

Ellen Schwalbe

**Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung
räumlich-zeitlich hochaufgelöster Bewegungsvektorfelder
an Gletschern aus monoskopischen Bildsequenzen**

München 2013

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung
räumlich-zeitlich hochaufgelöster Bewegungsvektorfelder an Gletschern
aus monoskopischen Bildsequenzen

An der Fakultät für Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Dresden
vorgelegte Dissertation zur Erlangung
des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Ellen Schwalbe

München 2013

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München
Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 -1283 / - 1100
e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Erklärung der Übereinstimmung mit dem Original:

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema „Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung räumlich-zeitlich hochaufgelöster Bewegungsvektorfelder an Gletschern aus monoskopischen Bildsequenzen“ wird hiermit bestätigt.

Dresden, am 02.05.2013

Ellen Schwalbe

1. Gutachter: Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas, Technische Universität Dresden
2. Gutachter: Prof. Dr. Andreas Käab, University of Oslo
3. Gutachter: Prof. Dr. habil. Reinhard Dietrich (i.R.), Technische Universität Dresden

Tag der Einreichung: 08.01.2013

Tag der Verteidigung: 27.03.2013

© 2013 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet, die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Bewegungsvektorfeldern von Gletschern aus monokularen Bildsequenzen. Diese stellen eine wertvolle Grundlage für glaziologische Analysen des Bewegungsverhaltens von Gletschern dar. Im Rahmen der Arbeit wurden Bildsequenzmessungen an fünf schnellfließenden Gletschern im Bereich der Diskobucht in Westgrönland durchgeführt. Insbesondere erfolgte die Aufnahme von Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscannerdaten am Jakobshavn Isbræ, einem der schnellsten und produktivsten Gletscher Grönlands. Diese Messungen bilden die Datengrundlage der Arbeit.

Es werden Messkonzepte zur Aufnahme der entsprechenden Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscans bereitgestellt sowie Methoden entwickelt, um die Auswertung dieser Daten nach dem Prinzip der monoskopischen Bildsequenzanalyse zu ermöglichen. Die Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscans werden von einem festen Standpunkt aus aufgenommen. Die Ableitung von Bewegungsvektorfeldern erfolgt dann durch eine automatische Zuordnung von Grauwertmustern in den Bildsequenzen bzw. durch die Zuordnung von 3D-Punktmustern in den multi-temporalen Laserscannerdaten. Bestehende Punktzuordnungsmethoden werden einerseits an die besonderen Eigenschaften der Gletscherdaten angepasst, andererseits werden geeignete Methoden zur Lösung von Detailproblemen neu entwickelt. Die Methodik der Bildsequenzanalyse wird dabei vor allem hinsichtlich ihrer Robustheit – beispielsweise gegenüber durch Schattenwurf verursachten Störungen im Bild – optimiert und es werden Bewegungseffekte in den Bildsequenzen korrigiert, die durch die Eigenbewegung der Kamera verursacht werden. Bei der Entwicklung der Methodik zur Analyse multi-temporaler Laserscannerdaten werden vor allem Effekte berücksichtigt, die durch das sequenzielle Aufnahmeprinzip eines Scanners auftreten.

Auf Basis der entwickelten und implementierten Methodik erfolgt die Auswertung der aufgenommenen Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscans. Das Ergebnis der monoskopischen Bildsequenzauswertung ist ein dichtes Raster an Bewegungskurven für jede Bildsequenz. Die einzelnen Translationen der Bewegungskurven können mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern bis zu einem Dezimeter bestimmt werden. Die Auswertung der Laserscannerdaten liefert räumlich hochaufgelöste digitale Geländemodelle der Gletscheroberfläche sowie ein dichtes Raster von 3D-Bewegungsvektoren, deren Genauigkeit im Dezimeterbereich liegt.

Anhand von Beispielen wird gezeigt, dass sich die aus monokularen Bildsequenzen abgeleiteten Bewegungsvektorfelder zur Bestimmung frontnaher Geschwindigkeitsfelder mit hoher räumlicher Auflösung, zur Ableitung der Lage und der Migration der Aufsetzlinie aus zeiteninduzierten Vertikalbewegungen sowie zur Untersuchung des Geschwindigkeitsverhalten von Gletschern bei Kalbungsereignissen eignen. Aus den Laserscannerdaten können hochaufgelöste digitale Geländemodelle zur Dokumentation von Fronthöhen und Gletscherstrukturen abgeleitet werden, zudem eignen sie sich zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern, die eine sehr hohe räumliche Auflösung besitzen.

Abstract

This research aims to determine the motion vector fields of glaciers with high spatial and temporal resolution. These vector fields can be derived from monocular image sequences and are a valuable data source for glaciological analysis of the motion behaviour of glaciers. Image sequence measurements have been conducted at five fast-flowing glaciers in the Disko Bay region in western Greenland. Especially at the Jakobshavn Isbræ – one of the fastest and most productive glaciers in Greenland – numerous image sequences have been recorded, as well as multi-temporal laser scanner data sets. These measurements provide the basic data sets for this thesis.

The measurement concepts for the acquisition of image sequences and multi-temporal laser scans are presented, and procedures for the processing of the recorded data are developed, based on the principle of monoscopic image sequence analysis. Both the image sequences and multi-temporal laser scans are acquired statically. Motion vector fields can be derived by applying automatic co-registration methods on grey value patterns in the image sequences and on 3D point patterns in the laser scanner datasets respectively. Thus, standard matching techniques have been adapted to the special characteristics of the glacier data, and suitable methods that solve detail problems have been developed in addition. The method of the image sequence analysis has been optimised with respect to its robustness against errors caused by moving shadows. Furthermore, motion effects caused by small instabilities in the camera setup have been corrected. Regarding the analysis of multi-temporal laser scanner data, effects that occur because of the sequential acquisition principle of a laser scanner must also be considered.

Based on the developed method, the image sequences and multi temporal laser scans have been processed. The result of the monoscopic image sequence analysis is a dense raster of trajectories for each image sequence. Each translation component from these trajectories can be determined with an accuracy of some centimetres up to one decimetre. The processing of the laser scanner data provides digital surface models of the glacier with high spatial resolution, and a dense raster of 3D motion vectors with accuracy in the range of decimetres.

Specific examples show that motion vector fields derived from monocular image sequences can be used for the determination of high resolution velocity fields of glaciers, for the determination of the position and migration of the grounding line and for the investigation of a glacier's motion behaviour during calving events. From the multi-temporal laser scanner data, velocity fields with high spatial resolution can be derived as well as digital surface models from single scans that document glacier front heights and glacier structures.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Abstract

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Grundprinzip.....	2
1.3	Zielstellung.....	2
1.4	Gliederung der Arbeit.....	4
2	Geodätische und photogrammetrische Messverfahren in der Glaziologie.....	7
2.1	Terrestrische Verfahren.....	7
2.1.1	Trigonometrische Messungen.....	8
2.1.2	Terrestrische Photogrammetrie.....	9
2.1.3	Terrestrisches Laserscanning.....	10
2.1.4	GNSS-Messungen.....	11
2.2	Flugzeugbasierte Verfahren.....	11
2.2.1	Luftbildphotogrammetrie.....	11
2.2.2	Flugzeuglaserscanning.....	12
2.2.3	Flugzeuggestützte Radarmessungen.....	12
2.3	Satellitengestützte Verfahren.....	13
2.3.1	Synthetic-Aperture-Radar-Daten.....	13
2.3.2	Optische Satellitenbilder.....	14
3	Datenakquisition.....	15
3.1	Messgebiete.....	15
3.2	Aufnahmegерäte.....	18
3.2.1	Kameras.....	18
3.2.1.1	Anforderungen.....	18
3.2.1.2	Spezifikationen der verwendeten Kameras.....	18
3.2.1.3	Wahl der Objektivbrennweite.....	21
3.2.2	Terrestrische Laserscanner.....	22
3.2.2.1	Anforderungen.....	22
3.2.2.2	Geeignete Geräte.....	23
3.2.2.3	Riegl LPM-321.....	24
3.3	Aufnahmemethoden.....	25
3.3.1	Koordinatensysteme.....	25
3.3.2	Akquisition terrestrischer Bildsequenzen.....	26
3.3.2.1	Aufnahmekonfiguration.....	27
3.3.2.2	Ablauf der Messung.....	29
3.3.2.3	Möglichkeiten zur Reduzierung der Messausrüstung.....	32

3.3.3	Akquisition multi-temporaler Laserscannerdaten.....	33
3.3.3.1	Aufnahmekonfiguration.....	33
3.3.3.2	Ablauf der Messung.....	34
3.4	Messkampagnen.....	35
3.4.1	Übersicht.....	35
3.4.2	Messungen am Jakobshavn Isbræ.....	35
3.4.3	Messungen am Støre Qarajaq.....	39
3.4.4	Messungen am Eqip Sermia.....	39
3.4.5	Messungen am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq.....	40
4	Entwicklung der Auswertemethodik	43
4.1	Algorithmische Grundlagen.....	43
4.1.1	Bildzuordnungsverfahren.....	43
4.1.1.1	Kreuzkorrelationsverfahren.....	44
4.1.1.2	Least Squares Matching.....	46
4.1.2	Zuordnungsverfahren für Punktwolken.....	47
4.2	Terrestrische Bilddaten.....	49
4.2.1	Grundprinzip – Monoskopische Bildsequenzanalyse.....	49
4.2.2	Übersicht der Arbeitsschritte.....	50
4.2.3	Objektkoordinatenbestimmung und Orientierung der Sequenzkamera.....	53
4.2.3.1	Methodenwahl.....	53
4.2.3.2	Bildkoordinatenmessung.....	54
4.2.3.3	Bündelblockausgleichung.....	58
4.2.3.4	Nutzbarkeit von Structure-From-Motion(SFM)-Tools.....	59
4.2.3.5	Genauigkeitsaspekte.....	61
4.2.4	Distanz-Lookup-Tabelle.....	62
4.2.4.1	Methodenwahl.....	62
4.2.4.2	TIN-Generierung.....	62
4.2.4.3	Bestimmung der Distanzwerte.....	63
4.2.4.4	Genauigkeitsaspekte.....	63
4.2.5	Bildsequenzmessung.....	65
4.2.5.1	Methode.....	65
4.2.5.2	Prädiktionsbereich und Patchgröße.....	69
4.2.5.3	Matchingstrategien.....	71
4.2.5.4	Genauigkeitsaspekte.....	73
4.2.6	Korrektur der Kamerabewegung.....	74
4.2.6.1	Methode.....	74
4.2.6.2	Funktionales Modell.....	74
4.2.6.3	Bestimmung der Korrekturparameter.....	76
4.2.6.4	Korrekturstrategie.....	77
4.2.6.5	Genauigkeitsaspekte.....	79
4.2.7	Transformation vom Bildraum in den Objektraum.....	80
4.2.7.1	Einfache Skalierung mittels Distanzwert.....	80
4.2.7.2	Objektraumtransformation mit Vorgabe der Bewegungsrichtung.....	82
4.3	Terrestrische Laserscannerdaten.....	83
4.3.1	Grundprinzip – Analyse multi-temporaler Laserscans.....	83
4.3.2	Datenvorverarbeitung.....	84

4.3.3	Segmentierung.....	85
4.3.4	Tracking in 3D-Punktwolken.....	87
4.3.5	Geschwindigkeitsbestimmung.....	89
5	Datenauswertung und Ergebnisse.....	91
5.1	Datenübersicht.....	91
5.2	Auswertesoftware.....	92
5.3	Terrestrische Bilddaten.....	94
5.3.1	Arbeitsablauf.....	94
5.3.2	Auswertung.....	95
5.3.3	Resultate.....	96
5.4	Terrestrische Laserscannerdaten.....	98
5.4.1	Arbeitsablauf.....	98
5.4.2	Auswertung und Resultate.....	99
6	Fehlerbetrachtung.....	101
6.1	Terrestrische Bilddaten.....	101
6.1.1	Fehlereinflüsse.....	101
6.1.2	Betrachtung der inneren Genauigkeit.....	102
6.1.2.1	Fehler der Bildpunktzuordnung.....	103
6.1.2.2	Fehler der Kamerabewegungskorrektur.....	104
6.1.2.3	Skalierungsfehler.....	106
6.1.2.4	Gesamtfehler der Translationen.....	108
6.1.2.5	Fehler der Georeferenzierung.....	111
6.1.3	Betrachtung der äußeren Genauigkeit.....	113
6.2	Terrestrische Laserscannerdaten.....	115
6.2.1	Fehlereinflüsse.....	115
6.2.2	Betrachtung der äußeren Genauigkeit.....	117
7	Weiterverwendung der Ergebnisse.....	119
7.1	Terrestrische Bilddaten.....	119
7.1.1	Frontnahe Geschwindigkeitsfelder	119
7.1.2	Gezeiteneinfluss und Freefloatberechnung.....	121
7.1.3	Migration der Aufsetzlinie.....	122
7.1.4	Bewegungsverhalten bei Kalbungsereignissen	122
7.2	Terrestrische Laserscannerdaten.....	123
7.2.1	Digitales Geländemodell.....	124
7.2.2	Geschwindigkeitsfeld.....	124
7.3	Potenzial der Messverfahren.....	125
7.4	Weitere Anwendungsbereiche der Methodik.....	127
7.4.1	Anwendungsmöglichkeiten der monoskopischen Bildsequenzanalyse.....	127
7.4.2	Anwendungsmöglichkeiten der Analyse multi-temporaler Laserscannerdaten.....	129
8	Zusammenfassung.....	131

Literaturverzeichnis.....	135
Abkürzungsverzeichnis.....	145
Formelzeichenverzeichnis.....	146
Tabellenverzeichnis.....	148
Abbildungsverzeichnis.....	149
Danksagung.....	153
A Anhang.....	A - 1
A.1 Datenakquisition.....	A - 3
A.1.1 Objektivwahl.....	A - 3
A.1.2 Datenübersicht der Messungen am Jakobshavn Isbræ.....	A - 4
A.1.3 Datenübersicht der Messungen am Støre Qarajaq.....	A - 6
A.1.4 Datenübersicht der Messungen am Eqip Sermia.....	A - 7
A.1.5 Datenübersicht der Messungen am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq.....	A - 8
A.2 Entwicklung der Auswertemethodik – Herleitung der Gleichungen 4.14.....	A - 9
A.3 Datenauswertung und Ergebnisse.....	A - 11
A.3.1 Zuordnungstabelle für die Sequenzen und Bildverbände.....	A - 11
A.3.2 Programmbeschreibung.....	A - 12
A.4 Fehlerbetrachtung – Partielle Ableitungen für die Gleichungen 6.4.....	A - 19

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das grönländische Inlandeis stellt nach der Antarktis die zweitgrößte vergletscherte Landfläche der Erde dar und besitzt ein Volumen von etwa 2,85 Millionen km³. Dieses würde, bei einem vollständigen Abschmelzen des gesamten Eisschildes, einem globalen Meeresspiegelanstieg von ca. 7 m [Church u. a., 2001] entsprechen. Der aktuelle Beitrag Grönlands zum Meeresspiegelanstieg wird (bezogen auf den Zeitraum von 2003–2007) auf ca. 0,5 mm/Jahr geschätzt. Dies entspricht einem Anteil von etwa 15–20 % am weltweiten jährlichen Meeresspiegelanstieg [Cazenave & Llovel, 2010]. Seit der letzten Jahrtausendwende zeichnet sich eine deutliche Zunahme des grönländischen Beitrags am Meeresspiegelanstieg ab [Velicogna, 2009]. In welchem Maße der Prozess des Abschmelzens voranschreitet und welche Auswirkungen er in naher und ferner Zukunft auf die niedrigen Küstenregionen der Erde haben wird, ist von großem gesellschaftlichen Interesse und somit gegenwärtig Gegenstand umfangreicher Forschungsarbeiten.

Die Bestimmung von Massenbilanzen für den grönländischen Eisschild, d. h. die Ermittlung der Differenz zwischen Massenzugewinn in Form akkumulierten Niederschlags und Massenverlust in Form von Schmelzwasser, Sublimation oder dem Eisausstoß der Ausflussgletscher gibt einerseits Aufschluss über den aktuellen Beitrag Grönlands zum Meeresspiegelanstieg und liefert andererseits wichtige Eingangsdaten für Modelle, mit denen zukünftige Entwicklungen präzisiert werden.

Ein wichtiger Aspekt in Bezug auf die Erstellung von Massenbilanzen ist die Erhebung von Messdaten für die zahlreichen Ausflussgletscher an den Rändern des Eisschildes. Sie sind für etwa die Hälfte der gegenwärtigen Eismassenverluste verantwortlich [van den Broeke u. a., 2009]. Eine besondere Bedeutung kommt denjenigen Gletschern zu, welche ins Meer münden, da diese die höchsten Kalbungsraten aufweisen. Ein Viertel des durch Kalbung verursachten grönländischen Eismassenausstoßes wird dabei allein von den drei größten Gletschern Grönlands produziert. Dies sind die Gletscher Helheim und Kangerdlugsuaq an der grönländischen Ostküste sowie der Jakobshavn Isbræ an der Westküste Grönlands.

An vielen Ausflussgletschern Grönlands wurden in den letzten Jahren Veränderungen im Bewegungsverhalten festgestellt [Joughin u. a., 2010; Rignot & Kanagaratnam, 2006]. Besonders dramatische Ereignisse waren dabei am Jakobshavn Isbræ zu beobachten. Sie äußern sich in einem verstärkten Rückzug der Gletscherfronten, in der Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten, in der Höhenabnahme der Gletscheroberflächen und in erhöhten Kalbungsraten. Als Ursache für diese Prozesse werden Temperaturerhöhungen angenommen. In dieser Aussage besteht weitestgehend Übereinstimmung. Kontrovers wird dagegen diskutiert, auf welche Art und Weise die erhöhten Temperaturen das Bewegungsverhalten der Gletscher beeinflussen. Die erste Theorie geht von einem atmosphärischen Einfluss aus, wobei durch erhöhte Lufttemperaturen mehr Oberflächenschmelzwasser entsteht, welches auf das Gletscherbett hinunter sickert und dort eine Beschleunigung des Gletschers verursacht [van de Wal u. a., 2008; Zwally u. a., 2002]. Die zweite Theorie vermutet, dass eine Erwärmung des Ozeanwassers Ursache für die Dynamikänderungen ist, indem wärmeres Ozeanwasser ein verstärktes submarines Schmelzen der schwimmenden Gletscherzungen und damit erhöhte Kalbungsraten bewirkt [Holland u. a., 2008]. Diese Mechanismen und das Ausmaß ihres tatsächlichen Einflusses werden bislang noch nicht vollständig verstanden. Doch gerade das Verständnis der hochdynamischen Prozesse, die an den Ausflussgletschern wirken, ist eine wichtige Voraussetzung für eine sichere Vorhersage des zukünftigen Meeresspiegelanstieges [Nick u. a., 2009].

Für die Bereitstellung von Daten, welche die Basis für fundierte Aussagen hinsichtlich des Zustandes und der Veränderung der Ausflussgletscher bilden, wird eine Vielzahl unterschiedlicher Messverfahren eingesetzt. Satellitengestützte Verfahren erlauben dabei großflächige Untersuchungen und die Erfassung einer großen Anzahl von Gletschern. Terrestrische Messungen dagegen werden stichprobenartig an einzelnen bedeutenden Gletschern ergänzend durchgeführt, um spezielle Messwerte zu erheben, die aus Satellitendaten nicht oder nur in unzureichendem Maße abgeleitet werden können. Dies sind z. B. die generelle Erfassung frontnaher Gletscherbereiche bei schnellfließenden Gletschern, die Dokumentation hochdynamischer Prozesse, wie Kalbungseignisse, sowie die Untersuchung gezeiteninduzierter Vertikalbewegungen der Gletscherzunge, welche eine Lokalisierung der Aufsetzlinie ermöglicht. Terrestrische photogrammetrische Verfahren wie die Bild-

sequenzanalyse und das Laserscanning stellen dabei aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, mit der Messwerte erhoben werden können, geeignete Werkzeuge dar, um diese Fragestellungen zu beantworten.

1.2 Grundprinzip

Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Bewegungsvektorfelder bilden die Grundlage für glaziologische Analysen von Gletscherbewegungen mit hoher Dynamik. Solche Bewegungsfelder können aus monokularen Bildsequenzen abgeleitet werden. Zur Aufnahme der entsprechenden Daten werden im Folgenden hochauflösende digitale Kameras und ein terrestrischer Laserscanner genutzt.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der monoskopischen Auswertung von mittels digitalen Kameras aufgenommenen Bildsequenzen. Für eine Kamera, mit der in definierten Zeitabständen Bilder aufgenommen werden, um die Bewegung eines Messobjektes zu dokumentieren, ist dabei eine unveränderliche Position und Orientierung zu gewährleisten. Durch die Verfolgung von Merkmalen in den einzelnen Bildern der erzeugten Bildsequenz können dann Bewegungsvektoren der Gletscheroberfläche im Bildraum bestimmt werden. Unter Verwendung eines digitalen Geländemodells und mittels Kenntnissen über die Orientierung der Kamera im Raum erfolgt die Skalierung und Georeferenzierung der im Bild gemessenen Größen. Die so in den Objektraum transformierten Bewegungsvektoren und die registrierten Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Bilder ermöglichen schließlich die Bestimmung von Geschwindigkeiten.

Als zweites Aufnahmegerät wird ein terrestrischer Laserscanner eingesetzt. Laserscanner erzeugen „Distanzbilder“, welche sich aus den vom Laserscanner erfassten Polarkoordinaten für jeden Messpunkt ergeben. Während das in regelmäßigen Abständen abgetastete Raster von Horizontal- und Vertikalwinkeln die x - y -Ebene des „Bildes“ aufspannt, liefert die Distanz zum Messobjekt für jede Winkelposition einen individuellen Wert. Aufeinanderfolgende Laserscans, die von einer statischen Scanposition aus aufgenommen werden, können unter diesem Gesichtspunkt ebenfalls als monokulare „Bildsequenz“ verstanden werden. Die direkte Bestimmung von 3D-Informationen und das sequenzielle Aufnahmeprinzip eines Scanners bewirken aber, dass multi-temporale Laserscannerdaten komplementäre Eigenschaften zu Bildsequenzen im ursprünglichen Sinne aufweisen. Dies stellt unterschiedliche Anforderungen an die Datenakquisition und das Auswerteverfahren. Im Unterschied zur Auswertung der Bilddaten erfolgt die Bestimmung der Bewegungsvektoren hier durch die Zuordnung von homologen 3D-Punktwolken zwischen einzelnen Scanepochen.

1.3 Zielstellung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Bewegungsvektorfeldern von Gletschern. Das übergeordnete Ziel ist dabei die Entwicklung und Anwendung von Verfahren, mit denen entsprechende Bewegungsfelder aus monokularen Bildsequenzen abgeleitet werden können. Vor dem Hintergrund des Klimawandels rückten in den letzten beiden Jahrzehnten besonders die Ausflussgletscher Grönlands immer stärker in den Fokus der Forschung. Aus diesem Grund stellen photogrammetrische Messungen an mehreren Gletschern im Gebiet der Diskobucht in Westgrönland die Datengrundlage dieser Arbeit dar. Besonderes Augenmerk liegt bei der entwickelten Methodik deshalb auch auf deren Anwendbarkeit auf große und schnellfließende Ausflussgletscher. Die entsprechenden Messdaten wurden im Rahmen dreier Messkampagnen in den Jahren 2004, 2007 und 2010 unter Anwendung der in Kapitel 1.2 benannten photogrammetrischen Messverfahren erhoben. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf Messungen am Jakobshavn Isbræ, an dem in den letzten zehn Jahren dramatische Veränderungen zu beobachten waren. Des Weiteren wurden auch Messungen an den Gletschern Eqip Sermia, Støre Qarajaq, Sermeq Avannarleq und Sermeq Kujalleq durchgeführt (vgl. Abbildung 3.1), um deren Bewegungsverhalten zu untersuchen. Am Beispiel dieser Messungen soll die Entwicklung der oben genannten Auswerteverfahren dokumentiert werden.

Die einzelnen unter diesem Aspekt zu bearbeitenden Teilaufgaben und die damit verbundenen Zielstellungen lassen sich in folgende vier Bereiche einteilen (vgl. Abbildung 1.1):

- Datenakquisition
- Entwicklung der Auswertemethodik
- Datenauswertung
- Analyse und Interpretation der Ergebnisse

Die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit liegen auf den ersten drei Arbeitsschritten. Als Ergebnisse dieser drei Schritte sollen räumlich und zeitlich hochaufgelöste Bewegungsvektorfelder der Frontbereiche der oben genannten Ausflussgletscher bestimmt werden. Die Durchführung mehrerer Expeditionen ergab hier die Möglichkeit einer iterativen Verbesserung der Mess- und Auswerteverfahren. Es konnte dabei auf Erkenntnisse aufgebaut werden, die während der Auswertung der Daten aus den vorausgehenden Kampagnen gewonnen wurden.

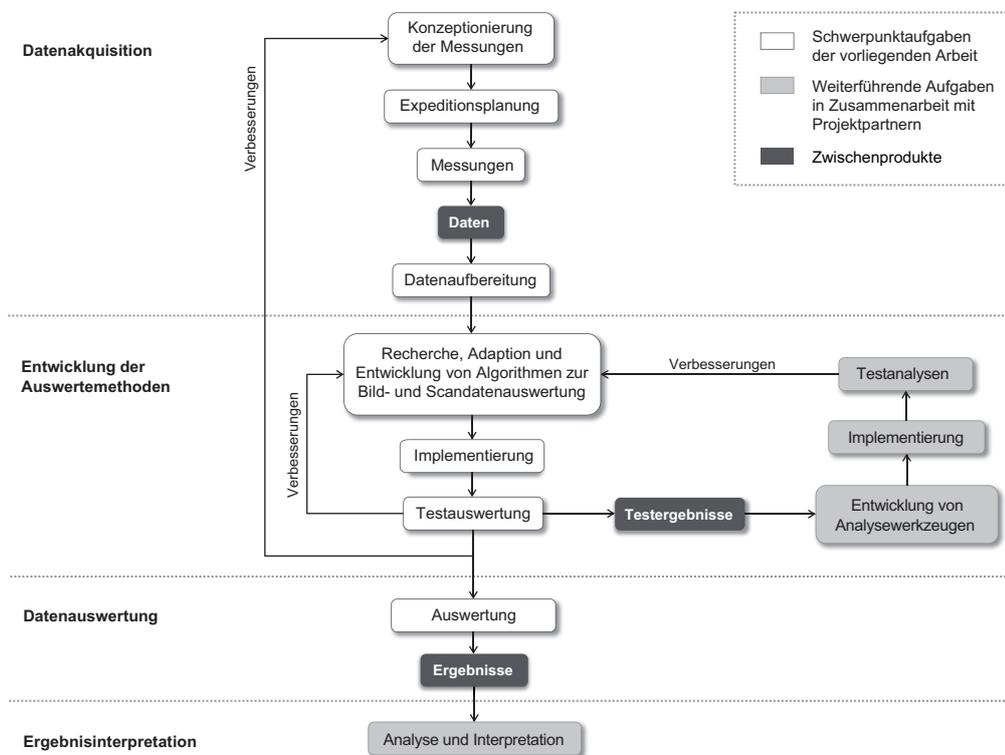


Abbildung 1.1: Arbeitsprogramm zur Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Gletscherbereichen. Das Schema zeigt den Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte, die sich in die vier großen Aufgabenbereiche Datenakquisition, Entwicklung von Auswertemethoden, Datenauswertung und Ergebnisinterpretation untergliedern lassen.

Datenakquisition

Ziel der Datenakquisition ist die Erhebung von Messdaten mit hoher zeitlicher Auflösung für die Frontbereiche von Ausflussgletschern, auf deren Basis Bewegungsvektorfelder ermittelt werden können, sowie die Bereitstellung von Daten, anhand derer eine Georeferenzierung der Messungen erfolgen kann. Als Messverfahren sollen dazu zum einen die Aufnahme monokularer Bildsequenzen durch stationäre Kameras und zum anderen die Aufnahme von Punktwolkensequenzen mit einem terrestrischen Laserscanner zum Einsatz kommen. Für die Aufnahme der Bildsequenzen sollen verschiedene Kameras eingesetzt werden, die entsprechend der zu untersuchenden Fragestellung und dem damit verbundenen Zeitraum, welchen eine Bildsequenz abdecken muss, geeignet sind. Als Alternative und Ergänzung zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern mit

tels Bilddaten soll die Aufnahme und Auswertung multi-temporaler Laserscannerpunktwolken erfolgen. Aus dem erstmaligen Einsatz eines terrestrischen Laserscanners für die Geschwindigkeitsbestimmung eines arktischen Gletschers im Jahr 2007 sollen zudem Erkenntnisse über das Potenzial der Messmethode für diesen Einsatzbereich gewonnen werden.

Entwicklung der Auswertemethodik

Die Entwicklung geeigneter Methoden für eine Auswertung der Bild- und Punktwolkensequenzen stellt den Kernpunkt der vorliegenden Arbeit dar. Für beide Aufnahmeverfahren sind Auswertekonzepte zu entwickeln, die an die spezielle Anwendung der terrestrischen Gletschervermessung angepasst sind mit dem Ziel, sowohl aus Bildsequenzen als auch aus multi-temporalen Laserscannerdaten räumlich und zeitlich hochaufgelöste Bewegungsvektorfelder ableiten zu können. Es sind dazu einerseits bestehende Methoden zu recherchieren, hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten und an besondere Eigenschaften der Gletscherdaten anzupassen sowie andererseits geeignete Methoden zur Lösung von Detailproblemen neu zu entwickeln. Alle Teillösungen sollen schließlich zu einem gesamten Auswertealgorithmus zusammengefasst werden. Die Methodik der Bildsequenzanalyse ist dabei vor allem hinsichtlich ihrer Robustheit (z. B. gegenüber durch Schattenwurf verursachten Störungen im Bild) zu optimieren. Für die Auswertung der Laserscannerdaten soll ein geeignetes Verfahren zur Zuordnung von Oberflächenstrukturen in aufeinanderfolgenden Scan-Epochen gefunden und an die durch das sequenzielle Aufnahmeprinzip eines Laserscanners entstehenden Eigenheiten der Daten angepasst werden. Die entwickelten Methoden sind schließlich auf eine Weise zu implementieren, die eine zusammenhängende und weitestgehend automatische Auswertung größerer Datenmengen erlaubt.

Datenauswertung

Die Ziele der sich anschließenden Auswertung der Daten bestehen in der Aufbereitung und Strukturierung der Messdaten, der Erarbeitung von Arbeitsabläufen für die jeweiligen Auswerteprozesse und letztendlich in der Ableitung von Bewegungskurven für die Punkte eines dichten Messpunktrasters der jeweiligen gemessenen Gletscher. Die erhaltenen Ergebnisse sind so aufzubereiten, dass auf ihrer Grundlage eine weitere Analyse und glaziologische Interpretation erfolgen kann.

Analyse und Interpretation der Ergebnisse

Anhand der Messergebnisse sollen schließlich glaziologische Fragestellungen beantwortet werden. Die dafür notwendige Analyse und Interpretation der Bewegungsvektorfelder erfolgte in Zusammenarbeit mit Projektpartnern. Ein Überblick über die Resultate des letzten Arbeitsschrittes wird zur Vervollständigung des Gesamtbildes in die vorliegende Arbeit mit aufgenommen. Für detailliertere Informationen wird diesbezüglich aber auf entsprechende Veröffentlichungen verwiesen.

1.4 Gliederung der Arbeit

Entsprechend den oben genannten Aufgabenbereichen und den dazu formulierten Zielstellungen gliedert sich die Arbeit in folgende Abschnitte:

Kapitel 2 gibt zunächst einen Überblick über geodätische Messverfahren, die zur Beantwortung glaziologischer Fragestellungen genutzt werden. Die Einsatzmöglichkeiten sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren werden diskutiert. Die in der Arbeit verwendeten photogrammetrischen Methoden werden in diesen Rahmen eingeordnet.

Kapitel 3 beinhaltet Aspekte der Datenakquisition. Die Eigenschaften der zu untersuchenden Gletscher stellen bestimmte Anforderungen an die Wahl der Aufnahmegерäte und an die Konzeptionierung der Messungen. Es werden deshalb zunächst die einzelnen Messgebiete beschrieben. Anschließend werden die verschiedenen zum Einsatz gekommenen Kameras und der verwendete terrestrische Laserscanner vorgestellt, ihre Eignung im Hinblick auf die an sie gestellten Anforderungen diskutiert und ihre Auswahl begründet. Für die Aufnahme von Bildsequenzen und Multi-Laserscannerdaten sowie deren Georeferenzierung werden geeignete Messkonzepte ausgearbeitet. Die praktische Anwendung Letzterer während der einzelnen Messkampagnen

und die daraus resultierenden Daten werden schließlich für jeden gemessenen Gletscher individuell dokumentiert.

Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung der Methoden zur Bestimmung von Bewegungsvektorfeldern auf Basis der an mehreren Gletschern in Westgrönland aufgenommenen Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscannerdaten. Beide Messverfahren stellen unterschiedliche Anforderungen an die Auswertemethodik. Ihre Gemeinsamkeit liegt aber in der Zuordnung identischer Punkte auf der Zeitachse. Es wird deshalb zunächst ein kurzer Überblick über automatische Punktzuordnungsverfahren gegeben. Die einzelnen Arbeitsschritte, die für eine automatische und an die jeweiligen Eigenschaften der Bild- und Laserscannerdaten angepasste Auswertung notwendig sind, werden beschrieben und diskutiert. Die Auswahl der dabei angewandten Methoden wird begründet und deren Anpassung an die Eigenschaften des Gletschers als Messobjekt vorgestellt. Darüber hinaus werden verschiedene Auswertestrategien betrachtet sowie Aspekte diskutiert, die im Hinblick auf die Genauigkeit der Auswertemethodik relevant sind.

Kapitel 5 erläutert die Auswertung der erhobenen Daten. Es wird zunächst ein Überblick über alle aufgenommenen Bildsequenzen und Laserscannerdatensätze gegeben sowie deren für die Auswertung notwendige Aufbereitung und Strukturierung dargestellt. Um eine integrierte Auswertung zu ermöglichen, wurde die in Kapitel 4 bereitgestellte Methodik implementiert. Die daraus resultierende Auswertesoftware wird vorgestellt. Für die Auswertung der Bild- und Laserscannerdaten wird jeweils ein geeigneter Auswerteablauf erarbeitet. Die Resultate der Datenauswertung werden für die weitere Verwendung aufbereitet und zusammengestellt.

In *Kapitel 6* erfolgt eine Fehlerbetrachtung für die mittels monoskopischer Bildsequenzanalyse und multi-temporalem Laserscanning bestimmten Trajektorien bzw. Bewegungsvektoren von Gletschern.

Kapitel 7 gibt einen Überblick über Möglichkeiten zur weiteren Verwendung der ermittelten Bewegungsvektorfelder. Anhand verschiedener Beispiele wird dargestellt, welche unterschiedlichen Erkenntnisse durch eine weiterführende Analyse und Interpretation der zeitlich hochaufgelösten Bewegungsvektorfelder abgeleitet werden können. Darüber hinaus wird das Potenzial der beiden angewandten Mess- und Auswerteverfahren für die terrestrische Vermessung von Gletschern diskutiert und es werden die Vor- und Nachteile beider Methoden gegenübergestellt. Schließlich wird ein Ausblick auf weitere mögliche Einsatzgebiete der entwickelten Verfahren gegeben.

In *Kapitel 8* werden die durchgeführten Arbeiten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse abschließend zusammengefasst.

2 Geodätische und photogrammetrische Messverfahren in der Glaziologie

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung von terrestrischen photogrammetrischen Verfahren zur Bestimmung von Bewegungsvektorfeldern an arktischen Ausflussgletschern. Zur Untersuchung des grönländischen Eisschildes kommt jedoch eine Vielzahl verschiedener geodätischer Messverfahren zum Einsatz. Über diese soll das vorliegende Kapitel zunächst einen Überblick geben, um die in der Arbeit verwendeten Methoden einzuordnen.

Der grönländische Eisschild bedeckt ca. 80 % Grönlands und besitzt eine Fläche von 1.710.000 km² (Zahlenangaben nach [Weng, 1995]). Er reagiert sensibler auf den aktuellen Klimawandel als die größere Antarktis. Dies äußert sich u.a. in einer deutlichen Zunahme des jährlichen Eisverlustes [van den Broeke u. a., 2009]. Ein großer Teil des Eismassenausstoßes erfolgt über die Ausflussgletscher am Rande des Eisschildes. Dies sind Gletscher, über welche die Eismassen abfließen, indem sie in durch das Relief vorgegebenen Tälern kanalisiert und zum Großteil direkt ins Meer geleitet werden. Die am grönländischen Eisschild beobachteten starken Veränderungen lenkten den wissenschaftlichen Fokus insbesondere auch auf die schnellfließenden, für den Massenhaushalt des Eisschildes bedeutsamen Ausflussgletscher. Deren rapide dynamische Änderungen seit der letzten Jahrtausendwende betreffen vor allem die folgenden Parameter, welche somit wichtige Messgrößen für die Vorhersage des Meeresspiegelanstiegs und Indikatoren des Klimawandels darstellen:

- Gletscherfrontlage [Howat & Eddy, 2011]
- Fließgeschwindigkeit [Joughin u. a., 2010; Rignot & Kanagaratnam, 2006]
- Dicke der Gletscherzunge [Krabill u. a., 2004; Thomas u. a., 2009]
- Position der Aufsetzlinie [Rignot, 1998]
- Kalbungsverhalten [Amundson, 2010]

Die Frage nach den Ursachen für die an den grönländischen Ausflussgletschern beobachteten Veränderungen war und ist Motivation für eine Vielzahl unterschiedlicher geodätischer Messungen. Dieses Kapitel gibt eine Übersicht, welche geodätischen Messverfahren zur Beobachtung grönländischer Ausflussgletscher zum Einsatz kommen. Diese können in terrestrische, flugzeug- und satellitengestützte Messverfahren unterteilt werden. Eine weitere Unterscheidung wird hinsichtlich der Sensorik vorgenommen, auf der die jeweiligen Messverfahren basieren. Optische Sensoren, Radarsysteme sowie Lasermesssysteme kommen dabei sowohl terrestrisch als auch auf Flugzeug- und Satellitenplattformen zum Einsatz. In der Regel nimmt die Messgenauigkeit sowie die räumliche und zeitliche Auflösung der Messverfahren mit größerer Aufnahmeentfernung ab, die Größe der Messgebiete, welche aufgenommen werden können, nimmt dagegen zu.

Im Folgenden werden für die einzelnen Messverfahren Beispiele aus historischer und aktueller Literatur vorgestellt. Eine Einschätzung hinsichtlich der Stärken und Grenzen der einzelnen Verfahren im Hinblick auf das Messobjekt Ausflussgletscher wird gegeben. Dies erfolgt insbesondere im Vergleich zu den in der vorliegenden Arbeit angewandten photogrammetrischen Methoden.

2.1 Terrestrische Verfahren

Neben den großflächig anwendbaren satelliten- und flugzeuggestützten Messverfahren wird zur detaillierteren Untersuchung einzelner Gletscher das Potenzial verschiedener terrestrischer Aufnahmeverfahren genutzt, deren Vorteil zumeist in einer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung liegt. In der älteren Literatur finden sich Beispiele zur Bestimmung von Gletschergeschwindigkeiten mittels Theodolitmessungen und analogen photogrammetrischen Verfahren. Bei Messungen aus jüngerer Zeit erfolgte der Übergang zu digitaler Photogrammetrie und es wird das Einsatzpotenzial moderner Messtechnologien, wie z.B. GPS oder terrestrisches Laserscanning, untersucht.

2.1.2 Terrestrische Photogrammetrie

Seit einem knappen Jahrhundert ist die terrestrische Photogrammetrie ein wichtiges Messverfahren für die Gletscherforschung. Die Grundlagen für den Einsatz photogrammetrischer Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung von Gletschern legten [Finsterwalder, 1931] und [Pillewizer, 1938]. Für die von ihnen untersuchten Gletscher im Pamir, im Himalaya, in Norwegen und in den Alpen wurden durch Wiederholungsmessungen Geschwindigkeitsprofile erstellt. Ein Beispiel für frühe photogrammetrische Bewegungsmessungen an einem arktischen Gletscher sind die in [Voigt, 1965; Meier, 1965] vorgestellten Untersuchungen des Kongsvegen-Gletschers auf Spitzbergen.

Mit dem Voranschreiten der technischen Entwicklung der Kameras konnte die photogrammetrische Messwerterhebung in immer kürzeren Zeitabständen erfolgen. Für die Untersuchung des kurzzeitlichen Bewegungsverhaltens wurden ab den 1970er Jahren automatische analoge Kameras eingesetzt. Das Einsatzpotenzial dieser Kameras für die Bewegungsmessung von Gletschern wird in [Flotron, 1973] beschrieben. Weitere Beispiele für die Anwendung automatischer Kameras sind die photogrammetrischen Messungen am Columbia-Gletscher (Alaska) von [Krimmel & Rasmussen, 1986], welche mit einer zeitlichen Auflösung von drei Aufnahmen pro Tag durchgeführt wurden, sowie die Untersuchungen von [Harrison u. a., 1986] am Variegated-Gletscher (Alaska).

Mit dem Aufkommen digitaler Kameras und der schnellen Weiterentwicklung ihrer Sensoren stehen seit den 90er Jahren photogrammetrische Werkzeuge zur Verfügung, die eine automatische Erhebung von nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich hochaufgelösten Messdaten ermöglichen. Dies stellt neue Anforderungen an die Automatisierung der Datenauswertung, erweitert aber gleichzeitig auch die Auswertmöglichkeiten, z. B. durch die Anwendung digitaler Bildanalyseverfahren. Somit erweitern sich auch die Einsatzmöglichkeiten der terrestrischen Photogrammetrie in Bezug auf die Bewegungsanalyse von Gletschern. Es können kurzzeitliche Bewegungsvariationen untersucht werden, die eine zeitliche Auflösung von Stunden (Gezeiteneinfluss auf die Gletscherbewegung) oder auch Minuten (Kalbungsereignisse) erfordern. Da die seit der Jahrtausendwende festgestellten starken Veränderungen am grönländischen Eisschild den wissenschaftlichen Fokus besonders auf die schnellfließenden Ausflussgletscher Grönlands lenkten, wurden an diesen auch terrestrische photogrammetrische Messungen durchgeführt. Neben den seit 2004 durchgeführten eigenen Arbeiten (vgl. auch Dietrich u. a., 2007) sind im Rahmen des Projektes „Extreme Ice Survey (EIS)“ für zahlreiche grönländische Gletscher Bildsequenzen aufgenommen worden [Hawbecker u. a., 2010]. Erste Ergebnisse für die Ableitung saisonaler Geschwindigkeitsvariationen aus diesen Daten werden in [Ahn & Box, 2010] vorgestellt. Für das Tracking in den monoskopischen Bildsequenzen wird hier ein auf dem Kreuzkorrelationsverfahren (vgl. Kapitel 4.1.1.1) basierender Ansatz vorgeschlagen. Durch die Anwendung mehrerer Patches unterschiedlicher Größe für jeden Messpunkt, die zudem noch auf unterschiedliche Weise gefiltert werden, wird eine robustere Zuordnung gewährleistet. Die Übertragung der Messwerte in den Objektraum erfolgt hier auf Basis eines digitalen Geländemodells (DGM) aus Satellitendaten. Ein aktuelles Beispiel für Geschwindigkeitsmessungen an arktischen Gletschern mittels terrestrischer Photogrammetrie sind die Untersuchungen dreier Gletscher auf Spitzbergen von (Eiken & Sund, 2012). Die Autoren vergleichen dazu die Auswertung stereoskopischer und monoskopischer Bildsequenzen sowie die Auswertung von aus Bildsequenzen generierten Orthophotosequenzen.

Verfahren der terrestrischen Photogrammetrie finden nicht nur Anwendung in der Bewegungsanalyse arktischer Auslassgletscher, sondern haben sich auch als geeignetes Werkzeug für die Überwachung und Änderungsdetektion von Gebirgsgletschern erwiesen [Kaufmann & Ladstädter, 2008; Pitkänen & Kajuutti, 2004; Sanz Ablanedo u. a., 2012]. Ziel ist hier vorrangig die Dokumentation von Eisdickenänderungen aus wiederholter DGM-Generierung mittels terrestrischer photogrammetrischer Aufnahmen.

Durch die Nutzung terrestrischer Bildsequenzen kann eine hohe zeitliche Auflösung und eine hohe räumliche Messwertdichte erreicht werden. Die anhand terrestrischer Bilddaten erzielbare Punktmessgenauigkeit liegt für die in der Gletschervermessung notwendigen Messdistanzen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich. Für die schnellfließenden unzugänglichen Gletscher Grönlands bietet sich die Bildsequenzanalyse als berührungsloses Messverfahren an. Die zahlreichen Spalten der zerklüfteten Gletscheroberfläche stellen zudem gut zu verfolgende Merkmale dar, die eine automatische Punktverfolgung in den Bildsequenzen ermöglichen.

2.1.3 Terrestrisches Laserscanning

Das terrestrische Laserscanning (TLS) ist eine junge Technologie (marktreife Geräte existieren seit Ende der 1990er Jahre), die bisher nur selten für die Vermessung arktischer Gletscher eingesetzt wurde. Aufgrund der großen Dimensionen dieser Gletscher sind hohe Reichweiten der Geräte notwendig. Entsprechend geeignete Geräte, die darüber hinaus auch Messungen auf Eis erlauben, sind allerdings bislang nur wenige verfügbar. Bisherige Messungen tragen daher eher den Charakter von Machbarkeitsstudien, welche das Potenzial des Messverfahrens für die spezielle Anwendung der Gletschervermessung untersuchen. Neben den im Folgenden vorgestellten eigenen Arbeiten (vgl. auch [Schwalbe u. a., 2008]) wurden z. B. auch von [Hamilton u. a., 2009] Untersuchungen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten terrestrischer Laserscanner an grönländischen Ausflussgletschern vorgenommen. Letztere nutzten zwei unterschiedliche Gerätetypen für Messungen am Helheim-Gletscher, um deren Vor- und Nachteile für die Aufnahme der Gletscheroberflächentopografie zu evaluieren.

Da terrestrische Long-Range-Laserscanner erst seit wenigen Jahren verfügbar sind, finden sich in der Literatur vorwiegend Arbeiten, die den Einsatz des Messverfahrens zum Monitoring von kleineren Gebirgsgletschern zum Inhalt haben (vgl. Abbildung 2.2). [Godone & Godone, 2012] betonen die zunehmende Bedeutung des terrestrischen Laserscannings für diesen Einsatzbereich und sehen ein besonderes Potenzial des Messverfahrens bei der Bestimmung von Ausdehnung, Oberflächentopografie und Oberflächengeschwindigkeiten der Gletscher. Erste Untersuchungen zur Vermessung von Gletschern und Blockgletschern mittels TLS wurden u. a. von [Avian & Bauer, 2006; Bauer u. a., 2003; Kellerer-Pirklbauer u. a., 2005] vorgestellt. Ein Beispiel für aktuelle Arbeiten ist die Bestimmung von Massenbilanzen und Oberflächengeschwindigkeiten eines Alpengletschers auf Basis von TLS-Daten [Carturan u. a., 2012].

Das terrestrische Laserscanning bietet den Vorteil, innerhalb kurzer Zeit räumlich sehr hochaufgelöste 3D-Punktwolken einer Gletscheroberfläche mit Punktgenauigkeiten von Dezimetern bis wenigen Metern zu erstellen. Eingeschränkt – in Bezug auf die Vermessung arktischer Gletscher – wird der Einsatz des Verfahrens noch durch zu geringe Reichweiten (max. 4.000 m). Aufgrund der Tatsache, dass es sich um eine junge Technologie handelt, ist anzunehmen, dass die Entwicklung der Geräte hinsichtlich Gewichtsreduktion und Optimierung der Handhabung in den nächsten Jahren weiter voranschreitet und die aktuellen Grenzen der technischen Spezifikationen terrestrischer Laserscanner weiter verschoben werden.

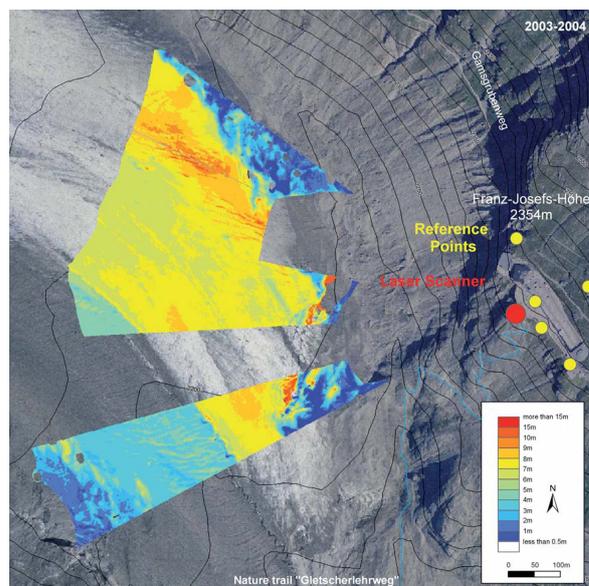


Abbildung 2.2: Beispiel für den Einsatz des terrestrischen Laserscannings zur Gletscherüberwachung. Die aus [Avian & Bauer, 2006] entnommene Abbildung zeigt die aus TLS-Daten abgeleiteten Höhenänderungen des Pasterzeglletschers (Hohe Tauern) zwischen den Jahren 2003 und 2004. Orthophoto 1998, © Nationalpark Hohe Tauern.

2.1.4 GNSS-Messungen

Messungen unter Nutzung von GNSS (Global Navigation Satellite System) haben sich als nützliches Werkzeug für die Bestimmung von Oberflächenfließgeschwindigkeiten auf dem Inlandeis erwiesen, wie z. B. die Untersuchungen des Ablationsgebietes am westlichen Rand des Eisschildes von [van de Wal u. a., 2008] zeigen. [Vieli u. a., 2004] nutzen das Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsvariationen eines Gezeitengletschers. Der Einsatz von GPS (Global Positioning System) als eine Variante zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und kurzzeitlicher Geschwindigkeitsvariationen schnellfließender Ausflussgletscher in Grönland wurden von [Brown u. a., 2008] bzw. [Howat u. a., 2009] untersucht. Preiswerte Einfrequenzempfänger wurden hierfür direkt auf dem Gletscher platziert und deren Position fortlaufend bestimmt. Durch Auswertung mittels DGPS (Differential Global Positioning System) wurde eine Genauigkeit von wenigen Dezimetern erreicht. Das erreichbare Genauigkeitspotenzial bei einem Einsatz von teureren Zweifrequenzempfängern wird von [Howat u. a., 2009] mit 1 cm bei einer zeitlichen Auflösung der Messwerte von einer Minute angegeben.

Der Unterschied zu den anderen hier vorgestellten terrestrischen Verfahren besteht darin, dass die Messung direkt am Objekt und nicht berührungslos von festem Gelände aus ausgeführt wird. Dies hat einerseits den Vorteil, dass hinsichtlich der Bereiche der Gletscherzunge, für die Messungen vorgenommen werden können, keine Restriktionen bestehen, wie sie bei berührungslosen Verfahren durch die Lage und das Relief eisfreier Uferbereiche oder durch die Reichweite der Messverfahren gegeben sind. Andererseits bringt das Verfahren als Nachteil mit sich, dass pro Gerät nur eine einzelne Bewegungskurve bestimmt werden kann. Darüber hinaus machen der Installationsaufwand und die hohe Wahrscheinlichkeit des Verlustes der Messgeräte das Verfahren sehr kostenintensiv. Bei höheren Genauigkeitsanforderungen, die den Einsatz von Zweifrequenzempfängern notwendig machen, steigern sich die anfallenden Kosten noch einmal deutlich.

2.2 Flugzeugbasierte Verfahren

Flugzeuggestützte Verfahren eignen sich vor allem zur Untersuchung von Gletschern, deren Größe oder Unzugänglichkeit eine terrestrische Vermessung ausschließt, für die aber dennoch Messdaten in relativ hoher geometrischer Auflösung erhoben werden sollen. Der Vorteil der weitestgehend senkrechten Aufnahmerichtung zur Oberfläche des Messobjekts liegt insbesondere in der lückenlosen Abtastung der Gletscheroberflächen. Aufgrund schräger Sichten und Standortabhängigkeiten besteht bei den meisten terrestrischen Verfahren die Gefahr von Abschattung und toten Sichtbereichen sowie eine distanzabhängig variierende geometrische Auflösung und Genauigkeit der Messwerte. Im Gegensatz zu terrestrischen Verfahren sind flugzeuggestützte Verfahren wiederum sehr kostenintensiv. Dies gilt insbesondere für die Ableitung von Geschwindigkeitsinformationen oder Veränderungsdetektionen, wofür wiederholte Befliegungen durchgeführt werden müssen. Die erreichbare zeitliche Auflösung der Verfahren ist geringer als bei terrestrischen Messungen und liegt im Bereich von Stunden bis Tagen. Die Anzahl von Wiederholungsmessungen ist gering. Die geometrische Auflösung liegt im Dezimeter- bis Meterbereich. Für die Vermessung von Gletschern werden neben der Luftbildphotogrammetrie auch neuere Technologien wie das Flugzeuglaserscanning oder Flugzeug-Radarmessungen eingesetzt.

2.2.1 Luftbildphotogrammetrie

Mit den zunehmenden Fortschritten in der Entwicklung der Luftbildphotogrammetrie während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts fand das Verfahren schließlich auch Einzug in die Gletschervermessung. Durch wiederholte Befliegungen lassen sich für Gletscher aus Luftbildern Geschwindigkeiten bestimmen, Frontlageänderungen kartieren sowie Oberflächenmodelle generieren, aus denen Volumenänderungen abgeleitet werden können [Meier u. a., 1985]. Die Punktmessgenauigkeit liegt, abhängig von den Parametern der Befliegung, im Dezimeter- bis Meterbereich.

In Bezug auf die grönländischen Ausflussgletscher wurden die umfassendsten Vermessungsarbeiten mittels Luftbildphotogrammetrie in den 1950er Jahren von [Carbonnell & Bauer, 1968] im Rahmen der EGIG durchgeführt. Ziel der Messungen war die photogrammetrische Bestimmung von Geschwindigkeitsvektoren (vgl. Abbildung 2.3) für alle Ausflussgletscher im Bereich der Diskobucht [Weidick & Bennike, 2007]. Für Nord-

grönland führte [Higgins, 1991] für zahlreiche Gletscher Geschwindigkeitsbestimmungen durch. Er nutzte dazu Luftbilder aus mehreren verschiedenen Luftbildbefliegungen in Grönland innerhalb des Zeitraums von 1947 bis 1978. Beispiele für die photogrammetrische Vermessung von Gletschern mittels Luftbildern finden sich weltweit. [Brecher, 1986] führte auf diese Weise Geschwindigkeitsbestimmungen von Gletschern in der Antarktis durch. [Meier u. a., 1985; Krimmel, 2001] nutzten das Verfahren zur umfassenden Vermessung des Columbia-Gletschers in Alaska. Für den Alpenraum finden sich Beispiele bei [Kääb, 2001].

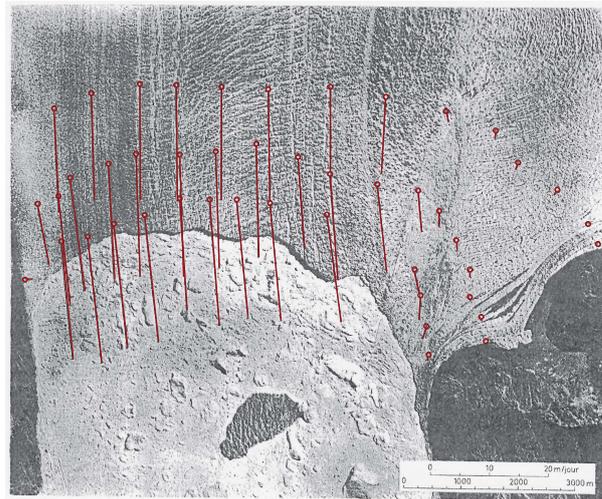


Abbildung 2.3: Aus Luftbildern abgeleitete Geschwindigkeitsvektoren (rot) am Jakobshavn Isbræ. Abbildung aus [Carbognell & Bauer, 1968] überarbeitet.

2.2.2 Flugzeuglaserscanning

Der Einsatz von Lasermesssystemen auf Flugzeugplattformen begann in den 1980er Jahren. Flugzeuglaserscanning wurde seit dieser Zeit auch als Messverfahren für glaziologische Untersuchungen in Grönland eingesetzt [Krabill u. a., 1995a]. Das Verfahren ermöglicht die direkte Gewinnung von dreidimensionalen Koordinaten der Gletscheroberfläche mit einer Höhenmessgenauigkeit von ca. 10–20 cm auf Eis [Krabill u. a., 1995b]. Durch Wiederholungsmessungen und den Vergleich von aus den Laserscannerdaten abgeleiteten Oberflächenmodellen können Aussagen über Eisdickenänderungen getroffen werden.

Auch Geschwindigkeitsbestimmungen sind anhand der gewonnenen Punktwolken möglich. In [Abdalati & Krabill, 1999] werden zu diesem Zweck Bildzuordnungsverfahren auf aus Laserscannerdaten interpolierte Höhenbilder angewandt und Merkmale verfolgt, die sich aus den durch Gletscherspalten bedingten Höhenunterschieden der Gletscheroberfläche ergeben. Die Autoren geben die Genauigkeit der so ermittelten Translationsvektoren mit 1–2 m an. Der Erfolg des Verfahrens ist sehr stark abhängig von der Topografie der Gletscheroberfläche. Die hohe Oberflächenrauigkeit der westgrönländischen Ausflussgletscher bietet hier gute Voraussetzungen für erfolgreiche Geschwindigkeitsbestimmungen aus Flugzeuglaserscannerdaten.

Die Stärke des Flugzeuglaserscannings liegt aber im Wesentlichen in der Gewinnung hochaufgelöster Oberflächenmodelle. Gegenwärtig werden dabei Punktdichten von mehr als zehn Punkten pro m² erreicht.

2.2.3 Flugzeuggestützte Radarmessungen

Hinsichtlich der Untersuchung von Ausflussgletschern werden Radarmessungen von Flugzeugplattformen hauptsächlich zur Bestimmung der Eisdicken und zur Ableitung von Profilen des Gletscherbettes genutzt [Allen u. a., 1997; Gogineni u. a., 2001; Braaten & Gogineni, 2003]. [Thomas u. a., 2009] kombinieren die Ergeb-

nisse von Oberflächenmessungen mittels Flugzeuglaserscanning und von Bodenprofilen aus Radarmessungen, um für Ausflussgletscher Eisdickenänderungen zu bestimmen und diese in Relation zur Tiefe des Gletscherbettes zu bewerten.

Bildgebende Radarverfahren auf Flugzeugplattformen werden kaum eingesetzt, da Satelliten-Systeme in diesem Bereich mittlerweile sehr hohe Auflösungen bieten. Eine Methode für die Bestimmung eines horizontalen Bewegungsvektorfeldes für einen alpinen Gletscher mittels flugzeuggestützter Synthetic-Aperture-Radar-Interferometrie (InSAR) wird von [Prats u. a., 2007] vorgestellt.

2.3 Satellitengestützte Verfahren

Satellitengestützte Beobachtungsverfahren stellen heute die Hauptdatenquelle für glaziologische Untersuchungen des grönländischen Eisschildes dar. Überlegen sind sie terrestrischen und flugzeug-gestützten Verfahren vor allem in der flächendeckenden Erhebung von Messwerten für sehr große, schwer zugängliche Untersuchungsgebiete. Mit der Zunahme in der Vielfalt der Sensorik und in der Verfügbarkeit von Daten mit immer besserer Bodenauflösung hat ihre Bedeutung auch für die Untersuchung der Polargebiete in den letzten Jahrzehnten rasant zugenommen. Ausgestattet mit unterschiedlichsten Sensoren kann von Satellitenplattformen aus eine Vielzahl Gletscher beeinflussender Parameter untersucht werden. Ein Überblick dazu findet sich in [Pellika & Rees, 2010]. In Bezug auf die Untersuchung von Ausflussgletschern ist vor allem die Auswertung von Synthetic-Aperture-Radar-Daten (SAR-Daten) und von optischen Satellitendaten interessant, deren Anwendung an dieser Stelle kurz vorgestellt werden soll.

2.3.1 Synthetic-Aperture-Radar-Daten

Von Satelliten mit bildgebenden Radarsystemen (z. B. Radarsat, TerraSAR-X) können mittels des Synthetic-Aperture-Radar-Prinzips Bilder aufgenommen werden, die Auflösungen bis zu 1 m oder mittlerweile sogar eine Dezimeter-Auflösung (z. B. SAR-Lupe) erreichen. Ein großer Vorteil gegenüber optischen Satellitenbildern besteht in der Bewölkungs- und Beleuchtungsunabhängigkeit der Radarmessungen. Aufnahmen können somit unter verschiedensten Wetterbedingungen und auch nachts erfolgen. Im Hinblick auf die Vermessung von Gletschern stellen satellitengestützte SAR-Systeme damit eine der wichtigsten Datenquellen dar. Glaziologisch relevante Parameter, die aus SAR-Daten abgeleitet werden können, sind dabei Gletschergeschwindigkeiten, Oberflächentopografien oder die Position der Aufsetzzone schwimmender Gletscherbereiche [Bäbler, 2011].

Die reflektierten und wieder empfangenen Radarsignale besitzen eine bestimmte Intensität und Phasenlage. Die Ableitung zweidimensionaler Geschwindigkeitsfelder aus SAR-Daten erfolgt durch Feature- und Speckletracking in den Amplitudenbildern [Gray u. a., 2001; Luckman u. a., 2003]. Die Anwendung von SAR-Interferometrie [Goldstein u. a., 1993] ermöglicht darüber hinaus die Ableitung von Oberflächenmodellen [Bamler, 1997] und unter bestimmten Voraussetzungen auch von 3D-Geschwindigkeitsfeldern [Mohr u. a., 1998]. Im Hinblick auf die Geschwindigkeitsbestimmung aus SAR-Daten ist eine Kombination der einzelnen komplementären Verfahren sinnvoll [Joughin, 2002]. Mittels SAR-Interferometrie können die besten Genauigkeitswerte erzielt werden [Strozzi u. a., 2002], doch ist das Verfahren anfällig gegenüber Kohärenzverlust zwischen zwei SAR-Aufnahmen, wofür insbesondere bei schnellfließenden Ausflussgletschern oder bei der Verfügbarkeit von Daten mit nur geringer Repetitionsrate Gefahr besteht. Ein weiterer Nachteil gegenüber den Trackingverfahren besteht darin, dass primär nur Geschwindigkeitskomponenten in Blickrichtung des Satelliten bestimmt werden können, aus welchen die Bewegungsvektoren unter Verwendung eines Höhenmodells, bestimmter Aufnahmegeometrien und Annahmen über das Fließverhalten des Gletschers erst abgeleitet werden müssen.

