsstelle  
 $v_k^0 (v_x^0, v_y^0)$  : Anfangsgeschwindigkeit gleich Null  
 $v_x, v_y$  : Lokales Mittel von  $v_x^k, v_y^k$   
 $\alpha^2$  : Gewichtungsfaktor

Die lokalen Mittelwerte  $\bar{v}_x^k$  und  $\bar{v}_y^k$  in der Gleichung (4.13) können zum Beispiel über einen Laplace-Filter ermittelt werden. Eine, zumindest lokal, einheitliche Beleuchtung in  $W$ , eine orthogonale Projektion sowie eine reine Translation parallel zur Szene beschreiben die zu erfüllenden Bedingungen, welche für die BCCE ( $dg/dt = 0$ ) getroffen werden müssen.

Da in der vorliegenden Arbeit die lokale Methode des optischen Flusses nach (LUCAS/KANADE, 1981) Anwendung zur Bildraumauswertung findet, wird auf die ausführlichere Erläuterung der globalen Verfahren in (HORN/SCHUNCK, 1981) verwiesen.

#### 4.1.3.3 Vergleich von lokalen und globalen Methoden

(BARRON et al., 1994) beobachteten, dass globale Methoden, im Vergleich zu lokalen Prozeduren, rauschanfälliger sind. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten liegt darin, dass Rauschen große Bildgradienten, welche in Gleichung (4.12) als Gewichte dienen, hervorruft. Das konstante Gewicht  $\lambda$  des Glättungsterms verursacht an Positionen mit großen Bildgradienten weniger glättende Wirkung als an anderen Stellen. In Konsequenz daraus sind Flussfelder an verrauschten Bildstrukturen weniger regularisiert. Diese Sensibilität ist der Nebeneffekt des begehrten filling-in effects. Eine Vergrößerung des Regularisierungsparameters  $\lambda$  würde letztendlich das optische Strömungsfeld in verrauschten Regionen glätten, allerdings auch die Eliminierung kleiner Details in flacheren Bildbereichen herbeiführen. Ein wesentlicher Vorteil der globalen Algorithmen ist, dass das gesamte Flussfeld bestimmt wird.

Lokale Ansätze sind bekannt für ihr robustes Verhalten gegenüber Rauschen. Sie unterstützen die Berechnung des optischen Flusses für wenige Bildpunkte. Dagegen bestimmen globale Techniken einhundert Prozent dichte Flussfelder und nehmen dementsprechend mehr Rechenleistung in Anspruch.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass jede Methode ihre Vorteile hat. Konsequenterweise wäre es wünschenswert, die verschiedenen Techniken von globalen und lokalen Methoden zu kombinieren. Dies wurde ansatzweise durch (BRUHN et al., 2002) realisiert. Hier wurden die verschiedenen Glättungstechniken dieser beiden differentiellen Methoden des optischen Flusses kombiniert. Sie entwickelten einen Prototyp mit dem Ziel, die hohe Robustheit der lokalen Methode mit der vollständigen Erfassung des Strömungsfeldes durch die globale Methode zu vereinen. Es wurden zwei hybride Ansätze (combined local-global (CLG) methods) vorgestellt. Diese beruhen auf einer räumlichen sowie räumlich-zeitlichen Glättungsstrategie.

Vor der vollständigen Implementierung in das Programm „2-DMA“ wurden die lokale und globale Methode auf ihre Eignung zur Auswertung der vorliegenden Bildsequenz des Jakobshavn Isbræ hin untersucht. Da eine schnelle und robuste Lösung zur Bestimmung der Näherungswerte für das Least Squares Matching favorisiert wird, kommt ein pyramidenbasierter Ansatz (vgl. Kapitel 2.1.3) nach (LUCAS/KANADE, 1981) zum Einsatz.

## 4.2 Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker

Die Verschiebung zwischen zwei Bildern kann mit dem von B. D. Lucas und T. Kanade entwickelten Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker (KLT-Tracker) geschätzt werden. Die Basis ist hierbei die die Bestimmung der translatorischen Affintransformationsparameter. Im Weiteren wird ein mathematischer Einblick in den Rechenalgorithmus gegeben. Für eine weiterführende Vertiefung der Thematik wird auf (LUCAS/KANADE, 1981; TOMASI/KANADE, 1991; SHI/TOMASI, 1994; BIRCHFIELD, 1996; BIRCHFIELD, 2005) verwiesen.

Ziel des KLT-Trackers ist die Bestimmung der Verschiebung  $\underline{\Delta x}$  der Patches zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern  $g_n$  und  $g_{n+1}$ . Das lokale Bildmodell hierfür lautet

$$g_n(\underline{x}) = g_{n+1}(\underline{x} + \underline{\Delta x}) + n(\underline{x}), \quad (4.14)$$

wobei  $\underline{x} = [x, y]^T$  den Vektor der Bildkoordinaten im Referenzbild darstellt und der Summand  $n(\underline{x})$  eventuell vorhandenes Bildrauschen berücksichtigt. Über die bekannte Minimierung der Quadrate der Grauwertunterschiede (engl.: sum of square differences, SSD) zwischen Muster- und Suchpatch, wird der Verschiebungsvektor  $\underline{\Delta x}$  nun so gewählt, dass das Residuum  $\varepsilon$  minimiert wird:

$$\varepsilon = \iint_W [g_{n+1}(\underline{x} + \underline{\Delta x}) - g_n(\underline{x})]^2 \omega(\underline{x}) d\underline{x} \quad (4.15)$$

Der Restbetrag  $\varepsilon$  in Gleichung (4.15) ist also durch ein Flächenintegral (jeweils ein Integral in x- und y-Richtung) über einen Bildausschnitt  $W$  definiert. Die Gewichtsfunktion  $\omega(\underline{x})$  in der Gleichung (4.14) wird im Allgemeinen gleich Eins gesetzt. Sie kann aber auch eine Gauß'sche Funktion annehmen, um den Einfluss des Centerpixels des Patches zu verstärken. Ebenso möglich ist die Abhängigkeit der Gewichtsfunktion  $\omega(\underline{x})$  von der Bildintensität (TOMASI/KANADE, 1991).

Ist die gesuchte Translation  $\underline{\Delta x}$  kleiner als die Patchgröße, kann das Residuum  $\varepsilon$  über eine Linearisierung von (4.14) minimiert werden. Zunächst wird die Gleichung (4.14) nach  $\underline{\Delta x}$  differenziert und das erhaltene Ergebnis gleich Null gesetzt:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \underline{\Delta x}} = 2 \iint_W [g_{n+1}(\underline{x} + \underline{\Delta x}) - g_n(\underline{x})] \frac{\partial g_{n+1}(\underline{x} + \underline{\Delta x})}{\partial \underline{\Delta x}} \omega(\underline{x}) d\underline{x} = 0 \quad (4.16)$$

Unter der Verwendung einer Taylorreihenentwicklung von  $g_{n+1}$  um den Bildpunkt  $\underline{x}$  und der Vernachlässigung von nichtlinearen Termen ergibt sich:

$$g_{n+1}(\underline{x} + \underline{\Delta x}) \approx g_{n+1}(\underline{x}) + \Delta x \frac{\partial g_{n+1}(\underline{x})}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial g_{n+1}(\underline{x})}{\partial y} \quad (4.17)$$

Das Einsetzen des Ergebnisses in (4.16) führt zu:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \underline{\Delta x}} = 2 \iint_W [g_{n+1}(\underline{x}) - g_n(\underline{x}) + g'(\underline{x})^T \underline{\Delta x}] g'(\underline{x}) \omega(\underline{x}) d\underline{x} = 0 \quad \text{mit} \quad g' = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{n+1}}{\partial x} \\ \frac{\partial g_{n+1}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Durch eine vereinfachte Schreibweise erhält man das zu lösende lineare  $2 \times 2$ -Gleichungssystem

$$\underline{A} \cdot \underline{\Delta x} = \underline{e} \quad (4.19)$$

mit der  $2 \times 2$ -Koeffizientenmatrix

$$\underline{A} = \iint_W g'(\underline{x}) g'(\underline{x})^T \omega(\underline{x}) d\underline{x} \quad (4.20)$$

sowie dem zweidimensionalen Vektor

$$\underline{e} = \iint_W [g_n(\underline{x}) - g_{n+1}(\underline{x})] g'(\underline{x}) \omega(\underline{x}) d\underline{x} . \quad (4.21)$$

Aufgrund der Linearisierung von (4.16) stellt (4.19) lediglich eine Näherung dar. Durch die anschließende Iteration von (4.19) mittels der als bekannt vorausgesetzten Newton-Raphson-Methode kann das Ergebnis sukzessiv verfeinert werden. Die Berechnung nach (4.19) ergibt im Allgemeinen keine ganzzahligen Werte für den Translationsvektor  $\underline{\Delta x}$ . Es ist demzufolge notwendig, die Intensitätswerte für die Pixelpositionen zwischen den Integerwerten zu berechnen (siehe Kapitel 2.1.2).

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass lediglich die zwei Translationen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  sowie das Bildrauschen modelliert werden. Des Weiteren werden auch bei diesem Verfahren zeitliche Beständigkeiten der Pixelintensitäten angenommen und daher keine radiometrischen Unterschiede der zwei aufeinander folgenden Bilder in die Berechnungen einbezogen. Der Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker entspricht somit einer vereinfachten Form der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadraten, welche im Kapitel 4.4 vorgestellt wird.

## 4.3 Kreuzkorrelation

### 4.3.1 Prinzip

Die Kreuzkorrelation hat, wie auch die anderen in dieser Arbeit vorgestellten Bildzuordnungsverfahren, ihren Ursprung in der Analyse der Verschiebung zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern und lokalisiert so korrespondierende Bildausschnitte. Dieses flächenbasierte Korrelationsverfahren bestimmt die Position der größten Ähnlichkeit eines Referenzmusters (Template, Korrelationspatch) in einem Suchbild (siehe Abbildung 4-6). Das Maß für die Ähnlichkeit zweier Muster (Korrelationsmaß) ist bei diesem Algorithmus der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho'$ . Ein Suchpatch wird sukzessiv mäanderförmig über das Suchbild geschoben (Abbildung 4-7), wobei die Größe des einbezogenen Bereiches in Abhängigkeit der Größenordnung der erwarteten Bewegung und der Bewegungsrichtung eingeschränkt werden kann.

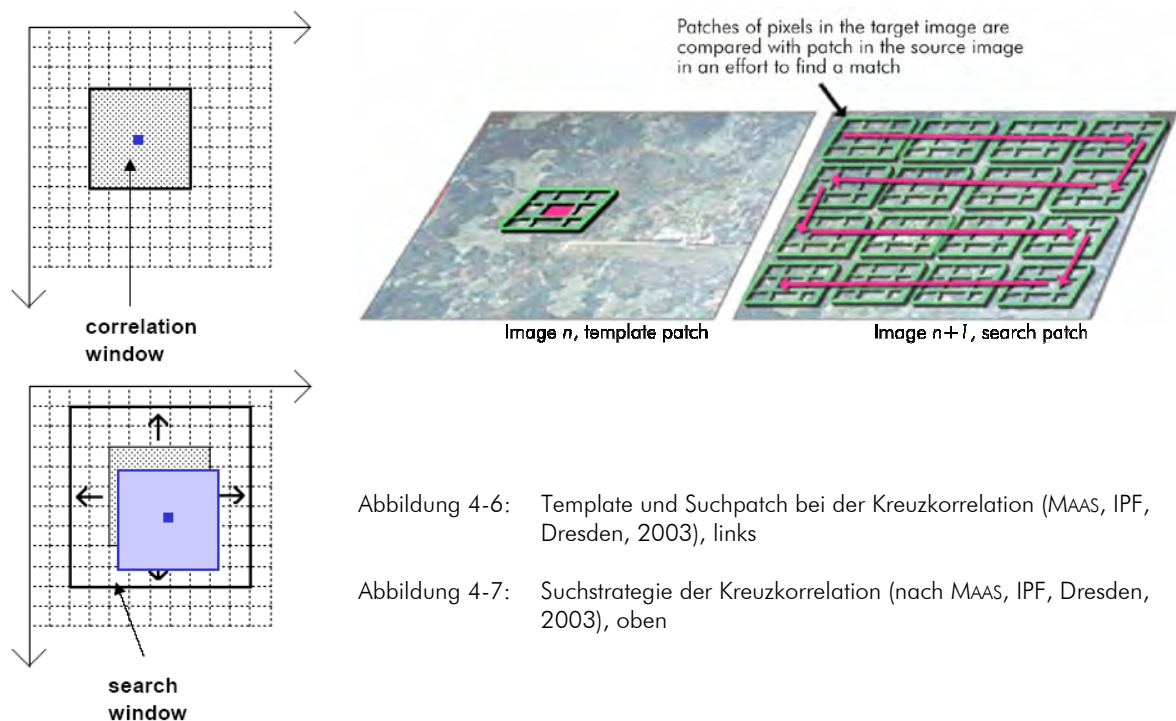


Abbildung 4-6: Template und Suchpatch bei der Kreuzkorrelation (MAAS, IPF, Dresden, 2003), links

Abbildung 4-7: Suchstrategie der Kreuzkorrelation (nach MAAS, IPF, Dresden, 2003), oben

Der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient wird an jeder Verschiebungsposition aus den Grauwerten des Suchfensters berechnet und mit den entsprechenden Bildkoordinaten gespeichert. Das Template der Größe  $R \times C$  sei bezeichnet als  $g_1$  mit seinen Grauwerten  $g_1(r, c)$  und dementsprechend das Suchfenster als  $g_2$ . Der (einfache) Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho(t_r, t_c)$  ist definiert über:

$$\rho(t_r, t_c) = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} g_1(r, c) \cdot g_2(r + t_r, c + t_c) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} t_r : \text{Relative Translation in } y \\ t_c : \text{Relative Translation in } x \\ R : \text{Anzahl der Bildzeilen} \\ C : \text{Anzahl der Bildspalten} \end{array} \quad (4.22)$$

Die Verwendung des einfachen Kreuzkorrelationskoeffizienten unterstellt allerdings, dass sich die Helligkeit und der Kontrast zwischen den Patches nicht verändert haben.

Diese Annahme ist in der Praxis in der Regel nicht erfüllt und erfordert die Einführung des normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten  $\rho'(t_r, t_c)$ :

$$\rho'(t_r, t_c) = \frac{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_1(r, c) - \bar{g}_1) \cdot (g_2(r + t_r, c + t_c) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_1(r, c) - \bar{g}_1)^2} \cdot \sqrt{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_2(r + t_r, c + t_c) - \bar{g}_2)^2}} \quad (4.23)$$

Hierbei stehen  $\bar{g}_1$  und  $\bar{g}_2$  für die arithmetisch aus allen Grauwerten der Patches berechneten Grauwertmittel:

$$\bar{g}_1 = \frac{1}{R \cdot C} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} g_1(r, c), \quad \bar{g}_2 = \frac{1}{R \cdot C} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} g_2(r + t_r, c + t_c)$$

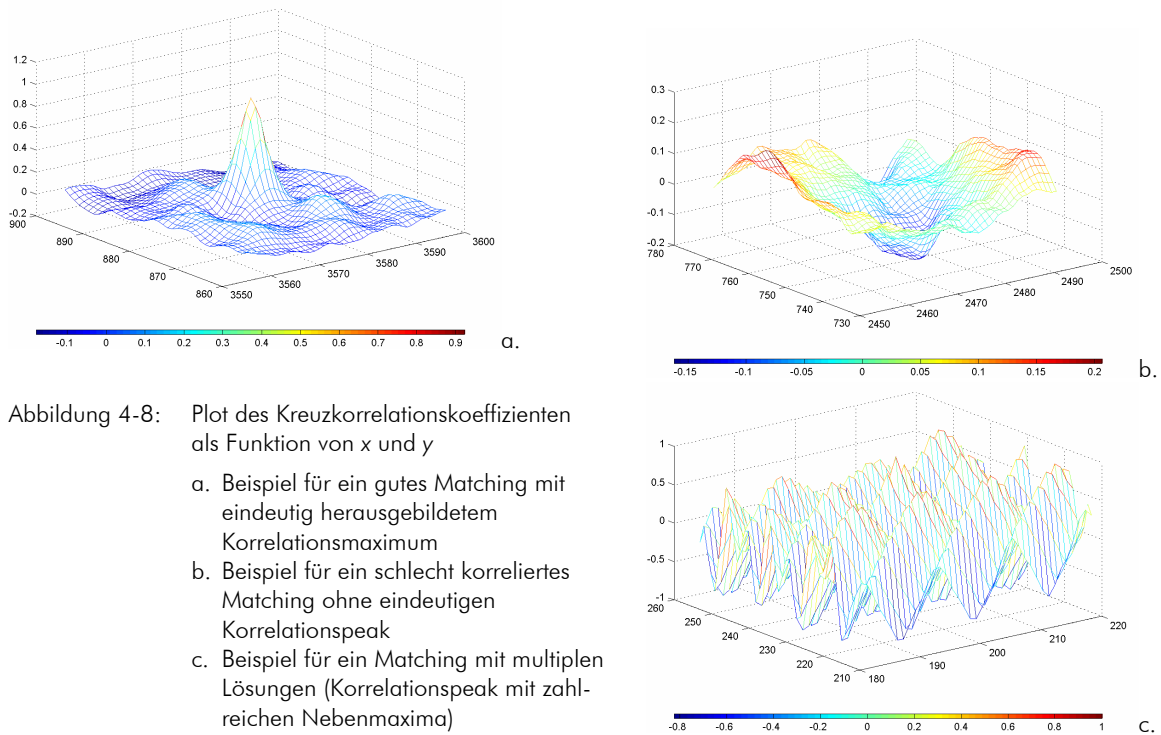
Der Zähler der Gleichung (4.23) wird durch Subtraktion des Grauwertmittels von alle Grauwerten innerhalb der Fenster, mit anschließender Aufsummierung, erhalten und entspricht somit der Kovarianz  $\sigma_{g_1 g_2}$  zwischen den Grauwerten der zwei Patches. Diese Zentrierung (Subtraktion des Mittelwertes) macht den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten bezüglich auftretender Helligkeitsunterschiede unempfindlich. Der Nenner ist das Produkt der Standardabweichungen  $\sigma_{g_1}$  und  $\sigma_{g_2}$  der Grauwerte des jeweiligen Patches, welcher die Kontrastunterschiede der Patches kompensiert. Es gilt:

$$\rho'(t_r, t_c) = \frac{\sigma_{g_1 g_2}}{\sigma_{g_1} \sigma_{g_2}} \quad (4.24)$$

mit

$$\begin{aligned} \sigma_{g_1 g_2} &= \frac{1}{R \cdot C - 1} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_1(r, c) - \bar{g}_1) \cdot (g_2(r + t_r, c + t_c) - \bar{g}_2) \\ \sigma_{g_1} &= \sqrt{\frac{1}{R \cdot C - 1} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_1(r, c) - \bar{g}_1)^2} \\ \sigma_{g_2} &= \sqrt{\frac{1}{R \cdot C - 1} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_2(r + t_r, c + t_c) - \bar{g}_2)^2} \end{aligned}$$

Der Wertebereich des normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten erstreckt sich von  $-1$  bis  $1$ . Ein Korrelationswert von Null lässt auf keinerlei Beziehungen zwischen den Grauwerten der Patches schließen, wohingegen identische Patches den Wert  $1$  aufweisen. Eine Bildzuordnung zwischen einem Positiv und einem Negativ würde zu einem Ähnlichkeitsmaß von  $-1$  führen. In der Praxis bewegen sich die Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen  $0,6$  und  $1,0$  (Abbildung 4-8a). Zahlenwerte unterhalb dieser Größenordnungen lassen auf ein falsches Matching schließen (Abbildung 4-8b). Bei starkem Bildrauschen oder Verdeckungen kann jedoch auch eine korrekte Zuordnung geringe Ähnlichkeitsmaße hervorrufen. Im umgekehrten Fall bewirken zum Beispiel multiple Lösungen ebenfalls ausgeprägte Kreuzkorrelationskoeffizienten. Es entstehen in der Nachbarschaft des eigentlich gesuchten Korrelationspeaks weitere Nebenmaxima mit unter Umständen gleichen Korrelationskoeffizienten (siehe Abbildung 4-8c).



Als Ergebnis des Matching erhält man eine Matrix von Kreuzkorrelationskoeffizienten (Abbildung 4-9). Werden diese Werte als Funktion von  $x$  und  $y$  aufgetragen, ist die Stelle der maximalen Korrelation mit hoher Wahrscheinlichkeit die Position des Referenzmusters im Suchbild.

$$\underline{\rho} = \begin{bmatrix} 0,140 & 0,208 & 0,282 & 0,324 & 0,316 & 0,258 & 0,183 \\ 0,219 & 0,361 & 0,504 & 0,579 & 0,532 & 0,411 & 0,273 \\ 0,301 & 0,515 & 0,742 & 0,859 & 0,745 & 0,520 & 0,312 \\ 0,351 & 0,575 & 0,815 & \mathbf{0,922} & 0,786 & 0,514 & 0,277 \\ 0,335 & 0,502 & 0,654 & 0,706 & 0,593 & 0,389 & 0,198 \\ 0,254 & 0,349 & 0,419 & 0,429 & 0,355 & 0,234 & 0,116 \\ 0,159 & 0,204 & 0,228 & 0,221 & 0,177 & 0,113 & 0,053 \end{bmatrix}$$

Abbildung 4-9: Ausschnitt einer Kreuzkorrelationskoeffizientenmatrix:

Rot hervorgehoben ist der Korrelationspeak. Der zugehörige Plot ist in Abbildung 4-8a dargestellt.

Die Kreuzkorrelation ist ein robustes Verfahren, welches sich besonders durch die Kompensation radiometrischer Unterschiede zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden Bildern auszeichnet. Ein weiterer Vorteil ist die in der Regel einfache Implementierung des oben beschriebenen Algorithmus in ein Computerprogramm. Die erreichbare Bildmessgenauigkeit liegt bei 0,1 Pixel (BALSAVIAS, 1999).

Die wichtigsten Probleme der Kreuzkorrelation sind der hohe Rechenaufwand, die Nichtberücksichtigung geometrischer Verzerrungen sowie die korrekte Bildzuordnung bei vorhandenen Nebenmaxima. Der Rechenaufwand erhöht sich, sobald keine Prädiktionen der zu erwartenden Bewegung vorliegen und folglich für jedes Pixel (und seiner Nachbarschaft) des gesamten Bildes der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient bestimmt werden muss. Da lediglich die Translation,

nicht aber der Maßstab, die Rotation sowie andere Verzerrungen modelliert wird, führen die Berechnungen zu einem geringen Ähnlichkeitsmaß und eventuell falschem Ergebnis. Die bereits oben genannten Nebenmaxima (vgl. Abbildung 4-8c) werden durch eine sehr hochfrequente Textur verursacht. Es kommt zu mehreren hohen normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten innerhalb der Korrelationsmatrix, welche die Qualität und Zuverlässigkeit des Matchingprozesses vermindern. Ebenso ist nicht immer eindeutig bestimmbar, ob der numerisch größte Kreuzkorrelationskoeffizient auch wirklich der wahren Lösung entspricht und nicht eines seiner Nebenmaxima für die Lösung in Frage kommt. Die Differenz  $d$  und der Abstand  $l$  aus Abbildung (4-10) können hierfür zur Beurteilung der Matchingqualität zusätzlich herangezogen werden.

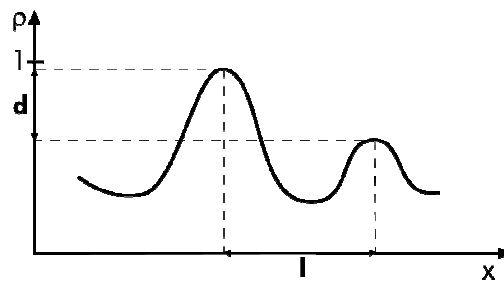


Abbildung 4-10: Differenz  $d$  und der Abstand  $l$  von anderen Nebenmaxima in der Nachbarschaft (nach BALTSAVIAS, 1999)

Weitere Erläuterungen für die Bildzuordnung nach der Methode der Kreuzkorrelation befinden sich in (NEVATIA, 1982; VERNON, 1991; BALTSAVIAS, 1999; ROTTENSTEINER, 2001; MCGLONE, 2004).

### 4.3.2 Subpixelberechnung

Im Anschluss an die Berechnung der Bildkoordinaten mit dem maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten kann um die Stelle des Maximums ein Paraboloid approximiert werden, um so die gesuchte Position im Subpixelbereich zu ermitteln. Abbildung 4-11 veranschaulicht dies zunächst für den eindimensionalen Fall.



Abbildung 4-11: Maximale Kreuzkorrelation mit Subpixelgenauigkeit (nach BALTSAVIAS, 1999)

Die Subpixelbestimmung ist notwendig, da die erhaltene Verschiebung aus Kapitel 4.3.1 im Integerbereich, also einer ganzzahligen Pixelkoordinate, liegt und somit nicht zwangsläufig die tatsächliche Stelle der maximalen Korrelation widerspiegeln muss. Die folgenden Ausführungen zeigen, wie die Einpassung einer Oberfläche zweiten Grades durch Stützpunkte um das Maximum mathematisch realisiert und somit die Subpixelgenauigkeit für das Ergebnis der Kreuzkorrelation erreicht wird.



Die Grundgleichung eines nach unten gewölbten elliptischen Paraboloides (vgl. Abbildung 4-12) lautet:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + z = 0 \quad (4.24)$$

Die Achse des Paraboloides, auf der die normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten abgetragen werden, ist die  $z$ -Achse. Des Weiteren entsprechen die  $x$ - und  $y$ -Werte aus Gleichung (4.24) den Bildkoordinaten des Suchbildes. Der Koordinatenursprung des digitalen Bildes wird zur Vereinfachung in das Korrelationsmaximum der Korrelationsmatrix gelegt. Ferner wird die Rotation des Paraboloides bewusst vernachlässigt, da bei der im Anschluss folgenden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (siehe Kapitel 2.2.1 und Kapitel 2.2.2) die Beobachtungsanzahl aus statistischer Sicht sehr gering ist und das Gleichungssystem zu instabil wäre.

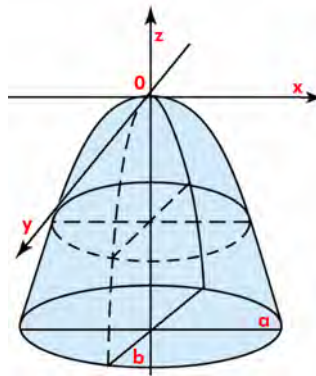


Abbildung 4-12: Ein nach unten gewölbtes Paraboloid mit seinem lokalen Koordinatensystem  
(nach url: [http://www.bartleby.com/, 2005])

Die Grundgleichung (4.24) wird nun um die eigentlich gesuchten Translationsparameter  $x_0$ ,  $y_0$  sowie  $z_0$  erweitert. Nach der Einpassung liegt das Maximum des Paraboloides um genau diesen Vektor versetzt gegenüber der ganzzahligen Position des Korrelationsmaximums. Im Anschluss erfolgt eine Substitution der für diesen Zweck nicht weiter relevanten ellipsoidischen Parameter  $a$  und  $b$ .

Es ist

$$A \cdot (x + x_0)^2 + B \cdot (y + y_0)^2 = -(z + z_0) \quad (4.25)$$

mit

$$A = \frac{1}{a^2} \quad \text{und} \quad B = \frac{1}{b^2}.$$

Die Beobachtungsgleichung lautet somit:

$$z = z_0 - A \cdot (x + x_0)^2 - B \cdot (y + y_0)^2 \quad (4.26)$$

Da die Beobachtungsgleichungen in quadratischer Form vorliegen, müssen diese vor der Ausgleichung einer Linearisierung nach Taylor unterzogen werden. Die partiellen Ableitungen der Gleichung (4.26) nach allen Unbekannten ergeben die folgenden Koeffizienten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial z}{\partial x_0} &= -2A \cdot (x + x_0) & \frac{\partial z}{\partial y_0} &= -2B \cdot (y + y_0) & \frac{\partial z}{\partial z_0} &= 1 \\ \frac{\partial z}{\partial A} &= -(x + x_0)^2 & \frac{\partial z}{\partial B} &= -(y + y_0)^2\end{aligned}$$

Diese Koeffizienten gehen in die Koeffizientenmatrix  $\underline{A}$  ein. Die nun folgenden Berechnungen entsprechen dem Formelapparat aus Kapitel 2.2.2 und sollen in diesem Abschnitt nicht weiter erläutert werden.

## 4.4 Least Squares Matching

### 4.4.1 Prinzip

Bei dem Verfahren der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (engl.: least squares matching, LSM) werden die Beziehungen zwischen den Grauwerten zweier Bilder innerhalb der Muster- und Suchmatrix als nichtlineare Verbesserungsgleichungen in einer vermittelnden Ausgleichung formuliert (ACKERMANN, 1984; GRUEN, 1985; LUHMANN, 2000; D'APUZZO, 2003). LSM ist ein flächenhaftes Korrelationsverfahren, um korrespondierende Bildelemente zwischen zwei zeitlich aufeinander folgenden Bildern einer Szene zu detektieren. Ziel ist es, die Parameter einer geometrischen und radiometrischen Transformation zu bestimmen. Als Ähnlichkeitsmaß gilt, äquivalent zu dem Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker (Kapitel 4-2), die Grauwertdifferenz. Das zu einem Template korrespondierende Grauwertmuster im Suchbild wird durch eine iterative Kleinste-Quadrate-Ausgleichung geschätzt. Die wahrscheinlichste Lösung ist diejenige, welche die Summe der Quadrate der Grauwertunterschiede der Patches  $g_n(x, y)$  und  $g_{n+1}(x', y')$  minimiert. Die Grauwerte der beiden Bildausschnitte gehen in die Ausgleichung als Beobachtungen ein. Werden systematische geometrische und radiometrische Einflüsse vernachlässigt, gilt für, bis auf einen kleinen Rauschanteil  $n(x, y)$ , identische Patches:

$$g_n(x, y) - n(x, y) = g_{n+1}(x, y) \quad (4.27)$$

Falls die geometrischen Relationen zwischen zwei Bildern komplexere Transformationen, wie zum Beispiel Maßstabsänderungen, Rotationen oder Scherungen, enthalten, reicht die Bestimmung der reinen Translation zwischen den Patches oft nicht aus, um die korrekte Position des Templates im Suchbild zu bestimmen. Bei genügend kleinen Bildausschnitten kann die geometrische Transformation durch eine ebene Affintransformation beschrieben werden. Diese beinhaltet sechs geometrische Parameter und wird in Kapitel 4.4.3 eingehend erläutert. Anstelle der Annahme über die Gleichheit der Grauwerte an der korrespondierenden Position nebst Nachbarschaft wird die Gleichung (4.27) mit den radiometrischen Parametern  $r_0$  (additiver Faktor; Helligkeit) und  $r_1$  (multiplikativer Faktor; Kontrast) linear erweitert. Es ergibt sich für jeden Grauwert  $g_n$  der Mustermatrix ein radiometrisch transformierter Grauwert  $g_{n+1}$ :

$$g_n(x, y) - n(x, y) = r_0 + r_1 \cdot g_{n+1}(x', y') \quad (4.28)$$

Die zwei Parameter dieser radiometrischen Anpassung werden entweder im Rahmen der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt oder vor der eigentlichen Ausgleichung bei jeder Iteration des Algorithmus bestimmt. Der Vorteil der zweiten Variante liegt darin, dass eine theoretisch vollkommene Unabhängigkeit der Bewegungsschätzung von radiometrischen Einflüssen erzielt wird. Da in dem vorliegenden Programm „2-DMA“ diese Variante Anwendung findet, werden in den folgenden zwei Kapiteln 4.4.2 und 4.4.3 die radiometrische und geometrische Transformation einzeln betrachtet.

LSM ist eines der genauesten Bildzuordnungsverfahren (ACKERMANN, 1984; MCGLONE, 2004) und kann in idealen Fällen Subpixelgenauigkeiten bis 0,01 Pixel erreichen. Des Weiteren ist die Ableitung von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaßen sowie statistischen Tests möglich. Aus photogrammetrischer Sicht sind insbesondere die Standardabweichungen der Verschiebungsparameter von großem Interesse. Hier liegt die erreichbare innere Genauigkeit für die Bestimmung der Translationsparameter bei ausreichender Überbestimmung zwischen 0,01 und 0,04 Pixel (LUHMANN, 2000). Generell ist diese theoretische Genauigkeit jedoch zu optimistisch. Die Berücksichtigung unmodellierter Fehler führt zu einer generell schlechteren empirischen Genauigkeit der Translationen und beläuft sich

- für kontrastreiche und flache Zielmarken auf 0,01-0,1 Pixel,

- für kontrastarme und flache Zielmarken auf 0,2-0,3 Pixel sowie
- für natürliche Punkte auf allgemeinen Oberflächen auf 0,5-1.5 Pixel (BALTSAVIAS, 1999).

Ein weiterer Vorteil liegt in der besseren Modellierung geometrischer Unterschiede.

Neben dem größeren Rechenaufwand im Vergleich zu anderen Verfahren ist die ausgleichsbedingte Notwendigkeit der Bestimmung hinreichend genauer Näherungswerte für die gesuchte Bildposition als nachteilig zu nennen.

Die Bereitstellung von Näherungen kann auf unterschiedliche Art und Weise geschehen (BALTSAVIAS, 1999):

- Bestimmung durch vorgegebene (berechnete) Bildkoordinaten
- Bestimmung durch manuelles Einstellen durch den Operateur interaktiv am Bildschirm
- Bestimmung durch Mustererkennungsmethoden im Rahmen der Bildvorverarbeitung (zum Beispiel durch die Suche nach codierten Zielmarken)
- Bestimmung durch einen Interestoperator

#### 4.4.2 Radiometrische Anpassung

Die Korrektur von Helligkeits- und Kontrastunterschieden zwischen zwei aufeinander folgenden Bildausschnitten ist für eine genaue Schätzung der Bewegung notwendig. Drei mögliche Funktionen zur Berechnung von radiometrisch korrigierten Grauwerten vor der MKQ werden im Folgenden näher vorgestellt.

##### (a) Korrektur um den Quotienten der Grauwertsummen

Es werden zunächst die Grauwerte innerhalb der zwei betrachteten Bildausschnitte aufsummiert:

$$g_n^\Sigma = \sum_{i=0}^{i=N-1} g_n(x, y, t) \quad \text{mit } N : \text{Anzahl der Pixel in einem Patch} \quad (4.29)$$

$$g_{n+1}^\Sigma = \sum_{i=0}^{i=N-1} g_{n+1}(x', y', t')$$

Eine Transformation der Grauwerte im Suchpatch erfolgt im Anschluss durch die Multiplikation der Ausgangswerte  $g_{n+1}(x', y', t')$  mit dem Quotienten  $\gamma$  der aufsummierten Mittelwerte. Es ergeben sich folgende neue Grauwerte des Suchpatches:

$$\hat{g}_{n+1}(x', y', t') = \begin{cases} g_{n+1}(x', y', t') \cdot \gamma & \text{für } \hat{g}_{n+1} \leq 255 \\ 255 & \text{für } \hat{g}_{n+1} > 255 \end{cases} \quad \text{mit } \gamma = \frac{g_n^\Sigma}{g_{n+1}^\Sigma} \quad (4.30)$$

### (b) Korrektur um den Offset der Mittelwerte sowie den Quotienten der Grauwertvarianzen

In einem ersten Schritt werden die einfachen arithmetischen Mittel der Grauwerte und anschließend die Differenzen dieser Mittelwerte berechnet:

$$\bar{g}_n = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{i=N-1} g_n(x, y, t) \quad (4.31)$$

$$\bar{g}_{n+1} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{i=N-1} g_{n+1}(x', y', t')$$

$$\Delta\bar{g} = \bar{g}_n - \bar{g}_{n+1} \quad (4.32)$$

Über die Varianzen der Grauwerte des Muster- und Suchpatches

$$\sigma_n = \sum_{i=0}^{i=N-1} |g_n(x, y, t) - \bar{g}_n| \quad (4.33)$$

$$\sigma_{n+1} = \sum_{i=0}^{i=N-1} |g_{n+1}(x', y', t') - \bar{g}_{n+1}|$$

sowie ihrem Quotienten

$$\gamma = \frac{\sigma_n}{\sigma_{n+1}} \quad (4.34)$$

ergeben sich die Korrekturen der Grauwerte im Suchpatch zu:

$$\hat{g}_{n+1}(x', y', t') = \begin{cases} \Delta\bar{g} + \bar{g}_{n+1} + (g_{n+1}(x', y', t') - \bar{g}_{n+1}) \cdot \gamma & \text{für } 0 \leq \hat{g}_{n+1} \leq 255 \\ 255 & \text{für } \hat{g}_{n+1} > 255 \\ 0 & \text{für } \hat{g}_{n+1} < 0 \end{cases}$$

### (c) Berechnung der Grauwertverbesserung in einer Ausgleichung

Bei dieser Methode wird die Verbesserung für jedes Pixel des Suchfensters in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Die Aufstellung der Normalgleichungsmatrix  $\underline{N}$  ergibt:

$$\underline{N} = \underline{A}^T \underline{P} \underline{A} = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=0}^{i=N-1} g_n(x, y, t) \\ \sum_{i=0}^{i=N-1} g_n(x, y, t) & \sum_{i=0}^{i=N-1} (g_n(x, y, t))^2 \end{bmatrix} \quad \text{mit } \underline{P} = \underline{E} \quad (4.35)$$

Der Absolutgliedvektor der Normalgleichungen  $\underline{n}$  lautet:

$$\underline{n} = \underline{A}^T \underline{P} \underline{l} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{i=N-1} (g_n(x, y, t) - g_{n+1}(x', y', t')) \\ \sum_{i=0}^{i=N-1} g_n(x, y, t) \cdot (g_n(x, y, t) - g_{n+1}(x', y', t')) \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Entsprechend dem Formelapparat aus Kapitel 2.2.2 berechnet sich der Lösungsvektor nach

$$\hat{x} = \underline{N}^{-1} \underline{n}, \quad (4.37)$$

wobei die erhaltene Kontrastverbesserung  $\hat{x}_{1,1}$  noch um den Summanden 1 erhöht wird. Die korrigierten Grauwerte berechnen sich nun über

$$\hat{g}_{n+1}(x', y', t') = \begin{cases} g_{n+1}(x', y', t') \cdot \hat{x}_{1,1} + \hat{x}_{0,0} & \text{für } 0 \leq \hat{g}_{n+1} \leq 255 \\ 255 & \text{für } \hat{g}_{n+1} > 255 \\ 0 & \text{für } \hat{g}_{n+1} < 0 \end{cases} \quad (4.38)$$

Das Element  $\hat{x}_{1,1}$  des Lösungsvektors stellt die Verbesserung für den Kontrast dar. Die Helligkeitsunterschiede zwischen Referenz- und Suchfenster werden in Gleichung (4.38) über  $\hat{x}_{0,0}$  berücksichtigt.