Die Nutzung von SAR-Daten für die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und Zustandsänderungen grönländischer Ausflussgletscher beschreiben [Luckman u. a., 2003; Rignot u. a., 1997; Rignot & Kanagaratnam, 2006; Joughin u. a., 2004; Joughin u. a., 2010].

2.3.2 Optische Satellitenbilder

Optische Satellitenbilder stellen für die Geschwindigkeitsbestimmung von Gletschern eine Alternative zu SAR-Daten dar, da sie momentan noch flächendeckender verfügbar und kostengünstiger sind und darüber hinaus eine längere Historie besitzen. Die Bestimmung horizontaler Geschwindigkeitsvektoren erfolgt durch die Anwendung von Bildzuordnungsverfahren auf wiederholte Satellitenaufnahmen des Messgebietes. Die Wiederholraten der Satellitensysteme begrenzen dabei die zeitliche Auflösung der Geschwindigkeitsmessungen. Repetitionsraten variieren zwischen wenigen Tagen (z.B. MODIS: 1–2 Tage) und mehreren Wochen (z.B. SPOT5: bis zu 26 Tage), wobei Verfahren mit hoher zeitlicher Auflösung in der Regel eine geringe geometrische Auflösung besitzen. Während MODIS eine Auflösung von maximal 250 m ermöglicht, besitzt SPOT5 eine Auflösung von 2,5 m für den panchromatischen Kanal. Je nach Messgebiet sind die unterschiedlichen Satellitensysteme als Datenquelle für Geschwindigkeitsbestimmungen geeignet. Unter Verwendung von SPOT5-Satellitenbildern bestimmen [Berthier u. a., 2005] Translationsvektoren für Gebirgsgletscher mit einer Genauigkeit von 0,5 m. [Haug u. a., 2010] weisen die Eignung von MODIS-Daten für Geschwindigkeitsmessungen von Schelfeisen nach.

Eine lange Historie haben die Satelliten der Landsat-Missionen (seit 1972), die nicht zuletzt aufgrund des nunmehr kostenfrei zur Verfügung stehenden Satellitenbildarchivs eine für Forschungszwecke wichtige Datenquelle sind. Erste Arbeiten zur Ableitung von Gletschergeschwindigkeiten aus Satellitenbildern wurden u. a. von [Krimmel & Meier, 1975; Lucchitta & Ferguson, 1986; Scambos u. a., 1992] unter Nutzung von Landsatdaten für die Antarktis durchgeführt.

Beispiele für die Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten bedeutender grönländischer Ausflussgletscher finden sich bei [Howat u. a., 2005; Stearns & Hamilton, 2006; Rosenau, 2008], welche für diesen Zweck jeweils ASTER-Daten auswerten.

Die Genauigkeit, mit der Bewegungsvektoren mittels satellitengestützter Verfahren bestimmt werden können, ist abhängig von der geometrischen Auflösung der Daten. Mittels subpixelgenauer Trackingverfahren ist bei der Verwendung von optischen Satellitendaten eher eine Genauigkeit im Meterbereich und für SAR-Messungen im Dezimeterbereich realisierbar. Die zeitliche Auflösung ist systemabhängig unterschiedlich, doch besitzen die meisten Satelliten Wiederholraten von mehreren Tagen. Kurzzeitigere Ereignisse können somit nicht erfasst werden und es bestehen Einschränkungen bei der Geschwindigkeitsbestimmung der unmittelbaren Frontbereiche schnellfließender Gletscher. Bei optischen Satellitendaten wird die realisierbare zeitliche Auflösung von Messungen darüber hinaus noch durch die Bewölkungssituation beeinflusst. Für Radarmessungen bestehen in Bezug auf Ausflussgletscher in steilen und tiefen Taleinschnitten aufgrund der seitlichen Visur gegebenenfalls Probleme durch Abschattung.

3 Datenakquisition

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Aspekte der Datenaufnahme behandelt. Es werden zunächst die einzelnen Gletscher vorgestellt, an denen Messungen durchgeführt wurden. Die Eigenschaften der Messgebiete und die jeweiligen Aufgabenstellungen stellen bestimmte Anforderungen an die zu verwendenden Messinstrumente. Die unter diesen Gesichtspunkten ausgewählten und zum Einsatz gekommenen Aufnahme­geräte werden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert. Die beiden angewandten Messverfahren – die Aufnahme monokularer Bildsequenzen einerseits und multi-temporalen Laserscans andererseits – werden beschrieben und die zugehörigen Messkonzepte vorgestellt. Schließlich werden die durchgeführten Messkampagnen mit ihren individuellen Messungen an den einzelnen Gletschern erläutert.

3.1 Messgebiete

Die untersuchten Messgebiete befinden sich im Bereich der Diskobucht in Westgrönland. Es wurden Messungen am Jakobshavn Isbræ, an dem in den letzten zehn Jahren dramatische Veränderungen zu beobachten waren, sowie an den Gletschern Støre Qarajaq, Eqip Sermia, Sermeq Avannarleq und Sermeq Kujalleq durchgeführt (vgl. Abbildung 3.1). Der Fokus der Messungen lag dabei auf dem Jakobshavn Isbræ, an dem drei Messkampagnen stattfanden (vgl. Kapitel 3.4). Dabei wurden 2004 erste Erfahrungen gesammelt und 2007 und 2010 entsprechende Wiederholungsmessungen durchgeführt, um die Änderung von Geschwindigkeit und Bewegungsverhalten des sich stark verändernden Gletschers zu dokumentieren. Für die vier anderen Gletscher zeigten die aus Luft- und Satellitenbildern abgeleiteten Frontlagen nur geringe Veränderungen seit Mitte der 1950er Jahre. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Verhaltensweisen stellen sie deshalb interessante Ver-

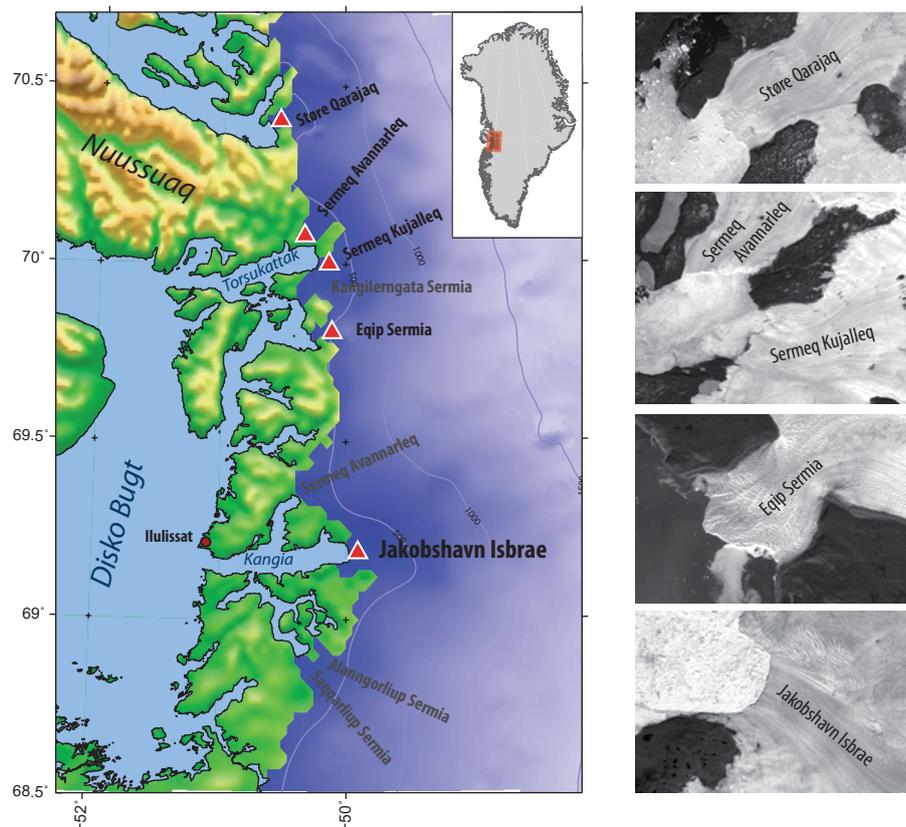


Abbildung 3.1: Übersicht der Messgebiete. Der Kartenausschnitt (links) zeigt den Bereich der Diskobucht an der Westküste Grönlands. Die untersuchten Gletscher Støre Qarajaq, Sermeq Avannarleq, Sermeq Kujalleq, Eqip Sermia und Jakobshavn Isbræ (von Nord nach Süd) sind gekennzeichnet. Sie sind jeweils auch als Ausschnitt eines SPOT5-Orthophotos vom August 2008 abgebildet (rechts). Orthophoto: © Centre national d'etudes spatiales (France) und SPOT Imaging Services.

gleichsobjekte zum Jakobshavn Isbræ dar. Für sie fanden jeweils einmalige Messungen statt. Die im Rahmen der Arbeit gemessenen Gletscher besitzen eine Ausdehnung von mehreren Kilometern und sind durch eine von tiefen Spalten geprägte Oberfläche gekennzeichnet.

Jakobshavn Isbræ

Der Jakobshavn Isbræ ist der größte Ausflussgletscher Grönlands und darüber hinaus einer der schnellsten und produktivsten Gletscher der Welt. Er befindet sich auf der Breite von $69^{\circ}11'$ N an der Westküste Grönlands und kalbt in den ca. 60 km langen Kangiafjord, welcher nahe Ilulissat in die Diskobucht mündet. Gletscher und Fjord zusammen wurden 2004 unter der Bezeichnung Ilulissat Eisfjord in die Liste des UNESCO Weltnaturerbes aufgenommen [Bennike u. a., 2004]. Die zwei Eisströme des Jakobshavn Isbræ, welche sich früher vereinten und gemeinsam die fließende Gletscherzunge bildeten, münden seit ca. 2004 getrennt in den Kangia. Die Messungen der vorliegenden Arbeit fanden am südlichen Hauptstrom statt, der eine Breite von ca. 4–5 km aufweist.

Bis zu 7 % der jährlichen Niederschlagsmenge des grönländischen Inlandeises werden über den Jakobshavn Isbræ abgeführt [Echelmeyer, 1992]. Seine Eisbergproduktion liegt dabei bei 30 bis 50 km^3/Jahr [Weidick & Bennike, 2007; Joughin u. a., 2004], was ihn zu einem wichtigen Forschungsgegenstand im Hinblick auf die Bestimmung der grönländischen Eismassenbilanz macht. Eine weitere Besonderheit des Gletschers ist sein bis zu 1.500 m tiefes Gletscherbett von 80–100 km Länge, welches weit ins Inlandeis hineinreicht. [Clarke & Echelmeyer, 1996; Weidick & Bennike, 2007]. Bis in die jüngste Zeit hinein besaß der Jakobshavn Isbræ eine schwimmende Gletscherzunge, deren Zerfall etwa um das Jahr 2000 begann und von einer Reihe starker Änderungen in der Dynamik des Gletschers begleitet wurde.

Der Jakobshavn Isbræ ist einer der am längsten und umfassendsten dokumentierten Gletscher Grönlands. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften gilt er einerseits schon lange als interessantes Forschungsobjekt und zum anderen ist er aus logistischer Sicht günstig gelegen, da er durch seine Nähe zu Ilulissat, der drittgrößten Ortschaft Grönlands, per Helikopter vergleichsweise gut zu erreichen ist. So begann die Dokumentation der sich verändernden Frontlagen des Jakobshavn Isbræ (vgl. Abbildung 3.2) schon vor über 150 Jahren durch Hinrich Johannes Rink [Rink, 1857]. Ausgehend von dieser ersten kartierten Frontlage erfolgte ein stetiger Rückzug der Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ bis in die 1950er Jahre, dem sich bis zum Ende des Jahrhunderts eine Phase mit relativ stabiler Frontlage anschloss [Weidick, 1995; Sohn u. a., 1998; Csatho u. a., 2008]. Danach begann der Zerfall der schwimmenden Gletscherzunge [Alley u. a., 2005; Mayer & Herzfeld, 2008], verbunden mit erhöhten Kalbrungsraten [Rignot & Kanagaratnam, 2006], der Abnahme ihrer Dicke [Thomas u. a., 2003] und der Zunahme der Fließgeschwindigkeit [Joughin u. a., 2004].

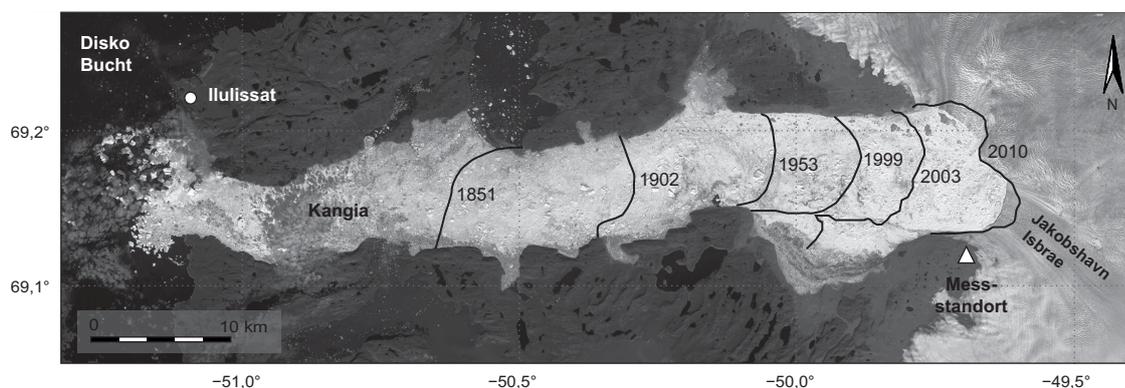


Abbildung 3.2: Rückgang der Gletscherfront am Jakobshavn Isbræ. Dem Ausschnitt eines SPOT5-Orthophotos von 2008, welches den Kangiafjord und den Jakobshavn Isbræ zeigt, werden ausgewählte Frontlagen des Gletschers im Verlauf der letzten 160 Jahre überlagert (nach [Weidick & Bennike, 2007]). Dargestellt sind auch die Lage der Ortschaft Ilulissat sowie die Position, von der aus die eigenen Messungen erfolgten. Orthophoto: © Centre national d'etudes spatiales (France) und SPOT Imaging Services.

Die erste Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten des Jakobshavn Isbræ wurde von [Helland u. a., 1876] durchgeführt, gefolgt von geodätischen Messungen durch [Hammer, 1883] und [Engell, 1904], die jeweils Geschwindigkeiten in der Größenordnung von ca. 20 m/Tag ermittelten. Mit dem Voranschreiten der Entwicklungen in der Luftbildphotographie konnten die vorher stichprobenartig erhobenen Messungen ab den 1950er Jahren auf flächendeckende Untersuchungen erweitert werden. Die von [Carbonnell & Bauer, 1968] aus Luftbildmessungen abgeleiteten Geschwindigkeitsprofile für den Jakobshavn Isbræ dokumentierten auch ein Jahrhundert nach Hellands ersten Messungen noch Fließgeschwindigkeiten von 20–22 m/Tag. Um das Jahr 2003 begannen schließlich drastische Veränderungen in der Dynamik des Gletschers, die sich u. a. in einer Verdopplung der Fließgeschwindigkeiten im Frontbereich innerhalb eines Zeitraumes von nur wenigen Jahren äußerten [Joughin u. a., 2004; Rignot & Kanagaratnam, 2006].

Mit der Entwicklung der Laserscannertechnologie wurden durch den Einsatz von Flugzeuglaserscannern Höhenmessungen möglich, mit denen seit den 1990er Jahren zunächst eine sporadische Zunahme, ab 1997 jedoch eine Abnahme der Dicke der Gletscherzunge von mehreren Metern pro Jahr am Jakobshavn Isbræ dokumentiert werden konnte. [Abdalati u. a., 2001; Krabill u. a., 2004; Thomas u. a., 2003].

Støre Qarajaq

Der in seinem Frontbereich ca. 5–6 km breite Støre Qarajaq ist einer der schnellsten Gletscher an der Westküste Grönlands und nach dem Jakobshavn Isbræ der zweitproduktivste Gletscher der Region, mit einer Eisbergproduktion von 14–18 km³/Jahr [Weidick & Bennike, 2007]. Er ist der einzige der untersuchten Gletscher, der nicht in die Diskobucht mündet, sondern sich etwas nördlich der Nuussuaqhalbinsel auf 70°23' nördlicher Breite befindet. Von der nächstgelegenen größeren Ortschaft Uummannaq aus ist er per Boot zu erreichen. Aufgrund seiner relativ guten Zugänglichkeit liegen auch für den Støre Qarajaq schon sehr frühe Messungen vor. Ende des 19. Jahrhunderts wurden erste Geschwindigkeitsmessungen von [Steenstrup, 1883] und [von Drygalski, 1897] durchgeführt. Später erfolgten die Luftbildauswertungen von [Carbonnell & Bauer, 1968]. Diese Messungen dokumentieren für den entsprechenden Zeitraum eine relativ stabil bleibende Geschwindigkeit des Gletschers zwischen 12–14 m/Tag.

Eqip Sermia

Der auf 69°47' N gelegene Eqip Sermia weist in seinem Frontbereich eine Breite von ca. 3–4 km auf. Er befindet sich ca. 70 km nördlich des Jakobshavn Isbræ und ist von Ilulissat aus gut mit dem Boot zu erreichen. Nach [Weidick & Bennike, 2007] wurden die ersten Geschwindigkeitsmessungen für den Eqip Sermia im Jahr 1912 von Alfred de Quervain [de Quervain & Mercanton, 1925] durchgeführt. Weitere historische Messungen wie die von [Bauer, 1955; Carbonnell & Bauer, 1968; Zick, 1972] dokumentieren über einen langen Zeitraum hinweg stabile Geschwindigkeiten von 2–3 m/Tag für den Gletscher. Für den Zeitraum von 2000–2005 wurde von [Rignot & Kanagaratnam, 2006] jedoch eine Beschleunigung des Eqip Sermia von ca. 30 % festgestellt. Die Gletscherfront des Eqip Sermia zog sich seit Beginn ihrer ersten Dokumentation im Jahr 1912 bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts um ca. 2 km zurück und fluktuierte seitdem in einem Bereich von ca. 1 km [Zick, 1972] (vgl. auch Abbildung 2.1).

Sermeq Kujalleq und Sermeq Avannarleq

Zwei weitere schnellfließende Gletscher der Diskobucht, auf welche das Messprogramm ausgedehnt wurde, sind der im Frontbereich ca. 6 km breite Sermeq Avannarleq (70°3' N) und der ca. 6–7 km breite Sermeq Kujalleq (69°60' N). Beide Gletscher liegen nah beieinander und münden, getrennt durch eine Felseninsel, in den Torsukattakfjord. Während am nördlichen der beiden Gletscher schon Ende des 19. Jahrhunderts Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt wurden [Helland, 1876; Steenstrup, 1883], liegen für den Sermeq Kujalleq Messungen erst ab Mitte des 20. Jahrhunderts vor. Die Luftbildauswertungen von [Carbonnell & Bauer, 1968] ergaben maximale Geschwindigkeiten von ca. 17 m/Tag für den Sermeq Kujalleq und ca. 9 m/Tag für den Sermeq Avannarleq. Auch bei diesen beiden Gletschern wurden seit dem Jahr 2000 Veränderungen beobachtet. [Rignot & Kanagaratnam, 2006] bestimmten für den Zeitraum von 2000 bis 2005 für beide Gletscher allerdings eine Geschwindigkeitsabnahme.

3.2 Aufnahmegeräte

Für die photogrammetrische Vermessung der frontnahen Gletscherbereiche wurden zum einen verschiedene digitale Spiegelreflexkameras als Aufnahmegeräte verwendet, zum anderen wurde getestet, inwieweit sich ein terrestrischer Laserscanner für diese Aufgabe eignet. Die verwendeten Messgeräte werden in diesem Kapitel näher vorgestellt.

3.2.1 Kameras

3.2.1.1 Anforderungen

Die Hauptanforderung an Kameras, die zur Bewegungsanalyse eines Gletschers genutzt werden sollen, ist, dass sie die Fähigkeit besitzen, in definierten Zeitabständen Bilder aufzunehmen und über einen gewissen Zeitraum autonom arbeiten zu können. Je nach Aufgabenstellung umfasst dies Zeiträume von wenigen Tagen bis hin zu mehreren Monaten.

Dies bedeutet, dass die Kameras nach Möglichkeit mit einem Intervallometer ausgestattet sind, das in vordefinierten Zeitabständen eine Aufnahme auslöst. Externe Intervallometer bieten häufig umfangreichere Einstellmöglichkeiten, bedürfen aber auch einer zusätzlichen Stromversorgung. Bei Langzeitbeobachtungen von mehreren Wochen ist eine externe Stromversorgung einer Kamera, z. B. mittels Gelakkus und Solarmodulen, unumgänglich. Bei kürzeren Beobachtungszeiträumen von einigen Tagen dagegen ist es aus logistischen Gründen vorteilhaft, wenn das Energiemanagement der Kamera und die Kapazität interner Akkus eine Messung ohne externe Stromversorgung erlauben.

Weitere Anforderungen sind ein möglichst hochauflösender Sensor aufgrund der großen Dimensionen des Messobjektes, die Verwendbarkeit von Wechselobjektiven sowie die Wahlmöglichkeit für manuelle Fokus- und automatische Belichtungseinstellungen. Für die Belichtungseinstellungen ist die Wahl des Blendenprioritätsmodus (Zeitautomatik) sinnvoll. Da die Kameras unter Expeditionsbedingungen unterschiedlichen Witterungen ausgesetzt sind, ist ein staub- und nässegeschütztes Kameragehäuse erforderlich. Hinsichtlich der verwendbaren Speicherkarten ist zu beachten, dass diese robust und temperaturstabil sind und während einer Messung nicht ausgetauscht werden sollten, um die Orientierung der Kamera nicht zu verändern. Fallen also für bestimmte Messaufgaben große Datenmengen an, für welche die maximal verfügbare Speicherkapazität nicht ausreicht, sollte die Möglichkeit bestehen, externe Datenspeicher zu verwenden oder die Kamera berührungslos anhand eines Datenkabels auslesen zu können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, eine Kamera über einen längeren Zeitraum stabil installieren zu können. Zu diesem Zweck sind in der Regel Adapter anzufertigen, um sie auf einem geodätischen Stativ oder direkt auf Fels montieren zu können. Gängige Kamerastative sind aus Stabilitätsgründen nur bedingt für einen Aufbau der Kamera im Feld geeignet.

3.2.1.2 Spezifikationen der verwendeten Kameras

Während der einzelnen Expeditionen kamen fünf unterschiedliche digitale Spiegelreflexkameras (DSLR-Kameras) zum Einsatz. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Kameras, ihren Einsatzzeitraum und ihre Spezifikationen, die hinsichtlich Auflösungsvermögen und Öffnungswinkel von Bedeutung sind.

Die verwendeten Kameras lassen sich in folgende drei Kategorien einteilen:

- Digitale, semiprofessionelle Spiegelreflexkameras
- Time-Lapse-Kamera
- Hochauflösende digitale Kamera

Tabelle 1: Verwendete Kameras. Die Tabelle stellt die wichtigsten Spezifikationen und Einsatzzeiträume der einzelnen Kameras, welche im Rahmen der Arbeit Verwendung fanden, zusammen.

	Kodak DCS 14n Pro	Nikon D700	Nikon D300	Canon EOS1000D	IGI DigiCAM
					
Pixelanzahl	4.500 x 3.000	4.256 x 2.832	4.288 x 2.848	3.888 x 2.592	7.216x 5.412
Pixelgröße	8 µm	8,4 µm	5,5 µm	5,7 µm	6,8 µm
Sensorformat	36 x 24 mm Kleinbild- Vollformat	36 x 24 mm Kleinbild- Vollformat	23,7 x 15,6 mm Kleinbild- DX-Format	22,2 x 14,8 mm Kleinbild- APS-C-Format	49 x 36 mm Mittelformat
Objektive	24 mm 50 mm	50 mm 85 mm	50 mm 85 mm	35 mm	80 mm
Öffnungswinkel	74° 40°	40° 24°	27° 16°	35°	34°
Pixel in 3.000 m	1,0 m 0,5 m	0,5 m 0,3 m	0,3 m 0,2 m	0,5 m	0,3 m
Einsatzzeitraum	2004 und 2007	Aug. 2010	Aug. 2010	Mai und Aug. 2010	2007

Digitale Spiegelreflexkameras

Bei der DCS 14n Pro, der D300 und der D700 handelt es sich um digitale Spiegelreflexkameras, die jeweils zum Zeitpunkt ihres Einsatzes zu den hochauflösendsten semiprofessionellen Kameras gehörten, die auf dem Markt verfügbar waren. Gleichzeitig erfüllen sie die meisten der oben genannten Anforderungen, um zu Messzwecken verwendet werden zu können, und sind kostengünstiger im Vergleich zu reinen Profikameras. Da die Kameras aufgrund ihres Außeneinsatzes und durch häufige Auslösungen sehr beansprucht werden, stellen sie einen guten Kompromiss aus Kosten, Auflösungsvermögen, Praktikabilität und Qualität dar. Sie eignen sich für Messungen über Zeiträume von mehreren Tagen während eines Feldaufenthaltes, bei dem eine regelmäßige manuelle Überwachung der Kameras möglich ist. Unter dem Begriff der Auflösung einer Kamera wird im Folgenden stets die Auflösung am Objekt, bei Realisierung des gleichen Öffnungswinkels verstanden.

Alle drei Kameras besitzen CMOS-Sensoren mit Bayerfarbmuster, wobei die DCS 14n Pro mit 14 Megapixeln das größte Auflösungsvermögen hat. Die DCS 14n Pro und die D700 verfügen über einen Vollformatsensor. Der Vorteil des größeren Sensorformates ist das bessere Rauschverhalten bei gleicher Auflösung bzw. die größere Auflösung bei gleicher Pixelgröße. So besitzt z. B. die D700 gegenüber der D300 den Vorteil 1,5-fach größerer Pixel bei gleicher Auflösung, wodurch eine entsprechend größere Lichtausbeute und somit ein besseres Signal-Rauschverhältnis gegeben ist. Für die DCS 14n Pro könnte in dieser Hinsicht ähnlich argumentiert werden, aber hier spielt vor allem die Tatsache eine Rolle, dass sie die älteste unter den verwendeten Kameras ist. Aufgrund der deutlichen Weiterentwicklung der Qualität der Sensoren in den letzten Jahren, zeigt sie gegenüber den anderen, ca. fünf Jahre jüngeren Modellen, das schlechteste Rauschverhalten. Für die meisten Messaufgaben im Rahmen der arktischen Gletscherbeobachtung sind Bilder über einen Zeitraum von 24 h aufzunehmen. Dies ist möglich, da alle beobachteten Gletscher nördlich von 69° N liegen und die Messungen im Sommer erfolgten. Durch weniger Licht in den Nachtstunden und die daraus resultierende schwache Signalstärke ist die Verwendung eines Sensors mit geringem Grundrauschen von besonderer Bedeutung.

Ein deutlicher Unterschied zwischen der DCS 14n Pro und der D300 bzw. D700 besteht auch hinsichtlich der Energieversorgung. Die Laufzeit der D300 und D700 lässt sich durch Nutzung eines Batteriegriffes mit einem zusätzlichen Akku verdoppeln. Auf diese Weise wurde mit beiden Kameras eine autonome Laufzeit von ca. 10–14 Tagen bei wechselnden Temperaturen zwischen -5 bis +20 °C erreicht. Die Energieversorgung der DCS 14n Pro dagegen konnte mit kamerainternen Akkus lediglich 6–7 h aufrecht erhalten werden. Da die

Messungen längere Beobachtungszeiträume erforderten, war der Einsatz dieser Kamera deshalb nur in Verbindung mit einer externen Stromversorgung (z. B. mittels einer Gelbatterie) möglich.

Die kamerainternen Intervallometer aller drei Kameras sind auf eine bestimmte Gesamtanzahl von Bildern limitiert. Während mit der DCS 14n Pro im Intervallmodus bis zu 9.999 Bilder aufgenommen werden können, liegt das Limit bei den Nikonkameras bei 999 Bildern. Dies stellt besonders bei Letzteren eine starke Einschränkung hinsichtlich der Gesamtdauer und der zeitlichen Auflösung einer Messung dar.

Time-Lapse-Kamera

Die EOS1000D fällt ebenfalls in die Kategorie der semiprofessionellen DSLR-Kameras, nimmt aber hier eine Sonderstellung ein, da sie von der Firma Harbortronics zu einer sogenannten Time-Lapse-Kamera erweitert wurde. Die EOS1000D als Time-Lapse-Kamera stellt eine integrierte Lösung aus Kamera, wasserdichtem Gehäuse, autonomer Stromversorgung und Intervallometer dar (vgl. Abbildung 3.3). Eine langzeitliche Stromversorgung ist über zwei im Gehäuse integrierte Gelakkus gewährleistet, die mittels eines Solarmoduls kontinuierlich aufgeladen werden. Das Intervallometer ist individuell programmierbar und erlaubt z. B. die Einstellung unterschiedlicher Aufnahmeintervalle für vordefinierte Zeitabschnitte und eine unbegrenzte Anzahl von Aufnahmen. Die Kamera ist damit speziell für autonome Messungen über lange Zeiträume von mehreren Wochen oder Monaten geeignet. Mit 10,1 Megapixeln besitzt sie allerdings die geringste Pixelanzahl unter den verwendeten Kameras und mit dem APS-C-Sensor auch das kleinste Sensorformat.



Abbildung 3.3: Harbortronics Time-Lapse-Kamera-System.
(Quelle: <https://www.harbortronics.com>)

Hochauflösende digitale Kamera

Des Weiteren kam eine digitale hochauflösende Kamera zum Einsatz, die von der Firma IGI leihweise zur Verfügung gestellt wurde. Die IGI DigiCAM basiert auf einer Mittelformatkamera von Hasselblad und wird mit einem digitalen Rückteil von 39 Megapixeln verwendet. Sie ist speziell für den Einsatz auf Flugzeugplattformen adaptiert und wird in diesem Zusammenhang auch als Bestandteil eines variabel konfigurierbaren Mehrkamerasystems verwendet. Weiterführende Informationen dazu finden sich in [Petrie, 2009]. Die Kamera wurde von IGI freundlicherweise modifiziert, um für terrestrische Messungen einsetzbar zu sein. Ein bestimmtes Aufnahmeintervall wurde voreingestellt und bei Stromzufuhr wurden die Aufnahmen in diesen Zeitabständen ausgelöst. Die Energieversorgung erfolgte mittels eines extern anzuschließenden Gelakkus.

Im Vergleich zu den oben beschriebenen Kameras besitzt die IGI DigiCAM für den Einsatz im Feld die geringste Flexibilität. Gründe dafür sind u. a. der wesentlich höhere Energiebedarf, der hohe Speicherbedarf aufgrund der großen Datenmengen, die anfallen, ihr größeres Gewicht sowie das fest fixierte Objektiv, dessen Brennweite im Vorfeld festzulegen war und welches während der Messkampagne nicht gewechselt werden konnte. Die eingeschränkte Praktikabilität der IGI DigiCAM ist teilweise der Tatsache geschuldet, dass hier eine für Luftbilddaufnahmen konzipierte Kamera terrestrisch genutzt wurde. Es kann aber grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die Nutzbarkeit von Mittelformatkameras für die Bewegungsanalyse von Glet-

schern größeren praktischen Einschränkungen unterliegt als die Verwendung von Kameras im Kleinbildbereich.

Die IGI DigiCAM war somit nicht für den Einsatz von Langzeitmessungen nutzbar. Es konnten aber zusammenhängende Messreihen von ca. 1–2 Tagen aufgenommen werden. Für die Untersuchung von Bewegungseffekten, die in diesen Zeiträumen fallen, wie z.B. gezeiteninduzierte Vertikalbewegungen und Beschleunigungen eines Gletschers, ist die Kamera aufgrund ihrer hohen Auflösung wiederum sehr gut geeignet.

3.2.1.3 Wahl der Objektivbrennweite

Neben der Entscheidung, welche Kamera für die einzelnen Gletscher und die jeweilige Messaufgabe geeignet ist, stellt sich auch die Frage nach der zweckmäßigsten Objektivbrennweite. Für die Wahl des Objektivs sind einerseits die erzielbare Auflösung am Objekt und andererseits der realisierbare Öffnungswinkel entscheidend. Je nach der Dimension des Messgebietes, der notwendigen Reichweite der Messung und der aktuellen lokalen Situation am Gletscher (Standpunktmöglichkeiten, Gletscherfrontlage) sind diese beiden Aspekte gegeneinander abzuwägen. Gleichung 3.1 stellt die Beziehung zwischen dem realisierbaren horizontalen Öffnungswinkel α_K der Kamera und der Pixelgröße am Objekt ΔPIX in einer bestimmten Entfernung D dar. Als Konstante geht das Verhältnis aus Sensorbreite b_S und Pixelgröße Δpix ein:

$$\alpha_K = 2 \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{\Delta PIX}{2 \cdot D} \cdot \frac{b_S}{\Delta pix} \right) \quad (3.1)$$

Die maximalen Entfernungsbereiche, für die noch Messwerte erhoben werden sollen, variieren für die einzelnen Gletscher von ca. 3.000 m bis ca. 7.000 m. Anhand Gleichung 3.1 ergeben sich exemplarisch für eine Distanz von 3.000 m die Kennlinien, welche für die verwendeten Kameras den Zusammenhang zwischen Öffnungswinkel und der Auflösung am Objekt beschreiben (vgl. Abbildung 3.4).

Ist entschieden, welches Verhältnis aus Öffnungswinkel und Auflösung am Objekt für die jeweilige Aufgabenstellung am geeignetsten ist, lässt sich die entsprechende Brennweite c ermitteln, mit der dieses Verhältnis realisierbar ist. Dabei kann die Brennweite entweder in Abhängigkeit von der Auflösung am Objekt (Gleichung 3.2) oder in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel (Gleichung 3.3) bestimmt werden.

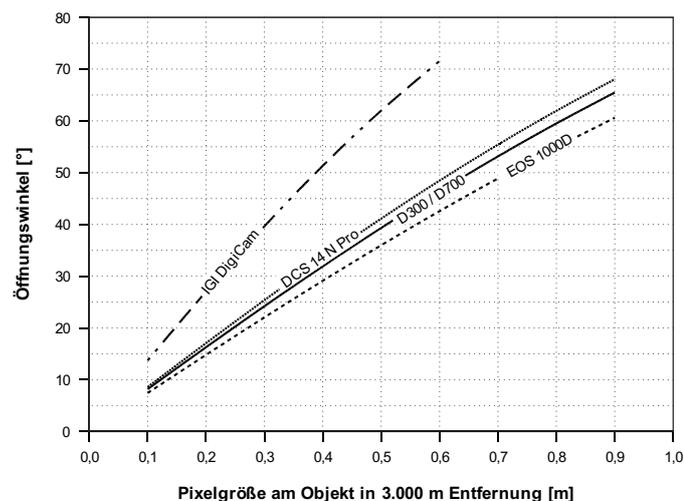


Abbildung 3.4: Öffnungswinkel in Abhängigkeit von der Auflösung am Objekt. Das Diagramm zeigt, welcher Öffnungswinkel für die verwendeten Kameras bei einer bestimmten Pixelgröße am Objekt (in 3.000 m Entfernung) realisiert werden kann.

$$c = D \cdot \frac{\Delta \text{pix}}{\Delta \text{PIX}} \quad (3.2)$$

$$c = \frac{b_s}{\text{atan}\left(\frac{\alpha_K}{2}\right)} \quad (3.3)$$

Anhand der so ermittelten Brennweite lässt sich das geeignetste Objektiv für die entsprechende Kamera auswählen (vgl. Anhang A.1.1).

3.2.2 Terrestrische Laserscanner

3.2.2.1 Anforderungen

Die zwei wesentlichsten Anforderungen, welche die Aufnahme einer ausgedehnten Gletscherzunge an einen zum Einsatz kommenden Laserscanner stellt, sind zum einen eine sehr hohe Reichweite und gleichzeitig ein gutes Reflexionsvermögen auf Eis. Darüber hinaus sind für die Eignung eines Laserscanners dessen Auflösung, die erzielbare Messgenauigkeit und der Arbeitstemperaturbereich von Bedeutung. Aus praktischer und logistischer Sicht sind des Weiteren hohe Messgeschwindigkeiten, ein geringer Stromverbrauch des Scanners und ein moderates Gewicht der Scanausrüstung wünschenswert.

Reichweite

Für die Reichweite eines Scanners ist ausschlaggebend, nach welchem Verfahren die Distanzmessung erfolgt. Hierbei werden drei Messprinzipien unterschieden: das Impulslaufzeitverfahren, das Phasenvergleichsverfahren und das Triangulationsverfahren [Joeckel & Stober, 1999; Kern, 2003]. Mit Letzterem lassen sich die höchsten Genauigkeiten erzielen, jedoch beschränkt sich der Einsatz auf einen Entfernungsbereich bis ca. 10 m. Die Reichweite beim Phasenvergleichsverfahren wird limitiert durch die Wellenlänge des auf die Trägerfrequenz aufmodulierten Signals. Mit Scannern, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind Messungen in Entfernungen von bis zu ca. 100 m möglich. Die größten Reichweiten werden mit dem Impulslaufzeitverfahren erreicht. Hier wird von der Sendeeinheit des Gerätes ein Laserpuls ausgesandt, dieser wird am Objekt reflektiert und von der Empfangseinheit des Gerätes wieder registriert. Aus der gemessenen Laufzeit des Laserpulses bestimmt sich die Entfernung zum Objekt. Die meisten Geräte, die nach diesem Verfahren arbeiten, besitzen Reichweiten von bis zu 1.000 m, was für die meisten Anwendungen ausreichend ist. Für Spezialanwendungen existieren jedoch einige wenige Scanner auf dem Markt, bei denen Reichweiten bis zu 6.000 m möglich sind. Für die Beobachtung der in Kapitel 3.1 beschriebenen Ausflussgletscher, deren Gletscherzungen in Beobachtungsrichtung eine Ausdehnung von bis zu 7 km aufweisen, kann also ausschließlich mit diesen sogenannten „Long-Range“-Laserscannern gearbeitet werden.

Reflexionsvermögen auf Eis

Laserscannermessungen sind nur möglich, wenn ein ausreichend großer Anteil des Ausgangssignals vom Objekt (in diesem Fall bestehend aus Gletschereis, gegebenenfalls auch aus Firn oder Schnee) zurück reflektiert wird. Verschiedene Materialien reflektieren unterschiedlich stark in den verschiedenen Wellenlängenbereichen [Böhler u. a., 2003]. Laserscanner, die mit Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichts (ca. 400–700 nm) arbeiten, besitzen gute Reflexionseigenschaften auf Eis und Schnee. Für diese Wellenlängen, für die das Auge durchlässig ist, kommt es allerdings schon bei geringen Laserleistungen zu Schädigungen der Netzhaut [Sliney & Wolbarsht, 1980]. Terrestrische Laserscanner besitzen deshalb in diesem Wellenlängenbereich entsprechend geringe Strahlleistungen, um augensicher und damit im praktischen Gebrauch universeller einsetzbar zu sein. Dies bedeutet jedoch, dass mit diesen Geräten keine großen Reichweiten erzielt werden kön-

nen. Im Bereich des infraroten Lichts nimmt die Augengefährdung mit Zunahme der Wellenlänge ab, allerdings verringert sich dabei auch das Reflexionsvermögen auf Eis (vgl. Abbildung 3.6).

Winkelauflösung

Die Winkelauflösung eines Scanners wird beeinflusst vom Abtastintervall und von der Divergenz des Laserstrahls. Das Abtastintervall eines Gerätes wird sinnvollerweise größer als die Strahldivergenz gewählt, um keine korrelierten Messungen zu erhalten. Nimmt man korrelierte Messungen aufgrund von sich überlappenden Laserspots in Kauf, würde sich die Auflösung scheinbar erhöhen, da auf diese Weise die Abtastintervalle beliebig klein gewählt werden können. Die Auflösbarkeit von Objektstrukturen wird auch durch die Größe des Laserspots am Objekt limitiert. Der Durchmesser des Laserstrahls am Objekt nimmt linear mit der Entfernung zu und bewirkt eine zunehmende Unschärfe bei der Aufnahme feinerer Details. Speziell bei Messungen auf zerklüfteten Gletscheroberflächen in großen Entfernungsbereichen ist deshalb eine geringe Strahldivergenz wünschenswert. Bei einer geringen Divergenz kann ein entsprechend geringeres Abtastintervall gewählt werden. Dieses wiederum ist erwünscht, um Objektstrukturen in großer Entfernung noch mit einer ausreichenden Punktdichte abbilden zu können und den Grad der Unterabtastung zu verringern. Der Nachteil kleinerer Abtastintervalle liegt wiederum in der Zunahme der Messdauer. Ausführliche Betrachtungen zur Winkelauflösung terrestrischer Laserscanner finden sich in [Lichti & Jamtsho, 2006].

Messgenauigkeit

Die Punktmessgenauigkeit eines Laserscanners wird einerseits durch die Genauigkeit des Winkelabgriffs und andererseits durch die Streckenmessgenauigkeit beeinflusst [Böhler u. a., 2003]. Die Genauigkeit der Streckenmessung unterliegt den Fehlereinflüssen, die generell bei elektrooptischer Distanzmessung wirken (vgl. [Joeckel & Stober, 1999]). Für das Impulslaufzeitverfahren wird hier die Größenordnung des streckenunabhängigen Gesamtfehlers mit ca. 1–14 mm angegeben und die des maßstäblichen Gesamtfehlers mit ca. 2–16 ppm. Streckenmessfehler sind somit im Hinblick auf die Genauigkeitsanforderungen für die Gletschermessung weitestgehend vernachlässigbar – selbst bei Messentfernungen von ca. 5.000 m (vgl. Kapitel 6.2). Zudem wirken Streckenmessfehler in Beobachtungsrichtung. Die Hauptbewegungskomponenten eines Gletschers (Fließrichtung, gezeiteninduzierte Bewegungen in vertikaler Richtung) verlaufen – bei der hier gewählten Beobachtungskonstellation – jedoch nahezu orthogonal zur Beobachtungsrichtung, so dass auch aus diesem Grund die Streckenmessgenauigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Einen ungleich größeren Einfluss haben dementsprechend Fehler des Winkelabgriffs. Diese wirken sich orthogonal zur Beobachtungsrichtung aus. Auch die Divergenz des Laserstrahls verursacht Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der tatsächlich wirksamen Winkelauslenkung des Laserstrahls, die einer Punktmessung zugrundeliegt [Lichti & Jamtsho, 2006]. Da der Einfluss des Winkelfehlers linear mit der Entfernung zunimmt, spielt er aufgrund des großen Messbereichs bei der Gletscherbeobachtung eine besondere Rolle (vgl. Kapitel 6.2).

3.2.2.2 Geeignete Geräte

Da die üblichen Anwendungen, für die terrestrische Laserscanner genutzt werden, selten eine Kombination aus hoher Reichweite und gutem Reflexionsvermögen auf Eis erfordern, existieren nur wenige Geräte auf dem Markt, die für die Aufnahme großer Gletscher geeignet sind. Die Laserscannermessungen wurden während einer Messkampagne im Jahr 2007 durchgeführt. Nach der Marktübersicht von [Lemmens, 2007] existierten zu diesem Zeitpunkt lediglich drei terrestrische Laserscanner, mit denen Reichweiten über 1.000 m erzielt werden konnten: Ilris 3D (Reichweite: 1.200 m) und Ilris 3DER (Reichweite: 1.700 m) von Optech sowie Riegl LMP-321 (Reichweite: 6.000 m bei einer Messrate von 10 Hz). Neben der deutlich größeren Reichweite hat der Riegl LPM-321 ($\lambda \approx 0,9 \mu\text{m}$) gegenüber den Laserscannern von Optech ($\lambda \approx 1,5 \mu\text{m}$) zudem den Vorteil einer besser geeigneten Wellenlänge für Messungen auf Eis und Schnee. In [Larsson u. a., 2006] wird das Reflexionsverhalten für diese beiden Wellenlängenbereiche untersucht. Die Vorteile der Optech-Laserscanner liegen in der deutlich höheren Messrate, der höheren Messgenauigkeit und der geringeren Strahldivergenz. Entsprechend einem technischen Report von [Geist u. a., 2006] bieten diese Geräte ein hohes Potenzial für die Vermessung von Gebirgsgletschern. Für die Vermessung arktischer Gletscher jedoch war der Riegl LMP-321 als das am besten geeignete Gerät zu bewerten. Auch zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Anzahl

verwendbarer Laserscanner noch gering. Das aktuelle, für Messungen auf Eis konzipierte Modell der Iris-Serie, der Iris-LR (Reichweite: 3.000 m; $\lambda \approx 1,1 \mu\text{m}$) sowie der ebenfalls speziell für die Gletschermessung entwickelte Riegls VZ-6000 (ca. 5.000 m Reichweite auf Eis, bei einer Messrate von 50 kHz) können gegenwärtig als Alternativen zum Riegls LPM-321 in Betracht gezogen werden.

3.2.2.3 Riegls LPM-321

Für die durchgeführten Laserscannermessungen wurde der als „Long-Range Laser Profil Measuring System“ bezeichnete terrestrische Laserscanner Riegls LPM-321 (vgl. Abbildung 3.5) verwendet. Dieser war zum Zeitpunkt seines Einsatzes (Sommer 2007) noch ein Prototyp und wurde freundlicherweise von der Firma Riegls leihweise zur Verfügung gestellt. In Tabelle 2 werden die für die Messaufgabe relevanten Spezifikationen des Gerätes zusammengestellt:



Abbildung 3.5: Riegls LPM-321 am Jakobshavn Isbræ (Messkampagne 2007).

Tabelle 2: Technische Daten des Riegls LPM-321 [Riegls GmbH, 2010].

Reichweite (bei einer Messrate von 10 Hz)	6.000 m bei Reflektivität $\geq 80 \%$ ≥ 1.500 m bei Reflektivität $\geq 10 \%$
Wellenlänge	905 nm
Minimales Abtastintervall	0,018°
Strahldivergenz	0,045°
Winkelgenauigkeit	0,009°
Streckenmessgenauigkeit	25 mm \pm 20 ppm
Energieverbrauch	60 W
Arbeitstemperatur	0 °C – +45 °C
Gewicht	ca. 16 kg (mit Zubehör und Transportkoffer)

Die Reichweite des Laserscanners wird vom Hersteller mit einem Maximum von bis zu 6.000 m angegeben. Sie ist dabei abhängig von den Reflexionseigenschaften des Messobjektes und wird insbesondere durch ein geringes Reflexionsvermögen des Objektmaterials eingeschränkt. Der LPM-321 arbeitet mit einer Wellenlänge von 905 nm (nahes Infrarot). Abbildung 3.6 verdeutlicht, dass Schnee und Firn in diesem Wellenlän-

genbereich eine hohe Reflektivität besitzen und auch für Gletschereis das Reflexionsvermögen größer als 10 % ist, und somit der vom Hersteller angegebene Grenzwert für Messungen nicht unterschritten wird.

Um für die großen Entfernungsbereiche (bis 6.000 m) Messungen zu ermöglichen und gleichzeitig ein augensicheres Gerät (Laserklasse 1M) nutzen zu können, sind gewisse Einschränkungen hinsichtlich Messdauer, Auflösungsvermögen und Messgenauigkeit in Kauf zu nehmen. Um die höchsten Reichweiten zu erzielen, muss mit der niedrigsten Scanfrequenz des Gerätes von 10 Hz gearbeitet werden. Die Streckenmessung erfolgt nach dem Impulslaufzeitverfahren. Die Divergenz des Laserstrahls ist mit $0,045^\circ$ vergleichsweise groß. Sie bewirkt, dass der Durchmesser des Laserspots in einer Entfernung von 3.000 m ca. 2,4 m beträgt. Die horizontale sowie auch die vertikale Auslenkung des Laserstrahls erfolgt jeweils mittels eines Schrittmotors, wobei das minimal wählbare Abtastintervall $0,018^\circ$ beträgt. Die angegebene Streckenmessgenauigkeit bewirkt einen Streckenmessfehler von ca. ± 9 cm bei einer Distanz von 3.000 m. Die Winkelgenauigkeit, mit welcher der Laserstrahl positioniert werden kann, wird mit $0,009^\circ$ angegeben. Dies würde in der gleichen Entfernung einem Punktlagefehler von ca. ± 47 cm orthogonal zur Beobachtungsrichtung entsprechen. Dies zeigt die größere Bedeutung der Winkel- gegenüber der Streckenmessgenauigkeit.

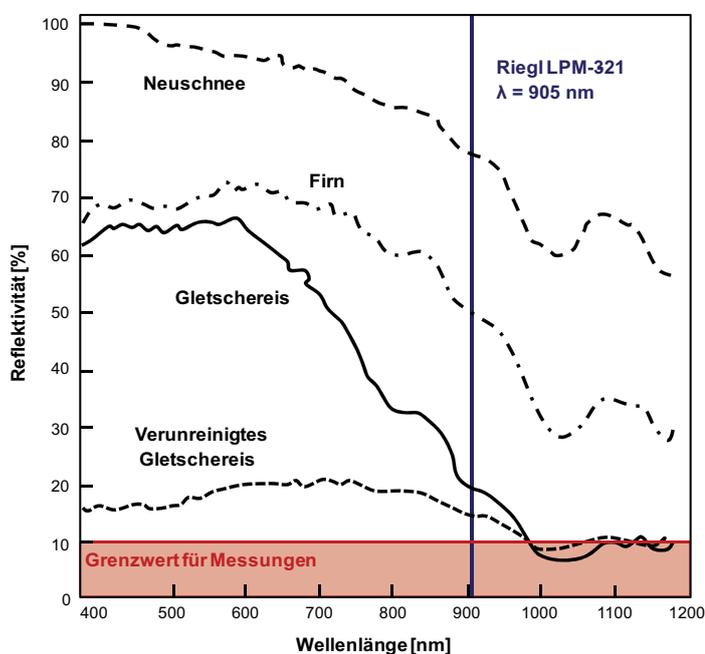


Abbildung 3.6: Reflexionsvermögen von Eis und Schnee für verschiedene Wellenlängen, adaptiert nach [Hall & Martinec, 1985].

3.3 Aufnahmemethoden

Im Folgenden werden die beiden angewandten Messverfahren zur terrestrischen photogrammetrischen Bestimmung von Bewegungsvektorfeldern von Gletschern beschrieben. Die den Messungen zugrundeliegenden Koordinatensysteme werden dabei im ersten Unterkapitel einleitend vorgestellt.

3.3.1 Koordinatensysteme

Für die Auswertung der Bildsequenzen bzw. multi-temporalen Laserscans sind fünf Koordinatensysteme von Bedeutung. Zu unterscheiden sind dabei das Bildkoordinatensystem als zweidimensionales Koordinatensystem, in dem Bildmesswerte vorliegen, das Kamerakoordinatensystem und das Laserscannerkoordinatensystem als Gerätekoordinatensysteme, ein lokales Koordinatensystem, auf welches sich tachymetrische Messungen beziehen, und ein übergeordnetes, globales Koordinatensystem, in welches die Ergebnisse letztendlich

transformiert werden. Alle dreidimensionalen Koordinatensysteme werden als Rechte-Hand-Systeme definiert, abgesehen vom Kamerakoordinatensystem, welches bei digitalen Kameras als Linke-Hand-System verwendet wird.

Bildkoordinatensystem

Das zweidimensionale kartesische Bildkoordinatensystem hat seinen Ursprung in der Bildmitte. Die x' -Achse zeigt in Richtung der Bildbreite zum rechten Bildrand und die y' -Achse in Richtung der Bildhöhe zum oberen Bildrand. Es ist zu unterscheiden vom Pixelkoordinatensystem, dessen Ursprung sich in der oberen linken Bildecke befindet und dessen u -Achse die Breite und dessen v -Achse die Höhe des Bildes aufspannen. Im Unterschied zur y' -Achse des Bildkoordinatensystem zeigt die positive v -Achse des Pixelkoordinatensystems zum unteren Bildrand.

Kamerakoordinatensystem

Das im Folgenden verwendete Kamerakoordinatensystem ist definiert durch eine parallel zur Bildebene befindliche x - y -Ebene, in der sich das Projektionszentrum der Kamera als Ursprung des Kamerakoordinatensystems befindet. Die z -Achse ist orthogonal zur Bildebene definiert. Die x - und die y -Achse definieren die Hauptrichtungen der Bildebene, wobei die x -Achse auf die Bildbreite und die y -Achse auf die Bildhöhe entfällt.

Laserscannerkoordinatensystem

Beim Laserscannerkoordinatensystem beschreibt die Stehachse des Laserscanners die z -Achse. Die orthogonal dazu definierte x - y -Ebene entspricht somit der Rotationsebene des Scanners, wobei der Ursprung des Koordinatensystems im elektronischen Zentrum des Gerätes liegt. Die Richtung der x -Achse wird über die mit dem Scannergehäuse fest verbundene Nullrichtung des Laserscanners definiert. Die y -Achse ergibt sich orthogonal dazu.

Lokales Koordinatensystem

Für die tachymetrische Messung von Passpunkten wird ein lokales, horizontiertes Koordinatensystem definiert. Die Messung erfolgt von zwei Standpunkten aus, welche die Basislinie bilden. Das zugrundeliegende Koordinatensystem ist dabei so festgelegt, dass sein Ursprung in einem Basislinienendpunkt liegt und die X -Achse entlang der Basislinie verläuft. Die Y -Achse ergibt sich rechtwinklig zur X -Achse, so dass sie mit dieser eine Horizontalebene aufspannt. Die Z -Achse zeigt lotrecht nach oben.

Globales Koordinatensystem

Für die Transformation der Messergebnisse, die zunächst im lokalen Koordinatensystem vorliegen, in ein globales Koordinatensystem werden die Koordinaten der Basislinienendpunkte mit GPS bestimmt. Dies ermöglicht die Transformation der trigonometrisch gemessenen Punkte in UTM-Koordinaten mit ellipsoidischen Höhen. Die globalen Koordinaten beziehen sich dabei auf eine UTM-Projektion mit angepasstem Bezugsmeridian. Da es sich bei der UTM-Projektion um eine winkeltreue Abbildung handelt und nur entlang des Meridians Längentreue gewährleistet ist, wird dieser in das jeweilige Arbeitsgebiet gelegt, um eine möglichst verzerrungsarme Abbildung zu erhalten.

3.3.2 Akquisition terrestrischer Bildsequenzen

Die Aufnahme der Bilddaten erfolgt von einem einzelnen Standpunkt aus. Mit einer Kamera, die im Folgenden als Sequenzkamera bezeichnet wird, werden dabei von einer festen Position aus in definierten zeitlichen Abständen Bilder vom Messobjekt aufgenommen. Eine zusammenhängende Zeitreihe von aufgenommenen Messbildern wird als Bildsequenz bezeichnet. Die Auswertung der so erhaltenen Bildsequenzen erfolgt nach dem Prinzip der monoskopischen Bildsequenzanalyse. In Kapitel 4.2.1 wird dieses Auswerteverfahren

näher erläutert und die Wahl desselben begründet. Aufgrund des Auswerteverfahrens ergeben sich für die Bilddatenakquisition zwei wesentliche Aufgaben: Dies ist zum einen die Aufnahme der Bildsequenzen, die zur eigentlichen Bewegungsmessung des Gletschers dienen, und zum anderen die Aufnahme eines GPS-gestützten photogrammetrischen Netzes, um die im Bildraum gemessenen Größen skalieren, in den Objektraum transformieren und georeferenzieren zu können.

3.3.2.1 Aufnahmekonfiguration

In Abbildung 3.7 ist die Aufnahmekonfiguration für die Messung eines Gletschers schematisch dargestellt. Die Geländebeschaffenheit, die Entfernung zum Messobjekt, die Lage der Gletscherfront sowie logistische Aspekte bedingen eine individuelle Konzeption des Aufnahmeschemas für jeden einzelnen Gletscher (vgl. Kapitel 3.4). Bestimmte Grundanforderungen sind jedoch in jedem Fall zu erfüllen. Für die Aufnahme eines Gletschers werden drei Arten von Instrumentenstandpunkten unterschieden:

- Standpunkt der Sequenzkamera S
- Standpunkte des photogrammetrischen Netzes O_i
- Standpunkte der Basislinie für Tachymeter- und GPS-Messungen T_1 – T_2

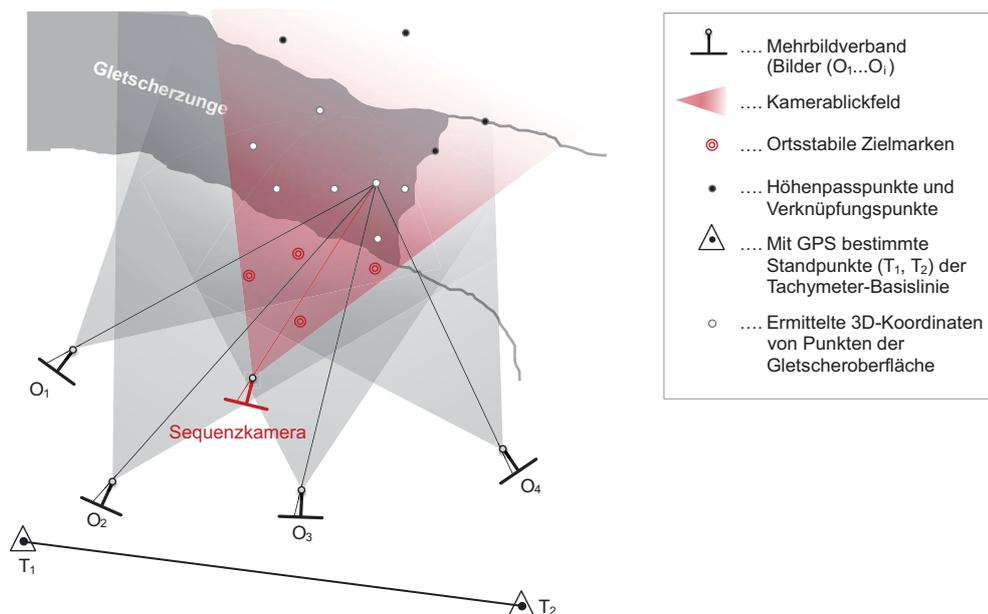


Abbildung 3.7: Aufnahmekonfiguration der Bildsequenzmessung.

Sequenzkamera

Die Einrichtung des Standpunktes einer Sequenzkamera umfasst zwei Aspekte, zum einen die Wahl der Kameraposition und zum anderen die Wahl des Kamerablickfeldes (vgl. Abbildung 3.8). Um vertikale und horizontale Bewegungskomponenten des Gletschers erfassen zu können, sowie zur Vermeidung sichttoter Räume muss für den Standpunkt einer Sequenzkamera eine erhöhte Position gefunden werden, die einen schrägen Blickwinkel auf die Gletscheroberfläche erlaubt. Stabile Aufstellungen der Kameras an den meist windexponierten Standpunkten wurden durch die direkte Montage eines Kugelkopfes auf anstehendem Fels oder durch die Verwendung von geodätischen Stativen ermöglicht, die unterstützend mit Steinen beschwert wurden. Für mehrtägige Aufnahmereihen ist ein Wetterschutz für die Kamera unerlässlich. Dies kann einerseits durch ein Kunststoffgehäuse realisiert werden, welches die Kamera wasserdicht einschließt, oder durch eine freistehende Überdachung, die nicht mit der Kamera verbunden ist. Ersteres hat den Vorteil, dass die Ka-

mera vor Nässe und feinem Staub geschützt ist, doch bietet diese Variante auch eine größere Angriffsfläche für den Wind und die Bilder werden zusätzlich durch Verzeichnungseffekte des Gehäusefensters beeinflusst.

Bezüglich des Kamerablickfeldes sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen. Die Entfernung zum Messobjekt und der interessierende Bereich, der im Messbild sichtbar sein soll, sind zunächst entscheidend für die Wahl der Kamera (Sensorgröße, Auflösung) und des Objektivs (Brennweite). Um später die Orientierungsparameter der Kamera bestimmen zu können (vgl. Kapitel 4.2.3), müssen Passpunkte im Bild erkennbar sein. Dies können markante Geländemerkmale wie Berggipfel am Gegenufer der Gletscherzunge oder Punkte auf der Uferlinie sein, die als Höhenpasspunkte verwendet werden können.

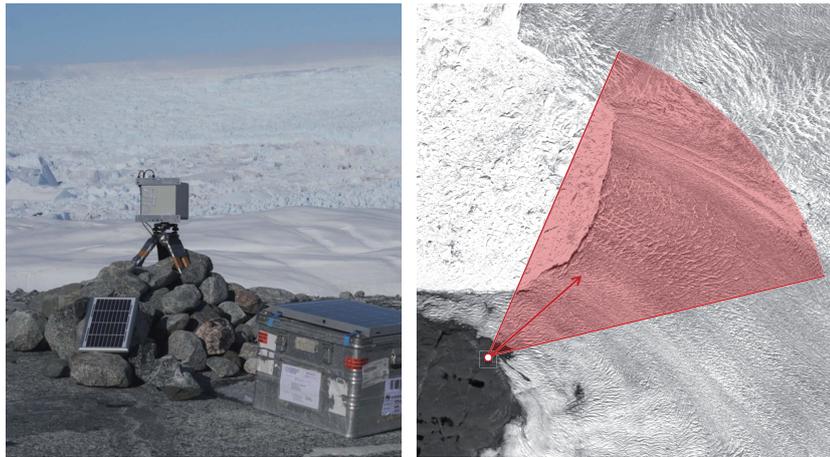


Abbildung 3.8: Kameraaufstellung. Die Abbildung zeigt beispielhaft die Aufstellung einer Time-Lapse-Kamera am Jakobshavn Isbræ (links) sowie deren Blickfeld über die Gletscherzunge (rechts).

Trotz der erwähnten Maßnahmen zur stabilen Positionierung einer Sequenzkamera kann eine Eigenbewegung der Kamera (verursacht durch Wind- und Aufwärmeeffekte) nie völlig ausgeschlossen werden. Somit ist es notwendig, dass im Bild ortsfeste Punkte erkennbar sind, mit deren Hilfe der Einfluss dieser Bewegungen auf die Messung korrigiert wird (vgl. Kapitel 4.2.6). Dies können natürliche Punkte im Vordergrund und/oder Hintergrund des Bildes sein oder signalisierte Punkte, die nur im Vordergrund angebracht werden, aber genauer und zuverlässiger zu messen sind als natürliche Punkte. Dies bedeutet, dass im Vordergrund des Messbildes ein gewisser Bereich unbewegtes, zugängliches Gelände abgebildet sein sollte. Besonders bei Langzeitsequenzen ist zu berücksichtigen, dass der Bildausschnitt die zu erwartende Positionsänderung der Gletscherfront innerhalb eines bestimmten Aufnahmezeitraumes mit abdeckt, so dass interessante Messbereiche das Blickfeld der Kamera nicht verlassen. Um diese Bedingungen erfüllen zu können, wird auf eine horizontierte Kameraaufstellung verzichtet. Dieser Umstand wird bei der Auswertung rechnerisch berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2.7). Abbildung 3.9 zeigt ein entsprechendes Messbild mit signalisierten statischen Punkten.

Die ortsfesten Zielmarken müssen folgenden Anforderungen genügen: Sie sollten wetterfest, stabil, aber aus logistischen Gründen auch leicht sein. Um für eine automatische Messung geeignet zu sein, sollten sie einen guten Kontrast besitzen, nicht reflektieren sowie ein Muster aufweisen, welches eine eindeutige Zuordnung ermöglicht. Circa 5–10 Marken sind jeweils über die Breite des Bildes verteilt anzubringen und gut zu fixieren. Es ist dabei auf eine möglichst orthogonale Ausrichtung der Zieltafeln zur Kamerablickrichtung zu achten.



Abbildung 3.9: Messbild. Die Abbildung zeigt eine Aufnahme der Sequenzkamera. Im Messbild müssen ortsfeste Zielmarken sowie Höhenpasspunkte sichtbar sein. In der rechten unteren Bildecke ist eine der Zielmarken vergrößert abgebildet.

Photogrammetrisches Netz

Ist der Standpunkt für die Sequenzkamera eingerichtet, werden die Kamerastandpunkte für das photogrammetrische Netz gewählt, wobei folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind: Alle Bilder sollten den Bereich des Gletschers abdecken, der im Sequenz-Messbild abgebildet ist; die Standpunkte sind so zu wählen, dass freie Sichten auf das Messobjekt gewährleistet sind; ein günstiges Basis-Tiefen-Verhältnis ist anzustreben. Demgegenüber stehen aber die Einschränkungen bei der Standpunktwahl, die durch das Gelände vorgegeben sind, sowie die Tatsache, dass die Bildinhalte der Aufnahmen vom Gletscher, welche unter konvergentem Schnittwinkel aufgenommen wurden, sehr unterschiedlich sind. Dies erschwert die Zuordnung von homologen Punkten (vgl. Kapitel 4.2.3.2). Grundsätzlich ist die Aufnahme eines Stereobildpaares als Minimallösung ausreichend. Aus Redundanzgründen und zur Stärkung der Netzgeometrie wurden für die einzelnen Gletscher jeweils Bildverbände von 3–8 Bildern aufgenommen.

Tachymeter-Basislinie

Können keine Passpunkte genutzt werden, deren Höhen aus anderen Quellen bekannt sind (z. B. Uferlinienpunkte, Berggipfel), ist schließlich ist noch die Basislinie zu definieren, von deren Endpunkten aus die tachymetrische Aufnahme der Passpunkte erfolgt. Es bietet sich an, jeden Tachymeterstandpunkt auch als Kamerastandpunkt für eine Aufnahme des photogrammetrischen Netzes zu nutzen. Um den Messaufwand gering zu halten und weitere Standpunkte zu vermeiden, ist es günstig, wenn die Basislinienendpunkte so gewählt werden, dass von ihnen aus freie Sicht auf alle Kamerastandpunkte sowie auf die ortsfesten Zielmarken besteht, um deren Positionen tachymetrisch bestimmen zu können.

3.3.2.2 Ablauf der Messung

Der praktische Messablauf für die Bildsequenzmessung gliedert sich in die folgenden vier Teilaufgaben, welche anschließend näher erläutert werden sollen:

- Start der Bildsequenzmessung
- Aufnahme des Bildverbandes
- ggf. Tachymetermessungen
- GPS-Messungen

Bildsequenzaufnahme

Für den Start der Bildsequenzmessung sind die Aspekte der Stromversorgung der Kamera, der Belichtungseinstellung und der Wahl des Messintervalls von Bedeutung. Je nach Dauer der angestrebten Messung und verwendetem Kameratyp (vgl. Kapitel 3.2.1.2) muss die Stromversorgung der Kamera extern unterstützt werden. Dazu wurden Gelbatterien verwendet, die in Kombination mit Solarmodulen eine langzeitliche Stromversorgung gewährleisten.

Die untersuchten Gletscher befinden sich alle nördlich von 69° nördlicher Breite und die meisten Messungen fanden während der Sommermonate statt, in denen aufgrund des Polartages auch nachts noch genügend Licht für Aufnahmen vorhanden war. Für eine manuelle Vorgabe von Blende und Belichtungszeit sind die Lichtverhältnisse während eines gesamten Messtages dennoch zu unterschiedlich. Deshalb wurde für die Belichtungseinstellungen der Kamera der Blendenprioritätsmodus gewählt. Da die Kamera fest installiert ist und keine Bewegungsunschärfen bei langen Belichtungszeiten zu erwarten sind, kann eine kleinere Blendenöffnung eingestellt werden. Dadurch wird eine größere Schärfentiefe und somit eine scharfe Abbildung der Zielmarken im Vordergrund gewährleistet.

Der zeitliche Abstand zwischen den Bildern einer Sequenz ist abhängig von der Geschwindigkeit des Gletschers, der verfügbaren Kapazität des Datenspeichers, der Bildgröße und der angestrebten Gesamtdauer der Messung. Bei Messungen, mit denen hochdynamische Prozesse des Gletschers untersucht werden sollen (Gezeiteneinflüsse, Kalbungsverhalten), sollte die Gesamtmeszdauer mindestens 24 h betragen und das Aufnahmeintervall nicht länger als 30 min gewählt werden. Bei längeren Zeitabständen können die Bildinhalte zweier aufeinanderfolgender Aufnahmen durch wechselnde Lichtverhältnisse und veränderten Schattenwurf schon so dekorreliert sein, dass die Bildmessung sehr erschwert wird (vgl. Abbildung 3.10 oben). Anders verhält es sich bei Messungen, für die eine Aufnahme pro Tag ausreichend ist (Bestimmung von Tagesgeschwindigkeiten, saisonale Geschwindigkeitsvariationen). Werden die Bilder hierfür mit einem Intervall von 24 Stunden aufgenommen, so existiert aufgrund des vergleichbaren Sonnenstandes und Schattenwurfes eine ähnliche Beleuchtungssituation für die einzelnen Aufnahmen (vgl. Abbildung 3.10 unten).

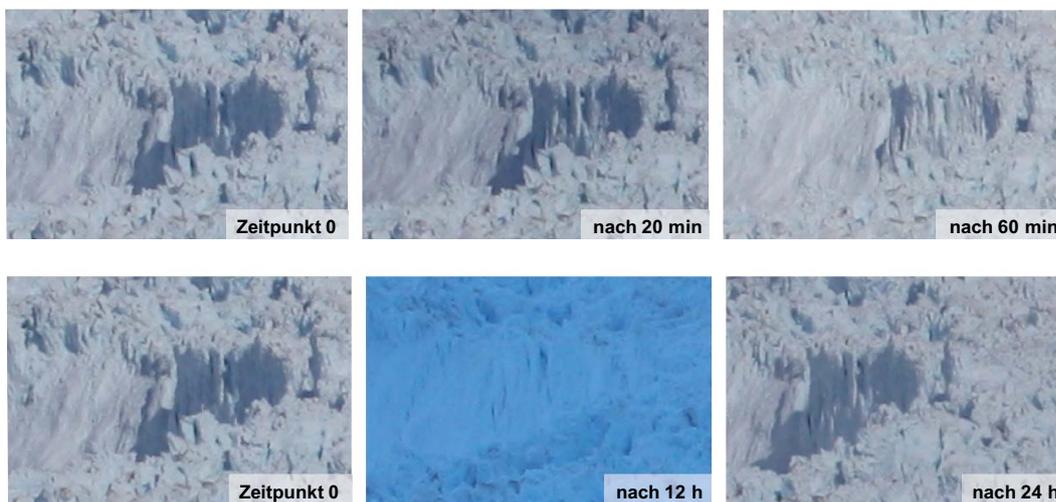


Abbildung 3.10: Schattenwurf zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Aufnahme einer Bildsequenz. Die Abbildung zeigt, wie sich der Bildinhalt eines festen Fensters innerhalb einer Stunde (obere Reihe) sowie innerhalb eines Tages (untere Reihe) verändert.

Aufnahme des Bildverbandes

Die Aufnahme des Bildverbandes für das photogrammetrische Netz dient einerseits zur Bestimmung der äußeren Orientierung der Sequenzkamera und andererseits zur Messung eines groben DGM für die Gletscheroberfläche. Um die Sequenzkamera orientieren zu können, muss ein Bild der Sequenz mit in den Bildverband eingebunden werden. Für die Generierung des DGM ist zudem wichtig, dass in allen Bildern homo-

loge Punkte auf der Gletscheroberfläche gemessen werden können. Optimalerweise wird der Bildverband also zeitnah mit dem Start- oder Endbild der Bildsequenz aufgenommen. Dies hat zum einen den Grund, dass es durch die Dynamik des Gletschers zu Ungenauigkeiten bei der Auswertung kommt, wenn die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Bildern des Bildverbandes zu groß sind. (vgl. Kapitel 4.2.3). Zum anderen erschweren die sich ändernden Schattenwürfe eine Punktzuordnung in den Bildern.

Tachymetermessungen

Die Messung von Passpunkten kann optional mittels Tachymeter erfolgen. Alternative Methoden zur Bestimmung von Passpunktinformationen werden in Kapitel 3.3.2.3 vorgestellt. Die tachymetrischen Messungen werden von den Endpunkten der Basislinie aus ausgeführt (vgl. Abbildung 3.7 links). Sie dienen der Bestimmung der 3D-Koordinaten folgender Objekte in einem lokalen Koordinatensystem (vgl. Kapitel 3.3.1):

- unbewegte Geländepunkte, die bei der Auswertung des Bildverbandes als Passpunkte verwendet werden sollen
- Positionen der Kameras des Bildverbandes und der Sequenzkamera
- ortsfeste Zielmarken

Zu entfernten, unzugänglichen Punkten werden von beiden Standpunkten der Basislinie aus jeweils die Vertikal- und Horizontalwinkel gemessen und ihre 3D-Koordinaten mit Kenntnis der Basislinienlänge per Vorwärtsschnitt berechnet.

Weiterhin werden auch Punkte auf der Gletscheroberfläche gemessen. Diese finden Verwendung als Passpunkte oder dienen zur Bestimmung von Bewegungsvektoren und Referenzgeschwindigkeiten, mit denen die Resultate der photogrammetrischen Auswertung verglichen werden können. Für die sich während der Dauer der Messung bewegenden Gletscherpunkte muss das Verfahren des Vorwärtsschnittes um die Komponente der Zeit erweitert werden. Dazu erfolgen nun die Winkelmessungen vom ersten und zweiten Standpunkt der Basislinie und im Anschluss daran noch einmal vom ersten Standpunkt aus, wobei für die einzelnen Winkelmessungen jedes Punktes jeweils auch die Zeit registriert wird. Diese Vorgehensweise erlaubt es, die Winkel, welche auf dem ersten Basislinienendpunkt gemessen wurden, auf den Zeitpunkt der Winkelmessung vom zweiten Basislinienendpunkt zu interpolieren [Dietrich u. a., 2007]. Somit werden 3D-Koordinaten für Gletscherpunkte bestimmt, die sich auf einen diskreten Zeitpunkt beziehen. Durch Wiederholungsmessungen der Punkte (günstigerweise nach ca. 24 h) können Bewegungsvektoren ermittelt und Fließgeschwindigkeiten abgeleitet werden. Aus praktischer Sicht ist bezüglich der Gletscherpunktmessung anzumerken, dass die Wiedererkennung eines Punktes von den zwei Standpunkten der Basislinie aus und dessen Zuordnung im Messbild aufgrund des unterschiedlichen Blickwinkels und der diffusen Struktur der Gletscheroberfläche nicht trivial ist. Je größer die Basislinie gewählt wird, umso aufwendiger und zeitintensiver gestaltet sich die Messung.



Abbildung 3.11: Tachymeteraufstellung (links) und GPS-Messung (rechts) auf einem Basislinienendpunkt.

GPS-Messungen

Der letzte Schritt des Messablaufes umfasst die Positionsbestimmung der Basislinienendpunkte in einem übergeordneten Koordinatensystem (vgl. Kapitel 3.3.1) mittels differenzieller GPS-Messungen (vgl. Abbildung 3.11 rechts). Alle lokal gemessenen Größen lassen sich damit in das übergeordnete System transformieren. Durch die ca. zweistündige Beobachtung jedes Punktes kann dessen Position zentimetergenau bestimmt werden.

3.3.2.3 Möglichkeiten zur Reduzierung der Messausrüstung

Das oben beschriebene Messkonzept gewährleistet, dass alle für eine erfolgreiche Auswertung der Daten notwendigen Messwerte zur Verfügung stehen. Da Messwerte nur im zeitlichen Rahmen der Expedition erhoben und fehlende Messungen meist erst während der Datenauswertung im Nachhinein erkannt werden können, ist es ratsam, redundante Messungen durchzuführen und ein nicht allzu minimalistisches Instrumentarium zu nutzen. Demgegenüber steht das Bestreben, den logistischen Aufwand und die Expeditionsdauer möglichst gering zu halten, um die Kosten für die Messungen zu minimieren. Gegenüber der Bildsequenzmessung, für die nur eine Kamera verwendet wird, ist die Aufnahme des photogrammetrisch-tachymetrischen Netzes mit einem höheren Mess- und Geräteaufwand verbunden. Maßgeblich für den Erfolg der Messung eines Gletschers ist die Auswertbarkeit dieses Netzes mittels Bündelblockausgleichung. Der Erfolg der Bündelblockausgleichung wiederum hängt von der Verfügbarkeit guter Näherungswerte und einem Minimum an Passpunktinformationen ab (Kapitel 4.2.3.3).

Unter diesen Gesichtspunkten sollen deshalb nun drei Möglichkeiten zur Reduzierung der Messausrüstung und die damit einhergehenden Vor- und Nachteile vorgestellt werden. Gewichts- und Platzeinsparungen werden ermöglicht, indem auf bestimmte Messgeräte verzichtet wird und somit auch die Menge an Stativen, Gelbatterien und Kraftstoff reduziert werden kann.

Im einfachsten Fall erfolgt eine Beschränkung auf Messergebnisse, die nur in einem lokalen Koordinatensystem vorliegen, welches durch die Basislinienendpunkte definiert ist (Kapitel 3.3.1). Auf diese Weise kann auf GPS-Messungen verzichtet werden. Geodätischer GPS-Empfänger, GPS-Antenne und Gelakkus werden eingespart. Passpunkte und Kamerastandpunkte werden ausschließlich tachymetrisch bestimmt. Nachteilig ist, dass die Messergebnisse in diesem Fall nicht mit anderen Datenquellen (z. B. Satellitenbildern, Bathymetrie-daten) zusammengeführt werden können und auch der Vergleich zwischen Wiederholungsmessungen an einem Gletscher eingeschränkt ist. Alternativ kann hier aber die Messung der Kamerastandpunkte mit einem einfachen Handheld-GPS durchgeführt werden, wenn für die gewünschten Vergleiche eine absolute Positionierungsgenauigkeit im 10er-Meterbereich ausreichend ist.

Bei einer zweiten Variante wird auf die tachymetrische Ausrüstung verzichtet, wodurch insbesondere auch Stative eingespart werden können. Der Maßstab für das photogrammetrische Netz ergibt sich dann aus zwei mit GPS eingemessenen Kamerastandpunkten, die eine ausreichend große Basis bilden sollten. Die Koordinaten der Kamerastandpunkte sind zugleich zwei Vollpasspunkte, auf die das Netz gelagert wird. Als ein für die Lagerung zusätzlich notwendiger Höhenpasspunkt kann dann entweder ein Uferlinienpunkt des Fjordes genutzt werden (Meeresspiegelhöhe) oder ein markanter Berggipfel, dessen Höhe sich z. B. aus Kartenmaterial ableiten lässt. Bei dieser Methode liegt der Nachteil darin, dass die Bereitstellung guter Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung schwierig ist. Da in den Bildern keine Punkte enthalten sind, für die entsprechende Objektpunktkoordinaten gemessen wurden, ist eine automatische, näherungsweise Vororientierung einzelner Kameras – z. B. mittels DLT (direkter linearer Transformation) – nicht möglich. Die Näherungswertbeschaffung muss dann interaktiv erfolgen und ist mit hohem Arbeitsaufwand verbunden.

Bei der dritten Variante wird nun zusätzlich zur tachymetrischen Ausrüstung auch auf die geodätische GPS-Ausrüstung verzichtet. Stattdessen wird zur Positionbestimmung der Kameras ein einfacher Handheld-GPS-Empfänger oder ein Geotagger genutzt. Die Nachteile dieser Methode entsprechen denen der zweiten Variante. Hinzu kommt, dass sich aus der Positionierungsgenauigkeit des Handheld-GPS von ca. 5–15 m, bezogen auf den maximalen Abstand zweier Kamerastandpunkte (ca. 150–300 m), eine Maßstabsungenauigkeit ergibt, die nicht akzeptabel ist. Dies kann kompensiert werden, indem eine Kamerabasis zusätzlich mit einem Handheld-Laser-Entfernungsmesser bestimmt wird. Hochwertigere Laser-Entfernungsmesser besitzen

Reichweiten von bis zu 250 m und weisen laut Herstellerangaben eine Streckenmessgenauigkeit von ca. 1–2 mm auf. Der so – mit wesentlich höherer Genauigkeit – bestimmte Maßstab kann dann mittels Bedingungs-gleichung mit in die Bündelblockausgleichung eingeführt werden. Dem Vorteil der extrem kompakten und leichten Messausrüstung (ca. 500 g) steht der Nachteil des höheren Auswerteaufwandes gegenüber und die Gefahr, dass die geografischen Gegebenheiten am Messobjekt nicht genügend Zuordnungsmöglichkeiten bieten, um einen Bildverband erfolgreich auswerten zu können.

3.3.3 Akquisition multi-temporaler Laserscannerdaten

Die Aufnahme multi-temporaler Laserscannerdaten unterscheidet sich von der Aufnahme der Bildsequenzen im Wesentlichen dadurch, dass es sich beim Laserscanning um ein sequenzielles Aufnahmeverfahren handelt. Das bedeutet, dass – abhängig von der Messfrequenz, der gewählten Scanauflösung und dem horizontalen und vertikalen Scanbereich – ein Scan eine gewisse Aufnahmedauer beansprucht, wodurch die zeitliche Auflösung der Mehrfachscans beschränkt wird. Ein weiterer wichtiger Unterschied ist die Tatsache, dass aus den Winkel- und Streckenmessungen des Scanners direkt 3D-Koordinaten abgeleitet werden. Es müssen also keine weiteren Messverfahren eingesetzt oder zusätzliche Datenquellen genutzt werden, wie es bei der bildbasierten Messung notwendig ist, um einen Bezug zum Objektraum herzustellen.

Üblicherweise werden terrestrische Laserscanner für Anwendungen eingesetzt, bei denen statische Objekte aufgenommen werden. Um ein Objekt von allen Seiten erfassen zu können, werden Scans von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen. Sie liegen dann in lokalen, standpunktbezogenen Koordinatensystemen vor. Ein wichtiger Weiterverarbeitungsschritt der Daten ist somit die Registrierung, d. h. die Überführung der einzelnen Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem. Dazu müssen identische Punkte in den einzelnen Scans gefunden werden, auf deren Basis die Bestimmung der entsprechenden Transformationsparameter erfolgt. Faktisch wird also eine Positions- und Orientierungsänderung des Scanners mit Hilfe von unbewegten Objektpunkten bestimmt.

Bei der Nutzung von Laserscannersequenzen für die 3D-Bewegungsanalyse liegen andere Sachverhalte vor. Hier sollen Bewegung und Geschwindigkeit eines dynamischen Objektes mit Hilfe mehrerer Scans ermittelt werden, die von einer unveränderlichen Scannerposition aus aufgenommen wurden. Identische Punkte, die in den einzelnen Punktwolken einander zugeordnet werden können, geben nun Aufschluss über Betrag und Richtung der Bewegung des entsprechenden Objektpunktes.

3.3.3.1 Aufnahmeconfiguration

In Abbildung 3.12 ist die Aufnahmeconfiguration für die Akquisition der multi-temporalen Laserscans dargestellt. Um schleifende Schnitte zu vermeiden, wird für die Standpunktwahl ein höher gelegener Punkt bevorzugt, von dem aus eine verdeckungsfreie Sicht auf den interessierenden Gletscherbereich gewährleistet ist. Bei zu niedriger Standpunktwahl können durch Toteisgebiete im Vordergrund oder die Oberflächentopografie des Gletscher größere Abschattungsbereiche auftreten. Gleichzeitig soll aber die begrenzte Reichweite des Scanners möglichst effektiv ausgenutzt werden, d. h. es ist wünschenswert, dass sich die Scannerposition nah am Messobjekt befindet. Aus diesen beiden Anforderungen ist, abhängig von der Geländesituation am Gletscher, ein Kompromiss zu finden.

Die 3D-Koordinaten der gescannten Punkte beziehen sich auf das lokale Koordinatensystem des Laserscanners (vgl. Kapitel 3.3.1). Ist kein absoluter Bezug der Messgrößen notwendig, kann auf die zusätzliche Messung von Passpunkten verzichtet werden. Da die meisten Laserscanner aber nicht exakt horizontalisiert werden können, ist es (im Hinblick auf die Berechnung von Neigungen und Vertikalbewegungen) sinnvoll, die Daten in ein übergeordnetes, horizontalisiertes Koordinatensystem zu transformieren. Zu diesem Zweck werden retroreflektierende Passpunkte um den Standpunkt des Scanners herum verteilt und mit hoher Auflösung gescannt, so dass ihre Koordinaten im scannerbezogenen Koordinatensystem vorliegen. Bei den Retromarken sollte auf eine gute räumliche Verteilung rund um den Scanner und in verschiedenen Entfernungen zum Scanner geachtet werden. In [Kenner, 2010] finden sich ausführliche Betrachtungen zu diesem Thema. Die entsprechenden Koordinaten der Passpunkte im übergeordneten System (vgl. Kapitel 3.3.1) werden tachyme-

trisch und mittels GPS-Messungen ermittelt. Zu diesem Zweck ist, wie auch unter Kapitel 3.3.2.1 beschrieben, eine Basislinie einzurichten.

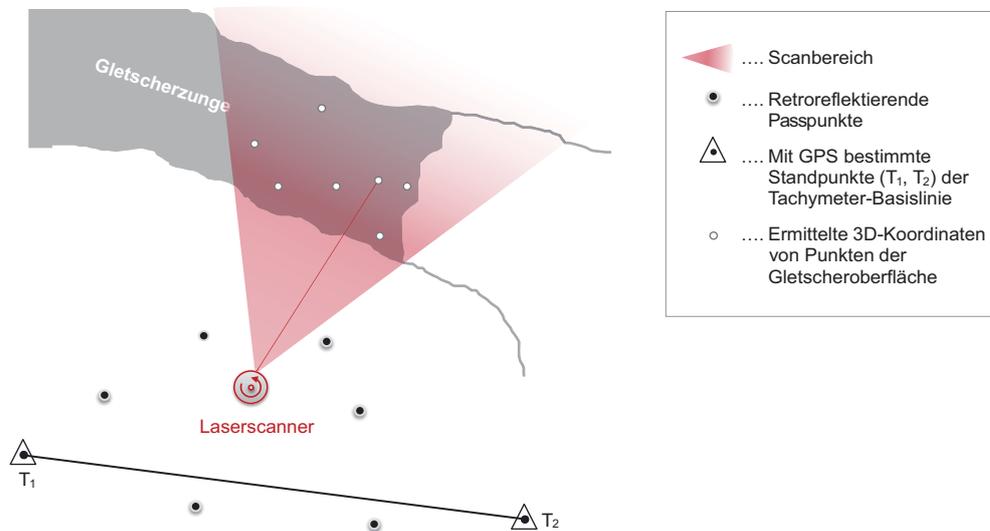


Abbildung 3.12: Aufnahmeconfiguration der Laserscannermessung.

3.3.3.2 Ablauf der Messung

Neben der Herstellung eines absoluten Bezugs für die Messwerte bieten die ortsfesten Retromarken auch die Möglichkeit der Kontrolle, ob sich die Orientierung des Scanners während einer Messung verändert hat. Es ist also sinnvoll, vor und nach jedem Scan des Gletschers einen hochaufgelösten Scan (Feinscan) der Retromarken durchzuführen.

Für die eigentlichen Sequenzscans ist zunächst die Auflösung und der Scanbereich zu wählen. Mit kleinen Scanbereichen und einer geringen Messauflösung lässt sich eine höhere zeitliche Auflösung der Scanssequenz realisieren. Aufgrund der Dimension des Messobjektes wird jedoch in großen Entfernungsbereichen gescannt, weshalb eine hohe Scanauflösung erwünscht ist. Der Scanbereich sollte einen möglichst großen Teil der Gletscherzunge abdecken. Dabei werden die obere Grenze des vertikalen und die beiden Grenzen des horizontalen Scanbereichs durch die Reichweite des Scanners limitiert. Die untere Grenze des vertikalen Scanbereichs sollte so gewählt werden, dass unbewegtes Gelände mitgescannt wird, um damit später gegebenenfalls Änderungen der Scannerorientierung zwischen zwei Sequenzscans detektieren und korrigieren zu können (Kapitel 6.2.1). Dies führt allerdings – bei Verwendung des Riegl LPM-321 – zu einer deutlichen Vergrößerung des vertikalen Scanbereichs und damit auch zu einer entsprechend längeren Scandauer.

Die tachymetrische Messung der Retromarken kann zeitlich unabhängig von der Akquisition der Scanssequenz durchgeführt werden und lässt sich mit den Messungen für die Bildsequenzaufnahme kombinieren, wenn beide Verfahren an einem Gletscher zum Einsatz kommen.

3.4 Messkampagnen

Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über die der Arbeit zugrundeliegenden Messkampagnen gegeben werden. Die individuellen Messungen für die in Kapitel 3.1 vorgestellten Gletscher werden dargestellt.

3.4.1 Übersicht

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Daten einer initialen Messkampagne am Jakobshavn Isbræ im August 2004 ausgewertet sowie drei weitere Messkampagnen im Juli/August 2007, im Mai 2010 und im August 2010 durchgeführt und ausgewertet. Während jeder dieser Expeditionen wurden Messungen am Jakobshavn Isbræ vorgenommen. Messungen zur Untersuchung der Gletscher Eqip Sermia und Støre Qarajaq wurden 2007 durchgeführt. Im Jahr 2010 wurde das Messprogramm schließlich noch auf zwei weitere schnellfließende Gletscher der Diskobucht, den Sermeq Avannarleq und den Sermeq Kujalleq, ausgedehnt, an denen in den letzten Jahren eine Geschwindigkeitsabnahme beobachtet werden konnten [Joughin u. a., 2008a]. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die vier Expeditionen mit den jeweils beobachteten Gletschern und den zum Einsatz gekommenen Messinstrumenten.

Aufgrund der Lage aller untersuchten Gletscher auf mehr als 69° nördlicher Breite stand von Mai bis August auch nachts noch genügend Licht zur Verfügung, so dass bei guten Wetterbedingungen und entsprechender Stromversorgung die Aufnahme von durchgängig auswertbaren Bildsequenzen mit einer Länge von mehreren Tagen oder Wochen möglich war. Sämtliche zum Einsatz gekommenen Kameras konnten mittels Intervallometer auf vordefinierte Zeitintervalle eingestellt werden. Diese variierten bei den einzelnen Messungen zwischen 15 min und 30 min, abhängig von Messdauer und Speicherkapazität.

Tabelle 3: Übersicht der Messkampagnen und der verwendeten Ausrüstung.

Jahr	Gletscher	Messgeräte
2004 (Aug.)	Jakobshavn Isbræ (1)	• Kodak DCS 14n Pro
2007 (Juli/Aug.)	Jakobshavn Isbræ (2)	• Kodak DCS 14n Pro • IGI DigiCAM • Riegl LPM-321
	Støre Qarajaq	• Kodak DCS 14n Pro • IGI DigiCAM
	Eqip Sermia	• Kodak DCS 14n Pro • IGI DigiCAM
2010 (Mai)	Jakobshavn Isbræ (3)	• Canon EOS1000D
2010 (Aug.)	Jakobshavn Isbræ (4)	• Canon EOS1000D • Nikon D700
	Sermeq Avannarleq	• Nikon D300
	Sermeq Kujalleq	• Nikon D700

3.4.2 Messungen am Jakobshavn Isbræ

Neben den speziellen Eigenschaften des Jakobshavn Isbræ, die ihn zu einem interessanten Untersuchungsobjekt vor dem Hintergrund des klimatischen Wandels machen (vgl. Kapitel 3.1), ist er auch aus logistischer Sicht für terrestrische Messungen besonders geeignet, da er von Ilulissat aus per Helikopter gut zu erreichen ist.

Am Jakobshavn Isbræ fanden vier Messkampagnen in den Jahren von 2004–2010 statt, in denen mit unterschiedlichen Kameras und unterschiedlichen Zielstellungen Bildsequenzen aufgenommen wurden. Die Beobachtungen konzentrierten sich jeweils auf den frontnahen Bereich des schnelleren südlichen Eisstromes und wurden von einer ca. 300 m hohen Erhebung am südlichen Ufer des Kangiafjordes aus durchgeführt. Die Kamerapositionen und -blickrichtungen variierten in den einzelnen Jahren entsprechend Abbildung 3.13, um sich der veränderten Frontlage und Aufnahmesituation anzupassen. So befand sich der Kamerastandpunkt von 2010 ca. 500 m östlich des Standpunktes von 2007. Die Distanz der Kamerapositionen zum südlichen Ufer des Gletschers betrug jeweils ca. 1,5 km.

Im Jahr 2004 wurde eine erste Bildsequenzmessung mit der Kodak DCS 14n Pro (Objektiv: 50 mm, Öffnungswinkel: 40°) durchgeführt mit dem Ziel, Geschwindigkeitsfelder abzuleiten und gezeiteninduzierte Bewegungen des Gletschers zu detektieren sowie die Eignung der terrestrischen Bildsequenzanalyse für diese Zwecke zu untersuchen. Die Stromversorgung der Kamera erfolgte extern mittels 24-Ah-Gelbatterien, mit denen eine Messdauer von ca. 48 h gewährleistet werden konnte. Die Bildsequenzen konnten aufgrund der Wetterbedingungen und mangels regengeschützter Aufstellmöglichkeiten in Zeiträumen von 12–36 Stunden aufgenommen werden. Für die Auswertung wurde eine zusammenhängende Sequenz von 24 h Länge ausgewählt. Das Aufnahmezeitintervall betrug 30 min. Detailliertere Informationen zur Messkampagne 2004 finden sich in [Maas u. a., 2006].

Die erste Wiederholungsmessung am Jakobshavn Isbræ wurde im Jahr 2007 mit der IGI DigiCAM (Objektiv: 80 mm, Öffnungswinkel: 34°) durchgeführt, welche aufgrund ihrer hohen Auflösung speziell für den Nachweis gezeitenbedingter Vertikalbewegungen der Gletscherzunge sowie zur Bestimmung der Aufsetzlinie

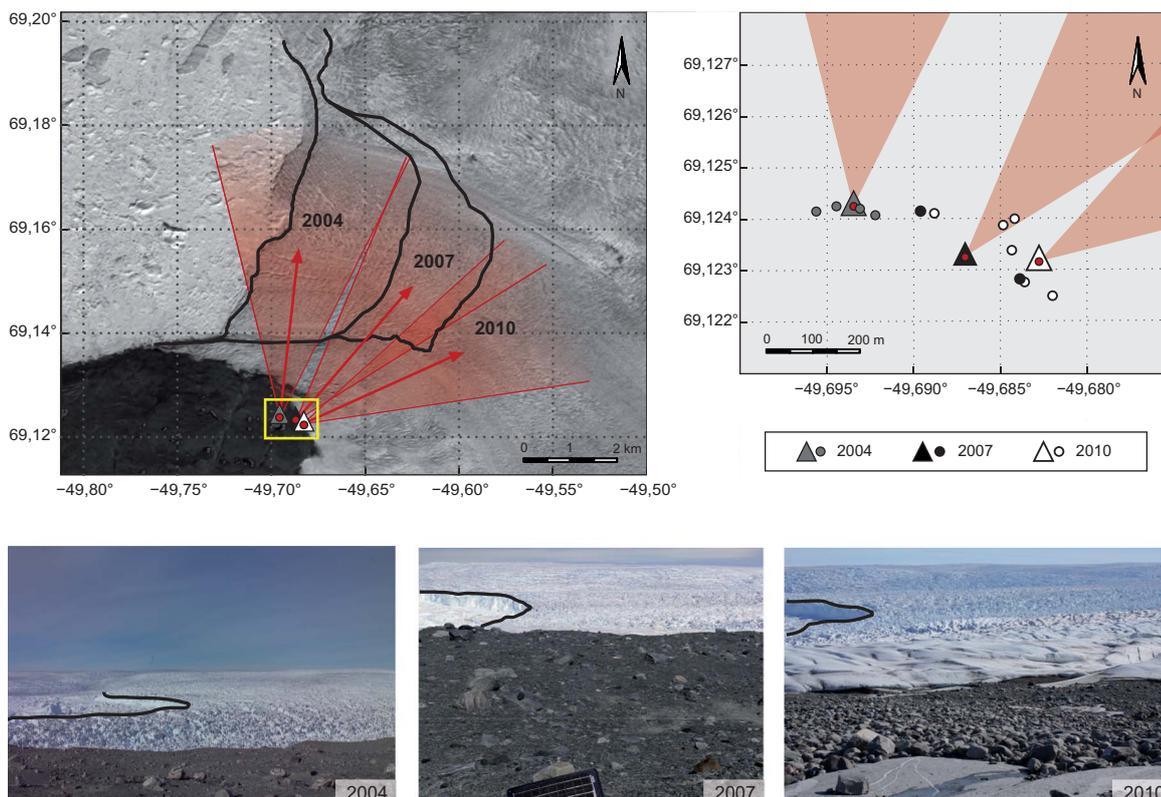


Abbildung 3.13: Aufnahmesituation am Jakobshavn Isbræ für die Messungen in den Jahren 2004, 2007 und 2010. Die Abbildung zeigt die Position der Sequenzkamera (Dreieck mit rotem Punkt), ihre Blickrichtung (roter Pfeil) und ihr Gesichtsfeld über den frontnahen Gletscherbereich zu den jeweiligen Messkampagnen, einer bearbeiteten Landsataufnahme von 2004 überlagert (oben links). Die aktuelle Position der Gletscherfront ist für jeden Messzeitpunkt als schwarze Linie dargestellt. Der gelb markierte Ausschnitt ist noch einmal vergrößert abgebildet (oben rechts) und zeigt die Verteilung der Kamerastandorte (Kreise) des jeweiligen photogrammetrischen Netzes für die drei Messepochen. Die Abbildung zeigt außerdem für jede Messepoche ein Bild der jeweiligen Sequenzkamera (unten). Auch in diesen Messbildern ist die Oberkante der Gletscherfront als schwarze Linie markiert. (Quelle Landsatszene: <http://landsat.usgs.gov/>)

eingesetzt wurde. Die Kameraaufstellung erfolgte stabiler als 2004, indem mittels eines an die Kamera angebrachten Steckzapfens eine Aufstellung mit Dreifuß und geodätischem Stativ möglich war. Darüber hinaus wurde ein nicht mit der Kamera verbundener Wetterschutz errichtet, um vom Wind induzierte Bewegungen der Kamera gering zu halten. Auch für die IGI DigiCAM war eine externe Stromversorgung notwendig, die mittels Gelbatterien und eines Solarmoduls realisiert wurde. Das Aufnahmezeitintervall betrug 15 min, und es konnten mehrere Sequenzen mit einer Länge von 24 h aufgenommen werden.

Um saisonale Veränderungen im Bewegungsverhalten des frontnahen Bereichs des Jakobshavn Isbræ zu untersuchen, wurden im Mai 2010 zwei wetterfeste Time-Lapse-Kameras (Harbortronics mit Canon EOS1000D, Objektiv: 35 mm, Öffnungswinkel: 35°) mit integrierter Gelbatterie und Solarmodul installiert, die bis zum August 2010 eine Langzeitsequenz mit einem Zeitintervall von 20 min aufnehmen sollten. Aufgrund überdurchschnittlich hoher Temperaturen im Winter 2009/2010 hatte sich die Gletscherfront allerdings schon im Mai sehr weit zurückgezogen, so dass die Zielstellung der Messung geändert werden musste und der Fokus bei der Auswertung der Langzeitsequenzen nun auf die Untersuchung des Fließverhaltens der Gletscherzunge während großer Kalbungsereignisse gelegt wurde. Ergänzt wurden die Messungen im August noch durch Bildsequenzaufnahmen mit einer Nikon D700, anhand derer die aktuelle Aufsetzlinie im Sommer 2010 bestimmt werden sollte.

Für die Georeferenzierung wurde für jedes Messkampagnenjahr ein photogrammetrisches Netz entsprechend Abbildung 3.13 (oben rechts) gemessen und unter Verwendung tachymetrisch bestimmter Passpunkte ausgewertet. Die Nutzung von Höhenpasspunkten auf der Uferline ist am Jakobshavn Isbræ aufgrund des dicht mit Eisbergen gefüllten Fjordes nicht möglich. Im Blickfeld der Kamera befinden sich zudem auch keine Berggipfel, denen eine Höhe zugeordnet werden könnte. Als Höhenpasspunkte zur Lagerung des Netzes konnten deshalb nur weit entfernte, markante Strukturen auf dem Inlandeis genutzt werden. Diese wurden von den mit GPS bestimmten Endpunkten einer Basislinie aus mittels Tachymeter per Vorwärtseinschnitt gemessen.

Die Aufnahme multi-temporaler Laserscannerpunktvolken als Ergänzung zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern mittels Bilddaten erfolgte im Jahr 2007 mit dem Riegl LPM-321 (vgl. Kapitel 3.2.2.3), welcher mit einer maximalen Reichweite von 6 km der einzige Laserscanner war, der sich für die Vermessung ei-

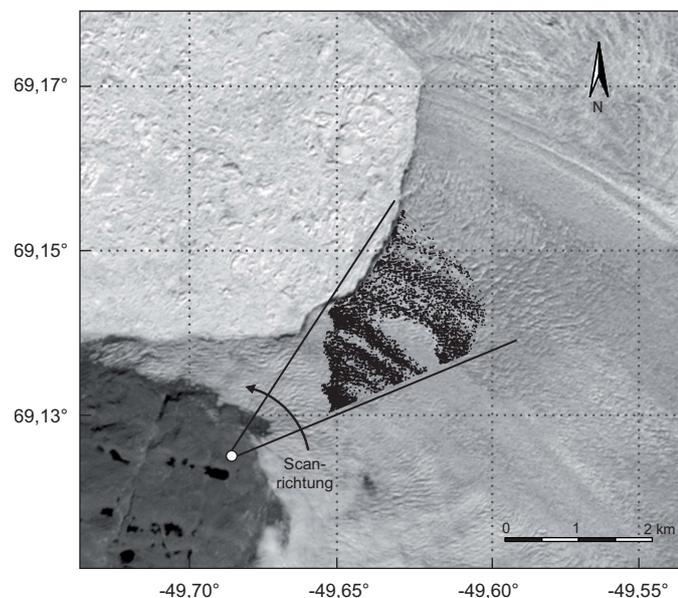


Abbildung 3.14: Laserscan des frontnahen Bereichs am Jakobshavn Isbræ (2007). Die Abbildung stellt die gescannte Punktwolke als Überlagerung einer Landsat-Satellitenkarte (bearbeitet) dar. Der Standort des Laserscanners ist als weißer Punkt markiert. (Quelle Landsat-Satellitenkarte: <http://landsat.usgs.gov/>)

nes ausgedehnten arktischen Gletschers eignete. Der Riegl LPM-321 war zum Zeitpunkt der Messung noch ein Prototyp und wurde aus logistischen Gründen nur am Jakobshavn Isbræ eingesetzt. Es sollten dabei vorrangig Erkenntnisse über das Potenzial der Messmethode für die Geschwindigkeitsbestimmung eines arktischen Gletschers gewonnen werden.

Die Aufnahmeposition des Laserscanners und der aufgenommene Bereich des Gletschers sind in Abbildung 3.14 dargestellt. Zum Schutz vor starken Windeinflüssen wurde der Scanner im Windschatten eines Felsens positioniert. Dieser Standpunkt erlaubte ein horizontales Sichtfeld von ca. 30° . Die maximale Reichweite, bis zu der auf Eis gemessen werden konnte, betrug 4 km. Mit einer Strahldivergenz von $0,8$ mrad ergibt sich ein Punktdurchmesser von $3,2$ m in dieser Entfernung. Der gesamte sichtbare frontnahe Gletscherbereich innerhalb des maximalen Aufnahmeradius wurde in zwei Epochen mit einer Auflösung von $0,027^\circ$ gescannt. Der vertikale Öffnungswinkel des Scansektors betrug dabei ca. 10° . Die jeweiligen Scans einer Epoche wurde aus Gründen des Energiemanagements in mehrere Teilscans unterteilt.

Die höchsten Scanreichweiten können nur in einem Messmodus mit der geringen Messrate von 10 Punkten pro Sekunde erreicht werden. Dies führt zu langen Scanzeiten und damit zu höheren Anforderungen an die Energieversorgung von Laserscanner und Notebook. Die Energieversorgung wurde einerseits durch eine Kombination von Gelbatterien und Solarmodulen bei sonnigem Wetter und andererseits durch ein Benzinaggregat gewährleistet. Für den Scan einer Epoche mit ca. 250.000 Punkten ergibt sich eine Messzeit von ca. 7 h.

Während der Messungen stellte sich heraus, dass die Reichweite von der Position der Sonne beeinflusst wird. Dabei verringert sie sich, wenn die Eisflächen der zerklüfteten Gletscheroberfläche die Sonnenstrahlen verstärkt in die Richtung des Laserscanners reflektieren. Dieser Effekt wirkt sich also dann am stärksten aus, wenn die Sonne im Rücken des Scanners steht. Mit der Hauptscanrichtung nach Norden war dies um die Mittagszeit der Fall. Der flache Stand der Sonne durch die hohe nördliche Breite verstärkt die Problematik. Dieser Effekt war somit bei der Wahl der Aufnahmezeiten für die Sequenzen zu berücksichtigen.

Eine Übersicht über alle aufgenommenen Bildsequenzen und Laserscannermessungen für den Jakobshavn Isbræ in Form eines Zeitstrahls befindet sich im Anhang A.1.2.

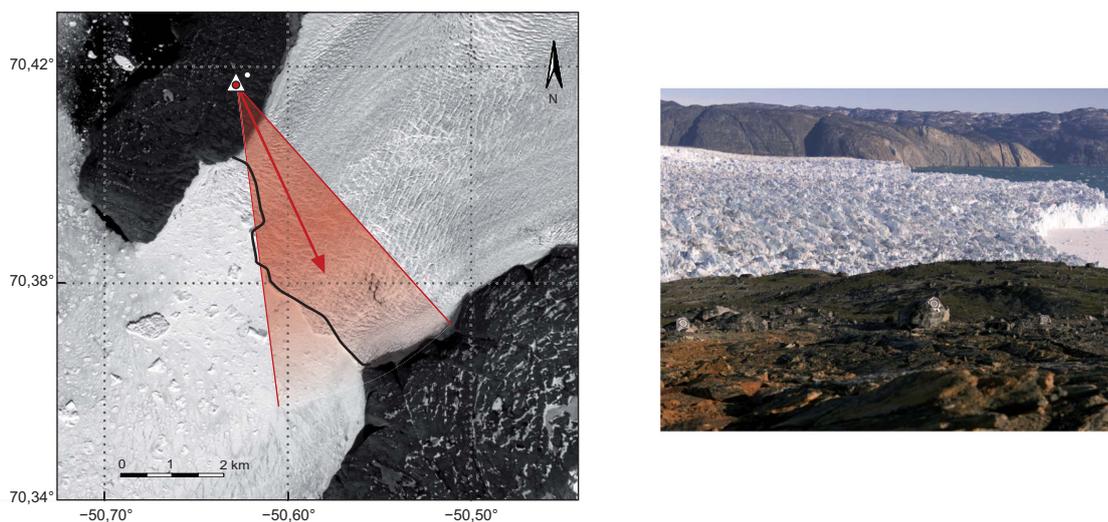


Abbildung 3.15: Aufnahme-situation am Støre Qarajaq 2007. Die Abbildung zeigt die Position der Sequenzkamera (Dreieck mit rotem Punkt), ihre Blickrichtung (roter Pfeil) und ihr Gesichtsfeld über den frontnahen Gletscherbereich als Überlagerung eines SPOT5-Orthophotos von 2008 (links). Die zum Messzeitpunkt aktuelle Gletscherfrontlage ist als schwarze Linie dargestellt. Ein zweiter Kamerastandort für die Aufnahme eines Stereopartners ist als Kreis dargestellt. Die Abbildung zeigt rechts ein Bild der Sequenzkamera. Orthophoto: © Centre national d'etudes spatiales (France) und SPOT Imaging Services.

3.4.3 Messungen am Støre Qarajaq

Die Messung am Støre Qarajaq erfolgte im Jahr 2007 mit der IGI DigiCAM (Objektiv: 80 mm, Öffnungswinkel: 34°). Der Kamerastandpunkt befand sich in einer Höhe von etwa 300 m auf der Südseite einer Felseninsel (vgl. Abbildung 3.15). Durch den zu Fuß zurückzulegenden vierstündigen Transportweg vom Feldcamp zum Messstandort gestaltete sich die Messung logistisch schwierig und der zur Verfügung stehende Zeitrahmen für Messungen am Kamerastandort war eingeschränkt. Das für die Georeferenzierung notwendige photogrammetrische Netz wurde deshalb auf eine Minimallösung beschränkt. Weitere Gründe dafür bestanden außerdem im steilen Gelände am Messort sowie in der zeitaufwendigen Handhabung der hochauflösenden Kamera, die per Notebook zu bedienen und jeweils an eine externe Stromquelle anzuschließen war. Es wurde eine Basis eingerichtet, von deren Endpunkten ein Stereobildpaar aufgenommen wurde. Der westliche Basislinienpunkt wurde zugleich als Standort der Sequenzkamera genutzt, so dass ein Sequenzbild als zweites Stereobild diente. Am Støre Qarajaq konnten Höhenpasspunkte auf der Uferlinie des Fjordes sowie markante Merkmale des gegenüberliegenden Bergmassivs genutzt werden. Letztere wurden mittels Tachymeter gemessen.

Eine Übersicht über die aufgenommenen Bildsequenzen am Støre Qarajaq befindet sich im Anhang A.1.3.

3.4.4 Messungen am Eqip Sermia

Die Messungen am Eqip Sermia wurden 2007 mit der IGI DigiCAM (Objektiv: 80 mm, Öffnungswinkel: 34°) von einer schmalen Seitenmoräne des Gletschers aus durchgeführt. Der Kamerastandpunkt wurde entsprechend Abbildung 3.16 in einer Höhe von ca. 250 m eingerichtet. Ähnlich wie am Støre Qarajaq bot die Aufnahmesituation am Eqip Sermia, bedingt durch lange Transportwege, die verwendete Kamera und eine eingeschränkte Standortwahl aufgrund der geographischen Gegebenheiten, keine Möglichkeit für die Aufnahme eines umfangreichen Bildverbandes, so dass auch hier die Georeferenzierung über die Aufnahme eines Stereobildpaares von der mit GPS eingemessenen Basislinie aus erfolgte.

Eine Übersicht über die aufgenommenen Bildsequenzen am Eqip Sermia befindet sich im Anhang A.1.4.

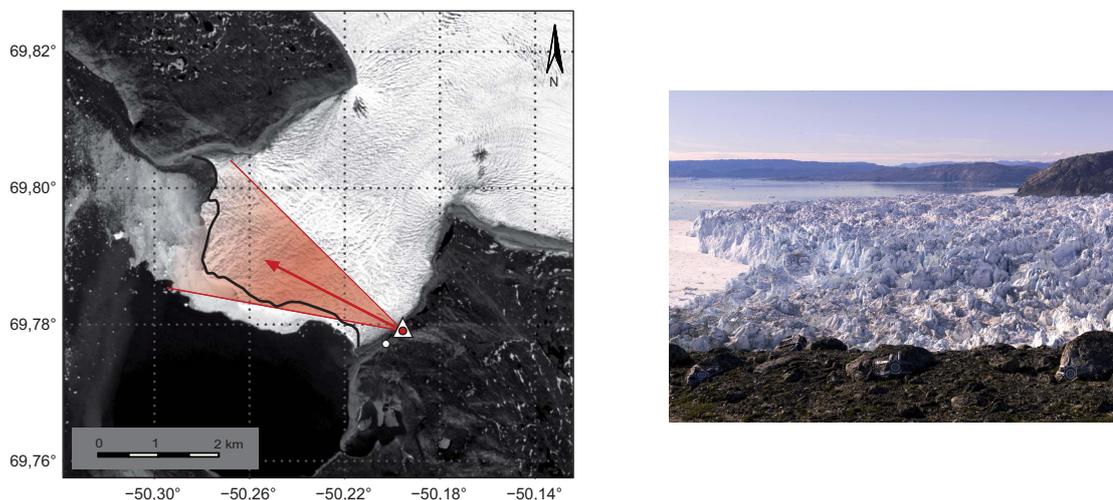


Abbildung 3.16: Aufnahmesituation am Eqip Sermia 2007. Die Abbildung zeigt die Position der Sequenzkamera (Dreieck mit rotem Punkt), ihre Blickrichtung (roter Pfeil) und ihr Gesichtsfeld über den frontnahen Gletscherbereich als Überlagerung eines SPOT5-Orthophotos von 2008 (links). Die zum Messzeitpunkt aktuelle Gletscherfrontlage ist als schwarze Linie dargestellt. Ein zweiter Kamerastandort für die Aufnahme eines Stereopartners ist als Kreis dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt ein Bild der Sequenzkamera. Orthophoto: © Centre national d'etudes spatiales (France) und SPOT Imaging Services.

3.4.5 Messungen am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq

Die Gletscher Sermeq Avannarleq und Sermeq Kujalleq münden zu beiden Seiten einer Felseninsel in den Torssukatakfjord. Auf dieser wurde das Feldcamp errichtet und die beiden Gletscher konnten im August 2010 zeitgleich beobachtet werden. Die Standpunkte der Kameras und ihr Blickfeld sowie die Verteilung der Kamerastandpunkte des photogrammetrischen Netzes sind in Abbildung 3.17 dargestellt. Für die Messung am Sermeq Avannarleq wurde eine Nikon D300 (Objektiv: 85 mm, Öffnungswinkel: 16°) verwendet. Die Bildsequenzen am Sermeq Kujalleq wurden mit einer Nikon D700 (Objektiv: 50 mm, Öffnungswinkel: 40°) aufgenommen. Die Hauptstromlinie des Sermeq Avannarleq war mit einer Distanz zum Kamerastandpunkt von ca. 6 km sehr weit entfernt, wodurch die Verwendung einer längeren Brennweite nötig wurde und das vergleichsweise schmale Blickfeld der Kamera begründet ist. Beide Kamerastandpunkte befanden sich in einer Höhe von etwa 400 m.

Die interne Stromversorgung der Kameras, die mittels Batteriegriff jeweils noch um einen weiteren Akku erweitert werden kann, ermöglichte (abhängig von Temperatur und Lichtverhältnissen) eine durchgängige Messung von ca. sieben Tagen bei einem Aufnahmeintervall von 15 min. Für die Installation wurde jeweils ein Kugelkopf direkt auf Fels montiert, die Kameras wurden damit ausgerichtet und wetterfest überdacht.

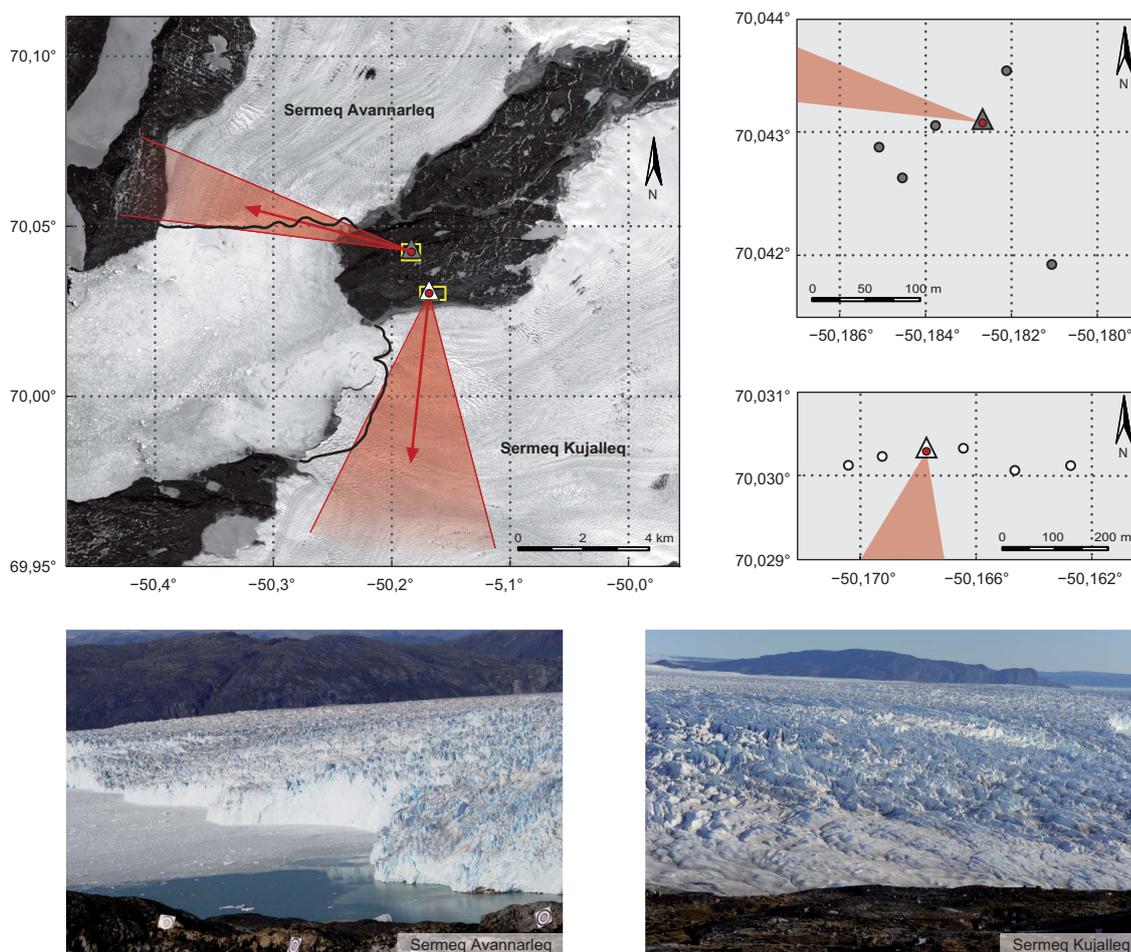


Abbildung 3.17: Aufnahme- und Messungssituation am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq 2010. Die Abbildung zeigt die Positionen der Sequenzkameras (Dreiecke mit rotem Punkt), ihre jeweilige Blickrichtung (roter Pfeil) und ihr Gesichtsfeld über den frontnahen Gletscherbereich für die beiden Gletscher als Überlagerung eines SPOT5-Orthophotos von 2008 (oben links). Die zum Messzeitpunkt aktuellen Gletscherfrontlagen sind als schwarze Linien dargestellt. Die gelb markierten Ausschnitte sind rechts oben vergrößert abgebildet und zeigen die Verteilung der Kamerastandorte (Kreise) der beiden photogrammetrischen Netze. Die Abbildung zeigt zudem für jeden Gletscher ein Bild der jeweiligen Sequenzkamera (unten). Orthophoto: © Centre national d'etudes spatiales (France) und SPOT Imaging Services.

Zur Lagerung des photogrammetrischen Netzes konnten am Sermeq Avannarleq Höhenpasspunkte auf der Wasserlinie an der Gletscherfront genutzt werden. Da im Messbild des Sermeq Kujalleq kaum Fjordbereich abgebildet ist, wurden hier als Höhenpasspunkte markante Merkmale des bergigen Geländes am gegenüberliegenden Ufer des Eisstromes genutzt, welche trigonometrisch gemessen wurden.

Auch hier befindet sich eine Übersicht der aufgenommenen Bildsequenzen am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq im Anhang A.1.5.

4 Entwicklung der Auswertemethodik

Das vorliegende Kapitel dokumentiert die Entwicklung von Methoden, die eine weitgehend automatische Auswertung von Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscans ermöglichen. Die in Kapitel 3.4 vorgestellten Messungen an mehreren Gletschern in Westgrönland bilden dabei die Datengrundlage, auf deren Basis die Entwicklung der Auswertemethoden erfolgt. Bildzuordnungsverfahren sowie Punktzuordnungsverfahren für unregelmäßig verteilte 3D-Punktwolken stellen wichtige Werkzeuge für die Ableitung von Bewegungsvektorfeldern aus diesen Datensätzen dar. Im ersten Unterkapitel werden deshalb die in der Arbeit verwendeten Zuordnungsverfahren vorgestellt und eingeordnet. Obwohl der Bestimmung von Bewegungsvektorfeldern aus Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscannerdaten gleichermaßen das Prinzip der zeitlichen Zuordnung von homologen Punkten zugrundeliegt, stellen die komplementären Eigenschaften der Bild- und Laserscannerdaten jeweils unterschiedliche Anforderungen an die Auswerteverfahren. Für beide Datenarten wird in den entsprechenden Unterkapiteln jeweils ein Überblick über die einzelnen notwendigen Auswerteschritte gegeben, welche dann im Detail vorgestellt und diskutiert werden.

4.1 Algorithmische Grundlagen

Für die im Folgenden beschriebenen Auswertemethoden kommen in unterschiedlichen Arbeitsschritten Punktzuordnungsverfahren zur Anwendung. Dies sind zum einen Bildzuordnungsverfahren für die Auswertung der terrestrischen Bildsequenzen und zum anderen Verfahren für die Zuordnung von 3D-Punktwolken, welche für die Auswertung der multi-temporalen Laserscans das grundlegende Werkzeug darstellen. Aufgrund ihrer Bedeutung im Auswerteprozess soll an dieser Stelle zunächst ein kurzer Überblick über existierende Zuordnungsverfahren gegeben und es sollen die in der Arbeit verwendeten Verfahren vorgestellt und eingeordnet werden.

4.1.1 Bildzuordnungsverfahren

Bei der Zuordnung von identischen Punkten in zwei Bildern ist die Verteilung der Grauwerte in der Umgebung der Punkte das maßgebliche Entscheidungskriterium. Dabei kann zwischen merkmalsbasierten und flächenbasierten Matchingverfahren unterschieden werden. Eine umfassende Übersicht verschiedener Bildzuordnungsmethoden liefern [Brown, 1992] und [Zitová & Flusser, 2003].

Flächenbasierte Verfahren

Bei den flächenbasierten Verfahren wird um einen Punkt im Ausgangsbild ein Fenster (im Folgenden als Patch bezeichnet) bestimmter Größe definiert. Es wird versucht, dieses mit einem Patch im Suchbild in Übereinstimmung zu bringen, indem die Grauwerte innerhalb der beiden Patches miteinander verglichen werden. Dabei wird zwischen Korrelationsmethoden, Transinformativmethoden, Fouriemethoden und Optimierungsmethoden unterschieden.

Bei den Korrelationsmethoden werden verschiedene Varianten der Berechnung von Korrelationskoeffizienten zur Beurteilung der Übereinstimmung der Grauwerte zweier Patches verwendet [Pratt, 1974]. Sie beschreiben, in welchem Maße zwei Bildausschnitte identisch sind. Als gängigstes Korrelationsmaß wird dabei der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient verwendet [Lewis, 1995].

Für die auf der Informationstheorie basierenden Transinformativmethoden dagegen werden keine Grauwertdifferenzen zur Berechnung des Ähnlichkeitskriteriums genutzt, sondern Werte berechnet, welche mittels der Entropie der Grauwerte den statistischen Zusammenhang zwischen zwei Bildausschnitten beschreiben [Viola & Wells, 1997]. Damit sind diese Verfahren unabhängig von der Beleuchtung und somit z. B. speziell für die Zuordnung zwischen Bildern geeignet, die mit unterschiedlichen bildgebenden Verfahren gewonnen wurden. Ein Beispiel für ein Zuordnungsverfahren, welches auf Transinformativwerten basiert, ist das von [Hirschmüller, 2005] vorgestellte semi-globale Matching.

Gesucht wird bei beiden Methoden jeweils nach derjenigen Position im Suchbild, für welche der Korrelations- bzw. Transinformativwert maximal wird.

Das Prinzip der Fouriermethoden basiert auf der Bestimmung der Phasenverschiebung zweier in den Frequenzraum transformierter Bildausschnitte [Bracewell, 1965]. Daraus wiederum lässt sich die Translation zwischen den beiden Bildausschnitten ableiten. Es wird dazu die inverse Fouriertransformation des Kreuzleistungsspektrums der beiden Bildausschnitte berechnet. Aus der Position des Maximums ergeben sich die Translationswerte. Die Methode kann auch für die Bestimmung von Rotationen und Skalierungsunterschieden erweitert werden [Reddy & Chatterji, 1996; De Castro & Morandi, 1987].

Zu den Optimierungsmethoden zählen Verfahren, welche zwischen den beiden Patches eine geometrische Transformation definieren und deren Parameter bestimmen, indem sie die Grauwertdifferenzen zwischen dem Ausgangspatch und dem transformierten Suchpatch minimieren. Ein etabliertes Verfahren aus dieser Kategorie ist das Least Squares Matching (LSM) (vgl. Kapitel 4.1.1.2).

Merkmalsbasierte Verfahren

Bei merkmalsbasierten Verfahren wird dem eigentlichen Matching eine Merkmalsdetektion vorgeschaltet. Es werden zunächst markante Punkte gesucht, die über bestimmte Eigenschaften verfügen, um im anderen Bild eindeutig wiedererkannt werden zu können. Ein umfangreicher Überblick über Merkmalsdetektoren wird in [Tuytelaars & Mikolajczyk, 2007] gegeben. Nachdem in zwei Bildern mittels dieser Detektoren (z. B. Harrisoperator, Cannydetektor, Laplacien of Gaussian) signifikante Merkmale extrahiert wurden, wird mittels Merkmalsdeskriptoren oder über räumliche Relationen versucht, sie einander paarweise zuzuordnen. Die wesentliche Anforderung an die Merkmalsdeskriptoren ist dabei, dass sie invariant gegenüber bestimmten geometrischen Verzerrungen und radiometrischen Unterschieden zwischen zwei Bildern sind. Als gegenwärtig bedeutendste merkmalsbasierte Verfahren sind der SIFT-Algorithmus (Scale-invariant feature transform) [Lowe, 2004] und der SURF-Algorithmus (Speeded Up Robust Features) [Bay u. a., 2006] zu nennen.