Die Ergebnisse der einzelnen Methoden der radiometrischen Transformation sind in Abbildung 4-14 dargestellt. Um die Auswirkungen sowie die Notwendigkeit der radiometrischen Anpassung zu verdeutlichen, wird als Referenzbild eine Tages- und als Suchbild eine Nachtaufnahme des Gletschers Jakobshavn Isbræ gewählt (vgl. Abbildung 4-13). Die Bestimmung der radiometrischen Parameter über eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Methode (c)) liefert zwar visuell ein homogen angepasstes Bild, allerdings ist die Ausprägung des Kontrastes für die anschließende Bildzuordnung nicht ausreichend und die Rechenzeit recht hoch. Es ist zu erkennen, dass die Anpassung der Grauwertmittel nach Methode (b) die deutlichsten Kontraste hervorbringt. Eine Transformation durch die Quotientenbildung der aufsummierten Mittelwerte (Methode (a)) ist im Vergleich zu Methode (b) ebenfalls weniger geeignet.

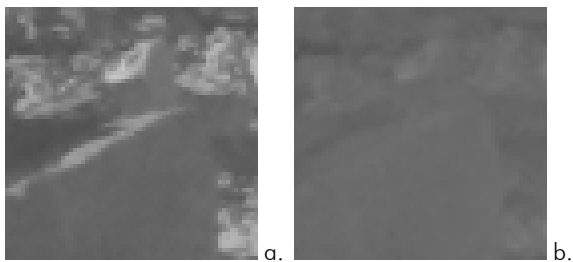


Abbildung 4-13: Referenzpatch a und Suchpatch b (61x61 Pixel), links

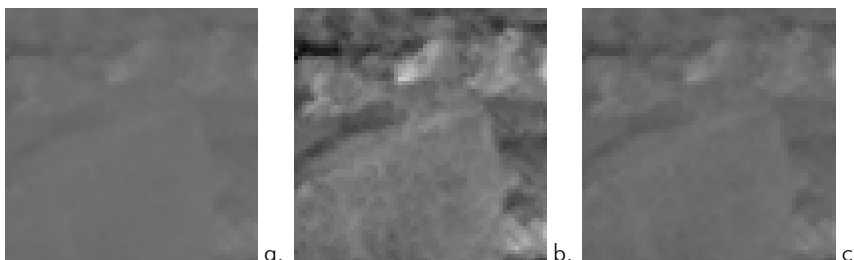


Abbildung 4-14: Visualisierung der Ergebnisse der radiometrischen Transformation, unten  
a. Mittelwert  
b. Offset und Mittelwert  
c. MKQ

### 4.4.3 Geometrische Transformation

Bei genügend kleinen Bildausschnitten kann die geometrische Transformation durch eine ebene Affintransformation beschrieben werden (vgl. Abbildung 4-15). Die sechs Parameter der affinen Abbildung erlauben die Berücksichtigung von relativen Translationen in x- und y-Richtung ( $a_0, b_0$ ), beliebigen Maßstäben in beiden Koordinatenrichtungen ( $a_1, b_2$ ) sowie den Dreh- und Scherungswinkeln zwischen den Koordinatenachsen ( $a_2, b_1$ ):

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y \quad y' = b_0 + b_1x + b_2y \quad (4.39)$$

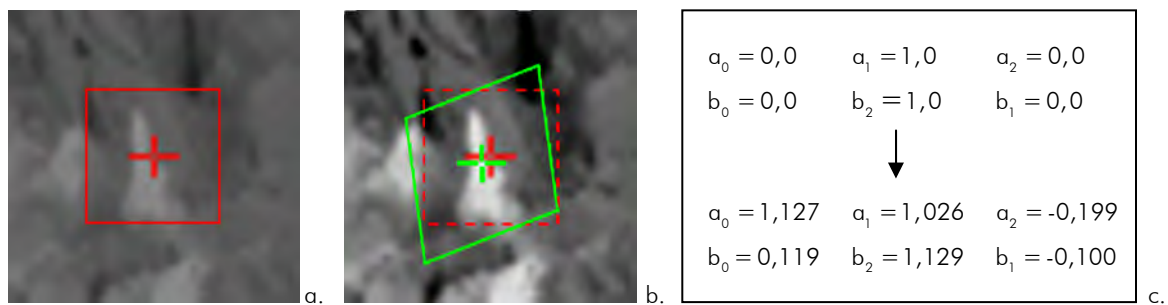


Abbildung 4-15: Visualisierung einer Punktmessung mit LSM (nach BALTSAVIAS, 1999)

- a. Referenzpatch
- b. ---: Patch um Näherungsposition  
---: Position nach Ende der Iterationen; das ursprüngliche Quadrat ist affin transformiert (unmaßstäblich)
- c. Näherungswerte der Affintransformationsparameter (oben) und die verbesserten Transformationsparameter (unten)

Aus (4.27) und (4.28) ergibt sich die Beobachtungsgleichung zu

$$\Delta g = r_0 + r_1 \cdot g_n - g_{n+1} \quad (4.40)$$

Wird die radiometrische Transformation im Voraus betrieben, sind  $r_0 = 0$  und  $r_1 = 1$  zu setzen. Die anschließende Linearisierung der Gleichung (4.40) nach Taylor, bedingt durch die Nichtlinearität der Bildfunktion  $g_n$ , führt zu:

$$\begin{aligned} g_n(x, y) - n(x, y) = & g_{n+1}^0(x, y) + (g_{n+1})_x da_0 + (g_{n+1})_x x da_1 + (g_{n+1})_x y da_2 \\ & + (g_{n+1})_y db_0 + (g_{n+1})_y x db_1 + (g_{n+1})_y y db_2 \\ & + r_0 + r_1 g_{n+1}^0(x, y) \end{aligned} \quad (4.41)$$

mit

$$(g_{n+1})_x = \frac{\partial g_{n+1}^0(x, y)}{\partial x} \quad \text{und} \quad (g_{n+1})_y = \frac{\partial g_{n+1}^0(x, y)}{\partial y}$$

als Grauwertgradienten, also den räumlichen Ableitungen der Intensitätsfunktion. Sie beschreiben folglich die lokale Änderung der Grauwerte in benachbarten Bildelementen.

Die geometrischen und radiometrischen Unbekannten werden im Rahmen der Ausgleichung im Gauß-Markov-Modell (GMM) nach folgendem Ansatz geschätzt:

$$\begin{aligned} \underline{v} &= \underline{A}\hat{x} - \underline{l} \\ \hat{x} &= (\underline{A}^T \underline{P}\underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{P}\underline{l} \\ \underline{P} &= \underline{E} \end{aligned} \tag{4.42}$$

In Gleichung (4.42) bezeichnet  $\underline{A}$  die Koeffizientenmatrix, gebildet aus den Grauwertgradienten und  $\underline{P}$  die Gewichtsmatrix (hier Einheitsmatrix, da gleichartige und gleich genaue Beobachtungen). Des Weiteren stellt  $\underline{l}$  den Beobachtungsvektor,  $\underline{v}$  den Vektor der Verbesserungen und  $\hat{x}$  den Lösungsvektor dar. Das Ausgleichungsmodell ist in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

Aufgrund der Linearisierung der Beobachtungsgleichung (4.40) wird das Gleichungssystem (4.42) iterativ gelöst. In jeder Iterationsstufe erhalten die Affintransformationsparameter Zuschläge, die in ihrer Größenordnung in der Regel mit zunehmender Iterationsanzahl kleiner werden. Wie jedes Bildzuordnungsverfahren mit Subpixelgenauigkeit ergeben die Lösungen in der Regel keine ganzzahligen Werte. Demzufolge müssen die Grauwerte nach jeder affinen Transformation, also nach jeder Iteration, interpoliert werden. Geeignete Interpolationsmethoden sind in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Die Iteration wird abgebrochen, sobald die Zuschläge einen vorab definierten Schwellwert unterschreiten oder die maximale Anzahl an Iterationen erreicht ist. Bedingung für die Konvergenz des Algorithmus ist, neben der Notwendigkeit von Textur mit Gradienten in beiden Bildrichtungen, die Bereitstellung genügend genauer Näherungswerte. Sie dürfen nicht weiter als die halbe Patchgröße von der wahren Lösung entfernt sein. In dem vorliegenden Programm „2-DMA“ können bei geringen Verschiebungen oder hoher Framerate die Koordinaten des Musterbildes in die Ausgleichung aufgenommen werden. Andernfalls sind die Lösungen aus Kapitel 4.1 bis 4.3 zu verwenden. Das Ausgleichungssystem ist in der Regel hoch redundant, da für die zu bestimmenden geometrischen und radiometrischen Parameter alle Grauwerte eines Bildausschnitts als Beobachtungen vorliegen (LUHMANN, 2000). Es konvergiert nach wenigen Iterationen.

Als Ergebnis erhält man alle Transformationsparameter inklusive deren Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_x$ , die a posteriori Standardabweichung der Ausgleichung  $\hat{\sigma}_0$  sowie die Signifikanz und die Korrelationen der Lösung. Die Genauigkeitsmaße für die ermittelten Unbekannten lassen sich entsprechend der Fehlerrechnung aus Kapitel 2.2.2 schätzen. Die empirische Standardabweichung  $\hat{\sigma}_0$  gibt einen Indikator über die mittlere Grauwertdifferenz, also das Rauschniveau, zwischen den Bildern an. Am Ende jeder Iteration wird in der Praxis oft der Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho$  (vgl. Kapitel 4.3.1) zwischen Template und Suchpatch berechnet und als zusätzliches Qualitätskriterium verwendet.

Des Weiteren kann auf die Bestimmung einzelner Parameter verzichtet werden. In der photogrammetrischen Bewegungsanalyse sind hauptsächlich die beiden Translationsparameter  $a_0$  und  $b_0$  von Interesse, welche die relative Verschiebung zwischen Muster- und Suchpatch angeben. Sollte die Affintransformation überparametrisiert sein, das heißt, die Parameter sind nicht signifikant schätzbar, muss auf die Bestimmung einzelner Parameter verzichtet werden. Ein Beispiel hierfür liefert (LUHMANN, 2000): Bei der Transformation eines Kreises (Referenzmuster) in eine gedrehte Ellipse (Zielmarke im Suchbild) kann die Drehung und Skalierung über einen Scherungswinkel und die unterschiedliche Skalierung in x- und y-Richtung erreicht werden. Dasselbe Ergebnis ist auch durch eine Gesamtdrehung und die Maßstabsfaktoren formulierbar. Um hohe Korrelationen zu vermeiden, sollte in dem genannten Fall auf eine 5-Parameter-Transformation ohne Scherung zurückgegriffen werden. Durch geeignete statistische Tests können nichtsignifikante Parameter mit hohen Korrelationskoeffizienten detektiert und in der nächsten Iterationsstufe ausgeschlossen werden (MAAS, 1997).

Die erreichbare innere Genauigkeit für die Bestimmung der Translationsparameter  $a_0$  und  $b_0$  liegt bei ausreichender Überbestimmung zwischen 0,01 und 0,04 Pixel (vgl. Kapitel 4.4.1). Des



Weiteren kann die Genauigkeit der Lösung nicht durch eine beliebige Vergrößerung der Patches gesteigert werden. Zwar wird die Aussicht auf Konvergenz zur richtigen Lösung erhöht und die Anzahl der eingehenden Beobachtungen vergrößert, allerdings ist so das Modell einer ebenen Affintransformation zwischen den Bildern nicht mehr ausreichend genau. Ein kleineres Fenster hingegen verringert die Rechenzeit und steigert die Genauigkeit. Dies verlangt jedoch auch genauere Näherungswerte, damit das Verfahren konvergieren kann. Eine ausführlichere Betrachtung des Einflusses der Patchgröße auf die Matchingqualität wird in Kapitel 7.2.1 vorgenommen. Ferner kann, insofern ein Mehrbedarf an Speicherplatz akzeptiert wird, der in Kapitel 2.1.3 beschriebene Pyramidenansatz angewandt werden.



## Kapitel 5

# Photogrammetrische Auswertungen im Bildraum

Dieses Kapitel beschreibt die notwendigen Arbeiten für die Auswertung der Bilder des grönländischen Gletschers Jakobshavn Isbræ im Bildraum. Hierzu gehören insbesondere die Definition der zu verfolgenden Gletscherpunkte (Kapitel 5.1), die Bestimmung der Kamerabewegungen (Kapitel 5.2) und die eigentliche Bildzuordnung (Kapitel 5.3). Abschließend werden die Ergebnisse der Bildraumauswertungen zusammengefasst (Kapitel 5.4) und die verschiedenen Möglichkeiten für die Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse vorgestellt (Kapitel 5.5).

Die Verfolgung der Gletscherpunkte erfolgt im strengen Sinne lediglich in einer Dimension (horizontale Komponente der Fließrichtung). Die Bewegungsvektoren, welche in  $\pm y$ -Richtung ermittelt werden, entsprechen aufgrund der Wahl des Kamerastandpunktes (zentralperspektivische Schrägaufnahme, etwa 200 Meter über dem Gletscher) einer Überlagerung der Bewegungen quer zur Fließrichtung mit den gezeiteninduzierten Höhenänderungen des Gletscherstroms. Die Bewegungskomponente quer zur Fließrichtung kann hierbei allerdings vernachlässigt werden.

Während der Erläuterungen im folgenden Kapitel werden immer wieder Hinweise auf die wichtigsten Erweiterungen der Programmfunktionalitäten der Software „2-DMA“ gegeben. Auf ein eigenständiges Kapitel für die Darstellung der Softwareeigenschaften wurde zwar verzichtet, jedoch kann dem Anhang B eine stichpunktartige Programmdokumentation mit zahlreichen Screenshots und Erläuterungen der implementierten Funktionen entnommen werden. Des Weiteren sei für eine ausführliche Einführung in das Grundkonzept des Programms „2-DMA“ auf (WESTFELD, 2004) verwiesen.

## 5.1 Vorarbeiten für die Bildzuordnung

Die vorliegenden Bildsequenzen des Jakobshavn Isbræ können in dem erstellten Programm „2-DMA“ über die Menüoberfläche eingelesen werden. Die unterstützten Bildformate sind (WESTFELD, 2004) zu entnehmen. Da die Bilder durch einen hochauflösenden Sensor generiert wurden, beträgt die Dateigröße circa 40 Megabyte (MB). Das Einlesen sämtlicher Bilder einer Sequenz in den Arbeitsspeicher (RAM) verursacht bei einem herkömmlichen Computersystem mit bis zu 1000 MB RAM in der Regel weitreichende Systeminstabilitäten.

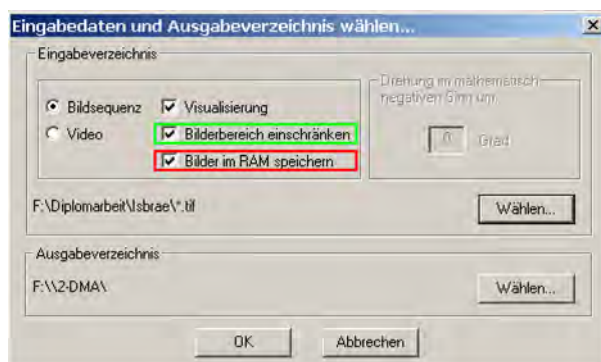


Abbildung 5-1: Dialogfeld „Eingabedaten und Ausgabeverzeichnis“:

- Rot: Funktion „Bildbereich einschränken“
- Grün: Funktion „Bilder im RAM speichern“

Eine Lösung besteht in der optionalen Deaktivierung der in Abbildung 5-1 zu sehenden Funktion „Bilder im RAM speichern“. Die Eingabedaten werden dann bei jedem Gebrauch von dem lokalen Datenträger geladen. Die dadurch auftretenden Rechenzeitverlängerungen sind in jedem Fall vertretbar.

Eine weitere Möglichkeit im Umgang mit großformatigen Bildern ist eine Extraktion von nicht relevanten Bildinformationen, wobei dies entweder im Vorfeld der Auswertungen oder interaktiv im Rahmen der vorliegenden Software geschieht. Nach dem Einlesen der Bildsequenzen bietet „2-DMA“ dem Nutzer diese Option unter „Bildbereich einschränken“ an (Abbildung 5-1). Die folgende Abbildung 5-2 zeigt den für die Auswertungen verwendeten Bildausschnitt der Normalwinkelsequenz vom 20.08.2004, welcher alle notwendigen Gletscherinformationen beinhaltet. Die Passpunkte im unteren Teil des Bildes werden separat betrachtet.



Abbildung 5-2: Eingeschränkter Bildbereich

Im Anschluss erfolgt die Auswahl der zu verfolgenden Gletscherpunkte durch

- eine interaktive Wahl der Features am Bildschirm,
- die Anwendung eines Interestoperators oder
- die Definition eines regelmäßigen Rasters.

Die interaktive Bestimmung der Features durch den Operator ist vorteilhaft, wenn bestimmte Regionen der Gletscheroberfläche auf ihr Bewegungsverhalten untersucht werden sollen. Bei der Detektion des Fließverhaltens für den gesamten Gletscherstrom kann sich eine manuelle Auswahl jedoch als sehr zeitaufwendig gestalten. Die Bestimmung der Features mit einem Interestoperator gewährleistet das für die flächenbasierte Bildzuordnung zwingend notwendige Vorhandensein von Textur. Bei der vorliegenden Arbeit werden die Bildelemente vornehmlich über die Definition eines regelmäßigen Rasters bestimmt. Es wird so ein hochauflösendes Bewegungsfeld in homogener räumlicher Verteilung erhalten. Nachteilig ist, dass durch eine konsequente Rastergenerierung zahlreiche texturlose Features mitbestimmt werden. Die Ausdehnung des Rasters in x- und y-Richtung kann im Programm „2-DMA“ anwendungsspezifisch variiert werden (vgl. Anhang B.2). Drei Beispiele für die zuvor erläuterten Methoden sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

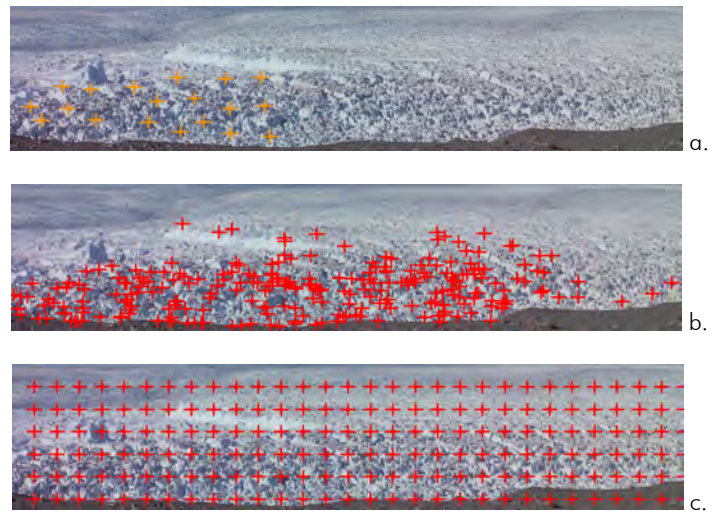


Abbildung 5-3: Methoden der Featurewahl

- a. Manuelle Auswahl
- b. Interestoperator
- c. Regelmäßiges Raster

## 5.2 Kamerabewegungen

Aufgrund teilweise sehr starker Windeinflüsse (kurzperiodische Schwankungen) ist für eine genaue Auswertung der aufgenommenen Bildsequenzen die Bestimmung der Kamerabewegung unabdinglich. Für die Normalwinkelsequenz werden die vier Zielmarken im stabilen Vordergrund des Gletschers durch alle Bilder der Sequenz verfolgt. Da in der Zoomsequenz lediglich ein Passpunkt am linken unteren Bildrand zu sehen und dieser durch Schattenwürfe für das Matching unbrauchbar ist, wird für diese Sequenz die relativ stabile Eisdecke im Vordergrund als statische Referenz verwendet. Die hierzu genutzte Punktverteilung, generiert durch einen Interestoperator, ist in der Abbildung 5-4 dargestellt.



Abbildung 5-4: Punktverteilung zur Bestimmung der Kamerabewegung der Zoomsequenz vom 19.08.2004

Zur Berechnung der Kameratrajektorien kommt für die Schätzung der Näherungswerte der optische Fluss zum Einsatz. Diese Näherungen sind die Startkoordinaten der iterativen Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die Matchingkonfigurationen in tabellarischer Form sowie die Ergebnisse sind dem Anhang A.2 (Tabelle A-2) bzw. dem beigelegten Datenträger (DVD:\Kapitel\_5\Kamerabewegung\) zu entnehmen.

Das letzte Bild der Zoomsequenz unterscheidet sich in seiner Ausleuchtung sehr stark von dem vorherigen. Es kommt zu einem sprunghaften Wechsel der Beleuchtungsverhältnisse, was zu Korrespondenzproblemen bei der Bildzuordnung führt. Da im Vergleich zu dem Gletscher die Bewegung der Kamera nicht gleichmäßig verläuft, und dementsprechend keine Featurekorrektur entsprechend Kapitel 5.3.1 erfolgen kann, wird im weiteren Verlauf der Auswertung auf dieses letzte Bild der Zoomsequenz verzichtet.

Im Anschluss an die Bildzuordnung sind die Trajektorien der Features arithmetisch zu mitteln. Aus Abbildung 5-5 können die gemittelten Trajektorien der Kamerabewegungen relativ zum ersten Bild der jeweiligen Sequenz entnommen werden.

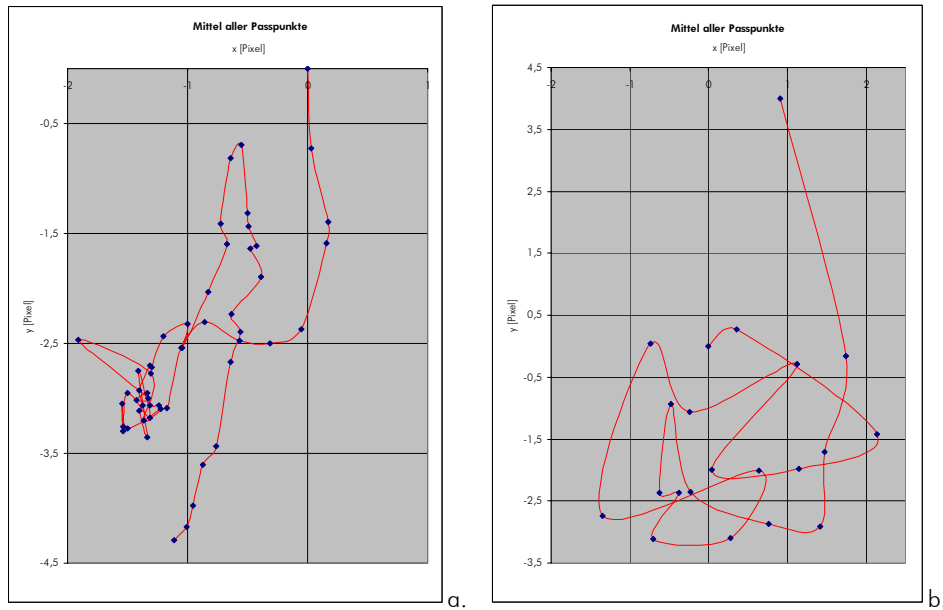


Abbildung 5-5: Trajektorien der Kamerabewegungen  
 a. Normalwinkelsequenz vom 20.08.2004  
 b. Zoomsequenz vom 19.08.2004

Die Berücksichtigung der oben bestimmten Kameraoffsets erfolgt in der Regel nach dem eigentlichen Matching der Gletscherpunkte. Hierfür bietet das Programm „2-DMA“ entsprechende Funktionen zum Einlesen und Anbringen der Kamerabewegungen an (siehe Anhang B.4). Diese Strategie ist beim Least Squares Matching mit zeitlichen Restriktionen allerdings nicht anwendbar. Durch die Aufstellung von zeitlichen Bedingungsgleichungen (vgl. Kapitel 5.3.3) werden die Transformationsparameter für die betrachteten Bildausschnitte gemeinsam in einer Ausgleichung bestimmt. Tritt beispielsweise eine Bewegung des Sensors zwischen dem  $n$ -ten Bild und dem  $(n+1)$ -ten Bild einer Bildsequenz auf, wird aufgrund der temporalen Bedingungen dieser Fehler auf alle anderen Parameter verteilt. Das heißt, dass die Trajektorie eines Features schon während des Trackingprozesses um die Kamerabewegung geglättet, allerdings nicht exakt und vollständig korrigiert wird. Aus diesem Grund sind die Bildfolgen für die Auswertung mit temporalen Restriktionen vor dem Matching um die Kamerabewegungen zu verbessern.

Das mit der zu eliminierenden Kamerabewegung betrachtete Eingabebild  $g_n(x, y)$  wird durch eine affine Transformation in ein um den Sensoroffset korrigiertes Bild  $g'_n(x', y')$  überführt:

$$\begin{aligned} x' &= -a_0 + a_1x + a_2y & \text{mit } a_0, b_0 &: \text{Translationen in } x \text{ und } y \\ y' &= -b_0 + b_1x + b_2y & a_1, b_2 &: \text{Maßstäbe in } x \text{ und } y \\ & & a_2, b_1 &: \text{Rotations- und Scherungswinkel} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Da nur die Translationsparameter  $a_0$  und  $b_0$  der Kameravariationen bestimmt werden, vereinfacht sich Gleichung (5.1) zu:

$$\begin{aligned} x' &= x - a_0 \\ y' &= y - b_0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Für die Transformation wird eine indirekte Methode bevorzugt (Abbildung 5-5b), bei der jedes Pixel  $(x', y')$  des Ausgabebildes durchlaufen wird. Die Grauwerte werden dann aus der zugehörigen Position  $(x, y)$  des Eingabebildes abgegriffen. Da es sich nicht um ganzzahlige

Verschiebungen handelt, ist eine, in diesem Fall bilineare, Interpolation der Grauwerte zwischen den Integerpositionen entsprechend Kapitel 2.1.2 nötig. Die Inverse zu Gleichung (5.2) lautet:

$$\begin{aligned} x &= x' + a_0 \\ y &= y' + b_0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Die oben beschriebene Transformation wird bei den vorliegenden RGB-Bildern für jeden Kanal durchgeführt. Durch den Einsatz einer indirekten Transformation (Abbildung 5-6b) werden Lücken oder Überschneidungen im Ausgabebild, wie sie bei der direkten Methode (Abbildung 5-6a) auftreten würden, vermieden. Die transformierten Normalwinkel- und Zoombildsequenzen sind dem beigelegten Datenträger (DVD:\Kapitel\_5\Resampling) zu entnehmen.

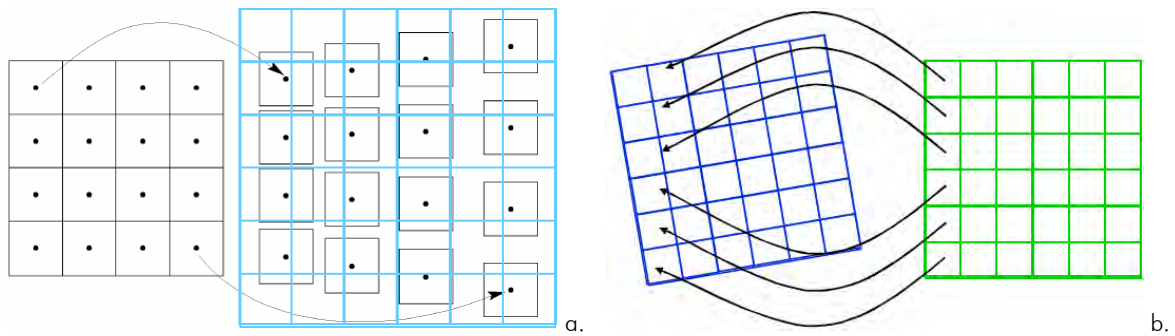


Abbildung 5-6: Geometrische Transformation eines Bildes mit anschließender Grauwertinterpolation (MAAS, IPF, Dresden, 2003)

- a. Direkte Methode
- b. Indirekte Methode



## 5.3 Gletscherbildzuordnungen

An dieser Stelle wird auf die Modifikation der in Kapitel 4 vorgestellten Trackingalgorithmen sowie weitere Programmspezifikationen in Hinblick auf eine optimierte Auswertung der Gletscherbilder eingegangen. Eine detaillierte Beschreibung für den Aufruf der verschiedenen Trackingfunktionen im Programm „2-DMA“ sowie der zu treffenden Parameter ist aus (WESTFELD, 2004) sowie im Anhang B.2 ersichtlich.

### 5.3.1 Allgemeine Modifikationen für das Matching der Gletscherbilder

#### (a) Matchingstrategien

Die vorliegenden Gletscherbilder des Jakobshavn Isbræ werden mit zwei verschiedenen Matchingstrategien ausgewertet (Abbildung 5-7):

- Matching von Bild zu Bild und
- Matching vom ersten Bild ausgehend in alle folgenden Bilder.



Abbildung 5-7: Matchingstrategien

- a. Bild zu Bild
- b. 1. Bild zu Bild

In der Praxis ist die Bildzuordnungsstrategie „Bild zu Bild“, also die Verfolgung der Bildelemente jeweils von dem vorherigen Bild in das temporal folgende Bild, weit verbreitet. Der Grund hierfür liegt vor allem in einem eingeschränkten Konvergenzradius der Matchingalgorithmen (vgl. Kapitel 7.2.3), welche bei zu großen Translationen des betrachteten Objektes falsch oder gar nicht konvergieren. Die „Bild zu Bild“-Zuordnung hat jedoch den Nachteil, dass sich aufgetretene Fehlzuordnungen durch die Bildsequenz fortpflanzen und so die gesamte Trajektorie eines Features verfälschen.

Eine Alternative ist ein vom ersten Bild der Sequenz ausgehendes Matching in alle weiteren Bilder. Voraussetzung hierfür ist ein, entsprechend der zu erwartenden Objektbewegung, hinreichend großer Konvergenzradius oder ausreichend genaue Näherungswerte. In dieser Arbeit sind die Kreuzkorrelation sowie das Least Squares Matching mögliche Verfahren für diese Strategie. Die Bildzuordnung durch das Kreuzkorrelationsverfahren passt ihren Prädiktionsbereich im vorliegenden Programm „2-DMA“ automatisch an (Multiplikation des vorgegebenen Suchbereiches mit der Anzahl der ausgelassenen Bilder). Da das Verfahren der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate auf der vorherigen Bestimmung von Näherungswerten basiert, ist auch hier, unter der Voraussetzung genügend genauer Näherungen, ein Matching vom ersten Bild in alle folgenden Bilder möglich. Problematisch bei dieser Zuordnungsstrategie ist allerdings, dass sich die geometrischen und radiometrischen Bedingungen sprunghaft ändern können und eine korrekte Bildzuordnung erschweren (vgl. Abbildung 5-8).

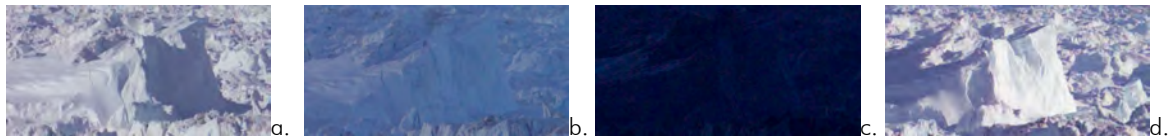


Abbildung 5-8: Änderungen der Beleuchtungsverhältnisse

- a. 1. Bild der Sequenz
- b. 7. Bild der Sequenz
- c. 15. Bild der Sequenz
- d. 30. Bild der Sequenz

Eine Untersuchung der oben vorgestellten Matchingstrategien hinsichtlich ihrer Eignung für die Auswertung der vorliegenden Bildsequenzen erfolgt in Kapitel 7.3.

### (b) Automatische Detektion fehlerhafter Trajektorien

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, wird eine massenhafte Bildpunktverfolgung in der Auswertung favorisiert, um die gesamte Oberfläche des Jakobshavn Isbræ abzudecken. Eine manuelle Qualitätskontrolle der berechneten Trajektorien ist dementsprechend nur bedingt sinnvoll. Die erstellte Software „2-DMA“ ermöglicht die Definition von Ausschlusskriterien vor dem eigentlichen Matching. Somit werden Fehlzuordnungen, verursacht durch zum Beispiel Variationen der Schattenwürfe, schon während der Trackingprozedur automatisch detektiert.

Da die Bewegung des Gletschers gleichmäßig in Richtung des Abtragungsgebietes verläuft, ist die Aufstellung der folgenden Kriterien, welche die berechneten Bildpunkte von Bild zu Bild erfüllen müssen, sinnvoll:

- Die Gletscherpunkte bewegen sich nicht entgegengesetzt der Fließrichtung.
- Die Gletscherpunkte können eine maximale Translation in x-Richtung nicht überschreiten.
- Die Gletscherpunkte können eine maximale Translation in y-Richtung nicht überschreiten.

Werden diese Kriterien während der Bildzuordnung nicht eingehalten, wird das entsprechende Feature optional gelöscht oder während des Matchingvorgangs korrigiert. Die Korrektur erfolgt entweder über einen Erfahrungswert oder die Verwendung der gemittelten Translationen der zuvor korrekt bestimmten Bildelemente. Abbildung 5-9 zeigt die über den Menüpunkt „Einstellungen“ zu erreichende Registerkarte für die Definition der Ausschlusskriterien. Des Weiteren ist die Untersuchung der Trajektorien auf die Einhaltung der oben diskutierten Kriterien nach einer Bildzuordnung ebenfalls möglich.



Abbildung 5-9: Registerkarte „Ausschlusskriterien“

In der vorliegenden Arbeit werden die Ausschlusskriterien mit anschließender Korrektur auf die Verfahren zur Bestimmung der Näherungswerte für das Least Squares Matching, also auf den optischen Fluss sowie die Kreuzkorrelation, angewandt. Dieses Vorgehen unterstellt eine konstante Fließgeschwindigkeit des Gletscherstroms, die jedoch aufgrund der Geschwindigkeitszunahme im Kalbungsgebiet nicht überall gegeben ist. Für die Generierung der Näherungswerte ist diese Annahme aber vertretbar und ermöglicht so eine Korrektur der geschätzten Position durch LSM. Würden die Korrekturen nicht stattfinden, käme es zu einem sehr großen Anteil an Fehlzuordnungen aufgrund der Tag/Nacht-Übergänge sowie der Schattenvariationen. Um die endgültig berechneten Trajektorien nicht mit den aufgestellten Annahmen zu verfälschen, wird das Least Squares Matching zwar mit automatischer Ausreißerprüfung, aber ohne optionale Korrektur durchgeführt.