Verwendete Verfahren

Da flächenbasierte Verfahren in der Regel ein höheres Genauigkeitspotenzial im Subpixelbereich aufweisen als merkmalsbasierte Verfahren, und die Punkte, welche zugeordnet werden, darüber hinaus gleichmäßig über den Bildbereich verteilt und in hoher Punktdichte vorliegen sollen, wird von der Anwendung merkmalsbasierter Verfahren für das Tracking in Bildsequenzen abgesehen.

Die zwei in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommenden flächenbasierten Ansätze sind das Verfahren der Kreuzkorrelation und das Least Squares Matching. Sie werden im Folgenden kurz erläutert, hinsichtlich ihres Genauigkeitspotenzials bewertet und ihre Anwendung wird begründet.

4.1.1.1 Kreuzkorrelationsverfahren

Das Verfahren der Kreuzkorrelation beruht auf der Bestimmung von Ähnlichkeitsmaßen auf der Basis der Grauwerte zweier Bilder. Im Ausgangsbild wird um den Punkt, der im Suchbild wiedergefunden werden soll, ein Fenster (Referenzpatch) bestimmter Größe definiert. Im Suchbild wird ein Patch gleicher Größe pixelweise verschoben und für jede Position, die es einnimmt, ein Wert berechnet, der seine Ähnlichkeit zum Referenzpatch quantifiziert. Diejenige Position im Suchbild, für welche der Ähnlichkeitswert maximal ist, wird als korrespondierender Punkt zum Punkt im Ausgangsbild interpretiert. Stehen Vorinformationen über die zu erwartende Position des gesuchten Punktes zur Verfügung (Prädiktion), so muss die Suche nicht über das ganze Bild erfolgen, sondern kann auf einen bestimmten Suchbereich beschränkt werden, wodurch sich die Rechenzeit des Verfahrens entsprechend verringert.

Um eventuelle Helligkeits- und Kontrastunterschieden in den Patches mit zu berücksichtigen, wird als Ähnlichkeitsmaß bevorzugt der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient ρ verwendet (vgl. Gleichung 4.1) [Lewis, 1995].

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n [(g_{1i} - \bar{g}_1) \cdot (g_{2i} - \bar{g}_2)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (g_{1i} - \bar{g}_1)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (g_{2i} - \bar{g}_2)^2}} \quad (4.1)$$

Es gehen die Grauwerte g_{1i} im Referenzpatch und die Grauwerte g_{2i} im Suchpatch mit $i = 1 \dots n$ ein sowie die arithmetischen Mittel \bar{g}_1 bzw. \bar{g}_2 , gebildet aus den Grauwerten des jeweiligen Patches. Aus der Position des Suchpatches mit dem größten Korrelationswert ergibt sich die Verschiebung des Suchpatches gegenüber dem Ausgangspatch mit einer Genauigkeit von einem Pixel. Inwieweit auf die Richtigkeit des Zuordnungsergebnisses vertraut werden kann, lässt sich anhand des Korrelationswertes selbst beurteilen. Dieser kann Werte in einem Bereich von $-1 \leq \rho \leq 1$ annehmen, wobei ein Wert von $\rho = 1$ völlig identischen und ein Wert von $\rho = -1$ genau inversen Patches entspricht. Bei einem Wert von $\rho = 0$ besteht keinerlei Ähnlichkeit zwischen den Patches. Welche Größenordnung der Schwellwert für den Kreuzkorrelationskoeffizienten zur Akzeptanz von Zuordnungsergebnissen annehmen sollte, hängt von der Art der Textur im Patch und von der Rauschcharakteristik der Bilder ab.

Zur Interpolation subpixelgenauer Translationswerte existieren mehrere Verfahren (vgl. z.B. [Debell-Gilo & Käab, 2011]). Eine gängige und in dieser Arbeit verwendete Methode ist die Einpassung eines elliptischen Paraboloides (vgl. Gleichung 4.2) in die Korrelationswerte innerhalb eines bestimmten Nachbarschaftsbereichs um das Korrelationsmaximum.

$$\frac{(x+x_0)^2}{a^2} + \frac{(y+y_0)^2}{b^2} + (z+z_0) = 0 \quad \text{mit } z = \rho \quad (4.2)$$

Durch vermittelnde Ausgleichung werden die Translationsparameter x_0, y_0 der Korrelationswert im Scheitelpunkt des Paraboloides z_0 sowie die Achsparameter a und b bestimmt. Als Beobachtungen gehen die Korrelationswerte z_i an ihrer jeweiligen Position (x_i, y_i) ein. Ist das zugrundeliegende Koordinatensystem so definiert, dass die z -Achse durch das Korrelationsmaximum verläuft, so stellen x_0 und y_0 die Subpixelwerte dar, um welche die ganzzahligen Verschiebebeträge zwischen den Patches zu verbessern sind (vgl. Abbildung 4.1). Auf diese Weise kann die Genauigkeit der Zuordnung unter idealen Bedingungen bis auf ca. 0,1 Pixel gesteigert werden [Luhmann, 2010].

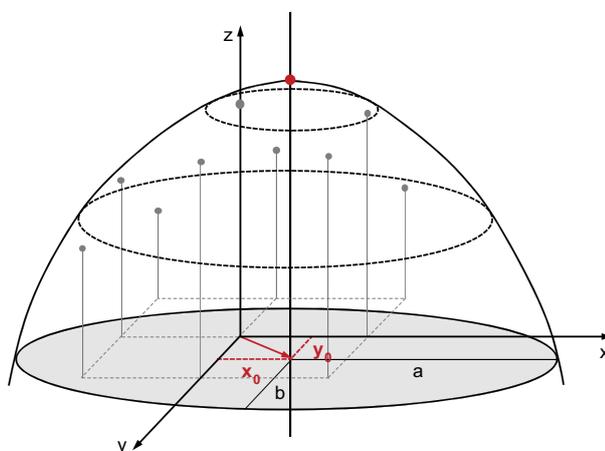


Abbildung 4.1: Möglichkeit zur Subpixelinterpolation beim Kreuzkorrelationsverfahren. Die Abbildung zeigt ein in die 3x3-Nachbarschaft des Korrelationsmaximums eingepasstes Paraboloid.

Der Nachteil des Kreuzkorrelationsverfahrens liegt darin, dass keine geometrischen Verzerrungen zwischen Patches modellierbar sind und beim Auftreten mehrerer lokaler Korrelationsmaxima im Suchbereich Fehler 2. Art entstehen können. Der Vorteil des Verfahrens ist seine einfache Implementierbarkeit und seine Schnelligkeit bei guter Prädiktion. Aus diesem Grund wird es in der Arbeit als Verfahren zur Beschaffung von Näherungswerten verwendet, die für das im Folgenden beschriebene Least Squares Matching Voraussetzung sind.

4.1.1.2 Least Squares Matching

Unter dem Prinzip des Least Squares Matching wird ein subpixelgenaues Verfahren der Bildzuordnung verstanden, mit welchem auch geometrische Verzerrungen und radiometrische Unterschiede zwischen den Patches modellierbar sind. Es wurde in den 1980er Jahren entwickelt [Förstner, 1982; Ackermann, 1984; Grün, 1985] und hat seitdem ein breites Anwendungsspektrum gefunden.

Dem Verfahren des LSM liegt eine geometrische Transformation zwischen den Grauwerten des Referenzpatches im Ausgangsbild und den Grauwerten des Suchbildes zugrunde. Ziel ist es, die Parameter dieser Transformation zu bestimmen, indem die Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen des Originalpatches und des transformierten Suchpatches minimiert werden. Helligkeits- und Kontrastunterschiede zwischen den Patches können durch eine Erweiterung der Transformationsgleichung um entsprechende radiometrische Parameter berücksichtigt werden. Zur Vermeidung von Korrelationen zwischen radiometrischen und geometrischen Parametern ist jedoch eine separate Kontrast- und Helligkeitsanpassung im Vorfeld des LSM zu bevorzugen [Westfeld, 2005].

Als Transformationsgleichung zwischen zwei Patches wird üblicherweise die Affintransformation (vgl. Gleichungen 4.3) verwendet. Es können jedoch auch Projektiv- oder Polynomtransformationen genutzt werden, die für bestimmte Anwendungen eine Genauigkeitssteigerung des LSM ermöglichen [Bethmann & Luhmann, 2011]. Das LSM kann somit als adaptives Verfahren bezeichnet werden, da die zugrundeliegende geometrische Transformation je nach Anwendung angepasst werden kann [Grün, 1985].

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y \\y' &= b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y\end{aligned}\tag{4.3}$$

Dem funktionalen Modell des LSM liegt nun die Annahme zugrunde, dass ein Grauwert g_1 des Ausgangspatches an der Stelle (x, y) , abgesehen von einem gewissen Rauschanteil v , dem Grauwert g_2 an der Stelle (x', y') im Suchbild bzw. dem Grauwert \bar{g}_2 an der Stelle (x, y) im transformierten Suchpatch entspricht. Ein Grauwert \bar{g}_2 an der Stelle (x, y) des transformierten Suchpatches ergibt sich aus dem interpolierten Grauwert im Suchbild an der mit Gleichung 4.3 transformierten Position ($x' = f(x, y, a_i)$, $y' = f(x, y, b_i)$). Somit kann für jedes Pixel des Ausgangspatches eine Beobachtungsgleichung entsprechend Gleichung 4.4 formuliert werden.

$$\begin{aligned}g_1(x, y) + v(x, y) &= g_2(x', y') \\ &= \bar{g}_2(x, y)\end{aligned}\tag{4.4}$$

Die Nichtlinearität der Bildfunktion $g_2(x', y')$ bedingt eine Linearisierung der Beobachtungsgleichungen nach Taylor. Es resultieren die linearen Verbesserungsgleichungen entsprechend Gleichung 4.5.

$$\begin{aligned}g_1(x, y) + v(x, y) &= \bar{g}_2^0(x, y) + g_{2x} \cdot da_0 + g_{2x} \cdot x \cdot da_1 + g_{2x} \cdot y \cdot da_2 \\ &\quad + g_{2y} \cdot db_0 + g_{2y} \cdot x \cdot db_1 + g_{2y} \cdot y \cdot db_2\end{aligned}\tag{4.5}$$

Die beiden Differentialquotienten g_{2x} und g_{2y} entsprechen dabei einfachen Grauwertgradienten im transformierten Suchpatch und können wie folgt definiert werden (vgl. Gleichung 4.6):

$$\begin{aligned} g_{2x} &= \frac{\delta \bar{g}_2^0(x, y)}{\delta x} = \frac{\bar{g}_2^0(x+1, y) - \bar{g}_2^0(x-1, y)}{2} \\ g_{2y} &= \frac{\delta \bar{g}_2^0(x, y)}{\delta y} = \frac{\bar{g}_2^0(x, y+1) - \bar{g}_2^0(x, y-1)}{2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Die Unbekannten, die aufgrund der Linearisierung nun im Rahmen der Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell geschätzt werden, sind differenzielle Zuschläge zu den Näherungswerten der gesuchten Parameter. Durch Iteration der Ausgleichung verringern sich die Zuschläge sukzessive, bis ein entsprechendes Konvergenzkriterium erreicht ist.

Je nach Anwendung besteht nicht immer die Notwendigkeit zur Bestimmung aller Parameter der Affintransformation. Bei der Punktzuordnung in Mehrbildverbänden können, bedingt durch die konvergenten Blickwinkel der Kameras, deutliche geometrische Verzerrungen auftreten, wodurch die Schätzung aller Parameter sinnvoll sein kann. Dagegen kann für den Fall der Punktzuordnung innerhalb der Bildsequenzen von Gletschern zumeist eine Beschränkung auf die Bestimmung der Translationsparameter erfolgen, da sich die Veränderungen des Bildinhaltes nicht durch die unterschiedliche Orientierung und Position der Kameras ergeben, sondern durch die Bewegung des Messobjektes. Im Falle eines Gletschers entspricht dies, bezogen auf kleine Bildausschnitte und kurze Zeitintervalle zwischen den Bildern, hauptsächlich einer Translationsbewegung. Der Ausschluss von nicht signifikanten Parametern [Maas, 1997] wirkt sich zum einen günstig auf die Rechenzeit aus und verhindert zum anderen schlechtes Konvergenzverhalten, welches auftritt, wenn nichtsignifikante Parameter mit anderen stark korreliert sind.

Die Genauigkeit des LSM wird unter idealen Bedingungen mit bis zu 0,01 Pixel angegeben [Ackermann, 1984; Luhmann, 2010]. Dies setzt allerdings die Verwendung von kontrastreichen, signalisierten Punkten voraus. Bei natürlichen Punkten sind, abhängig von der Art der Textur der Patches, eher Genauigkeiten im Bereich von 0,1–0,3 Pixel realistisch.

Als Nachteile des LSM sind die Notwendigkeit der Bereitstellung von Näherungswerten sowie der vergleichsweise höhere Rechenaufwand, bedingt durch die iterative Natur des Verfahrens, zu sehen. Der Vorteil des LSM liegt darin, dass es sich um ein adaptives, genaues und robustes Verfahren handelt, welches die Berücksichtigung geometrischer Verzerrungen zwischen Patches sowie gleichzeitig die Bestimmung von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaßen erlaubt.

4.1.2 Zuordnungsverfahren für Punktwolken

Für einen umfassenden Überblick über die zahlreichen Verfahren zur Registrierung von 3D-Punktwolken sei an dieser Stelle auf [Grün & Akca, 2005] verwiesen. Eine detaillierte Zusammenstellung und Klassifikation von 3D-Oberflächen-Matchingverfahren findet sich in [Tangelder & Veltkamp, 2008].

Die aufgrund ihrer Robustheit und Schnelligkeit am weitesten verbreitete Methode für die Zuordnung von Punktwolken ist der Iterativ Closest Point Algorithmus (ICP), von welchem verschiedenste Varianten existieren [Rusinkiewicz & Levoy, 2001]. Er wird entsprechend Kapitel 4.3.4 zur Auswertung der multi-temporalen Laserscannerdaten genutzt und wird deshalb im Folgenden kurz erläutert.

Der ICP-Algorithmus ist ein von [Chen & Medioni, 1992] und [Besl & McKay, 1992] vorgestelltes Verfahren für die Registrierung von geometrischen Objekten sowohl im 2D- als auch im 3D-Raum. Es ist anwendbar auf die verschiedensten Repräsentationsarten geometrischer Daten, wie z. B. Punktmengen, Kurvenmengen, Dreiecksvermaschungen oder parametrisierte Oberflächen.

Zwischen zwei korrespondierenden Datensätzen, von denen einer als Modell M bezeichnet wird und der andere als Szene S , kann eine Transformation beschrieben werden, die den Szenedatensatz in das Bezugssystem

tem des Modelldatensatzes überführt. Die Parameter der Transformation werden durch Minimierung der Quadrate der kleinsten Abstände zwischen den Punkten der Szene und dem Modell ermittelt. Je nach Repräsentationsart der Daten ist dazu eine geeignete Abstandsfunktion zu definieren. In der vorliegenden Arbeit liegen die zu registrierenden Daten als unregelmäßig verteilte 3D-Punktwolken vor. Die Bestimmung der Parameter der Transformation erfolgt hier somit durch Minimierung der Quadrate der euklidischen Distanz d zwischen korrespondierenden Punkten $\vec{p} \in S$ und $\vec{x} \in M$ aus den beiden Datensätzen (vgl. Gleichung 4.7):

$$d(\vec{p}, M) = \min_{\vec{x} \in M} \|\vec{x} - \vec{p}\| \quad (4.7)$$

Das grundlegende Problem ist, die am besten korrespondierenden Punktepaare zu finden. Zu diesem Zweck erfolgt eine Iteration der folgenden drei Schritte:

1. Bestimmung benachbarter Punkte: jedem Punkt des Szenedatensatzes wird derjenige Punkt \vec{y} aus dem Modelldatensatz zugeordnet, der ihm am nächsten liegt (vgl. Abbildung 4.2).
2. Bestimmung der Transformationsparameter: für jedes benachbarte Punktepaar kann eine Beobachtungsgleichung formuliert werden. Mittels Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate werden die Transformationsparameter geschätzt.
3. Anwendung der Transformation auf die Punkte der Szene

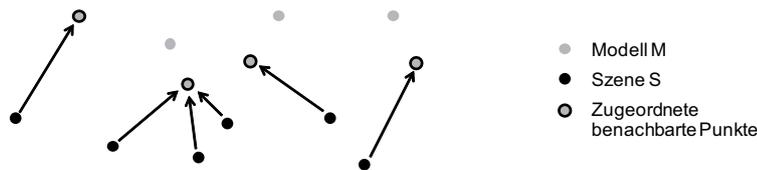


Abbildung 4.2: Beispiel für die Zuordnung benachbarter Punkte beim ICP-Algorithmus. Abbildung nach [Junker 2008].

Ab der zweiten Iteration erfolgt die Bestimmung der benachbarten Punkte jeweils zwischen der mit den zuletzt ermittelten Parametern transformierten Szene Q_k und dem Modelldatensatz. Auf diese Weise ergibt sich für jeden Iterationsschritt k eine zuverlässigere Zuordnung der Punkte und eine Verringerung des quadratischen Fehlers s_k , der sich aus dem Mittelwert der Quadrate der Abstände aller n benachbarten Punktepaare $(\vec{q}_{ki}, \vec{y}_{ki})$ mit $\vec{q}_{ki} \in Q_k$ und $\vec{y}_{ki} \in M$ ergibt (vgl. Gleichung 4.8). Ist die Veränderung des quadratischen Fehlers zwischen zwei Iterationen nur noch gering, so dient dies als Abbruchkriterium für den Algorithmus.

$$s_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\vec{y}_{ki} - \vec{q}_{ki}\|^2 \quad (4.8)$$

4.2 Terrestrische Bilddaten

Im diesem Kapitel wird die entwickelte Methodik zur Ableitung von Bewegungsvektorfeldern aus monokularen Bildsequenzen vorgestellt.

4.2.1 Grundprinzip – Monoskopische Bildsequenzanalyse

Für monokulare Bildsequenzen werden, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, von einem einzelnen festen Standpunkt aus Bilder in definierten zeitlichen Abständen aufgenommen. Diese bilden im Folgenden die Datengrundlage für die Bestimmung von Bewegungsvektorfeldern von Gletschern. Durch die einzelnen Bilder der Sequenz kann mittels geeigneter Bildzuordnungsverfahren die Position eines Merkmals verfolgt werden. Jede Zuordnung eines Punktes zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern ergibt einen zweidimensionalen Translationsvektor im Bildraum. Werden für einen Messpunkt die einzelnen Bewegungsvektoren zwischen allen zeitlich aufeinanderfolgenden Bildpaaren einer Bildsequenz bestimmt, so erhält man eine Bewegungskurve (Trajektorie) des Punktes im Bildraum. Deren zeitliche Auflösung entspricht dem Zeitintervall der Aufnahme der Bildsequenz.

Die gemessenen Trajektorien sind in den Objektraum zu übertragen, indem sie entsprechend skaliert werden. Bei der monoskopischen Bildsequenzanalyse ist dazu jeder Position im Bild die Entfernung zum entsprechenden Objektpunkt zuzuordnen. Das heißt, Tiefeninformation muss vorliegen, z.B. in Form eines digitalen Geländemodells vom Gletscher, mit dem jeder Bildstrahl, der zu einer Trajektorie beiträgt, verschnitten werden kann. Anhand dieses Schnittpunktes und dem Kameraprojektionszentrum wird dann der entsprechende Distanzwert ermittelt. Der Schnittpunkt mit dem DGM selbst definiert den Bezugspunkt im Raum, dessen Bewegungsverhalten die skalierte Trajektorie beschreibt. Die Bereitstellung eines geeigneten Geländemodells sowie die Bestimmung der äußeren Orientierung der Bildsequenzkamera sind also für die monoskopische Auswertung von Bildsequenzen Grundvoraussetzungen. Anhand der Trajektorien und der registrierten Aufnahmezeitpunkte für jedes Bild einer Sequenz können schließlich Geschwindigkeitswerte abgeleitet werden. Dies geschieht im Rahmen einer weiteren Analyse der Bewegungsvektorfelder zur Beantwortung spezieller glaziologischer Fragestellungen. Beispiele dafür werden in Kapitel 7.1 vorgestellt.

Die Alternative zur monoskopischen Bildsequenzanalyse ist die stereoskopische Auswertung von Bildsequenzen. In diesem Fall müssen mindestens zwei synchronisierte Kameras Bildsequenzen vom Objekt aufnehmen, deren Strahlenschnittwinkel ausreichend konvergent sind. Die Position eines Merkmals kann dann mittels stereoskopischer Auswertung eines synchron aufgenommenen Bildpaares direkt als 3D-Koordinate im Objektraum bestimmt werden (vgl. Abbildung 4.3).

Ein Vorteil der stereoskopischen Bildsequenzanalyse ist, dass kein zusätzliches DGM bereitgestellt werden muss. Der damit verbundene zusätzliche Mess- und Auswerteaufwand entfällt. Dennoch kann auch hier nicht auf den Einsatz weiterer Messinstrumente (z. B. Laser-Entfernungsmesser) verzichtet werden, da die Bestimmung eines Maßstabs notwendig ist. Bei der monoskopischen Auswertung besteht zudem die Schwierigkeit, dass das verwendete DGM die Oberfläche des Gletschers zum Zeitpunkt der Messung des DGM reprä-

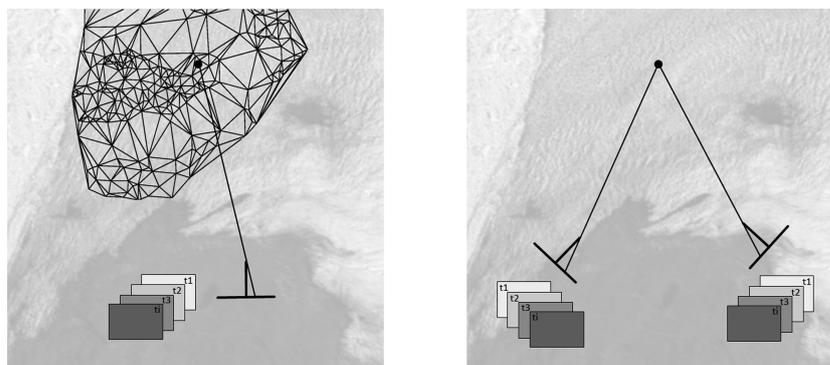


Abbildung 4.3: Monoskopische (links) vs. stereoskopische (rechts) Bildsequenzanalyse.

sentiert. Da ein bewegtes Objekt beobachtet wird, ist davon auszugehen, dass sich die Repräsentationsgenauigkeit des DGM bezüglich des Aufnahmezeitpunktes eines Sequenzbildes mit zunehmendem zeitlichen Abstand zum Aufnahmezeitpunkt des DGM verschlechtert. Dieses Problem besteht für die stereoskopische Auswertung von Bildsequenzen nicht, da jede 3D-Koordinate aus zeit-synchronen Messungen resultiert.

Ein Nachteil der stereoskopischen gegenüber der monoskopischen Auswertung ist der erhöhte Auswerteaufwand. Zusätzlich zur zeitlichen Zuordnung der Punkte in jeder Bildsequenz ist hier für jeden Aufnahmezeitpunkt auch die räumliche Zuordnung eines Messpunktes in den Bildern der verschiedenen Kameras durchzuführen. Dies erschwert zudem die Automatisierbarkeit des Auswerteverfahrens. Die großen Entfernungsunterschiede zum Messobjekt erfordern einerseits einen entsprechend großen Abstand zwischen den Kamerastandpunkten, um auch für weit entfernte Punkte ein gutes Basis-Tiefen-Verhältnis zu gewährleisten. Andererseits werden dadurch Punkte der Gletscheroberfläche in geringerer Entfernung unter stark konvergen-ten Blickwinkeln aufgenommen. Für diese Punkte ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Abbildung in den Stereobildern – und der damit einhergehenden Dekorrelation – schon die manuelle Zuordnung homologer Punkte deutlich erschwert. Eine automatisierte Auswertung ist für diese Fälle nahezu ausgeschlossen. Für ein dichtes Raster an Messpunkten, zeitlich hochaufgelöste Messungen und lange Zeitreihen bedeutet dies einen sehr hohen Auswerteaufwand.

Ein weiterer Nachteil der stereoskopischen Auswertung ist die Notwendigkeit von mindestens zwei Bildsequenzkameras, die zudem synchronisiert werden müssen. Daraus resultiert ein höherer Aufwand hinsichtlich Kosten, Logistik und Energiebereitstellung. Weiterhin ist es wesentlich schwieriger, geeignete Positionen für zwei Kameras zu finden, die den Anforderungen an die stereoskopische Auswertung und gleichzeitig den Anforderungen an die Aufnahme von Bildsequenzen gerecht werden. Das Verfahren ist also wesentlich abhängiger von der Charakteristik des Geländes und somit unflexibler einsetzbar als die monokulare Methode.

Die Gegenüberstellung beider Auswerteverfahren begründet die Entscheidung für die monoskopische Bildsequenzanalyse. Für den speziellen Fall der Gletscherbeobachtung wird ihr hier aus praktischen Gründen sowie auch im Hinblick auf eine weitestgehende Automatisierbarkeit der Auswertung der Vorzug zu geben.

4.2.2 Übersicht der Arbeitsschritte

Aus dem Prinzip der monoskopischen Bildsequenzanalyse ergeben sich die folgenden fünf grundlegenden Aufgaben, die hier zunächst im Überblick am Beispiel der Messung am Støre Qarajaq (Juli 2007) vorgestellt werden sollen:

1. Objektkoordinatenbestimmung von Gletscherpunkten und Orientierung der Sequenzkamera
2. Berechnung von Distanz-Lookup-Tabellen
3. Auswertung der Sequenzen im Bildraum
4. Bestimmung und Korrektur der Eigenbewegung der Kamera
5. Übertragung der im Bildraum gemessenen Größen in den Objektraum

Die Beschreibung erfolgt entsprechend der chronologischen Reihenfolge, nach der die einzelnen Schritte zu bearbeiten sind, da resultierende Teilergebnisse jeweils Voraussetzung für die nachfolgenden Auswerteschritte sind. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte erfolgt dann in den sich anschließenden Kapiteln (4.2.3 – 4.2.7).

Die Basis für alle weiteren Auswerteschritte bildet zunächst die Bestimmung von Objektkoordinaten auf der Gletscheroberfläche (vgl. Abbildung 4.4). Diese dienen zur Erstellung eines groben digitalen Oberflächenmodells für den in der Bildsequenz sichtbaren Gletscherbereich. Das digitale Geländemodell ist wiederum Grundlage für die Ermittlung der Entfernung zum Messobjekt. Für diesen Zweck sind des Weiteren Kenntnisse über die Orientierung, Positionierung und Kalibrierung der Kamera erforderlich, mit der die Aufnahme der Bildsequenz erfolgt. Zur Bestimmung dieser Größen wird hier die Auswertung eines entsprechend Kapitel 3.3.2 aufgenommenen Mehrbildverbandes favorisiert (vgl. Kapitel 4.2.3).

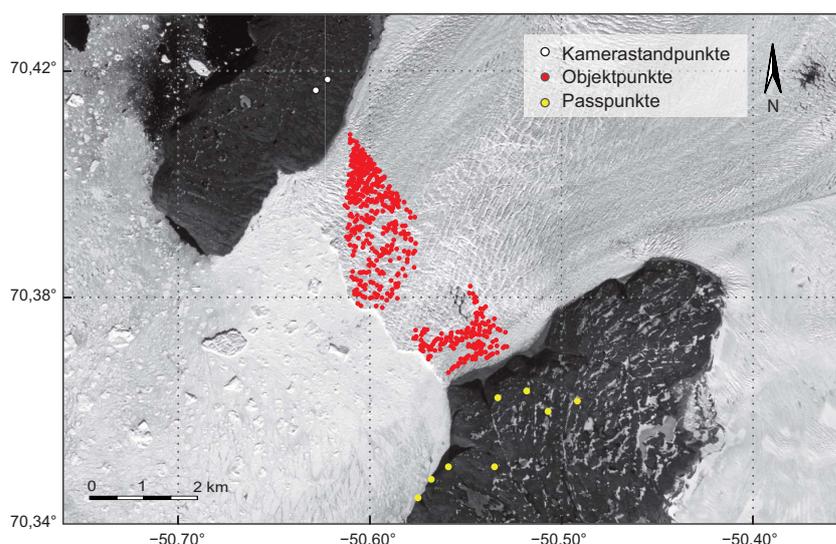


Abbildung 4.4: 3D-Objektpunkte der Gletscheroberfläche (Bsp. Støre Qarajaq, Juli 2007). Die Abbildung zeigt Punkte der Gletscheroberfläche des Støre Qarajaq, für die 3D-Koordinaten ermittelt wurden (rot). Des Weiteren sind die Positionen der Kameras (weiß) sowie verfügbare Höhenpasspunkte (gelb) abgebildet. Alle Punkte werden auf ein SPOT5-Orthophoto projiziert dargestellt. Orthophoto: © Centre national d'etudes spatiales (France) und SPOT Imaging Services.

Zur Generierung des DGM werden die berechneten 3D-Objektpunkte trianguliert. Anhand des DGM der Gletscheroberfläche wird für einen bestimmten Sequenzkamerastandort eine 2D-Lookup-Tabelle erstellt, welche jedem Pixel im Bild eine entsprechende Entfernung zum korrespondierenden Objektpunkt zuordnet (vgl. Kapitel 4.2.4). Dazu wird mittels bekannter Orientierung des Standortreferenzbildes der Bildstrahl für jedes Pixel mit dem DGM verschnitten. Aus diesem Schnittpunkt und dem Kameraprojektionszentrum ergibt sich der Distanzwert für das entsprechende Pixel (vgl. Abbildung 4.5). Die so erstellte Distanz-Lookup-Tabelle für einen Bildverband bildet die Grundlage für die Skalierung der einzelnen Trajektorien und kann darüber hinaus für eine automatisierte Parametrisierung einzelner Arbeitsschritte der Bildsequenzauswertung genutzt werden.

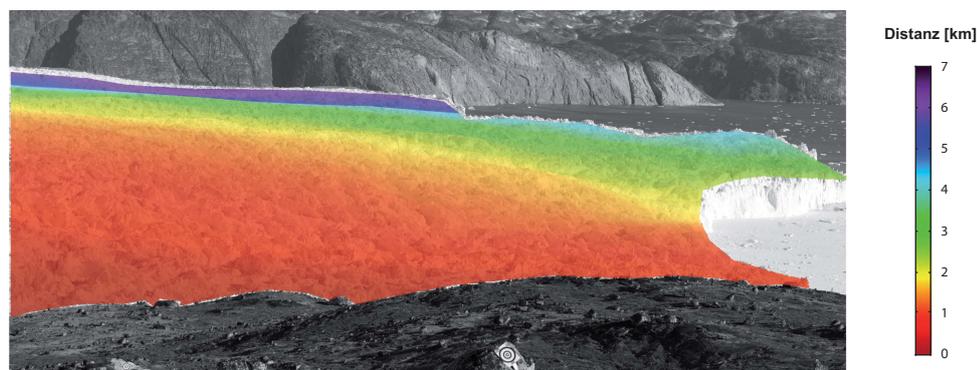


Abbildung 4.5: Distanzwerte (Bsp. Støre Qarajaq, Juli 2007). Farbkodierte Darstellung der Entfernungen zwischen Messobjekt und Sequenzkamera als Überlagerung eines Sequenzbildes.

Als nächster Schritt erfolgt die eigentliche Auswertung der Bildsequenzen. Im Startbild der Bildsequenz werden dazu interessierende Einzelpunkte oder ein dichtes Punktraster definiert (vgl. Abbildung 4.6, links).

Jeder einzelne Punkt wird dann mittels geeigneter Zuordnungsverfahren durch alle Bilder der Sequenz verfolgt (vgl. Kapitel 4.2.5). Als Resultat entstehen Bewegungskurven (Trajektorien) im Bildraum (vgl. Abbildung 4.6, rechts). Aus den besonderen Eigenschaften des Messobjekts ergeben sich spezielle Anforderungen an das Messverfahren. Zwei wesentliche Aspekte sind dabei die starke Veränderung der radiometrischen Eigenschaften der Bilder während einer Tagessequenz sowie die Veränderung und Bewegung von Schatten auf der Gletscheroberfläche.

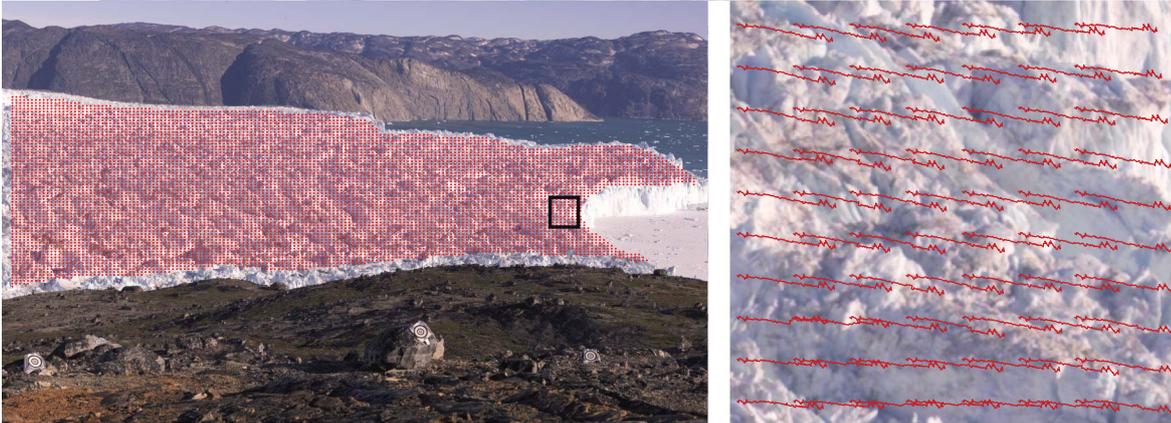


Abbildung 4.6: Messpunktraster und gemessene Trajektorien (Bsp. Støre Qarajaq, Juli 2007). Die Abbildung zeigt das Raster der Messpunkte (rote Punkte) als Überlagerung eines Sequenzbildes (links). Für den schwarz markierten Bereich werden der entsprechende Bildausschnitt und, diesem überlagert die gemessenen unkorrigierten Trajektorien (rote Linien) abgebildet (rechts).

Nicht nur Schatteneffekte überlagern das eigentliche Bewegungsmuster der Gletscherpunkte. Insbesondere verursacht auch die Eigenbewegung der Kamera spezielle Bewegungseffekte im Bild. Die gemessenen Trajektorien sind also jeweils noch durch den Einfluss der Kamerabewegung verfälscht. Im nächsten Auswerteschritt ist deshalb zum einen der Einfluss der Kamerabewegung auf jeden gemessenen Bildpunkt zu ermitteln und zum anderen eine geeignete Korrektur anzubringen (vgl. Kapitel 4.2.6). Dazu werden natürliche oder auch signalisierte Festpunkte verwendet, die in der Bildsequenz gemessen werden. Es wird angenommen, dass die gemessenen Trajektorien der Festpunkte ausschließlich die Effekte der Kamerabewegung enthalten. Auf Grundlage dieser Festpunkttrajektorien kann somit für jeden gemessenen Punkt auf dem Gletscher eine „Korrekturtrajektorie“ bestimmt werden, mit der die gemessene Bewegungskurve verbessert werden kann (vgl. Abbildung 4.7).

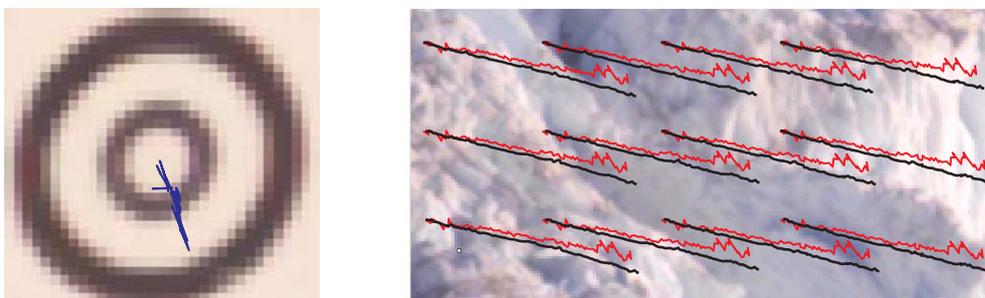


Abbildung 4.7: Effekte der Eigenbewegung der Sequenzkamera (Bsp. Støre Qarajaq, Juli 2007). Die Abbildung zeigt die gemessene scheinbare Bewegungskurve (blaue Linie) einer ortsfesten Zielmarke (links). Des Weiteren ist ein Bildausschnitt, überlagert mit den ursprünglich gemessenen Trajektorien (rote Linien) und den um die Effekte der Kamerabewegung korrigierten Trajektorien (schwarze Linien), abgebildet.

Der letzte Schritt der Auswertung beinhaltet nun noch die Übertragung der im Bildraum vorliegenden korrigierten Trajektorien bzw. der davon abgeleiteten Messgrößen in den Objektraum (vgl. Abbildung 4.8). Bei horizontaler Kamera und nahezu orthogonaler Blickrichtung der Kamera zur Fließrichtung des Gletschers kann dies als einfache Skalierung der Trajektorien mit Hilfe der Distanzwerte geschehen. Da die Sequenzkamera aber unter realen Bedingungen häufig nicht exakt horizontalisiert werden kann und auch die Zugänglichkeit und das Terrain am Messobjekt oft nur eine schräge Sicht auf den Gletscher erlauben, ist ein umfassenderes Verfahren zur Objektraumübertragung erforderlich (vgl. Kapitel 4.2.7). Als Ergebnis liegen dann schließlich für alle gemessenen Punkte auf dem Gletscher 3D-Objektkoordinaten der Trajektorien im übergeordneten Koordinatensystem vor.

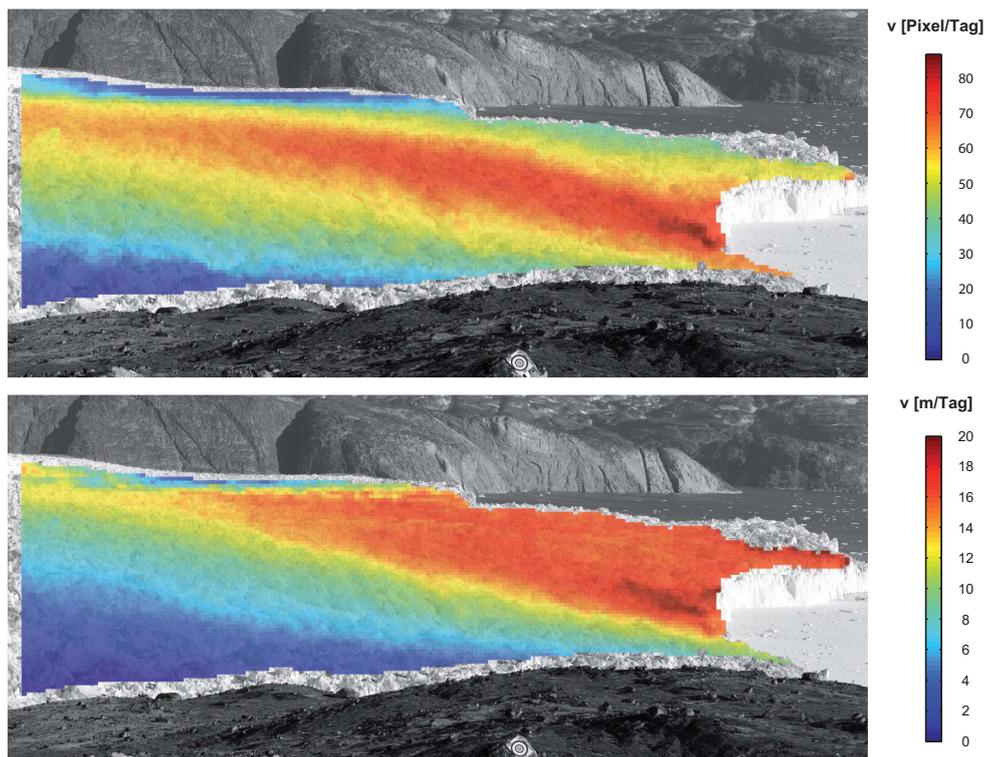


Abbildung 4.8: Geschwindigkeitsfelder im Bild- und Objektraum (Bsp. Støre Qarajaq, Juli 2007). Die Abbildung zeigt die farbkodierte Überlagerung von Geschwindigkeitswerten, die als Tagesmittel aus den Trajektorien abgeleitet wurden. Die Darstellung erfolgt dabei einerseits für unskalierte Messwerte im Bildraum (oben) und andererseits für die in den Objektraum überführten Messwerte (unten).

4.2.3 Objektkoordinatenbestimmung und Orientierung der Sequenzkamera

Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte der Bildsequenzanalyse ist zunächst die Bestimmung von 3D-Koordinaten von Punkten auf der Gletscheroberfläche, aus denen im Folgenden ein digitales Oberflächenmodell abgeleitet werden soll. Des Weiteren ist die Bestimmung der Orientierungsparameter der Sequenzkamera notwendig, um den geometrischen Zusammenhang zwischen Bild- und Objektraum herstellen zu können. In diesem Kapitel wird die für diesen Zweck angewandte Methode vorgestellt, wobei auch Aspekte der Automatisierbarkeit von Arbeitsschritten sowie Aspekte der Genauigkeit betrachtet werden sollen.

4.2.3.1 Methodenwahl

Die dreidimensionale Erfassung der Gletscheroberfläche kann einerseits durch satelliten- und flugzeuggestützte Verfahren erfolgen, z. B. durch die Ableitung digitaler Geländemodelle aus Satellitenbilddaten, durch SAR-Interferometrie oder durch die direkte 3D-Koordinatengewinnung mittels Flugzeuglaserscanning. Ande-

rerseits können terrestrische Verfahren angewandt werden, wie z.B. terrestrisches Laserscanning oder die photogrammetrische Auswertung von Mehrbildverbänden.

Die Nutzung von digitalen Geländemodellen, die aus Satellitendaten abgeleitet werden, hat den Nachteil, dass der Zeitpunkt, auf den sich der erfasste Zustand des Gletschers bezieht, in der Regel nicht mit dem Zeitpunkt der Aufnahme der Bildsequenzen übereinstimmt. Dies ist insbesondere für dynamische und sich durch Kalbungen verändernde frontnahe Bereiche von Gletscherzungen als kritisch zu bewerten. Ein weiteres Problem besteht bei der Referenzierung zwischen einem Sequenzbild und dem DGM. Die Zuordnung identischer Punkte in beiden Datensätzen ist schwierig, insbesondere aufgrund der starken Maßstabs- und Perspektivenunterschiede. Sie ist speziell in solchen Gebieten kaum zu realisieren, in denen keine markanten Geländepunkte im Sequenzbild mit abgebildet werden können (vgl. z.B. mit den Bildsequenzmessungen am Jakobshavn Isbræ, Kapitel 3.4.2). Darüber hinaus besitzen die verfügbaren Satelliten-DGM eine unzureichende absolute Höhengenauigkeit oder sind noch nicht flächendeckend verfügbar (Höhenmodelle aus Radarmessungen). Höhenfehler des DGM wirken sich, bedingt durch die flache Sicht der terrestrischen Sequenzkamera, stark auf die Skalierungsgenauigkeit der Trajektorien aus (vgl. auch Kapitel 4.2.4.4). Demgegenüber hat die Verwendung von Flugzeuglaserscannerdaten den Vorteil einer wesentlich besseren Genauigkeit und Punktdichte. Jedoch ist das Verfahren sehr kostenintensiv, und es besteht gleichermaßen das Problem der zuverlässigen Registrierung zwischen den terrestrischen Bild- und Laserscannerdaten.

Die Anwendung terrestrischer Verfahren vereinfacht einerseits die Registrierungsproblematik und andererseits kann eine gute zeitliche Übereinstimmung der Datensätze gewährleistet werden. Terrestrische Verfahren ermöglichen darüber hinaus eine hohe Punktdichte und – aufgrund der ähnlichen Aufnahmerichtung wie die Sequenzkamera – eine für die Auswertung optimale Punktverteilung. Ein Vorteil des terrestrischen Laserscannings gegenüber der Auswertung eines Bildverbandes ist dabei die direkte und zuverlässige Gewinnung von 3D-Koordinaten der Gletscheroberfläche mit einer hohen Genauigkeit in Tiefenrichtung. Dem Vorteil des geringeren Auswerteaufwandes stehen allerdings der größere logistische Aufwand bei der Aufnahme, die höheren Kosten sowie die begrenzte Reichweite terrestrischer Laserscanner gegenüber.

Aus diesen Gründen und wegen der Tatsache, dass ein terrestrischer Laserscanner nur für die Messungen am Jakobshavn Isbræ im Jahr 2007 zur Verfügung stand, wurde als Methode zur dreidimensionalen Erfassung der Gletscherzungen für die vorliegende Arbeit die Aufnahme von Mehrbildverbänden und deren Auswertung mittels Bündelblockausgleichung gewählt. Wird dabei ein Sequenzbild mit in den Bildverband integriert, können die Objektpunktkoordinaten der Gletscheroberfläche und die Orientierungsparameter der Kamera gleichzeitig bestimmt werden und liegen direkt in einem einheitlichen System vor. Da alle Parameter in einem gemeinsamen Ausgleichungsprozess geschätzt werden sind zudem zuverlässige Genauigkeitsangaben möglich.

4.2.3.2 Bildkoordinatenmessung

Eine wesentliche Aufgabe ist zunächst die Messung von Bildkoordinaten für die zu bestimmenden Objektpunkte in den Bildern des Mehrbildverbandes. Mit einer höheren Punktdichte auf der Gletscheroberfläche steigt die Repräsentationsgenauigkeit des zu generierenden DGM. Gleichzeitig vergrößert sich aber auch der Aufwand bei einer manuellen Messung der homologen Punkte. Deshalb soll an dieser Stelle eine Möglichkeit zur Automatisierung der Zuordnung vorgestellt werden. Probleme, die dabei durch die stark zerklüftete Oberfläche der Gletscher auftreten, werden aufgezeigt.

Abbildung 4.9 zeigt jeweils einen Ausschnitt aus einem Stereobildpaar, in welchem beispielhaft die Zuordnung von drei Punkten auf der Gletscheroberfläche dargestellt ist. Darunter sind für jeden der drei Punkte die Patches aus beiden Bildern, d.h. die Grauwerte der lokalen Umgebung der homologen Punkte abgebildet, welche ein automatisches Zuordnungsverfahren beeinflussen würden. Sie stellen Beispiele für Zuordnungsprobleme dar, die durch die unterschiedlichen Blickwinkel der Kameras auftreten können:

- Geometrische Verzerrungen, d.h. Unterschiede in Maßstab, Rotation und Perspektive (Punkt 1)
- Tiefenunterschiede im Patch (Punkt 2)
- Partielle Verdeckungen (Punkt 3)
- Mehrdeutigkeiten

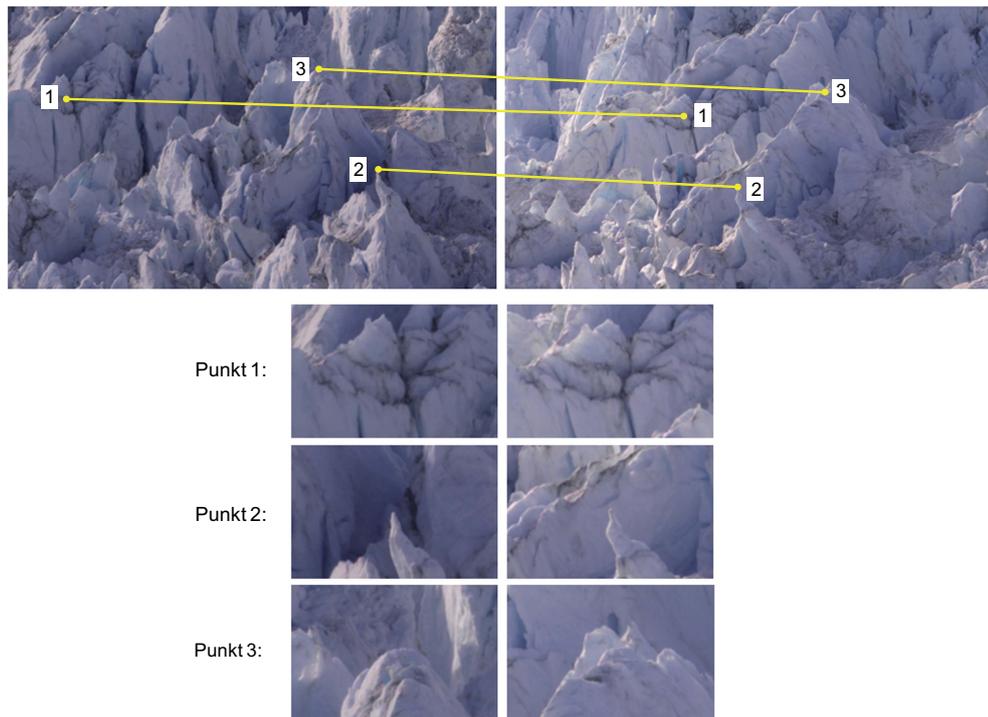


Abbildung 4.9: Zuordnungsprobleme in einem Stererobildpaar. Die Abbildung stellt drei Fallbeispiele vor, für die bei der automatischen Zuordnung homologer Punkte auf der Gletscheroberfläche Probleme entstehen können (Bsp. Eqip Sermia, August 2007).

Punkte, deren Patches durch Tiefenunterschiede und Verdeckungen stark dekorreliert sind, lassen sich automatisch kaum zuordnen, auch wenn das Merkmal visuell in beiden Bildern ggf. noch identifiziert werden kann. Geometrische Verzerrungen und Mehrdeutigkeitsprobleme können aber durch geeignete Verfahren kompensiert werden.

Um eine relativ gleichmäßige und dichte Verteilung zugeordneter Punkte über die gesamte Gletscherzunge im Bild zu gewährleisten, wird ein flächenbasierter Ansatz gegenüber einem merkmalsbasierten bevorzugt. Zur Berücksichtigung von Rotations- und Maßstabsänderungen in den Patches bietet sich hierfür insbesondere das Verfahren des Least Squares Matching in Kombination mit dem Verfahren der Kreuzkorrelation zur Näherungswertbeschaffung an. Zuordnungsfehler durch Mehrdeutigkeiten lassen sich minimieren, wenn der Suchbereich möglichst klein gehalten werden kann. Ähnlich dem Ansatz von [Otto & Chau, 1989] wird mittels einer „Region-Growing“-Strategie versucht, den Umstand auszunutzen, dass sich der Prädiktionsbereich für eng benachbarte Punkte nur geringfügig ändert. Stehen für einen Bildverband Passpunkte zur Verfügung, anhand derer eine Vororientierung der Bilder per räumlichem Rückwärtsschnitt erfolgt, oder wird die relative Orientierung der Bilder anhand von Verknüpfungspunkten bestimmt, so kann die Epipolargeometrie zur Einschränkung des Suchbereichs genutzt werden.

Eingangsdaten für das Verfahren sind die Bildkoordinaten eines Startpunktes $P_0'(x_0', y_0')$ in Bild 1 und die manuell gemessene Bildordinate x_0'' des identischen Punktes $P_0''(x_0'', y_0'')$ in Bild 2 sowie die Orientierungsparameter der beiden Bilder. Der initiale Prädiktionswert Δp_0 ergibt sich aus der Differenz von x_0'' und x_0' . Zunächst wird für den Startpunkt P_0' die Kernlinie im zweiten Bild berechnet. An der Stelle $x_0'' = x_0' + \Delta p_0$ wird der zugehörige Wert y_0'' auf der Kernlinie ermittelt. Der Suchbereich für das Matching wird nun um P_0'' in einem bestimmten Abstand entlang der Kernlinie und mit einem gewissen Puffer in y -Richtung definiert (vgl. Abbildung 4.10). Als Ergebnis erhält man die verfeinerte Position $P_0''_{neu}$ von P_0'' . Der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient aus den Patches um P_0' und $P_0''_{neu}$ dient der Beurteilung, ob die Messung übernommen werden kann oder als Fehler verworfen wird. Liegt der Kreuzkorrelationskoeffizient über dem vorgegebenen Schwellwert, ergibt sich der neue Prädiktionswert Δp_1 für den nächsten Messpunkt P_1' aus

der Differenz von $x_0''_{neu}$ und x_0' . Liegt er unter dem Schwellwert, wird der alte Prädiktionwert beibehalten, aber der Suchbereich entlang der Kernlinie um einen bestimmten Betrag vergrößert.

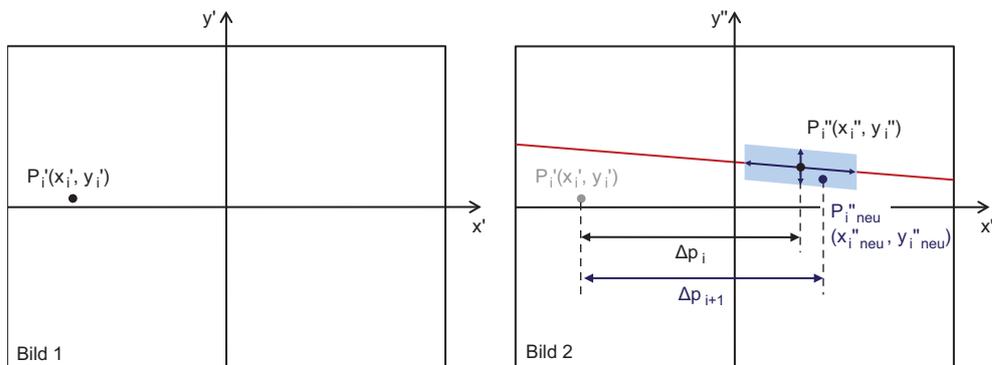


Abbildung 4.10: Definition des Suchbereichs für die automatische Punktzuordnung in Stereobildpaaren.

Für die Definition des jeweils nächsten zu messenden Punktes wird nach dem in Abbildung 4.11 dargestellten Schema verfahren. Aufgrund des relativ zur Gletscheroberfläche flachen Blickwinkels der Kamera sind für benachbarte Punkte in x' -Richtung weniger starke Tiefenunterschiede zu erwarten als in y' -Richtung. Deshalb wird jeweils eine Punktreihe in x' -Richtung vollständig gemessen, um dann auf geeignete Weise einen guten Startpunkt für die nächste um $\Delta y'$ versetzte Punktreihe bestimmen zu können. Für die Messung einer Punktreihe in x' -Richtung wird, ausgehend vom Startpunkt, zunächst der x' -Wert nach jeder Messung um einen geringen Betrag $\Delta x'$ erhöht (1). Ist das Ende des Messbereichs erreicht, erfolgt die Messung vom Startpunkt aus noch einmal in negativer x' -Richtung (2). Die Punkte des gemessenen Profils werden nun der Größe ihres Korrelationswertes nach sortiert. Ausgehend vom Punkt mit dem besten Korrelationswert wird die y' -Koordinate um $\Delta y'$ erhöht und der so erhaltene Punkt als Startpunkt für das nächste Profil übernommen, wenn seine Messung erfolgreich durchgeführt werden kann (3). Ist dies nicht der Fall, wird der Punkt mit dem zweitgrößten Korrelationswert geprüft. Dies wird entsprechend fortgesetzt, bis ein guter Startpunkt für das neue Profil in x' -Richtung gefunden wurde und dieses gemessen werden kann (4), (5). Auf diese Weise erfolgt die sukzessive Messung von Punktreihen zunächst in positiver y' -Richtung und dann, wieder ausgehend vom Startprofil, noch einmal in negativer y' -Richtung bis zum jeweiligen Ende des Messbereichs (6).

Die Abbildung 4.12 zeigt das Ergebnis des Verfahrens, angewandt auf ein Stereobildpaar vom Jakobshavens Isbræ. Im Ausgangsbild (links) ist das nach dem oben beschriebenen „Region-Growing“-Verfahren ent-

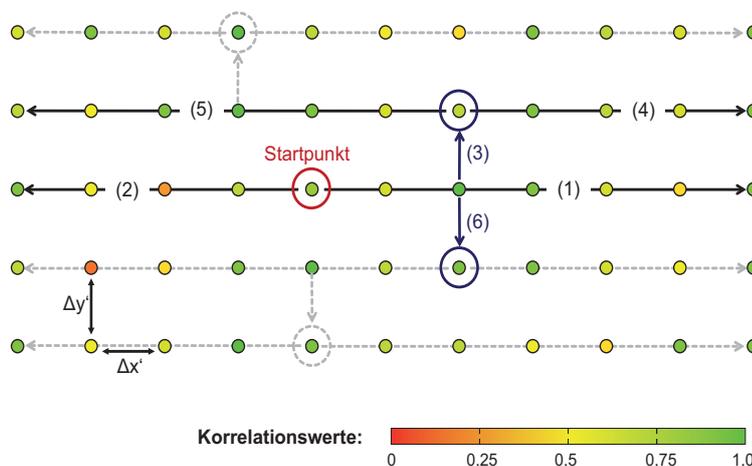


Abbildung 4.11: „Region-Growing“-Strategie.

standene regelmäßige Punktraster zu sehen. Der Stereopartner (rechts) enthält die automatisch zugeordneten Punkte. Sie sind ihrem zugehörigen Kreuzkorrelationskoeffizienten nach farbkodiert dargestellt. Für das Bildpaar werden in der ersten Variante alle gemessenen Punkte dargestellt (oben), und in der zweiten nur diejenigen Punkte, deren Korrelationswerte größer 0,5 sind (unten). Zu Fehlmessungen kommt es einerseits verstärkt im Vordergrund, wo sich aufgrund der konvergenteren Strahlenschnittwinkel Tiefenunterschiede im Patch stärker auswirken und zu großen Unterschieden führen. Zudem treten für diese Punkte auch häufiger Verdeckungen auf. Andererseits sind weiter entfernte Bereiche fehleranfällig, bei denen sehr flache Sichten zur Gletscheroberfläche bestehen und die Patches speziell in y -Richtung deshalb große Tiefenunterschiede aufweisen. Im dargestellten Beispiel konnte somit der steilere Gegenhang im oberen Drittel der Messbilder (93 % der Punktzuordnungen mit Korrelationswerten $>0,5$) wesentlich lückenloser gemessen werden als der Eisstrom im mittleren Drittel der Messbilder (42 % der Punktzuordnungen mit Korrelationswerten $>0,5$).

Verbesserungsmöglichkeiten der Methode bestehen beispielsweise darin, den Messbereich blockweise in Regionen aufzuteilen, für die jeweils unterschiedliche Parameter verwendet werden. So können für Bereiche mit großer Tiefenvariation in y -Richtung rechteckige Patches verwendet werden, deren Breite in y -Richtung deutlich schmaler ist als in x -Richtung. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den Suchbereich durch Kernlinienschnitte bei der gleichzeitigen Auswertung von mindestens drei Bildern des Bildverbandes einzuzugrenzen.

Es ist zu schlussfolgern, dass die beschriebene Methode zur automatischen Punktzuordnung nicht ausschließlich, sondern nur unterstützend zur Bildpunktmesung verwendet werden kann. Bereiche, in denen die automatische Messung keine zuverlässigen Ergebnisse liefert, müssen durch manuelle Messungen ergänzt werden.

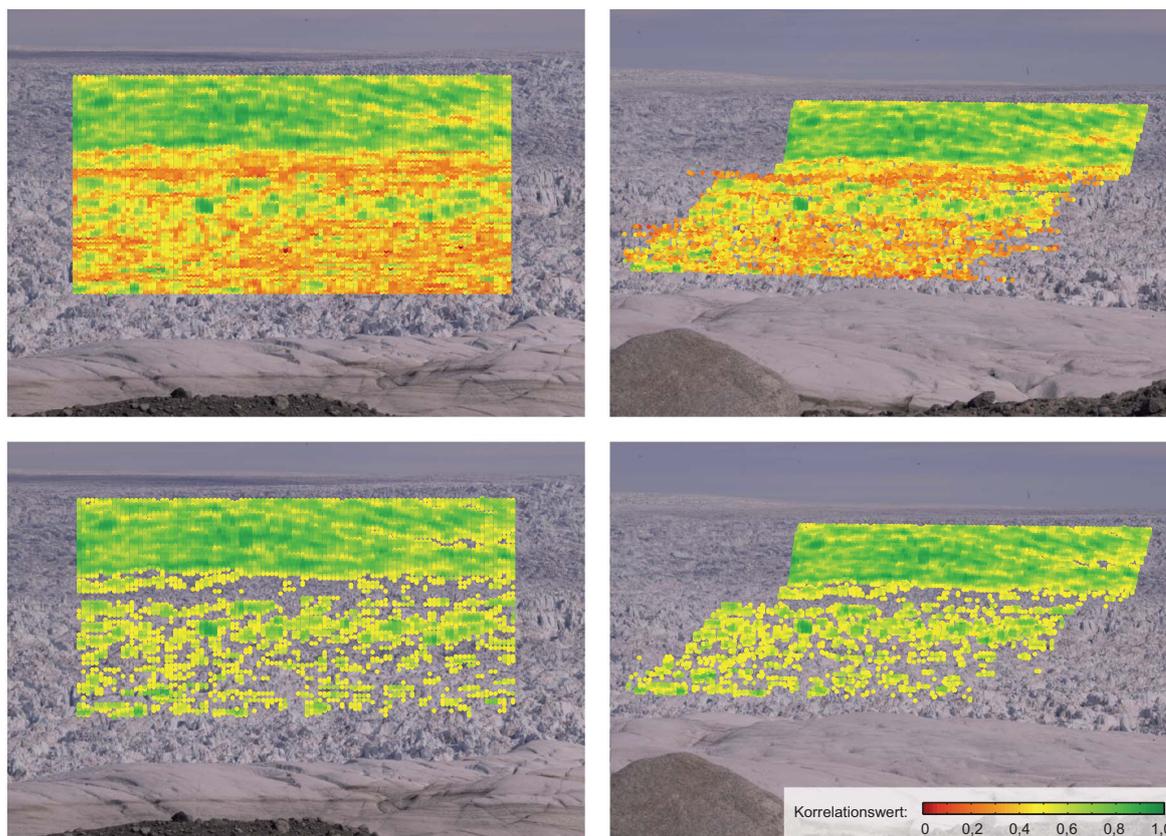


Abbildung 4.12: Ergebnis der automatischen Messung homologer Punkte in einem Stereobildpaar (Bsp. Jakobshavn Isbræ, 2007). Dargestellt werden das Referenzbild mit einem regelmäßigen Punktraster (links) und ein Stereopartner mit dem Ergebnis der automatischen Punktzuordnung (rechts). Die zugeordneten Punkte sind ihrem Korrelationswert nach farbkodiert. Im oberen Bildpaar werden alle gemessenen Punkte dargestellt. Das untere Bildpaar zeigt die gleichen Messergebnisse, die aber nach Zuordnungsqualität gefiltert wurden. Es sind nur noch Punktpaare mit Korrelationswerten $> 0,5$ abgebildet.

4.2.3.3 Bündelblockausgleichung

Für die Auswertung der Bildverbände mittels Bündelblockausgleichung sind folgende Eingangsdaten bereitzustellen:

- Bildkoordinaten als Beobachtungen
- Werte für alle im Vorfeld bestimmten Parameter (z. B. Kalibrierparameter)
- Passpunktinformationen zur Datumsfestlegung
- Näherungswerte für alle Unbekannten

Bildkoordinaten

Als Beobachtungen für die Bündelblockausgleichung gehen die in den Bildern des Bildverbandes gemessenen Bildkoordinaten für die Objektpunkte ein (vgl. Kapitel). Dabei kann unterschieden werden in Punkte, welche vorrangig die Strahlenschnittgeometrie bei der Auswertung des Bildverbandes stärken sollen, und Punkte auf der Gletscheroberfläche, deren Objektkoordinaten von Interesse sind. Für Erstere ist eine gute Verteilung im Überlappungsbereich der Bilder anzustreben, weshalb sie hauptsächlich auf den Uferhängen zu beiden Seiten eines Gletscherflusses definiert werden. Die Anforderung an die Verteilung und Punktdichte Letzterer ist, dass sie die im Sequenzbild sichtbare Gletscheroberfläche gut repräsentieren.

Die einzelnen Bilder des photogrammetrischen Netzes sowie das zu integrierende Sequenzbild sollten optimalerweise zeitnah aufgenommen werden. Ist dies der Fall, können die Bildkoordinaten der Objektpunkte auf der Gletscheroberfläche in allen Bildern gemessen und als Beobachtungen verwendet werden. Für einen Fall, bei dem die Sequenzmessung nur mit gewissem zeitlichen Abstand zur Aufnahme des Bildverbandes gestartet werden konnte, wird das Sequenzbild lediglich über Punkte auf unbewegtem Gelände mit eingebunden, um die Orientierung der Sequenzkamera bestimmen zu können. Es trägt in diesem Fall aber nicht zur Bestimmung der Objektpunkte auf der Gletscheroberfläche bei.

Unbekannte

Aufgrund der schwachen Aufnahmekonfigurationen der Bildverbände wird auf die simultane Mitbestimmung von Zusatzparametern während der Ausgleichung verzichtet. Die im Feld realisierbaren Konfigurationen sind nicht geeignet, um Korrelationen zwischen den Parametern der inneren Orientierung und den Objektkoordinaten zu verringern. Die Parameter der inneren Orientierung der verwendeten Kameras sowie ihre Verzeichnungsparameter werden deshalb vorab per Testfeldkalibrierung mit guter Genauigkeit bestimmt und als fehlerfrei angenommene, feste Größen in die Berechnung eingeführt. Nachteilig wirkt sich in diesem Fall allerdings eine zeitliche Instabilität der Zusatzparameter aus, da die Kalibrierung nicht zeitnah zur Messung im Feld durchgeführt werden kann.

Für die meisten Bildverbände liegen zudem auch die mit GPS gemessenen Koordinaten der Kamerapositionen mit guter Genauigkeit vor (1–2 cm). Auch diese werden zur Vermeidung hoher Korrelationen als feste Werte übernommen. Die in der Ausgleichung zu bestimmenden Unbekannten sind somit die Rotationsparameter für die einzelnen Kamerastandpunkte und die Objektpunktkoordinaten.

Passpunkte

Passpunkte dienen einerseits zur Datumsfestlegung für das photogrammetrische Netz und andererseits vereinfachen sie die Bestimmung der Näherungswerte für die Unbekannten. Zur Lagerung des Netzes in einem übergeordneten Koordinatensystem sind drei Translationen, drei Rotationen und ein Maßstab zu fixieren. Mit mindestens zwei Passpunktinformationen in beiden Lagekoordinatenrichtungen und drei Höhenpasspunktinformationen kann der Datumsdefekt behoben werden. Stehen keine Koordinaten für die Kamerapositionen zur Verfügung, sind also z. B. mindestens zwei Vollpasspunkte und ein Höhenpasspunkt in die Ausgleichung einzuführen. Da aber bei den meisten der gemessenen Bildverbände zumindest die beiden äußersten Kamerapositionen mittels GPS bestimmt wurden, sind die Lage und der Maßstab des Netzes darüber schon definiert.

Lediglich die Rotation um die Basis zwischen den beiden Kamerastandpunkten muss noch mittels eines Höhenpasspunktes fixiert werden.

Näherungswerte

Aufgrund der nichtlinearen Verbesserungsgleichungen sind für alle unbekanntes Größen, die in der Ausgleichung geschätzt werden, Näherungswerte bereitzustellen. Möglichkeiten zur automatischen Näherungswertbestimmung werden z. B. in [Luhmann, 2010] beschrieben. Für die meisten Gletscher wurden genügend Passpunktinformationen bestimmt, um die Bilder zunächst näherungsweise per Rückwärtsschnitt orientieren zu können. Aufgrund der bekannten Positionen der Kameras sind dabei nur die Rotationen zu ermitteln. Mit den vororientierten Bildern können anschließend die Näherungskordinaten der Objektpunkte durch strengen räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmt werden.

Software

Für eine Berechnung mit den oben beschriebenen Konfigurationen bestehen bestimmte Anforderungen an die Software der Bündelblockausgleichung. Zum einen soll jeder beliebige Parameter entweder als Unbekannte oder als fester Wert eingeführt werden können. Zum anderen soll die Möglichkeit bestehen, für Passpunkte flexibel entscheiden zu können, welche Koordinate als Passpunktinformation eingeht und welche gegebenenfalls als Unbekannte mitbestimmt wird. Bei kommerzieller Software steht häufig die anwendungsspezifische Benutzerfreundlichkeit bzw. ein hoher Automatisierungsgrad, aber weniger eine hohe Flexibilität der Konfigurierbarkeit im Vordergrund. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Arbeit die von [Schneider, 2008] zu Forschungszwecken entwickelte Programmbibliothek zur integrierten Bündelblockausgleichung genutzt.

4.2.3.4 Nutzbarkeit von Structure-From-Motion(SFM)-Tools

Die in der Computervision als „Structure from Motion“ bezeichneten Techniken haben die automatische Ableitung von 3D-Objektgeometrien aus Bildern, welche sequentiell aufgenommen werden und dabei einer Positions- und Orientierungsänderung unterliegen, ohne die Verwendung initialer Vorinformationen (z. B. Näherungswerte) zum Ziel. Die prinzipielle Vorgehensweise besteht in der automatischen Suche nach identischen Punkten in den Bildern, in der Vororientierung der Bilder sowie in einer Bündelblockausgleichung. Für die Bestimmung homologer Punkte werden merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren genutzt, wie der SIFT- oder SURF-Algorithmus. Eine Vororientierung der Bilder erfolgt, indem auf Basis der homologen Punkte die relative Orientierung der Bilder zueinander bestimmt wird. In einem iterativen Vorgang werden durch die wechselweise Berechnung räumlicher Vorwärts- und Rückwärtsschnitte Näherungskordinaten für alle 3D-Objektpunkte und Kameraparameter bestimmt. Mittels Bündelblockausgleichung werden schließlich die Orientierungsparameter aller Kameras und die 3D-Koordinaten der Objektpunkte ermittelt. Eine Verdichtung der unregelmäßig verteilten Punkte kann zusätzlich durch flächenbasierte Zuordnungsverfahren unter Nutzung der Epipolareometrie erfolgen.

In den letzten Jahren wurden mehrere sogenannte „SFM-Tools“ entwickelt, die nach diesem Prinzip arbeiten. Diese stehen als Open Source, als Webdienste oder auch als kommerzielle Programme zur Verfügung. Eines der bekanntesten Open-Source-Programme aus diesem Bereich ist „Bundler“ [Snavely u. a., 2006], dessen erster Release 2008 erfolgte. Für eine Erhöhung der Punktdichte wird „Bundler“ häufig in Kombination mit „PMVS2“ (Patch-based Multi-view Stereo) [Furukawa & Ponce, 2010] eingesetzt, welches eine flächenbasierte Zuordnung von Punkten auf Kernlinien ermöglicht. Bei einem Test mehrerer SFM-Programme von [Neitzel & Klonowski, 2011] erwies sich das kommerzielle Programm „AgiSoft PhotoScan“ hinsichtlich erzeugter Punktdichte und lückenfüllender Punktabdeckung von Objekten als das im Vergleich zu „Bundler“ leistungsfähigere Werkzeug.

Prinzipiell bieten sich die SFM-Tools auch für die Objektpunktbestimmung der Gletscheroberflächen an, da sie effiziente Methoden der Bildpunktmessung, Kameraorientierung und 3D-Koordinatenbestimmung in sich vereinen. Nachteilig ist aber, dass für die berechnete 3D-Geometrie keine Datumsfestlegung möglich ist

und keine Genauigkeitsschätzung für die ermittelten Werte erfolgt. Hinsichtlich der Bündelblockausgleichung bieten die genannten Programme aus diesem Grund keine verwendbare Alternative.

Ihr größtes Potenzial hinsichtlich der Erstellung digitaler Geländemodelle von Gletschern ist eher in der automatischen und dichten Messung homologer Bildpunkte und in der automatischen Vororientierung von Bildern zu sehen. Zur Evaluierung des Potenzials der automatischen Bildpunktmessung wurde mit dem Programm „PhotoScan“ exemplarisch ein Test mit einem Mehrbildverband vom Jakobshavn Isbræ durchgeführt (vgl. Abbildung 4.13). Im oberen Bild ist das Zuordnungsergebnis zwischen den beiden Bildern mit der größten Basis dargestellt. Die hier erzielte Punktdichte repräsentiert die Gletscheroberfläche nur unzureichend. Auch für die merkmalsbasierte Zuordnung mittels SIFT-Algorithmus sind konvergente Aufnahmen der Gletscheroberfläche problematisch. Das Hinzufügen weiterer sieben Bilder (vgl. Abbildung 4.13, unten) erhöht die Anzahl und Dichte der detektierten homologen Punkte deutlich. Die meisten Punkte resultieren dabei aber aus Zuordnungen zwischen Bildern mit schleifender Strahlenschnittgeometrie.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich SFM-Programme prinzipiell zur Unterstützung der Messung homologer Punkte in Bildverbänden eignen. Unter dem Aspekt einer besseren Strahlenschnittgeometrie und um eine regelmäßige Verteilung der Punkte auf der Gletscheroberfläche zu gewährleisten, sind zusätzliche manuelle Messungen oder die Anwendung automatischer, flächenbasierter Zuordnungverfahren zu empfehlen. Für diese kann z. B. nach der unter Kapitel 4.2.3.2 beschriebenen, für die Geometrie der Gletscheraufnahmen optimierten, Strategie eine Einschränkung des Suchbereichs auf der Kernlinie vorgenommen werden.

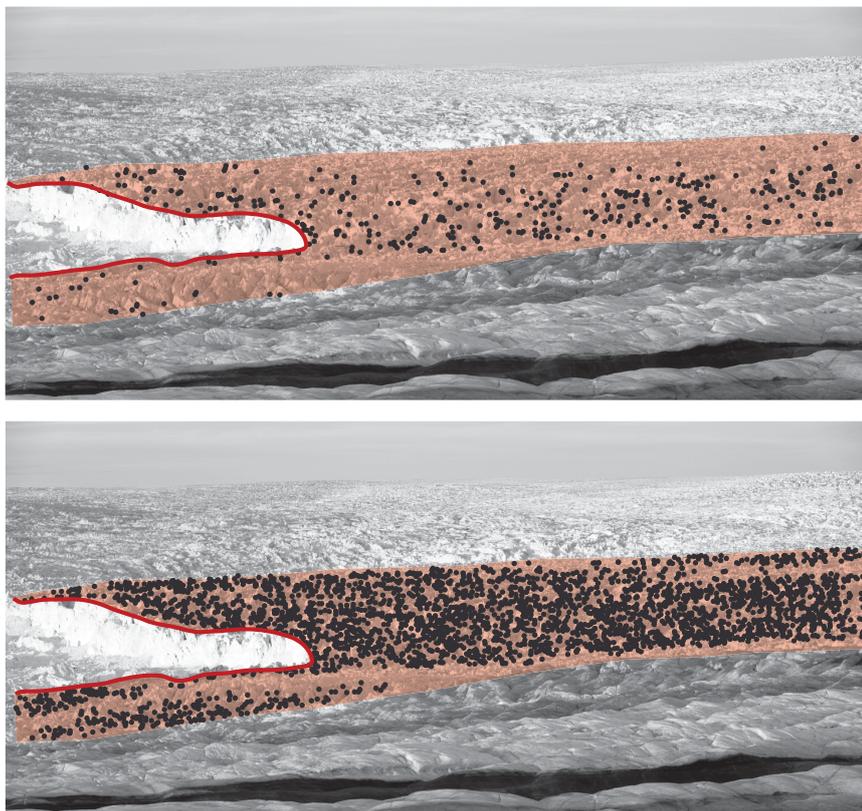


Abbildung 4.13: Test der Bildpunktmessung eines Bildverbandes mittels AgiSoft Photoscan (Bsp. Jakobshavn Isbræ, Mai 2010). Die Abbildung zeigt die Bildpunkte, die in den beiden mit der größten Distanz zueinander aufgenommenen Bildern (oben) und die bei Verwendung aller neun Bilder des Bildverbandes (unten) zugeordnet werden konnten. Dargestellt werden jeweils nur die Punkte im Bereich der fließenden Gletscherzunge (rot eingefärbt). Die rote Linie markiert die Oberkante der Gletscherfront.

4.2.3.5 Genauigkeitsaspekte

Von besonderer Bedeutung für die weitere Auswertung ist die erreichbare Genauigkeit der Objektpunkte in Tiefenrichtung, da diese die Skalierungsgenauigkeit der Trajektorien beeinflusst (vgl. Kapitel 4.2.4.4). Zwei wesentliche Einflussfaktoren sind dabei einerseits die Netzkonfiguration, die im Gelände realisierbar ist, und zum anderen die Bildpunktmessgenauigkeit bzw. die Punktzuordnungsgenauigkeit in den Bildern. Letztere wird bei schnellfließenden Gletschern insbesondere durch den zeitlichen Abstand zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Bilder des Bildverbandes beeinflusst. Die Netze werden aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten zur Standpunktwahl am Messobjekt als konvergente Stereobildkonfiguration mit einer – den örtlichen Gegebenheiten nach – möglichst großen Basis B angelegt und dann zur Stärkung der Geometrie mit Zwischenstandpunkten zu einem Mehrbildverband erweitert. Zur Abschätzung der Auswirkung der genannten Einflussfaktoren soll hier vereinfacht vom Stereornormalfall ausgegangen werden. Für den Fehler eines Objektpunktes in Tiefenrichtung s_T in der Entfernung D gilt dann Gleichung 4.9.

$$s_T = \frac{D^2}{B \cdot c} \cdot s_{px} \quad (4.9)$$

Der Fehler der Parallaxe s_{px} setzt sich dabei zusammen aus der Bildpunktmessgenauigkeit $s_{xy'}$ und der Bewegung des Objektpunktes (Geschwindigkeit v) orthogonal zur Tiefenrichtung während des Zeitintervalls Δt zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Bilder (vgl. Gleichung 4.10).

$$s_{px} = \sqrt{2} \cdot s_{xy'} + v \cdot \Delta t \cdot \frac{c}{D} \quad (4.10)$$

Da sich die Genauigkeit in Tiefenrichtung einerseits proportional zum Quadrat der Entfernung des Objektpunktes verschlechtert und sich andererseits aber verbessert, je größer die Basis gewählt werden kann, ist das zu realisierende Verhältnis von Basislänge und maximaler Messentfernung entscheidend für die erreichbaren Genauigkeiten bei der Bestimmung der 3D-Koordinaten von Objektpunkten auf der Gletscheroberfläche. Das folgende Rechenbeispiel soll die zu erwartende Größenordnung des Objektpunktfehlers bei der Verwendung von für die Gletschermessungen typischen Werten veranschaulichen. Dabei wird der Einfluss der Bewegung des Gletschers zunächst vernachlässigt. Für eine Basislänge von 200 m, eine Kamerakonstante von 50 mm und eine Bildpunktmessgenauigkeit von einem Pixel (8 μm) ergibt sich für einen Objektpunkt in der maximalen Messentfernung von 5.000 m ein Fehler in Tiefenrichtung von 28 m.

Betrachtet man nun zusätzlich den Einfluss der Objektpunktbewegung, so besteht ein linearer Zusammenhang zwischen einer größeren Zeitdifferenz bei der Aufnahme der Bilder und der Verschlechterung von s_T . Bei einer Fließgeschwindigkeit des Gletschers von 20 m/d hätte eine Zeitdifferenz von einer halben Stunde zur Folge, dass sich der Objektpunktfehler in Tiefenrichtung auf 43 m erhöht. Diesem Umstand war deshalb insbesondere am Jakobshavn Isbræ mit einer schnellen Durchführung bei der Aufnahme des Bildverbandes Rechnung zu tragen.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Skalierungsgenauigkeit der Trajektorien ist die Höhengenaugigkeit der Objektpunkte. Der Höhenfehler s_H eines berechneten Objektpunktes kann mittels Gleichung 4.11 näherungsweise abgeschätzt werden. Mit den oben genannten Werten ergibt sich hier ein Fehler von 0,8 m. Bei diesem Beispiel ist die Höhengenaugigkeit für einen Objektpunkt (am Rande des Messbereichs) also um den Faktor 30 besser als in Tiefenrichtung.

$$s_H = \frac{D}{c} \cdot s_{xy'} \quad (4.11)$$

4.2.4 Distanz-Lookup-Tabelle

Zur Übertragung der Trajektorien vom Bildraum in den Objektraum wird für jeden gemessenen Punkt eine Information über seine Distanz zur Kamera benötigt (vgl. Kapitel 4.2.7). Kenntnisse über die Entfernungen sind aber auch für das Tracking in den Bildsequenzen selbst (vgl. Kapitel 4.2.5) und für die Bestimmung der Kamerabewegungskorrektur (vgl. Kapitel 4.2.6) von Interesse. Dieses Kapitel beschäftigt sich damit, die in den folgenden Arbeitsschritten benötigten Distanzwerte in geeigneter Weise bereitzustellen. Als Ergebnis soll eine Distanz-Lookup-Tabelle erstellt werden, deren Matrix dem Pixelraster des Startbildes einer Sequenz entspricht und die für jedes Pixel die entsprechende Entfernung zum Objekt enthält.

4.2.4.1 Methodenwahl

Kann bei der Auswertung des Bildverbandes ein dichtes Raster von Objektpunkten mit guter Verteilung bestimmt werden, so besteht die einfachste Möglichkeit zur Skalierung der Trajektorien darin, dass in den Bildsequenzen nur Punkte gemessen werden, denen direkt ein berechneter Objektpunkt und damit auch ein Distanzwert zugeordnet werden kann. Das heißt, die Bildkoordinaten im Sequenz-Startbild, welche in die Bündelblockausgleichung als Beobachtungen eingehen, werden gleichzeitig auch als Ausgangspunkte für die Trajektorienmessung genutzt. Der Vorteil ist, dass die Skalierungsgenauigkeit nur von der Objektpunktgenauigkeit abhängt und sich nicht zusätzlich aufgrund von Interpolationen verschlechtert. Die Methode hat aber zum einen den Nachteil, dass das Sequenz-Startbild zeitnah mit dem Bildverband aufgenommen werden muss (vgl. Kapitel 4.2.3.5), und dass zum anderen das Potenzial, welches die Auflösung der Sequenzkamera bietet, um räumlich hoch aufgelöste Bewegungsvektorfelder zu messen, nicht ausgeschöpft wird. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn – aufgrund der in Kapitel 4.2.3.2 geschilderten Problematik – die Bildpunktmessung für einen Bildverband nur manuell erfolgen kann.

Um die Möglichkeit zu schaffen, unabhängig von der Anzahl der vorhandenen Objektpunkte, ein beliebig dichtes Punktraster in einer Bildsequenz messen zu können, müssen Distanzwerte für jedes Pixel des Sequenz-Startbildes mittels eines geeigneten Verfahrens interpoliert werden. Dies geschieht im Folgenden durch Triangulation der Objektpunkte der Gletscheroberfläche und durch Verschneidung der Bildstrahlen des Sequenz-Startbildes mit dem so entstandenen TIN (Triangulated Irregular Network).

4.2.4.2 TIN-Generierung

Zur Erstellung eines digitalen Geländemodells werden alle berechneten Objektpunkte der Gletscheroberfläche mittels Delaunay-Triangulation vermascht [Delaunay, 1934]. Das so entstandene Dreiecksnetz enthält in den Randbereichen Dreiecke, die aufgrund ihrer Größe oder aufgrund eines sehr spitzen Winkels, als nicht repräsentativ bewertet werden müssen. Zum Ausschluss dieser Dreiecke werden die kleinste Seite a und die größte Seite b im Dreieck betrachtet sowie die Höhe h zur Basis b . Ein Randdreieck wird aus dem TIN gelöscht, wenn b einen bestimmten Schwellwert überschreitet, um zunächst unverhältnismäßig große Dreiecke, unabhängig von ihrer Form, auszuschließen. Zusätzlich werden aber auch kleinere Dreiecke verworfen, wenn die Verhältnisse b/a und b/h groß sind und einen entsprechenden Schwellwert überschreiten. Abbildung 4.14 (links) zeigt ein bereinigtes TIN am Beispiel des Jakobshavn Isbræ.

In speziellen Fällen ist eine Extrapolation des TIN über den durch die gemessenen Objektpunkte eingeschlossenen Bereich hinaus notwendig. Dies ist vor allem bei längeren Aufnahmezeiträumen (mehrere Wochen) an einem schnellfließenden Gletscher der Fall. Zum Zeitpunkt der Installation und Abholung der Kamera besteht die Möglichkeit der Aufnahme eines Bildverbandes zur Messung von Objektpunktkoordinaten. Das abgeleitete TIN überdeckt also maximal nur den Bereich der Gletscherzunge, der zu diesen beiden Zeitpunkten gemessen werden kann. Allerdings ist nicht gewährleistet, dass die Frontlage zu einem dieser Zeitpunkte der vordersten Gletscherfrontlage innerhalb des Aufnahmezeitraums der Bildsequenz entspricht. Für die Skalierung frontnaher Trajektorien vor größeren Kalbungsereignissen können somit gegebenenfalls aus dem vorhandenen TIN keine Distanzwerte abgeleitet werden. Um auch diese Messwerte in den Objektraum überführen zu können, wird im Folgenden eine Möglichkeit vorgestellt, das gemessene TIN durch Extrapolation auf die Breite des Bereichs auszudehnen, der durch das horizontale Blickfeld der Sequenzkamera abgedeckt wird.

In einfachster Näherung wird mit den Objektpunkten auf dem fließenden Bereich der Gletscherzunge eine ausgleichende Ebene berechnet. Es wird dann der horizontale Öffnungswinkel der Kamera in den Objektraum übertragen. Entlang seiner Grenzen werden nun zusätzliche Objektpunkte $P_i (X_i, Y_i)$ in der Horizontalebene definiert, bis zu welchen das TIN ausgeweitet werden soll. Die Höhen Z_i dieser Punkte ergeben sich aus der Ebenengleichung der vorher ermittelten ausgleichenden Ebene. Die Liste der ursprünglich zu triangulierenden Objektpunkte wird um die zusätzlichen Objektpunkte $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$ erweitert und es resultiert ein TIN (vgl. Abbildung 4.14, rechts), anhand dessen über die gesamte Breite des Sequenzbildes Entfernungen ableitbar sind. Zu einer besseren Approximation der Gletscheroberfläche kann alternativ auch die Einpassung geeigneter ausgleichender Funktionen (im einfachsten Fall Geraden) in Punkte erfolgen, die sich innerhalb definierter Schnitte der Objektpunktwolke in Fließrichtung des Gletschers befinden. Dies würde eine bessere Modellierbarkeit des gekrümmten Querprofils der Gletscherzunge ermöglichen.

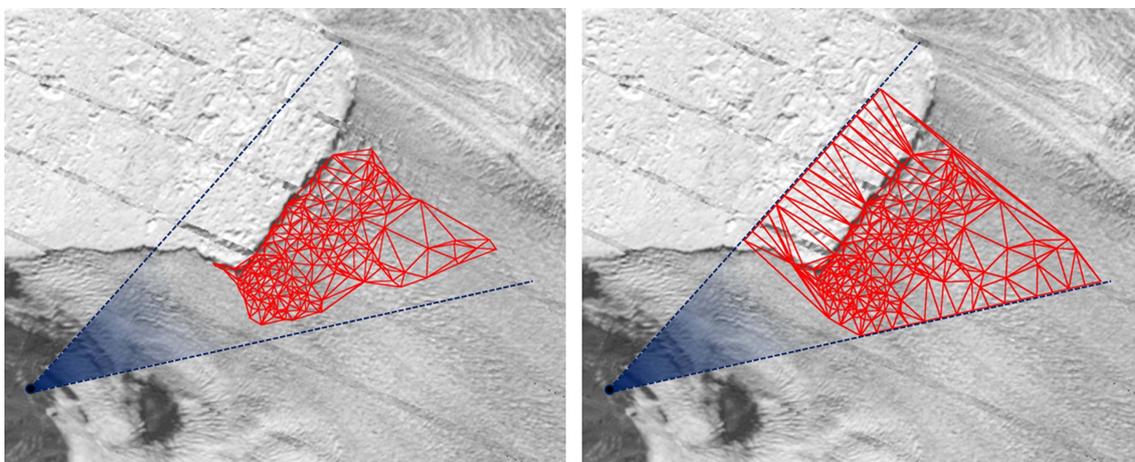


Abbildung 4.14: TIN-Generierung (Bsp. Jakobshavn Isbræ, 2010). Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Triangulation von Objektpunkten auf der Gletscheroberfläche als Projektion in ein Landsat7-Satellitenbild (bearbeitet). Standpunkt und Blickfeld der Kamera sind blau dargestellt. Im linken Bildausschnitt wurden ausschließlich gemessene Objektpunkte trianguliert. Der rechte Bildausschnitt zeigt die Extrapolation des TIN auf das gesamte Kamerablickfeld. (Quelle Landsatszene: <http://landsat.usgs.gov/>)

4.2.4.3 Bestimmung der Distanzwerte

Der interessierende Messbereich für den Distanzwerte abgeleitet werden sollen, wird zunächst im Sequenz-Startbild maskiert. Für jedes Pixel innerhalb des maskierten Bereichs kann dann mittels der Orientierungsparameter der Sequenzkamera der Bildstrahl im Objektraum rekonstruiert werden. Nun wird der Bildstrahl jeweils mit der durch jedes Dreieck des TIN aufgespannten Ebene verschnitten und es wird geprüft, ob der Schnittpunkt innerhalb des Dreiecks liegt. Wurde das entsprechende Dreieck gefunden, kann die Distanz zwischen Kameraprojektionszentrum und Schnittpunkt berechnet und für das entsprechende Pixel in der Lookup-Tabelle abgespeichert werden. Da jedes Dreieck des TIN eine ebene Fläche aufspannt, erfolgt eine lineare Interpolation der Distanzwerte zwischen den gemessenen Objektpunkten, die als Stützpunkte des TIN dienen.

4.2.4.4 Genauigkeitsaspekte

Bei der Verschneidung der Bildstrahlen mit dem Geländemodell beeinflussen die Genauigkeit des TIN und die der Kameraorientierung zusammen die Genauigkeit des Schnittpunktes und damit die Genauigkeit der berechneten Distanzwerte. Im Folgenden sollen vier Faktoren näher betrachtet werden, die einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Distanzen haben:

- Repräsentationsgenauigkeit des TIN
- Höhengenaugigkeit des TIN
- Lagegenauigkeit des TIN in Tiefenrichtung
- Genauigkeit des Orientierungswinkels ω der Sequenzkamera (Drehwinkel um die x -Achse des Kamerakoordinatensystems)

Durch die zur Gletscheroberfläche relativ flachen Blickwinkel der Kameras kann es, je nach Topografie der Gletscherzunge, zu verdeckten Bereichen kommen, innerhalb derer keine Objektpunkte bestimmt werden können (vgl. Abbildung 4.15 a)). Diese sichttoten Bereiche werden im TIN mit langen Dreiecken überbrückt. Sie stellen allerdings für die weitere Auswertung keinen Informationsverlust dar, da für sie auch im Sequenzbild keine Bildinformation enthalten ist. Problematisch ist in diesem Zusammenhang jedoch, wie gut die Grenzpunkte für solche Tiefensprünge im TIN erfasst werden können. Als Grenzpunkte werden hier der höchste Punkt G_{N1} vor und der niedrigste Punkt G_{F1} hinter dem abgeschatteten Bereich verstanden. Werden diese Punkte nicht exakt bestimmt, sondern stattdessen Punkte in das TIN integriert, die um einen gewissen Betrag davon abweichen (G_{N2} und G_{F2}), so führt dies bei der Verschneidung der Bildstrahlen mit dem TIN zu Distanzfehlern für alle Pixel im Bereich $\Delta y'$ des Bildes. Beispielhaft ist dies in Abbildung 4.15 a) für einen Bildstrahl dargestellt, dessen Distanzwert sich aus dem Schnittpunkt in P_1 ergeben würde. Durch die unzureichende Repräsentationsgenauigkeit des TIN in der Umgebung des abgeschatteten Bereichs resultiert letztendlich ein fehlerhafter Distanzwert aus dem Schnittpunkt in P_2 . Folglich ist bei der Bildpunktmessung im Mehrbildverband auf die Topografie der Gletscheroberfläche zu achten. Bruchkanten können durch eine gezielte Messung von Punkten auf der Kante und mit größerer Punktdichte exakter erfasst werden.

Der Höhenfehler s_H und der Lagefehler des Geländemodells in Tiefenrichtung s_T wirken sich, wie in Abbildung 4.15 c) und Abbildung 4.15 d) dargestellt, auf die Genauigkeit der Distanzen aus. Zudem werden Di-

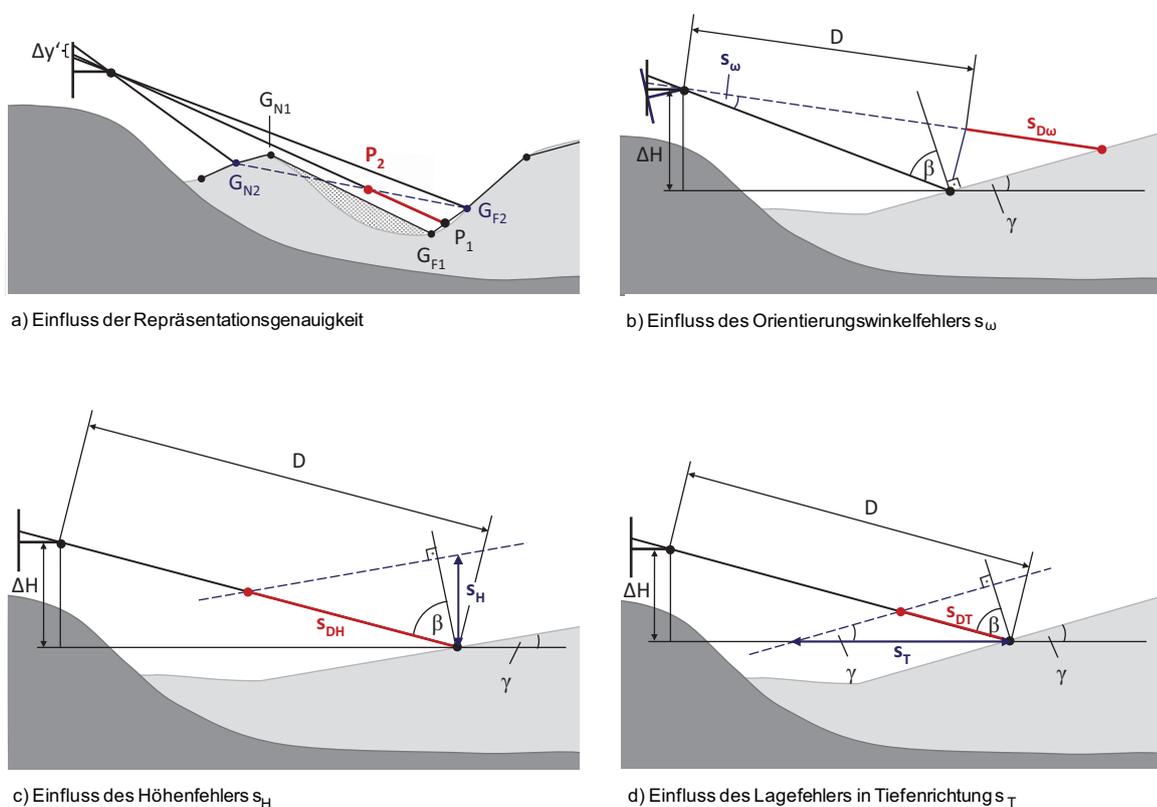


Abbildung 4.15: Einflüsse auf die Distanzgenauigkeit. Die Abbildung zeigt, wie sich einzelne Fehlereinflüsse (blau dargestellt) auf die Distanzen auswirken. Der jeweils resultierende Fehler der Distanz wird rot dargestellt.

stanzfehler auch durch fehlerhafte Orientierungswinkel der Sequenzkamera verursacht. Abbildung 4.15 b) veranschaulicht den Einfluss des Orientierungswinkelfehlers s_ω . Zur vereinfachten Betrachtung wird hier von einer ebenen Gelände­fläche in der Umgebung des Schnittpunktes von Bildstrahl und Geländemodell ausgegangen. Die resultierenden Distanzfehler s_{DH} , s_{DT} und $s_{D\omega}$ werden dabei entsprechend den Gleichungen 4.12 durch den Winkel β beeinflusst, welchen der Bildstrahl und die Flächennormale des Geländes einschließen, bzw. durch die Neigung der Geländeoberfläche γ . Je größer der Winkel β ist, d. h. je schleifendere Schnitte zwischen den Bildstrahlen und der Geländeoberfläche existieren, desto stärker wirken sich die oben genannten Fehler auf die Distanzgenauigkeit aus.

$$\begin{aligned} s_{DH} &= s_H \cdot \frac{|\cos(\gamma)|}{|\cos(\beta)|} \\ s_{DT} &= s_T \cdot \frac{\sin(\gamma)}{|\cos(\beta)|} \\ s_{D\omega} &= D \cdot \left(\frac{|\cos(\beta)|}{|\cos(\beta + s_\omega)|} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Folgendes Rechenbeispiel soll die Größenordnung der zu erwartenden Distanzfehler verdeutlichen: Für einen Punkt P , der sich in einer Entfernung von $D = 5.000$ m von der Kameraposition befindet und um $\Delta H = 200$ m tiefer liegt als die Kamera, ergibt sich mit Gleichung 4.13 bei einer Geländeneigung von $\gamma = 3^\circ$ ein Winkel zwischen der Flächennormalen der Gletscheroberfläche und dem Bildstrahl von $\beta = 84,7^\circ$.

$$\beta = \arccos\left(\frac{\Delta H}{D}\right) - \gamma \quad (4.13)$$

Der Distanzfehler s_{DH} , der durch den Höhenfehler des TIN verursacht wird, ergibt sich somit als das 11,5-fache von s_H , wogegen der Distanzfehler s_{DT} , der aus dem Lagefehler s_T resultiert, dem 0,5-fachen von s_T entspricht. Die Auswirkungen des Höhenfehlers sind somit deutlich größer als die des Lagefehlers in Tiefenrichtung. Nimmt man in Anlehnung an das Rechenbeispiel in Kapitel 4.2.3.5 für das Geländemodell in der Umgebung von P als Höhenfehler $s_H = 1,0$ m und als Lagefehler in Tiefenrichtung $s_T = 28,0$ m an sowie den Orientierungswinkelfehler s_ω mit $0,05^\circ$, dann resultieren s_{DH} mit 10,8 m und s_{DT} mit 15,9 m. Der Einfluss des Orientierungswinkelfehlers $s_{D\omega}$ entspricht 0,95 % der Distanz D und ergibt sich somit zu 47,6 m.

4.2.5 Bildsequenzmessung

Die eigentliche Messung der Gletscherbewegung erfolgt zunächst im Bildraum. Dazu werden im ersten Bild einer Sequenz interessierende Punkte auf der Gletscheroberfläche definiert. Für jeden einzelnen Punkt erfolgt mittels eines geeigneten Bildzuordnungsverfahrens die Bestimmung von Translationen zwischen Bildpaaren einer Sequenz. Aus diesen Einzelmessungen lässt sich die Bewegungskurve (Trajektorie) eines Punktes im Bildraum für den Zeitraum der Bildsequenz ableiten.

4.2.5.1 Methode

Als Basisverfahren für die Bildzuordnung wurde das Least Squares Matching mit vorgeschaltetem Kreuzkorrelationsverfahren zur Näherungswertbeschaffung gewählt. Gründe dafür sind die direkte Bestimmbarkeit subpixelgenauer Ergebnisse mit Genauigkeitsmaßen sowie die Robustheit des Verfahrens (vgl. auch Kapitel 4.1.1.2). Vor der Anwendung des LSM erfolgt eine lokale radiometrische Anpassung hinsichtlich Helligkeit und Kontrast für die beiden zu vergleichenden Patches.

Als Transformationsparameter werden lediglich die beiden Translationen bestimmt, da keine signifikanten Rotations- und Maßstabseinflüsse zu erwarten sind. Dies ist einerseits durch die hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Bildsequenzen begründet, aufgrund derer bei zwei aufeinanderfolgenden Bildern für kleine Bildausschnitte von einer geradlinigen Bewegung des Gletschers ausgegangen werden kann. Andererseits sind durch das Messprinzip der statischen Kamera keine affinen Verzerrungen zwischen zwei Bildern zu erwarten, wie sie eine sich ändernde Kameraorientierung verursachen würde.

Aufgrund der Aufnahmeintervalle von 10 min bis 30 min und der Messzeiträume von Tagen bis Wochen sind die Bildsequenzen stark vom Tagesgang der Sonne beeinflusst. Die durch die zerklüftete Gletscheroberfläche und an Gletscherspalten entstehenden Schatten „wandern“ somit in den Bildsequenzen über die Gletscheroberfläche (vgl. Abbildung 4.16). Die Schattenbewegung überlagert dabei die Bewegung des Gletschers und verfälscht das Zuordnungsergebnis. Bei der einfachen Anwendung des oben beschriebenen Bildzuordnungsverfahrens wird dieses Problem nicht berücksichtigt. Es ist eine geeignete Methode notwendig, mit der von Schatten beeinflusste Pixel detektiert und vom Matching ausgeschlossen werden können.

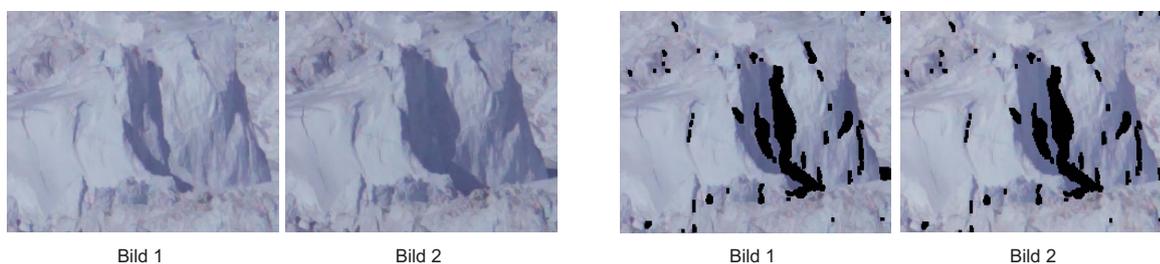


Abbildung 4.16: Einfluss wandernder Schatten in Bildsequenzen. Die Abbildung zeigt korrespondierende Bildausschnitte aus zwei Sequenzbildern, die in einem zeitlichen Abstand von 30 min aufgenommen wurden (links). Im gleichen Bildpaar wurden diejenigen Pixel schwarz markiert, die durch Schattenbewegungen beeinflusst sind (rechts). Diese Pixel verfälschen das Ergebnis der Bildzuordnung, da durch sie die Gletscherbewegung mit der Schattenbewegung überlagert wird.

In der Literatur werden verschiedene Verfahren beschrieben, die zur Detektion bzw. Eliminierung von Schatten in Bildern dienen [Al-Najdawi u. a., 2012]. [Finlayson u. a., 2002] schlagen z. B. eine Methode vor, mit der Schattenbereiche im Bild lokalisiert werden und dann innerhalb dieser die ursprüngliche, nicht von Schatten veränderte Bildinformation rekonstruiert werden kann. Das Verfahren basiert auf der Generierung eines beleuchtungsinvarianten Grauwertbildes aus einem RGB-Farbbild. Ein ähnliches Ziel verfolgen [Li u. a., 2004], die mittels der bekannten Position der Sonne und eines digitalen Oberflächenmodells (DOM) Gebäudeschatten in Luftbildern detektieren und diese Bereiche einer Kontrast- und Helligkeitsanpassung unterziehen. [Prati u. a., 2003] geben einen Überblick über mehrere Verfahren, welche die Detektion von Schatten zum Ziel haben, die sich mit ihrem zugehörigen Objekt durch eine Bildsequenz bewegen.

Die der Gletscherbewegungsmessung zugrundeliegende Schattenproblematik weicht hinsichtlich ihrer Anforderungen teilweise von den Problemstellungen der oben genannten Verfahren ab. Es sind folgende Aspekte zu beachten:

- Es ist eine in Bezug auf das Messobjekt veränderliche Lichtquelle zu berücksichtigen.
- Auch bei bekannter Position der Lichtquelle ist es nicht möglich, Schatten zu modellieren, da zu diesem Zweck ein extrem detailliertes DGM der zerklüfteten Gletscheroberfläche nötig wäre.
- Es müssen keine vollständigen Schatten detektiert werden, sondern nur der veränderte Bereich eines bewegten Schattens zwischen zwei Bildern.
- Die Wiederherstellung schattenfreier Farbinformationen für Schattenbereiche ist nicht notwendig, denn es genügt der Ausschluss der entsprechenden Pixel und deren unmittelbarer Nachbarn aus dem weiteren Verfahren.

Abbildung 4.17 (oben) zeigt ein synthetisches Bildpaar, bei dem das zweite Bild einer Kopie des Ausgangsbildes entspricht, welche aber definiert in beide Koordinatenrichtungen verschoben wurde. Auf diese Weise wird eine Gletscherbewegung simuliert, für die Referenzwerte bekannt sind.

Zusätzlich werden beide Bilder mit einem Schattenbereich (Quadrat) versehen, dessen Position im zweiten Bild um einen bestimmten Betrag zur Position im ersten Bild versetzt ist. Dies simuliert eine Schattenbewegung, welche die Gletscherbewegung überlagert. Anhand dieses Beispiels soll im Folgenden eine für den spe-

Synthetisches Bildpaar:

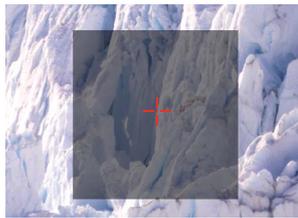
Simulierte Gletscherbewegung:

$$\begin{aligned}\Delta x_{G_soll} &= -5,00 \text{ Pixel} \\ \Delta y_{G_soll} &= -2,00 \text{ Pixel}\end{aligned}$$

Simulierte Schattenbewegung:

$$\begin{aligned}\Delta x_S &= 6,00 \text{ Pixel} \\ \Delta y_S &= -10,00 \text{ Pixel}\end{aligned}$$

Ausgangsbild



Suchbild



Messung - LSM mit Schattenpixelausschluss:

1. Iteration (LSM ohne Ausschluss):

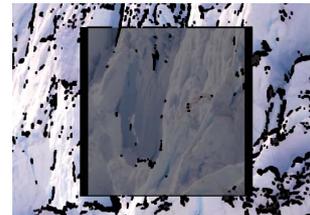
Gemessene Gletscherbewegung:

$$\begin{aligned}\Delta x_{G_ist} &= -0,98 \text{ Pixel} \\ \Delta y_{G_ist} &= -9,52 \text{ Pixel}\end{aligned}$$

Differenzbild



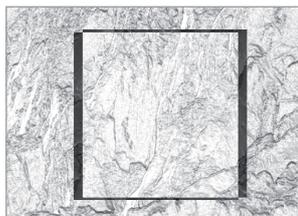
Ausschlusspixel



2. Iteration: (LSM mit Schattenpixelausschluss)

Gemessene Gletscherbewegung:

$$\begin{aligned}\Delta x_{G_ist} &= -4,06 \text{ Pixel} \\ \Delta y_{G_ist} &= -5,02 \text{ Pixel}\end{aligned}$$



3. Iteration: (LSM mit Schattenpixelausschluss)

Gemessene Gletscherbewegung:

$$\begin{aligned}\Delta x_{G_ist} &= -5,00 \text{ Pixel} \\ \Delta y_{G_ist} &= -2,00 \text{ Pixel}\end{aligned}$$

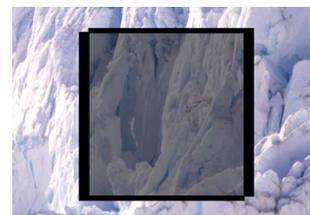
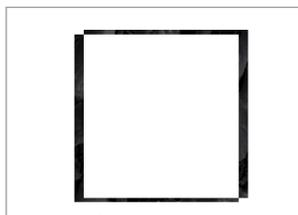


Abbildung 4.17: Methode zur Eliminierung der Schattenbewegung. Die Abbildung zeigt ein synthetisch generiertes Bildpaar, welches eine durch Schattenbewegung überlagerte Gletscherbewegung simuliert, für die Referenzwerte bekannt sind (oben). Auf dieses Bildpaar wird eine Methode angewandt, mit der iterativ Schattenbewegungspixel detektiert und vom Matching ausgeschlossen werden können (unten). Dargestellt werden für jeden Iterationsschritt die beim Matching bestimmten Translationsparameter (links), das Bild der Differenzbeträge zwischen Ausgangspatch und transformiertem Suchpatch (Mitte) sowie die daraus abgeleiteten Ausschlusspixel für die nächste Iteration, die als schwarze Pixel dem Ausgangspatch überlagert abgebildet sind (rechts).

ziellen Fall des Gletschertrackings entwickelte Methode zur Eliminierung der Schattenbewegung beschrieben und validiert werden.

Dem Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass die Pixel der Bereiche, die von Schattenbewegungen betroffen sind, eine stärkere Änderung ihrer Grauwerte aufweisen als andere Pixel. Gelingt es, diese „Schattenbewegungspixel“ zu detektieren, so können sie beim Matching als Beobachtungen ausgeschlossen werden. Im Idealfall beschreiben die bei der Bildpunktzuordnung ermittelten Translationswerte dann ausschließlich die Gletscherbewegung.

Für die Bestimmung der Schattenbewegungspixel wird das Matching zwischen Ausgangspatch und Suchpatch wie folgt iteriert: Zunächst gehen alle Pixel des Ausgangspatches als Beobachtungen ein. Das Ergebnis ist noch durch die gesamte Schattenbewegung beeinflusst. Mittels der erhaltenen Transformationsparameter kann nun der Bildinhalt des Suchpatches transformiert und mit dem Bildinhalt des Ausgangspatches verglichen werden. Im Idealfall wären Ausgangspatch und transformiertes Suchpatch identisch. Durch den Schatteneinfluss wird diese Übereinstimmung nicht erreicht, da einerseits die Transformationsparameter verfälscht sind und andererseits Pixel an Schattenrändern große Grauwertunterschiede aufweisen.

Pixel, die im Differenzbild zwischen Ausgangspatch und transformiertem Suchpatch hohe Werte aufweisen, sind potentielle Schattenpixel. Jedes Pixel, dessen Grauwertdifferenz einen bestimmten Schwellwert überschreitet, geht deshalb im nächsten Iterationsschritt nicht mit als Beobachtung in das Matching ein. Nach der ersten Iteration werden noch verhältnismäßig viele Nichtschattenpixel als Schattenpixel klassifiziert (vgl. Abbildung 4.17 – 1. Iteration). Da aber in den ausgeschlossenen Pixeln auch tatsächliche Schattenbewegungspixel enthalten sind, werden die Transformationsparameter im zweiten Iterationsschritt schon genauer bestimmt (vgl. Abbildung 4.17 – 2. Iteration). Mit jedem Iterationsschritt verbessert sich so das Ergebnis des Matchings, denn es werden einerseits sukzessive mehr Pixel eliminiert, die zu wandernden Schatten gehören, und andererseits immer weniger Pixel, die keine Schattenbewegungspixel sind.

Die beschriebene Vorgehensweise wird solange iteriert, bis sich das Matchingergebnis nicht mehr ändert, bzw. keine Änderung mehr bei der Schattenpixeldefinition auftritt. Der Vergleich zwischen Referenzwerten und ermittelten Translationsparametern nach der letzten Iteration in Abbildung 4.17 (3. Iteration) zeigt, dass für das synthetische Beispiel die Schattenbewegung vollständig eliminiert werden konnte.

Ein wichtiger Teilaspekt der Methode ist die Definition der auszuschließenden Pixel anhand des Differenzbildes (vgl. Abbildung 4.18). Dies erfolgt mittels eines Schwellwertes, welcher einheitlich für die gesamte Bildsequenz festgelegt wird. Er sollte groß genug gewählt werden, um die schattenunabhängige Streuung der Grauwertdifferenzen mit zu berücksichtigen, und kann z.B. auf Basis des Differenzbildhistogramms zweier schattenfreier (bei Bewölkung aufgenommener) Sequenzbilder festgelegt werden. Für jedes Patchpaar wird zusätzlich geprüft, ob die einfache Standardabweichung der Grauwerte des Differenzbildes größer ist als der gewählte globale Schwellwert. Ist dies der Fall, bedeutet dies eine starke Streuung der Grauwertdifferenzen, wie sie z.B. im ersten Iterationsschritt bei starkem Schatteneinfluss auftreten kann. Um zu vermeiden, dass zu viele Pixel ausgeschlossen werden, die keine Schattenbewegungspixel sind, wird der Schwellwert in diesem Fall auf den Wert der einfachen Standardabweichung gesetzt. Geht man von einer näherungsweisen

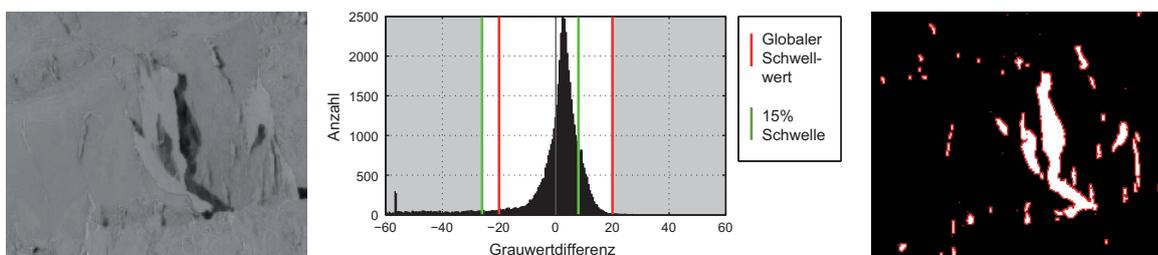


Abbildung 4.18: Definition von Schattenpixeln im Differenzbild. Die Abbildung zeigt die Definition der Schattenpixel (für das Bildbeispiel aus Abbildung 4.16) anhand des Differenzbildhistogramms (Mitte). Ausschusspixel sind Pixel, die in den grau unterlegten Bereich des Histogrammes fallen. Es entsteht ein Binärbild, welches morphologisch gefiltert wird (rechts). Die Ausschusspixel, die durch Dilatation hinzukommen, sind rot markiert.

Normalverteilung der Grauwertdifferenzen aus, was für die meisten Patchpaare zutrifft, so wird auf diese Weise sichergestellt, dass nicht mehr als ca. 30 % der Pixel eines Patches ausgeschlossen werden.

In besonderen Fällen weicht die Verteilung der Grauwertdifferenzen jedoch stark von der Normalverteilung ab. Treten z.B. innerhalb des Ausgangspatches lokale Helligkeitsunterschiede auf, die im Suchpatch (z.B. verursacht durch Wolkenschatten) deutlich weniger stark ausgeprägt sind, so können mehrere Maxima im Histogramm des Differenzbildes entstehen, da keine gute Helligkeitanpassung zwischen Patch und Suchpatch möglich ist. Für diese Fälle erfolgt die Schwellwertfindung mittels Histogrammanalyse. Von den größten Grauwertdifferenzen im positiven wie im negativen Bereich des Histogramms ausgehend, wird jeweils ein Schwellwert gegen Null verschoben, bis der global gesetzte Schwellwert erreicht wird oder jeweils 15 % der Pixel des positiven bzw. negativen Histogrammbereichs ausgeschlossen sind (vgl. Abbildung 4.18 – Mitte).

Anhand der ermittelten Schattenpixel wird ein Binärbild erstellt, welches noch morphologisch zu filtern ist. Zunächst wird eine Konnektivitätsanalyse durchgeführt, um Einzelpixel im Binärbild zu eliminieren, da bei Schattenbereichen von mehreren zusammenhängenden Pixeln ausgegangen werden kann und einzelne Pixel mit hohen Grauwertdifferenzen eher durch Rauschen in den Bildern hervorgerufen werden. In einem zweiten Schritt werden die Schattenpixelbereiche mittels Dilatation um 1 Pixel erweitert (vgl. Abbildung 4.18 – rechts) da sonst von den direkten Nachbarn der Schattenpixel aus noch Gradienten zu Schattenpixeln beim LSM mit eingehen würden. Dadurch wäre ein Einfluss der Schattenbewegung immer noch vorhanden, mit der Folge, dass das Verfahren weniger robust wäre und deutlich langsamer konvergierte und damit auch das Ergebnis der letzten Iteration immer noch einen bestimmten Restfehler enthielte.

4.2.5.2 Prädiktionsbereich und Patchgröße

Zwei wesentliche Kenngrößen, die Einfluss auf den Erfolg des Matchings haben, sind der Prädiktionsbereich und die Patchgröße. Beide Größen möglichst klein zu wählen, hat den generellen Vorteil schnellerer Rechenzeiten. Für den Prädiktionsbereich gilt darüber hinaus, dass sich die Zuverlässigkeit des Matchings erhöht, je besser dieser eingegrenzt werden kann. Dies ist insbesondere bei Bildern mit Wiederholungen bzw. Mehrdeutigkeiten in der Textur von Bedeutung. Wird der Prädiktionsbereich jedoch zu klein gewählt, sind grobe Fehler bei der Bildzuordnung die Folge. Für Patchgrößen gilt, dass die Redundanz und damit die Zuverlässigkeit der Messung erhöht wird, je mehr Pixel im Patch enthalten sind. Doch nicht nur der rechenzeitliche Aspekt spricht gegen zu große Patches, sondern auch die Gefahr, dass innerhalb des Patches unterschiedliche Maßstäbe oder Bewegungsmuster auftreten können. Des Weiteren wird durch größere Patches der zu ermittelnde Translationswert über eine größere Fläche des Gletschers interpoliert. Die Wahl von Prädiktionsbereich und Patchgröße stellt sich somit als Optimierungsproblem dar. Im Folgenden wird für beide Kenngrößen jeweils ein an die terrestrische Gletschermessung angepasster Lösungsansatz vorgestellt:

Die geringen zeitlichen Veränderungen der Gletscherbewegung, das Prinzip der statischen Bildsequenzkamera und die geringen Zeitabstände zwischen einem Bildpaar, für welches die Punktzuordnung erfolgt, erlauben eine gute Prädikation der Position eines gesuchten korrespondierenden Punktes. Für die Gletscherbewegung existiert eine Hauptbewegungsrichtung, die im Bild meist näherungsweise der x' -Richtung entspricht. Die Vertikalbewegung des Gletschers entfällt hauptsächlich auf die y' -Komponente. Da für jeden Bildpunkt die Entfernung zum Messobjekt bekannt ist (vgl. Kapitel 4.2.4), kann der individuell notwendige Suchbereich $(\Delta x'_G, \Delta y'_G)$ anhand einer A-priori-Annahme über die maximal zu erwartende Gletschergeschwindigkeit (x' -Richtung) und den Tidenhub (y' -Richtung) eingegrenzt werden. Darüber hinaus ist bei der Definition des Prädiktionsbereichs auch der mögliche Einfluss der Kamerabewegung $(\Delta kx', \Delta ky')$ zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 4.2.6), sofern dieser zwischen zwei Bildern größer als 1 Pixel ist.

Abweichungen von der Modellvorstellung, dass die Hauptbewegungsrichtungen des Gletschers im Bild auf die x' - und y' -Komponente entfallen, ergeben sich, wenn die Blickrichtung der Kamera nicht orthogonal zur Gletscherfließrichtung ist, die Kamera um die optische Achse geneigt ist bzw. die Gletscheroberfläche aufgrund der Subglazialtopografie eine gewisse Neigung aufweist. Um diese möglichen Einflüsse zu berücksichtigen, wird der errechnete Mindestsuchbereich entsprechend Abbildung 4.19 noch um einen Puffer ΔP erweitert.

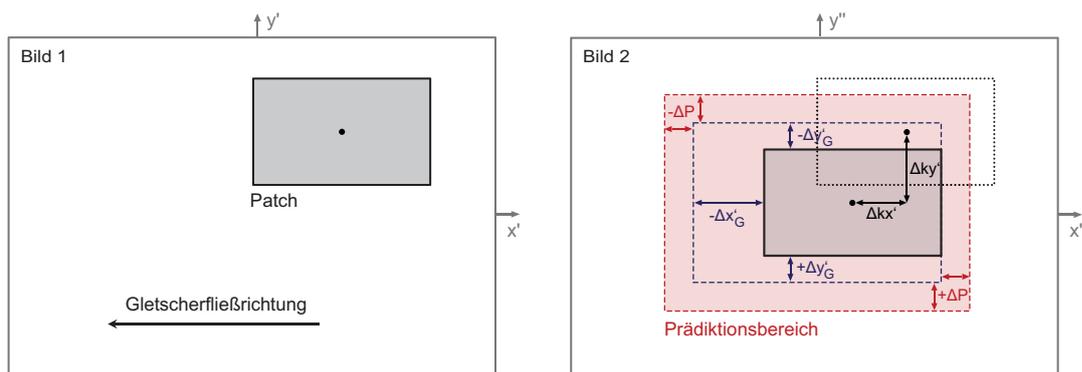


Abbildung 4.19: Definition des Prädiktionsbereichs. Ausgehend von der Position des Punktes in Bild 1 ergibt sich der Suchbereich in Bild 2 aus der Patchgröße, dem Einfluss der Kamerabewegung ($\Delta kx'$, $\Delta ky'$), der zu erwartenden Gletscherbewegung ($\Delta x'_G$, $\Delta y'_G$) und einem Puffer (ΔP).

Aufgrund der bekannten Objektentfernung für jedes Pixel bietet sich die Möglichkeit, für jeden zu verfolgenden Punkt die Patchdimensionen distanzabhängig zu optimieren. Da in den Sequenzbildern große Tiefenunterschiede vorwiegend in vertikaler Richtung auftreten, ist es gegebenenfalls sinnvoll, rechteckige Patches mit einer größeren Ausdehnung in x' - als in y' -Richtung zu verwenden. Für weiter entfernte Bereiche des Gletschers oder Bereiche, in denen aufgrund von Verdeckungen Distanzsprünge auftreten, sind dabei schmalere Patches notwendig als für den Vordergrund des Messbereichs.

Zunächst wird – unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Teil der Pixel im Patch als Schattenpixel ausgeschlossen werden könnte – eine feste Pixelanzahl vorgegeben, die jedes Patch enthalten sollte, um ein stabiles Matching durchführen zu können. Durch den zu messenden Punkt wird nun im Bild ein vertikales Profil gelegt. Ausgehend von einer Mindesthöhe wird das Patch in vertikaler Richtung pixelweise vergrößert. Dabei wird jeweils geprüft, wie groß der Distanzunterschied ist, der entlang des Profils auftritt. Wird ein bestimmter Grenzwert für den maximalen Tiefenunterschied innerhalb eines Patches überschritten, so ist die vertikale Patchgröße festgelegt. Die horizontale Ausdehnung des Patches ergibt sich dazu aus der vorgegebenen Gesamtpixelanzahl eines Patches. Ist auf diese Weise ein quadratisches Patch entstanden, bevor der Grenzwert für den Tiefenunterschied erreicht wurde, so wird das quadratische Patch verwendet. Abbildung 4.20 stellt die auf diese Weise definierten Seitenverhältnisse für die einzelnen Patches am Beispiel des Ser-

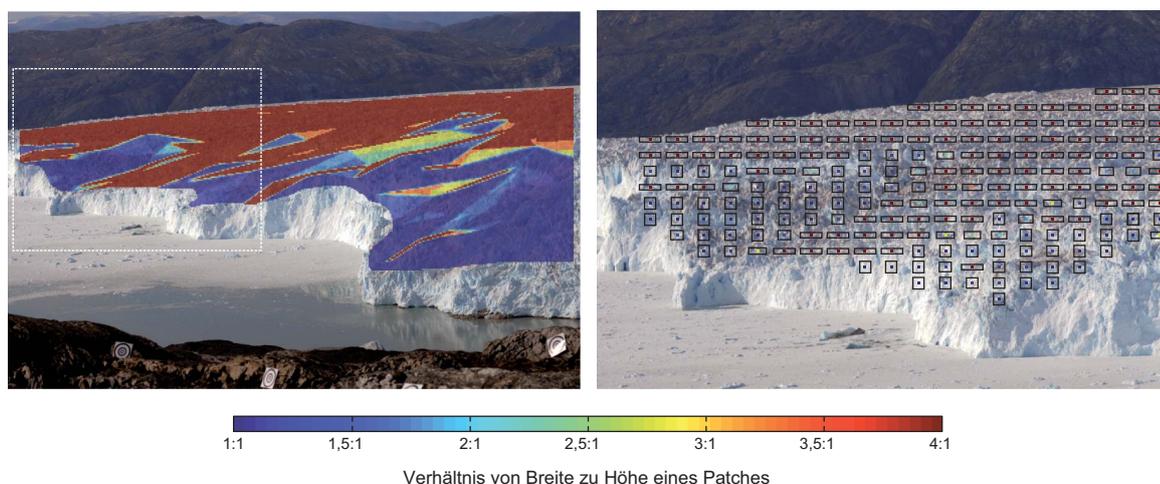


Abbildung 4.20: Patchgrößendefinition (Bsp. Sermeq Avannarleq, Juli 2010). Die Abbildung zeigt das Ergebnis der automatischen Patchgrößendefinition unter Berücksichtigung von Distanzunterschieden im Patch. Links sind die ermittelten Seitenverhältnisse für ein Patch an der entsprechenden Position im Bild farbkodiert dargestellt. Für einen kleineren Bildausschnitt (weißes Rechteck) sind rechts die resultierenden Patches (1.600 Pixel) dem Sequenzbild überlagert abgebildet.

meq Avannarleq dar. Je detaillierter das der Distanzbestimmung zugrundeliegende DGM der Gletscheroberfläche ist, desto besser können die Patchgrößen automatisch angepasst werden.