### (c) Patchgeometrie

In der Praxis ist es üblich, für die Muster- und Suchbildausschnitte eine quadratische Form zu wählen. Bei den ausgewerteten Gletscherbildern ist für die Bestimmung der Näherungswerte meist eine sehr große Patchausdehnung (z.B.  $61 \times 61$ ) Pixel) nötig. Dies führt zu großen perspektivischen Unterschieden innerhalb eines quadratischen Bildausschnittes (Abbildung 5-10).



Abbildung 5-10: Patchgeometrie (unmaßstäblich):

- Rot: Quadratisches Patch
- Grün: Rechteckiges Patch

Wie der Abbildung 5-10 zu entnehmen ist, erstreckt sich das quadratische Patch über den eigentlich zu untersuchenden Bildbereich in die Objektraumtiefe. Es werden folglich auch Grauwerte aus perspektivisch weit entfernten Regionen für die Berechnung eines Ähnlichkeitsmaßes verwendet. Das kann, aufgrund einer anscheinend langsameren Bewegung des Gletschers in der Tiefe, zu Diskrepanzen bei der Suche des korrespondierenden Bildausschnittes im darauffolgenden Bild führen. In Hinblick auf ein Matching des hinteren Gletscherstroms ist somit eine rechteckige Patchgröße mit einer verminderten Ausdehnung in y-Richtung empfehlenswert.

## 5.3.2 Modifikationen der Kreuzkorrelation

### (a) Prädiktionsbereich

Das Verfahren der Kreuzkorrelation bewegt das Suchpatch, wie in Kapitel 4.3 erläutert, mäandertförmig über das Suchbild. Falls das Bewegungsverhalten des zu verfolgenden Objektes bekannt ist, kann der Suchbereich durch die Definition geeigneter Prädiktionen eingeschränkt werden.

Für die Gletscherbilder ist ein kleiner bzw. auch gar kein Suchbereich entgegengesetzt der Fließrichtung (+x-Richtung) ausreichend. Die Ausdehnung des Prädiktionsbereiches in  $\pm y$ -Richtung ist, aufgrund des Gezeiteinflusses, entsprechend der zu erwartenden Bewegung vom Betrag her gleich groß zu wählen. Ein Suchbereich in  $-x$ -Richtung sollte etwas größer als die zu schätzende horizontale Translationskomponente sein. Die Abbildung 5-11 veranschaulicht diese Thematik schematisch.

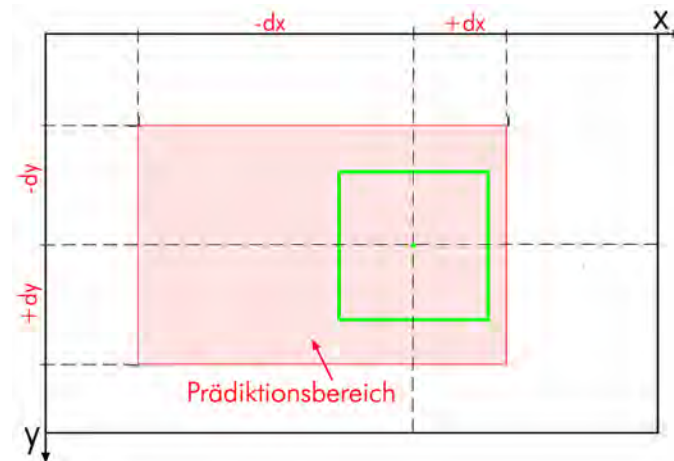


Abbildung 5-11: Schematische Darstellung des Kreuzkorrelationsprinzips unter Verwendung verschiedener Prädiktionen in x- und y-Richtung

### (b) Zur automatischen Detektion schlecht korrelierter Zuordnungen

Aufgrund von Bildrauschen, Verdeckungen, ausgeprägten Änderungen der Beleuchtungsverhältnisse oder der Wahl eines zu kleinen Suchbereiches kann eine Bildzuordnung nach dem Verfahren der Kreuzkorrelation zu Ergebnissen führen, die ein geringes Ähnlichkeitsmaß zu ihrem korrespondierenden Template aufweisen (Abbildung 5-12). Durch die a priori Definition eines Schwellwertes für den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten können in dem Programm „2-DMA“ automatisch schlecht korrelierte Zuordnungen zurückgewiesen werden.

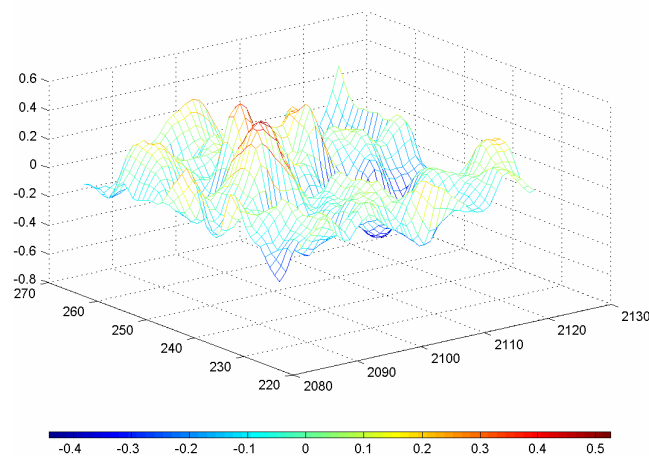


Abbildung 5-12: Schlecht korreliertes Ergebnis einer Kreuzkorrelation

Eine weitere Möglichkeit zur Detektion einer Kreuzkorrelationszuordnung mit geringen Ähnlichkeitsmaßen besteht in der Analyse des Abstandes des Korrelationspeaks von weiteren Nebenmaxima entsprechend Abbildung 4-10 des Kapitels 4.3.1. In der vorliegenden Arbeit wurde dies jedoch aus Zeitgründen nicht berücksichtigt.

### (c) Die Verwendung von Restriktionen für die Subpixeleinpassung

Die Interpolation der Subpixelposition des Korrelationsmaximums wird bei der Kreuzkorrelation durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate realisiert (vgl. Kapitel 4.3.2). Um zu verhindern, dass die gesuchten Translationsparameter  $x_0$  und  $y_0$  des Paraboloids größer als Eins bestimmt werden (dies würde gleichsam einer Subpixelinterpolation des benachbarten Pixels entsprechen), wurde in dem vorliegenden Programm „2-DMA“ eine MKQ-Ausgleichung mit linearen Restriktionen der Form

$$x_0 \leq 1, \quad y_0 \leq 1 \quad (5.4)$$

implementiert.

Eine Lösungsmöglichkeit für quadratische Optimierungsaufgaben mit Ungleichungen als Restriktionen bietet der lineare Komplementaritätsalgorithmus (LCA). Im Folgenden werden die Grundprinzipien des LCA vorgestellt. Für eine eingehende Beschreibung des Verfahrens sei auf (SCHAFFRIN, 1981; FRITSCH, 1985; LAWSON/HANSON, 1995) verwiesen.

Der Ausgangspunkt ist eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (vgl. Kapitel 2.2.1 und Kapitel 2.2.2) mit dem Ziel, die Summe der Fehlerquadrate zu minimieren. Das bereits linearisierte funktionale Modell aus Gleichung (2.14) erweitert sich um die Bedingungsungleichungen zu

$$\begin{array}{l} \underline{l} + \underline{v} = \underline{A} \cdot \underline{\hat{x}} \\ \underline{b} \geq \underline{B} \cdot \underline{\hat{x}} \end{array} \quad (5.5)$$

wobei  $\underline{B}$  die Koeffizientenmatrix und  $\underline{b}$  die linke Seite des Ungleichungssystems darstellen. Das lineare Komplementaritätsproblem kann nun wie folgt formuliert werden:

$$\begin{array}{l} \text{Bestimme} \quad \underline{\hat{z}}, \underline{\hat{u}} \geq 0, \\ \text{sodass gilt} \quad \underline{\hat{z}} = \underline{M} \cdot \underline{\hat{u}} + \underline{k}. \end{array} \quad (5.6)$$

In Gleichung (5.6) gilt:

$$\begin{array}{l} \underline{M} = \underline{B} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) \\ \underline{k} = \underline{b} - \underline{B} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) \end{array} \quad (5.7)$$

Die Lösung des Gleichungssystems (5.6) wird als eine komplementäre Lösung bezeichnet, da die beiden Vektoren  $\underline{\hat{z}}$  und  $\underline{\hat{u}}$  zueinander komplementär sind und dementsprechend die folgende Komplementaritätsbedingung erfüllen:

$$\underline{\hat{u}}^T \underline{\hat{z}} = 0 \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \underline{\hat{z}} \geq 0 \\ \underline{\hat{u}} \geq 0 \end{array} \quad (5.8)$$

Der gesuchte Unbekanntenvektor bestimmt sich im Anschluss mit

$$\hat{x} = -(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{B}^T \hat{u} - \underline{A}^T \underline{P} \underline{l}), \quad (5.9)$$

wobei der Vektor  $\hat{u}$  aus Gleichung (5-6) über die Lösung des aufgestellten LCP erhalten wird. Einen möglichen Lösungsansatz für (5-6) bietet der sogenannte Lemke-Algorithmus (nach C. E. Lemke) aus dem Jahr 1968, welcher in (FRITSCH, 1985) ausführlich erläutert wird.

Im Rahmen der Arbeit ist es nicht gelungen, den oben beschriebenen Algorithmus vollständig auf die Kreuzkorrelation anzuwenden. Im Anhang A.3 ist ein Beispiel enthalten, bei dem das Verfahren zu einem korrekten Ergebnis führt. Die gesamte Lösung des Problems, übertragen auf die Kreuzkorrelation, bleibt jedoch zukünftigen Arbeiten vorbehalten.

### 5.3.3 Modifikationen der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate

Eine weitere Möglichkeit im Umgang mit den Tag/Nacht-Übergängen sowie den Schattenvariationen der Bilder des Gletschers Jakobshavn Isbræ ist die Definition von Bedingungsgleichungen. Diese müssen die Features bzw. ihre Translationsparameter während der LSM-Ausgleichung erfüllen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ein zeitliches (temporales) und ein räumliches (spatiales) Restriktionskonzept für die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate vorgestellt. Der Vorteil der Aufstellung von Bedingungsgleichungen liegt darin, dass schwache Features durch gut konditionierte Features über die oben angesprochenen problematischen Bildbereiche geführt bzw. gestützt werden.

#### (a) Temporale Restriktionen

Das a priori Wissen einer gleichmäßigen Bewegung des Gletschers in Fließrichtung kann genutzt werden, um zeitliche Restriktionen zwischen einem Feature und seinen korrespondierenden Positionen innerhalb der Bildfolge aufzustellen. Es wird die folgende Annahme getroffen:

$$a_0^1 \approx a_0^2 \approx \dots \approx a_0^{\hat{n}} \quad (5.10)$$

Die Gleichung (5.10) unterstellt, dass die Translationen eines Gletscherpunktes in x-Richtung über alle Bilder ( $1 \dots \hat{n}$ ) in etwa gleich groß sind. Da es sich hierbei um eine zeitliche Verknüpfung von, im klassischen Sinn, mehreren separaten Bildzuordnungen handelt (vgl. Abbildung 5-13), sind folglich diese einzelnen Matchingschritte innerhalb einer Ausgleichung zu formulieren.

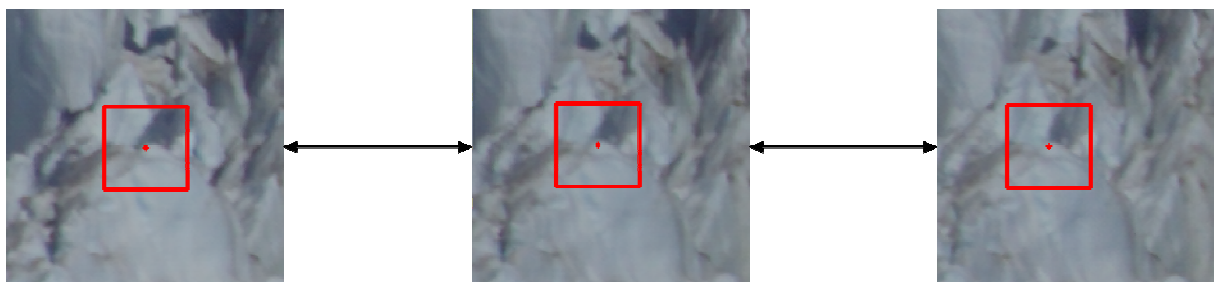


Abbildung 5-13: Temporales LSM über drei Bilder einer Sequenz

Die Koeffizientenmatrix der partiellen Ableitungen nach allen Unbekannten und der gekürzte Beobachtungsvektor besitzen die dem Anhang A.4 zu entnehmenden Strukturen. Die Notation ist dabei äquivalent zu Kapitel 2.2 und Kapitel 4.4.

Das Ausgleichungssystem beinhaltet

$$n = n_1 + \dots + n_{\hat{n}} \quad (5.11)$$

Beobachtungen. Diese setzen sich aus den einzelnen Beobachtungsgleichungen der Patches aus den Bildern  $(1 \dots \hat{n})$  zusammen. Die Anzahl  $u$  an Unbekannten ist bei einer vollständig bestimmten ebenen Affintransformation gleich Sechs  $(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$ . Wird aufgrund ungünstiger Korrelationen auf die Schätzung einzelner Parameter verzichtet, verringert sich die Anzahl dementsprechend.

Die oben genannten Restriktionsgleichungen (5.10) können in zwei Varianten aufgestellt werden. Diese beiden Varianten werden auch von dem Programm „2-DMA“ unterstützt. Eine strenge Formulierung der Form

$$\begin{aligned} a_0^1 - a_0^2 &= 0 \\ a_0^1 - a_0^3 &= 0 \\ &\vdots \\ a_0^1 - a_0^{\hat{n}} &= 0 \end{aligned} \quad (5.12)$$

gestattet das exakte Einhalten der Bedingungsgleichungen bei entsprechender Gewichtung. Folglich ergeben sich

$$r = \hat{n} - 1 \quad (5.13)$$

Restriktionsgleichungen. Hingegen ist bei einem im strengen Sinne nicht exakten Ausdruck

$$a_0^1 - a_0^2 - \dots - a_0^{\hat{n}} = 0 \quad (5.14)$$

lediglich eine Bedingungsgleichung notwendig.

Die vorliegenden Normalwinkelsequenzaufnahmen umfassen insgesamt 53 Bilder. Unter Verwendung der Gleichungen (5.12) ergeben sich 52 Restriktionen. Diese haben eine erhebliche Vergrößerung des Gleichungssystems und damit eine enorme Erhöhung des Rechenaufwandes zur Folge.

Das erweiterte Normalgleichungssystem besitzt die in Kapitel 2.2.4 definierte Struktur und setzt sich zusammen aus

- den Normalgleichungen  $\underline{N}$  der Größe  $(u \times u)$ ,
- den Restriktionskoeffizienten  $\underline{B}$  der Größe  $(u \times r)$ ,
- den Restriktionsgewichten  $\underline{P}_{Res}$  der Größe  $(r \times r)$  sowie
- dem Absolutgliedvektor  $\underline{n}$  der Größe  $(u \times 1)$  und
- der rechten Seite des Restriktionssystems  $\underline{w}$  mit einer Größe von  $(r \times 1)$ .

Der weitere Lösungsweg kann dem Kapitel 2.2 entnommen werden.

Eine Übertragung der oben diskutierten Bedingungen auf die Translationen in y-Richtung ist nicht möglich. Der Grund hierfür liegt in dem Einfluss der Meereszeiten auf den Gletscherstrom. Die y-Trajektorien der Features entsprechen in ihrem Verlauf einer Sinuskurve mit unterschiedlich ausgeprägten Maxima. Es ist zweckmäßig, den Kurvenverlauf an den natürlichen Tidenverlauf

anzupassen. Durch fehlende Maßstabsangaben für die Verknüpfung von Objekt- und Bildraumstrecken gestaltet sich dieser Ansatz jedoch problematisch. Eine andere Anpassungsmöglichkeit besteht in der Erstellung von Bedingungen für die typischen Charakteristika der Sinuskurve. Hierzu zählen zum Beispiel die Monotonie und die Positionen der Wendestellen. Für die Formulierung dieser Restriktionen werden aber auch Ungleichungen, entsprechend dem Kapitel 5.3.2, benötigt. Eine Ableitung von Erfahrungswerten für die Eigenschaften der zu erwartenden Sinuskurve aus zuvor bestimmten Trajektorien ist eine weitere Option. Dies muss allerdings für zahlreiche Bereiche des Gletschers geschehen, da die vertikale Bewegungskomponente von der Entfernung zum Kalbungsgebiet abhängt (vgl. Kapitel 5.4). Aus den genannten Gründen wird von der Restriktionsaufstellung in  $y$ -Richtung abgesehen.

### (b) Spatiale Restriktionen

Im Gegensatz zu den temporalen Bedingungen werden bei spatialen Restriktionen die folgenden Beziehungen zwischen dem zu verfolgenden Feature und seiner Nachbarschaft angenommen:

$$\begin{aligned} a_0 &\approx a_0^2 \approx \dots \approx a_0^{\tilde{n}} \\ b_0 &\approx b_0^2 \approx \dots \approx b_0^{\tilde{n}} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Es kann zugrunde gelegt werden, dass für die Translationen von nahe beieinanderliegenden Bildpunkten annähernd gleiche Größenordnungen vorliegen. Der hochgestellte Index  $\tilde{n}$  steht in Gleichung (5.15) für die Ausdehnung der räumlichen Nachbarschaft (vgl. Abbildung 5-14). Das Programm „2-DMA“ unterstützt die Nachbarschaften von 4, 8 und 12 Bildpunkten.

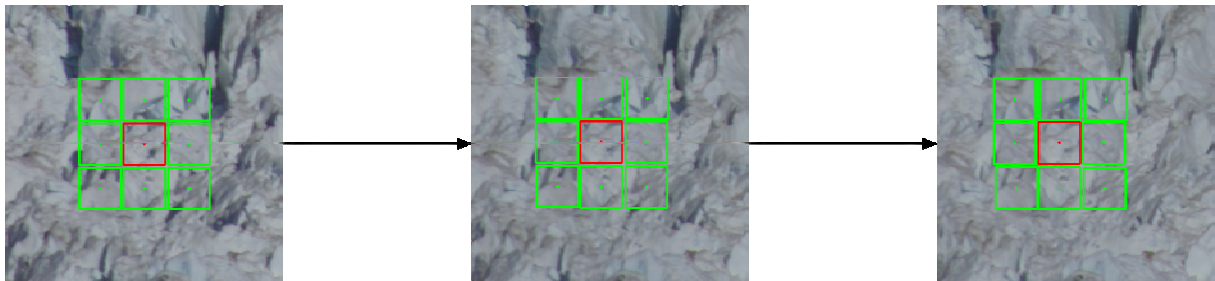


Abbildung 5-14: Spatiales LSM über drei Bilder einer Sequenz mit einer Nachbarschaft von acht Bildpunkten

Die einzelnen Bildzuordnungen des Centerfeatures und dessen Nachbarschaft sind gemeinsam auszugleichen. Für die Lösung kann der Ansatz der zeitlichen Restriktionen entsprechend übertragen werden.

### (c) Gewichtung der Restriktionen

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Restriktionen sowie die Anzahl an Restriktionsgleichungen auf die eigentliche Hauptbedingung der Methode der kleinsten Quadrate (siehe Gleichung (2.9)) am Beispiel eines Least Squares Matchings mit räumlichen Bedingungsgleichungen untersucht. Für die Analyse finden das sechste und siebente Bild (erster sprunghafter Wechsel der Beleuchtungsverhältnisse) der Normalwinkelsequenz Verwendung, da auch die Restriktionen vornehmlich für den kritischen Tag/Nacht-Übergang konzipiert wurden.



Der Wertebereich der Gewichtung liegt zwischen  $p=0$  (kein Zwang) und  $p=10^9$  (voller Zwang; Erfahrungswert). Neben diesen Extrema werden noch zusätzlich die folgenden Gewichte in die Betrachtungen aufgenommen:  $p=10^3$ ,  $p=5 \cdot 10^5$ ,  $p=10^6$ . Gemessen werden die Translationen von sechs Features sowie deren Achternachbarschaft (insgesamt 54 Bildpunkte) unter der oben aufgeführten Gewichtsverteilung.

Die Abbildung 5-15a vergleicht die Größenordnungen der Hauptbedingung des Gesamtmodells (Summe aus den Fehlerquadraten der Beobachtungen und den Fehlerquadraten der Restriktionen). Erwartungsgemäß hebt sich die Quadratsumme bei der Verwendung eines streng aufgestellten Restriktionssystems unter vollem Zwang deutlich, in diesem Beispiel um bis zu 65 Prozent, vom Mittelwert ab. Das MKQ-Ausgleichssystem ordnet die Erfüllung der zusätzlichen Bedingungen, aufgrund der hohen Gewichtung, höher ein als die eigentliche Minimierung der Summe der Quadrate der Grauwertunterschiede. Des Weiteren ist bemerkenswert, dass sich die Werte der restlichen Gewichtsconfigurationen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Das erste Feature wird mit seiner Nachbarschaft als Ausreißer angesehen, da die Ergebnisse mit und ohne Bedingungengleichungen in keinem relationalen Zusammenhang stehen.

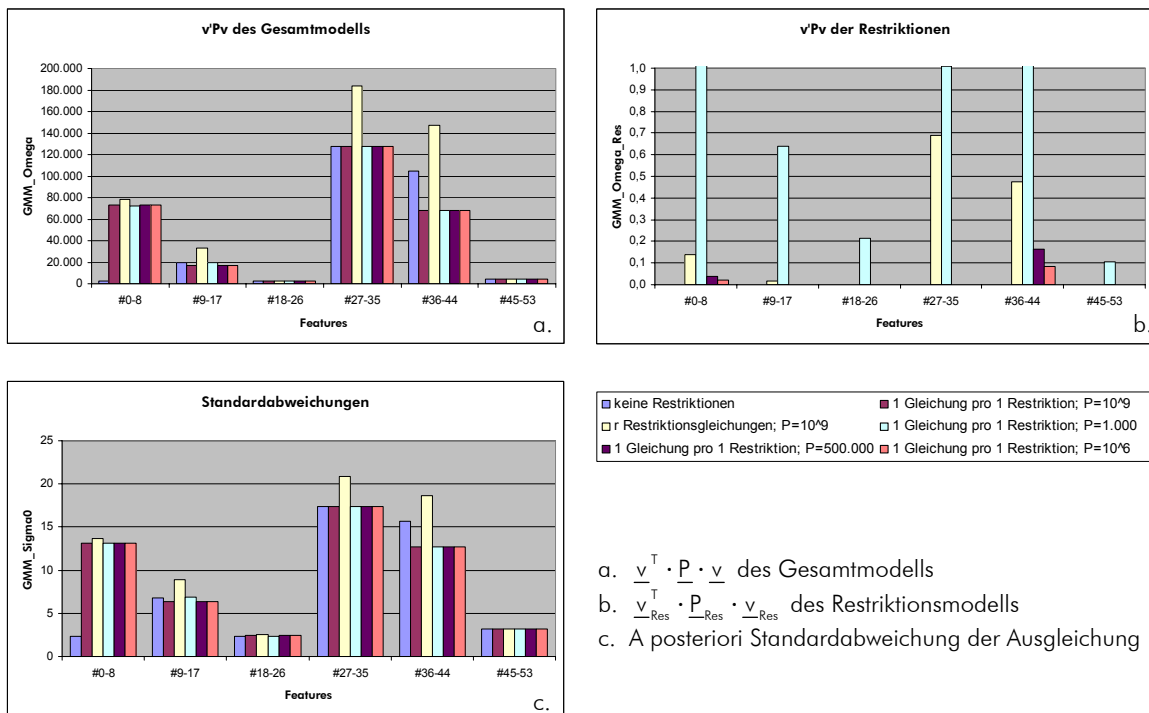


Abbildung 5-15: Zum Einfluss der Restriktionsgewichtung auf die Hauptbedingung der MKQ

Die Abbildung 5-15b zeigt den  $\underline{v}_{Res}^T \underline{P}_{Res} \underline{v}_{Res}$ -Anteil des Restriktionsmodells an dem Gesamtmodell aus der Abbildung 5-15a. Da bei einer geringen Gewichtung die Erfüllung der Restriktionsgleichungen nicht im Vordergrund steht, ist die Summe der Quadrate der Restriktionsverbesserung sehr groß. Des Weiteren ist zu erkennen, dass  $r$  Restriktionsgleichungen unter höchstmöglichem Zwang ( $p=10^9$ ) ebenfalls vergleichsweise hohe Werte für das vierte und fünfte Feature hervorrufen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Korrespondenzeigenschaften für diese zwei Bildzuordnungen allgemein nicht sehr gut sind.

In Abbildung 5-15c werden die zugehörigen a posteriori Standardabweichungen des Ausgleichsmodells visualisiert. Der Vergleich dieser Genauigkeitsmaße untereinander bestätigt die oben aufgeführten Erkenntnisse.

## 5.4 Ergebnisse der Bildzuordnungsverfahren

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Normalwinkelsequenz vom 20.08.2004 sowie die Zoomsequenz vom 19.08.2004 des Jakobshavn Isbræ mit der dem Anhang angefügten Konfigurationenstabelle A-3 ausgewertet. Die Punktverteilung für das jeweils erste Bild, die Koordinatenlisten (mit und ohne Kameraverbesserungen) sowie ein Übersichtsbild der Trajektorien und Vektoren können dem beigefügten Datenträger (DVD:\Kapitel\_5\Bildzuordnung\ ) entnommen werden.

- Auswirkungen der Ausschlusskriterien und LSM-Restriktionen

Die folgenden Abbildungen vermitteln einen Einblick über die Bildzuordnungsergebnisse unter Verwendung von Ausschlusskriterien mit anschließender Korrektur (Verfahren zur Näherungswertbestimmung) sowie von Restriktionen für das Least Squares Matching.

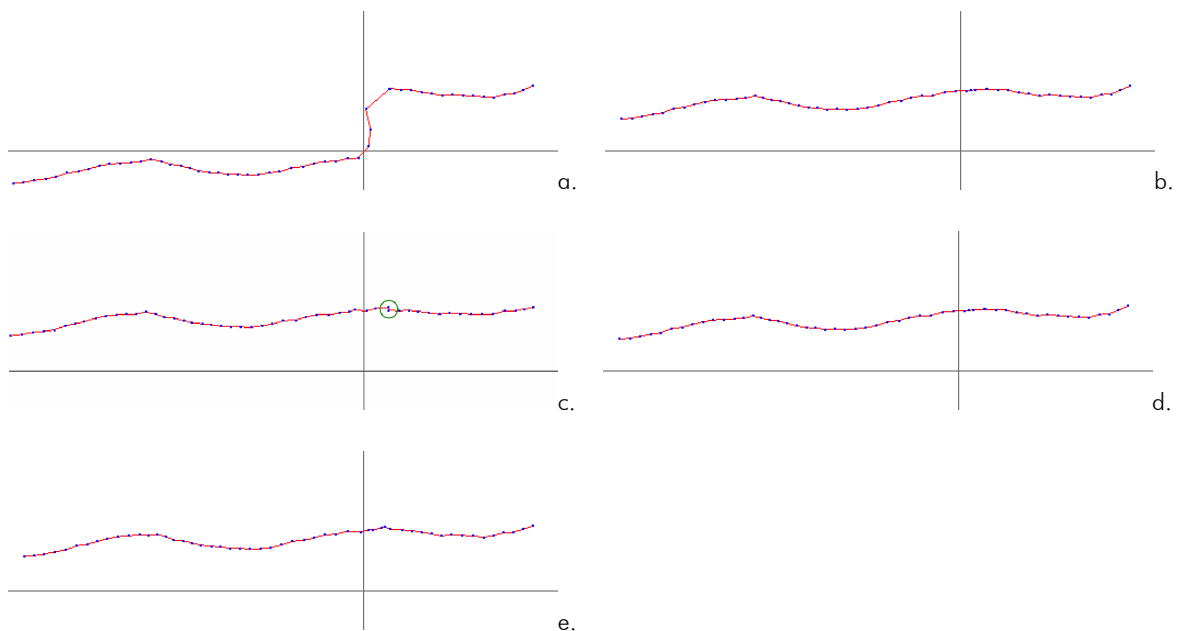


Abbildung 5-16: Auswirkungen der Ausschlusskriterien und LSM-Restriktionen

- Kreuzkorrelation ohne Ausschlusskriterien
- Kreuzkorrelation mit Ausschlusskriterien und Korrektur
- Least Squares Matching ohne Restriktionen
- Least Squares Matching mit spatialen Restriktionen
- Least Squares Matching mit temporalen Restriktionen

Die Abbildung 5-16a zeigt den Verlauf eines Gletscherpunktes, welcher ohne automatische Detektion und Korrektur fehlerhafter Bildzuordnungen verfolgt wurde. Der sehr große und für eine gleichmäßige Gletscherbewegung atypische vertikale Offset entsteht aufgrund der oben bereits aufgeführten sprunghaften Beleuchtungsänderung innerhalb der Szene. Während der sehr kontrastarmen Nachtphase gelingt es dem Matchingalgorithmus nicht, die Position des Bildelements korrekt zu schätzen. Erst ab dem ersten hellen Tagesbild stabilisiert sich der Algorithmus wieder, jedoch an einer nicht korrekten Bildposition. Für das in Abbildung 5-16a gezeigte Beispiel kam das Verfahren der Kreuzkorrelation zum Einsatz. Da alle in der vorliegenden Arbeit eingeführten Trackingalgorithmen einen ausreichenden Bildkontrast für eine erfolgreiche Zuordnung benötigen, kann das aufgeführte Beispiel auch auf den optischen Fluss, den Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker sowie das Least Squares Matching übertragen werden.

Über die in Abschnitt 5.3.1 definierten Ausschlusskriterien, in Verbindung mit einer anschließenden Korrektur des betreffenden Features, ist es möglich, diesen Offset zu kompensieren (vgl. Abbildung 5-16b) und den Gletscherpunkt durch die texturschwachen Bilder zu „führen“. Die nach diesem Prinzip generierten Näherungswerte gehen darauf als initiale Koordinaten in die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate ein.

Das Ergebnis eines LSM ohne Restriktionsanwendung ist in Abbildung 5-16c dargestellt. Trotz guter Näherungen ist bei genauer Betrachtung eine leichte Diskrepanz während der Nacht zu beobachten (grüner Kreis). In den Abbildungen 5-16d und 5-16e sind die Ergebnisse des Least Squares Matching in Kombination mit spatialen bzw. temporalen Bedingungsgleichungen zu sehen, wobei die genannte Abweichung leicht korrigiert werden konnte.

Obwohl durch geeignete Ausschluss- und Restriktionskriterien akzeptable Ergebnisse erzielt werden können, hat dieser Vergleich gezeigt, dass das Vorhandensein von Textur für flächenbasierte Bildzuordnungsverfahren zwingend notwendig ist und der in der Normalwinkelsequenz auftretende Nachtbereich an der Grenze des Auswertbaren liegt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch die Kombination und Modifikation der Trackingalgorithmen das bestmögliche Ergebnis erreichbar ist. Eine günstige Konfiguration für die Auswertung der vorliegenden Bilder des Gletschers Jakobshavn Isbræ ergibt sich durch eine Näherungswertbestimmung mit dem Verfahren des optischen Flusses oder der Kreuzkorrelation unter Anwendung von Ausschlusskriterien mit Korrektur. Im Anschluss gehen diese Näherungen in die MKQ-Ausgleichung des Least Squares Matchings ein. Als sehr robust und schnell hat sich hierbei der Einsatz von räumlichen Restriktionen unter der Verwendung einer Achternachbarschaft herausgestellt. Eine ausführliche Analyse der Bildzuordnungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Auswertung der Gletscherbilder erfolgt in Kapitel 7.

- Bewegungsverhalten des Gletschers

Ein Ziel des in Kapitel 1 beschriebenen Projektes ist, den Einfluss von Meereszeiten auf den Ausflussgletscher Jakobshavn Isbræ nachzuweisen. In der Abbildung 5-17 ist eine repräsentative y-Trajektorie aus dem Kalbungsbereich des Gletschers (Bildsequenz vom 20.08.2004) im Vergleich zu dem bekannten Tidenverlauf von Ilulissat (Abbildung 5-18; Tabellen A-4 und A-5) dargestellt.

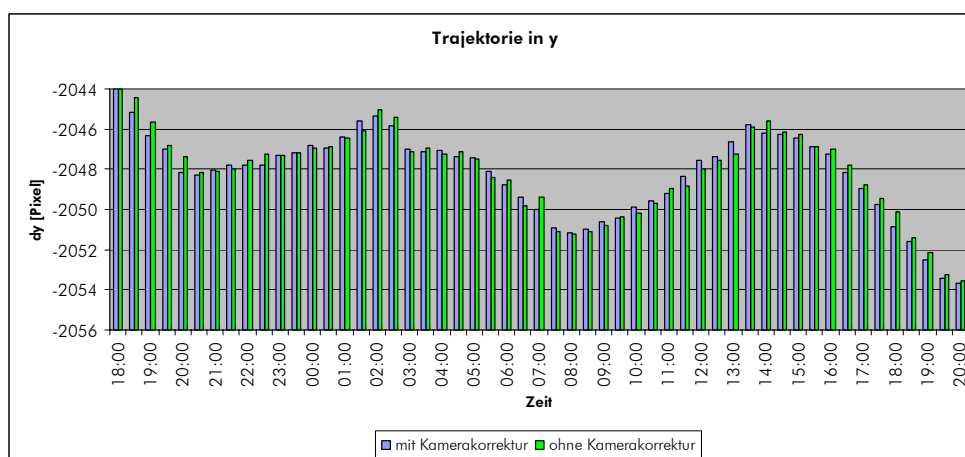


Abbildung 5-17: Beispiel einer y-Trajektorie aus dem Kalbungsbereich des Jakobshavn Isbræ Gletschers

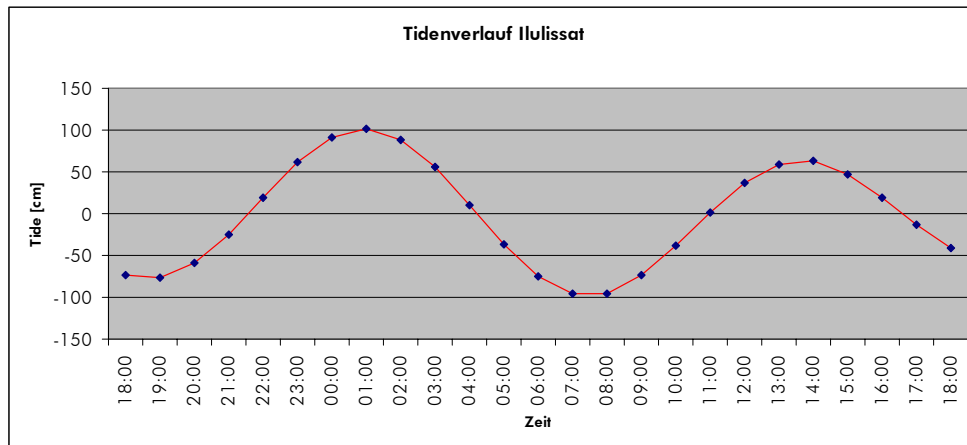


Abbildung 5-18: Tidenverlauf von Ilulissat/Grönland

In Abbildung 5-17 zeichnet sich deutlich eine sinusähnliche Funktion in Abhängigkeit von der Zeit ab. Diese stimmt in ihrer Charakteristika mit dem Referenzverlauf aus Abbildung 5-18 überein. Weiterhin wird deutlich, dass auch nach einer Reduktion der Koordinaten um die Kamerabewegung der sinusförmige Trend der Trajektorie erhalten bleibt.

Die folgende Abbildung 5-19 zeigt im Gegensatz dazu eine Trajektorie des hinteren Gletscherstroms. Diese weist eine wesentlich geringere zeiteninduzierte Variation auf.