4.2.5.3 Matchingstrategien

Strategien für das Matching von Punkten in einer Bildsequenz können unter einem zeitlichen und einem räumlichen Aspekt differenziert werden. Zum einen kann nach der Art der Paarung von Bildern einer Sequenz, zwischen denen eine Bildpunktzuordnung erfolgt, unterschieden werden. Zum anderen ist zu entscheiden, ob ein bestimmtes Merkmal im Bild durch die Sequenz hindurch verfolgt wird oder ob sich die Messungen auf eine ortsfeste Stelle im Raum beziehen sollen. Diese Entscheidungen richten sich insbesondere nach der Art der zu messenden Punkte. Für die Gletscherbewegungsanalyse werden zum einen natürliche Punkte auf der Gletscheroberfläche gemessen und zum anderen signalisierte Festpunkte. Letztere dienen der Bestimmung des Einflusses der Kamerabewegung. Ihre Messung wird in Kapitel 4.2.6.3 gesondert behandelt. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich zunächst auf die Messung von Gletscherpunkten.

Räumliche Strategien

Für die Bestimmung des Bewegungsverhaltens einer Gletscherzunge ist es zunächst naheliegend, zu versuchen, jeweils ein bestimmtes Spaltenmuster der Gletscheroberfläche in allen Bildern der Sequenz wiederzufinden, d. h. eine merkmalsbezogene Messung durchzuführen. Die so entstehenden Trajektorien geben für den Zeitraum der Bildsequenz Auskunft über die Positions- und Geschwindigkeitsänderung eines bestimmten Merkmals, welches Teil der Gletscherzunge ist (Lagrang'sche Betrachtungsweise). Bei einer zweiten Variante wird kein festes Merkmal durch alle Bilder verfolgt, sondern das Matching erfolgt (im Fall einer völlig statischen Kamera) jeweils von ein und derselben Bildkoordinate aus ins Folgebild. Die Trajektorien, die durch diese positionsbezogene Messung entstehen, geben Aufschluss über das Bewegungsverhalten des Gletschers an festen Positionen im Objektraum (Euler'sche Betrachtungsweise).

Grundsätzlich hängt es von der jeweiligen Fragestellung ab, womit die Messwerte sinnvollerweise in Bezug gesetzt werden. Ist das Bewegungsverhalten eines Punktes, der einen bestimmten Abstand zur Gletscherfront hat, von Interesse (z. B. vor einem großen Kalbungsereignis), kann eine Lagrang'sche Messung sinnvoll sein. Hinsichtlich der meisten Fragestellungen sind jedoch auf eine feste Position bezogene Messwerte besser zu interpretieren, da sie nicht von durch Positionsänderung eines Punktes bedingten Veränderungen im Bewegungsmuster beeinflusst werden.

Für Bildsequenzen, die nur einen kurzen Zeitraum umfassen, sind die Unterschiede zwischen den beiden Messvarianten allerdings vernachlässigbar. In diesem Fall wird eher nach methodischen Gesichtspunkten entschieden, welche der Strategien besser geeignet ist.

Ein methodischer Vorteil der ersten Variante ist die Möglichkeit, die Qualität der Punktzuordnung optisch zu kontrollieren. Da die Genauigkeit des Matchings unter anderem durch die Textur im Patch beeinflusst wird, sind die Einzelmessungen einer Trajektorie bei der merkmalsverfolgenden Messung in dieser Hinsicht besser miteinander vergleichbar als bei einer ortsfesten Messung. Nachteilig ist, dass der zeitliche Umfang einer Bildsequenz für einen zu messenden Punkt gegebenenfalls nicht in vollem Umfang ausgenutzt werden kann, da eine Trajektorie nur solange gemessen werden kann, bis das verfolgte Merkmal durch Kalbung oder Verlassen des Bildbereichs verloren geht. Ein großer methodischer Vorteil der zweiten Variante ist somit, dass für jeden Punkt im gesamten Bildbereich eine Trajektorie über die gesamte zeitliche Länge der Bildsequenz bestimmt wird. Dies ist besonders bei Langzeitmessungen von Bedeutung.

Zur Bewegungsmessung der Gletscherzunge wird aus den genannten Gründen die zweite Methode bevorzugt. Die erste Variante eignet sich für die Messung von ortsfesten Zielmarken (Kapitel 4.2.6.3) sowie für Testmessungen von Gletscherpunkten zur empirischen Definition von Parametern für das Matching.

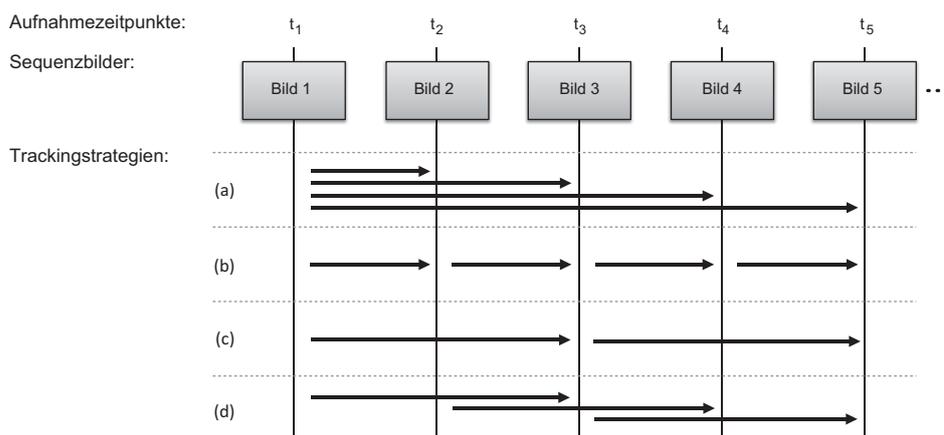


Abbildung 4.21: Matchingstrategien:

- (a) jeweils vom ersten Bild aus in jedes andere Bild der Sequenz
- (b) von Bild zu Bild
- (c) von Bild zu Bild mit größerem Zeitintervall als dem Aufnahmezeitintervall
- (d) von jedem Bild der Sequenz aus zu einem Bild in bestimmtem zeitlichen Abstand

Temporale Strategien

Die temporalen Matchingstrategien unterscheiden sich dahingehend, welche Bilder einer Sequenz beim Matching miteinander kombiniert werden. Damit wird beeinflusst, welche Zeitbasis den einzelnen Bildpunktzuordnungen zugrundeliegt und welche zeitliche Auflösung eine Messreihe besitzt. Abbildung 4.20 zeigt mögliche Arten der Bildpaarung beim Matching von Punkten in einer Bildsequenz.

Um die Anwendbarkeit der einzelnen Varianten zu bewerten, sind zunächst vier Arten von Zeitintervallen zu unterscheiden, die für eine Bildsequenzmessung von Bedeutung sind:

- Δt_A : Zeitintervall für die Aufnahmezeitpunkte der Bilder einer Sequenz
- Δt_M : Zeitintervall zwischen Bildpaaren, für die eine Punktzuordnung erfolgt
- Δt_{Max} : maximales Zeitintervall zwischen zwei Bildern, für das noch eine zuverlässige Punktzuordnung möglich ist, weil die Bildinhalte noch nicht zu stark dekorreliert sind (vgl. auch Kapitel 3.3.2.2)
- Δt_F : notwendige zeitliche Auflösung einer Messreihe, um eine bestimmte Fragestellung beantworten zu können.

Mit Variante (a) ist das Tracking eines Merkmals der Gletscheroberfläche nicht möglich, da die Zeitbasis zwischen Referenzbild und Suchbild sukzessive größer wird und – aufgrund starker Änderungen der Beleuchtungssituation – nach wenigen gemessenen Bildern Δt_{Max} übersteigt. Diese Art der Bildpaarung ist allerdings interessant für das Tracking signalisierter Punkte, da sie im Vergleich zu den anderen Strategien nicht deren ungünstiger Fehlerfortpflanzung unterliegt.

Ist $\Delta t_A = \Delta t_{Max}$, so ist Variante (b) die einzige Möglichkeit der Bildpaarung für die Gletschermessung. Für den Fall $\Delta t_A < \Delta t_{Max}$ kann diese noch in Variante (c) oder (d) abgewandelt werden, wobei gilt: $\Delta t_M \leq \Delta t_{Max}$ und $\Delta t_M \leq \Delta t_F$ mit $\Delta t_M = n \cdot \Delta t_A$ ($n \in \mathbb{N}$). Die Möglichkeit, eine größere Zeitbasis für die Punktzuordnung zu wählen, hat den Vorteil, dass für die Translationen ein geringerer relativer Fehler aus dem Matching resultiert. Dies bedeutet allerdings für Variante (c), dass sich die zeitliche Auflösung der Trajektorie entsprechend verringert. Bei Variante (d) dagegen entspricht die zeitliche Auflösung der Bewegungskurve noch der hohen zeitlichen Auflösung der Bildsequenz. Hier ist aber zu berücksichtigen, dass benachbarte Messwerte miteinander korreliert sind. Da für die zu beantwortenden Fragestellungen in der Regel $\Delta t_F > \Delta t_{Max}$ gilt, wurde für die vor-

liegende Arbeit als Matchingstrategie zur Messung von Gletscherpunkten Variante (c) mit einem zeitlichen Abstand $\Delta t_M \approx \Delta t_{Max}$ gewählt.

Ist Δt_F um ein Vielfaches k größer als Δt_M , können im Rahmen der zeitlichen Differenz dieser beiden Größen Methoden zur Verringerung des Messrauschens angewandt werden. Ein Ansatz besteht darin, das Matchingverfahren selbst robuster zu gestalten, indem z. B. zeitliche Restriktionen für jeweils k benachbarte Bilder in das stochastische Modell des LSM integriert werden. Die entsprechende Vorgehensweise wird in [Westfeld, 2005] beschrieben. Eine zweite Möglichkeit besteht in der Filterung der gemessenen Trajektorien im Nachgang [Rosenau u. a., 2013].

Erstere Methode hat den Nachteil, dass zum einen die Rechenzeit des Matchings erhöht wird und zum anderen die Messung nur an ein bestimmtes Zeitintervall Δt_F angepasst werden kann. Eine Filterung der Trajektorien im Nachhinein, die für verschiedene Weiterverwendungszwecke der Daten individuell angepasst werden kann, wurde somit als praktikablere Lösung erachtet.

4.2.5.4 Genauigkeitsaspekte

Die absoluten Genauigkeiten für ein Matching der natürlichen Punkte auf der Gletscheroberfläche sind, wie in Kapitel 4.1.1.2 beschrieben, in einer Größenordnung von ca. 0,1–0,2 Pixel zu erwarten. Dieser Wert wird beeinflusst durch die Textur der jeweiligen Patches und die sich ändernden Lichtverhältnisse während der Bildsequenzmessung. Für das Matching von Bildpaaren, die während der Nachtstunden aufgenommen wurden, ist aufgrund des schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses eine größere Standardabweichung beim LSM zu erwarten als für Tagesaufnahmen.

Für die Größe des relativen Fehlers, der für eine Translation aus dem Matching resultiert, spielt bei der Bildsequenzauswertung die Zeitbasis zwischen zwei Bildern eine große Rolle. Speziell für Translationen in x' -Richtung, die der Fließrichtung des Gletschers entsprechen, gilt, dass sich der relative Fehler verringert, je größer der Zeitabstand zwischen zwei Bildern ist, da entsprechend größere Translationswerte bestimmt werden. Das Zeitintervall kann jedoch nicht beliebig groß gewählt werden, da das Matching einerseits aufgrund starker Dekorrelation der Bildinhalte durch den sich verändernden Sonnenstand nicht für alle Zeitbasen zuverlässig funktioniert (vgl. Kapitel 3.3.2.2) und andererseits je nach Fragestellung eine bestimmte zeitliche Auflösung der Messung (Δt_F) notwendig ist.

Die Messungen in den Bildsequenzen werden besonders stark durch Schattenbewegungen verfälscht. Um die Größenordnung dieses Einflusses zu verdeutlichen, ist in Abbildung 4.22 exemplarisch die Bewegungskurve eines Punktes für ein Matching mit und ohne Schattenpixelausschluss (vgl. Kapitel 4.2.5.1) dargestellt.

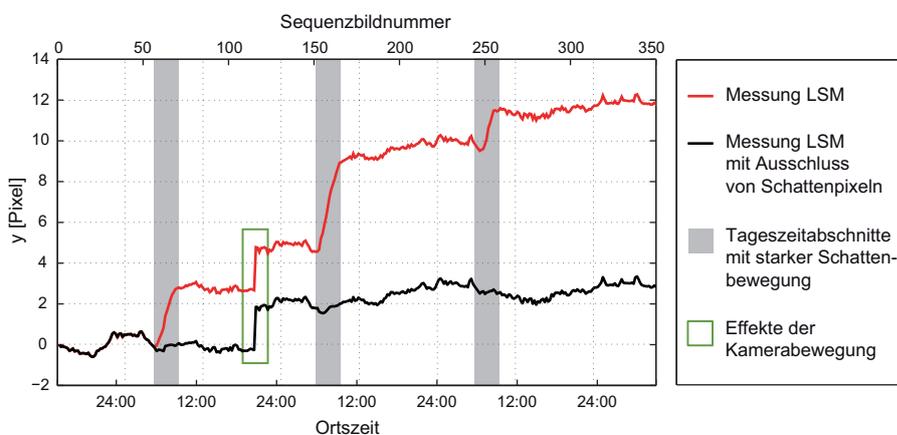


Abbildung 4.22: Drifteffekte bei der Messung einer Trajektorie aufgrund der Schattenbewegung. Die Abbildung zeigt die Messung einer Trajektorie mit und ohne Schattenpixelausschluss. Zu bestimmten Tageszeitabschnitten (grau unterlegt) treten besonders starke Schattenbewegungen auf. Beide Bewegungskurven enthalten noch den Einfluss der gemäß Kapitel 4.2.6 korrigierbaren Kamerabewegung.

Eine Trajektorie, die dem vollständigen Schatteneinfluss unterliegt, zeigt einen starken Drifteffekt, der nicht gleichförmig verläuft, sondern durch den Tagesgang der Sonne und die Bewölkungssituation beeinflusst wird. Abhängig von der Spaltenstruktur der Gletscherzunge und vom geografischen Azimut der Gletscherfließrichtung sind die Schatten zu bestimmten Tageszeiten besonders starken Veränderungen unterworfen. Die Größenordnung des Schatteneinflusses auf eine Einzelmessung kann zu diesen Zeitpunkten den Subpixelbereich übersteigen. Werden Schattenbewegungspixel ausgeschlossen, sollte die Trajektorie im Idealfall nur noch durch die Effekte der Kamerabewegung verfälscht sein.

4.2.6 Korrektur der Kamerabewegung

Trotz stabiler Aufstellung ist eine Sequenzkamera während der Messung nicht völlig statisch. Geringfügige Orientierungsänderungen werden verursacht durch Wind- und Temperatureinfluss sowie, je nach Art der Aufstellung, gegebenenfalls auch durch Einsinkeffekte des Stativs. Durch diese Eigenbewegungen der Sequenzkamera werden Bewegungseffekte im Bild verursacht, die sich der eigentlichen Gletscherbewegung überlagern. Die gemessenen Trajektorien auf der Gletscheroberfläche sind also erst dann interpretierbar, wenn sie um den Einfluss der Kamerabewegung korrigiert werden. Dieses Kapitel behandelt die Bestimmung und Korrektur des Kamerabewegungseinflusses.

4.2.6.1 Methode

Aufgrund der Kamerabewegung während der Bildsequenzmessung liegt jedem Bild ein eigenes Kamerakoordinatensystem zugrunde, dessen Orientierung und Lage im Raum sich um differenziell kleine Beträge vom Kamerakoordinatensystem des vorherigen bzw. nachfolgenden Bildes unterscheidet. Sind diese Orientierungsänderungen bekannt, können die Kamerabewegungen durch entsprechende Transformationen zwischen den sich verändernden Koordinatensystemen korrigiert werden. Im Folgenden wird zunächst die Möglichkeit zur Bewegungskorrektur zwischen zwei einzelnen Aufnahmen betrachtet. Strategien zur Anwendung der Methode auf die gesamte Bildsequenz werden in Kapitel 4.2.6.4 beschrieben.

Zunächst wird ein funktionales Modell benötigt, welches die Kamerabewegung ausreichend genau beschreibt (vgl. Kapitel 4.2.6.2). Unter Verwendung statischer Punkte, die in beiden Bildern zu sehen sind, werden die Parameter des funktionalen Modells geschätzt (vgl. Kapitel 4.2.6.3). Im Umkehrschluss können diese Transformationen dann auf eines der beiden Bilder angewandt werden, um dessen Bewegungseffekte relativ zum jeweils anderen Bild für alle Pixel individuell zu korrigieren (vgl. Kapitel 4.2.6.4).

4.2.6.2 Funktionales Modell

Hinsichtlich der Definition des funktionalen Modells bestehen zwei Möglichkeiten. Die erste Variante ist der Versuch, die physikalische Realität zu beschreiben, welche die Bewegungseffekte im Bild verursacht. Die zweite Möglichkeit besteht darin, nur die Bewegungseffekte im Bild zu betrachten und zu versuchen, diese im Bildraum mittels ebener Transformationen zu modellieren. Während mit der ersten Variante eine exakte Modellierung des geometrischen Problems möglich ist, können mit der zweiten Variante ggf. nicht alle systematischen Effekte kompensiert werden. Letztere ist aber oft einfacher zu realisieren, insbesondere dann, wenn die zu beschreibende physikalische Realität sehr komplex ist.

In Bezug auf die Kamerabewegung zwischen zwei Bildern bedeutet dies für die erste Variante, dass das Kamerakoordinatensystem des zweiten Bildes gegenüber dem ersten Bild um die drei Winkel $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$ und $\Delta\kappa$ rotiert und um die drei Translationen Δx_0 , Δy_0 und Δz_0 verschoben sein kann. Für einen Objektpunkt mit Koordinaten im Kamerakoordinatensystem (x_i, y_i, z_i) können somit mittels der Gleichungen 4.14 und 4.15 die Bildkoordinaten des zweiten Bildes (x'_{2i}, y'_{2i}) in Abhängigkeit von den Bildkoordinaten des ersten Bildes (x'_{1i}, y'_{1i}) ausgedrückt werden. Die Herleitung findet sich im Anhang A.2.

$$\begin{aligned}
 x'_{2i} &= -c \cdot \frac{r_{11} \cdot (x'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{21} \cdot (y'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{31} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)} \\
 y'_{2i} &= -c \cdot \frac{r_{12} \cdot (x'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{22} \cdot (y'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{32} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y'_{li} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} \cos \Delta \kappa \cos \Delta \varphi - \sin \Delta \kappa \sin \Delta \omega \sin \Delta \varphi & -\sin \Delta \kappa \cos \Delta \omega & \cos \Delta \kappa \sin \Delta \varphi + \sin \Delta \kappa \sin \Delta \omega \cos \Delta \varphi \\ \sin \Delta \kappa \cos \Delta \varphi + \cos \Delta \kappa \sin \Delta \omega \sin \Delta \varphi & \cos \Delta \kappa \cos \Delta \omega & \sin \Delta \kappa \sin \Delta \varphi - \cos \Delta \kappa \sin \Delta \omega \cos \Delta \varphi \\ -\cos \Delta \omega \sin \Delta \varphi & \sin \Delta \omega & \cos \Delta \omega \cos \Delta \varphi \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Die Gleichungen enthalten die Koordinate des abgebildeten Objektpunktes in Tiefenrichtung (z_i), wodurch sich die entfernungsabhängige Auswirkung der Kamerabewegung ausdrückt. Dabei ist jedoch nach der Art der Parameter zu differenzieren. Eine Änderung der Rotationsparameter wirkt sich im Bild unabhängig von der Entfernung des abgebildeten Objektpunktes aus, da der Bildstrahl im Raum unveränderlich bleibt und sich nur die Orientierung der Bildfläche relativ zum Bildstrahl verändert. Gilt also $\Delta x_0 = \Delta y_0 = \Delta z_0 = 0$, so reduzieren sich die Gleichungen 4.14 auf die Gleichungen 4.16.

$$\begin{aligned}
 x'_{2i} &= -c \cdot \frac{r_{11} \cdot x'_{li} + r_{21} \cdot y'_{li} - c \cdot r_{31}}{r_{13} \cdot x'_{li} + r_{23} \cdot y'_{li} - c \cdot r_{33}} \\
 y'_{2i} &= -c \cdot \frac{r_{12} \cdot x'_{li} + r_{22} \cdot y'_{li} - c \cdot r_{32}}{r_{13} \cdot x'_{li} + r_{23} \cdot y'_{li} - c \cdot r_{33}}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Die Translationsparameter dagegen wirken sich entfernungsabhängig aus. Mit der Veränderung des Projektionszentrums im Raum wird auch der Bildstrahl verändert. Der resultierende Einfallswinkel des veränderten Bildstrahls ist abhängig von der Entfernung des Objektpunktes. Für $\Delta \omega = \Delta \varphi = \Delta \kappa = 0$ gelten die Gleichungen 4.17:

$$\begin{aligned}
 x'_{2i} &= \frac{x'_{li} \cdot z_i + \Delta x_0 \cdot c}{z_i - \Delta z_0} \\
 y'_{2i} &= \frac{y'_{li} \cdot z_i + \Delta y_0 \cdot c}{z_i - \Delta z_0}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Abbildung 4.23 zeigt beispielhaft die Muster der systematischen Punktverschiebungen im Bild, die bei Veränderung der Kamera durch die einzelnen Parameter entstehen.

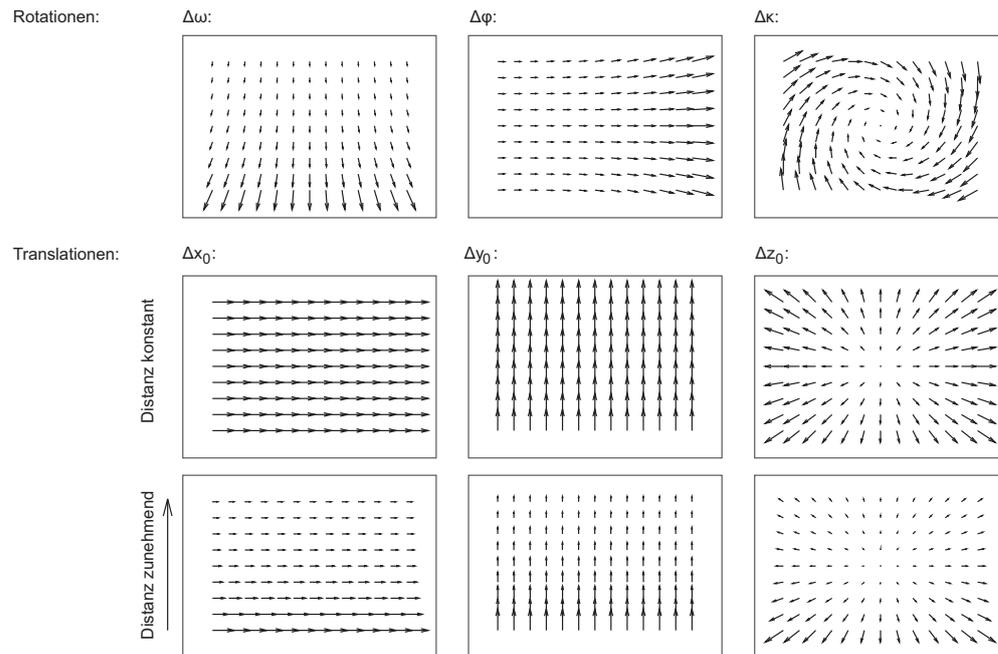


Abbildung 4.23: Auswirkung einzelner Parameter der Kamerabewegung im Bild. Die Abbildung zeigt die Auswirkungen der einzelnen Rotationsparameter (oben) und der einzelnen Translationsparameter bei konstanter (Mitte) und veränderlicher Objektdistanz (unten).

Im Hinblick auf die Definition eines funktionalen Modells im Bildraum als zweite Variante besteht die Möglichkeit der Anwendung einer Affintransformation. Die beiden Translationsparameter der Affintransformation kompensieren dabei Effekte der Verschiebung der Kamera in x - und y -Richtung. Maßstabeffekte, wie sie durch die Translation der Kamera in Tiefenrichtung entstehen, können mit den beiden Maßstabsparametern aufgefangen werden. Der Rotationsparameter kompensiert Effekte, die durch eine Rotation der Kamera um die optische Achse bedingt sind. Mit dem Parameter der Scherung können näherungsweise die Effekte der Rotationen der Kamera um die x - und y -Achse modelliert werden. Sind nur Rotationseffekte für die Kamerabewegung zu erwarten, kann das funktionale Modell im Bildraum auch als Projektivtransformation definiert werden. Entfernungabhängige Einflüsse sind mittels ebener Transformationen im Bildraum nicht modellierbar.

Bei den weiteren Betrachtungen findet das funktionale Modell, welches sich aus der Kollinearitätsgleichung ergibt, entsprechend den Gleichungen 4.14 Verwendung.

4.2.6.3 Bestimmung der Korrekturparameter

Zur Bestimmung der Parameter werden für eine Anzahl von i Punkten jeweils zwei Beobachtungsgleichungen 4.14 formuliert. Das Gleichungssystem wird durch Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen gelöst. Sollen alle sechs Parameter ermittelt werden, kann mit drei Punkten eine Minimallösung bestimmt werden. Es müssen dann Objektpunktinformationen für die homologen Punkte vorhanden sein. Aufgrund der großen Entfernungen zum Messobjekt und der zu erwartenden geringen Translationen der Sequenzkamera können die Translationsparameter vernachlässigt werden. Die im Bild wirkenden Effekte der Kamerabewegung auf gemessene Punkte der Gletscheroberfläche entfallen im Wesentlichen auf die Rotationsparameter. Werden nur Rotationsparameter geschätzt, reduzieren sich die Beobachtungsgleichungen auf die Gleichungen 4.16 und es sind keine Objektpunktinformationen notwendig.

Als Beobachtungen gehen die Bildkoordinaten homologer unbewegter Punkte ein, die in beiden Bildern gemessen werden. Die Bildpunktzuordnung erfolgt dabei automatisch mit einem geeigneten Matchingverfahren. Im Rahmen der Arbeit wurde auch für diesen Zweck das LSM-Verfahren verwendet.

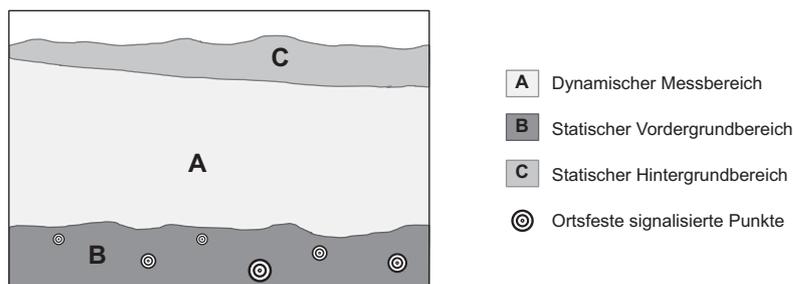


Abbildung 4.24: Dynamische und statische Bildbereiche. Die Abbildung zeigt die Bereiche im Bild mit unbewegtem Bildinhalt, der zur Bestimmung der Kamerabewegung genutzt werden kann.

Hinsichtlich der statischen Punkte können einerseits signalisierte und andererseits natürliche Punkte verwendet werden. Abbildung 4.24 zeigt, welche Bildbereiche für die Bestimmung der Kamerabewegung genutzt werden können.

Der größte Bereich des Messbildes wird durch den sich bewegenden Gletscher abgedeckt (Bereich A). Statische Bereiche sind die Berge des Gegenufers (Bereich C) und das Gelände, welches im Vordergrund abgebildet wird (Bereich B). Signalisierte Punkte können nur in diesem vorderen Bereich angebracht werden.

Der Vorteil signalisierter Punkte liegt in ihrer guten Messbarkeit, da sie einen hohen Kontrast aufweisen und so angebracht werden können, dass sie von Schattenbewegungen weitestgehend unbeeinflusst bleiben. Nachteilig ist, dass sie nur in begrenzter Anzahl und nur im Vordergrund verwendet werden können. Natürliche Punkte haben den Vorteil hoher Redundanz, da ein beliebig dichtes Netz an Punkten im Vorder- sowie auch im Hintergrund des Bildes definiert und gemessen werden kann. Sie können besser über den Bildbereich verteilt werden, so dass sie den eigentlichen Messbereich „einrahmen“. Dies ist eine günstige Punktconstellation, um für den Messbereich gültige Kamerabewegungsparameter zu bestimmen.

Die Verwendbarkeit natürlicher Punkte wird jedoch durch verschiedene Probleme, die bei der Messung auftreten können, eingeschränkt. Da die Belichtung der Aufnahmen auf den hellen Gletscherbereich optimiert wird, ist der Vordergrund teilweise unterbelichtet. Zudem werden die Messungen hier auch durch wandernde Schatten beeinflusst. Der Hintergrund besitzt aufgrund der großen Entfernungen meist eine sehr homogene Textur. Dies führt zu Fehlzuordnungen beim Matching. Die Messung von Hintergrundpunkten wird darüber hinaus durch Refraktionseffekte beeinflusst. Möglichkeiten, die Messung der natürlichen Punkte robuster zu gestalten, bestehen zum einen darin, die hohe Redundanz zu nutzen, indem ein robuster Schätzer, wie z. B. RANSAC (Random Sample Consensus) [Fischler & Bolles, 1981], verwendet wird. Zum anderen können Interestoperatoren (z. B. Harris Corner Detector) angewandt werden, um im Vorfeld kontrastreiche Punkte für die Bildzuordnung auszuwählen. Letzteres hat jedoch den Nachteil, dass häufig Schattenkanten als gute kontrastreiche Merkmale detektiert werden und der Einfluss der Schattenbewegung die Kamerabewegungseffekte überlagert, wie dies auch bei der Messung der Punkte der Gletscheroberfläche der Fall ist (vgl. Kapitel 4.2.5.1).

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Messung natürlicher Punkte und deren zunehmend schwierigerer Zuordnung, je größer der zeitliche Abstand zwischen zwei Bildern ist, wurde die Auswertung letztendlich auf die Messung der ortsfesten Zielmarken beschränkt. Die Bestimmung der Kamerabewegungseffekte anhand der signalisierten Punkte ist zuverlässiger und kann im Hinblick auf die Auswertung einer gesamten Bildsequenz flexibler gestaltet werden.

4.2.6.4 Korrekturstrategie

Durch Anwendung der Transformation mit den für ein bestimmtes Bildpaar ermittelten Parametern der Kamerabewegung auf einen einzelnen Messpunkt kann für diesen ein individueller Korrekturwert bestimmt werden, der an das Ergebnis der entsprechenden Punktzuordnungsmessung angebracht wird. Für jedes Bildpaar der Sequenz, für welches Bildpunktzuordnungen erfolgen, ist somit ein Satz Transformationsparameter

zu ermitteln. Für die Korrektur der Kamerabewegung einer gesamten Bildsequenz bedeutet dies, dass es von der Matchingstrategie, die der Gletscherpunktmessung zugrundeliegt (vgl. Kapitel 4.2.5.3), abhängt, zwischen welchen Bildpaaren jeweils Korrekturparameter zu bestimmen sind.

Die in der Arbeit angewandte Bewegungsmessung an einer festen Position im Raum nimmt dabei eine Sonderstellung ein, da hierfür eine zweistufige Korrektur erfolgen muss. Zum einen verändern sich durch die Kamerabewegung die Koordinaten des Bildpunktes, welcher der festen Position im Raum entspricht. Dieser ist zunächst für jedes Bild der Sequenz zu rekonstruieren (vgl. Abbildung 4.25 a). Zum anderen ist die Bewegungsmessung, die jeweils von diesem Punkt aus zum entsprechenden Bildpartner (meist zum Folgebild) durchgeführt wird, von der Kamerabewegung überlagert und muss korrigiert werden (vgl. Abbildung 4.25 b).

Für das erste Bild einer Sequenz liegen entsprechend Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 alle notwendigen Informationen vor, auf Basis derer ein Bezug zwischen Objekt- und Bildraum hergestellt werden kann (Distanzwerte für jedes Pixel und die Orientierungsparameter der Kamera). Um das Bewegungsverhalten des Gletschers an einer festen Position im Raum bestimmen und die im Bildraum gemessenen Größen in den Objektraum transformieren zu können, ist der Bezug zwischen jedem Bild der Sequenz und dem Kamerakoordinatensystem des Sequenzstartbildes herzustellen. Die Messung der ortsfesten Zielmarken wird aus diesem Grund und wegen der ungünstigen Fehlerfortpflanzung einer Bild-zu-Bild-Messung jeweils vom ersten Bild aus durchgeführt (Variante a in Abbildung 4.25). Mit den daraus abgeleiteten Parametern der Kamerabewegung kann ein im Sequenzstartbild definierter Bildpunkt $P'_{ref,1}$ in jedes beliebige Bild i der Sequenz transformiert werden ($P'_{ref,i}$), so dass er immer der gleichen Position im Objektraum entspricht.

Gemessen werden nun die differentiellen Gletscherbewegungen an dieser ortsfesten Position zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten innerhalb der Sequenz. Das Matching erfolgt im jeweiligen Referenzbild von $P'_{ref,i}$ aus und resultiert (für eine Messung zwischen aufeinander folgenden Bildern) in der Position $P'_{match,i+1}$ im Suchbild. Diese Position ist um die differentielle Kamerabewegung zwischen Referenz- und Suchbild verfälscht. Für die Bestimmung der verbesserten Position $P'_{korr,i+1}$ kann nun entweder die Differenz aus den Korrekturvektoren gebildet werden, die für Referenz- und Suchbild vorliegen und sich auf das Sequenzstartbild

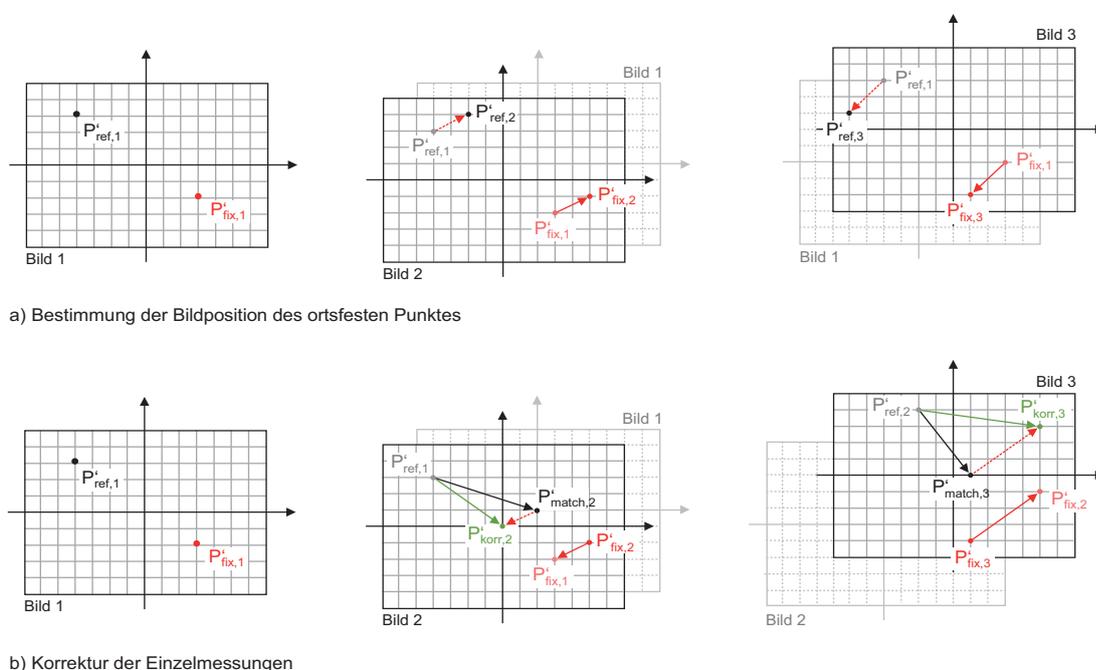


Abbildung 4.25: Korrektur der Kamerabewegung bei der Messung an fester Position im Objektraum. Die Abbildung veranschaulicht schematisch die Bestimmung der Positionen eines ortsfesten Punktes in den einzelnen Sequenzbildern $P'_{ref,i}$ (oben). Dargestellt wird zudem die Punktzuordnung, die von diesen Punkten aus ins Folgebild ($i+1$) erfolgt, mit gleichzeitiger Korrektur des zugeordneten Punktes $P'_{match,i+1}$ um den Effekt der Kamerabewegung zu $P'_{korr,i+1}$ (unten). Die Effekte der Kamerabewegung (rot) werden hier vereinfacht durch die Positionsänderung eines raumfesten Punktes $P'_{fix,i}$ im Bild dargestellt.

beziehen, oder es werden zusätzlich Kamerabewegungsparameter bestimmt, die den direkten Bezug zwischen dem jeweiligen Referenz- und Suchbild herstellen. Bei letzterer Variante müsste die Messung der ortsfesten Zielmarken ein zweites Mal erfolgen, nun entsprechend der Bildpaarungsstrategie, die für die Gletscherpunktmessung angewandt wird. Der Vorteil gegenüber der ersten Variante ist der, dass ein Korrekturwert aus einer einzelnen Zielmarkenzuordnung resultiert und nicht zwei Punktzuordnungen mit ihren jeweiligen Fehlern eingehen.

Die nach diesem Prinzip korrigierten Einzelmessungen bilden – über die Zeit aufgetragen – die Bewegungskurve für einen Punkt. Abbildung 4.26 zeigt die original gemessene Trajektorie aus Abbildung 4.22 im Vergleich mit der um die Kamerabewegung korrigierten Trajektorie. Auch die ermittelten Effekte der Kamerabewegung im Bildraum lassen sich als Bewegungskurve darstellen und sind hier als „Korrekturtrajektorie“ mit abgebildet. Sie lassen sich im Tagesrhythmus wiederholenden Systematiken im Bewegungsmuster der Kamera erkennen.

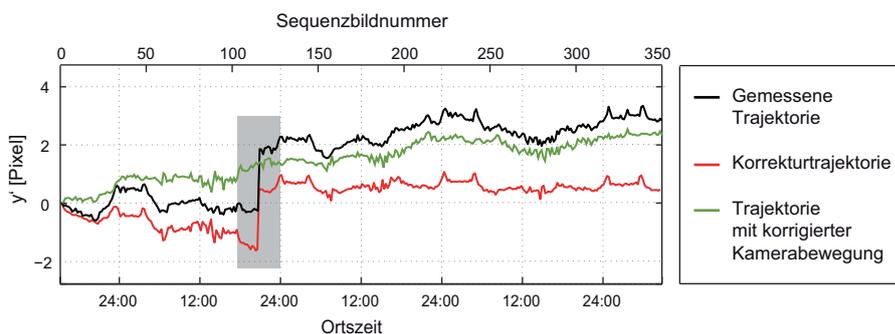


Abbildung 4.26: Anwendung der Kamerabewegungskorrektur auf eine Trajektorie. Die Abbildung zeigt exemplarisch eine original gemessene Trajektorie (schwarz), die dazugehörige Korrekturtrajektorie (rot) und die um die Kamerabewegung verbesserte Trajektorie (grün). Grau unterlegt ist ein Sprung in der Kamerabewegung.

4.2.6.5 Genauigkeitsaspekte

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit für die Ausgleichung zur Bestimmung der Kamerabewegungsparameter zwischen zwei Aufnahmen ist entsprechend der Genauigkeiten, die beim Matching der Zielmarken erreicht werden können, im Zehntelpixelbereich zu erwarten. Werden für eine Bildsequenz zwischen aufeinander folgenden Bildern die Kamerabewegungsparameter mittels Ausgleichung bestimmt und die jeweilige Standardabweichung in Abhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt der einzelnen Bildpaare betrachtet (vgl. Abbildung 4.27), so sind tagesperiodische Schwankungen in der erzielbaren Genauigkeit zu erkennen.

Für diese zeitlich variierende Bestimmungsgenauigkeit der Kamerabewegung können zwei Ursachen in Betracht gezogen werden: Zum einen ist eine entsprechende zeitlich variierende Genauigkeit beim Matching der ortsfesten Zielmarken zu vermuten, deren Ursache in den sich während eines Tages verändernden radiometrischen Eigenschaften der Bilder gesehen werden kann. Zum anderen ist denkbar, dass Effekte existieren, die vom angesetzten funktionalen Modell noch nicht berücksichtigt werden. Eine Vermutung besteht diesbezüglich darin, dass die innere Orientierung einer Kamera (die im Korrekturmodell nicht berücksichtigt wird) durch die in den Messgebieten aufgetretenen Temperaturänderungen von bis zu 20 °C während eines Tages nicht als konstant betrachtet werden kann. Temperaturbedingte Ausdehnungseffekte, die auf die Komponenten einer Kamera wirken, könnten die innere Orientierung systematisch verändern.

Erste Tests, die auf der Aufnahme eines Testfeldes bei sukzessiver Erwärmung der Kamera beruhen, scheinen eine Veränderlichkeit der Kamerakonstante bei Temperaturzunahme zu bestätigen. Bislang konnte eine systematische Schwankung wie in Abbildung 4.27 im Laborversuch jedoch noch nicht nachgewiesen werden. Die Frage möglicher Erwärmungseffekte ist somit durch weiterführende Untersuchungen noch endgültig zu klären.

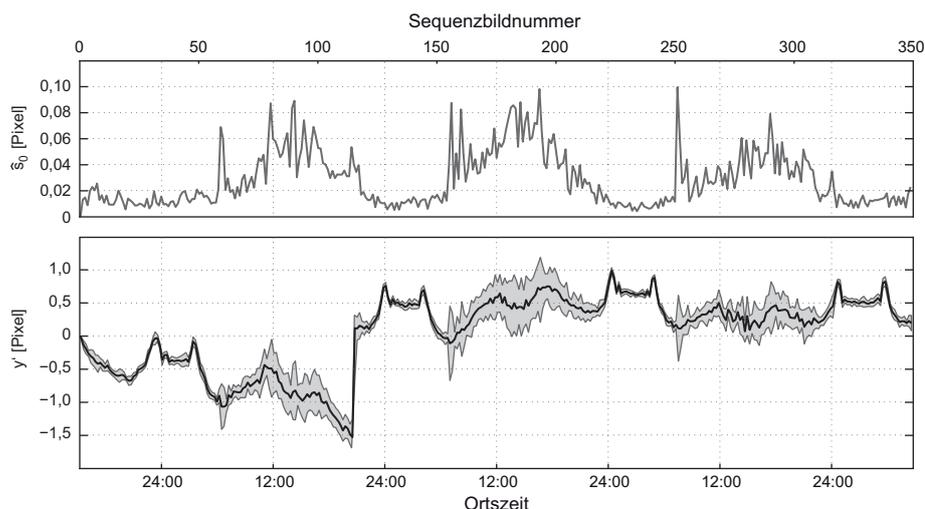


Abbildung 4.27: Zeitlich variierender Fehler der Kamerabewegungskorrektur. Im oberen Diagramm ist die Standardabweichung der Gewichtseinheit der Ausgleichung zur Bestimmung der Kamerabewegungsparameter für eine Bildsequenz in Abhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt der Bilder dargestellt. Die Größenordnung des Fehlers unterliegt systematischen Schwankungen im Tagesrhythmus. Das untere Diagramm zeigt exemplarisch eine Korrekturtrajektorie (y -Komponente), deren Fehlerkorridor in zehnfacher Überhöhung mit abgebildet ist (grau).

4.2.7 Transformation vom Bildraum in den Objektraum

Da alle gemessenen Größen zunächst nur im Bildraum vorliegen, besteht der letzte Schritt der Bildsequenzanalyse in einer geeigneten Transformation der Messwerte in den Objektraum. Bei der monoskopischen Bildsequenzanalyse können im Objektraum nur die Beträge der Bewegungsvektoren eines Objektpunktes bestimmt werden. Informationen über die Bewegungsrichtung müssen als bekannte Größen in die Berechnung mit einfließen.

4.2.7.1 Einfache Skalierung mittels Distanzwert

Wird eine Sequenzkamera horizontiert und ihre Bildebene zudem parallel zur Fließrichtung des Gletschers ausgerichtet, so können die im Bildraum gemessenen Translationen mittels einfacher Skalierung über die Distanz zwischen Kamera und Objekt, die entsprechend Kapitel 4.2.4 für jedes Pixel vorliegt, in den Objektraum übertragen werden. In der Realität ist es aufgrund geografischer Gegebenheiten häufig nicht möglich, einen Standort mit orthogonaler Blickrichtung zur Fließrichtung des Gletschers einzurichten. Die Tatsache, dass für die Kamerabewegungskorrektur ein gewisser Vordergrundbereich im Bild enthalten sein muss, erfordert zudem meist eine Verkippung der Kamera um die x -Achse des Kamerakoordinatensystems.

Auf die Genauigkeit, mit der eine Übertragung der Messwerte in den Objektraum erfolgen kann, haben somit folgende Größen einen wesentlichen Einfluss: Die Abweichung von der Parallelität zwischen der Fließrichtung des Gletschers und der Bildebene wirkt hauptsächlich auf die horizontale Bewegungskomponente. Die Neigung der Kamera um die x -Achse hat den größten Einfluss auf die vertikale Bewegungskomponente. Eine Rotation der Kamera um die optische Achse beeinflusst beide Vektorkomponenten gleichermaßen, kann aber schon bei der Aufstellung der Kamera gering gehalten werden, da keine Zwangsbedingungen bestehen, die eine Neigung der Kamera um die z -Achse erforderlich machen.

Im Folgenden wird für den Fall der Nichtparallelität zwischen Fließrichtung und Bildebene abgeschätzt, in welcher Größenordnung Fehler im Falle einer einfachen Skalierung der Trajektorien mittels Distanzwert zu erwarten sind und durch welche Variablen sie beeinflusst werden. In Abbildung 4.28 wird der entsprechende Zusammenhang in der Horizontalprojektion grafisch veranschaulicht und mit Gleichung 4.18 beschrieben.

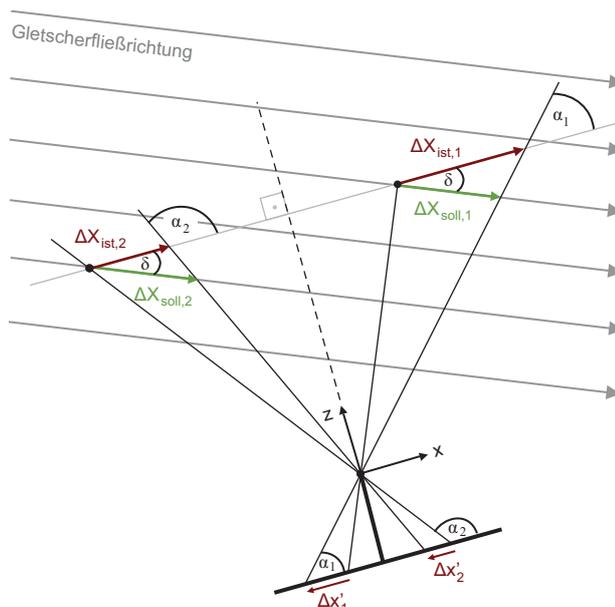


Abbildung 4.28: Fehler bei einfacher Skalierung. Fehlerhafte Übertragung im Bild gemessener Größen in den Objektraum im Falle einer einfachen Skalierung über die Distanz, bei Nichtparallelität zwischen Bildebene und Fließrichtung des Gletschers.

$$\Delta X_{soll} = \Delta X_{ist} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \delta)} \quad \text{mit} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{c}{x'}\right) \quad (4.18)$$

Durch eine einfache Skalierung wird der im Bild gemessene Vektor $\Delta x'$ auf eine Ebene parallel zur Bildebene projiziert und ergibt dort den Vektor ΔX_{ist} . Weicht die tatsächliche Bewegungsrichtung des Gletschers um den Winkel δ von dieser Ebene ab, so ist ΔX_{ist} gegenüber der tatsächlichen Translation im Objektraum ΔX_{soll} um einen gewissen Faktor verfälscht. Dieser Faktor ist neben δ auch abhängig von der Kamerakonstan-

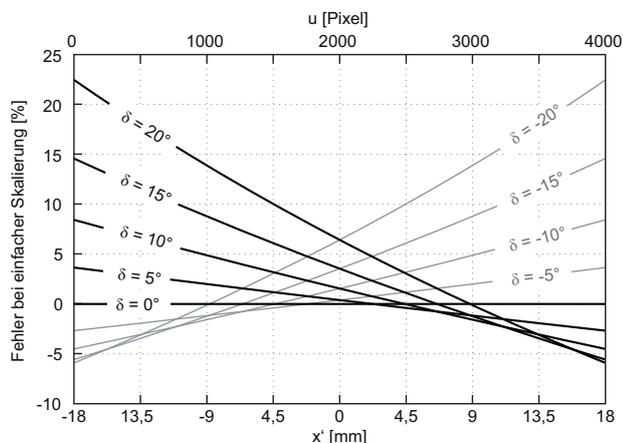


Abbildung 4.29: Auswirkung des Fehlers bei einfacher Skalierung aufgrund der Nichtparallelität von Gletscherbewegungsrichtung und Bildebene (Winkel δ) in Abhängigkeit von der horizontalen Position x' im Bild (Rechenbeispiel: Kamerakonstante 50 mm).

te c und der Position x' im Bild, auf welche sich die gemessene Translation bezieht, bzw. vom Winkel α , unter dem der entsprechende Bildstrahl auf die Bildebene auftrifft. Der entstehende Skalierungsfehler verstärkt sich, je weitwinkliger das verwendete Objektiv ist.

Abbildung 4.29 stellt die unterschiedliche Auswirkung der fehlerhaften Skalierung für verschiedene Winkel δ über die gesamte Bildbreite dar. Ausgehend von einer Position im Bild, für die kein Skalierungsfehler auftritt, nimmt dieser zum Bildrand hin zu. Je größer δ ist, umso stärker variiert der Fehler im Bildbereich. Doch auch schon bei der Abweichung der Parallelität zwischen Bildebene und Fließrichtung um wenige Grad ist der entstehende Skalierungsfehler am Bildrand nicht vernachlässigbar.

Analog zu den obigen Betrachtungen wirkt die Neigung der Kamera um die x -Achse (Winkel ω) auf die Vertikalkomponente des Bewegungsvektors. Es gilt in diesem Fall: $\delta = \omega$.

4.2.7.2 Objektraumtransformation mit Vorgabe der Bewegungsrichtung

Um bei der Transformation der Trajektorien in den Objektraum Fehlereinflüsse aufgrund einer nicht horizontalen Kamera mit schräger Sicht auf den Gletscher zu vermeiden, sind Modellannahmen über die Bewegungsrichtung eines Punktes zu treffen. Es wird angenommen, dass sich jeder Gletscherpunkt in einer Vertikalebene bewegt, die in Fließrichtung des Gletschers orientiert ist (vgl. Abbildung 4.30). Diese Annahme ist im Rahmen der erzielbaren Genauigkeit in der Regel gerechtfertigt (vgl. Kapitel 6.1.2.4). Durch Verschneidung der Bildstrahlen der Trajektorienpunkte mit der beschriebenen Modellebene können für alle Punkte einer Trajektorie 3D-Objektkoordinaten bestimmt werden.

Die Methode wird im Folgenden für den Fall einer ortsfesten Messung etwas detaillierter beschrieben: Die Orientierungsparameter, die für eine Sequenzkamera vorliegen (Kapitel 4.2.3), beziehen sich auf das Kamerakoordinatensystem des Sequenzstartbildes. Es wird demzufolge, ausgehend vom Startpunkt P' der Messung im Sequenzstartbild, der zugehörige Bildstrahl konstruiert und mittels bekannter Distanz der entsprechende Objektpunkt P im Raum bestimmt. Von diesem aus wird die Fließrichtung des Gletschers abgetragen. Diese kann z. B. anhand deutlich erkennbarer Fließlinienmuster in Satellitenorthophotos digitalisiert werden. Der Objektpunkt P , der Vektor der Fließrichtung und die Lotrechte definieren die vertikale Bewegungsebene für den zu messenden Punkt. Bei ortsfesten Messungen wird für jedes Zeitintervall in Bezug auf die feste Position P der Translationsvektor im Bildraum bestimmt. Dieser wird jeweils an den Startpunkt P' im Sequenz-

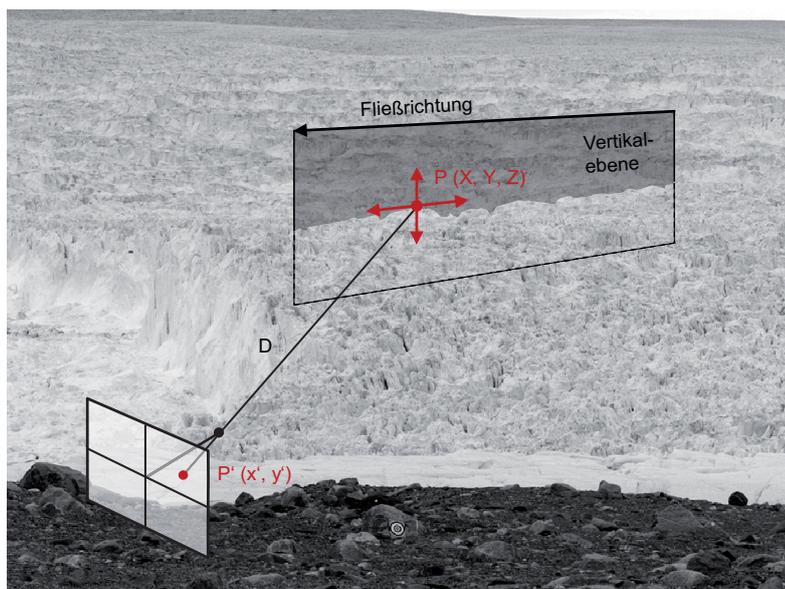


Abbildung 4.30: Objektraumübertragung. Definition der vertikalen Bewegungsebene eines Gletscherpunktes mittels bekannter Distanz D zwischen Kamera und dem Startpunkt P einer Trajektorie.

startbild angebracht und vom resultierenden Bildpunkt aus wird wiederum ein Bildstrahl konstruiert. Der durch Verschneidung dieses Bildstrahls mit der vertikalen Modell-Bewegungsebene entstehende Schnittpunkt ergibt zusammen mit P den Translationsvektor im Objektraum.

Auf die Genauigkeit mit der die Skalierung der Messwerte bei vorgegebener Bewegungsrichtung des Gletschers erfolgen kann, wirkt nunmehr nur noch der Restfehlereinfluss, durch den Winkel, um den die tatsächliche Bewegungsrichtung des Gletschers an der Stelle eines Messpunktes von der Modellannahme der Bewegungsrichtung abweicht. Dieser Einfluss wird in Kapitel 6.1.2.3 gesondert betrachtet.

4.3 Terrestrische Laserscannerdaten

Im diesem Kapitel wird eine Methode zur Ableitung dreidimensionaler Bewegungsvektorfelder aus terrestrischen Laserscannerdaten beschrieben, die auf Basis der Laserscannermessungen am Jakobshavn Isbræ (vgl. Kapitel 3.4.2), entwickelt wurde. Es wird hier ein allgemeines Verfahren vorgestellt, welches die grundsätzlichen Eigenschaften multi-temporaler Laserscans berücksichtigt, die sich aus dem sequenziellen Aufnahmeprinzip und der direkten 3D-Messung ergeben. Die – bei dem im Rahmen der Arbeit verwendeten Laserscanner – aus technischen Gründen notwendige Unterteilung der Scans in mehrere Teilscans (vgl. Abbildung 4.32) bedingte eine Ergänzung dieses allgemeinen Verfahrens um Maßnahmen, die zusätzlich Zeitdifferenzen und Nullrichtungsabweichungen zwischen den Teilscans korrigieren.

4.3.1 Grundprinzip – Analyse multi-temporaler Laserscans

Die Analyse multi-temporaler Laserscans basiert auf der Zuordnung korrespondierender Punktmuster in 3D-Punktwolken, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten vom Messobjekt aufgenommen wurden. Mittels geeigneter Zuordnungsverfahren wird zunächst der 3D-Translationsvektor für ein Punktmusterpaar bestimmt. Unter Einbezug der Aufnahmezeitdifferenz zwischen den zugeordneten Punktmustern kann der entsprechende Translationsvektor in eine Geschwindigkeit übersetzt werden.

Abbildung 4.31 zeigt die überlagerten Punktwolken aus zwei Scanepochen als Projektion in die X - Y -Ebene. Die inhomogene Topografie der Gletscheroberfläche, die im Messbereich durch Spaltenbildung geprägt ist, unterstützt die Abgrenzung und Zuordnung dreidimensionaler Merkmale. Gletscherspalten trennen einzelne Eisstrukturen voneinander, die am Jakobshavn Isbræ typischerweise eine Ausdehnung von ca. 10 m bis 50 m aufweisen. Da der Laserstrahl unter flachem Winkel auf den Gletscher auftrifft, werden stark geneigte, dem Laserscanner zugewandte Flächen mit großer Punktdichte gescannt, während auf der Rückseite der Eisstrukturen Scanschatten entstehen. Die daraus resultierende unregelmäßige Verteilung der Punkte in der Horizontalprojektion ermöglicht eine gute Trennbarkeit der einzelnen Eisstrukturen. Zwei unter diesen Voraussetzungen geeignete Methoden für die Punktzuordnung werden in Kapitel 4.3.4 erläutert. Als Ergebnis der Zuordnung ergibt sich ein Feld dreidimensionaler Translationsvektoren.

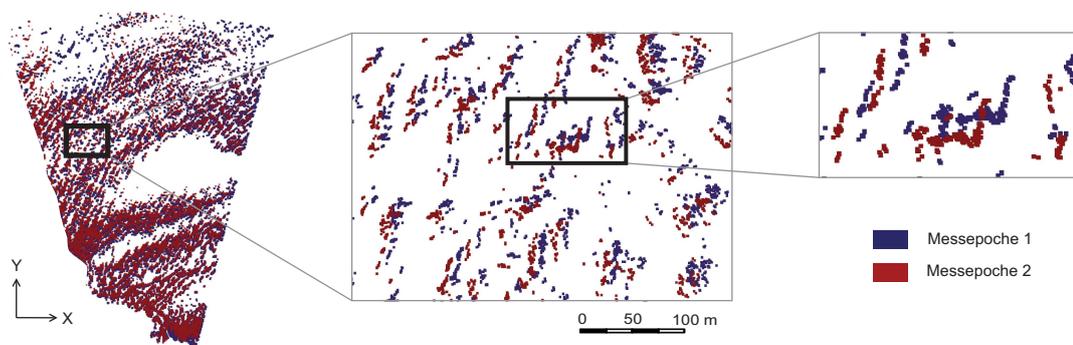


Abbildung 4.31: Gescannte Oberflächenstrukturen aus zwei Epochen. Die Abbildung zeigt die überlagerten Punktwolken aus zwei Messepochen in der Horizontalprojektion. Links ist der gesamte Scanbereich abgebildet und rechts wird ein Ausschnitt in zweistufiger Vergrößerung dargestellt.

Für die Ableitung von Geschwindigkeiten aus den gemessenen Translationen sind die zugeordneten Punktwolken mit Zeitstempeln zu versehen. Beim Laserscanning handelt es sich um ein sequenzielles Aufnahmeverfahren. Im Gegensatz zur Auswertung von Bildsequenzen, bei denen der gesamte Messbereich in einzelnen Momentaufnahmen erfasst wird und jeder Messpunkt im Bild den gleichen Zeitstempel trägt, umfasst die Aufnahme eines einzelnen Scans einen wesentlich größeren Zeitraum, und den einzelnen Messpunkten sind unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte zugeordnet. Abbildung 4.32 zeigt das individuelle Zeitverhalten für die Scans aus zwei Aufnahmeepochen sowie die Zeitunterschiede zwischen den beiden Epochen. Die Messdauer für ein horizontales Winkelintervall kann aufgrund unterschiedlicher vertikaler Gesichtsfelder von Scan zu Scan variieren. Dies führt für verschiedene Positionen im gescannten Bereich zu unterschiedlichen Zeitdifferenzen zwischen beiden Epochen. Für jede segmentierte Punktwolke ist aus den Aufnahmezeitpunkten der einzelnen enthaltenen Punkte eine Zeit für die Position zu interpolieren, auf die sich der ermittelte Translationsvektor bezieht. Die Methode zur Überführung der Bewegungsvektorfelder in Geschwindigkeitsfelder wird in Kapitel 4.3.5 beschrieben.

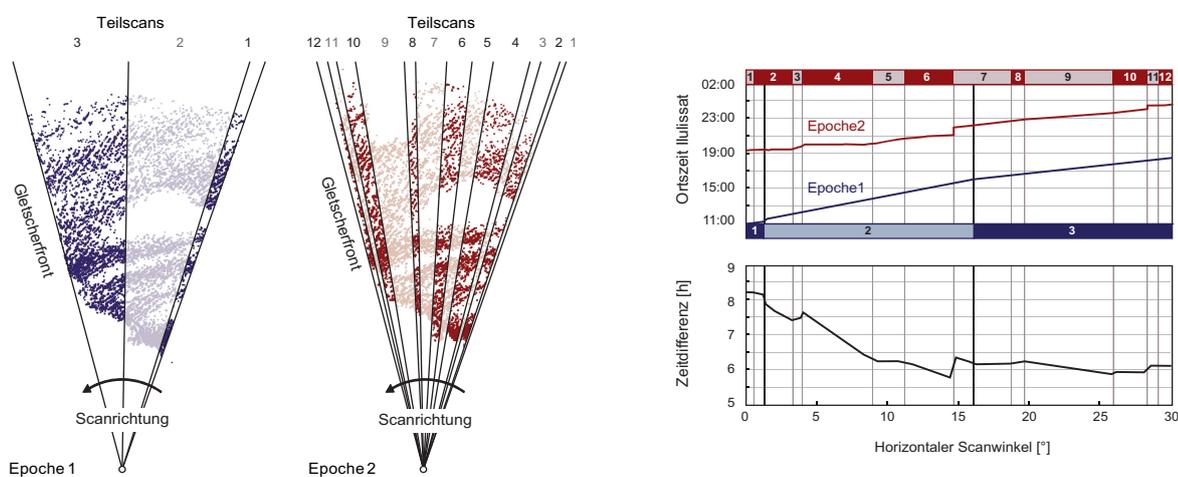


Abbildung 4.32: Aufnahmezeiten der Scans aus zwei Messepochen. Die Abbildung zeigt die Scans aus zwei Messepochen in der Horizontalprojektion, die sich jeweils aus mehreren Teilscans zusammensetzen. Während die Punktwolke aus Epoche 1 (blau) aus drei Einzelscans besteht, ergab sich die Punktwolke für Epoche 2 aus zwölf Teilscans. Die Abbildung zeigt im oberen Diagramm den zeitlichen Verlauf für die Aufnahme der Scans. Die unterschiedlichen Zeitdifferenzen zwischen Epoche 1 und 2, bezogen auf den Horizontalwinkel der Scans, sind im unteren Diagramm dargestellt.

4.3.2 Datenvorverarbeitung

Bevor in den 3D-Punktwolken verschiedener Messepochen eine Punktzuordnung erfolgen kann, ist eine Vorverarbeitung der Daten notwendig. Für die entsprechend Kapitel 3.4.2 aufgenommenen Scans ergeben sich die folgenden drei Vorverarbeitungsschritte:

1. Interpolation des Aufnahmezeitpunktes für jeden einzelnen Punkt
2. Korrektur der Nullrichtungsfehler (bei Unterteilung des Scans einer Epoche in einzelne Teilscans)
3. Transformation der Punktwolken in ein gemeinsames, horizontiertes Koordinatensystem.

Werden die Aufnahmezeitpunkte für die einzelnen Punktmessungen vom Scanner nicht registriert, so sind sie aus den Start- und Stopzeiten des Laserscans auf geeignete Weise zu interpolieren. Prinzipiell bieten sich dazu zwei Möglichkeiten an. Die Zeiten können linear in das vordefinierte Winkelraaster, mit dem gescannt wurde, interpoliert werden oder die Interpolation erfolgt andererseits linear anhand der Messreihenfolge der Punkte. Diese zweite Lösung wird bevorzugt, da das Scanmuster nicht vollkommen regelmäßig ist und die Winkelintervalle zwischen den gemessenen Punkten variieren (vgl. Abbildung 4.33). Die zeitliche In-

terpolation mit Hilfe der Messreihenfolge setzt voraus, dass alle Punkte des zu messenden Winkelrasters fortlaufend nummeriert werden, auch wenn ihre Messung nicht möglich ist (z. B. aufgrund zu großer Entfernung oder zu schwacher Reflektivität).

Wie eingangs erwähnt, ist bei der Auswertung der aufgenommenen Daten der besondere Fall zu berücksichtigen, dass sich jeder Epochenscan in kleinere Sektoren unterteilt, welche nacheinander gescannt wurden (Abbildung 4.32 links). Für einzelne Teilsfans treten geringfügige Abweichungen in der Nullrichtung auf, die ohne entsprechende Korrektur zu Messfehlern führen. Ein zusätzlicher Vorverarbeitungsschritt besteht deshalb hier in der Bestimmung der Nullrichtungsabweichung zwischen benachbarten Scans und in der Rotation der Teilsfans in das Koordinatensystem des ersten Scans der jeweiligen Messepoche. In [Schwalbe u. a., 2008] wird ein entsprechendes Korrekturschema vorgestellt.

Das mit dem Laserscanner fest verbundene lokale Koordinatensystem, in dem die Messung erfolgt, ist nicht horizontalisiert. Um vertikale und horizontale Komponenten der Gletscherbewegung ableiten zu können, werden die Scans der einzelnen Epochen in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt, in welchem die Z-Achse der Lotrechten entspricht. Dies erfolgt durch eine 3D-Helmert-Transformation. Die entsprechenden Transformationsparameter werden mit Hilfe von Passpunkten (retroreflektierende Zylinder) bestimmt, deren Koordinaten in beiden Systemen bekannt sind.

Als Ergebnis der Datenvorverarbeitung liegt für jede Messepoche eine 3D-Punktcloud in einem übergeordneten, horizontalisierten Koordinatensystem mit individuellen Zeitinformationen für jeden Messpunkt vor.

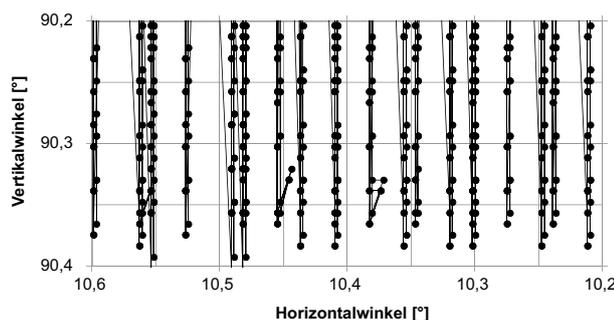


Abbildung 4.33: Scanmuster. Die Abbildung zeigt anhand eines kleinen Scanausschnittes die Verteilung der gemessenen Punkte im Horizontal- und Vertikalwinkelraster.

4.3.3 Segmentierung

Zur Bestimmung des Bewegungsvektorfeldes mit einer bestimmten räumlichen Auflösung ist der Gesamtdatensatz auf geeignete Weise in kleinere Punktclouden (Segmente) zu unterteilen, für die jeweils ein Translationsvektor ermittelt werden kann. Es sind dabei drei Aspekte zu betrachten:

- Definition des Messpunktrasters
- Größe der Segmente
- Positionsbezug der Messwerte

Über das Raster der Messpunkte wird definiert, für welche Positionen auf der Gletscheroberfläche Geschwindigkeitswerte ermittelt werden und mit welcher räumlichen Auflösung das Geschwindigkeitsfeld bestimmt wird. Das Messpunktraster kann prinzipiell beliebig dicht gewählt werden, doch ist zu beachten, dass im Falle sich überlappender Segmente benachbarte Messwerte miteinander korreliert sind. Die räumliche Ausdehnung der segmentierten Punktclouden ergibt sich aus der Punktdichte und der Mindestanzahl von

Punkten, die ein Segment enthalten sollte. Unkorrelierte Messwerte ergeben sich also nur im Falle eines an die Segmentgröße angepassten Messpunktrasters.

Die Größe der segmentierten Punktwolken beeinflusst einerseits die Repräsentationsgenauigkeit des daraus abgeleiteten Messwertes und zum anderen die Zuverlässigkeit der Punktzuordnung. Die Punktwolken sollten in ihrer räumlichen Ausdehnung klein genug sein, um stärkere räumliche und zeitliche Interpolationen bei der Bestimmung der Messgrößen zu vermeiden. Sie sollten aber dennoch genügend Punkte enthalten, um eine erfolgreiche Registrierung auf den zweiten Datensatz gewährleisten zu können.

Die Segmentierung der Punktwolken kann durch Definition eines regelmäßigen Segmentrasters oder mittels Clusteranalyse erfolgen. Abbildung 4.34 skizziert drei Möglichkeiten einer regelmäßigen Segmentierung des Datensatzes in kleinere Punktwolken. Naheliegend ist zunächst eine Rasterung des Datensatzes in der X - Y -Ebene des kartesischen Koordinatensystems (Variante a), da sich auf diese Weise auch ein gleichmäßig verteiltes Messpunktraster ergibt. Die räumliche Interpolation der Messwerte aufgrund der Größe der Segmente ist vergleichbar. Nachteile ergeben sich hier aus der Tatsache, dass das Aufnahmezeitintervall für ein Segment in geringer Entfernung deutlich größer ist als für weiter entfernte Segmente. Zudem enthalten die Segmente eine sehr unterschiedliche Anzahl an Punkten. Besser an das Aufnahmeprinzip der Laserscannerdaten angepasst ist deshalb die Rasterung mittels Polarkoordinaten. Hier ergeben sich zwei Möglichkeiten: Die Segmentierung kann einerseits über definierte Horizontal- und Vertikalwinkelintervalle (Variante b) oder mittels Horizontalwinkel- und Distanzintervallen (Variante c) erfolgen. Bei beiden Varianten ist vorteilhaft, dass durch die Verwendung gleicher Horizontalwinkelintervalle die Aufnahmezeitintervalle der segmentierten Punktwolken eine vergleichbare Größenordnung besitzen. Variante b) hat den Vorteil, dass die einzelnen Segmente eine vergleichbare Anzahl an Punkten enthalten.

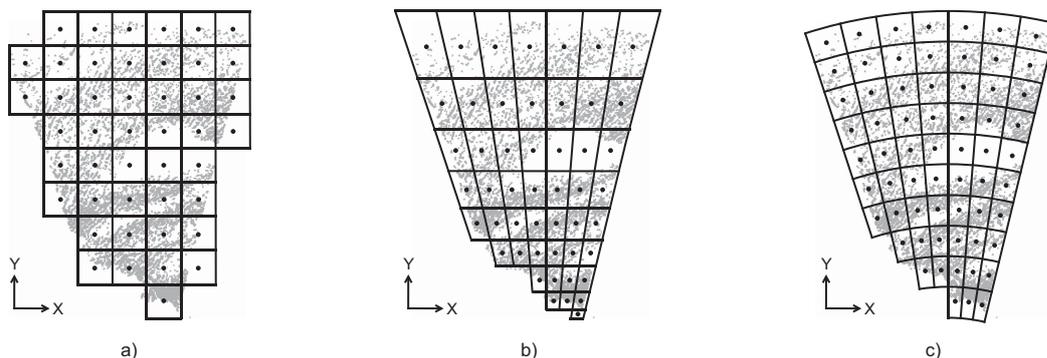


Abbildung 4.34: Schematische Darstellung von Möglichkeiten zur Messrasterdefinition und Segmentbildung:
 a) mittels der X - Y -Koordinaten des kartesischen Koordinatensystems
 b) mittels Vertikal- und Horizontalwinkel des Polarkoordinatensystems
 c) mittels Distanz und Horizontalwinkel des Polarkoordinatensystems.

Nachteilig wiederum ist aber, dass die Segmente in größerer Entfernung auch eine größere räumliche Ausdehnung besitzen, was in diesen Bereichen eine stärkere räumliche Interpolation der Messwerte zur Folge hat. Zudem würden bei zu großen Tiefenunterschieden im Patch zu starke Schereffekte innerhalb der Segmente auftreten. Der beste Kompromiss hinsichtlich der Zuordnungszuverlässigkeit sowie der räumlichen und zeitlichen Interpolation für die Segmentierung ist somit in Variante c) zu sehen.

Bei der Segmentierung mittels eines regelmäßigen Rasters stellt sich die Frage, welches für einen Messwert der korrekte Bezugspunkt innerhalb des entsprechenden Punktwolkensegmentes ist. Der zunächst naheliegende Bezug auf den Mittelpunkt des Segments ist durch die unregelmäßige Verteilung der Punkte nicht immer repräsentativ. Der Schwerpunkt der segmentierten Punktwolke ist hier ein geeigneterer Positionsbezug.

Die Möglichkeit einer verfeinerten Segmentierung, die der unregelmäßigen Verteilung der Punkte besser Rechnung trägt, besteht in der Anwendung einer Clusteranalyse. Sie eignet sich als Segmentierungsverfahren,

da sich im Scan Punkte auf einzelnen Eisstrukturen konzentrieren und diese durch Scanschatten klar voneinander getrennt sind (vgl. Abbildung 4.31). Abbildung 4.35 stellt anhand eines Scanausschnittes die Segmentierungsergebnisse von Clusteranalyse und Rastersegmentierung gegenüber. Die Vorteile der Clusteranalyse bestehen darin, dass Punktwolken einzelner Eisstrukturen zusammenhängend separiert werden können und der Positionsbezug des Messwertes in Form des Clusterschwerpunkts mitbestimmt wird. Insbesondere für die direkte Zuordnung von 3D-Punktwolken (z. B. mittels ICP) ist diese Art der Segmentierung sinnvoll. Aus der Vielzahl existierender Clusterverfahren [Bacher u. a., 2010] erweist sich dabei der „k-means“-Algorithmus als geeignet (vgl. z. B. [Kanungo, 2002]). Nachteile der Segmentierung mittels Clusteranalyse sind die größere Rechenintensität des Verfahrens und die Notwendigkeit einer entfernungsabhängig unterschiedlichen Parametrisierung, bedingt durch die variierende Punktdichte innerhalb des Scans.

Die Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Laserscans erfolgte unter Verwendung einer regelmäßigen Segmentbildung nach Variante c).

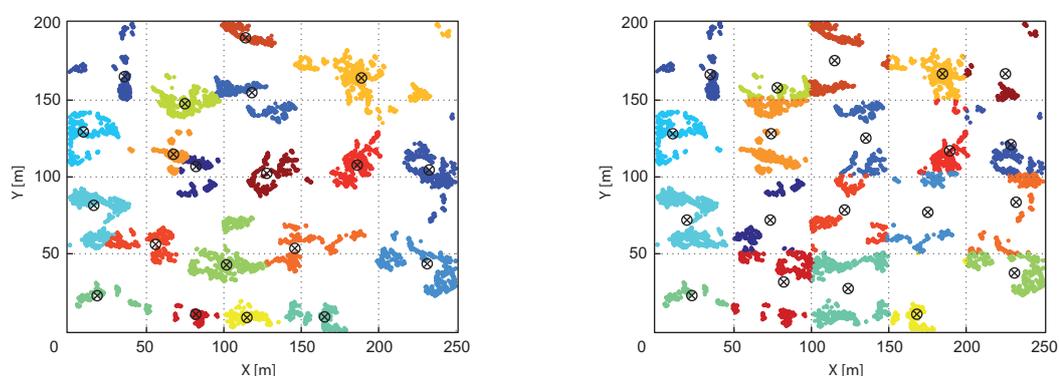


Abbildung 4.35: Vergleich von Clusteranalyse und Rastersegmentierung. Die Abbildung zeigt einen 200 m x 250 m großen Scanausschnitt, innerhalb dessen Punktwolken zum einen mittels „k-means“-Clusteranalyse (links) und zum anderen mittels eines regelmäßigen, 50 m x 50 m großen Rasters (rechts) segmentiert wurden. Die segmentierten Punktwolken sind farblich voneinander abgegrenzt. Schwarze Kreise mit Kreuz definieren den jeweiligen Schwerpunkt der einzelnen Segmente.

4.3.4 Tracking in 3D-Punktwolken

Aus der Tatsache heraus, dass sich die Punktwolken einzelner Eisstrukturen in der Horizontalprojektion der Daten gut voneinander trennen lassen, ergeben sich die folgenden zwei möglichen Vorgehensweisen bei der Punktzuordnung, die aufeinander aufbauend angewendet werden können:

1. Reduzierung der Punktwolken auf ein horizontales, zweidimensionales Raster, wobei die Z-Koordinaten der Punkte interpoliert werden. Die Zuordnung erfolgt dann mittels flächenbasierter Bildzuordnungsverfahren (z. B. Kreuzkorrelationsverfahren, LSM) für definierte Patchgrößen. Die Patches sind in diesem Fall die Entsprechung der in Kapitel 4.3.3 definierten Segmente.
2. Direkte Zuordnung von 3D-Punktwolken, die entsprechend Kapitel 4.3.3 aus dem Gesamtdatensatz segmentiert wurden, unter Verwendung geeigneter 3D-Matchingverfahren (z. B. ICP, 3D-LSM).

Die Abbildung 4.36 veranschaulicht die Vorgehensweise für den ersten Ansatz am Beispiel eines einzelnen Messpunktes (bzw. Segments). Die Einzelpunkte der Laserscans werden auf ein regelmäßiges, horizontales Raster projiziert (X - Y -Ebene). Die Höhe der Punkte kann als Grauwert kodiert werden. Für das Beispiel in Abbildung 4.36 erfolgte eine Skalierung der Z -Werte auf 16 bit. Dies ermöglicht eine Auflösung der Höhenwerte im Millimeterbereich, bei einem maximalen Höhenunterschied von ca. 250 m in den zugrundeliegenden Daten. Eine geeignete Rasterauflösung ergibt sich aus der Punktdichte bzw. aus der Winkelauflösung des Scans und der Entfernung zum Messbereich. Da die Punktdichte mit zunehmender Entfernung abnimmt, ist es

sinnvoll, die Rasterweite für die geringste Entfernung zum Messbereich zu definieren oder die segmentierten Punktwolken einzeln zu rastern und dabei die Rasterweite entfernungsabhängig anzupassen.

Auf die so gerasterten Laserscannerpunktwolken können nun entsprechende Bildzuordnungsverfahren angewandt werden. Aus den entsprechend Kapitel 4.3.3 segmentierten Punktwolken des Scans der ersten Mess-epoche ergibt sich dabei jeweils ein Referenzpatch. Die zugehörigen Suchbereiche im Scan der zweiten Mess-epoche werden anhand der Position und Größe des Referenzpatches definiert und um einen den zu erwartenden Translationen angepassten Bereich, erweitert (vgl. hierzu auch Kapitel 4.2.5.2).

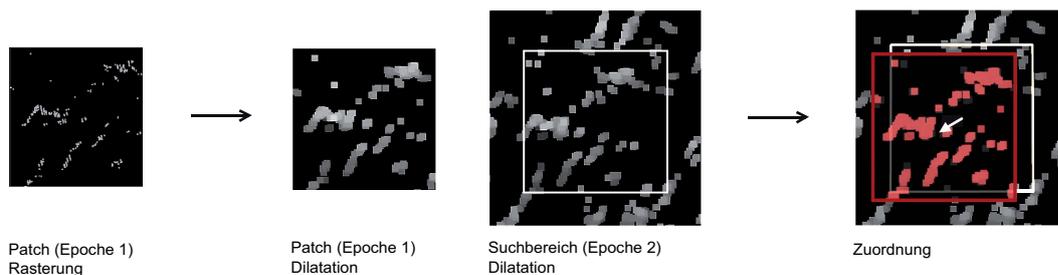


Abbildung 4.36: Punktwolkenzuordnung in gerasterten Laserscannerdaten. Die Abbildung zeigt am Beispiel eines einzelnen Messpunktes die Rasterung und Zuordnung der zugehörigen Punktwolke. Die gerasterte Punktwolke (links) und ihr zugehöriger Suchbereich werden morphologisch erweitert (Mitte). Als Ergebnis des Matchings ergibt sich ein horizontaler Bewegungsvektor (rechts).

Da davon auszugehen ist, dass die Bewegung des Gletschers lokal primär einer Translation entspricht, können horizontale Bewegungen durch Kreuzkorrelation mit Subpixelinterpolation oder mittels LSM mit Translationsparameterschätzung bestimmt werden. Bewegungsänderungen des Gletschers in vertikaler Richtung werden aus den Mittelwerten der Punkthöhen in den Patches zweier Epochen ermittelt. Sie äußern sich in einem Helligkeitsunterschied der beiden Patches.

Ein Problem, welches durch eine hohe Rasterauflösung entsteht, ergibt sich aus der Tatsache, dass die Laserpulse aus zwei Scanepochen nicht an den gleichen Positionen am Objekt auftreffen. In den gerasterten Daten sind Rasterelemente leer, auf die keine Laserscannerpunkte entfallen. Mit zunehmender Rasterauflösung steigt der Anteil leerer Rasterelemente und somit auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich Pixel mit Scaninfor-

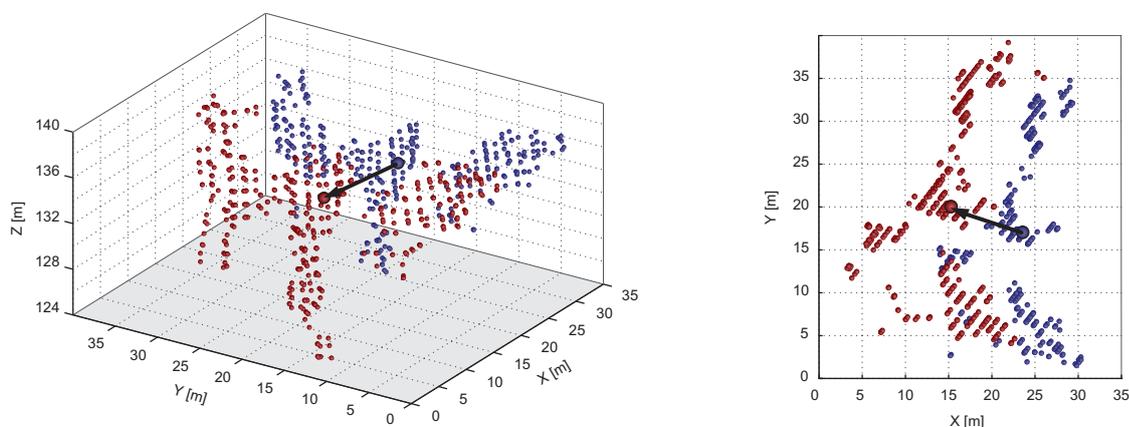


Abbildung 4.37: Direkte Zuordnung von Punktwolken mittels ICP. Die Abbildung zeigt am Beispiel eines 35 m x 35 m großen Punktwolkensegmentes die Verteilung der Punkte aus Epoche 1 (blau) und Epoche 2 (rot) sowie den mittels ICP erhaltenen Translationsvektor (schwarz). Bezugspunkt für den Messwert ist der Schwerpunkt der Punktwolke aus Epoche 1 (großer blauer Punkt). Die Abbildung zeigt die korrespondierenden Punktwolken als schräge Projektion (links) und als Horizontalprojektion (rechts).

mation aus zwei Epochen nicht überlappen und die beiden Patches somit nicht korreliert werden können. Um einerseits die hohe Auflösung zu erhalten und andererseits ein besseres Verhältnis aus leeren und nicht-leeren Rasterelementen herzustellen, wird im Vorfeld des Matchings ein morphologischer Dilatationsfilter auf die Patches angewandt.

Bei entsprechend hoher Rasterauflösung und unter Verwendung sub-pixelgenauer Zuordnungsverfahren ist mit diesem ersten Ansatz eine Zuordnungsgenauigkeit erzielbar, die kleiner ist als der Punktabstand innerhalb der Punktwolke. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese Methode aber primär als Verfahren zur Beschaffung von Näherungswerten für den zweiten Ansatz verwendet. Dieser besteht in der direkten Zuordnung der segmentierten Punktwolken mittels ICP (vgl. Kapitel 4.1.2). Als Transformationsmodell für die Zuordnung wird hier eine 3D-Translation zugrunde gelegt. Abbildung 4.37 zeigt am Beispiel einer segmentierten Punktwolke das Ergebnis der Zuordnung mittels ICP zwischen zwei Scanepochen.

4.3.5 Geschwindigkeitsbestimmung

Für die Ableitung von Geschwindigkeitswerten ist die Bestimmung eines repräsentativen Zeitwertes für eine segmentierte Punktwolke der ersten Epoche sowie für ihre korrespondierende Punktwolke aus dem Scan der zweiten Epoche Voraussetzung. Aufgrund des sequentiellen Aufnahmeverfahrens existiert eine gewisse Aufnahmezeitspanne für die jeweiligen Punktwolkensegmente. Die maximale Aufnahmezeitdifferenz für Punkte innerhalb eines Segments ist abhängig von der Größe der segmentierten Punktwolke, der Art der Definition eines Segments (vgl. Kapitel 4.3.3), der Scanauflösung, der Messrate und dem vertikalen Öffnungswinkel des Scans. Bei den vorliegenden Messungen betragen die Zeitunterschiede innerhalb der Segmente dabei bis zu 20 min. Innerhalb dieser Zeitspanne ist der Zeitwert für diejenige Position im Segment gesucht, auf die sich der Messwert lokal bezieht. Ein Fehler in der Bestimmung der Zeitdifferenz zwischen zwei Messepochen von ca. 5 min würde bei einer Zeitdifferenz von 7 h einem relativen Fehler von ca. 1,2 % bei der Bestimmung der Geschwindigkeit entsprechen. Eine korrekte Bestimmung der Zeitwerte für jede segmentierte Punktwolke (Epoche 1) und ihre korrespondierende Punktwolke (Epoche 2) ist deshalb im Hinblick auf die großen Zeitunterschiede innerhalb der einzelnen Segmente anzustreben. Die zunächst naheliegende Bestimmung der Zeitwerte mittels „Nearest-Neighbour“-Interpolation ist aufgrund der unregelmäßigen Verteilung der Punkte im Segment nicht in jedem Fall geeignet.

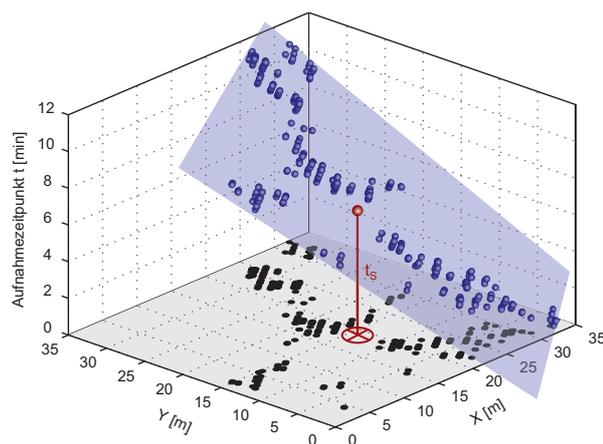


Abbildung 4.38: Zeitwertverteilung und -interpolation innerhalb eines Segmentes. Die Abbildung zeigt die Aufnahmezeiten einer segmentierten Punktwolke (blau), abgetragen über den X-Y-Koordinaten der jeweiligen Punkte (schwarz). Der Zeitwert (t_s) für eine bestimmte Position im Segment (roter Kreis mit Kreuz) ergibt sich durch Einsetzen der entsprechenden Koordinaten in die Ebenengleichung einer ausgleichenden Ebene durch alle Zeitwerte.

Abbildung 4.38 zeigt die Verteilung der Aufnahmezeiten für die einzelnen Punkte einer segmentierten Punktwolke. Wird der Aufnahmezeitpunkt auf der Z -Achse über den X - Y -Koordinaten der Punkte abgetragen, stellt sich die zeitliche Entwicklung innerhalb eines Segmentes näherungsweise als Ebene dar. Dies ermöglicht die Interpolation des Zeitwerts (t_s) für eine beliebige Position im Segment, indem die entsprechenden Koordinaten in die Ebenengleichung einer ausgleichenden Ebene durch alle Zeitwerte eingesetzt werden. Gilt der Schwerpunkt der Punktwolke als Bezugspunkt für die Messung, so kann der zugehörige Zeitwert auch anhand des Mittelwerts aller Aufnahmezeitpunkte innerhalb der Punktwolke bestimmt werden.

Die Abbildung 4.39 stellt die Zeitdifferenzen zwischen den beiden Messepochen dar. Zudem werden die Beträge der ermittelten Translationen und Geschwindigkeitswerte gegenübergestellt. Im Beispiel ist die Aufnahmezeitdauer für den zweiten Epochenscan geringer als die für den ersten. Dies führt für die einzelnen Messpunkte innerhalb des Scanbereichs zu variierenden Zeitdifferenzen zwischen beiden Messepochen (vgl. auch Abbildung 4.32 rechts). Ein relativer Vergleich der Beträge der Translationsvektoren ist somit nicht möglich. Die Translationsvektoren liefern die Bewegungsrichtung, doch erst durch die Bestimmung der Geschwindigkeiten werden miteinander vergleichbare Werte für das Bewegungsfeld erreicht.

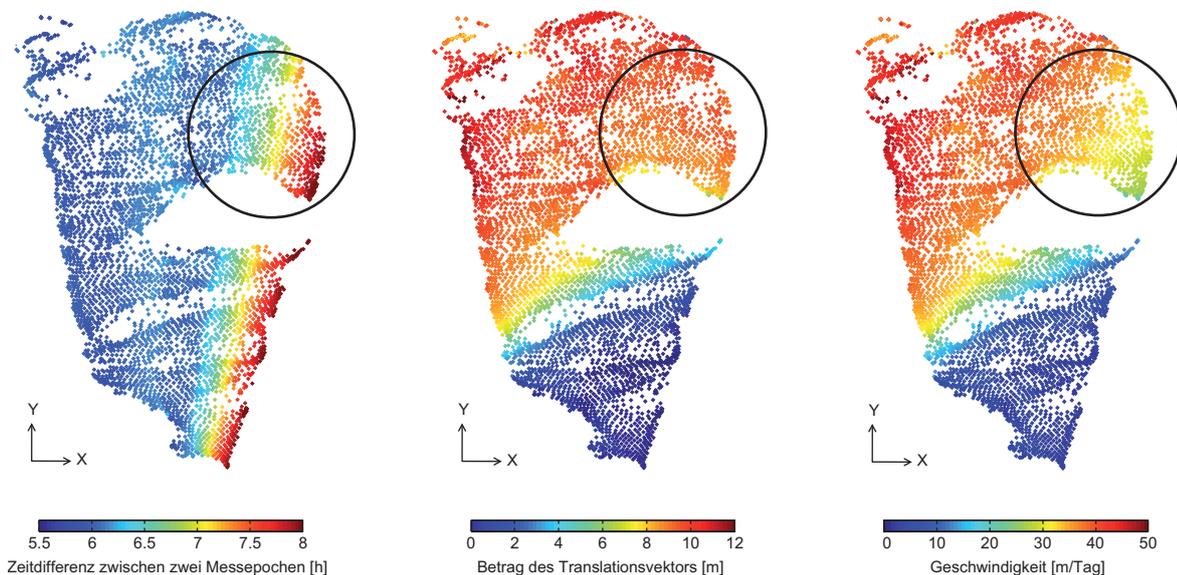


Abbildung 4.39: Zeitdifferenzen zwischen zwei Messepochen (links), Translationsbeträge (Mitte) und Geschwindigkeiten (rechts) im Scanbereich. Der schwarze Kreis umrandet einen Bereich, in dem Veränderungen beim relativen Vergleich der Messwerte innerhalb des Translations- und Geschwindigkeitsfeldes gut erkennbar sind.

5 Datenauswertung und Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Auswerteprozess der gewonnenen Messdaten. Dies beinhaltet die Aufbereitung und Strukturierung der Messdaten, die Implementierung von Auswertelgorithmen sowie die Zusammenstellung eines Arbeitsablaufes für die Auswertung. Weiterhin wird eine Übersicht über die verwendeten Parameter gegeben mit denen die Berechnungen erfolgten, und die erhaltenen Resultate werden zusammengestellt.

5.1 Datenübersicht

In Kapitel 3.4 wurden die einzelnen Messkampagnen mit den jeweils gewonnenen Bild- bzw. Laserscannerdaten vorgestellt. Die aufgenommenen Bildsequenzen – insbesondere die Langzeitsequenzen – können oft nicht in einem Stück ausgewertet werden, da sie zeitweise von Schneefall, Nebel oder Vereisungen des Kameragehäuses unterbrochen sind. Sie sind dann in kleinere zusammenhängende Sequenzabschnitte zu unterteilen, welche einzeln prozessiert werden. Die Bildmessreihen sind in den Nachtstunden nicht unterbrochen, da alle Daten nördlich von 69° N während des Polartags aufgenommen wurden, so dass viele zusammenhängend auswertbare Sequenzen eine Länge von mehr als 24 h besitzen. In Abbildung 5.1 wird anhand einer Zeittabelle eine Übersicht über alle auswertbaren Bildsequenzen und Laserscans aus den einzelnen Messkampagnen gegeben.

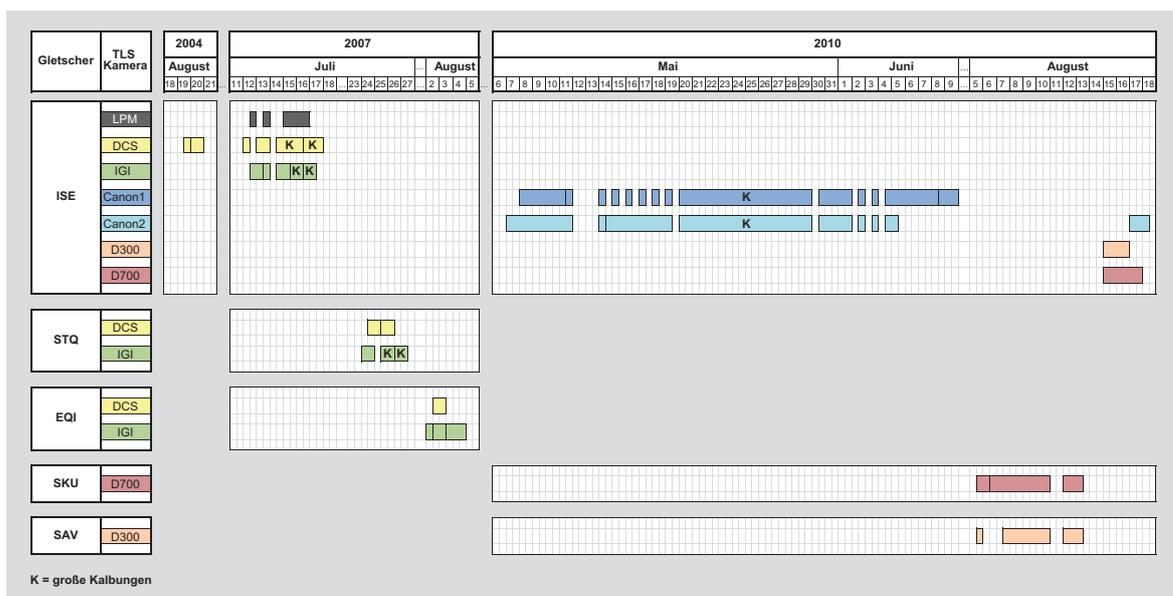


Abbildung 5.1: Übersicht der gewonnenen Messdaten: Die Abbildung zeigt alle auswertbaren Bild und Laserscannersequenzen, die während der Expeditionen 2004, 2007 und 2010 an den jeweiligen Gletschern Jakobshavn Isbræ (ISE), Støre Qarajaq (STQ), Eqip Sermia (EQI), Sermeq Kujalleq (SKU) und Sermeq Avannarleq (SAV) aufgenommen wurden. Die verwendeten Kameras und der Laserscanner (LPM) sind farblich unterschiedlich. Sequenzen, die größere Kalbungsereignisse enthalten, sind mit „K“ gekennzeichnet.

Das in Abbildung 5.2 dargestellte Schema zeigt die Strukturierung der aufgenommenen Daten. Neben den Bild- und Laserscannerdaten, anhand derer die Bestimmung von Bewegungsvektorfeldern erfolgt, wurden auch Daten aufgenommen, die zur Georeferenzierung dienen. Darunter fallen GPS- und Tachymetermesswerte sowie die zusätzlich aufgenommenen Mehrbildverbände. Die Aufnahmen der Bilddaten (ca. 9.000 Bilder) erfolgten in drei verschiedenen Jahren, wobei jeweils mehrere Gletscher gemessen wurden. Für einen Gletscher wiederum können mehrere Standpunkte existieren und auf jedem Standpunkt können mit unterschiedlichen Kameras Bildmessreihen aufgenommen worden sein. Eine Bildmessreihe muss gegebenenfalls in mehrere zusammenhängend auswertbare Sequenzabschnitte aufgeteilt werden. Insgesamt waren somit ca. 50 einzel-

ne Sequenzenabschnitte zu prozessieren. Für jeden Sequenzkamerastandpunkt wurde ein Bildverbund aufgenommen, aus dem sich das DGM für den Gletscherbereich im Blickfeld der Sequenzkamera ableiten lässt. Es liegen insgesamt zehn Mehrbildverbände vor, anhand derer eine Transformation der Messwerte aus allen Bildsequenzen der drei Messkampagnen in den Objektraum ermöglicht wird. Eine Tabelle, die einen Überblick über alle ausgewerteten Sequenzen und ihre Zuordnung zu den entsprechenden Mehrbildverbänden gibt, befindet sich im Anhang A.3.1. Die Strukturierung der Laserscannerdaten erfolgt analog dazu, doch wurden hier nur Daten für den Jakobshavn Isbræ erhoben. Die Datensätze bestehen aus einem multi-temporalen Scan zur Ableitung eines Bewegungsvektorfeldes und mehreren Detailscans in höchster Auflösung. Zur Georeferenzierung sowohl der Bild- als auch der Laserscannerdaten liegen für jedes einzelne Jahr und Messgebiet entsprechende Tachymeter- und GPS-Messungen vor.

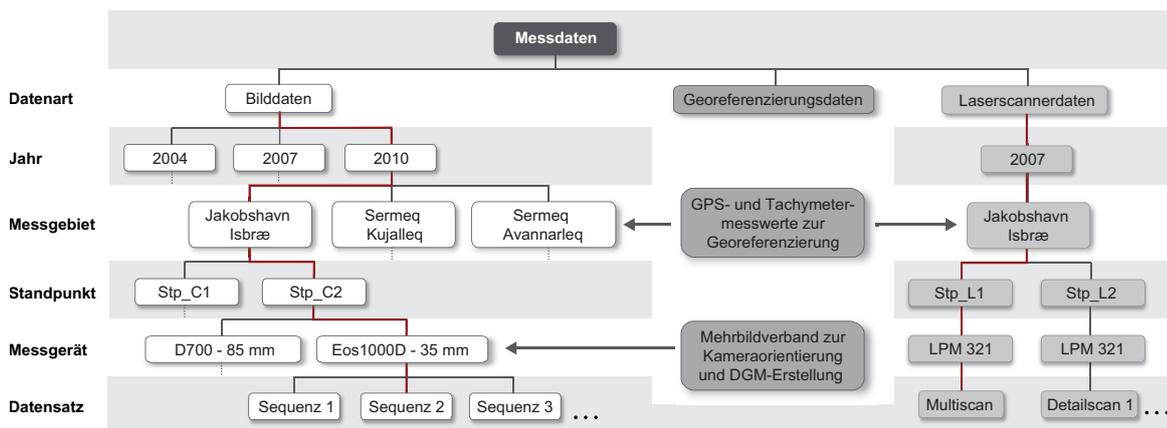


Abbildung 5.2: Strukturierung der aufgenommenen Messdaten. Die Einordnung eines einzelnen Datensatzes in dieses Schema wird beispielhaft als rote Linie verdeutlicht.

5.2 Auswertesoftware

Die Registrierung der Laserscannerdaten erfolgte mit der kommerziellen Software „RiSCAN PRO“ von Riegl, welche auch zur Steuerung des Scanners LPM-321 verwendet wird. Zur Auswertung der Mehrbildverbände wurde eine Programmbibliothek zur integrierten Bündelblockausgleichung von [Schneider, 2008] genutzt. Manuelle Bildpunktmessungen erfolgten mit dem Programm „Photomodeler“.

Alle weiteren in Kapitel 4 beschriebenen Methoden zur Bildsequenz- und Laserscannerdatenauswertung wurden in C++ implementiert. Die grafische Benutzeroberfläche des Programms ermöglicht die visuelle Kontrolle der Messung während des laufenden Auswertevorgangs und vereinfacht die Bewertung der Auswertergebnisse im Vergleich zur Qualität der Daten (vgl. Abbildung 5.4).

1.. Ergebnis_Scandaten.txt

ID	X [m]	Y [m]	Z [m]	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	dt [s]	v [m/Tag]
27	503139.530	7669352.335	179.484	-2.930	2.587	1.088	29267.137	11.539
28	503210.897	7669359.129	179.138	-3.168	2.466	0.923	29543.256	11.741
29	503244.950	7669361.986	179.456	-3.893	3.746	0.005	29448.598	15.851
30	503443.690	7669516.303	171.123	-5.778	3.831	0.108	28810.427	20.790
31	503472.184	7669522.898	172.941	-7.182	4.895	0.024	28953.576	25.936
32	503507.729	7669537.553	175.806	-7.163	4.618	0.002	28953.776	25.432
33	503550.520	7669561.387	179.060	-7.574	4.642	0.197	28837.463	26.615

Abbildung 5.3: Ausgabedatei für die Auswertung multi-temporaler Laserscans. Die Ausgabedatei enthält die 3D-Positionen des Messpunktrasters sowie die entsprechenden, zwischen zwei Scans bestimmten Translationen mit der zugehörigen Zeitdifferenz und der daraus abgeleiteten Geschwindigkeit.

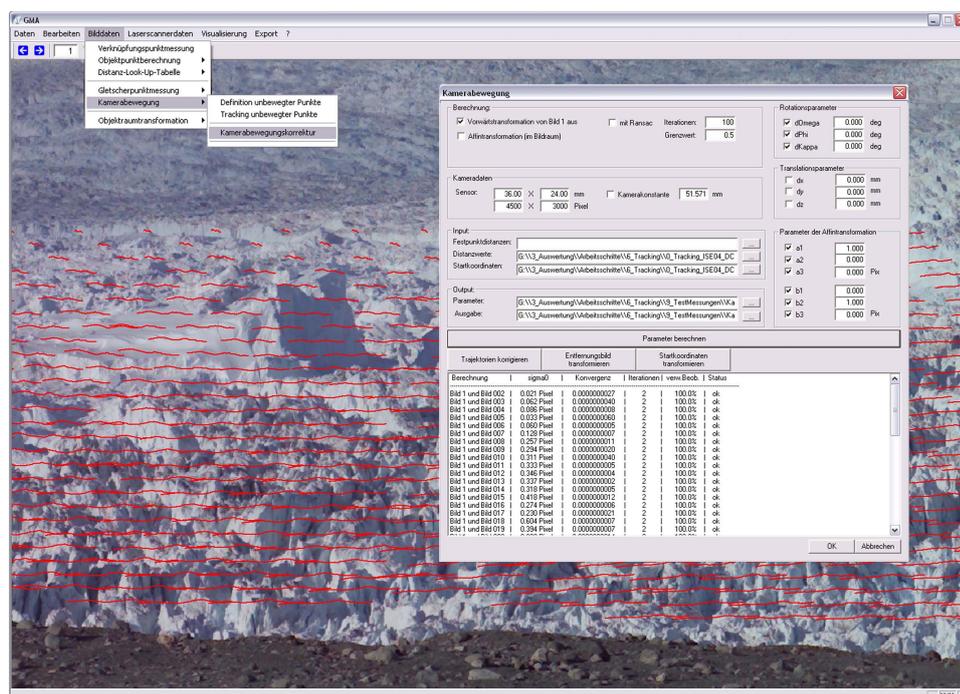


Abbildung 5.4: Grafische Benutzeroberfläche zum Programm mit integrierten Algorithmen zur Bildsequenz- und Laserscannerdatenauswertung.

Für die einzelnen Arbeitsschritte werden über entsprechende Menüpunkte Dialogfelder geöffnet, die wiederum die Eingabe und Anpassung aller relevanten Parameter erlauben, die Auswahl verschiedener Berechnungsoptionen bieten und teilweise die Ergebnisse in Zahlen tabellarisch dokumentieren. Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Programmpunkte findet sich im Anhang A.3.2.

Für die Auswertung der Mehrfach-Laserscans werden als Eingangsgrößen die 3D-Koordinaten der gescannten Punkte jeder Epoche in Form einfacher ASCII-Dateien sowie eine Datei mit Zeitwerten für den Beginn und das Ende der einzelnen Scans eingelesen. Nach erfolgter Auswertung wird eine Ausgabedatei (vgl. Abbildung 5.3) erstellt, welche die 3D-Koordinaten des gemessenen Punktrasters sowie die Translationsvektoren zu den zugeordneten Punkte im Folgescans enthält. Für jeden Translationsvektor wird zudem die Aufnahmezeitdifferenz ausgegeben.

Zur Auswertung der Bildsequenzen sind neben den Bilddaten die zuvor aus der Auswertung des Mehrbildverbandes gewonnenen Koordinaten von Objektpunkten auf der Gletscheroberfläche und die Orientierungsparameter der Sequenzkamera als Eingangsdaten bereitzustellen.

Der Zugriff auf die Bilddaten erfolgt über eine ASCII-Datei, welche den Speicherort der Bilder sowie die Dateinamen der zum auszuwertenden Sequenzabschnitt gehörenden Bilder enthält. Auf diese Weise kann eine zentrale Datenhaltung erfolgen und die auszuwertenden Bildsequenzen können flexibel zusammengestellt werden. Des Weiteren enthält die Eingabedatei die Orientierungsparameter der entsprechenden Sequenzkamera. Die Koordinaten der Objektpunkte der Gletscheroberfläche werden im Rahmen der DGM-Generierung gesondert eingelesen. Als Ergebnis der Bildsequenzauswertung wird für jede gemessene Trajektorie eine Textdatei ausgegeben, welche die Objekt- und Bildkoordinaten des verfolgten Punktes für jedes einzelne Bild der Sequenz sowie statistische Parameter des Matchings enthält (vgl. Abbildung 5.5). Zusätzlich wird eine Datei mit den ausgelesenen Aufnahmezeitpunkten der einzelnen Sequenzbilder ausgegeben.

Eine bei jeder Berechnung erstellte Protokolldatei dokumentiert jeweils die Parameter, die während der Auswertung verwendet wurden.

BildNr	X[m]	Y[m]	Z[m]	x[px]	y[px]	sx[px]	sy[px]	m0[GW]	KK_Koeff	KK_Koeff_LSH	KK_Koeff_LSHE	Beobachtungen[°]	Hatchtyp
1	504196.351	7671836.127	126.955	58.858	518.173								
2	504195.998	7671836.443	126.878	58.241	518.283	0.0253	0.0224	4.0	0.78	0.83	0.88	38.8	2
3	504196.056	7671836.391	126.944	58.339	518.196	0.0285	0.0235	3.9	0.72	0.73	0.89	63.5	2
4	504195.869	7671836.558	127.091	58.002	518.015	0.0168	0.0156	3.7	0.90	0.93	0.96	41.2	2
5	504196.076	7671836.373	127.097	58.366	518.001	0.0182	0.0182	4.2	0.81	0.86	0.91	37.5	2
6	504195.982	7671836.457	126.899	58.211	518.256	0.0078	0.0076	5.3	0.92	0.95	0.97	67.0	2
7	504196.043	7671836.402	126.650	58.334	518.572	0.0078	0.0080	4.8	0.93	0.96	0.98	52.7	2
8	504196.034	7671836.410	126.997	58.298	518.129	0.0088	0.0094	4.9	0.90	0.96	0.98	50.1	2

Abbildung 5.5: Ausgabedatei für eine in einer Bildsequenz gemessene Trajektorie. Die einzelnen Ausgabedateien enthalten die Objekt- und Bildkoordinaten für jedes Bild der Sequenz sowie statistische Werte zur Beurteilung der Qualität der Punktzuordnung.

5.3 Terrestrische Bilddaten

5.3.1 Arbeitsablauf

Entsprechend der Struktur der Daten (vgl. Abbildung 5.2) kann der Arbeitsablauf der Auswertung in drei Bereiche unterteilt werden. Wie in Abbildung 5.6 dargestellt, sind dies Vorarbeiten, die für jedes Messgebiet durchzuführen sind, sowie Arbeitsschritte, die der Auswertung der Mehrbildverbände dienen und somit für jeden einzelnen Kamerastandort ausgeführt werden. Weitere Auswerteschritte sind schließlich noch für jede einzelne Bildsequenz einer Bildmessreihe durchzuführen, welche von einem entsprechenden Kamerastandort aus aufgenommen wurde.

Zielstellung der Vorarbeiten ist die Aufarbeitung der Rohdaten, die Bereitstellung von Passpunktinformationen sowie die Zuordnung einzelner Bildsequenzen zu den Mehrbildverbänden. Somit erfolgt zunächst die Auswertung der Tachymetermessungen, um Koordinaten für Passpunkte und Kamerapositionen in einem lokalen Kamerakoordinatensystem zu erhalten. Es folgt die Auswertung der GPS-Messungen und die Transfor-

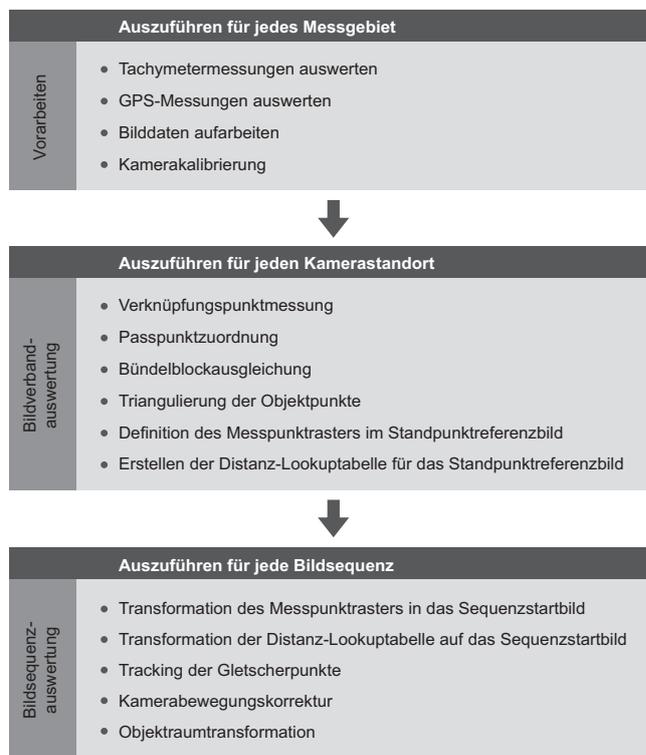


Abbildung 5.6: Arbeitsablauf für die monokulare Bildsequenzanalyse.

mation aller Passpunkte und Kamerapositionen in das globale Koordinatensystem. Hinsichtlich der Bilddaten bestehen die Vorarbeiten in der Konvertierung von Rohdatenformaten, in der Sichtung der Bildmessreihen und in der Zusammenstellung zusammenhängender Bildsequenzen sowie deren Zuordnung zu einem entsprechenden Mehrbildverband. Darüber hinaus sind für alle verwendeten Kamera-Objektiv-Kombinationen Kalibrierungen durchzuführen, um Werte für die innere Orientierung und Verzeichnung bereitzustellen.

Aus einer aufgenommenen Bildmessreihe wird jeweils nur ein Bild, welches zeitnah zum Mehrbildverband aufgenommen wurde, in diesen mit integriert. Ziel der Auswertung eines Mehrbildverbandes ist es, den Pixeln dieses Bildes, welches im Folgenden als Standpunktreferenzbild bezeichnet wird, Distanzwerte zuzuordnen zu können, die für die Skalierung der im Bildraum gemessenen Größen notwendig sind. Die ersten Arbeitsschritte bestehen hierfür in der Messung homologer Punkte sowie in der Bildkoordinatenmessung für Passpunkte in den einzelnen Bildern des Mehrbildverbandes. Es stehen dann alle Eingangsgrößen für die Berechnung der Bündelblockausgleichung bereit. Diese liefert als Ergebnis Objektpunktkoordinaten für Punkte auf der Gletscheroberfläche sowie die äußere Orientierung für das Standpunktreferenzbild. Im nächsten Schritt werden die Objektpunkte trianguliert und ein grobes DGM der Gletscheroberfläche erstellt. Im Standpunktreferenzbild wird dann das Messraster der Punkte auf dem Gletscher definiert, für welches in der zugehörigen Bildmessreihe Trajektorien bestimmt werden sollen. Unter Verwendung der Orientierungsparameter für das Standpunktreferenzbild erfolgt im letzten Schritt die Verschneidung der Bildstrahlen für die Pixel des Messpunktrasters mit dem DGM und die Berechnung der entsprechenden Distanzwerte.

Ziel des letzten Auswerteblocks ist es, Trajektorien im Objektraum, bezogen auf die ortsfesten Positionen des Messpunktrasters, zu bestimmen. Eine Bildmessreihe, die von einem Standpunkt aus aufgenommen wurde, ist gegebenenfalls in mehrere Sequenzen aufzuteilen, die einzeln ausgewertet werden. Da die Eigenbewegung der Kamera bewirkt, dass sich die Kameraorientierung zwischen dem Standpunktreferenzbild und dem jeweiligen Startbild einer Sequenz verändert, sind für jede Sequenz die Transformationsparameter zwischen dem Kamerakoordinatensystem des Standpunktreferenzbildes und dem des Sequenzstartbildes zu ermitteln, um alle zur Skalierung notwendigen Distanzwerte in das jeweilige Sequenzstartbild zu transformieren. Die gleiche Transformation wird auch mit dem Messpunktraster durchgeführt, so dass sich dieses für jede Sequenz immer auf die gleichen Punkte im Objektraum bezieht. Im nächsten Schritt erfolgt die Bildpunktzuzuordnung für das Messpunktraster innerhalb der zusammenhängend auswertbaren Bildsequenz. Die Bewegung der Kamera während der Aufnahme einer Sequenz bewirkt, dass der Messung in jedem Bild ein geringfügig vom Sequenzstartbild abweichendes Koordinatensystem zugrundeliegt. Mittels der Kamerabewegungskorrektur werden die gemessenen Trajektorien verbessert, so dass sich alle Messwerte der Sequenz auf das Koordinatensystem des Sequenzstartbildes beziehen. Für Letzteres liegen die Distanzwerte vor, anhand derer im letzten Schritt eine Transformation der Messwerte in den Objektraum erfolgen kann.

5.3.2 Auswertung

Von den in Kapitel 5.1 vorgestellten Bilddaten wurden neun Bildmessreihen ausgewertet. Fünf davon entfallen auf den Jakobshavn Isbræ, da dieser in allen drei Expeditionsjahren vermessen wurde. Tabelle 4 stellt für die Auswertung der Bildmessreihen relevante Kenngrößen zusammen.

Sie gibt zunächst einen Überblick über die Anzahl der Bilder, die pro Bildmessreihe ausgewertet wurden, und über die Anzahl einzelner Sequenzen, in welche die Bildmessreihen aufgrund von Unterbrechungen zu unterteilen waren. Den größten Umfang besitzen die Langzeitbildreihen (EOS 1 und EOS 2) vom Jakobshavn Isbræ im Jahr 2010 mit ca. 1.700 Bildern. Aufgrund ihrer Länge (fünf Wochen) waren für sie auch entsprechend viele Einzelsequenzen zu messen. Insgesamt wurden neun der zehn aufgenommenen Bildverbände ausgewertet, um die Messwerte jeder Bildmessreihe zu skalieren und zu georeferenzieren. Von den 52 verfügbaren Sequenzabschnitten wurden nach Aussparung redundanter Aufnahmereihen schließlich 41 Sequenzen mit insgesamt 5.904 Bildern prozessiert.

Die für das Tracking wichtigsten Parameter sind die Patchgröße und der Suchbereich, der sich nach der Bewegung des Gletschers und der maximalen Kamerabewegung zwischen zwei Bildern bemisst. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, bestimmt sich das Seitenverhältnis der Patches nach dem Tiefenunterschied innerhalb des Patches. Die Anzahl an Beobachtungen für das LSM wird mit der Anzahl an Pixeln, die ein Patch enthält, fest

vorgegeben. Dieser Wert sollte unter dem Aspekt, dass Schattenpixel ausgeschlossen werden, groß genug gewählt werden, um für möglichst viele Messpunkte ein zuverlässiges Matching zu gewährleisten. Der Parameter wird mit Hilfe von Testmessungen empirisch festgelegt. In Tabelle 4 wird die gewählte Pixelanzahl für die Patches der jeweiligen Bildmessreihe aufgelistet. Für Bildmessreihen mit höherer Auflösung (z. B. IGI) werden tendenziell größere Patches gewählt als für Bildmessreihen mit niedrigerer Auflösung (z. B. EOS).

Der Suchbereich für das Tracking lässt sich durch die gleichförmige Gletscherbewegung sehr gut eingrenzen. Die Größenordnung des Suchbereichs liegt je nach räumlicher und zeitlicher Auflösung der Bildmessreihe und der Geschwindigkeit des Gletschers zwischen 0–4 Pixeln in x -Richtung und 0–2 Pixeln in y -Richtung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern. Ein zweites Einflusskriterium auf die Definition des Suchbereichs ist die Kamerabewegung. Deren Auswirkungen sind im Bildbereich zwar insgesamt kleiner als die eigentliche Gletscherbewegung, jedoch weniger homogen. Vereinzelt können kleinere Sprünge auftreten, welche vom gewählten Suchbereich mit abgedeckt werden müssen. Tabelle 4 stellt des Weiteren die Größenordnung der Kamerabewegung im Bild für die einzelnen Bildmessreihen zusammen. Aufgeführt sind die maximalen Abweichungen, bezogen auf das Startbild einer Sequenz in x - und y -Richtung. Die Befestigung und Gewichtsverteilung der Kameras lässt in y -Richtung einen größeren Bewegungsspielraum zu als in x -Richtung. Auffällig ist der starke Einfluss der Kamerabewegung bei der Bildmessreihe vom Sermeq Avannarleq (SAV 2010). Hier wurde im Vergleich zu allen anderen Messungen ein deutlich schmalwinkligeres Objektiv verwendet (85 mm), wodurch sich auch die Auswirkung der Kamerabewegung auf den Bildraum entsprechend maßstäblich vergrößert.

Tabelle 4: Kenngrößen für die Auswertung. Zusammenstellung der für die Auswertung relevanten Werte für die einzelnen Bildmessreihen, die an den Gletschern Jakobshavn Isbræ (ISE), Støre Qarajaq (STQ), Eqip Sermia (EQI), Sermeq Kujalleq (SKU) und Sermeq Avannarleq (SAV) aufgenommen wurden. Die Bildmessreihen sind nach den jeweiligen Kameras benannt, mit denen sie aufgenommen wurden.

Messgebiete	Ausgewertete Bildmessreihen	Ausgewertete Sequenzabschnitte	Auswertbare Bilder der Bildmessreihe	Patchgröße [Pixel]	Größenordnung der Kamerabewegung [Pixel]	
					x '-Richtung	y '-Richtung
ISE 2004	DCS	1	53	8.000 $\hat{=}$ 80 x 100	2	4
ISE 2007	IGI	5	348	4.800 $\hat{=}$ 60 x 80	1	4
ISE 2010	EOS 1	14	1.721	2.400 $\hat{=}$ 40 x 60	3	9
	EOS 2	8	1.703	2.400 $\hat{=}$ 40 x 60	3	8
	D700	1	288	8.000 $\hat{=}$ 80 x 100	2	4
STQ 2007	IGI	3	296	4.800 $\hat{=}$ 60 x 80	2	3
EQI 2007	IGI	3	265	8.000 $\hat{=}$ 80 x 100	1	3
SKU 2010	D700	3	697	4.800 $\hat{=}$ 60 x 80	3	2
SAV 2010	D300	3	533	4.800 $\hat{=}$ 60 x 80	8	15
Gesamtanzahl	9 (von 10)	41 (von 52)	5.904 (von 8.700)			

5.3.3 Resultate

Als Resultat der Bildsequenzauswertung liegt für jede Sequenz einer Bildmessreihe ein dichtes Raster an Trajektorien vor (vgl. auch Abbildung 4.6). Die Einzelmessungen, aus denen sich die Trajektorien zusammensetzen, sind die Translationsbeträge zwischen den Aufnahmezeitpunkten zweier aufeinanderfolgender Bilder, jeweils ausgehend von einer festen Position im Objektraum. Grobe Fehler werden detektiert und gekennzeichnet. Für alle Messgrößen werden Genauigkeitsmaße ausgegeben, welche eine Beurteilung der Qualität des Matchings innerhalb der Trajektorie erlauben und so als Gewichtungskriterium für die weitere Filterung der

Daten dienen können. Eine Genauigkeitsanalyse der Messungen wird in Kapitel 6.1 durchgeführt. Die im Ergebnis dieser Arbeit vorliegenden Messwerte aus neun Bildmessreihen an fünf schnellfließenden Gletschern Westgrönlands sind die Datengrundlage für die Ableitung von Folgeprodukten, welche der Beantwortung spezieller glaziologischer Fragestellungen dienen. Ein Überblick über die Weiterverwendung der Messergebnisse wird in Kapitel 7.1 gegeben. Tabelle 5 stellt die wesentlichen Informationen zusammen, die dafür von Interesse sind.

Das Messpunktraster wurde im Bild meist mit einem Abstand von 20 x 20 Pixeln definiert (vgl. Abbildung 4.6). Der entsprechende Punktabstand im Objektraum ist abhängig von der jeweiligen Kameraspezifikation und der Distanz zum Messobjekt. Für das Beispiel der Bildmessreihe ISE 2004 ergibt sich hier orthogonal zur Kamerablickrichtung ein lateraler Punktabstand im Objektraum von ca. 3 m (in 1.000 m Entfernung) bis ca. 16 m (in 5.000 m Entfernung). Der Punktabstand in Tiefenrichtung ist abhängig vom Blickwinkel der Kamera auf die Gletscheroberfläche. Bei flacheren Sichten resultiert ein größerer Punktabstand in Tiefenrichtung. Aus dem Messpunktraster ergibt sich die Gesamtanzahl der Trajektorien, die in jeder Einzelsequenz einer Bildmessreihe gemessen werden (vgl. Tabelle 5).

Die große Anzahl an Trajektorien resultiert bei der Messung am Eqip Sermia (EQI 2007) aus der Tatsache, dass aufgrund der geringeren Entfernung zwischen Messobjekt und Kamerastandpunkt der Gletscher einen deutlich größeren Bereich innerhalb des Messbildes einnimmt als bei anderen Messungen (vgl. Abbildung 3.16).

Wichtige Informationen für die weitere Verwendung der Messungen sind die zeitliche Auflösung der Trajektorien, die für die einzelnen Bildmessreihen zwischen 15 min und 30 min liegt, sowie die Gesamtdauer einer Bildmessreihe. Für die meisten Standpunkte liegen Messungen von 24 h bis zu wenigen Tagen vor. Für den Jakobshavn Isbræ im Jahr 2010 wurden aber auch zwei redundante Langzeitmessungen mit einer Dauer von mehreren Wochen ausgewertet. Tabelle 5 stellt zudem besondere Inhalte zusammen, welche in einzelnen Bildsequenzen enthalten sind. Im Jahr 2004 war am Jakobshavn Isbræ noch eine schwimmende Gletscherzunge zu beobachten. Die Bildsequenz ISE 2004 ist somit eine wertvolle Datengrundlage für Untersuchungen von Gezeiten auf das Fließverhalten des Gletschers. Die Langzeitsequenzen am Jakobshavn Isbræ von 2010 enthalten Großkalbungsereignisse und ermöglichen Untersuchungen zum Einfluss der Kalbungen auf das Bewegungsverhalten des Gletschers. Kleinere Kalbungsereignisse finden sich auch in Bildsequenzen vom Jakobshavn Isbræ und vom Støre Qarajaq aus dem Jahr 2007.

Tabelle 5: Zusammenstellung von für die Weiterverwendung der Messwerte relevanten Informationen zu den einzelnen ausgewerteten Bildmessreihen an den Gletschern Jakobshavn Isbræ (ISE), Støre Qarajaq (STQ), Eqip Sermia (EQI), Sermeq Kujalleq (SKU) und Sermeq Avannarleq (SAV).

Messgebiete	Ausgewertete Bildmessreihen	Anzahl gemessener Trajektorien	Zeitliche Auflösung [min]	Gesamtlänge Bildmessreihe [Tage]	Längste Einzelsequenz [Tage]	Besondere Inhalte
ISE 2004	DCS	5.772	30	1,1	1,1	Schwimmende Gletscherzunge
ISE 2007	IGI	3.709	15	3,5	0,8	Kalbungen
ISE 2010	EOS 1	4.092	20	36,0	9,8	Kalbungen
	EOS 2	3.283	20	30,0	9,5	Kalbungen
	D700	5.825	15	3,0	3,0	
STQ 2007	IGI	8.388	15	1,1	1,1	Kalbungen
EQI 2007	IGI	10.863	15	1,3	1,3	
SKU 2010	D700	4.283	15	4,5	4,5	
SAV 2010	D300	5.985	15	3,6	3,6	

5.4 Terrestrische Laserscannerdaten

5.4.1 Arbeitsablauf

Der Arbeitsablauf zur Auswertung der Laserscannerdaten ist schematisch in Abbildung 5.7 dargestellt. Er lässt sich in drei Arbeitsblöcke gliedern. Zunächst sind allgemeine Vorarbeiten für alle Scans durchzuführen, um diese für die eigentliche Auswertung aufzubereiten. Gegebenenfalls sind zusätzlich Arbeitsschritte auszuführen, die bei der Unterteilung eines Scans in mehrere Teilscans ein korrektes Zusammenführen derselben gewährleisten. Der dritte Arbeitsblock umfasst die eigentliche Auswertung der Scans. Die Arbeitsabläufe unterscheiden sich hier danach, ob Informationen aus einem Einzelscan abgeleitet oder multi-temporale Scans ausgewertet werden sollen.