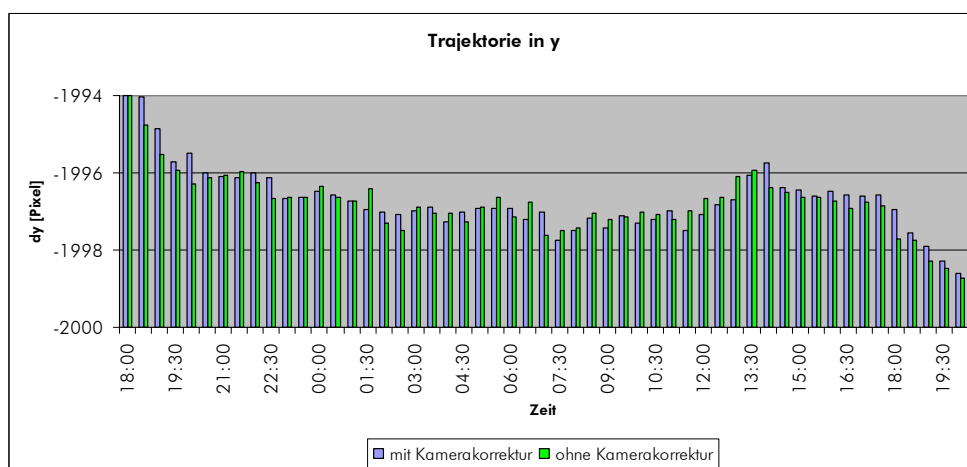


Abbildung 5-19: Vertikale Punktbewegung eines Features des hinteren Gletscherstroms

Es ist bereits jetzt festzustellen, dass die vertikalen Komponenten der Trajektorien dem Gezeiten Einfluss unterliegen. Eine weiterführende Untersuchung des Gezeiteinflusses auf die berechneten Trajektorien ist jedoch nicht Gegenstand der folgenden Auswertungen.

Des Weiteren ist die in Kapitel 3 aufgezeigte Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in Richtung Abtragungsgebiet zu beobachten. Die Abbildung 5-20 zeigt einen Plot von berechneten Vektoren im ersten Bild der Normalwinkelsequenz. Dabei sind die Vektoren in Abhängigkeit ihrer Größe farb-kodiert.

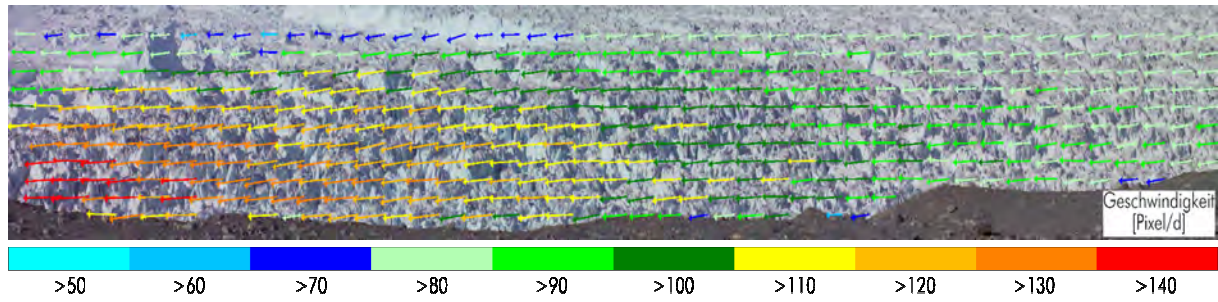


Abbildung 5-20: Geschwindigkeiten des Gletschers Jakobshavn Isbræ, 20.08.2004, Angaben in Pixel/Tag

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fließgeschwindigkeit in Höhe der Abbruchkante zunimmt. Aufgrund der perspektivischen Verzerrung der Bilder, nimmt die Größe der Vektoren dementsprechend in der Tiefe ab.

## 5.5 Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse

Die Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse, das heißt der Bildkoordinaten im Verhältnis zur Zeit, erfolgt in der vorliegenden Software „2-DMA“ durch

- Einzeichnen der Translationen in die zugehörigen Bilder,
- Einzeichnen der gesamten Trajektorien in das erste Bild der Sequenz,
- Einzeichnen von Vektoren in das erste Bild der Sequenz,
- Darstellung der Trajektorien im 3D-Kontext (OpenGL/VRML),
- Export der Trajektorien in Microsoft Office Excel-Dateien,
- Generierung eines Videofilms über die gesamte Bildsequenz,
- Interaktion am Bildschirm im Rahmen des Programms „2-DMA“.

Weiterhin ist eine Darstellung der innerhalb der Kreuzkorrelation berechneten Korrelationsmatrizen möglich, um eine visuelle Qualitätskontrolle des Matchings zu erhalten:

- Visualisierung innerhalb des Programms „2-DMA“ (OpenGL/VRML),
- Export in MatLab-Dateien.

Einen Gesamteindruck über die erreichten Resultate vermittelt die Visualisierung aller Trajektorien im ersten Bild der Sequenz. Es besteht so die Möglichkeit, die Trajektorien hinsichtlich ihrer Ausdehnung in x- und y-Richtung untereinander zu vergleichen sowie vorhandene Ausreißer schnell und einfach visuell zu detektieren. Die Abbildungen 5-21a und 5-21b zeigen hierfür ein Beispiel.

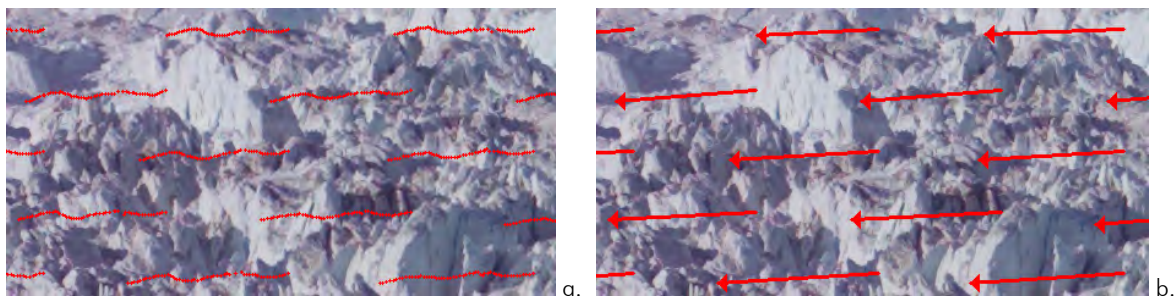


Abbildung 5-21: Visualisierung aller Trajektorien im ersten Bild der Sequenz

a. Ursprüngliche Trajektorien

b. Darstellung der Trajektorien als Vektoren (Anfangs- und Endpunkt)

Innerhalb des Programms „2-DMA“ können die resultierenden Trajektorien über einen OpenGL-Kontext räumlich dargestellt werden (Abbildung 5-22a). Die Navigation im virtuellen Bildraum (Translation, Rotation, Zoom) erfolgt interaktiv per Computermaus am Bildschirm. Während der Betrachtung ist ein Vergleich der Trajektorien der einzelnen Features untereinander bzw. der Ergebnisse der verschiedenen Trackingalgorithmen möglich. Falls bei der Sichtung der Trajektorien Ausreißer erkannt werden, ist eine nachträgliche Löschung des betroffenen Features jederzeit möglich. Des Weiteren sind die Trajektorien, entsprechend des während der Bildzuordnung erlangten Status (Ausschluss, Korrektur), farbcodiert (vgl. Abbildung 5-22b).

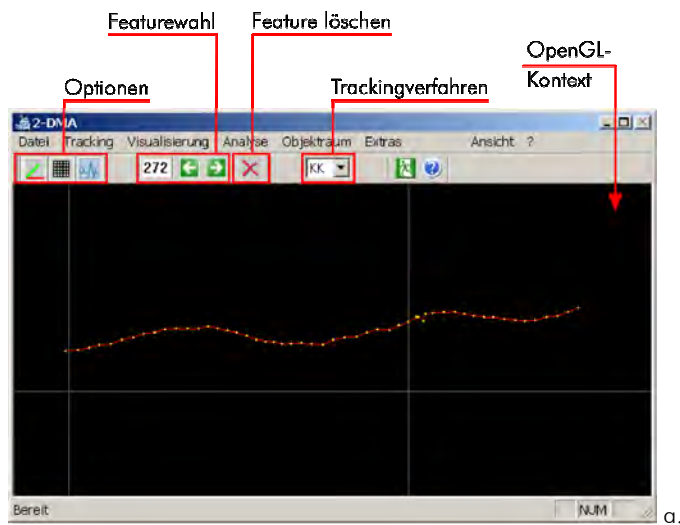


Abbildung 5-22: Visualisierung einzelner Trajektorien

- a. OpenGL-Kontext
- b. Legende

Eine weitere Variante zur Veranschaulichung der Bildkoordinaten in Abhängigkeit von der Zeit ist die Erstellung von Microsoft Office Excel-Diagrammen.

Da alle Programme der Microsoft Office-Reihe eine Programmierschnittstelle, die sogenannte OLE Automation (Object Linking and Embedding), aufweisen, ist eine automatisierte Dateigenerierung von außen möglich. Über den OLE-Standard kann auf das Objektmodell der jeweiligen Applikationen (z.B. Microsoft Office Excel) zugegriffen werden.

Die so erzeugten Dateien beinhalten neben den Datenreihen (Koordinaten in  $x$  und  $y$ ) zur Visualisierung der Trajektorien zwei verschiedene Diagrammtypen (Linien- und Säulendiagramm; siehe Abbildung 5-23). Darüber hinaus stehen alle Excel-Funktionalitäten für die Analyse der Datenreihen zur Verfügung.

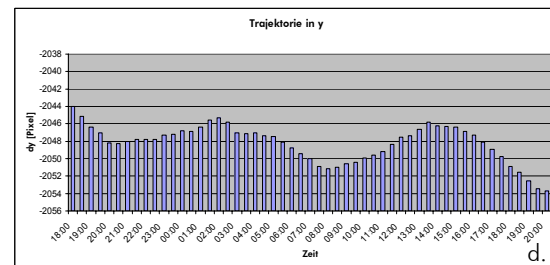
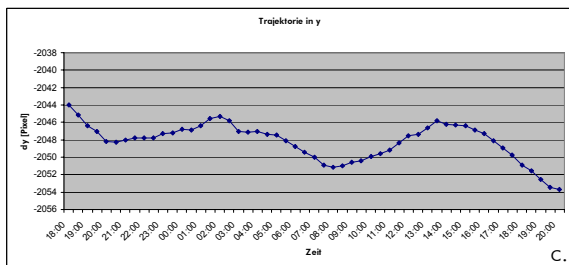
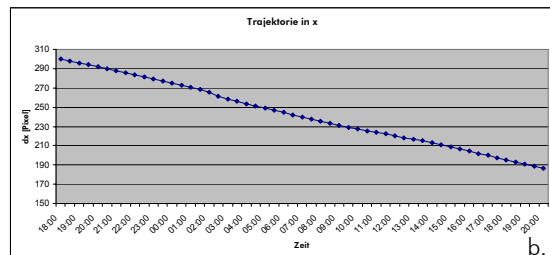
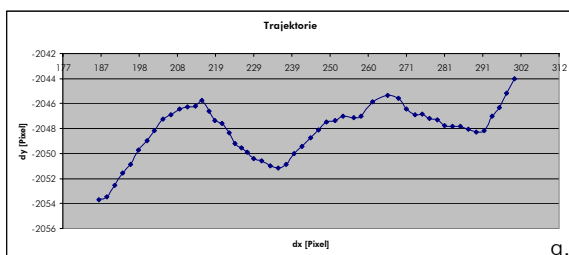


Abbildung 5-23: Microsoft Office Excel-Diagramme

- a. x/y-Trajektorie; Liniendiagramm
- b. x-Trajektorie; Liniendiagramm
- c. y-Trajektorie; Liniendiagramm
- d. y-Trajektorie; Balkendiagramm



Auch ein Videofilm ist für eine anschauliche Darstellung der Trajektorien geeignet. Dieser wird in dem Programm „2-DMA“ über alle Bilder der Sequenz erstellt und beinhaltet das Patch des jeweiligen Features im aktuellen Bild sowie die vorangegangenen Bildpunktpositionen (Abbildung 5-24). Sowohl die Größe des einzubeziehenden Bildausschnittes als auch die Framerate des zu erstellenden Videos sind über die Programmoberfläche variierbar.

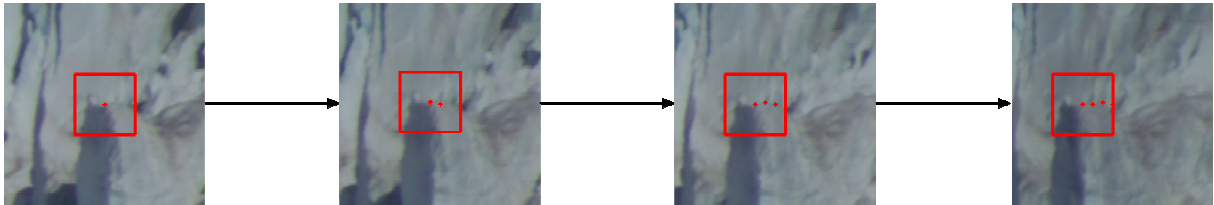


Abbildung 5-24: Einzelne Frames eines Videofilms der Trajektorien



## Kapitel 6

# Überführung der Ergebnisse in den Objektraum

## 6.1 Überblick

Ein weiterer Schritt zur Validierung der Daten in Hinblick auf die zeiteninduzierten Variationen der Gletscherbewegung besteht in der Überführung der gewonnenen Ergebnisse in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Hierzu werden die Bildkoordinaten durch eine projektive Transformation in eine horizontale Ebene, welche sich etwa 200 Meter unterhalb des Projektionszentrums der Kamera befindet, überführt. Das Ziel ist, Aussagen über die Größenordnungen der berechneten Vektoren im Objektraum zu treffen.

Die Voraussetzung für solch eine Einzelbildentzerrung ist die Kenntnis der Orientierung der Bilder im Raum. Dabei wird die innere Orientierung als gegeben vorausgesetzt und die Parameter der äußeren Orientierung können über eine stereoskopische Bildzuordnung berechnet werden (vgl. Kapitel 6.3.1). Für jenen Zweck ist die Bestimmung von Passpunkten im Objektraum notwendig.

Wie im Kapitel 2.3 aufgeführt, erfolgten die Passpunktmessungen in der Örtlichkeit innerhalb eines lokal angelegten 3D-Koordinatensystems mit einem Tachymeter. Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt in Punkt  $N1$  und die Bezugsrichtung (Nullrichtung) verläuft von  $N1$  zu  $N4$ . Die  $Z$ -Achse schneidet den Ursprung und steht senkrecht auf der  $(X, Y)$ -Ebene. Zweckdienlich wurde die  $X$ -Achse nahezu parallel zum Gletscherstrom ausgerichtet. Die Abbildung 6-1a zeigt den 2D-Plot der  $(X, Y)$ -Ebene des lokalen Koordinatensystems. In Abbildung 6-1b ist ein Satellitenbildausschnitt des Gletschers Jakobshavn Isbræ, überlagert mit den Positionen der Tachymeterpunkte  $N1$  bis  $N5$ , dargestellt.

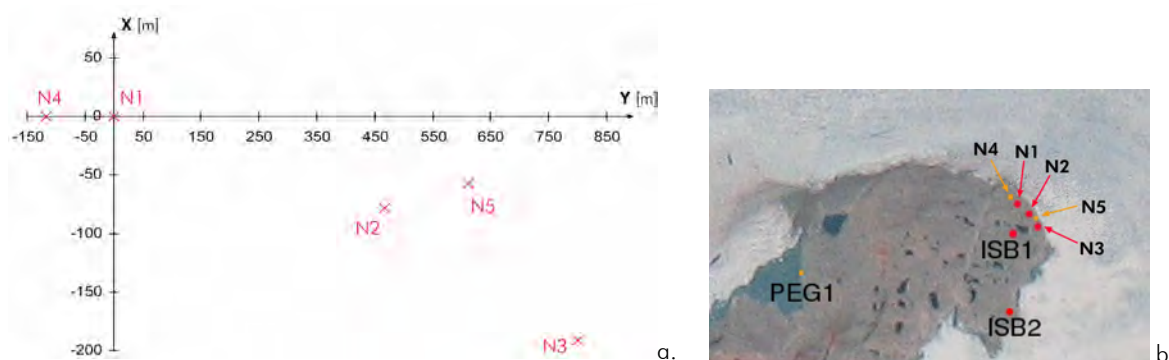


Abbildung 6-1: Lokales Koordinatensystem  $N1$ - $N4$

a. 2D-Plot der  $(X, Y)$ -Ebene

b. Satellitenbild mit Tachymeterpunkten  $N1$  bis  $N5$  (nach TU Dresden, IPG, 2005)

Auf der stabilen Landmasse, etwa 200 Meter oberhalb des Gletscherstroms, befinden sich die in der Abbildung 6-2 zu sehenden Zielmarken. Diese wurden mit einem Tachymeter aufgemessen und in das oben definierte Koordinatensystem integriert. Darüber hinaus wurden, ebenfalls durch Tachymeteraufnahmen, markante Punkte der Gletscherfront zu mehreren Epochen bestimmt.



Abbildung 6-2: Verteilung der Zielmarken auf dem stabilen Vordergrund des Gletscherstroms

Ein detailliertes Übersichtsbild mit allen Paß- und Gletscherpunkte, ist dem Datenträger (DVD:\Kapitel\_6\Passpunkte\) zu entnehmen. Die lokalen Objektkoordinaten der Tachymeterpunkte sowie die Bild- und lokalen Objektkoordinaten der Zielmarken und der Gletscherpasspunkte, welche durch die geodätischen Messungen vom 20.08.2004 bestimmt wurden, sind im Anhang A.7 beigefügt.

## 6.2 Grundlagen der zentralperspektivischen Abbildung

Die mathematische Grundlage eines jeden Abbildungsvorganges in der konventionellen Photogrammetrie ist das Modell der Zentralperspektive. Über sie kann, unter Kenntnis der Abbildungsgeometrie des Sensors (innere Orientierung) und der Lage der Kamera im Raum (äußere Orientierung), die Bildebene und der Objektraum zueinander in Beziehung gesetzt werden. Somit kann aus dem Schnitt von mindestens zwei korrespondierenden Bildstrahlen ein dreidimensionaler Objektpunkt bestimmt werden.

### 6.2.1 Innere Orientierung eines Bildes

Die innere Orientierung beschreibt das geometrische Modell der Kamera. Die drei kameraspezifischen Größen der inneren Orientierung sind

- die Kamerakonstante  $c$  und
- die Lage des Bildhauptpunktes  $H(x_0, y_0)$ .

Die Kamerakonstante  $c$  quantifiziert den Abstand zwischen der Bildebene und dem Projektionszentrum  $O$ , durch welchen alle Bildstrahlen geradlinig verlaufen. Bei einer Fokussierung der Kamera auf Unendlich entspricht die Kamerakonstante im Idealfall der Objektivbrennweite  $f$ . Der Bildhauptpunkt  $H$  stellt den Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Bildebene dar. Dieser Schnittpunkt ist nicht zwingend äquivalent mit der Bildmitte. Die Abbildung 6-3 veranschaulicht die geometrischen Beziehungen zwischen den inneren Orientierungselementen.

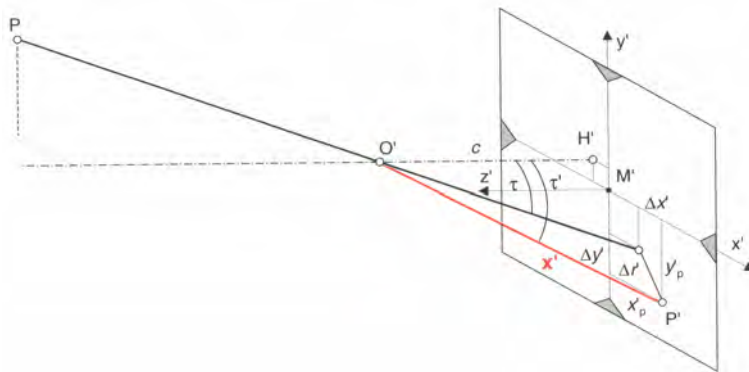


Abbildung 6-3: Innere Orientierung eines Bildes (LUHMANN, 2000)

Da das Messbild in der Praxis keine exakte Zentralprojektion darstellt, werden neben den drei Hauptelementen der inneren Orientierung auch die Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive berücksichtigt. Diese achsbezogenen Korrekturwerte  $\Delta x$  und  $\Delta y$  (vgl. Abbildung 6-3) der Abbildungsfehler erfassen die systematischen Fehler von CCD-Kameras und verschlechtern die erreichte Bildgenauigkeit. Zu diesen Effekten gehören Fehler der Optik (z.B. Objektivverzeichnungen), topographische Fehler des Sensors und Fehler der Kameramechanik (z.B. zeitliche Instabilität der Sensorfläche im Kameragehäuse).

Der Abbildungsvektor  $\underline{x}$  in Abbildung 6-3, der den Objektpunkt  $P(X_P, Y_P, Z_P)$  durch das Projektionszentrum  $O$  auf die Bildebene im Punkt  $P'(x_P, y_P)$  abbildet, lautet somit:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P - x_0 + \Delta x \\ y_P - y_0 + \Delta y \\ -c \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Die Bestimmung der inneren Orientierung (Kalibrierung) geschieht in der Nahbereichsphotogrammetrie im Allgemeinen indirekt aus photogrammetrischen Beobachtungen und ist bei hohen Genauigkeitsansprüchen für jede Messepoche durchzuführen. Hierfür sind die Verfahren der Selbst- und Simultankalibrierung die verbreitetsten Methoden im Nahbereich (MAAS, 1997; LUHMANN, 2000).

### 6.2.2 Äußere Orientierung eines Bildes

Die folgenden sechs Parameter der äußeren Orientierung legen die räumliche Lage und die Ausrichtung der Kamera im übergeordneten Koordinatensystem fest:

- Das Projektionszentrum  $O(X_0, Y_0, Z_0)$  der Kamera als gemeinsamer Bezugspunkt von dem Bild- und dem Objektkoordinatensystem,
- drei Rotationswinkel  $\varphi$ ,  $\omega$  und  $\kappa$ .

In Abbildung 6-4 sind die drei Translationen, welche die Lage des Projektionszentrums beschreiben, sowie die räumlichen Drehwinkel  $\varphi$  (Azimut),  $\omega$  (Neigung um Kippachse) und  $\kappa$  (Kantung um Aufnahmeachse) für die terrestrische Photogrammetrie dargestellt.

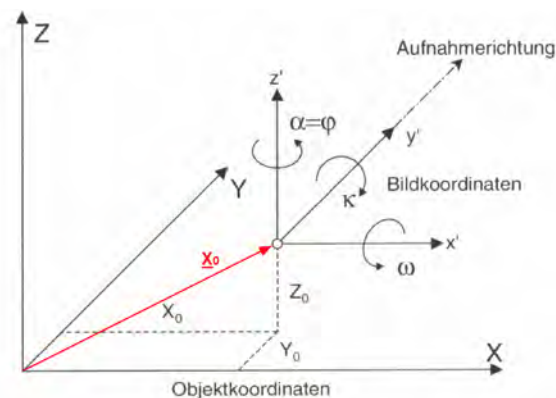


Abbildung 6-4: Äußere Orientierung eines Bildes in der terrestrischen Photogrammetrie (nach LUHMANN, 2000)

Die oben genannten drei Translationen bilden den in Abbildung 6-4 gezeigten Vektor

$$\underline{X}_0 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}. \quad (6.2)$$

Die Drehung im Raum wird mathematisch über die Rotationsmatrix

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

mit, in Abhängigkeit von der Drehreihenfolge,

$$\underline{R} = \underline{R}_\omega \cdot \underline{R}_\varphi \cdot \underline{R}_\kappa$$

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \varpi \sin \kappa + \sin \varpi \sin \varphi \cos \kappa & \cos \varpi \cos \kappa - \sin \varpi \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \varpi \cos \varphi \\ \sin \varpi \sin \kappa - \cos \varpi \sin \varphi \cos \kappa & \sin \varpi \cos \kappa + \cos \varpi \sin \varphi \sin \kappa & \cos \varpi \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

bzw.

$$\underline{R} = \underline{R}_\varphi \cdot \underline{R}_\omega \cdot \underline{R}_\kappa$$

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \varpi \sin \kappa & -\sin \varphi \cos \varpi & \cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \varpi \cos \kappa \\ \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \varpi \sin \kappa & \cos \varphi \cos \varpi & \sin \varphi \sin \kappa - \cos \varphi \sin \varpi \cos \kappa \\ -\cos \varpi \sin \kappa & \sin \varpi & \cos \varpi \cos \kappa \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

festgelegt.

Die Elemente der äußeren Orientierung werden indirekt durch die Messung der Bildkoordinaten bekannter Objektpunkte ermittelt (vgl. Kapitel 6.3.1).

### 6.2.3 Kollinearitätsgleichungen

Der in Abbildung 6-3 und 6-4 veranschaulichte Zusammenhang zwischen den Koordinaten  $x_p$  und  $y_p$  eines Bildpunktes  $P'$  und den Koordinaten  $X_P, Y_P, Z_P$  eines Objektpunktes  $P$  kann mathematisch über die sogenannten Kollinearitätsgleichungen (6.6) beschrieben werden:

$$x_p = x_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_P - X_0) + r_{21} \cdot (Y_P - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_P - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_P - X_0) + r_{23} \cdot (Y_P - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_P - Z_0)} + \Delta x$$

$$y_p = y_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_P - X_0) + r_{22} \cdot (Y_P - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_P - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_P - X_0) + r_{23} \cdot (Y_P - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_P - Z_0)} + \Delta y$$

Auf eine ausführliche Herleitung wird verzichtet und auf (KRAUS, 1982) bzw. (LUHMANN, 2000) verwiesen.

Die Gleichungen (6.6) stellen die Bildkoordinaten als Funktion der Objektkoordinaten und der Orientierungselemente dar. Sind die neun Parameter, welche die Zentralprojektion eines Bildes eindeutig festlegen, sowie optional die Korrekturwerte für die Abbildungsfehler des Sensors bekannt, kann folglich ein beliebiger Objektpunkt in das Bildkoordinatensystem transformiert werden. Die nicht eindeutige Umkehrung der Transformation vom Bild- in den Objektraum wird in Kapitel 6.3.2 behandelt.

## 6.3 Einzelbildauswertung

Eine Möglichkeit, die Objektkoordinaten der im Bildraum verfolgten Gletscherpunkte zu bestimmen, wird in der Abbildung 6-5 zunächst schematisch aufgezeigt und in den folgenden Abschnitten theoretisch behandelt.

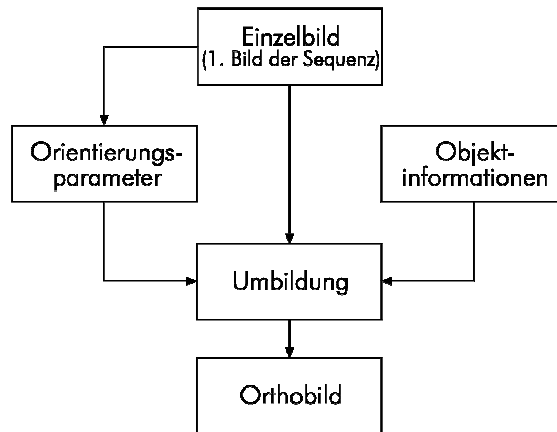


Abbildung 6-5: Einzelbildauswertung (nach LUHMANN, 2000)

Für eine Objektrekonstruktion sind die Orientierungsdaten der Bilder sowie geometrische Zusatzinformationen des Objektes, zum Beispiel Passpunkte, nötig. Da es sich bei den vorliegenden Gletscherbildszenen um monokulare Aufnahmen handelt, beschränkt sich die Kenntnis der Orientierungsparameter auf das erste Bild der Sequenz.

Über eine rechnerische Umbildung der Aufnahmen in eine andere Projektion, in diesem Fall eine projektive Transformation, entsteht ein auf das lokal angelegte Koordinatensystem entzerrtes, nicht lagerichtiges Orthobild.

### 6.3.1 Bestimmung der Orientierungsparameter

#### (a) Innere Orientierung

Die Genauigkeitsforderungen der hier behandelten Gletscherbildauswertung bewegen sich, übertragen in den Objektraum, im Zentimeterbereich. Somit können die folgenden Vereinbarungen getroffen werden:

- Die Kamerakonstante entspricht der Objektivbrennweite.
- Der Bildhauptpunkt liegt in der Mitte des digitalen Bildes.

Weiterhin können die systematischen Fehler der Kamera vernachlässigt werden, da sich die Verzeichnung des Normalwinkelobjektives im Zehntelpixelbereich bewegt und in Folge dessen sie keinen signifikanten Einfluss auf die erstrebten Auswertegenauigkeiten haben. Daher wird von einer idealen zentralperspektivischen Abbildung ausgegangen und eine zusätzliche Kalibrierung der Kamera kann entfallen.

Die Tabelle 6-1 zeigt die Parameter der inneren Orientierung der verwendeten Kamera Kodak DCS 14n unter Einsatz des Normalwinkelobjektives.



Kamerakonstante $c$ [mm]	50
Bildhauptpunkt $H$ [mm]	$x_0 = 0$ $y_0 = 0$

Tabelle 6-1: Elemente der inneren Orientierung (Kodak DCS 14n, Normalwinkelobjektiv)

### (b) Äußere Orientierung

Die Bestimmung der sechs Parameter der äußeren Orientierung für das erste Bild der Normalwinkelsequenz vom 20.08.2004 erfolgt indirekt über die Verknüpfung von Stereobildern (DVD:\Kapitel\_6\Stereobilder\), die zwei Tage zuvor aufgenommen wurden, zu einem Bildblock im Rahmen einer Bündelblockausgleichung (Mehrbildorientierung, Bündeltriangulation). Die Geometrie der Messkonfiguration ist in Abbildung 6-6 dargestellt.



Abbildung 6-6: Messkonfiguration für die Stereobildaufnahmen

Die Bündelblockausgleichung liefert einen rechnerischen Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten und den Objektkoordinaten für beliebig viele im Raum angeordnete Bilder. Die in Kapitel 6.2 bereits vorgestellten Beziehungen zwischen den Bildkoordinaten, dem Projektionszentrum der Kamera sowie den Objektkoordinaten erweitern sich zu sogenannten Strahlenbündeln. Diese Strahlenbündel werden jeweils durch einen Objektpunkt mit seinen zugehörigen und untereinander korrespondierenden Bildkoordinaten sowie den Projektionszentren der Kamerastandpunkte definiert (Abbildung 6-7).

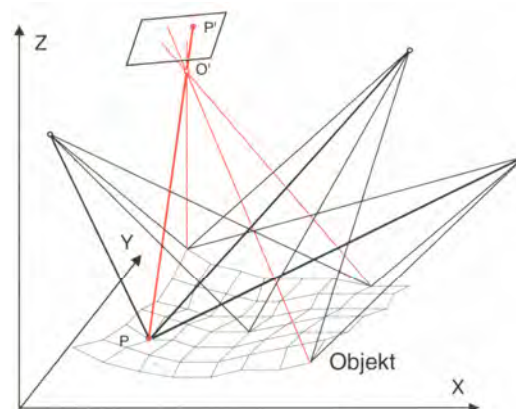


Abbildung 6-7: Bündelblockausgleichung (LUHMANN, 2000)

Eine Vertiefung der Thematik der Bündelblockausgleichung ist in (KRAUS, 1982; KRAUS, 1984; LUHMANN, 2000) zu finden.

Die wichtigste Forderung der Bündelblockausgleichung ist eine stabile Geometrie der einzelnen Strahlen des jeweiligen Strahlenbündels. Dabei sollen sich alle homologen Bildstrahlen optimal in ihrem Objektpunkt schneiden. Eine gute Netzgeometrie in allen drei Koordinatenrichtungen ist über eine lange Basis und dementsprechend große Winkel zwischen den Bildstrahlen zu erzielen. Je größer die Basen des Stereobildverbandes sind, desto geringer ist allerdings auch der Überlappungsbereich der Bilder. Ein großer Überlappungsbereich wird durch die Wahl einer kurzen Basis erreicht. Problematisch hierbei ist aber, dass die Winkel zwischen den Bildstrahlen korrespondierender Punkte sehr kleine Größenordnungen erreichen können. Dies wiederum führt zu einem schlechten Basis-Höhen-Verhältnis und folglich zu einer geringen Tiefengenauigkeit. Geometrisch kann dieses Problem durch zwei Geraden veranschaulicht werden, die einander unter einem sehr kleinen Winkel schneiden (schleifender Schnitt). In einem solchen ungünstigen Fall wirken sich bereits kleine Änderungen der Geradensteigung wesentlich auf den Schnittpunkt aus. Die in Abbildung 6-6 aufgezeigte Netzgeometrie für die Stereoaufnahmen am Jakobshavn Isbræ Gletscher weist eine für die Ausdehnungsgröße des Gletscherstroms relativ kurze Basis zwischen den Bildern auf. Allerdings ist die Wahl der Basislänge als ein Kompromiss zwischen einem bestmöglichen Überlappungsbereich, der Sichtbarkeitsbedingung der gut identifizierbaren Zielmarken im Vordergrund in allen Stereobildern und einer guten Tiefengenauigkeit zu verstehen.

Die mathematische Grundlage der Bündeltriangulation sind die in Kapitel 6.2.3 aufgeführten Kollinearitätsgleichungen der zentralperspektivischen Abbildung. Als Eingabedaten stehen die Bildkoordinaten von zuvor definierten Verknüpfungspunkten sowie die Bild- und Objektkoordinaten von Passpunkten zur Verfügung. Innerhalb einer Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen werden die Verbesserungsgleichungen

$$\begin{aligned}x_i + vx_i &= F\left(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x_{0k}, y_{0k}, c_k, \Delta x_k, X_i, Y_i, Z_i\right) \\y_i + vy_i &= F\left(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x_{0k}, y_{0k}, c_k, \Delta y_k, X_i, Y_i, Z_i\right)\end{aligned}\tag{6.7}$$

mit  $i$ : Punktindex  
 $j$ : Bildindex  
 $k$ : Kameraindex

für jeden gemessenen Bildpunkt aufgestellt. Dieser erweiterte Ansatz des bekannten räumlichen Rückwärtsschnittes stellt die Bildkoordinaten als Funktion sämtlicher Unbekannten dar. Zu diesen Unbekannten zählen die Elemente der inneren und äußeren Orientierung sowie die 3D-Objektpunktkoordinaten. Für den hier diskutierten Zweck sind jedoch nur die Orientierungselemente des Bildes „M“ (vgl. Abbildung 6-6 und DVD:\Kapitel\_6\Stereobilder\M.jpg) von Interesse. Entsprechend dem Ansatz aus Kapitel 2.2.2 wird der Lösungsvektor, der die Zuschläge zu den Näherungswerten der unbekannt Parameter enthält, in einer iterativen Ausgleichung nach den kleinsten Quadraten (Minimierung der Fehler der gemessenen Bildkoordinaten) bestimmt.

Die Auswertung der generierten Stereoaufnahmen vom 18.08.2004 erfolgt mit dem Programm „PhotoModeler“ (Eos Systems Inc.). Mit dieser Software werden zunächst die relative Orientierung zwischen den Stereobildern durch die Bildmessungen von homologen Punkten und die absolute Orientierung über Passpunktinformationen hergestellt (KRAUS, 1982). Im Anschluss sind die Bildkoordinaten weiterer Pass- und Verknüpfungspunkte in einem gewählten Referenzbild zu bestimmen und die Positionen der zugehörigen korrespondierenden Bildpunkte in den restlichen Aufnahmen des Bildverbandes zu lokalisieren und markieren. Die relative Orientierung des Bildverbandes zueinander ist zu diesem Zeitpunkt bereits geschehen und ermöglicht die eindimensionale interaktive bzw. automatische Suche korrespondierender Bildpunkte auf einer Kernline (KRAUS, 1982). Mit diesen Eingabedaten erfolgt die oben beschriebene Mehrbildtriangulation automatisch mit dem Programm „PhotoModeler“. Nach einer vollständigen Ausgleichung können über die Analyse der ermittelten statistischen Genauigkeitsmaße (Kontrolle auf Ausreißer) die Berechnungen sukzessiv verfeinert werden.

Die Ergebnisse der Stereobildauswertungen für die äußere Orientierung sind in der Tabelle 6-2 zusammengefasst und die Abbildungen 6-8a bis 6-8c zeigen die softwareinternen Festlegungen für das Bild-, Modell- und Objektkoordinatensystem.

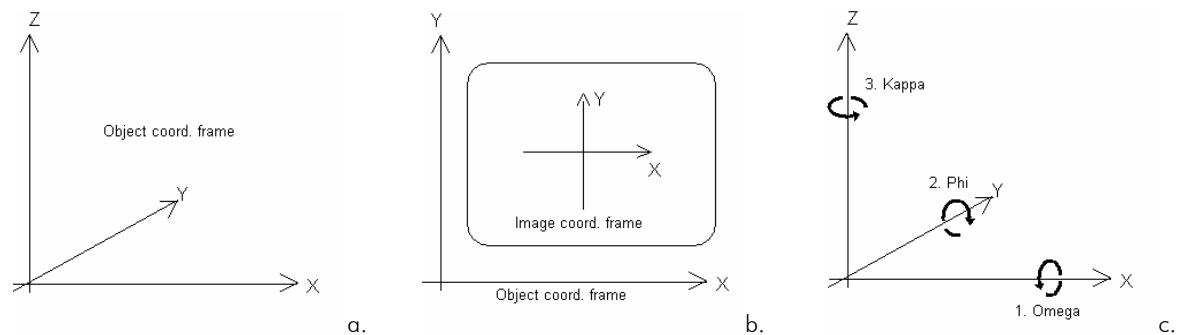


Abbildung 6-8: Festlegung der Koordinatensysteme und der Drehreihenfolge im Programm „PhotoModeler“

- a. Terrestrisches Objektkoordinatensystem
- b. Bildkoordinatensystem
- c. Drehreihenfolge

Projektionszentrum $O$ [m]	$X_0 = -0,684$ $Y_0 = 37,117$ $Z_0 = -12,211$
Drehwinkel [°]	$\omega = 89,454$ $\varphi = -3,947$ $\kappa = -0,341$

Tabelle 6-2: Elemente der äußeren Orientierung des Bildes „M.jpg“

Die angegebenen Parameter für die äußere Orientierung sind jedoch nur bedingt auf die Normalwinkelsequenz übertragbar. Zum einen entspricht die Position und Ausrichtung der Kamera am Tag der Aufnahme des Stereobildes „M“ (18.08.2004) nicht exakt dem Standpunkt sowie der Orientierung des Sensors vom 20.08.2004 (Normalwinkelsequenz). Des Weiteren ist eine Extrapolation der Objektkoordinaten vom 20.08.2004 auf den 18.08.2004 notwendig. Ebenso erwies sich die Suche nach korrespondierenden Punkten in den Stereobildern des Gletschers als schwierig. Eine automatische Detektion durch das Programm „PhotoModeler“ ist lediglich bei den eindeutig identifizierbaren und kontrastreichen Zielmarken mit einem Schwerpunktoperator möglich. Die Zuordnung der homologen Gletscherpunkte muss interaktiv am Bildschirm erfolgen. Die aufgezeigten Bedingungen führen zu einem Genauigkeitsverlust bei der Bestimmung der äußeren Orientierungselemente.

### 6.3.2 Projektive Transformation

Die Auflösung der Kollinearitätsgleichungen (6.6) nach den Objektkoordinaten  $X$  und  $Y$  ergibt (ohne Verzeichnung):

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{11} \cdot (x - x_0) + r_{12} \cdot (y - y_0) - r_{13} \cdot c}{r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) - r_{33} \cdot c} \quad (6.8)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{21} \cdot (x - x_0) + r_{22} \cdot (y - y_0) + r_{23} \cdot c}{r_{31} \cdot (x - x_0) + r_{32} \cdot (y - y_0) + r_{33} \cdot c}$$

Bei bekannter innerer und äußerer Orientierung ist es über (6.8) möglich, für jeden Bildpunkt der vorliegenden Bildsequenz die zugehörigen Lagekoordinaten im Objektraum zu berechnen.

Die Kollinearitätsgleichungen (6.6) besagen, dass zu jedem Objektpunkt ein Bildpunkt eindeutig zugeordnet werden kann. Der Umkehrschluss trifft auf die Gleichungen (6.8) jedoch nicht zu. Infolge der  $Z$ -Koordinate auf der rechten Seite der Gleichungen gehören zu jedem Bildpunkt unendlich viele Objektpunkte. Aus einem Einzelbild ist daher die Rekonstruktion eines räumlichen Objektes ohne Tiefeninformationen (z.B. aus einem Stereobildpartner oder einem Höhenmodell) nicht möglich. In Kapitel 6.4.2 wird eine Möglichkeit zur Beschaffung der Information über die  $Z$ -Koordinate diskutiert.

Aufgrund der beschriebenen Nichteindeutigkeit der zentralperspektivischen Abbildung vom Bild in den Objektraum wird im Folgenden angenommen, dass sich alle Objektpunkte des Gletschers in einer Horizontalebene, circa 200 Meter unterhalb der Kamera, befinden. Die Auswirkung einer solchen Annahme ist in Abbildung 6-9 schematisch dargestellt:

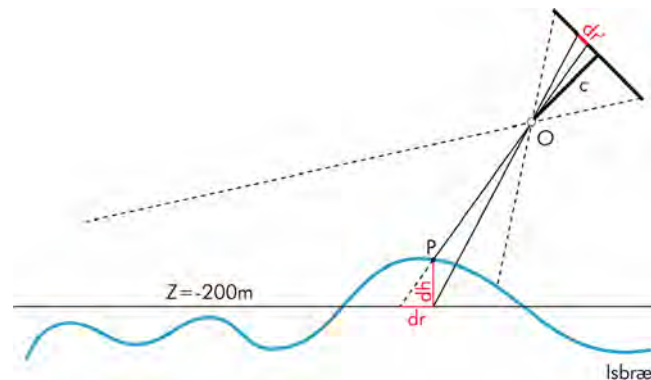


Abbildung 6-9: Radialer Versatz durch Höhenunterschied

Der aus der Luftbildphotogrammetrie bekannte „Hochhaus- oder Umkippeffekt“, verursacht durch die Unebenheit der Geländeoberfläche, ruft in der Bildebene einen radialen Versatz  $\Delta r'$  hervor. In dem vorliegenden Fall verhält es sich umgekehrt: Die projektive Transformation beschreibt die zentralperspektivische Abbildung zweier ebener Koordinatensysteme aufeinander. Das von Natur aus ebene Bildkoordinatensystem wird auf das dreidimensionale  $(X, Y, Z)$ -Objektkoordinatensystem mit  $Z = const.$  abgebildet. Die Bildelemente werden, um den Betrag  $\Delta r$  versetzt, durch das Projektionszentrum  $O$  auf die Referenzebene projiziert. Folglich sind die Relationen der Bewegungsvektoren der verfolgten Gletscherpunkte untereinander zwar korrekt, allerdings weisen die Trajektorien falsche Maßstäbe auf.

Der in Abbildung 6-8 gezeigte Effekt ist abhängig von

- der Objektivbrennweite sowie
- den Höhenunterschieden des aufgenommenen Objektes.

Eine Objektivbrennweite gegen Unendlich verursacht in Verbindung mit einer vertikalen Blickrichtung auf das Objekt (Orthogonalprojektion) keinen radialen Versatz. Je kürzer die Brennweite und je deutlicher die Abweichung vom Normalfall ist, desto größer wird der radiale Versatz. Weiterhin ist klar ersichtlich, dass sich der Effekt mit stärker ausgeprägten Höhenunterschieden vergrößert.

Zur Darstellung der Güte der berechneten Orientierungsparameter sind in den Abbildungen 6-10a und 6-10b die Abweichungen der nach (6.8) ermittelten Koordinaten von den Objektkoordinaten der geodätischen Messungen (20.08.2004) abgebildet. Betrachtet werden hierbei die vier Zielmarken M1 bis M4 im Vordergrund des Gletscherstroms (nur Abbildung 6-10a) sowie die zusätzlich eingemessenen Punkte der Gletscherfront (GS1 bis GS12). Die Bildkoordinaten entstammen dem ersten Bild der Normalwinkelsequenz vom 20.08.2004.

Darüber hinaus zeigt Abbildung 6-10c die Differenzen zwischen den nach (6.8) ermittelten Koordinaten und den Koordinaten, die mit dem Programm „PhotoModeler“ im Rahmen der Ausgleichung zur Bestimmung der äußeren Orientierungselemente berechnet wurden. Neben den Werten der vier Zielmarken M1 bis M4 sind die Abweichungen weiterer Passpunkte der Gletscheroberfläche aufgetragen. Die Messung der Bildkoordinaten erfolgte im mittleren Stereobild „M“.

Für die Berechnungen der in den Abbildungen 6-10a und 6-10c dargestellten Abweichungen finden die „wahren“ Höhen im Objektraum ( $N1-N4$ -Koordinatensystem) Anwendung. So wird pro Passpunkt eine Ebene in der jeweiligen Höhe in den Objektraum gelegt und der Bildstrahl über die Gleichungen (6.8) mit dieser geschnitten. Die abgebildeten Abweichungen entsprechen dem Lageunterschied zwischen dem Schnittpunkt des Strahls mit der Ebene und der ursprünglichen ( $X,Y$ )-Position der Passpunkte. Im Gegensatz dazu zeigt die Abbildung 6-10b die Ergebnisse unter Verwendung der oben aufgeführten Referenzebene in einer Höhe von  $Z = -200m$ .

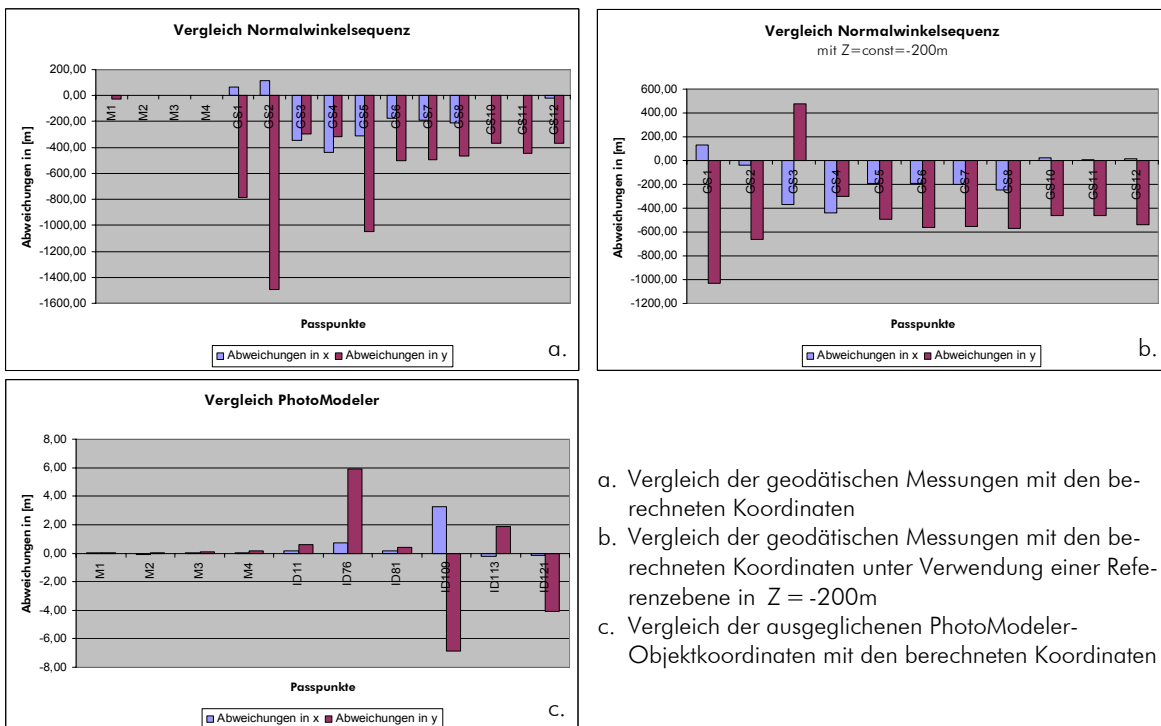


Abbildung 6-10: Soll-Ist-Vergleich der Lagekoordinaten

Die Abbildung 6-10a verdeutlicht, dass trotz korrekter Höhenwerte (kein Einfluss von Lagefehlern) die Abweichungen, vor allem in y-Richtung, sehr groß sind. Die Ursachen hierfür liegen in der indirekten Bestimmung der äußeren Orientierungselemente für das erste Bild der Normalwinkelsequenz sowie der Extrapolation der geodätischen Messungen vom 20.08.2004 auf den 18.08.2004, den Aufnahmetag der Stereobilder (vgl. Kapitel 6.3.1). Weiterhin ist das Auffinden der tachymetrisch eingemessenen Gletscherpasspunkte im Bild problematisch, da die in der Örtlichkeit markanten Zielpunkte in dem Bild weniger stark ausgeprägt sind. Die Bildmessgenauigkeit liegt hierbei deutlich über einem Pixel. Für den Passpunkt „GS9“ konnte der zugehörige Bildpunkt aufgrund fehlender Textur gar nicht bestimmt werden. Die Abweichungen der Zielmarken hingegen bewegen sich in einem Bereich unter einem Meter, was durch den kurzen Abstand zum Projektionszentrum, und folglich einem geringeren geometrischen Einfluss der ermittelten Orientierungsparameter, zu erklären ist.

Neben den oben diskutierten Thematiken, wirkt sich zusätzlich ein Lagefehler infolge der Annahme einer mittleren Geländehöhe nachteilig auf die Genauigkeit aus (siehe Abbildung 6-10b). Die vollständige Größenordnung des radialen Versatzes kann, aufgrund der Übertragung der Orientierungselemente auf das erste Bild der Normalwinkelsequenz und den damit verbundenen Genauigkeitsverlusten nicht exakt abgeschätzt werden.

Die in Abbildung 6-10c zu sehenden günstigen Abweichungen bestätigen das berechnete Orientierungsmodell für das mittlere Stereobild und belegen, dass die sehr großen Differenzen (vgl. Abbildungen 6-10a und 6-10b) nur durch die erläuterten Fehlerquellen hervorgerufen werden. Diese Überprüfung führt allerdings nicht zu Null-Abweichungen, da nicht alle Fehler der Objektkoordinaten bei der Ausgleichung zur Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter vollständig gegen Null zu minimieren sind.

Die Berechnungen der Abweichungen sowie das PhotoModeler-Protokoll sind auf dem beigefügten Datenträger (DVD:\Kapitel\_6\Abweichungen\ ) vorhanden. Eine Einschätzung der Brauchbarkeit der berechneten Elemente der äußeren Orientierung, unter an betracht der aufgeführten Koordinatenabweichungen, ist nicht Gegenstand dieser Arbeit

## 6.4 Weitere Möglichkeiten zur Objektraumüberführung

In diesem Abschnitt werden weitere Möglichkeiten zur Überführung der gewonnenen Ergebnisse vom Bild- in den Objektraum behandelt. Die nun aufgezeigten Fälle verstehen sich als Erweiterung zu den oben aufgeführten Verfahren bzw. als eigenständige Lösungsansätze. Auch werden die Gründe für eine Nichtanwendbarkeit dieser Algorithmen auf die Gletscherbildszenen des Jakobshavn Isbræ aufgeführt.

### 6.4.1 Ebene Entzerrung

Durch die Zusammenfassung der Orientierungselemente in Gleichung (6.8) ergeben sich, ohne die Allgemeinheit der Aussagen einzuschränken, die Abbildungsgleichungen der ebenen Zentralprojektion (Herleitung in (KRAUS, 1982)):

$$X = \frac{a_0 + a_1x + a_2y}{c_1x + c_2y + 1} \quad (6.9)$$

$$Y = \frac{b_0 + b_1x + b_2y}{c_1x + c_2y + 1}$$

Die lineare Form von (6.9) lautet

$$\begin{aligned} a_0 + a_1x + a_2y - X - c_1xX - c_2yX &= 0 \\ b_0 + b_1x + b_2y - Y - c_1xY - c_2yY &= 0 \end{aligned} \quad (6.10)$$

und eignet sich als Beobachtungsgleichung für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Kapitel 2.2.2). Zur Bestimmung der acht Koeffizienten im Rahmen eines Ausgleichungssystems müssen mehr als vier Passpunkte im übergeordneten Koordinatensystem (Referenzsystem) mit ihren Bildkoordinaten vorliegen. Über die berechneten Transformationsparameter  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  und  $c_1, c_2$  lassen sich mit (6.9) weitere Bildkoordinaten in ein zweidimensionales, also ebenes, Zielsystem ( $Z = 0$ ) abbilden, ohne die inneren und äußeren Orientierungsparameter des Bildes im Voraus bestimmen zu müssen. Die ebene projektive Entzerrung verwendet in diesem Beispiel für alle Bildpunkte die gleichen Transformationsparameter. Bei nichtebenen Objekten, wie dem Jakobshavn Isbræ Gletscher, müsste de facto jeder Bildpunkt als Funktion seiner Objektkoordinaten entzerrt werden.

Mit dem Programm „PhotoStretch“ (KLUGE, HTW Dresden) wird die oben beschriebene ebene Entzerrung realisiert. Da auch hier angenommen wird, dass es sich bei der Gletscheroberfläche um eine Ebene handelt, konvergiert die Lösung bei diesem Ansatz sehr schlecht. Die Größenordnungen der Verbesserungen der Koordinatenmessungen sind in den Abbildungen 6-11 und 6-12 zusammengestellt.

Nummer	X (Objekt)	Y (Objekt)	Z (Objekt)	x' (Bild)	z' (Bild)	vX	vZ
✓1	-705,496	3201,628	-222,087	108	2014	-634,367	46,686
✓10	-374,922	1985,114	-212,311	319	2255	66,464	-24,879
✓11	-353,747	2182,802	-202,256	505	2159	85,698	-17,138
✓12	-269,178	2011,395	-221,886	696	2276	210,894	-10,634
✓2	-583,894	3985,691	-152,701	613	1812	-653,452	136,326
✓3	265,259	2885,437	-156,196	1629	1798	55,716	28,175
✓4	323,977	2213,898	-198,397	1434	2073	-103,897	-0,079
✓5	735,420	3072,199	-158,744	3138	1891	-57,943	-17,328
✓6	545,912	2214,668	-207,601	3192	2153	41,027	3,556
✓7	609,986	2200,143	-206,820	3387	2153	0,078	3,159
✗8	752,919	2210,827	-212,564	3780	2150		

Abbildung 6-11: Bild- und Objektkoordinaten der Gletscherpasspunkte sowie deren Verbesserungen

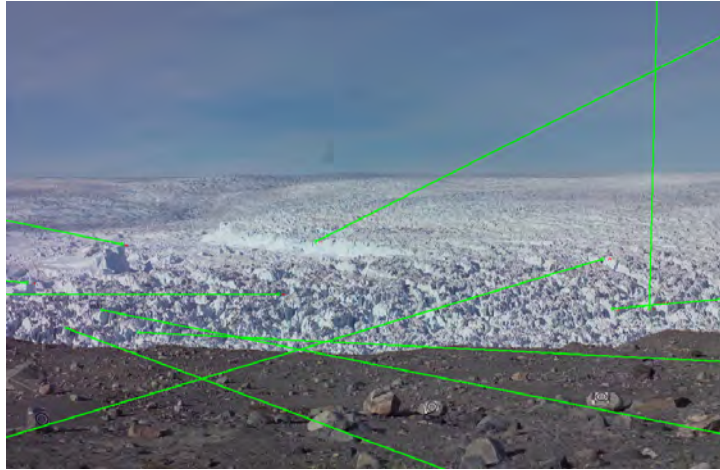


Abbildung 6-12: Visualisierung der Verbesserungen der Gletscherpasspunkte

### 6.4.2 Verwendung digitaler Geländemodelle

Mit digitalen Geländemodellen (DGM) ist eine vollständige Objektrekonstruktion unter der Vermeidung von Ebenheitsannahmen möglich. Das Prinzip der Projektion der Pixel des Eingabebildes in den Objektraum ist in Abbildung 6-13 dargestellt.

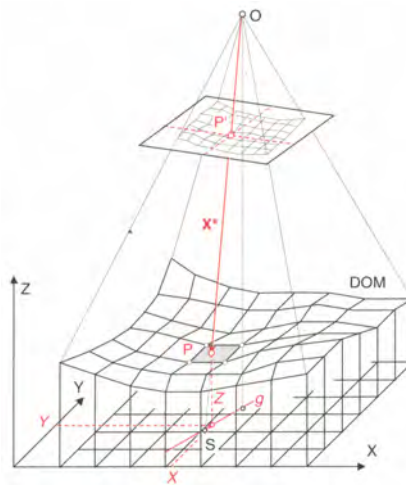


Abbildung 6-13: Räumliche Punktbestimmung im DGM (LUHMANN, 2000)

Jedes Bildelement kann bei bekannter Orientierung über die Kollinearitätsbedingungen in den Objektraum projiziert werden. Durch den Schnitt des projizierten Bildstrahls mit dem digitalen Geländemodell erhält man die  $X$ -,  $Y$ - und  $Z$ -Koordinate des zugehörigen Objektpunktes. Im Einzelnen sind die folgenden Schritte notwendig:

- Die Bildkoordinaten  $x, y$  des Bildelements  $P'$  sowie die Kamerakonstante  $c$  legen die Raumrichtung im Bildkoordinatensystem fest (Bildvektor  $\underline{x}$ ).
- Über die äußere Orientierung wird der Bildvektor  $\underline{x}$  in den Raumvektor  $\underline{X}^*$  überführt.
- Der Raumvektor  $\underline{X}^*$  schneidet das DGM im zugehörigen Objektpunkt  $P$ .



- Es ergeben sich die 3D-Koordinaten des Punktes  $P$ . Die Höhe  $Z$  ist in der Regel durch die Interpolation aus den Höhenwerten der benachbarten Eckpunkte des DGM-Rasters zu bestimmen.

Im Gegensatz zur projektiven Transformation mit einer zuvor definierten Referenzebene im Objektraum liefert das digitale Geländemodell die notwendigen Tiefeninformationen zur eindeutigen Rekonstruktion eines räumlichen Objektes aus einem Einzelbild. Diese Variante eignet sich folglich sehr gut, um die berechneten Bewegungsvektoren des Jakobshavn Isbræ in den Objektraum zu überführen.

Aufgrund der Dynamik des Gletschers ist für genau den Zeitpunkt der Aufnahme ein DGM notwendig. Ein solches DGM liegt jedoch nicht vor und eine eigenständige Generierung mittels Laserscanning ist im Finanzrahmen des Jakobshavn Isbræ-Projektes nicht vorgesehen.

Eine weitere Möglichkeit ist die terrestrische Tachymetermessung von Gletscherpunkten. Mit diesen gewonnenen Objektkoordinaten kann dann ein DGM berechnet werden. Die Anzahl der Punktmessungen sollte hierbei sehr groß sein, um ein möglichst feinmaschiges Modell berechnen zu können.



## Kapitel 7

# Beurteilung der Methoden der Bildzuordnung

Das folgende Kapitel untersucht die vorgestellten Bildzuordnungsverfahren auf ihre Eignung für die Auswertung der Bildsequenzen des Gletschers Jakobshavn Isbræ. Es werden anwendungsbezogene Aussagen über die Qualität der Ergebnisse und die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Matchingmethoden getroffen. Hierbei stehen die Genauigkeit, die Zuverlässigkeit, die Größe des Konvergenzradius und die Effektivität im Vordergrund (Kapitel 7.2). Des Weiteren erfolgt eine Beurteilung der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Matchingstrategien.

## 7.1 Beurteilungskriterien

Für die Beurteilung der vorgestellten Bildzuordnungsverfahren werden die folgenden Kriterien (nach BARNARD/FISCHLER, 1982) aufgestellt:

### (a) Genauigkeit

Die Angabe von Genauigkeitsmaßen ist eines der geeignetsten Mittel für den Vergleich der Qualität von Bildzuordnungen untereinander.

Im Gegensatz zu dem optischen Fluss und der Kreuzkorrelation bietet die Formulierung der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate im Rahmen der Ausgleichsrechnung die Möglichkeit, statistische Genauigkeitsangaben abzuleiten. Somit stehen objektive Kriterien für die Beurteilung der Güte der geschätzten LSM-Ergebnisse zur Verfügung (siehe auch Kapitel 4.4).

Über Referenzmessungen wäre eine Bestimmung von unabhängigen Genauigkeitsangaben für alle vorgestellten Trackingalgorithmen möglich. Da jedoch bei den Bildern des Gletschers Jakobshavn Isbræ keine bekannte Objektverschiebung vorliegt, kann diese einfache Variante zur Generierung von Qualitätsmaßen nicht verwendet werden. Um dennoch einen Gütevergleich für die Bildzuordnungsverfahren zur Verfügung stellen zu können, werden unterschiedliche Testmessungen durchgeführt. Zum einen ist über simuliertes Datenmaterial die oben aufgeführte Referenzmessung möglich, hierbei gelten allerdings idealisierte Bedingungen. Des Weiteren liegen Ergebnisse einer vermittelnden Ausgleichung, ähnlich der Ausgleichung eines Nivellementnetzes, vor.

In Kapitel 7.2.1 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen für verschiedene Teile der Normalwinkelsequenz sowie unter Verwendung unterschiedlicher Patchgrößen dargestellt.

### (b) Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit wird durch den Einfluss grober Beobachtungsfehler und schlechter Textur auf die Resultate der Bildzuordnungsverfahren quantifiziert.

In Kapitel 7.2.2 soll gezeigt werden, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Häufigkeit grober Fehler minimierbar ist. Hierbei steht der Vergleich von Bildzuordnungsergebnissen ohne bzw. mit automatischer Detektion und optionaler Korrektur von Fehlerzuordnungen im Vordergrund.

### (c) Größe des Konvergenzradius

Als drittes Kriterium zur Beurteilung der implementierten Bildzuordnungsverfahren wird die Größe des Konvergenzradius herangezogen (Kapitel 7.2.3). Dieser spielt allerdings nur bei solchen Zuordnungsalgorithmen eine Rolle, in denen eine Zielfunktion zu minimieren bzw. maximieren ist. Entsprechend den Ausführungen des vierten Kapitels lautet die Minimierungsfunktion des Least Squares Matchings

$$\sum_{i=1}^N [g_{n,i}(x, y) - \hat{g}_{n+1,i}(x, y)]^2 \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \hat{g}_{n+1} : \text{Ausgeglichenes Suchbild} \\ N : \text{Anzahl der Grauwerte} \\ \text{innerhalb eines Patches} \end{array} \quad (7.1)$$

und die des optischen Flusses aus Gleichung (4.9)

$$\sum_{\underline{x} \in \Omega} W^2(\underline{x}) [\underline{v} \nabla g(\underline{x}, t) + g_t(\underline{x}, t)]^2.$$

Die Konvergenzeigenschaften der Verfahren werden hierbei hauptsächlich durch die Abweichungen der Näherungswerte von der wahren Lösung sowie der Größe der Patches bestimmt.

Die Suche nach korrespondierenden Bildelementen bei der Kreuzkorrelation basiert auf einer sukzessiven Verschiebung des Suchfensters (vgl. Kapitel 4.3). Ein Konvergenzradius im klassischen Sinne tritt nicht auf, da die Größe des Suchbereiches einzig durch einen vor der Berechnung definierten Prädiktionsbereich festzulegen ist. Aus dem genannten Grund muss die Kreuzkorrelation bei diesem Vergleich ausgelassen werden.

Eine Vergrößerung des Konvergenzradius kann zum Beispiel durch die Verwendung von Bildpyramiden erfolgen (vgl. Kapitel 2.1.3). Alleinige Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein ausreichender Textur in allen Auflösungsstufen der Bildpyramide. Bei dem Verfahren des optischen Flusses ist der Einsatz von Bildpyramiden optional möglich.

### (d) Effektivität

Ein weiterer wichtiger Aspekt, vor allem im operationellen Einsatz, ist die Rechenzeit der einzelnen Trackingalgorithmen (siehe Kapitel 7.2.4). Die Angabe einer absoluten und insbesondere vergleichbaren Rechenzeit gestaltet sich jedoch problematisch, da unter anderem die Optimierung der Programmkodierung der einzelnen Bildzuordnungen auf einem unterschiedlichen Stand ist und die ermittelten Rechenzeiten von der verwendeten Hardware abhängen. Aufgrund der rasanten Entwicklung im Bereich der Hardwarekonfiguration wird diesem Beurteilungskriterium kein großes Gewicht beigemessen.

### (e) Anwendungsflexibilität

Die einzige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der flächenbasierten Matchingverfahren auf verschiedene Objektraumscenen ist das Vorhandensein ausreichender Bildtextur. Wird diese Bedingung erfüllt, können die aufgeführten Algorithmen für die unterschiedlichsten Aufgabenstellungen zum Einsatz kommen. Die Flexibilität in der Anwendung von flächenbasierten Zuordnungsverfahren zeigt die menschliche Bewegungsanalyse aus (WESTFELD, 2004).

## 7.2 Beurteilung der Methoden

### 7.2.1 Genauigkeit

Für die Genauigkeitsuntersuchungen in diesem Abschnitt finden zwei Datensätze der Normalwinkelsequenz vom 20.08.2004 Anwendung: Das sind zum einen ausgewählte Bilder der texturreichen Tagessphase (~44.tif bis ~47.tif) sowie Bilder der kontrastarmen Nachtphase (~57.tif bis ~60.tif). Die Anzahl der betrachteten Gletscherbilder wird somit auf Vier gesetzt.

Im Kapitel 7.1 wird ausgeführt, dass lediglich die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate statistische Genauigkeitsangaben im Rahmen der Ausgleichung direkt bereitstellt. Ebenso ist aufgrund fehlender Referenzmessungen ein Soll-Ist-Vergleich nicht ohne weiteres möglich.

Im Folgenden werden zwei Methoden vorgestellt, um dennoch vergleichbare Genauigkeitsangaben für den optischen Fluss, die Kreuzkorrelation und das Least Squares Matching ableiten zu können. Des Weiteren wird der Einfluss der Patchgröße auf die erreichbare Genauigkeit untersucht.

Die detaillierten Berechnungen sowie die Parameter der Matchingverfahren enthält der beigegefügte Datenträger (DVD:\Kapitel\_7\Genauigkeit\).

#### (a) Ableitung von Genauigkeitsmaßen über eine vermittelnde Ausgleichung

In Anlehnung an die Ausgleichung eines Nivellementnetzes (z.B. REISSMANN, 1974) gehen die Messergebnisse (Verschiebungen  $\underline{dx} = [dx, dy]^T$  in x- und y-Richtung) der in Abbildung 7-1 dargestellten Matchingkonfiguration in eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen ein.

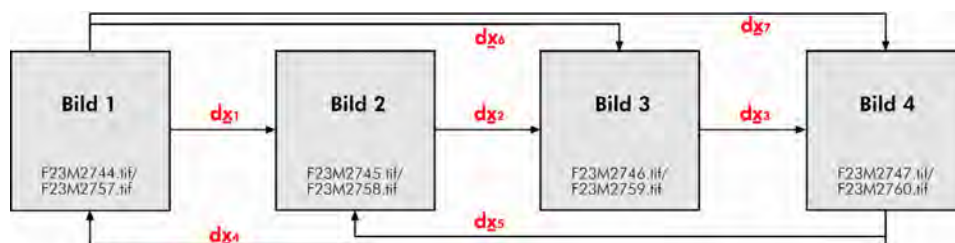


Abbildung 7-1: Matchingkonfiguration für die Genauigkeitsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen, das heißt die a posteriori Standardabweichungen des Gesamtmodells, sind in Abbildung 7-2a für die Tagesssequenz und in Abbildung 7-2b für die Nachtsequenz abgebildet.

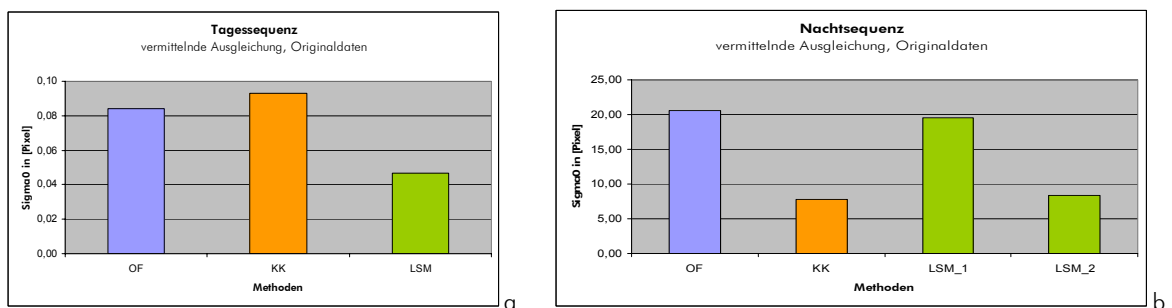


Abbildung 7-2: A posteriori Standardabweichungen des Ausgleichungsmodells in [Pixel]; OF, KK, LSM

- a. Tagesssequenz
- b. Nachtsequenz

Die mittlere Genauigkeit der Bildzuordnungen während der Tagesphase bewegt sich hierbei zwischen 0,05 und 0,1 Pixel. Die Standardabweichungen des optischen Flusses (OF) und der Kreuzkorrelation (KK) liegen in der gleichen Größenordnung. Aufgrund der Verfügbarkeit von guten Näherungswerten für die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (in diesem Fall durch den optischen Fluss generiert), einer kleineren Patchgröße sowie des robusten Umgangs mit radiometrischen Unterschieden (Schattenwürfe) ist die Genauigkeit des LSM gegenüber dem optischen Fluss bzw. der Kreuzkorrelation um etwa den Faktor 2 besser. Die berechneten Genauigkeitswerte sind jedoch zu optimistisch, da in der praktischen Auswertung üblicherweise keine Schleifenmessungen vollzogen und somit die Fehler auch nicht auf die einzelnen Messungen verteilt werden. Eine Messgenauigkeit im Subpixelbereich ist für die Auswertung der Tagesbilder des grönländischen Gletschers Jakobshavn Isbræ dennoch gewährleistet.

Erwartungsgemäß ist die Genauigkeit während der texturarmen Nachtphase sehr gering. Die Standardabweichungen nach der Ausgleichung reichen von 8,0 Pixeln für die Kreuzkorrelation bis zu 20,0 Pixeln für den optischen Fluss. Im Gegensatz zur Kreuzkorrelation, wo Helligkeits- und Kontrastunterschiede teilweise durch den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten kompensierbar sind, ist bei der Methode des optischen Flusses keine Modellierung von radiometrischen Abweichungen zwischen dem Muster- und dem Suchfenster möglich. Weiterhin wird bei der Kreuzkorrelation der Suchbereich durch zuvor definierte Prädiktionen erheblich eingeschränkt. Dies zeigt sich in der vergleichsweise sehr schlechten Zuordnungsgenauigkeit des optischen Flusses bei den kontrast- und helligkeitsarmen Nachtbildern. Die Genauigkeitsangaben für das Least Squares Matching resultieren aus einer MKQ-Bildzuordnung mit Initialkoordinaten des optischen Flusses (LSM\_1) und der Kreuzkorrelation (LSM\_2). Hierbei wird der Einfluss der Güte der Näherungswerte deutlich.

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Bildzuordnung erhöht sich während der Nachtsequenz deutlich durch die Verwendung der in Kapitel 5.3 eingeführten Modifikationen. Die Abbildung 7-3 zeigt die Genauigkeitsmaße für ein LSM-Matching mit spatialen bzw. temporalen Restriktionen zwischen den Translationsparametern, wobei die Näherungswerte durch den optischen Fluss (mit Ausschlusskriterien und anschließender Korrektur) bereitgestellt werden.

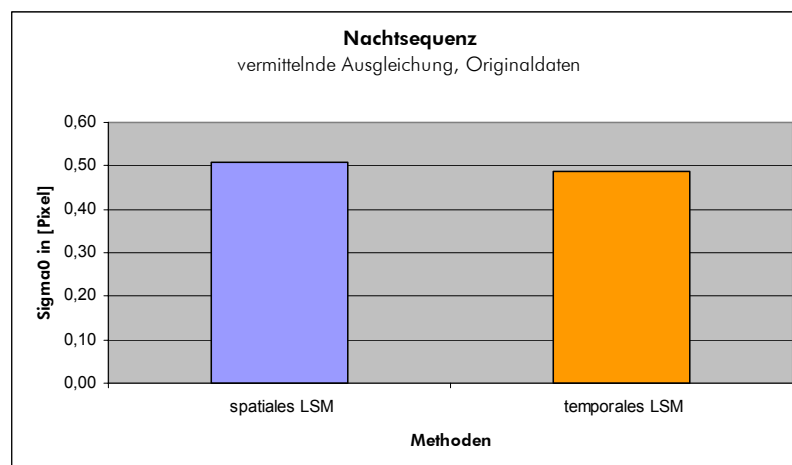


Abbildung 7-3: A posteriori Standardabweichungen des Ausgleichungsmodells in [Pixel]; LSM

Im Vergleich zu den a posteriori Standardabweichungen aus Abbildung 7-2 verbessert sich die Genauigkeit des Least Squares Matchings um die Faktoren 40 (vgl. LSM\_1) bzw. 17 (vgl. LSM\_2). Die Gründe hierfür liegen zum einen in den sehr guten Näherungswerten, die durch die Ausschlusskriterien mit anschließender Korrektur der Fehlzugeordnungen berechnet werden. Weiterhin ist das Ausgleichungssystem der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate durch

den Einsatz von räumlichen und zeitlichen Bedingungsgleichungen zwischen den Unbekannten robuster gegen grob falsche Fehlzuordnungen. Dieses Beispiel zeigt folglich das Potential, das in der Anwendung von, auf das Bewegungsverhalten des betrachteten Objektes angepassten, Restriktionen liegt.

### (b) Referenzmessungen mit simuliertem Datenmaterial

Durch Resampling (bilineare Interpolation) des ersten Bildes der Normalwinkelsequenz (Repräsentant der Tagesbedingungen) bzw. des ersten Bildes der Nachtphase mit den in Tabelle 7-1 angegebenen Translationsparametern ist eine fingierte Referenzmessung durchführbar. Die so gewonnenen simulierten Datensätze (DVD:\Kapitel\_7\Resampling\...) erlauben im Anschluss an die Bildzuordnung einen Vergleich der tatsächlichen Messwerte mit den Sollwerten sowie die statistische Analyse der Differenzen.

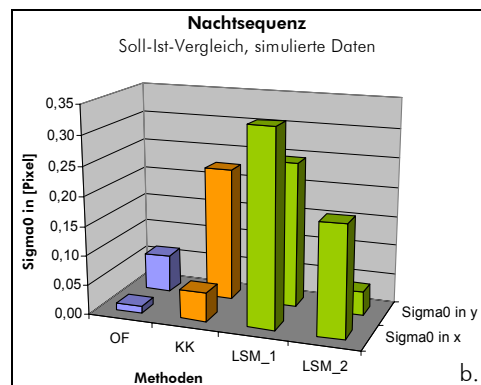
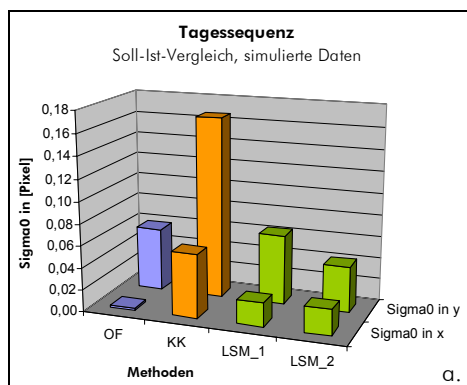
	dx [Pixel]	dy [Pixel]
Bild 1	0,0	0,0
Bild 2	-2,5	-0,7
Bild 3	-5,5	-1,7
Bild 4	-7,0	-1,4

Tabelle 7-1: Parameter des Bildresamplings:

Dargestellt sind die Translationsparameter in x- und y-Bildrichtung bezüglich des ersten Bildes.

In der Abbildung 7-4 sind die Standardabweichungen für die geschätzten Translationen in x- und y-Bildrichtung graphisch abgebildet.

Verglichen mit den Genauigkeitsmaßen der realen Gletscherbewegung, fallen diese Standardabweichungen, vor allem in der Nachtsequenz, weitaus besser aus und spiegeln keinesfalls die Wirklichkeit wider. Der Grund hierfür liegt darin, dass durch eine definierte Translation zwar mittels Interpolation neue Grauwerte generiert werden, die Unterschiede zum Originalbild allerdings sehr klein sind. Demzufolge erhält man bei der Zuordnung stets die größtmögliche Korrelation zwischen Muster- und Suchpatch.



a. Tagessequenz  
b. Nachtsequenz

Abbildung 7-4: Standardabweichungen des Soll-Ist-Vergleichs in x und y in [Pixel]

Des Weiteren treten in den simulierten Datensätzen keine zeitlichen Variationen der Beleuchtungsverhältnisse auf. Die besonders großen Diskrepanzen in y-Bildrichtung sind mit der bereits aufgeführten perspektiven Verzerrung in der Bildtiefe zu erklären.

Im Anhang A.8 sind darüber hinaus die für den Soll-Ist-Vergleich zugehörigen Differenzen angegeben (Abbildung A-1). Ferner befinden sich im Anhang A.8 die Ergebnisse der oben aufgeführten vermittelnden Ausgleichung unter Verwendung des simulierten Datenmaterials (Abbildung A-2). Dabei fallen die Resultate aufgrund der Fehleraufteilung auf alle Messungen auch hier günstiger aus.

### (c) Einfluss der Patchgröße auf die Genauigkeit der Bildzuordnung

Die Ausdehnung der Template- und Suchmatrix hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit sowie die Erfolgsrate des Matching.

Je größer die Patches sind, desto größer ist der Konvergenzradius. Folglich steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der entsprechende Algorithmus an der richtigen Position konvergiert. Allerdings sinkt mit zunehmender Vergrößerung der Patches auch die Genauigkeit der Bildzuordnungsverfahren, da der betreffende Bildausschnitt lokal als eben angenommen wird. Ebenso erweist sich der höhere Rechenaufwand als nachteilig.

Im Gegensatz dazu führen kleine Patches zu einer besseren Genauigkeit und kürzeren Rechenzeiten. Wird der Prädiktionsbereich zu klein gewählt oder weisen die Näherungswerte nicht die entsprechende Güte auf, kann die Wahl eines zu kleinen Patches aber auch zu einer falschen oder womöglich zu gar keiner Lösung führen.

Die Abbildung 7-5 zeigt die nach der in Abbildung 7-1 dargestellten Messkonfiguration ermittelten a posteriori Standardabweichungen in Abhängigkeit der Patchgrößen.

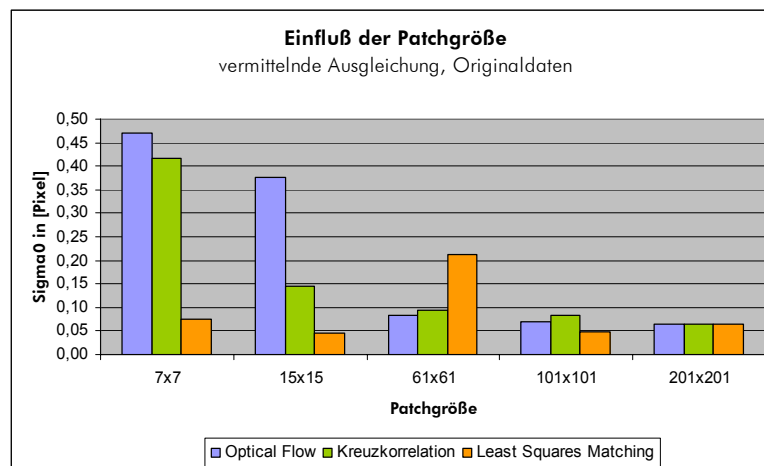


Abbildung 7-5: Einfluss der Patchgröße auf die Genauigkeit der Bildzuordnungsverfahren

Dem Diagramm in Abbildung 7-5 ist zu entnehmen, dass sich für die Verfahren Optical Flow und Kreuzkorrelation ein zu kleiner Bildausschnitt negativ auf die erreichbare Matchinggenauigkeit auswirkt. Dies ist mit den komplex variierenden Beleuchtungsverhältnissen in der Gletscherszene zu erklären. Aufgrund der auftretenden Schattenwürfe haben sich die Grauwerte innerhalb der kleinen Patches von einem Bild in das Folgende zu stark geändert. Durch den Einsatz von weitaus größeren Fenstern wird eine großflächigere Umgebung in die Berechnungen mit einbezogen. Innerhalb dieser Nachbarschaft treten zwar auch radiometrische Änderungen auf, die größere



Ausdehnung erlaubt allerdings auch eine bessere Erfassung von markanten Strukturen in der Nachbarschaft des zu verfolgenden Bildelements.

Bei der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate fließen die berechneten Näherungswerte aus dem optischen Fluss oder der Kreuzkorrelation ein. Somit ist der Suchbereich bereits eingeschränkt und die Wahrscheinlichkeit von multiplen Lösungen sinkt. Folglich benötigt das Least Squares Matching gegenüber den anderen Verfahren auch deutlich kleinere Fenstergrößen zur Lösung des Korrespondenzproblems.

### 7.2.2 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit der eingeführten Trackingalgorithmen wird in diesem Kapitel anhand der Bildzuordnung von 300 automatisch detektierten Features im ersten Bild der Normalwinkelsequenz untersucht. Es gelten die in Kapitel 5.3.1 aufgestellten Kriterien für die Detektion fehlerhafter Trajektorien. Neben der Bedingung, dass sich kein Feature entgegengesetzt der Fließrichtung des Gletscherstroms bewegen kann, gelten die folgenden Schwellwerte für die maximale Translation in x- und y-Richtung von einem Bild auf das zeitlich folgende Bild:

- $dx_{\max} = \pm 5 \text{ Pixel}$
- $dy_{\max} = \pm 5 \text{ Pixel}$

Weitere mögliche Kriterien für die Beurteilung der Zuverlässigkeit sind ein definierter Schwellwert für den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten bei der Kreuzkorrelation und der Schwellwert für die a posteriori Standardabweichung des LSM-Ausgleichsmodells. Da diese zwei Kriterien jedoch nicht auf alle Verfahren gleichermaßen angewendet werden können, werden sie in die weiteren Untersuchungen nicht mit einbezogen. In Abbildung 7-6 wird die Anzahl falscher Zuordnungen im Vergleich zu richtigen, unter den oben genannten Konditionen (ohne Korrektur falscher Zuordnungen), dargestellt.

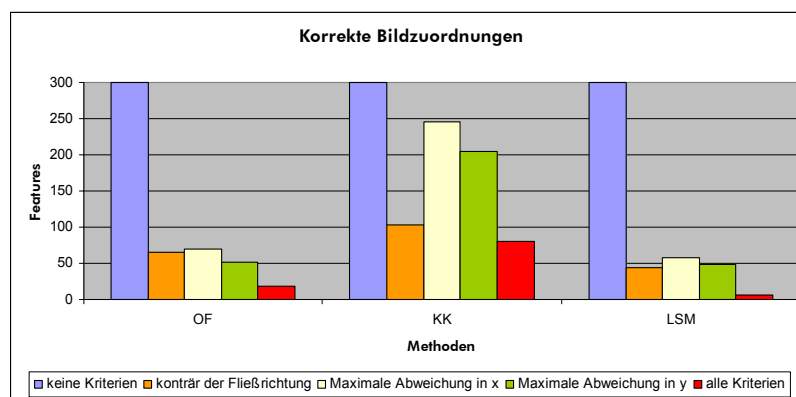


Abbildung 7-6: Korrekte Bildzuordnungen; OF, KK, LSM:

Anzahl der als korrekt eingestuft Trajektorien von insgesamt 300 zu verfolgenden Gletscherpunkten über die gesamte Normalwinkelsequenz unter Verwendung der aufgeführten Kriterien.

Die Ergebnisse der Untersuchungen fallen, aufgrund zahlreicher Fehlzusordnungen bei dem Tag/Nacht-Übergang, erwartungsgemäß sehr schlecht aus. Die Kreuzkorrelation schneidet hierbei noch am besten ab, da der zuvor definierte Prädiktionsbereich keinen großen Spielraum für Fehlzusordnungen zulässt.

Die Abbildung 7-7 zeigt abschließend ein Beispiel für ein Least Squares Matching mit spatialen Restriktionen unter der Verwendung von generierten Näherungswerten aus der Kreuzkorrelation. Während der Kreuzkorrelation wurden falsche Zuordnungen um den Mittelwert der vorherigen Features korrigiert. Innerhalb der LSM-Berechnungen gelten zwar die Ausschlusskriterien, allerdings werden fehlerhafte Trajektorien nicht noch einmal verbessert, sondern gelöscht.

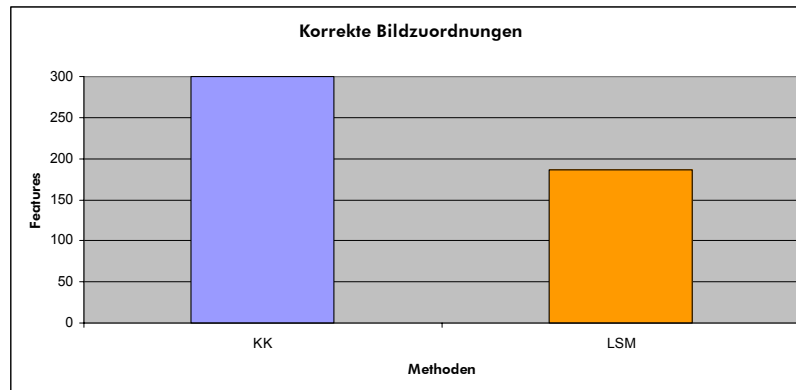


Abbildung 7-7: Korrekte Bildzuordnungen; KK, LSM:

Anzahl der als korrekt eingestuft Trajektorien von insgesamt 300 zu verfolgenden Gletscherpunkten über die gesamte Normalwinkelsequenz.

Werden hingegen fehlerhafte Trajektorien, welche die gegebenen Ausschlusskriterien nicht erfüllt haben, korrigiert, reduziert sich die Anzahl der Trajektorie für die Berechnung der Näherungswerte nicht. Bei der anschließenden Schätzung der Gletscherbewegung durch das LSM mit einer Achternachbarschaft erhöht sich dadurch die Anzahl der als korrekt angenommenen Bildzuordnungen von zwei Prozent auf ca. 62 Prozent.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Ausschlusskriterien für eine sichere Auswertung der vorliegenden Gletscherbilder mit anschließender Korrektur fehlerhafter Bildzuordnungen unabdingbar ist. Ebenso haben die in Kapitel 5.3.3 aufgezeigten temporalen und spatialen Restriktionen eine große Auswirkung auf das Least Squares Matching. Durch die Kombination der optionalen Korrekturen mit den Restriktionen der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate kann die Zuverlässigkeit bzw. die Widerstandsfähigkeit der gesamten Matchingprozedur gegenüber groben Fehlern gesteigert werden.

### 7.2.3 Größe des Konvergenzradius

Zur Bestimmung des Konvergenzradius der beiden iterativen Bildzuordnungsverfahren Optical Flow und Least Squares Matching wird das erste Bild der Normalwinkelsequenz durch Resampling sukzessiv um zuvor definierte Beträge in  $-x$ -Richtung verschoben. Auch in diesem Fall sind die erhaltenen Werte lediglich theoretischer Natur, da sich durch eine ganzzahlige Verschiebung die Grauwerte in den Bildern nicht geändert haben.

Wie in Kapitel 7.2.1 bereits aufgeführt, hängt der Konvergenzradius unter anderem von der Größe der Muster- bzw. Suchfenster ab. Je größer die Bildausschnitte sind, desto größer ist die Aussicht auf eine Konvergenz zur richtigen Lösung. Auf die Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Konvergenzradius und Patchgröße wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Für diese Untersuchungen wird die Patchgröße auf einen für die Gletscherbildauswertung typischen Wert von  $61 \times 61$  Pixel gesetzt.

Des Weiteren ist die Genauigkeit der Näherungswerte ein entscheidender Faktor für die Konvergenzeigenschaften der Algorithmen. Als Näherungen gehen in die beiden Verfahren die Koordinaten des Ausgangsbildes ein. Im Verlauf der Iterationen werden diese solange sukzessiv verfeinert, bis ein gewisser Schwellwert für den Aufschlag unterschritten oder die maximale Iterationsanzahl erreicht wird.

Die Abbildung 7-8 zeigt die Abweichungen der tatsächlichen Messwerte von der Sollposition für die jeweilige Stufe der definierten Bildverschiebung. Da es sich um lokale Bildzuordnungsverfahren handelt, ist der Konvergenzradius entsprechend klein. Ab einer Objektbewegung von etwa zehn Pixeln beginnen der optische Fluss (Abbildung 7-8a) sowie das Least Squares Matching (Abbildung 7-8c) an einer falschen Position im Suchbild zu konvergieren. In Abbildung 7-8b sind die Abweichungen des optischen Flusses unter Verwendung einer zweistufigen Bildpyramide dargestellt. Durch diese hierarchische Bildzuordnung kann der Konvergenzradius im Vergleich zu dem einfachen optischen Fluss bzw. dem Least Squares Matching um etwa den Faktor 5 erhöht werden.

Für die zu erwartenden Gletscherbewegungen von maximal circa drei bis vier Pixel in  $-x$ -Richtung bzw. ein bis zwei Pixel in  $\pm y$ -Richtung von einem Bild in das zeitlich darauffolgende Bild, ist der Konvergenzradius des optischen Flusses sowie des Least Squares Matching ausreichend.

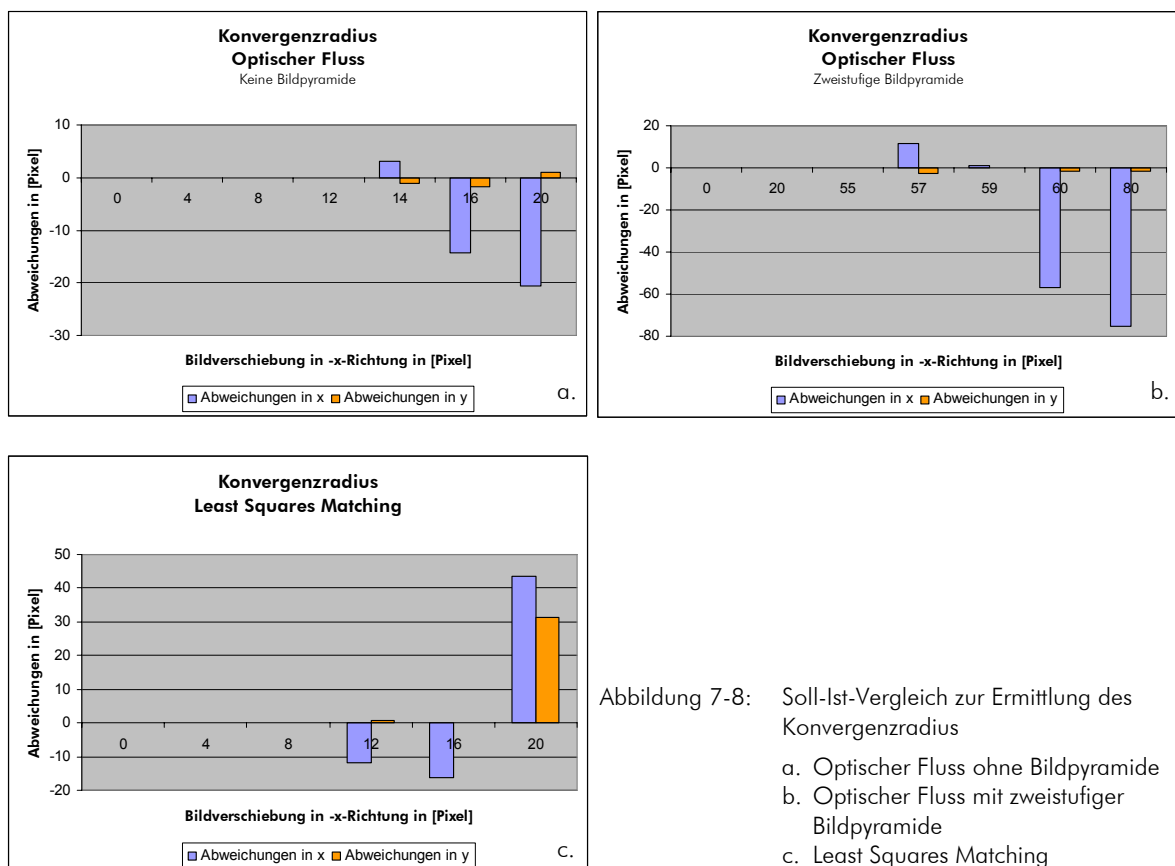


Abbildung 7-8: Soll-Ist-Vergleich zur Ermittlung des Konvergenzradius

- Optischer Fluss ohne Bildpyramide
- Optischer Fluss mit zweistufiger Bildpyramide
- Least Squares Matching

## 7.2.4 Effektivität

Im folgenden Abschnitt werden die Bildzuordnungsverfahren auf ihre Effektivität (benötigte Rechenzeiten) untersucht. Wie bereits ausgeführt, ist die Bestimmung einer vergleichbaren absoluten Rechenzeit für die einzelnen Algorithmen in dem Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Effektivität der Verfahren hängt unter anderem von den folgenden Punkten ab:

- Hardwareperformance
- Eigenschaften der Patches (z.B. Größe, Textur innerhalb der Bildausschnitte)
- Güte der Näherungswerte
- Größe des Prädiktionsbereiches
- Optimierung der Programmkodierungen
- Größe des zu allozierenden Speichers

Bei der Gegenüberstellung in Abbildung 7-9 können diese Faktoren nicht berücksichtigt werden. Vielmehr geht es hierbei um einen Vergleich der Rechenzeiten der verschiedenen Matchingalgorithmen bei einer für die Gletscherbildauswertung günstigen Konfiguration, wobei diese jeweils auf die Verfahren angepasst ist und sich dementsprechend, zum Beispiel in der Patchgröße, unterscheidet.

Die Fenstergröße für die Verfahren zur Bestimmung der Näherungswerte wird auf  $61 \times 61$  Pixel festgelegt. Das Least Squares Matching arbeitet mit einem  $(15 \times 15)$ -Bildausschnitt. Alle Bilder der Testmessungen sind von dem lokalen Datenträger zu laden (keine vorherige Speicherung im RAM) und werden während den Berechnungen nicht visualisiert. Innerhalb der einkanaligen Sequenzen (roter Kanal), welche aus 2, 25 und 50 Bildern bestehen, liegt die Anzahl der durch einen Interestoperator automatisch detektierten Features zwischen 1 und 300.

In der Abbildung 7-9 sind die Rechenzeiten des optischen Flusses, der Kreuzkorrelation und des Least Squares Matching in Sekunden pro Bildsequenz dargestellt.

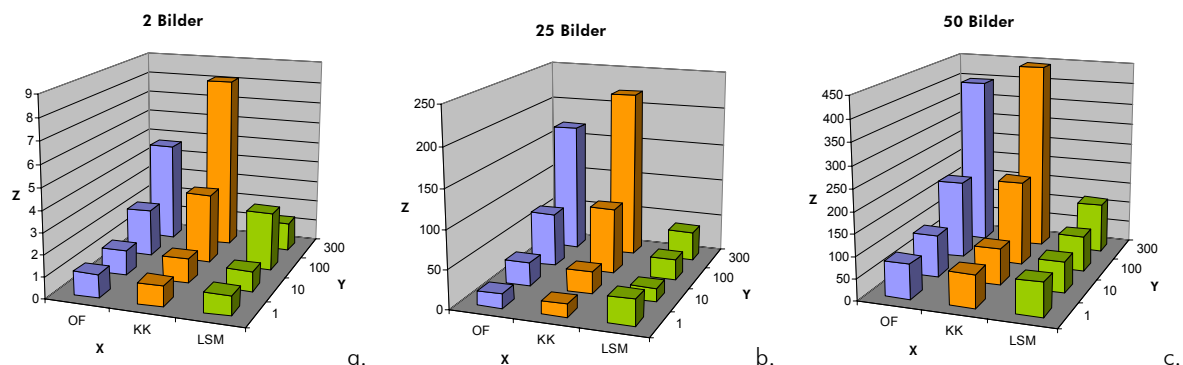


Abbildung 7-9: Geschwindigkeiten der Bildzuordnungsverfahren im Vergleich:

- Bildsequenz bestehend aus:
  - a. 2 Bildern
  - b. 25 Bildern
  - c. 50 Bildern
- X-Achse: Bildzuordnungsverfahren (OF: Optical Flow; KK: Kreuzkorrelation; LSM: Least Squares Matching)
- Y-Achse: Anzahl der verfolgten Bildelemente
- Z-Achse: Zeit in [Sekunden/Bildsequenz]
- Rechnerperformance: AMD Athlon XP 2600+ 2,08 GHz
- Die numerischen Werte sind der Tabelle A-7 zu entnehmen.

Angesichts der vorhandenen Näherungswerte und einer folglich kleineren Patchgröße sowie einer rascheren Konvergenz des Algorithmus, sind die Rechenzeiten des Least Squares Matchings bei dieser Untersuchung am günstigsten. Der Prädiktionsbereich für die Kreuzkorrelation wurde mit 5 Pixeln in Fließrichtung ( $-x$ -Richtung), 1 Pixel entgegengesetzt der Fließrichtung ( $+x$ -Richtung) und  $\pm 5$  Pixel in  $\pm y$ -Richtung sehr großzügig gewählt und erklärt die im Vergleich mit dem optischen Fluss erhöhte Rechenzeit.

Da die Rechenzeit vornehmlich von der Hardwareperformance abhängt und sich die Fortschritte bei der Entwicklung immer leistungsfähigere Computersysteme rasant vollziehen, ist die Betrachtung dieses Kriteriums in naher Zukunft bereits überflüssig.

### 7.3 Anwendbarkeit der Matchingstrategien

Die in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Matchingstrategien

- von Bild zu Bild und
- vom ersten Bild ausgehend in alle zeitlich folgenden Bilder

werden in diesem Abschnitt auf ihre Eignung zur Auswertung der Bilder des Gletschers Jakobs-havn Isbræ untersucht.

In dem Diagramm der Abbildung 7-10 sind die Trajektorien der Matchingalgorithmen unter der Anwendung der zwei vorgestellten Strategien aufgetragen.

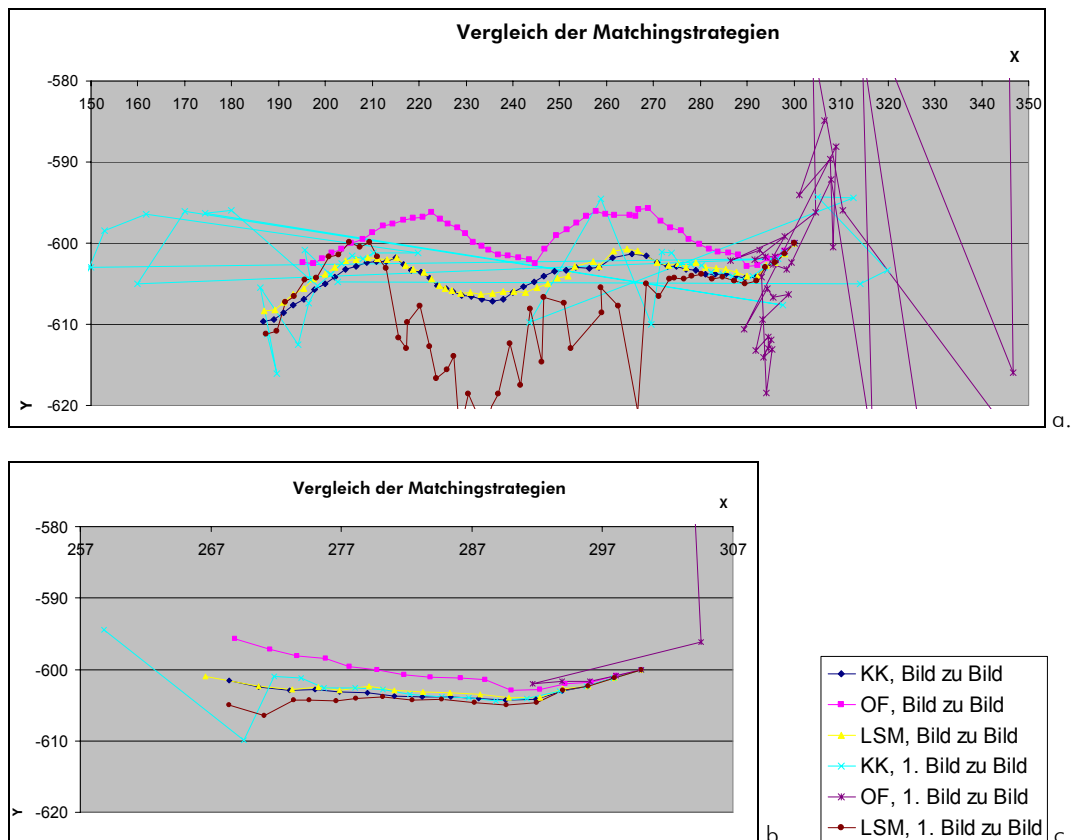


Abbildung 7-10: Ergebnisse der Bildzuordnungsverfahren unter Anwendung zwei verschiedener Matchingstrategien

- a. Trajektorien über die gesamte Bildsequenz  
 b. Trajektorien über die ersten 16 Bilder

Die Ursachen für den unkontrollierten Verlauf der Trajektorien, welche durch ein Matching, ausgehend vom ersten Bild in alle weiteren Bilder, bestimmt wurden, liegt in der bereits mehrfach angesprochenen texturarmen Nachtphase sowie bei den Schattenwürfen. Eine ausreichende Korrelation zwischen dem Musterpatch im ersten Bild und dem Suchpatch in den folgenden Bildern ist dadurch nicht mehr gewährleistet. Selbst das Least Squares Matching konnte unter Verwendung genauer Näherungskoodinaten keine korrekten Bildzuordnungen ermitteln.

Diese Testmessungen haben gezeigt, dass sich lediglich ein Matching von einem Bild in das temporal folgende Bild für die vorliegenden Szenen eignet. Aus diesem Grund wird auf weitere Untersuchungen verzichtet.

## Kapitel 8

# Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Der Jakobshavn Isbræ an der Westküste Grönlands ist einer der dynamischsten Gletscher der Welt. Er hat im letzten Jahrzehnt seine Geschwindigkeit verdoppelt und fließt derzeit mit circa 14 Kilometern pro Jahr in die Davis Strait zwischen Nordkanada und Grönland. Im August 2004 führten Geodäten und Photogrammeter der Technischen Universität Dresden mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eine Messkampagne am Jakobshavn Isbræ Gletscher in Grönland durch. Das photogrammetrische Ziel dieses Projektes ist, die Bildsequenzen einer hochauflösenden Digitalstillvideokamera Kodak DCS 14n mit digitalen Bildzuordnungsverfahren auszuwerten, um daraus das räumliche und zeitliche Bewegungsverhalten des Gletschers zu bestimmen.

Die vorliegende Arbeit zum Thema „Entwicklung von Verfahren zur räumlich und zeitlich aufgelösten 2D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie“ beschäftigt sich mit der zeitlichen Verfolgung von Punkten auf dem interessierenden Gletscherbereich, der Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse sowie der Überführung der erhaltenen Trajektorien in den Objektraum. Weiterhin wird die Güte der Bildzuordnungsverfahren aus statistischer Sicht mit geeigneten Methoden bewertet.

In einem ersten Schritt werden zunächst die Funktionsweisen verschiedener Bildzuordnungsverfahren vorgestellt und in Hinblick auf ihre Eignung für die Auswertung der auf Grönland generierten Bildsequenzen des Jakobshavn Isbræ Gletschers untersucht. Hierzu gehören die Verfahren des optischen Flusses, der Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker, die Kreuzkorrelation und die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (engl.: Least Squares Matching, LSM). Für die Gletscherbildzuordnung kommen der optische Fluss und die Kreuzkorrelation für die Näherungswertbestimmung sowie das Least Squares Matching zum Einsatz.

Die zu verfolgenden Punkte des Gletschers können entweder interaktiv am Bildschirm, über einen Interestoperator oder durch die Definition eines regelmäßigen Rasters ausgewählt werden. Diese Segmentierung ist vorteilhaft, um sowohl bestimmte Regionen der Gletscheroberfläche auf ihr Bewegungsverhalten zu untersuchen, als auch ein hochauflösendes Bewegungsfeld in einer homogenen räumlichen Verteilung zu erhalten. Eine Signalisierung diskreter Punkte auf der Gletscheroberfläche ist aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich gewesen.

Die erarbeiteten Modifikationen der implementierten Trackingalgorithmen basieren auf den a priori Informationen des zu untersuchenden Gletscherstroms. Naturgemäß bewegt sich ein Ausflussgletscher mit einer annähernd gleichmäßigen Geschwindigkeit in Richtung Kalbungsgebiet. Aufgrund dieses gleichmäßigen Bewegungsverhaltens ist eine Schwellwertdefinition für die Ausdehnung der Bewegung in  $\pm x$ - und  $\pm y$ -Bildrichtung von einem Bild der Sequenz in das zeitlich folgende möglich. Hierfür werden empirisch ermittelte Werte verwendet. Durch die aufgestellten Schwellwerte ist zum einen die automatische Lokalisierung fehlerbehafteter Trajektorien der Gletscherpunkte und zum anderen eine optionale Korrektur der als Ausreißer klassifizierten Näherungswerte während des Zuordnungsprozesses durchführbar. Die Zuverlässigkeit der Verfahren zur Berechnung der Näherungswerte für die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate kann somit auf bis zu einhundert Prozent gesteigert werden. Weiterhin werden zeitliche und räumliche Restriktionen in Form von gewichteten Bedingungsgleichungen in das Ausgleichungssystem der Kleinsten-Quadrate-Anpassung integriert. Die zeitliche Restriktion verlangt, dass die Translationen der zu verfolgenden Gletscherpunkte, über eine frei definierbare Anzahl von Bildern, die gleichen

Größenordnungen in Fließrichtung aufweisen. Über die räumlichen Restriktionen wird der Matchingprozess eines Features mit dem seiner Nachbarschaft verknüpft und unterstellt, dass sich alle Gletscherpunkte innerhalb einer kleinen Umgebung mit näherungsweise gleichen Translationsparametern in beiden Bildkoordinatenrichtungen bewegen. Die Anpassung der Bildzuordnungsverfahren auf die hochkomplexen Bildinhalte der vorliegenden Gletschersequenzen (Gletschertopologie, zeitlich variable Schattenwürfe, Beleuchtungsänderungen) erlaubt eine genaue und zuverlässige Verfolgung der Gletscheroberfläche durch den gesamten Bildverband.

Die Visualisierung der gewonnenen Ergebnisse, das heißt der Bildkoordinaten der detektierten Gletscherpunkte über die Zeit, ermöglicht die visuelle Beurteilung der Güte der Berechnungen und erlaubt eine erste glaziologische Interpretation des Fließverhaltens des Jakobshavn Isbræ Gletschers. Diese Visualisierung erfolgt durch eine Vielzahl von Möglichkeiten: Neben der Übertragung der Trajektorien in die Bilder bzw. aller Trajektorien oder Bewegungsvektoren in das jeweils erste Bild der Sequenz können die Resultate durch den Einsatz von graphischen Programmiersprachen interaktiv in einem 3D-Kontext visualisiert werden. Des Weiteren stehen automatische Exportfunktionalitäten der Koordinaten in Microsoft Office Excel-Dateien zur Verfügung.

Die Überführung der berechneten Bildkoordinaten in den Objektraum erfolgt über geodätische Messungen (Zielmarken auf dem stabilen Vordergrund des Gletschers sowie ausgewählte Punkte des Gletscherstroms) und stereoskopische Aufnahmen. Durch die Kenntnis der inneren und äußeren Orientierungsparameter des ersten Bildes der Sequenz werden die Bildkoordinaten über eine projektive Transformation in eine horizontale Ebene (mittlere Gletscherhöhe) überführt. Die innere Orientierung wird als gegeben vorausgesetzt, die äußeren Orientierungsparameter werden über eine stereoskopische Bildzuordnung berechnet. Diese Einzelbildauswertung liefert Maßstabangaben und ermöglicht somit, Aussagen über die Größenordnungen der berechneten Vektoren im Objektraum zu treffen.

Ein weiterer Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Testverfahren zur Genauigkeitsüberprüfung der Bildzuordnungsalgorithmen sowie die Untersuchung der Algorithmen in Hinblick auf ihre Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Praktikabilität. Da keine Referenzmessungen vorliegen, werden die Genauigkeitsmaße im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung unter einer geeigneten Matchingkonfiguration und über simuliertes Datenmaterial abgeleitet. Die gewonnenen Erkenntnisse belegen, dass sich die implementierten Matchingverfahren auch für komplexe Aufgabenstellungen, wie die Auswertung der generierten Gletscherbildsequenzen, eignen. Die a posteriori Standardabweichungen liegen im Bereich von 0,05-0,1 Pixel für die texturreichen Tagesbilder. Problematischer ist die Auswertung der Nachtsequenzen. Die zahlreichen Fehlzuidnungen innerhalb der texturarmen Nachtphase können allerdings durch die Verwendung der vorgestellten Matchingmodifikationen deutlich reduziert werden.

Über die in einer vorangegangenen Studienarbeit (WESTFELD, 2004) entworfene und in dieser Arbeit erweiterte benutzeroberflächenbasierte Software „2-DMA“ können alle für die Auswertung der Gletscherbildszenen notwendigen Schritte (semi-)automatisch vollzogen werden.

Die Ergebnisse der Bildzuordnungen liegen in Form eines zweidimensionalen Bewegungsvektorfeldes über den gesamten Bildverband vor. Dieses Vektorfeld erfasst vollständig die Bewegungen des Gletschers in Fließrichtung. Die Translationen der Gletscherpunkte in y-Bildrichtung entstehen aus einer Überlagerung der Bewegung transversal zur Fließrichtung mit den Höhenänderungen des Gletscherstroms, welche durch die Meeresgezeiten verursacht werden. Die Analyse der Trajektorien hat gezeigt, dass die vertikalen Komponenten der Trajektorien dem Gezeiteneinfluss unterliegen. Ebenso ist eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in Richtung Abtragungsgebiet sichtbar.

Die vorliegende Arbeit zeigt das Potential, welches in den Aufnahme- und Auswertestrategien der Nahbereichsphotogrammetrie zu finden ist und belegt, dass temporale Verfahren der digitalen Photogrammetrie operationell und zuverlässig zur Beobachtung kontinuierlicher Massenbewegungen eingesetzt werden können. Die photogrammetrische Bildzuordnung liefert präzise



---

Ergebnisse und kann durchaus eigenständig zur Datengenerierung im Bereich der Gletscheranalysen beitragen.

## 8.2 Ausblick

Im Folgenden werden Ansätze für Verbesserungsmöglichkeiten in den Bereichen Bildzuordnung und Programmierung aufgezeigt sowie Änderungsvorschläge für künftige Expeditionen in das Zielgebiet Jakobshavn Isbræ, Grönland gegeben.

- Bildzuordnung

Im Hinblick auf eine allgemein anwendbare Software für die unterschiedlichsten Bereiche der Bewegungsanalysen im Nahbereich ist die Integration einer pyramidenbasierten Datenstruktur in die Matchingalgorithmen der Kreuzkorrelation und des Least Squares Matchings vorteilhaft. Insbesondere dann, wenn für das zu verfolgende Objekt keine a priori Aussagen über das Bewegungsverhalten vorliegen, erhöht die Verwendung von Bildpyramiden deutlich den Konvergenzradius der Verfahren der Bildzuordnung. Bei der Kreuzkorrelation können somit der Prädiktionsbereich und folglich die Rechenzeit vermindert werden. Da die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate Näherungswerte für die wahre Lösung bedingt, eignet sich hier der Einsatz von Bildpyramiden, wenn keine Näherungswerte vorliegen oder diese von schlechter Qualität sind.

Eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit für die Güte der Ergebnisse der Kreuzkorrelation bietet die Analyse der Maxima der Kreuzkorrelationskoeffizienten. Vor allem der Abstand des Hauptmaximums von weiteren Nebenmaxima sowie die Differenzen zwischen den Kreuzkorrelationskoeffizienten des Hauptmaximums und den Nebenmaxima sind Kriterien, die sich für eine Güteanalyse eignen.

Eine weitere Verbesserung ist die funktionsfähige Verallgemeinerung des in der vorliegenden Arbeit aufgegriffenen Ansatzes einer vermittelnden Ausgleichung mit Restriktionen in Form von Ungleichungen zwischen den Unbekannten bei der Subpixelinterpolation der Ergebnisse der Kreuzkorrelation.

Die erstellte Software „2-DMA“ bietet die Möglichkeit, die Bildzuordnungen zwischen Farbbildern für jeden einzelnen Kanal durchzuführen und im Anschluss die Ergebnisse arithmetisch bzw. gewichtet zu mitteln. Das Ausgleichungssystem des Least Squares Matchings eignet sich allerdings auch dazu, alle drei Grauwertinformationen eines Bildelements gemeinsam auszugleichen. Über die Einbettung von Restriktionen zwischen den einzelnen Kanälen kann die Anzahl der Beobachtungen und die Genauigkeit erhöht werden.

Ferner ist die vollständige Einbindung der temporalen Restriktionen in y-Bildrichtung für die Kleinste-Quadrate-Anpassung vorzusehen. Sobald ein geeigneter Maßstab für Herstellung der Beziehungen zwischen Bild- und Objektraum vorliegt, kann der bekannte Tidenverlauf von Ilulissat für die Formulierung der Bedingungsgleichungen in  $y$  genutzt werden.

- Programmierung

Eine sehr rechen- und speicherintensive Komponente des LSM-Ausgleichungssystems, insbesondere bei der Verwendung von Restriktionen zwischen den Unbekannten, sind die Matrizenoperationen (Invertierung des Normalgleichungssystems, Lösung des Unbekanntenvektors). Da die inverse Normalgleichungsmatrix in der Regel für die statistischen Genauigkeitsangaben benötigt wird, kann nicht auf einfache Zerlegungsverfahren (z.B. Gauß'scher Algorithmus) zurückgegriffen werden. Eine alternative Variante ist die Cholesky-Zerlegung der Normalgleichung in Submatrizen. Im Anschluss an die Zerlegung wird die Profilspeichertechnik (engl.: sparse technique) auf die entstandenen Dreiecksmatrizen angewandt. Ist die Anzahl der Unbekannten und Beobachtungen innerhalb einer Ausgleichung sehr hoch, enthält die Normalgleichungsmatrix, und folglich auch deren Submatrizen, eine Vielzahl von Null-Elementen (nicht alle Beobachtungsgleichungen

sind Funktionen aller Unbekannten). Die Profilspeichertechnik speichert dabei lediglich die Elemente vom ersten Nicht-Nullelement bis zur Hauptdiagonalen für jede Spalte der Matrix.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Reduzierung der Rechenzeit liegt in der Anzahl der zur Erreichung des Abbruchkriteriums notwendigen Iterationen. Durch eine Schrittweitenkorrektur (Überkorrektur), welche aus der numerischen Mathematik zur Beschleunigung von Iterationsvorgängen hervorgeht, können einige Iterationen im Berechnungsprozess übersprungen werden. Realisiert wird dies durch einen Überkorrekturfaktor, mit denen die Unbekanntenzuschläge zu multiplizieren sind. Die Schrittweitenkorrektur kommt für die iterative Berechnung der geometrischen Parameter des Least Squares Matchings sowie für die Subpixelberechnung im Rahmen der Kreuzkorrelation in Frage.

Die weitere Optimierung der Programmkodierung und das Abfangen aller Laufzeitfehler in dem erstellten Programm „2-DMA“ sind des Weiteren zu untersuchen.

- Zukünftige Messkampagnen

Um unverfälschte Genauigkeitsangaben für die vorgestellten Matchingverfahren unter realistischen Bedingungen im Objektraum zu generieren, sind Referenzmessungen und ein anschließender Soll-Ist-Vergleich optional möglich. Hierfür sind markante Gletscherpunkte zum Zeitpunkt der Kameraaufnahmen mit Tachymeter geodätisch einzumessen. Voraussetzung ist die Herstellung des Bezuges zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem.

Für eine genaue Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung sind Stereoaufnahmen zu jeder Messepoche wünschenswert. Der Aufnahmestandpunkt sowie die Aufnahmerichtung des letzten Bildes der Stereoaufnahmen sollten hierbei mit denen des ersten Bildes der Sequenz übereinstimmen.

Während der sehr dunklen Nachtphasen ist die Erhöhung der Aufnahme Frequenz vorteilhaft. Es werden so kontinuierliche und keine sprunghaften Änderungen der Beleuchtungsverhältnisse erreicht. Dies erleichtert den Bildzuordnungsverfahren in den kontrastarmen Nachtbildern die Suche nach korrespondierenden Bildausschnitten. Der Mehraufwand an Speicherplatz ist dabei vertretbar.

Eine weitere Verbesserung der Ergebnisse kann ebenfalls durch die Reduzierung der teilweise sehr starken Kamerabewegungen erreicht werden (z.B. durch eine Verankerung des Statives mit dem Erdreich bzw. eine geringe Stativhöhe). Außerdem ist der Einsatz einer noch hochauflösenderen einkanaligen digitalen Kamera zu empfehlen.



## Anhang A

# Ergänzungen der vorangegangenen Kapitel

### A.1 Bildsequenzen

#	Datum	Bildanzahl	Zeitliche Auflösung [min]	Zeitraum [h]	Startzeit [h:min]	Brennweite [mm]
1	11.08.04	100	20	33		135
2	16.08.04	14	30	6,5		50
3	17.08.04	18	30	8,5	09:30	50
4	18.08.04	27	30	13	10:30	50
5	19.08.04	21	30	10	11:30	200
6	20.08.04	53	30	26	18:00	50
7	22.08.04	48	30	23,5	20:00	200

Tabelle A-1: Übersicht der aufgenommenen Bildsequenzen:  
Die Bildsequenzen #5 und #6 werden für die Auswertungen genutzt.

### A.2 Kamerabewegung

Sequenz	Algorithmus	Punktzahl	Patch [Pixel]	Kanal	Strategie	Ausschluss/ Korrektur
Normalwinkel	KK	Zielmarken M1, M2, M3, M4	61×61	RGB	1. Bild zu Bild	nein/nein
	LSM		31×31	RGB	1. Bild zu Bild	nein/nein
Zoom	OF	250	61×61	GW	Bild zu Bild	ja/nein
	LSM	250	31×31	GW	Bild zu Bild	nein/nein

Tabelle A-2: Matchingkonfiguration zur Bestimmung der Kamerabewegungen:

Die dem Datenträger beigelegten Koordinaten (DVD:\Kapitel\_5\Kamerabewegung\...) wurden durch Least Squares Matching (LSM) berechnet. Die Näherungswerte für die Kleinste-Quadrate-Anpassung entstammen der Kreuzkorrelation (KK) bzw. dem optischen Fluss (OF).

### A.3 Beispiele für die Lösung des linearen Komplementaritätsproblems (LCP)

#### (a) Beispiel 1

- Zielfunktion

$$\min \Phi(x, y) = x^2 + y^2$$

- Restriktionen

$$x \geq 2$$

$$x + y \geq 12$$

$$x - y = 0$$

- LCP-Eingabedaten

$$\underline{Q} = \underline{A}^T \underline{P} \underline{A} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \quad \underline{n} = (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} -2 \\ -12 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{M} = \underline{B} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ 0,5 & 1 & 0 \\ -0,5 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{k} = \underline{b} - \underline{B} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \begin{bmatrix} -2 \\ -12 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- LCP

$$\hat{\underline{z}} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ 0,5 & 1 & 0 \\ -0,5 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{\underline{u}} + \begin{bmatrix} -2 \\ -12 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Lösung des LCP

$$\hat{\underline{z}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 12 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\underline{x}} = -(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{B}^T \hat{\underline{u}} - \underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \underline{\underline{\begin{bmatrix} 6 \\ 6 \end{bmatrix}}}$$

**(b) Beispiel 2**

- Zielfunktion

$$\min \Phi(x, y) = x^2 + y$$

- Restriktionen

$$x \geq 5$$

$$y \leq -2$$

- LCP-Eingabedaten

$$\underline{Q} = \underline{A}^T \underline{P} \underline{A} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{n} = (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} -5 \\ -2 \end{bmatrix}$$

$$\underline{M} = \underline{B} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{k} = \underline{b} - \underline{B} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \begin{bmatrix} -5 \\ -2 \end{bmatrix}$$

- LCP

$$\hat{\underline{z}} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{\underline{u}} + \begin{bmatrix} -5 \\ -2 \end{bmatrix}$$

- Lösung des LCP

$$\hat{\underline{z}} = \begin{bmatrix} 10 \\ 2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\underline{x}} = -(\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{B}^T \hat{\underline{u}} - \underline{A}^T \underline{P} \underline{l}) = \begin{bmatrix} 5 \\ -2 \end{bmatrix}$$

### A.4 Matrizenstruktur beim temporalen LSM

- Koeffizientenmatrix  $\underline{A}$

$$\begin{matrix}
 & a_0^1 & a_1^1 & a_2^1 & b_0^1 & b_1^1 & b_2^1 & \dots & a_0^{\hat{n}} & a_1^{\hat{n}} & a_2^{\hat{n}} & b_0^{\hat{n}} & b_1^{\hat{n}} & b_2^{\hat{n}} \\
 \underline{A} = & \left[ \begin{array}{cccccccccccccc}
 (g_1^1)_x & (g_1^1)_x \cdot x_1^1 & (g_1^1)_x \cdot y_1^1 & (g_1^1)_y & (g_1^1)_y \cdot x_1^1 & (g_1^1)_y \cdot y_1^1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 (g_{n1}^1)_x & (g_{n1}^1)_x \cdot x_{n1}^1 & (g_{n1}^1)_x \cdot y_{n1}^1 & (g_{n1}^1)_y & (g_{n1}^1)_y \cdot x_{n1}^1 & (g_{n1}^1)_y \cdot y_{n1}^1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & (g_1^{\hat{n}})_x & (g_1^{\hat{n}})_x \cdot x_1^{\hat{n}} & (g_1^{\hat{n}})_x \cdot y_1^{\hat{n}} & (g_1^{\hat{n}})_y & (g_1^{\hat{n}})_y \cdot x_1^{\hat{n}} & (g_1^{\hat{n}})_y \cdot y_1^{\hat{n}} & \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & (g_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}})_x & (g_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}})_x \cdot x_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}} & (g_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}})_x \cdot y_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}} & (g_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}})_y & (g_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}})_y \cdot x_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}} & (g_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}})_y \cdot y_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}} & 
 \end{array} \right] & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \vdots \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Bild 1} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\
 & & & & & & & & & & & & & & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \vdots \\ \\ \end{array} \right\} \text{Bild } \hat{n}
 \end{matrix}$$

- Beobachtungsvektor  $\underline{l}$

$$\underline{l} = \begin{matrix}
 \left[ \begin{array}{c}
 g_1^2 - g_1^1 \\
 \vdots \\
 g_{n2}^2 - g_{n1}^1 \\
 \vdots \\
 g_1^{\hat{n}} - g_1^{\hat{n}-1} \\
 \vdots \\
 g_{\hat{n}\hat{n}}^{\hat{n}} - g_{(n-1)\hat{n}}^{\hat{n}-1}
 \end{array} \right] & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \vdots \\ \\ \end{array} \right\} \Delta g(\text{Bild}_1, \text{Bild}_2) \\
 & & & & & & & & & & & & & & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \vdots \\ \\ \end{array} \right\} \Delta g(\text{Bild}_{\hat{n}-1}, \text{Bild}_{\hat{n}})
 \end{matrix}$$



## A.5 Bildzuordnung

ID	Punktverteilung (Raster)		Patch	Kanal	Prädiktionen	Ausschluss	Kor- rektur	Features (Ist/Soll)
OF_NWv_1	$x_A = 50$ $y_A = 400$	$dx = 50$ $dy = 50$	61×61	R	–	+x –x : 5 ±y : 3	ja	1073 1080
OF_NWv_2	$x_A = 200$ $y_A = 100$	$dx = 200$ $dy = 100$	61×61	RGB	–	+x –x : 5 ±y : 3	ja	1782 1782
OF_NWv_3	$x_A = 60$ $y_A = 430$	$dx = 50$ $dy = 50$	61×61	RGB	–	+x –x : 5 ±y : 3	ja	979 979
KK_NWv_1	$x_A = 50$ $y_A = 400$	$dx = 50$ $dy = 50$	61×61	R	$x : -5;1$ $y : -5;5$	+x –x : 5 ±y : 3	ja	955 1080
LSM_NWv_1	$x_A = 50$ $y_A = 400$	$dx = 50$ $dy = 50$	31×31	R	OF_NWv_1	+x –x : 5 ±y : 3	nein	202 1073
LSM_NWv_2	$x_A = 50$ $y_A = 400$	$dx = 50$ $dy = 50$	31×31	R	OF_NWv_1	+x –x : 5 ±y : 3	ja	1062 1073
LSM_NWv_3	$x_A = 50$ $y_A = 400$	$dx = 50$ $dy = 50$	31×31	RGB	OF_NWv_1	+x –x : 5 ±y : 3	nein	521 1073
LSM_NWv_4 ▪ spatial ▪ Bild 6 bis Bild 28	$x_A = 200$ $y_A = 100$	$dx = 200$ $dy = 100$	31×31	RGB	OF_NWv_2	+x –x : 5 ±y : 3	nein	840 1782
LSM_NWv_5 ▪ temporal ▪ Bild 6 bis Bild 28	$x_A = 60$ $y_A = 430$	$dx = 50$ $dy = 50$	31×31	RGB	OF_NWv_3	+x –x : 5 ±y : 3	nein	77 979
OF_NWh_1	$x_A = 50$ $y_A = 50$	$dx = 50$ $dy = 50$	61×31	RGB	–	+x –x : 3 ±y : 2	ja	711 720
OF_NWh_2	$x_A = 100$ $y_A = 100$	$dx = 100$ $dy = 100$	61×31	RGB	–	+x –x : 3 ±y : 2	ja	1570 1584

ID	Punktverteilung (Raster)		Patch	Kanal	Prädiktionen	Ausschluss	Kor- rektur	Features (Ist/Soll)
OF_NWh_2	$x_A = 100$ $y_A = 100$	$dx = 100$ $dy = 100$	61×31	RGB	–	+x –x : 3 ±y : 2	ja	1570 1584
KK_NWh_1	$x_A = 50$ $y_A = 50$	$dx = 50$ $dy = 50$	61×31	RGB	x : –3;1 y : –3;3	+x –x : 3 ±y : 2	ja	704 720
LSM_NWh_1	$x_A = 50$ $y_A = 50$	$dx = 50$ $dy = 50$	31×15	RGB	OF_NWh_1	+x –x : 3 ±y : 2	nein	77 711
LSM_NWh_2 ▪ spatial ▪ Bild 6 bis Bild 28	$x_A = 100$ $y_A = 100$	$dx = 100$ $dy = 100$	31×15	RGB	OF_NWh_2	+x –x : 3 ±y : 2	nein	269 1563
OF_Z_1	$x_A = 60$ $y_A = 60$	$dx = 100$ $dy = 100$	61×61	RGB	–	+x –x : 15 ±y : 5	ja	1311 1350
OF_Z_2	$x_A = 240$ $y_A = 240$	$dx = 200$ $dy = 200$	61×61	RGB	–	+x –x : 15 ±y : 5	ja	1458 1458
LSM_Z_1	$x_A = 60$ $y_A = 60$	$dx = 100$ $dy = 100$	31×31	RGB	OF_Z_1	+x –x : 15 ±y : 5	nein	146 1293
LSM_Z_2 ▪ spatial ▪ alle Bilder	$x_A = 240$ $y_A = 240$	$dx = 200$ $dy = 200$	31×31	RGB	OF_Z_2	+x –x : 15 ±y : 5	nein	224 1458

Tabelle A-3: Matchingkonfiguration der Bildzuordnung:

- OF: Optical Flow
- KK: Kreuzkorrelation
- LSM: Least Squares Matching
- NWv: Normalwinkelsequenz (20.08.2004); vorderer Gletscherbereich
- NWh: Normalwinkelsequenz (20.08.2004); hinterer Gletscherbereich
- Z: Zoomsequenz (19.08.2004)
- $x_A, y_A$ : Position des ersten Rasterpunktes, [Pixel]
- $d_x, d_y$ : Maschenweite des Rasters, [Pixel]
- Angaben innerhalb der Spalte „Patch“ in Pixeln
- R: Roter Kanal
- RGB: RGB-Kanäle
- +x: Entgegengesetzt der Fließrichtung
- –x: Schwellwert für die maximale Translation in Fließrichtung, [Pixel]
- ±y: Schwellwert für die maximale Translation in y-Bildrichtung, [Pixel]

- Die optionale Ausreißerkorrektur erfolgt stets um den Mittelwert der zuvor korrekt verfolgten Features.
- Für das LSM in Verbindung mit zeitlichen und räumlichen Restriktionen gehen die Bedingungs-gleichungen unter höchstmöglicher Gewichtung im nicht strengen Sinn (eine bzw. zwei Restrik-tionsgleichungen) in die Ausgleichung ein (vgl. Gleichung (5-14), Kapitel 5.3.3).

## A.6 Meereszeiten Ilulissat

Datum	Jahr	DOY	Zeit Ilulissat [h:min]	Zeit UTC [h:min]	Tide [cm]
20.08.	2004	233	22:00	00:00	50,82
	2004	233	23:00	01:00	92,69
	2004	233	00:00	02:00	115,72
	2004	233	01:00	03:00	114,21
	2004	233	02:00	04:00	88,32
	2004	233	03:00	05:00	44,09
	2004	233	04:00	06:00	-8,11
	2004	233	05:00	07:00	-56,19
	2004	233	06:00	08:00	-89,29
	2004	233	07:00	09:00	-100,5
	2004	233	08:00	10:00	-88,46
	2004	233	09:00	11:00	-57,62
	2004	233	10:00	12:00	-16,93
	2004	233	11:00	13:00	22,5
	2004	233	12:00	14:00	50,3
	2004	233	13:00	15:00	59,5
	2004	233	14:00	16:00	48,29
	2004	233	15:00	17:00	20,37
	2004	233	16:00	18:00	-16,03
	2004	233	17:00	19:00	-50,44
	2004	233	18:00	20:00	-72,82
	2004	233	19:00	21:00	-76,31
	2004	233	20:00	22:00	-58,99
	2004	233	21:00	23:00	-24,4

Tabelle A-4: Meereszeiten Ilulissat vom 20.08.2004

Datum	Jahr	DOY	Zeit Ilulissat [h:min]	Zeit UTC [h:min]	Tide [cm]
21.08.	2004	234	22:00	00:00	19,28
	2004	234	23:00	01:00	61,34
	2004	234	00:00	02:00	91,25
	2004	234	01:00	03:00	101,33
	2004	234	02:00	04:00	88,71
	2004	234	03:00	05:00	56,03
	2004	234	04:00	06:00	10,81
	2004	234	05:00	07:00	-36,44
	2004	234	06:00	08:00	-74,85
	2004	234	07:00	09:00	-95,84
	2004	234	08:00	10:00	-95,21
	2004	234	09:00	11:00	-74,1
	2004	234	10:00	12:00	-38,56
	2004	234	11:00	13:00	2,05
	2004	234	12:00	14:00	37,48
	2004	234	13:00	15:00	59,22
	2004	234	14:00	16:00	62,57
	2004	234	15:00	17:00	47,75
	2004	234	16:00	18:00	19,71
	2004	234	17:00	19:00	-13,24
	2004	234	18:00	20:00	-41,67
	2004	234	19:00	21:00	-57,5
	2004	234	20:00	22:00	-56,11
	2004	234	21:00	23:00	-37,49

Tabelle A-5: Meereszeiten Ilulissat vom 21.08.2004

## A.7 Koordinatenliste

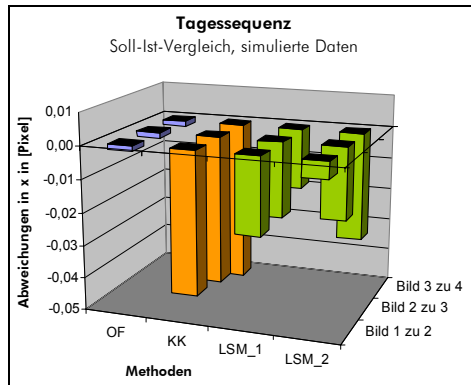
ID	x [Pixel]	y [Pixel]	x [mm]	y [mm]	X [m]	Y [m]	Z [m]
N1	–	–	–	–	0,000	0,000	0,000
N2	–	–	–	–	467,207	-77,704	8,263
N3	–	–	–	–	801,639	-190,840	4,558
N4	–	–	–	–	-117,552	0,000	-1,577
N5	–	–	–	–	610,296	-57,142	-2,617
ZM1	187,0	2732,0	1,496	21,856	-5,376	54,788	-16,038
ZM2	2239,0	2665,0	17,912	21,320	0,760	60,916	-16,970
ZM3	3131,0	2613,0	25,048	20,904	3,597	58,719	-16,467
ZM4	4456,0	2595,0	35,648	20,760	7,999	58,021	-16,352
GS1	108,0	2014,0	0,864	16,112	-705,496	3201,628	-222,087
GS2	613,0	1812,0	4,904	14,496	-583,894	3985,691	-152,701
GS3	1629,0	1798,0	13,032	14,384	265,259	2885,437	-156,196
GS4	1434,0	2073,0	11,472	16,584	323,977	2213,898	-198,387
GS5	3138,0	1891,0	25,104	15,128	735,420	3072,199	-158,744
GS6	3192,0	2153,0	25,536	17,224	545,912	2214,668	-207,601
GS7	3387,0	2153,0	27,096	17,224	609,986	2200,143	-206,820
GS8	3780,0	2150,0	30,240	17,200	752,919	2210,827	-212,564
GS9	–	–	–	–	1172,751	3115,621	-149,138
GS10	319,0	2255,0	2,552	18,040	-374,922	1985,114	-212,311
GS11	505,0	2159,0	4,040	17,272	-353,747	2182,802	-202,256
GS12	696,0	2276,0	5,568	18,208	-269,178	2011,395	-221,886

Tabelle A-6: Koordinatenübersicht der Passpunkte und Tachymeterstandpunkte:

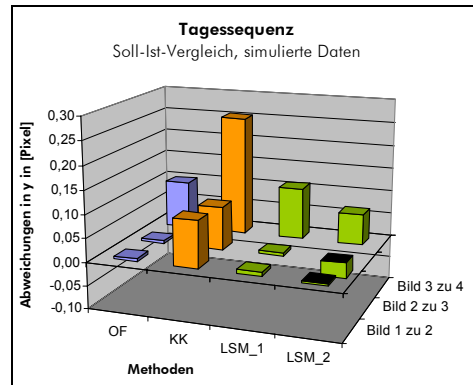
Aufgeführt sind die Bild- und Objektkoordinaten der Zielmarken (ZM) sowie von markanten Punkten auf der Oberfläche des Gletscherstroms (GS). Weiterhin liegen die Objektkoordinaten der Tachymeterstandpunkte vor (N).

- Bildkoordinaten bezüglich des ersten Bildes der Normalwinkelsequenz vom 20.08.2004
- Objektkoordinaten des Gletschers bezüglich des lokalen Koordinatensystems (N1-N4) zur Messepoche 20.08.2004

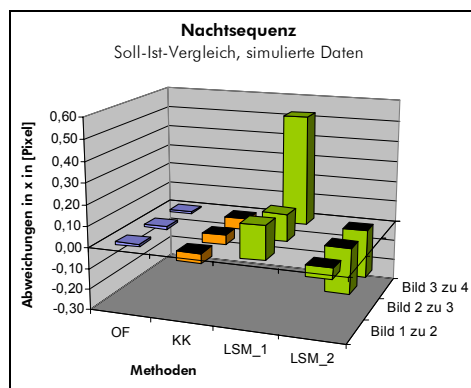
## A.8 Genauigkeitsanalyse



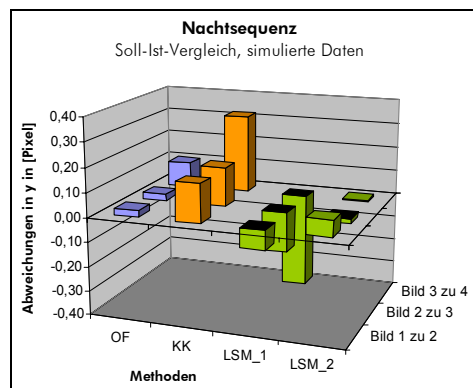
a.



b.



c.



d.

Abbildung A-1: Differenzen zwischen Soll- und Messwerten in [Pixel]

- Abweichungen in x der simulierten Tagessequenz
- Abweichungen in y der simulierten Tagessequenz
- Abweichungen in x der simulierten Nachtsequenz
- Abweichungen in y der simulierten Nachtsequenz

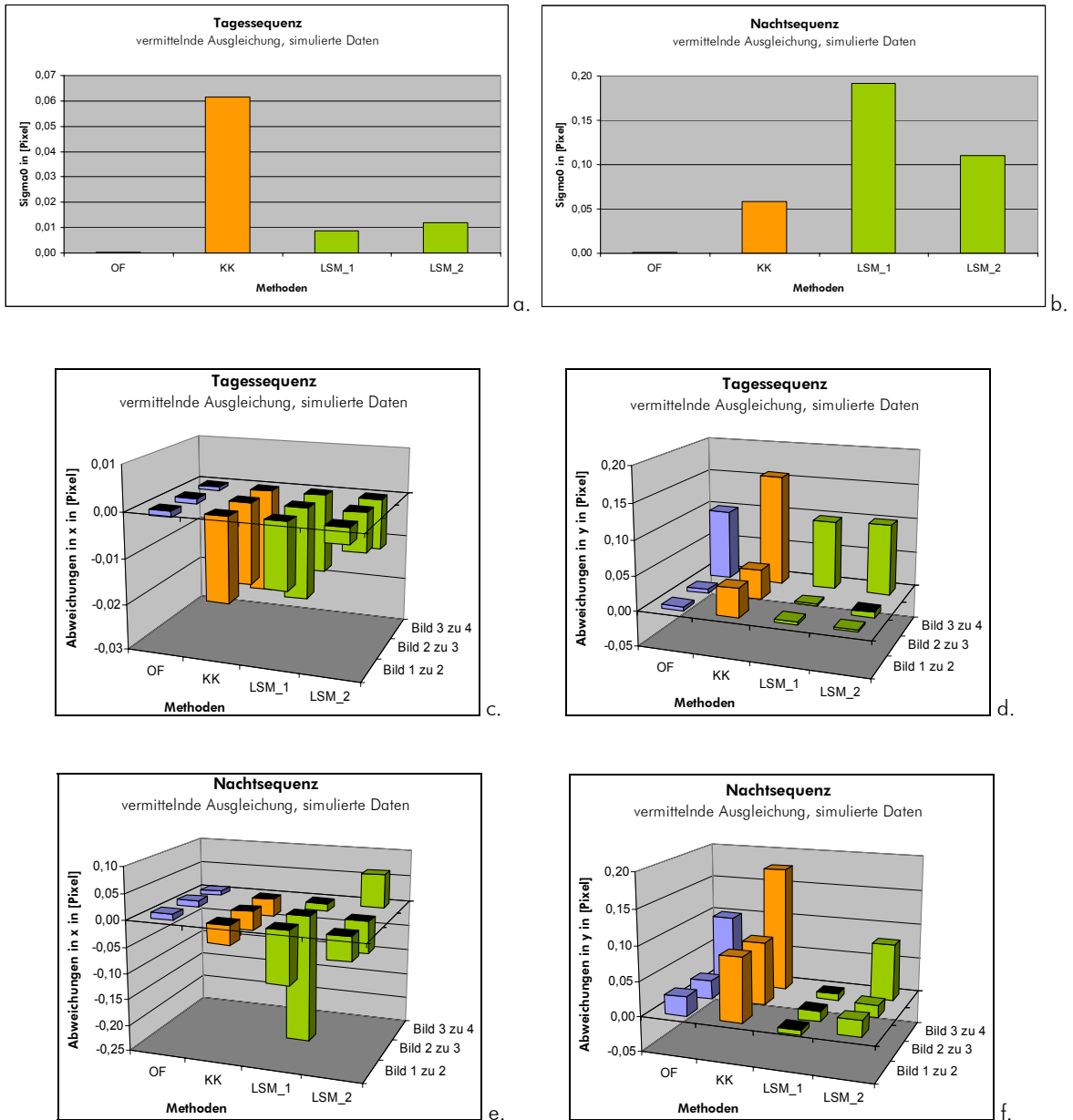


Abbildung A-2: Ergebnisse der vermittelnden Ausgleichung in [Pixel]

- a. A posteriori Standardabweichungen des Ausgleichungsmodells der simulierten Tagessequenz
- b. A posteriori Standardabweichungen des Ausgleichungsmodells der simulierten Nachtsequenz
- c. Abweichungen in x der simulierten Tagessequenz
- d. Abweichungen in y der simulierten Tagessequenz
- e. Abweichungen in x der simulierten Nachtsequenz
- f. Abweichungen in y der simulierten Nachtsequenz

## A.9 Effektivität

Methode Punkt- anzahl	1	10	100	300	Bildanzahl
Optical Flow	1,08	1,18	2,22	4,67	2
	18,62	30,81	70,67	170,41	25
	80,85	98,48	182,33	396,74	50
Kreuzkorrelation	0,95	1,17	3,29	8,14	2
	16,45	28,40	85,58	221,22	25
	76,42	85,07	197,10	444,04	50
LSM	0,92	0,94	2,72	1,33	2
	33,77	17,48	27,64	39,01	25
	78,08	73,00	82,82	117,07	50

Tabelle A-7: Rechenzeiten der Bildzuordnungsverfahren in Sekunden/Bildsequenz



## Anhang B

# Programmdokumentation

In diesem Abschnitt wird die im Rahmen der Arbeit erstellte Software „2-DMA“ dokumentiert. Es werden hierbei lediglich die Erweiterungen für die Gletscherbilddauswertung vorgestellt, wobei die Gliederung den Menüpunkten der Standardoberfläche entspricht. Im Mittelpunkt stehen der Aufbau der Programmoberfläche und die zu treffenden Parameter für die Verwendung der einzelnen Funktionalitäten. Eine ausführliche Einführung in die Arbeitsweise des Programms „2-DMA“ zeigt (WESTFELD, 2004). Die Erläuterungen beziehen sich auf den Programmstand vom 31.07.2005. Der Quelltext ist dem Datenträger (DVD:\2-DMA\Quelltext\)) zu entnehmen.

Die folgenden Abkürzungen werden im Verlauf der Erläuterungen benutzt:

- DF: Dialogfeld
- EF: Eingabefeld
- GF: Gruppenfeld
- KK: Kontrollkästchen
- MP: Menüpunkt
- RK: Registerkarte

## B.1 Datei

### (a) Ein- und Ausgabe

- DF „Eingabedaten und Ausgabeverzeichnis wählen“
  - KK „Bildbereich einschränken“

Diese Option ermöglicht die interaktive Extraktion des interessierenden Bildbereiches aus dem ersten Bild der geladenen Sequenz. Der dadurch freigestellte Bereich wird auf die restlichen Bilder übertragen. Die Speicherung der verkleinerten Bilder erfolgt fakultativ.

- KK „Bilder im RAM speichern“

Um einen ressourcenschonenden Umgang mit großformatigen Bildsequenzen sicherzustellen, besteht die Möglichkeit, die Bilder nicht in dem Arbeitsspeicher des Rechners zu speichern, sondern sie bei jeder Verwendung vom lokalen Datenträger zu laden.

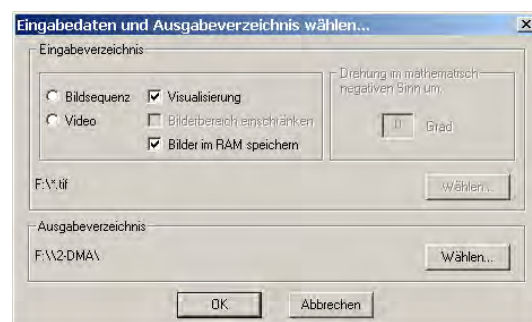


Abbildung B-1: Dialogfeld „Eingabedaten und Ausgabeverzeichnis wählen“

## B.2 Tracking

### (a) Bestimmung der Features

- MP „Punktraster“
  - EF „Rasterausdehnung“

Die anzugebenden Werte entsprechen der Maschenweite des Rasters in x- und y-Bildrichtung in Pixel.

- EF „Erstes Feature“

Die anzugebenden Werte entsprechen der Position des ersten Rasterpunktes in Pixel, wobei jener die kleinste x- und y-Koordinate des gesamten Rasternetzes aufweist.

- GF „Bereichswahl“

Über das Gruppenfeld „Bereichswahl“ ist der zu betrachtende Bildausschnitt zu wählen. Die Featurewahl kann optional visualisiert und im Ausgabeverzeichnis gespeichert werden.

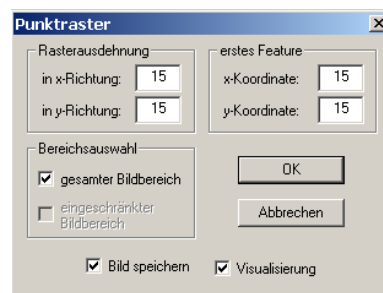


Abbildung B-2: Dialogfeld „Punktraster“

- MP „Features löschen“

Dieser Menüpunkt ist aktiv, sobald die zu verfolgenden Bildelemente über ein Punktraster definiert sind oder die Koordinaten eines zuvor gespeicherten Projektes geladen werden. In diesen zwei Fällen ist vor einer manuellen (interaktiv) oder automatischen (Interestoperator) Bestimmung neuer Features das Löschen der alten Startwerte notwendig.

### (b) Kreuzkorrelation

- GF „Einstellungen“

In diesem Gruppenfeld können die fundamentalen Parameter für die Kreuzkorrelation gewählt werden. Hierzu gehören die Größe von Muster- und Suchpatch (Ausdehnung in x- und y-Richtung in Pixel), der Prädiktionsbereich (Ausdehnung in positiver sowie negativer x- und y-Richtung in Pixel) sowie die Anzahl der zu verwendenden Nachbarschaft für die Bildung des Paraboloides bei der Subpixelberechnung. Für das Tracking stehen der Kreuzkorrelation, wie auch den restlichen Matchingverfahren, ein, zwei oder alle Kanäle eines RGB-Bildes zur Verfügung. Ebenso ist die Berechnung und anschließende Verwendung eines einzigen Grauwertkanals möglich.

- GF „Abbruchkriterien“

Die folgenden Kriterien führen zu einem Abbruch der Berechnungen: die Unterschreitung eines Schwellwertes für den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten sowie die Überschreitung einer maximalen Iterationsanzahl bzw. die Unterschreitung eines Schwellwertes für die Korrektur des Schätzwertes während der iterativen Paraboloidenpassung.

- GF „Ausschlusskriterien“

Die hier angebotenen Optionen sind äquivalent zu den Ausschlusskriterien der anderen Bildzuordnungsverfahren und werden in (WESTFELD, 2004) eingeführt.

- GF „Features“

In Abhängigkeit von der Detektionswahl der zu verfolgenden Bildelemente ist in diesem Gruppenfeld die Verwendung von manuell gewählten (Interaktion am Bildschirm), automatisch bestimmten (Interestoperator; Rastergenerierung) und/oder importierten Startkoordinaten festzulegen.

Die Visualisierung der Bildsequenz im Verlauf der Zuordnung, die Speicherung der Bilder mit den eingezeichneten Featurepositionen, die Protokollgenerierung und -speicherung sowie die Speicherung der Korrelationsmatrizen zur anschließenden Kontrolle sind optional. Des Weiteren ist der Menüpunkt „Einstellungen“ (B.4) über sämtlich Dialogfelder der Matchingverfahren direkt erreichbar.

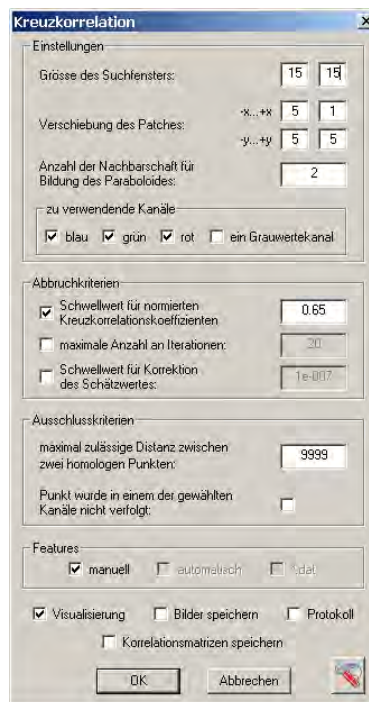


Abbildung B-3: Dialogfeld „Kreuzkorrelation“

## B.3 Analyse

### (a) Trajektorien

- MP „AVI“

Über das Dialogfeld der Abbildung B-4 werden die Parameter für die Generierung von Videofilmen der Trajektorien definiert (vgl. Kapitel 5.5).

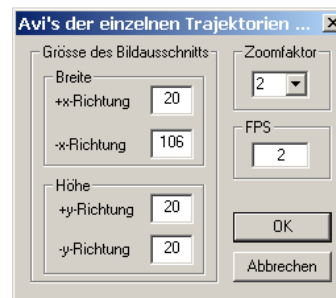


Abbildung B-4: Dialogfeld „Avi's der einzelnen Trajektorien“

- GF „Breite“ und GF „Höhe“

Die Ausdehnung des Videofilms ist in diesen zwei Gruppenfeldern anzusetzen. Die Angaben erfolgen in Pixel.

- GF „Zoomfaktor“

Für hochauflösende Bilder empfiehlt sich die Verwendung der Zoomfunktion. Entsprechend der Angaben werden alle Videofilme und die eingezeichneten Trajektorien vergrößert.

- MP „Bilder“

Eine zweite Möglichkeit zur Visualisierung der berechneten Trajektorien besteht in dem Plot der Koordinaten in die einzelnen Bilder bzw. aller Koordinaten über die Zeit in das erste Bild der ausgewerteten Sequenz (vgl. Kapitel 5.5).

- MP „OpenGL/VRML“

Die räumliche und interaktive Darstellung der Trajektorien ist in dem Programm „2-DMA“ über einen OpenGL-Kontext gewährleistet. In Kapitel 5.5 wird der dieser eingehend erläutert.

- MP „Vektoren“

Über den Menüpunkt „Vektoren“ kann das erste Bild der Sequenz mit dem ermittelten Bewegungsvektorfeld im Bildraum erstellt werden (vgl. Kapitel 5.5).

- MP „XLS“

Insofern das Programm „Microsoft Office Excel“ auf dem Anwendungsrechner installiert ist, werden über „XLS“ die Koordinatenlisten in eine Microsoft Office Excel-Datei exportiert und gemäß den Ausführungen des Kapitels 5.5 die grundlegendsten Diagramme zur Visualisierung der

Trajektorien automatisch erstellt. Voraussetzung dafür ist, dass sich die beigelegte Vorlagedatei (...\ExcelSheet\Traj.xls) im Ausführungsverzeichnis der Software „2-DMA“ befindet. Der Pfad kann über den Menüpunkt „Einstellungen“ auch eigens spezifiziert werden.

## (b) Kreuzkorrelation

- MP „Korrelationsmatrizen“

„2-DMA“ unterstützt die Visualisierung der Kreuzkorrelationsmatrizen in dem programmeigenen OpenGL-Kontext (Abbildung B-5a) oder durch den Export der Matrizen in eine MatLab-Datei (Abbildung B-5b). Die Bedienung des OpenGL-Kontexts entspricht jener aus Kapitel 5.5. Für die Darstellung der MatLab-Dateien ist das Programm „MatLab“ (The MathWorks, Inc.) notwendig, da die Funktionalitäten dieser Software bis dato noch nicht in das vorliegende Programm „2-DMA“ integriert sind.

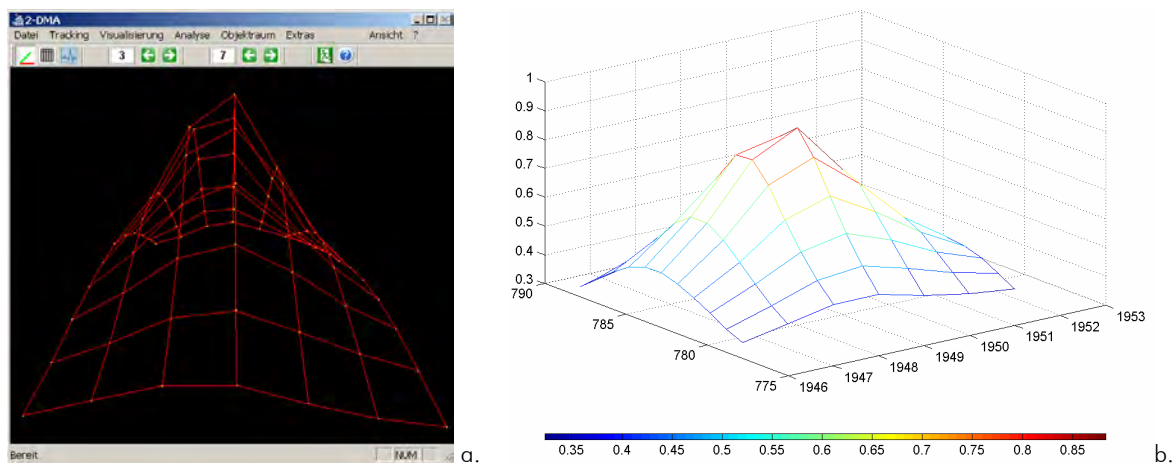


Abbildung B-5: Visualisierung der Kreuzkorrelationskoeffizienten

- a. OpenGL-Kontext („2-DMA“)  
b. MatLab-Kontext („MatLab“)

## (c) Featureanalyse

Der Menüpunkt „Features entfernen“ kann genutzt werden, um

- die zeitlichen Variationen der Bildelemente zu betrachten,
- einzelne Features manuell aus den weiteren Berechnungen auszuschließen bzw.
- sie wieder zu aktivieren.

Neben dem Hauptfenster, welches zu Beginn das erste Bild der Sequenz zeigt, öffnet sich der in Abbildung B-6 dargestellte Dialog. Über diesen wird die Methode ausgewählt (GF „Features aus...“), die Toleranz für die Lokalisierung der Features in Pixel eingestellt (GF „Toleranz“) und die Zoomfunktion verwendet (GF „Zoom“). Darüber hinaus wird die Farbgebung der Features in Abhängigkeit ihres erlangten Matchingstatus aufgezeigt (GF „Legende“).

Das „Blättern“ durch die einzelnen Bilder der Sequenz wird über die Steuerung des Rades der Computermaus realisiert.

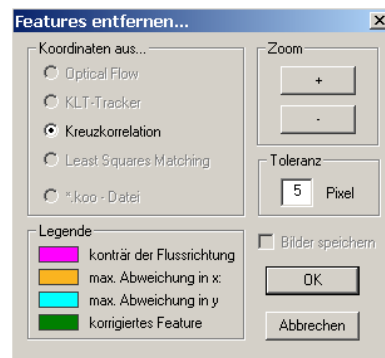


Abbildung B-6: Dialogfeld „Features entfernen“

## B.4 Extras

### (a) Koordinatenimport

Der Menüpunkt „Koordinaten einlesen“ entspricht einer einfachen Projektwiederherstellung. Falls die Koordinaten einer vorangegangenen Auswertung gespeichert wurden, können diese Werte wieder eingelesen werden. Die Voraussetzung ist, dass die Anzahl der zuvor geladenen Bilder mit der Bildanzahl des vorherigen Projektes übereinstimmt. Die Methode, welche zur Bestimmung Anwendung fand, ist manuell zu wählen. Die Status der Features werden hingegen automatisch aus den Koordinatenlisten ermittelt. Nach einem erfolgreichen Einlesen stehen sämtliche Programmfunktionalitäten zur Verfügung.

### (b) Kamerabewegung

- MP „Kamerabewegung schreiben“

Insofern die vorausgegangene Bildzuordnung der Bestimmung der Kamerabewegung diente (Matching von Passpunkten), werden über den Menüpunkt „Kamerabewegung schreiben“ die ermittelten Koordinaten in eine ASCII-Datei (Extension: „cam“) oder Excel-Datei geschrieben.

- MP „Kamerabewegung lesen“

Falls die Kamerabewegung nach jeder Bildzuordnung sofort automatisch angebracht werden soll oder die Kameraoffsets für ein Bildresampling nötig sind, müssen im Voraus die zugehörigen Werte aus einer \*.cam-Datei eingelesen werden.

- MP „Kamerabewegung anbringen“

Die Anbringung der Kamerabewegung ist auch nach einer Bildzuordnung über diesen Menüpunkt möglich. Korrigiert werden die Trajektorien aller erfolgreich verfolgten Features, wobei dieser Vorgang nicht umkehrbar ist.

### (c) Resampling

Dieser Menüpunkt nutzt die berechneten zeitlichen Variationen des Kamerastandpunktes, um die Eingabebilder vor der eigentlichen Bildzuordnung durch Resampling zu korrigieren. Es wird die bilineare Interpolation verwendet.

### (d) Einstellungen

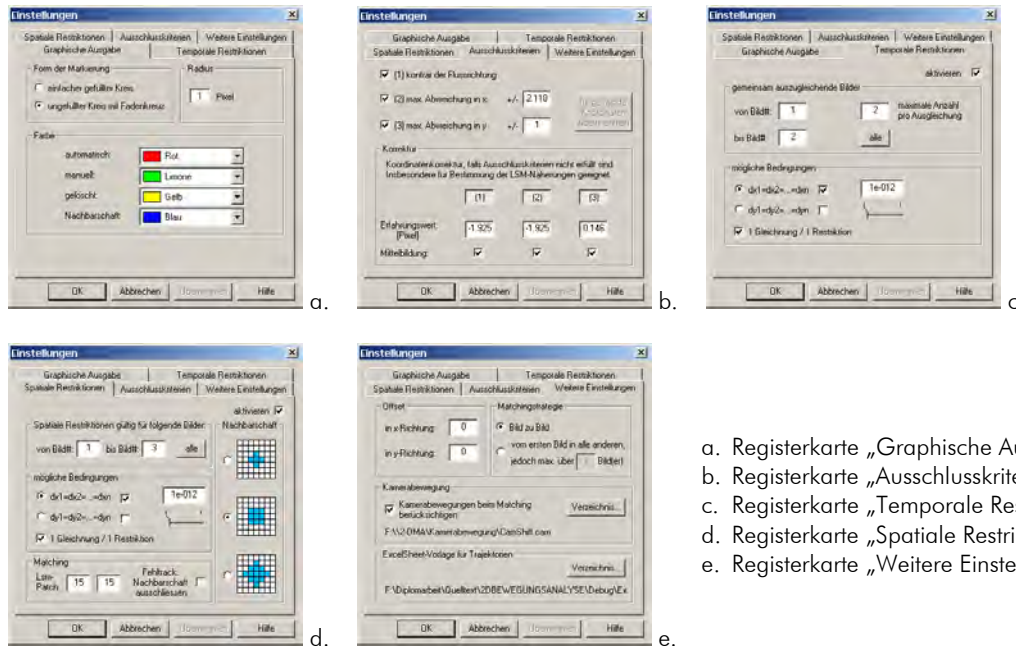
Der Menüpunkt „Einstellungen“ beinhaltet die unten abgebildeten Registerkarten (Abbildung B-7).

- Registerkarte „Graphische Ausgabe“

Die Featuremarkierung kann in ihrer Form, Größe und Farbgebung beeinflusst werden.

- Registerkarte „Ausschlusskriterien“

Die Definition der Ausschlusskriterien und das Verhalten des Programms „2-DMA“ bei der Verletzung dieser Schwellwerte (optionale Korrektur) behandelt die Registerkarte „Ausschlusskriterien“. Ebenso besteht die Möglichkeit, die festgelegten Schwellwerte auf eine bereits verfolgte Punktliste anzuwenden. Weitere Erläuterungen finden sich in dem Kapitel 5.3.1.



- a. Registerkarte „Graphische Ausgabe“  
 b. Registerkarte „Ausschlusskriterien“  
 c. Registerkarte „Temporale Restriktionen“  
 d. Registerkarte „Spatiale Restriktionen“  
 e. Registerkarte „Weitere Einstellungen“

Abbildung B-7: Dialogfeld „Einstellungen“

- Registerkarte „Temporale Restriktionen“

Entsprechend den Ausführungen des Kapitels 5.3.3 beinhaltet diese Registerkarte

- die Definition der Bilder, welche dem Restriktionseinfluss unterliegen (GF „Gemeinsam auszugleichende Bilder“) sowie
- die Festlegung des Restriktionsbereiches,
- die Größe der Restriktionsgewichte und
- die Anzahl der Restriktionsgleichungen (GF „Mögliche Bedingungen“).

- Registerkarte „Spatiale Restriktionen“

Die Einstellungen sind äquivalent zu der Registerkarte „Temporale Restriktionen“. Zusätzlich sind die folgenden Angaben zwingend:

- Die Anzahl der Nachbarschaft (GF „Nachbarschaft“)
- Die Größe des LSM-Patches (GF „Matching“)

Fakultativ kann bei einer Fehlzuordnung des Hauptbildelementes auch dessen Nachbarschaft von der weiteren Bildzuordnung ausgeschlossen werden.

- Registerkarte „Weitere Einstellungen“

Das Programm „2-DMA“ unterstützt ferner die untenstehenden Einstellungen.

- Falls mit einer verkleinerten Bildsequenz gearbeitet wird, kann der Offset zur Originalgröße automatisch an alle Koordinaten angebracht werden (GF „Offset“).
- Die Auswahl der Matchingstrategie (Kapitel 5.3.3) erfolgt innerhalb des Gruppenfeldes „Matchingstrategie“.
- Die Berücksichtigung der Kamerabewegung wird im Gruppenfeld „Kamerabewegung“ aktiviert und bedingt die Wahl der zugehörigen Offsetdatei auf dem lokalen Datenträger.

Das Standardverzeichnis für die Excel-Vorlage kann im Gruppenfeld „ExcelSheet-Vorlage für Trajektorien“ individualisiert werden.



## B.5 Protokolle

### (a) Kreuzkorrelation

```

cross correlation                               Rot_1_0.txt           1
chosen options:
size of patch: 61 x 61                          2
displacement of patch in x: -5 <-> 1           3
displacement of patch in y: -5 <-> 5           4
number of neighborhood for sub-pixel calculation: 2 5
threshold value for cross correlation coefficient: 0.65 6
imx 4500 imy 972
imx 4500 imy 972
+++++
correlations:                                    7
 0.499 0.532 0.557 0.572 0.571 0.560 0.541
 0.517 0.557 0.589 0.612 0.616 0.604 0.579
 0.537 0.584 0.628 0.659 0.664 0.646 0.611
 0.562 0.620 0.678 0.720 0.721 0.689 0.640
 0.596 0.669 0.747 0.799 0.787 0.732 0.665
 0.637 0.726 0.827 0.886 0.848 0.762 0.677
 0.670 0.769 0.878 0.927 0.864 0.760 0.672
 0.685 0.775 0.862 0.886 0.819 0.726 0.648
 0.677 0.746 0.801 0.804 0.748 0.678 0.617
 0.651 0.702 0.732 0.727 0.685 0.634 0.585
 0.614 0.651 0.667 0.660 0.631 0.595 0.555

coordinates of max. correlation:                 8
223.00000 614.00000 <-> 0.92696

sub-pixel evaluation:
GMM_sigma0 = 0.017 after 3 it.                  9
x0: 0.060 +- 0.0688
y0: -0.017 +- 0.0973                            10

results:
225.93036 613.10085 <-> 223.87020 614.11741    11

```

Abbildung B-8: Protokoll der Kreuzkorrelation

- 1 Struktur des Dateinamens: <Kanal>\_<Bild-ID>\_<Features-ID>.txt
- 2 Patchgröße; [Pixel]
- 3 Prädiktionsbereich; [Pixel]
- 4 Anzahl der zu verwendenden Nachbarschaft für die Paraboloideinpassung
- 5 Schwellwert für Kreuzkorrelationskoeffizienten
- 6 Muster- und Suchbildgrößen; [Pixel]
- 7 Matrix der Kreuzkorrelationskoeffizienten
- 8 Koordinaten des maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten; [Pixel]
- 9 A posteriori Standardabweichung der Subpixelberechnung; [Pixel]
- 10 Parameter der Subpixelberechnung mit Genauigkeitsangaben; [Pixel]
- 11 Zusammenfassung der Ergebnisse; [Pixel]

**(b) Least Squares Matching**

```

                                Rot_0_0.txt
chosen options for lsm:
-> radio_corr (offs+gain from avg)

matches with sigma0 > 9999.00 are not accepted
least squares matching
imx 4500 imy 972
imx 4500 imy 972
output: template position
output: initial pixel coord, final pixel coord, sigma0
+++++

0. location: 228.000 612.000 <-> 225.930 612.146

0. iteration:
GMM_omega = 15209.0
GMM_omega_Res = 0.000000
0. parameters:
      -0.228  -0.028  -0.028   0.542   0.015  -0.014
      -0.228   0.972  -0.028   0.542   0.015   0.986

1. iteration:
GMM_omega = 13514.3
GMM_omega_Res = 0.000000
0. parameters:
      0.032   0.003  -0.003   0.150   0.005   0.013
     -0.195   0.975  -0.031   0.692   0.019   0.999

2. iteration:
GMM_omega = 13318.8
GMM_omega_Res = 0.000000
0. parameters:
      0.001   0.001   0.002   0.045   0.004   0.004
     -0.194   0.976  -0.029   0.738   0.023   1.003

3. iteration:
GMM_omega = 13215.4
GMM_omega_Res = 0.000000
0. parameters:
      0.003  -0.001   0.000  -0.001  -0.001   0.000
     -0.192   0.975  -0.028   0.736   0.023   1.004

correlations
 1.000  0.111  -0.366  -0.113  -0.103  -0.143
 0.111  1.000  -0.075   0.100   0.103   0.138
-0.366 -0.075  1.000  -0.053   0.035   0.012
-0.113  0.100  -0.053  1.000   0.649   0.452
-0.103  0.103   0.035   0.649  1.000   0.476
-0.143  0.138   0.012   0.452   0.476  1.000

GMM_sigma0 = 7.768 after 4 it.
0. a0: -0.192 +- 0.0455
0. a1:  0.975 +- 0.0123
0. a2: -0.028 +- 0.0109
0. b0:  0.736 +- 0.0938
0. b1:  0.023 +- 0.0196
0. b2:  1.004 +- 0.0174

=> 225.739 612.882 - 7.768

```

Abbildung B-9: Protokoll eines LSM ohne Restriktionen

- 1 Struktur des Dateinamens:
  - Ohne Restriktionen: <Kanal>\_<Bild-ID>\_<Feature-ID>.txt
  - Spatiale Restriktionen: <Kanal>\_<Bild-ID>\_<von-Feature-ID>-<bis-Feature-ID>.txt
  - Temporale Restriktionen: <Kanal>\_<von-Bild-ID>-<bis-Bild-ID>\_<Feature-ID>.txt
- 2 Radiometrische Transformation
- 3 Schwellwert für die a posteriori Standardabweichung des GMM; [Grauwerte]
- 4 Muster- und Suchbildgrößen; [Pixel]
- 5 Start- und Näherungswertpositionen; [Pixel]:

Der vorangestellte laufende Index erweitert sich bei temporalen Restriktionen um die Anzahl der gemeinsam auszugleichenden Bilder und bei spatialen Restriktionen um die Anzahl der Nachbarschaft.

- 6 Iterationsstufe
- 7  $\underline{v}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v}$  der jeweiligen Iterationsstufe
- 8  $\underline{v}_{Res}^T \cdot \underline{P}_{Res} \cdot \underline{v}_{Res}$  der jeweiligen Iterationsstufe
- 9 Zuschläge für die unbekannt Parameter; [Pixel]:

Der vorangestellte laufende Index erweitert sich bei temporalen Restriktionen um die Anzahl der gemeinsam auszugleichenden Bilder und bei spatialen Restriktionen um die Anzahl der Nachbarschaft.

- 10 Korrelationsmatrix der Unbekannten
- 11 A posteriori Standardabweichung des GMM; [Grauwerte]
- 12 Ausgegliche Parameter mit Genauigkeitsangaben; [Pixel]

Der vorangestellte laufende Index erweitert sich bei temporalen Restriktionen um die Anzahl der gemeinsam auszugleichenden Bilder und bei spatialen Restriktionen um die Anzahl der Nachbarschaft.

- 13 Zusammenfassung der Ergebnisse; [Pixel], [Grauwerte]

## B.6 Koordinatenlisten

### (a) \*.koo-Format

```

                                Mittelung.koo      1
*****
Koordinatenliste - 08/05/05 - 11:56:11
*****

NOI = 4                               2
NOF = 4                               3

Feature #1, Status: 1                 4

716.00000      628.00000
714.27661      628.14600      11.682396
712.17512      629.05987      4.010213
710.28657      629.36571      3.158614

Feature #2, Status: 1

840.00000      712.00000
838.07500      712.14600      9.986255
836.32542      712.80448      9.660143
834.43687      713.37025      11.228037      5

Feature #3, Status: 1

1300.00000     612.00000
1298.25042     612.87884      12.905844      6
1296.22290     613.67475      11.871302      7
1294.22523     614.12099      8.247261      8

Feature #4, Status: 1

1320.00000     824.00000
1318.25042     824.87884      6.975455
1316.36187     825.71621      7.386368
1314.43694     826.31119      12.414135

4 von 4 Punkten erfolgreich verfolgt.

```

Abbildung B-10: Koordinatenliste im \*.koo-Format

- 1 Struktur des Dateinamens: <Kanal>.koo
- 2 Anzahl der Bilder der Sequenz
- 3 Anzahl der zu verfolgenden Features
- 4 Status der Bildzuordnung
  - Status 0: Matching nicht erfolgreich
  - Status 1: Matching erfolgreich
  - Status 2: Zuordnung konträr der Fließrichtung des Gletscherstroms (optionale Korrektur aktiviert)
  - Status 3: Schwellwert für die maximale Translation in  $\pm y$ -Bildrichtung über-/unterschritten (optionale Korrektur aktiviert)
  - Status 4: Schwellwert für die maximale Translation in  $\pm x$ -Bildrichtung über-/unterschritten (optionale Korrektur aktiviert)
- 5
  1. Spalte: Bildkoordinate in  $x$ -Richtung; [Pixel]
  2. Spalte: Bildkoordinate in  $y$ -Richtung; [Pixel]
  3. Spalte: A posteriori Standardabweichung des GMM; [Grauwerte]; nur bei LSM

**(b) \*.dat-Format**

Punkt001_Koo.dat					1
2744	716.00000	628.00000	0.00000	1	
2745	714.27661	628.14600	11.68240	1	
2746	712.17512	629.05987	4.01021	1	
2747	710.28657	629.36571	3.15861	1	
2	3	4	5	6	

Abbildung B-11: Koordinatenliste im \*.dat-Format

- 1 Struktur des Dateinamens: Punkt<Feature-ID>\_Koo.dat
- 2 Bildnummer
- 3 Koordinaten in x-Bildrichtung
- 4 Koordinaten in y-Bildrichtung
- 5 A posteriori Standardabweichung des GMM; [Grauwerte]; nur bei LSM
- 6 Status der Bildzuordnung (vgl. Anhang B.6 (a))



## Anhang C

# Inhalt des Datenträgers

DA_Westfeld.pdf	Ausarbeitung zur Diplomarbeit
<b>2-DMA\</b>	Programm „2-DMA“
Quelltext\	Der Ordner beinhaltet alle Quelltextdateien des Programms „2-DMA“.
2-DMA.exe	Setup des Programms „2-DMA“
<b>Bibliotheken\</b>	Bildverarbeitungsbibliotheken
ipl25.exe	Setup der Bibliothek „IPL“
OpenCV_B31.exe	Setup der Bibliothek „OpenCV“
<b>Bildsequenzen\</b>	Aufnahmen des Jakobshavn Isbræ Gletschers
Normalwinkel\	Normalwinkelsequenz (20.08.2004)
Zoom\	Zoomsequenz (19.08.2004)
<b>Kapitel_5\</b>	Daten des 5. Kapitels
Bildzuordnung\	Der Ordner beinhaltet die Ergebnisse der Bildzuordnungen für die Normalwinkelsequenz (vorderer und hinterer Gletscherbereich) und die Zoomsequenz.
Kamerabewegung\	Der Ordner beinhaltet die Koordinatenlisten der Pass- bzw. Gletscherpunktzuordnungen sowie die daraus bestimmten Kameraoffsets für die Normalwinkel- und Zoomsequenz.
Resampling\	In diesem Ordner befinden sich die Bildverbände der Normalwinkel- und Zoomsequenz, korrigiert um die ermittelten Kamerabewegungen.
<b>Kapitel_6\</b>	Daten des 6. Kapitels
Abweichungen\	Der Ordner beinhaltet die Berechnungen der Lagedifferenzen entsprechend Kapitel 6.3.2 sowie das Protokoll des Programms „PhotoModeler“.
Passpunkte\	Der Ordner beinhaltet das erste Bild der Normalwinkelsequenz, welches alle Passpunkte enthält.
Stereobilder\	Dieser Ordner enthält die in der Örtlichkeit aufgenommenen Bilder für die Stereobildzuordnung.

**Kapitel\_7\**

## Daten des 7. Kapitels

Genauigkeit\

Der Ordner enthält die Berechnungen der Genauigkeitsanalysen der Bildzuordnungsverfahren. Die Gliederung der Unterordner ist dabei adäquat der Messungskonfigurationen des Kapitels 7.2.1.

Resampling\

In diesem Ordner befinden sich die durch Resampling generierten simulierten Datensätze für die Genauigkeitsanalysen.





# Literaturverzeichnis

1. ACKERMANN, F., 1984: High Precision Digital Image Correlation, Proceedings of the 39th Photogrammetric Week, volume 9, Schriftenreihe der Universität Stuttgart, Stuttgart, BRD
2. BALLARD, D. H., BROWN, C. M., 1982: Computer Vision, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA
3. BALTSAVIAS E. P. et al., 1996: Automatic DSM Generation by Digital Photogrammetry: Example Morteratsch Glacier, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, CH
4. BALTSAVIAS E. P., 1999: Matching Verfahren und automatische DTM Generierung, Lecture Notes for the postgraduate course "Spatial Information Systems", IGP, ETHZ, Zürich, CH
5. BALTSAVIAS, E. P. et al., 2001: Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring, Photogrammetric Record, 17(98), pp. 243-273
6. BARNARD, S. T., FISCHLER, M. A., 1982, Computational Stereo, Computing Surveys, Vol. 14, No. 4, pp. 553-572
7. BARRON, J. L., FLEET, D. J., BEAUCHEMIN, S. S., 1994: Performance of Optical Flow Techniques, International Journal of Computer Vision, Volume 12, Issue 1, pp. 43-77
8. BARRON, J. L., THACKER, N. A., 2005, Tutorial: Computing 2D and 2D Optical Flow, Tina Memo No. 2004-012, Imaging Science and Biomedical Engineering Division, University of Manchester, Manchester, UK
9. BERTHIER, E. et al., 2005: Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery, Remote Sensing of Environment 95 (2005), pp. 14-28
10. BIRCHFIELD, S., 1996, Derivation of Kanade-Lucas-Tomasi Tracking Equation, Unpublished, url: [<http://www.ces.clemson.edu/~stb/klt/birchfield-klt-derivation.pdf>], Stand: 06/2005
11. BIRCHFIELD, S., 2005: KLT: An Implementation of the Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker, url: [<http://www.ces.clemson.edu/~stb/klt/>], Stand: 06/2005
12. BJÖRCK, Å., 1996: Numerical Methods for Least Squares Problems, Society for Industrial and Applied Mathematics (siam), Philadelphia, USA
13. BRUHN, A., WEICKERT, J., SCHNÖRR, C., 2002: Combining the Advantages of Local and Global Optic Flow Methods, L. Van Gool (Ed.), DAGM 2002, LNCS 2449, pp. 454-462, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, BRD
14. DAVIES, E. R., 1997: Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Academic Press, Inc., San Diego, USA
15. DITTRICH, J., 2004: Die Entstehung und Eigenschaften der Gletscher, Geomorphologische Prozesse im Hochgebirge, Hauptseminararbeit, Freie Universität Berlin, Berlin, BRD
16. FRANZ, M. O., 2001: Computer Vision in autonomen Systemen, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen, BRD
17. FRITSCH, D., 1985: Some Additional Information on the Capacity of the Linear Complementary Algorithm, in: Grafarend E. W., Sansò, F., 1985: Optimization and Design of Geodetic Networks, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, BRD, pp. 169-184.

18. GEIST, T., LUTZ, E., STÖTTER, J., 2003: Airborne laser scanning technology and its potential for applications in glaciology, Proceedings. ISPRS Workshop on 3-D reconstruction from airborne laserscanner and INSAR data, Dresden, BRD
19. GIROD, B., GREINER, G., NIEMANN, H., 2000: Principles of 3D Image Analysis and Synthesis. Kluwer Academic Publishers, Norwell
20. GRUEN A., Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, Vol. 14, Part 3, June 1985
21. HEIPKE, C., 1990: Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie, Dissertationsschrift, Reihe C, Heft Nr. 366, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, BRD
22. HORN, B. K. P., SCHUNCK, B. G., 1981: Determining Optical Flow, Artificial Intelligence Laboratory, A. I. Memo No. 572, Massachusetts Institute of Technology
23. JÄHNE, B., 2002: Digitale Bildverarbeitung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, BRD
24. JIABING, S., DONGCHEN, E., 2002: The study of remote sensing on monitoring ice velocities and fluxes of the polar record glacier and the dark glacier, Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan, VRC
25. JOUGHIN, I., ABDALATI, W., FAHNESTOCK, M., 2004: Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbrae glacier, nature: international weekly journal of science, Nature Publishing Group (NPG), Vol. 432, 2, December 2004
26. KÄÄB, A., 2001: Digitale Photogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen, Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Publikationen der Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), 10, pp. 451-458, Schweizerbart'schen Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, BRD
27. KÄÄB, A., VOLLMER, M., 2000: Surface Geometry, Thickness Changes and Flow Fields on Creeping Mountain Permafrost: Automatic Extraction by Digital Image Analysis, Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 11, pp. 315-326
28. KOLENDA, C., 2000: Glaziologie: Massenhaushalt, Gletscherschwankungen; Glaziale Prozesse und Formen, Geographisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, BRD
29. Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, BRD, url: [[http:// www.glaziologie.de/](http://www.glaziologie.de/)], Stand: 06/2005
30. KRABILL, W. et al., 2004: Greenland Ice Sheet: Increased coastal thinning, Geophysical Research Letters, Vol. 31, L24402, 10.1029/2004GL021533
31. KRAUS, K., 1982: Photogrammetrie – Band 1, Grundlagen und Standardverfahren, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn, BRD
32. KRAUS, K., 1984: Photogrammetrie – Band 2, Theorie und Praxis der Auswertesysteme, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn, BRD
33. LANDSAT, Landsat.org, Center for Global Change and Earth Observations, East Lansing, USA., url: [<http://www.landsat.org/>], Stand: 06/2005
34. LAPLANTE, P. A., STOYENKO, A. D., 1996: Real-Time Imaging. Theory, Techniques, and Applications. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA
35. LAWSON, C. L., HANSON, R. J., 1995: Solving Least Squares Problems, Society for Industrial and Applied Mathematics (siam), Philadelphia, USA

36. LUCAS, B. D., KANADE T., 1981: An Iterative Registration Technique with an Application to Stereo Vision, Proc 7th Intl Joint Conf on Artificial Intelligence (IJCAI) 1981, August 24-28, Vancouver, British Columbia, pp. 674-67
37. LUCAS, B. D., KANADE, T., 1981: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 674-679
38. LUCKMAN, A., MURRAY, T., 2005: Seasonal variation in velocity before retreat of Jakobshavn Isbræ, Greenland, Geophysical Research Letters, Vol. 32, L08501, 10.1029/2005GL022519
39. MAAS, H.-G., 1997: Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie, Habilitationsschrift, Zürich, CH
40. MCGLONE, J. C., 2004: Manual of Photogrammetry, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 5th Edition, Bethesda, Maryland, USA
41. NASA, 2005, Found it! Ice on Mars, url: [<http://science.nasa.gov/>], Stand: 06/2005
42. NEVATIA, R., 1982: Machine Perception, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA
43. NIEMEIER, W., 2002: Ausgleichsrechnung – Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, New York, BRD
44. PAPADEMETRIS X., BELHUMEUR, P. N., 1996: Estimation of motion boundary location and optical flow using dynamic programming, Proceedings IEEE ICIP 1996 1, Technical Report 9607, Dept. of Electrical Engineering, Yale University, New Haven, USA
45. PLUMER, J., Homepage, Department of Geography, University of Kansas, Lawrence, USA, url: [<http://www.people.ku.edu/~plummer/>], Stand: 06/2005
46. RAMANUJAN, K., 2004: NASA Eyes Ice Changes Around Earth's Frozen Caps, Goddard Space Flight Center, url: [<http://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/icecover.html>], Stand: 03/2005
47. REISSMANN, G., 1976: Die Ausgleichsrechnung – Grundlagen und Anwendungen in der Geodäsie, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, BRD
48. ROTTENSTEINER, F., 2001: Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS, Dissertationsschrift, Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik, Technische Universität Wien, Wien, A
49. SCHAFFRIN, B., 1981: Ausgleichung mit Bedingungs-Ungleichungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), Nr. 6/1981, pp. 227-238
50. SHI, J., TOMASI, C., 1994: Good Features to Track, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (CVPR94) Seattle, 593-600
51. SMITH, J., Vapour Technology, Floppy's VRML97 Tutorial, url: [<http://web3d.vapourtech.com/tutorials/vrml97/en/>], Stand: 02/2004
52. SNOW, K. B., 2002: Applications of Parameter Estimation and Hypothesis Testing of GPS Network Adjustments, Report No. 465, Geodetic and GeoInformation Science, Department of Civil Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA
53. Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, Bremerhaven, BRD, url: [<http://www.awi-bremerhaven.de/>], Stand: 06/2005

54. STROPPE, H., 1974: Physik: Teilchen, Felder, Ströme, Wellen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, BRD
55. THOMAS, R. H., 2004: Force-perturbation analysis of recent thinning and acceleration of Jakobshavn Isbræ, Greenland, *Journal of Glaciology*, Vol. 50, No. 168, pp. 57-66
56. TOMASI, C., KANADE, T., 1991: Detection and Tracking of Point Features, Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132
57. VA SOFTWARE CORPORATION, Open Source Technology Group, Inc., SourceForge.net, Open Source software development website, url: [<http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>], Stand: 07/2005
58. VERNON D., 1991: Machine Vision: Automated Visual Inspection and Robot Vision, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA
59. WAGNER, M., 2001: Design, Prototypical Implementation and Testing of a Real-Time Optical Feature Tracker, DWARF: Distributed Wearable Augmented Reality Framework, Diplomarbeit, Fakultät für Informatik, München, BRD
60. WALTER, R., 2003: Visualisierung von Hangrutschmodellen mit VRML, Studienarbeit, Geodätisches Institut, Technische Universität Dresden, Dresden, BRD
61. WESTFELD, P., 2004: Monokulare menschliche Bewegungsanalyse in Bildsequenzen, Studienarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Dresden, BRD
62. WU, Y., 2002-2004: Optical Flow and Motion Analysis, Electrical and Computer Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, USA