Das Ziel der Vorarbeiten ist es, die Laserscannerpunktewolken in ein gemeinsames, übergeordnetes Koordinatensystem zu transformieren und für jeden Einzelpunkt einen Aufnahmezeitpunkt zuzuordnen. Zu diesem Zweck werden die tachymetrischen Messungen ausgewertet, um die Koordinaten der eingemessenen Retro-Passpunkte im lokalen Koordinatensystem zu erhalten. Anhand von mit GPS bestimmten Koordinaten der Basislinie werden diese dann in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert. Die Registrierung der Laserscannerpunktewolken erfolgt auf Basis der gescannten Retrozylinder und wird mit „RiSCAN PRO“ ausgeführt. Im Anschluss erfolgt die Interpolation der Zeitwerte für jeden Einzelpunkt anhand der Start- und Endzeiten jedes Scans.

Der nächste Arbeitsschritt ist nur im Falle einer Unterteilung eines Scans in mehrere Teilscans durchzuführen. Er beinhaltet die Berechnung von der Winkelabweichungen zwischen einzelnen Teilscans und deren Korrektur sowie die Zusammenführung der Teilscans zu einem Gesamtscan einer Messepoche.

Schließlich erfolgt die Auswertung der Daten als Analyse multi-temporaler Scans oder als Auswertung von Einzelscans. Für die multi-temporale Scananalyse ist zunächst ein Messpunkttraster zu definieren. Es folgt die automatische Extraktion geeigneter Segmente aus dem Scan der ersten Epoche sowie die Bestimmung von Näherungswerten durch Rasterung der Punktwolkensegmente und Anwendung flächenbasierter Zuordnungsverfahren. Unter Verwendung der Näherungswerte erfolgt dann die direkte Punktwolkenzuordnung mittels ICP. Abschließend werden den getrackten Messpunkten und ihren korrespondierenden Punkten in den Folgescans Zeitwerte zugeordnet, welche die Basis für die Ableitung von Geschwindigkeitswerten bilden.

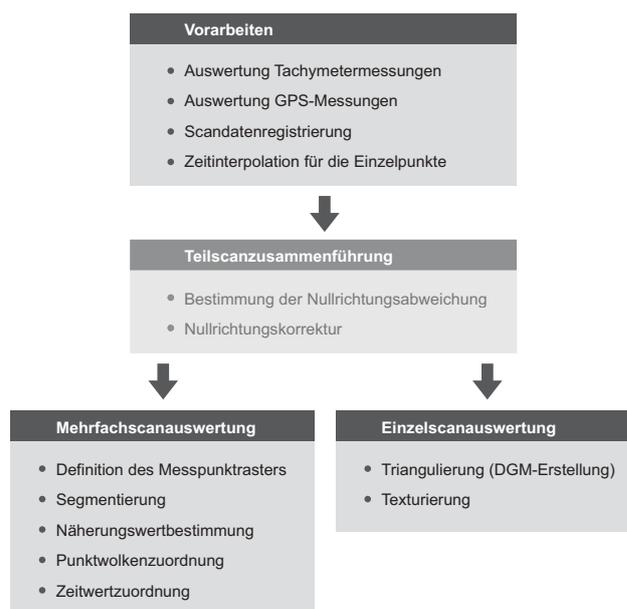


Abbildung 5.7: Arbeitsablauf der Laserscannerdatenauswertung.

Die Auswertung von Einzelscans dient der Erstellung eines DGM durch Triangulation der Daten. Zur besseren Visualisierung erfolgt zudem eine Texturierung mit Bildinformation.

5.4.2 Auswertung und Resultate

Als Mehrfachscan wurde ein Datensatz ausgewertet, der aus zwei Scanepochen besteht, wobei sich der Scan der ersten Epoche aus drei Teilsfans und der Scan der zweiten Epoche aus zwölf Teilsfans zusammensetzt (vgl. Abbildung 4.32). Dies bedingte aufgrund von Nullrichtungsabweichungen zwischen den einzelnen Teilsfans eine Vorkorrektur derselben mittels des in [Schwalbe u. a., 2008] beschriebenen Verfahrens. Es wurden dabei zwischen einzelnen aufeinanderfolgenden Teilsfans Winkelversätze von $-0,002^\circ$ bis zu $0,05^\circ$ bestimmt und korrigiert. Da sich der Fehler in horizontaler Scanrichtung aufsummiert, würde sich ohne die entsprechende Korrektur eine maximale Abweichung zwischen den beiden Epochenscans von ca. $0,1^\circ$ für den linken Scanrand ergeben. Dies würde für Scandistanzen von 1.000–4.000 m einem relativen Lagefehler in Scanrichtung von ca. 2–7 m entsprechen.

Für das Tracking wurde ein regelmäßiges Messpunktraster im Abstand von 25 m x 25 m definiert, woraus sich für den gesamten Scanbereich ca. 5.400 Messpunkte ergaben. Die Definition der Segmente für diese Messpunkte erfolgte entsprechend der Größenordnung der Gletscherstrukturen und der Scanpunktdichte mittels Distanz- und Horizontalwinkelintervallen. Die Ausdehnung der Segmente in Scanrichtung wurde mit 1° festgelegt, was einer Segmentbreite von ca. 17 m in einer Entfernung von 1.000 m und von ca. 70 m in einer Entfernung von 4.000 m entspricht. Die Segmenthöhe (in radialer Richtung vom Laserscannerstandpunkt) betrug 50 m. Mit der gewählten Scanwinkelauflösung von $0,027^\circ$ enthalten Segmente in einer Entfernung von 1.000 m ca. 800 Punkte und in einer Entfernung von 4.000 m noch ca. 50 Punkte. Die Zeitspanne für die Aufnahme eines einzelnen Segmentes umfasst etwa 10 min.

Als Resultat der Laserscannerdatenauswertung liegen für den zweifachen Scan des gesamten messbaren frontnahen Bereichs des Jakobshavn Isbræ die 3D-Koordinaten des getrackten Messpunktrasters im übergeordneten Koordinatensystem und die dazu ermittelten Translationen vor sowie ein Zeitbezug für jede Translation. Diese Daten ermöglichen die Bestimmung eines 3D-Geschwindigkeitsfeldes (vgl. Abbildung 7.7). Ergebnis der Einzelscanauswertung sind ein texturiertes DGM der Gletscheroberfläche des gesamten messbaren Bereichs sowie digitale Geländemodelle von fünf Detailbereichen, die in höchster Auflösung gescannt wurden (z. B. Gletscherfront, Toteisbereich). Die DGM bieten Möglichkeiten zur Visualisierung, zur Bestimmung von Distanzen zum Messstandort oder zur Messung diskreter Abstandsmaße innerhalb der Punktwolke. Die Weiterverwendung der erzielten Resultate wird in Kapitel 7.2 beschrieben, und die Genauigkeitsaspekte werden in Kapitel 6.2 untersucht.

6 Fehlerbetrachtung

In diesem Kapitel erfolgt eine Fehlerbetrachtung für die mittels monoskopischer Bildsequenzanalyse und multi-temporalen Laserscannings bestimmten Trajektorien bzw. Bewegungsvektoren von Gletschern.

6.1 Terrestrische Bilddaten

6.1.1 Fehlereinflüsse

Als Ergebnis der Bildsequenzanalyse sind primär die einzelnen in den Objektraum transformierten Translationen zwischen aufeinanderfolgenden Bildern zu sehen, aus welchen sich die Bewegungskurven der jeweiligen Messpunkte zusammensetzen. Aus diesen Trajektorien können die Größen abgeleitet werden, die für die weitere Auswertung interessieren (vgl. Kapitel 7.1). Die folgenden Betrachtungen haben also zunächst die Bestimmung des Fehlers der einzelnen Translationen zum Ziel. Dieser kann dann entsprechend der weiteren Auswertung auf sekundär abgeleitete Werte fortgepflanzt werden. Es interessieren jedoch nicht nur die Fehler der Trajektorien selbst, sondern auch die Genauigkeit ihres räumlichen Positionsbezugs. Die auf die Bildsequenzmessung wirkenden Fehlereinflüsse werden in Abbildung 6.1 zusammengestellt:

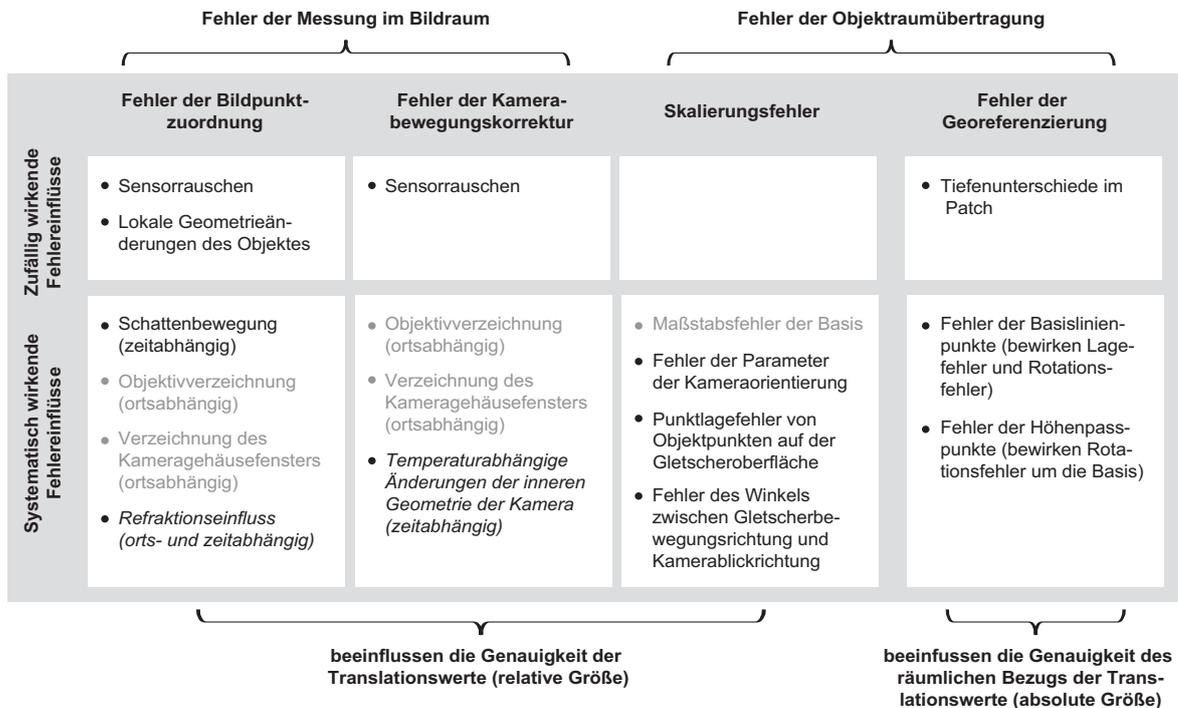


Abbildung 6.1: Fehlereinflüsse bei der monoskopischen Bildsequenzanalyse. Die Abbildung stellt zufällig und systematisch wirkende Fehlereinflüsse auf die ermittelten Translationen und deren räumliche Bezugspunkte zusammen. Fehlereinflüsse, die vernachlässigbar gering sind, werden grau dargestellt. Fehlereinflüsse, die im Rahmen der Arbeit nicht modelliert werden konnten, aber in den entsprechenden Kapiteln diskutiert werden, sind kursiv dargestellt.

Entsprechend den einzelnen Arbeitsschritten der Bildsequenzanalyse werden vier Fehler unterschieden: Der Fehler der Bildpunktzuordnung, der Fehler der Kamerabewegungskorrektur und der Skalierungsfehler, welche Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Translationen haben, sowie der Fehler der Georeferenzierung, welcher die Genauigkeit des räumlichen Bezugs der Translationswerte beeinflusst. Die Fehler der Bildpunktzuordnung und der Kamerabewegungskorrektur treten bei der Messung im Bildraum auf, die Fehler der Skalierung und der Georeferenzierung bei der Übertragung der Translationen in den Objektraum. Die einzel-

nen, auf die jeweiligen Arbeitsschritte wirkenden Fehlereinflüsse werden in zufällig oder systematisch wirkende Fehlereinflüsse unterschieden.

Je nach gewähltem Zeitintervall der Bildsequenz und nach Fließgeschwindigkeit des Gletschers betragen die zwischen zwei Bildern bestimmten Translationen nur wenige Pixel. Darüber hinaus ist der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern gering. Bei der Differenzbildung zweier zugeordneter Punkte zur Bestimmung eines Translationswertes wird somit ein Großteil der absolut auf ein Bild wirkenden systematischen Fehler eliminiert. Die verbleibenden differentiellen Restanteile können sich sowohl ortsabhängig als auch zeitabhängig systematisch auswirken. Systematische Fehlereinflüsse, wie z. B. durch die Verzeichnung des Objektivs verursacht, welche über die Zeit unveränderlich sind, wirken sich somit vorrangig ortsabhängig aus. Letzteres gilt insbesondere, da die Messung in der Bildsequenz nicht in Form einer Merkmalsverfolgung durch alle Bilder, sondern an ortsfester Position geschieht. Ein Beispiel für einen sich vorrangig zeitabhängig auswirkenden Fehlereinfluss ist die Schattenwanderung auf der Gletscheroberfläche. Der Betrag und die Richtung dieses Fehlereinflusses ändern sich systematisch in Abhängigkeit von der Tageszeit. Seine Auswirkung bezüglich einer bestimmten Position im Raum (bzw. im Bild) dagegen ist abhängig vom unregelmäßigen Relief der Gletscheroberfläche und hat daher einen pseudo-zufälligen Charakter.

Im Folgenden werden die einzelnen Fehlereinflüsse näher betrachtet. Eine Abschätzung ihres jeweiligen Fehleranteils am Gesamtfehler der Translationen erfolgt im Rahmen einer inneren Genauigkeitsbetrachtung (Kapitel 6.1.2.1–6.1.2.4). Der Einfluss des Georeferenzierungsfehlers wird in Kapitel 6.1.2.5 betrachtet. Neben der Ableitung innerer Genauigkeitsmaße bestehen darüber hinaus auch Möglichkeiten, eine äußere Genauigkeitsbetrachtung durchzuführen. In Kapitel 6.1.3 werden die entsprechenden Methoden vorgestellt.

6.1.2 Betrachtung der inneren Genauigkeit

Die Genauigkeit der Trajektorien, welche nach dem Prinzip der monokularen Bildsequenzanalyse bestimmt werden, wird maßgeblich von den folgenden drei Fehlern beeinflusst:

- Fehler der Bildpunktzuordnung
- Fehler der Kamerabewegungskorrektur
- Skalierungsfehler

Die Betrachtungen zu den einzelnen Fehlereinflüssen werden im Folgenden exemplarisch für eine Bildsequenzmessung am Jakobshavn Isbræ 2010 durchgeführt. Die einzelnen Fehlereinflüsse werden dabei zunächst am Beispiel einer frontnahen Trajektorie im Detail betrachtet und der mittlere Fehler der Translationen der Trajektorie im Objektraum abgeschätzt. Die Kenngrößen der Beispieltrajektorie, die für die folgende Fehlerbetrachtung relevant sind, werden in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Kenngrößen der Beispieltrajektorie.

Sequenz	Kamerakonstante	c	=	35,4 mm
	Pixelgröße	Δpix	=	5,7 μm
	Aufnahmezeitintervall	Δt	=	20,0 min
	Anzahl Bilder	n	=	360
Trajektorie	Distanz zum Objektpunkt	D	=	3.000,0 m
	Bildkoordinaten des Startpunktes	x'	=	-8,3 mm
		y'	=	4,0 mm
	Mittlerer Betrag der Translationen	$\overline{\Delta x}$	=	0,5 m
$\overline{\Delta y}$		=	0,1 m	

Anschließend werden für alle Messpunkte des Bildsequenzbeispiels die mittleren Translationsfehler der Trajektorien ermittelt.

6.1.2.1 Fehler der Bildpunktzuordnung

Die Genauigkeitsmaße, die beim LSM mitgeschätzt werden können, resultieren aus der statistischen Bewertung von Grauwertdifferenzen zwischen zwei Patches. Die Standardabweichung für ein Matching ist somit ein Maß für den Einfluss des Sensorrauschens und für die Genauigkeit, mit welcher das dem Matching zugrundeliegende Transformationsmodell die Realität approximiert. Bei Betrachtung einer einzelnen Trajektorie ist festzustellen, dass die Standardabweichung des LSM im Verlauf eines Tages variiert. Ursache dafür kann das unterschiedliche Signal-Rausch-Verhältnis der Bilder durch wechselnde Lichtverhältnisse und Temperaturen im Verlauf eines Tages sein. Für den Fehler der Translationen s_{ism_i} beim Matching zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern $i-1$ und i (mit $i \in \mathbb{N}$) ergab sich im Mittel über alle Trajektorien ein Wert von $s_{ism} = 0,01$ Pixel. Dieser Translationsfehler im Bildraum ist jedoch zu optimistisch. Er erfasst nicht die Qualität der Eliminierung von Effekten, welche die Gletscherbewegung im Bild überlagern (Schattenveränderung, Kamerabewegung) sowie die Qualität des Abbildungsmodells, welches den einzelnen Bildern zugrundeliegt und für zwei Patches sowohl räumlichen als auch zeitlichen Veränderungen unterworfen sein kann (z. B. Objektivverzeichnung, Refraktionseffekte). Auf den Fehler der Kamerabewegungskorrektur wird im folgenden Kapitel gesondert eingegangen. An dieser Stelle sollen zunächst einige Betrachtungen zur Schattenbewegung und zur Refraktion erfolgen.

Nach der in Kapitel 4.2.5.1 beschriebenen Methode werden das Matching beeinflussende, durch Schattenbewegung verursachte Störpixel detektiert und aus dem Matching ausgeschlossen. Zur Abschätzung der Größenordnung des verbleibenden Schattenrestfehlers in den Trajektorien kann dieser ähnlich einem Schleifenabschlussfehler ermittelt werden. Dazu wird eine Bildsequenz in einem Zeitrahmen von $j \cdot 24$ h (mit $j \in \mathbb{N}$) ausgewertet. Die Punkte werden von Bild zu Bild verfolgt und unterliegen den entsprechenden Fehlereinflüssen. Die Translationswerte der Einzelmatchings jeder Trajektorie werden aufaddiert. Zusätzlich erfolgt ein Matching vom Ausgangsbild in das Bild der Sequenz, welches $j \cdot 24$ h später aufgenommen wurde. Aus dem hieraus erhaltenen Translationswert und den aufsummierten Einzeltranslationen wird die Differenz gebildet (vgl. Abbildung 6.2). Für das zugrundeliegende Beispiel verläuft die Hauptbewegungsrichtung der Schatten – entgegen der Gletscherfließrichtung – von links nach rechts. Dies bewirkt eine systematische Verkürzung der Trajektorien in x' -Richtung gegenüber den Referenzmessungen. Wird der so bestimmte Differenzwert auf die einzelnen Translationen verteilt, so ergibt sich für die hier dargestellte Trajektorie im Mittel ein Schattenrestfehler s_{sr} in x' -Richtung von ca. 0,04 Pixel und in y' -Richtung von 0,01 Pixel für ein einzelnes Matching.

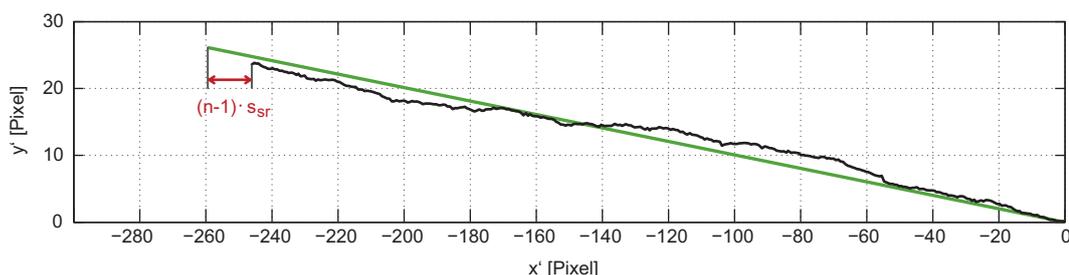


Abbildung 6.2: Schattenrestfehler einer Trajektorie. Die Abbildung zeigt die $(n-1) = 359$ aufaddierten Einzeltranslationen einer Trajektorie (schwarze Kurve) im Vergleich mit dem Vektor des Matchings (grün) zwischen Bild 1 und Bild 360 der Beispielsequenz (Zeitspanne der Sequenz: 5·24h).

Der Einfluss der Refraktion bewirkt bei der Abbildung eines Punktes im Bild eine Abweichung vom Abbildungsmodell der Zentralperspektive. Da insbesondere für Punkte in großer Entfernung die Bildstrahlen Luftschichten unterschiedlicher Temperatur und damit unterschiedlicher Dichte durchlaufen, kommt es – vorrangig in vertikaler Richtung – zu einer Krümmung des Bildstrahls im Objektraum. Der Einfluss der Refraktion nimmt dabei quadratisch mit der Entfernung zu. Durch die Messung des Bewegungsverhaltens an ortsfes-

ter Position und die Bestimmung kleiner Translationsvektoren mit der Hauptbewegungskomponente quer zur Beobachtungsrichtung ist ein ortsabhängig unterschiedlich wirkender Refraktionseinfluss vernachlässigbar. Gleiches gilt auch für den Einfluss der lediglich ortsabhängig im Bild wirkenden Verzeichnungen des Objektivs und des Schutzglases des Kameragehäuses, die darüber hinaus aber auch durch Kalibrierung der Kamera schon mit berücksichtigt werden. Einen größeren Einfluss hat aber die Änderung des Refraktionskoeffizienten über die Zeit. Es ist anzunehmen, dass die sich im Laufe eines Tages ändernden Temperaturen eine systematische Veränderung des wirksamen Refraktionskoeffizienten verursachen.

Da während der hier zugrundeliegenden Bildsequenzmessungen keine Bestimmung der Veränderung von Refraktionskoeffizienten für die Messgebiete erfolgen konnte, wird auf Werte aus der Literatur zurückgegriffen. [Stober, 1974] bestimmten mittels gleichzeitiger gegenseitiger Zenitdistanzmessungen die sich verändernden Refraktionskoeffizienten auf dem Inlandeis und über einem Fjord in Grönland innerhalb eines Zeitraumes von jeweils 4–5 Stunden am Nachmittag. Für die Messungen über dem Fjord ergab sich dabei eine maximale Veränderung des Refraktionskoeffizienten Δk innerhalb einer Stunde von 0,3, auf dem Inlandeis von 0,5. Auch wenn diese Messungen nur als bedingt repräsentativ für den Verlauf der Bildstrahlen über einer Gletscherzunge angesehen werden können, so vermitteln sie doch eine Vorstellung, in welcher Größenordnung die ermittelten Translationen von Refraktion beeinflusst sein können. Unter Verwendung der Werte der Fjordmessung würde sich mit Gleichung 6.1 für die Bildsequenz am Jakobshavn Isbræ (Kamerakonstante: $c = 35,4$ mm; Pixelgröße $\Delta pix = 5,7$ μm) ein refraktionsbedingter Translationsfehler s_{ref} von ca. 0,15 Pixel in y' -Richtung für einen Punkt in einer Entfernung $D = 3.000$ m bei der Punktzuordnung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern (Zeitintervall: $\Delta t = 20$ min) ergeben. R entspricht dem mittleren Erdradius.

$$s_{ref} = \frac{c}{\Delta pix} \cdot \frac{\Delta k_{20min} \cdot D}{2 \cdot R} \quad (6.1)$$

Für die frontnahe Beispieltrajektorie in ca. 3.000 m Entfernung zur Sequenzkamera werden in Tabelle 7 die einzelnen Fehleranteile aufgelistet, aus deren Summe sich der Fehler der Bildpunktzuordnung $s_{Ax'_i}$ bzw. $s_{Ay'_i}$ für die Einzeltranslationen der Trajektorie ergibt.

Tabelle 7: Fehler der Bildpunktzuordnung für die Beispieltrajektorie.

Fehlermittel über alle Translationen einer Trajektorie in 3.000 m Entfernung		x'-Komponente [Pixel]	y'-Komponente [Pixel]
Fehler der Translationen des LSM	s_{lsm}	0,01	0,01
Schattenrestfehler	s_{sr}	0,04	0,01
Refraktionsbedingter Translationsfehler	s_{ref}	0,00	0,15
Fehler der Bildpunktzuordnung	$s_{Ax'_i} / s_{Ay'_i}$	0,05	0,17

6.1.2.2 Fehler der Kamerabewegungskorrektur

Die Genauigkeit, mit der die Kamerabewegungskorrektur angebracht werden kann, wird durch den Fehler der Bildpunktzuordnung der Zielmarken sowie durch die Qualität des verwendeten funktionalen Modells, mit welchem die Kamerabewegung mathematisch beschrieben wird, beeinflusst (vgl. Kapitel 4.2.6). Einflüsse von Refraktion und Schattenbewegung, die auf die Messung der Gletscherpunkte wirken, sind für die Messung der Zielmarken nicht zu berücksichtigen, da diese sich in größerer Nähe zur Kamera befinden und die flachen signalisierten Punkte so angebracht werden können, dass auf den Zielmarken kein Schattenwurf entsteht.

Bei der Berechnung der Parameter des funktionalen Modells werden auch deren Fehler mitbestimmt. Werden nun zur Bestimmung der Korrekturtrajektorie für die Kamerabewegung die entsprechenden Transformationen auf einen Trajektorienstartpunkt angewandt, so lassen sich die Fehler der Transformationsparameter in einen Punktlagefehler im Bild ($s_{kx'_i} / s_{ky'_i}$) jedes Punktes der erhaltenen Korrekturtrajektorie durch Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes (VFG) auf die Gleichungen 4.14 fortpflanzen (vgl. Abbildung 6.3). Für das vorliegende Trajektorienbeispiel war die Bestimmung der Punkte der Korrekturtrajektorie mit einer mittleren Genauigkeit von ca. $s_{kx'} = s_{ky'} = 0,1$ Pixel möglich.

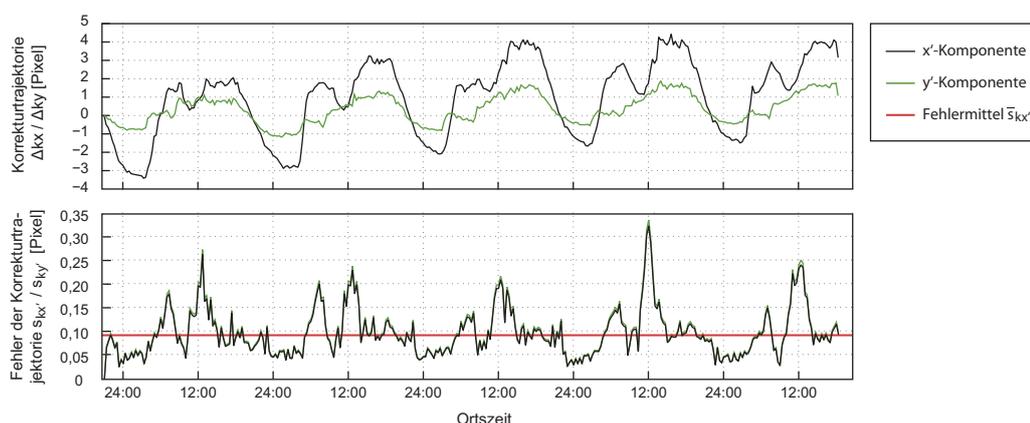


Abbildung 6.3: Fehler der Korrekturtrajektorie. Die Abbildung zeigt beispielhaft die Korrekturwerte, um welche die Beispieltrajektorie aufgrund der Kamerabewegung zu verbessern ist (oben), und die entsprechenden Fehler dieser Korrekturwerte (unten).

Für die Korrektur einer gemessenen Translation zwischen zwei Bildern ($i-1$ und i) um den Einfluss der Kamerabewegung ist die Differenz zwischen zwei Punkten der Korrekturtrajektorie anzubringen. Der Fehleranteil der Kamerabewegungskorrektur für eine Einzeltranslation ($s_{\Delta kx'_i} / s_{\Delta ky'_i}$) ergibt sich nach dem einfachen VFG entsprechend Gleichung 6.2 aus den Punktlagefehlern benachbarter Punkte der Korrekturtrajektorie $s_{kx'_{(i-1)}}$ und $s_{kx'_i}$ bzw. $s_{ky'_{(i-1)}}$ und $s_{ky'_i}$.

$$s_{\Delta kx'_i} = \sqrt{(s_{kx'_{(i-1)}}^2 + s_{kx'_i}^2)} \quad (6.2)$$

$$s_{\Delta ky'_i} = \sqrt{(s_{ky'_{(i-1)}}^2 + s_{ky'_i}^2)}$$

Es ist davon auszugehen, dass die Punktlagefehler aufeinanderfolgender Punkte einer Korrekturtrajektorie stark korreliert sind. Bei der Interpretation des so berechneten Fehlers ist deshalb anzunehmen, dass dieser zu pessimistisch geschätzt wird. Im Mittel ergibt sich für die gemessenen Translationen der Beispieltrajektorie ein Fehler der Kamerabewegungskorrektur von $s_{\Delta kx'} = s_{\Delta ky'} = 0,14$ Pixeln.

Wird die gemessene Trajektorie um die Kamerabewegung korrigiert, sollten daraus im Idealfall die in der korrigierten Trajektorie noch verbleibenden Systematiken aus der Gletscherbewegung resultieren (z. B. gezeiteninduzierte Vertikalbewegungen). Als Ursachen für verbleibende Restsystematiken, die noch aus dem Messverfahren resultieren können, werden durch Temperaturschwankungen verursachte, tagesperiodisch variierende Refraktionseffekte bei der Gletscherpunktmessung sowie Veränderungen in der inneren Geometrie der Kamera vermutet (vgl. auch Kapitel 4.2.6.5). Zu deren endgültiger Klärung bedarf es jedoch weiterführender Untersuchungen.

6.1.2.3 Skalierungsfehler

Bei der Übertragung der im Bild gemessenen Translationen in den Objektraum wirken die folgenden Einflüsse auf die Skalierungsgenauigkeit der Trajektorien:

- der Fehler des Maßstabs des photogrammetrischen Netzes
- die innere Genauigkeit des photogrammetrischen Netzes, welche die Berechnung der Distanzwerte für die einzelnen Bildpunkte beeinflusst
- der Fehler der Winkel, welche die Abweichung von der Orthogonalität zwischen Kamerablickrichtung und Gletscherbewegungsrichtung beschreiben

Der Maßstab für das photogrammetrische Netz ergibt sich aus der mittels GPS bestimmten Basis zwischen zwei Kamerastandpunkten. Deren Bestimmung erfolgt auf wenige Millimeter genau. Da jedoch für die Kameras keine zwangszentrierte Aufstellung möglich ist, existiert ein Offset-Vektor zwischen dem Kameraprojektionszentrum und der mit GPS gemessenen Position (Antennenphasenzentrum). Für die Basislänge wird deshalb ein Fehler von ca. 15 cm angenommen. Im vorliegenden Beispiel beträgt die Länge der Basis 255 m, woraus sich ein Maßstabsfehler von $s_{B,rel} = 0,06 \%$ ergibt, der vernachlässigbar gering ist.

Einen deutlich größeren Einfluss als der auf alle Trajektorien wirkende Maßstabsfehler des photogrammetrischen Netzes hat der Fehler der Distanzen zwischen dem Kameraprojektionszentrum und den jeweiligen Startpunkten der Trajektorien im Objektraum. Auch dieser wirkt als Skalierungsfehler und ist individuell für jede Trajektorie zu bestimmen. Die Distanzfehler resultieren aus den Fehlern der Objektpunktkoordinaten und den Fehlern der Orientierungsparameter der Sequenzkamera. Deren Standardabweichungen und Kovarianzen werden im Rahmen der Bündelblockausgleichung mitbestimmt. Sie können dann unter Anwendung des allgemeinen Varianzfortpflanzungsgesetzes auf den Fehler der berechneten Distanzen fortgepflanzt werden. Dies wurde exemplarisch für zwei Kamerastandpunkte am Jakobshavn Isbræ durchgeführt, zwischen denen ein Höhenunterschied von ca. 50 m existiert. Die Ableitung nach den einzelnen fehlerbehafteten Größen erfolgte dabei numerisch aufgrund der analytisch-geometrischen Berechnungsweise der Distanzen.

Die Distanzen können entsprechend Kapitel 4.2.4.1 entweder direkt als Strecke zwischen dem Kameraprojektionszentrum und dem Startpunkt einer Trajektorie bestimmt werden, wenn dieser als Neupunkt in der Bündelblockausgleichung berechnet wurde, oder sie werden durch Verschneidung eines Bildstrahls mit dem TIN der Gletscheroberfläche interpoliert. Im ersten Fall gehen als fehlerbehaftete Größen die Koordinaten des Kameraprojektionszentrums der Sequenzkamera und die Koordinaten des jeweiligen Objektpunktes ein. Da der Fehler der Objektpunktkoordinaten quadratisch mit der Entfernung zunimmt, nimmt der relative Distanzfehler für alle Trajektorien linear mit der Entfernung zu und beträgt hier im Mittel $s_{D,rel} = 0,09 \%$. Im zweiten Fall werden die Fehler aller Parameter der äußeren Orientierung der Sequenzkamera und die Koordinatenfehler der drei Objektpunkte des TIN-Dreiecks, welches der Bildstrahl schneidet, fortgepflanzt. Hier ergibt sich ein mittlerer relativer Distanzfehler von $s_{D,rel} = 0,17 \%$ für den höher liegenden und ein Fehler von $s_{D,rel} = 0,29 \%$ für den tiefer liegenden Sequenzkamerastandpunkt.

Die interpolierten Distanzen besitzen erwartungsgemäß eine geringere Genauigkeit als bei direkter Verwendung der Objektpunkte und sind insbesondere vom Schnittwinkel des Bildstrahls mit dem TIN beeinflusst. Die Unterschiede in der Genauigkeit für die beiden sich in unterschiedlichen Höhen befindenden Standpunkte sind auf eine Abhängigkeit des Distanzfehlers vom Winkel, unter dem ein Bildstrahl ein TIN-Dreieck schneidet, zurückzuführen.

Für den tiefer liegenden Standpunkt treten dabei schleifendere Schnitte auf als für den höher gelegenen. Abbildung 6.4 verdeutlicht den indirekt proportionalen Zusammenhang zwischen dem relativen Distanzfehler und dem Schnittwinkel zwischen Bildstrahl und TIN-Dreieck am Beispiel des unteren Sequenzstandpunktes. Besonders im Bereich von TIN-Dreiecken, die große Tiefensprünge überbrücken und häufig eine geringe Neigung aufweisen, besitzen die Distanzwerte eine schlechtere Genauigkeit (vgl. auch Kapitel 4.2.4.4).

Ein weiterer auf die Skalierungsgenauigkeit wirkender Fehlereinfluss ist der Fehler des Winkels zwischen Kamerablickrichtung und Gletscherbewegungsrichtung. Den größten Einfluss auf die Skalierungsgenauigkeit hat dabei der auf die horizontale Bewegungskomponente wirkende Anteil. Dieser setzt sich zusammen aus

dem Fehler der Kamerarotation φ um die y -Achse des Kamerakoordinatensystems und dem Fehler, der bei der Bestimmung der Gletscherfließrichtung (z. B. aus Satellitendaten) auftritt. Für das zugrundeliegende Beispiel wurde als Abweichung von der Orthogonalität zwischen Kamerablickrichtung und Gletscherfließrichtung ein Winkel $\delta = 21^\circ$ anhand von Fließlinienmustern in Satellitenorthophotos ermittelt. Die Genauigkeit, mit der dieser Winkel bestimmt werden kann, wird auf ca. $\pm 5^\circ$ geschätzt.

In Bezug auf die vertikale Bewegungskomponente wirkt lediglich der Fehler des Rotationswinkels um die x -Achse des Kamerakoordinatensystems. Dieser wird im Rahmen der Bündelbockausgleichung mitgeschätzt. Für das vorliegende Beispiel beträgt der Rotationswinkel der Kamera um die x -Achse $\omega = -1,93^\circ \pm 0,01^\circ$. Unter Anwendung des VFG auf Gleichung 6.1 ergibt sich damit ein Skalierungsfehler der Horizontalkomponente von $s_{m\delta_{rel}} = 6,96\%$ und ein Skalierungsfehler der Vertikalkomponente von $s_{m\omega_{rel}} = 0,03\%$, dessen Einfluss vernachlässigbar ist.

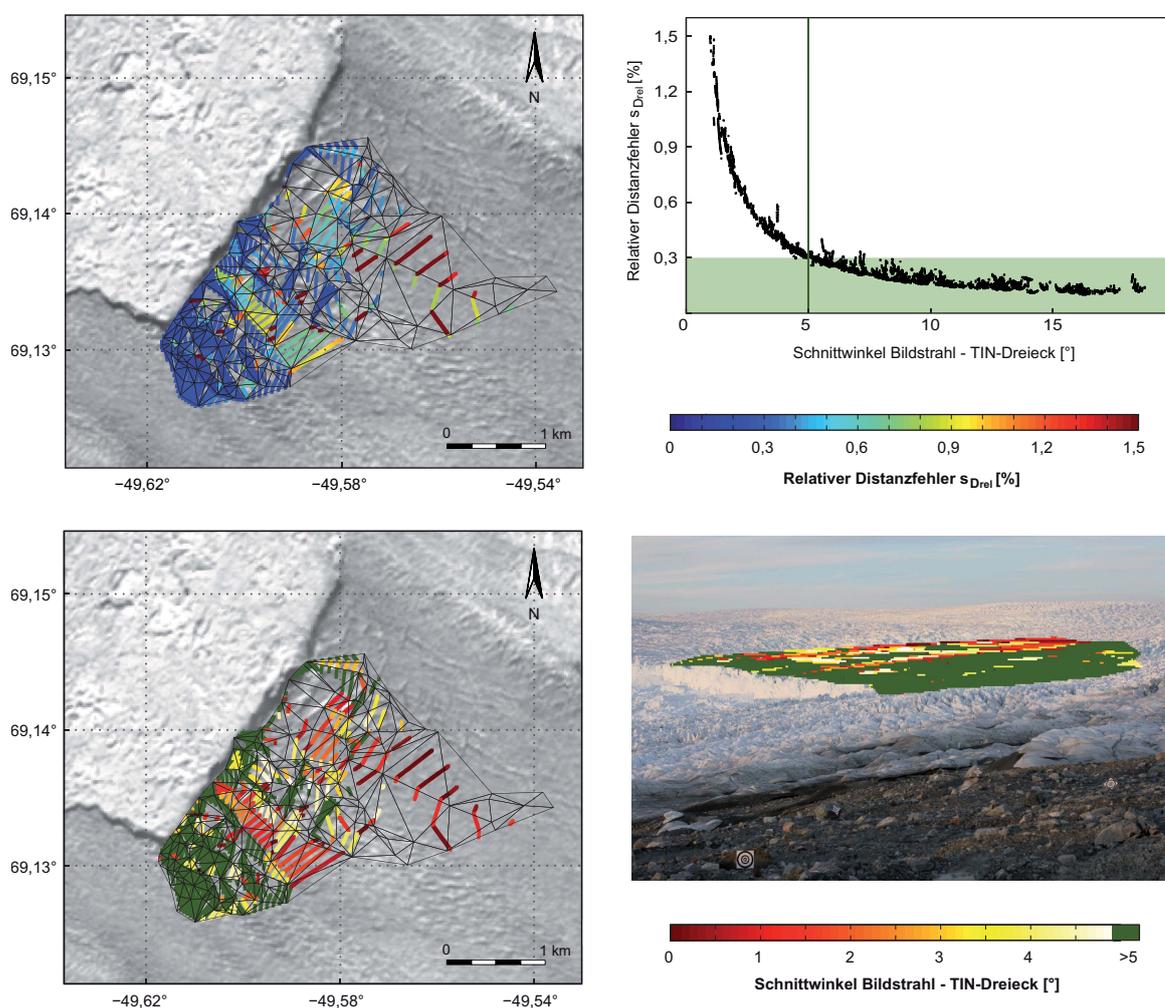


Abbildung 6.4: Relativer Distanzfehler und seine Abhängigkeit vom Schnittwinkel des Bildstrahls mit dem TIN (Bsp. Jakobs-havn Isbræ, August 2010). Die Abbildung zeigt den relativen Fehler, der sich bei der Bestimmung von Distanzwerten durch Verschneidung der Bildstrahlen mit dem TIN der Gletscheroberfläche ergibt sowie dessen Abhängigkeit vom Schnittwinkel des Bildstrahles mit dem jeweiligen TIN-Dreieck (oben rechts). Das TIN sowie die farb-kodierten Fehlerwerte sind einem Landsat-Satellitenbild (August 2010, bearbeitet) überlagert dargestellt (oben links). Im Vergleich dazu sind die entsprechenden Schnittwinkel zwischen Bildstrahl und TIN-Dreieck zum einen als Projektion ins Satellitenbild (unten links) und zum anderen im Messbild (unten rechts) farb-kodiert abgebildet. Punkte mit unkritischen Schnittwinkeln, die größer als 5° sind, werden dabei einheitlich grün dargestellt. (Quelle Landsatszene: <http://landsat.usgs.gov/>)

In Tabelle 8 werden die beschriebenen Einflüsse auf die Skalierungsgenauigkeit und deren Größenordnung für eine Beispieltrajektorie zusammengestellt. Es wird der relative Gesamtfehler der Skalierung ermittelt, der jeweils auf die Horizontal- und die Vertikalkomponente der Translationen wirkt.

Den größten Einfluss auf die Skalierungsgenauigkeit der Horizontalkomponente hat dabei die Genauigkeit, mit der die Gletscherfließrichtung bestimmt werden kann, sowie die Genauigkeit, mit der die Entfernung zum Objekt bestimmt wird. Auf die Vertikalkomponente wirkt maßgeblich der Fehler der ermittelten Distanz zwischen dem Kameraprojektionszentrum und dem Startpunkt der Trajektorie im Objektraum.

Tabelle 8: Skalierungsfehler der Beispieltrajektorie.

Relativer Skalierungsfehler für eine Trajektorie in 3.000 m Entfernung		Horizontalkomponente	Vertikalkomponente
Aufgrund des Maßstabsfehlers des photogrammetrischen Netzes	S_{Brel}	0,04 %	
aufgrund des Distanzfehlers	S_{Drel}	0,27 %	
aufgrund des Fehlers des Winkels zwischen Kamerablickrichtung und Gletscherbewegungsrichtung	$S_{m\delta rel} / S_{m\omega rel}$	6,96 %	0,03 %
Relativer Gesamtfehler der Skalierung	S_{m_x} / S_{m_y}	7,27 %	0,34 %

Für eine Horizontalkomponente einer Translation von 0,5 m würde aufgrund der Skalierung der im Bild gemessenen Größen zur Übertragung in den Objektraum ein Fehler von ca. 3,6 cm resultieren. Der Skalierungsfehler einer Translation gleicher Größenordnung in y -Richtung würde für das dargestellte Beispiel dagegen nur einen Fehler der Translation von 1,7 mm bewirken.

6.1.2.4 Gesamtfehler der Translationen

Die Übertragung der Translationswerte vom Bild- in den Objektraum erfolgt nach der in Kapitel 4.2.7.1 beschriebenen analytisch-geometrischen Vorgehensweise. Die Fehler der einzelnen Eingangsgrößen können im Rahmen dieser Berechnungen numerisch auf den Fehler der einzelnen Translationen im Objektraum fortgepflanzt werden.

Zum besseren Verständnis des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Eingangsgrößen und dem resultierenden Translationsbetrag bei der Transformation in den Objektraum kann die Skalierung der Trajektorien vereinfacht, getrennt für den vertikalen und den horizontalen Anteil der Translation, anhand der Gleichungen 6.3 beschrieben werden. Hier erfolgt für jede Translation i der Trajektorie eine Skalierung der um die Kamerabewegung ($\Delta kx'_i / \Delta ky'_i$) verbesserten Translation ($\Delta x'_i / \Delta y'_i$) im Bildraum mittels der Entfernung D sowie zusätzlich eine Korrektur aufgrund der Abweichung von der Orthogonalität zwischen Gletscherfließrichtung und Kamerablickrichtung. Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Fehler werden nach dem VFG mittels der Gleichungen 6.4 auf den Fehler der einzelnen Translationen im Objektraum ($s_{\Delta x_i} / s_{\Delta y_i}$) fortgepflanzt. Die partiellen Ableitungen für die Gleichungen 6.4 finden sich im Anhang A.4.

$$\Delta x_i = \frac{\Delta pix}{c} \cdot D \cdot (\Delta x'_i + \Delta kx'_i) \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \delta)} \quad \text{mit} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{c}{x'}\right) \quad (6.3)$$

$$\Delta y_i = \frac{\Delta pix}{c} \cdot D \cdot (\Delta y'_i + \Delta ky'_i)$$

$$s_{\Delta x_i}^2 = \left(\frac{\partial \Delta x_i}{\partial D}\right)^2 \cdot s_D^2 + \left(\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta x'_i}\right)^2 \cdot s_{\Delta x'_i}^2 + \left(\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta kx'_i}\right)^2 \cdot s_{\Delta kx'_i}^2 + \left(\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \delta}\right)^2 \cdot s_\delta^2$$

$$s_{\Delta y_i}^2 = \left(\frac{\partial \Delta y_i}{\partial D}\right)^2 \cdot s_D^2 + \left(\frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta y'_i}\right)^2 \cdot s_{\Delta y'_i}^2 + \left(\frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta ky'_i}\right)^2 \cdot s_{\Delta ky'_i}^2$$
(6.4)

Für das Beispiel der Bildsequenzmessung am Jakobshavn Isbræ im Mai 2010 sind in Tabelle 9 die wichtigsten Fehlereinflüsse, die bei der Messung im Bildraum und bei der Skalierung der Trajektorien wirken, exemplarisch für die frontnahe Beispieltrajektorie zusammengestellt. Für jeden Fehler wird seine Auswirkung im Objektraum angegeben. Aus diesen Fehleranteilen ergibt sich der mittlere Gesamtfehler für die Translationen der Beispieltrajektorie. Er ist abhängig von der Entfernung D des Trajektorienstartpunktes im Objektraum zur Sequenzkamera, von der Position x' des Trajektorienstartpunktes im Bild sowie vom Betrag der einzelnen Translationen der Trajektorie.

Tabelle 9: Fehler der Translationen der Beispieltrajektorie.

	Fehlermittel über alle Translationen einer Trajektorie in 3.000 m Entfernung		Fehleranteil im Bildraum	Fehleranteil im Objektraum (bezogen auf 3.000 m Distanz)
Horizontalkomponente	Fehler der Bildpunktzuordnung	$S_{\Delta x'}$	0,05 Pixel	2,3 cm
	Fehler der Kamerabewegungskorrektur	$S_{\Delta kx'}$	0,14 Pixel	6,8 cm
	Skalierungsfehler	S_{Drel}		0,27 %
	(bezogen auf die mittlere Translation der Trajektorie in x-Richtung: $\overline{\Delta x} = 0,5$ m)	$S_{m\delta rel}$		6,96 %
	Fehlermittel der horizontalen Translationen einer Trajektorie	$S_{\Delta x}$	0,15 Pixel	9,2 cm
Vertikalkomponente	Fehler der Bildpunktzuordnung	$S_{\Delta y'}$	0,17 Pixel	8,1 cm
	Fehler der Kamerabewegungskorrektur	$S_{\Delta ky'}$	0,14 Pixel	6,8 cm
	Skalierungsfehler	S_{Drel}		0,27 %
	(bezogen auf die mittlere Translation der Trajektorie in y-Richtung: $\overline{\Delta y} = 0,1$ m)			0,1 cm
	Fehlermittel der vertikalen Translationen einer Trajektorie	$S_{\Delta y}$	0,22 Pixel	10,7 cm

Die gemessenen Einzeltranslationen können innerhalb des Messgebietes, abhängig von ihrer Distanz zur Kamera, mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern bestimmt werden. Für kleine Translationsbeträge, d. h. bei hoher zeitlicher Auflösung der Messung, ist der Skalierungsfehler gegenüber den Fehlern, die bei der Messung im Bildraum auftreten, gering. Da die Fehler der Messung im Bildraum unabhängig vom Betrag der gemessenen Translation wirken, verringert sich ihr Einfluss in x-Richtung bei der Wahl größerer Zeitintervalle zwischen den Bildern und der Einfluss des Skalierungsfehlers nimmt hinsichtlich des Gesamtfehlers der Einzeltranslationen an Bedeutung zu.

Eine hohe zeitliche Auflösung der Bildsequenzen ist dennoch anzustreben, da sich die Zuverlässigkeit der Bildpunktzuordnung aufgrund der sich ändernden Beleuchtungssituation am Messobjekt durch größere Zeitabstände zwischen den Bildern verringert. Für die Zuordnung der Gletscherpunkte hat sich ein Zeitintervall zwischen den Aufnahmezeitpunkten von 15–20 min als günstig erwiesen. Die so gemessenen Trajektorien sind entsprechend verrauscht. Bei der Weiterverwendung der Daten sind, je nach Fragestellung, unterschiedli-

che, aber meist geringere zeitliche Auflösungen der Trajektorien erforderlich. Um z. B. Gezeiteneinflüsse untersuchen zu können, wären Zeitintervalle von 1 h ausreichend. Somit besteht ein gewisser Spielraum, um die Trajektorien vor ihrer Weiterverarbeitung auf geeignete Weise zu filtern. Art und Grad der Filterung kann entsprechend der zu lösenden Fragestellungen optimiert werden [Rosenau u. a., 2013].

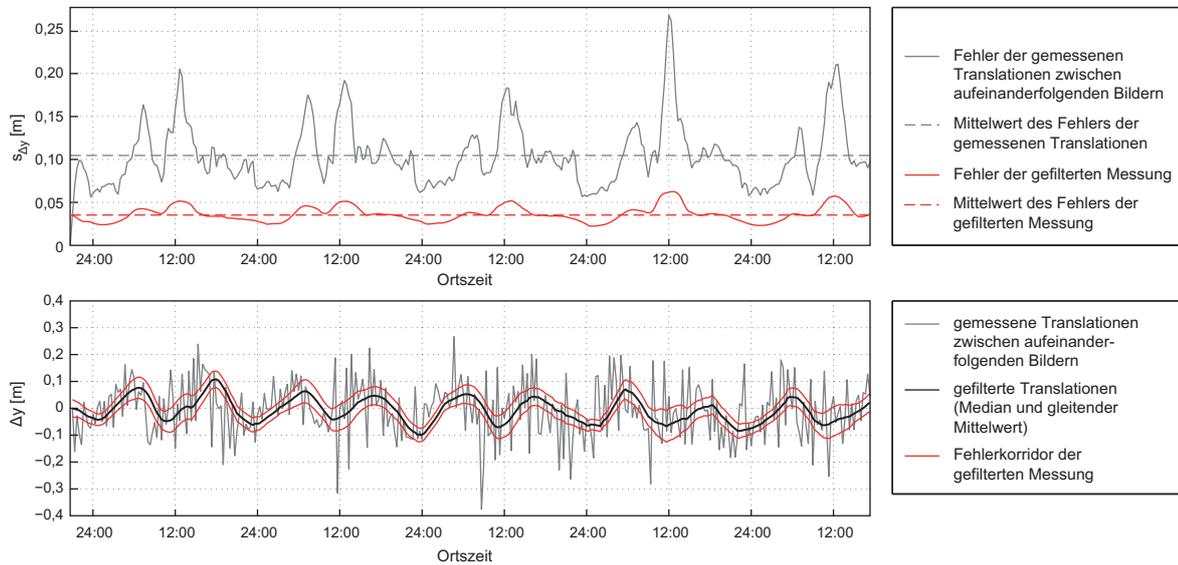


Abbildung 6.5: Fehler der vertikalen Translationen einer Trajektorie (schwimmender Gletscherbereich) nach Filterung der Datenreihe. Die Abbildung zeigt die Fehlerwerte der original gemessenen Translationen (blau) sowie die Fehlerwerte nach Filterung der Messreihe (rot). Im unteren Diagramm wird das gefilterte Signal mit seinem Fehlerkorridor abgebildet.

Abbildung 6.5 zeigt exemplarisch die Fehlerwerte für die Vertikalkomponente der Beispieltrajektorie, die auf dem frontnahen, schwimmenden Bereich der Gletscherzunge gemessen wurde. Im oberen Diagramm sind die Fehler der original gemessenen Translationen sowie die entsprechend geringeren Fehlerwerte nach Anwendung eines Medianfilters zur Entfernung von Ausreißern und eines gleitenden Mittelwertfilters (Mittelung über drei Messwerte) zur Glättung des Signals dargestellt. Im unteren Diagramm sind die ursprüngliche Messreihe sowie das gefilterte Signal mit seinem resultierenden Fehlerkorridor abgebildet.

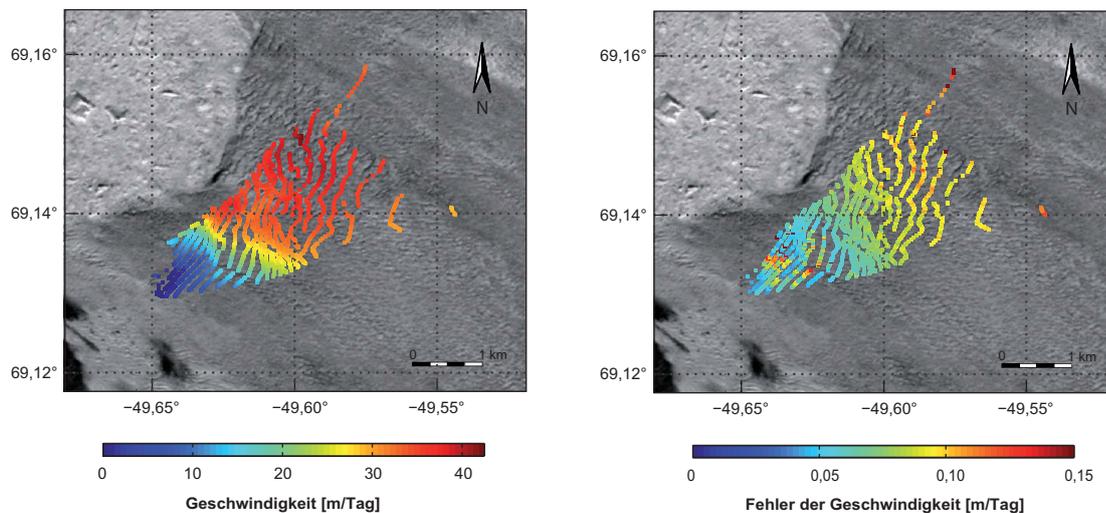


Abbildung 6.6: Fehler der abgeleiteten Horizontalgeschwindigkeiten (Bsp. Jakobshavn Isbræ, Mai 2010). Die Abbildung zeigt ein Geschwindigkeitsfeld, welches aus über einen Zeitraum von 24 h gemittelten Translationen der Trajektorien abgeleitet wurde (links), sowie die Fehler der einzelnen Geschwindigkeitswerte (rechts).

Nach Betrachtung des Fehlerhaushalts einer einzelnen Trajektorie kann nun die Bestimmung des mittleren Translationsfehlers für alle gemessenen Trajektorien der Beispielbildsequenz erfolgen. In Abbildung 6.6 werden die aus den ermittelten Trajektorien abgeleiteten horizontalen Geschwindigkeitsbeträge dargestellt sowie die Fehler der Geschwindigkeitswerte, die sich aus den entsprechenden Fehlern der Translationen der Trajektorien ergeben.

6.1.2.5 Fehler der Georeferenzierung

Die Genauigkeit der Georeferenzierung der gemessenen Bewegungsvektorfelder ergibt sich aus der Genauigkeit der Passpunkte, auf die das photogrammetrische Netz gelagert wird. Dies sind im Minimalfall die beiden Endpunkte der Basislinie als Vollpasspunkte sowie ein weiterer Höhenpasspunkt mit möglichst großem orthogonalem Abstand zur Basis.

Lagegenauigkeit

Die Lagegenauigkeit der räumlichen Bezugspunkte der einzelnen Trajektorien wird durch die Lagefehler der Basislinienendpunkte beeinflusst. Mittels DGPS konnten die Endpunkte auf ca. 10 cm genau bestimmt werden. Dieser Fehler kann sich bei der Transformation des photogrammetrischen Netzes in ein übergeordnetes Koordinatensystem als Translations-, Rotations- und Maßstabsfehler auf die Lagegenauigkeit der einzelnen Messpunkte auswirken (Abbildung 6.7).

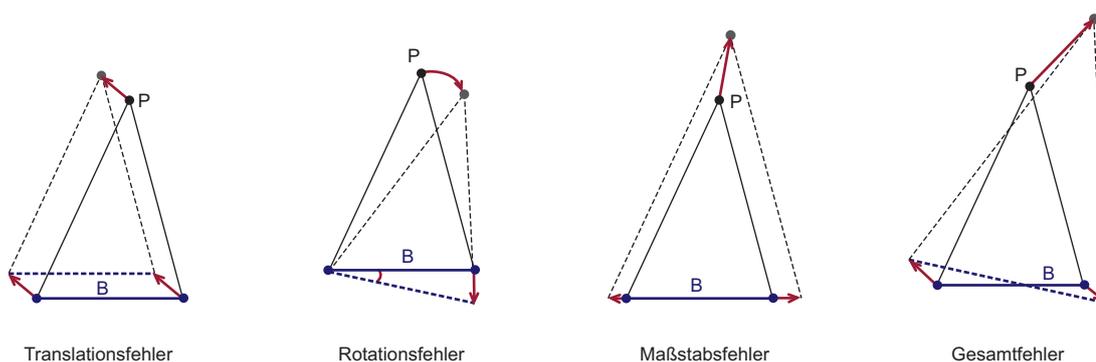


Abbildung 6.7: Auswirkung von Lagefehlern der Basislinie. Die Abbildung zeigt die unterschiedlichen Auswirkungen von Lagefehlern (rote Vektoren) der gemessenen Basislinienendpunkte der Basis B (blau) auf die Position eines Messpunktes P . Die Lagefehler wirken abhängig von ihrer Richtung als Translations-, Rotations- und Maßstabsfehler.

Während der Translationsanteil konstant auf alle Punkte wirkt und bei einer Größenordnung von 10 cm vernachlässigbar ist, sind der Maßstabs- und der Rotationseinfluss abhängig vom Basis-Entfernungs-Verhältnis. Bei einer Basis von 250 m beträgt der Maßstabsfehler ca. 0,06 %, was einem Lagefehler in Tiefenrichtung von ca. 1,7 m in 3.000 m Entfernung entsprechen würde. Ein Lagefehler der Basislinienendpunkte von 10 cm orthogonal zur Basis würde einen Rotationsfehler von $0,03^\circ$ bewirken, der in einer Entfernung von 3.000 m ebenfalls in einem Fehler von ca. 1,7 m resultieren würde, welcher vorrangig quer zur Blickrichtung wirkt. Aufgrund des kleinen Rotationswinkels wirkt der Rotationsfehler letztlich auch als Maßstabsfehler quer zur Blickrichtung, da sich auch hier das Verhältnis von Lagefehler zu Basis über die Distanz auf den Lagefehler des jeweiligen Messpunktes überträgt.

Bei der Verwendung eines einfachen Handheld-GPS zur Bestimmung der Basislinienendpunkte würde sich, unter Annahme einer erzielbaren Positionierungsgenauigkeit von 3 m, in 3.000 m Entfernung ein Lagefehler für einen Messpunkt von ca. 51 m ergeben.

Hinsichtlich des Lagefehlers des räumlichen Bezugspunktes für die Translationen ist noch ein weiterer Aspekt zu betrachten. Die ermittelten Translationen stellen aufgrund der Verwendung von Patches bestimmter Ausdehnung einen integralen Wert für das Bewegungsverhalten innerhalb der Fläche des Gletschers dar, die

von einem Patch abgedeckt wird. Bei flachen Sichten und Tiefenunterschieden in den Patches von bis zu 100 m ist der Bezugspunkt für eine ermittelte Translation innerhalb dieses Bereichs – insbesondere in Tiefenrichtung – nicht klar definiert. Der Patchmittelpunkt ist dabei nicht in jedem Fall der korrekte Bezugspunkt für eine Translation, da dieser auch von der Verteilung der Grauwerte im Patch abhängig ist.

Höhengenauigkeit

Durch den Fehler eines Höhenpasspunktes wird ein Rotationsfehler um die Basis und damit ein Höhenfehler jedes Messpunktes verursacht. Der Fehler eines weit entfernten Höhenpasspunktes wirkt sich geringfügiger aus als derselbe Fehler eines Höhenpasspunktes mit geringerer Entfernung zur Basis. Ein Höhenpasspunkt in einer Entfernung von 10 km mit einem Höhenfehler von 1 m bewirkt aufgrund des konstanten Verhältnisses zwischen Höhenfehler und Distanz einen Höhenfehler von 0,3 m in einer Entfernung von 3.000 m. Unter diesen Gesichtspunkten können also z. B. auch weit entfernte Berggipfel als Höhenpasspunkt verwendet werden, deren absolute Höhe nur auf wenige Meter genau aus Kartenmaterial abgegriffen werden kann.

Die Höhenfehler der Basislinienendpunkte bewirken neben einem konstant wirkenden Höhenfehler für jeden Messpunkt P und einem geringfügigen Maßstabsfehler im Wesentlichen eine Rotation α um eine horizontale Achse orthogonal zur Basis (vgl. Abbildung 6.8). Letztere besitzt ihre größte Auswirkung in den seitlichen Randbereichen des Messgebietes und verursacht dort, abhängig vom Höhenunterschied ΔH zwischen dem Messpunkt P und der Basislinie sowie von der Horizontalkomponente xr des orthogonalen Abstandes r des Messpunktes P von der Rotationsachse R , einen Lagefehler s_{xr} parallel zur Basislinie und einen Höhenfehler $s_{\Delta H}$. Zur Abschätzung dieser Fehler werden Basislinienendpunkte mit gleicher Höhe angenommen. Aufgrund des kleinen Rotationswinkels kommt vereinfacht die Bogenformel zur Anwendung. Bei einer Höhengenaugigkeit der Basislinienendpunkte von $s_{HB} = 10$ cm ergeben sich entsprechend Abbildung 6.8 anhand der Gleichungen 6.5 und 6.6 für einen Messpunkt mit einem Abstand von $xr = 1.000$ m zur Rotationsachse und einer Höhendifferenz von $\Delta H = 150$ m zur Höhe der Basislinie ein vernachlässigbar geringer Höhenfehler von $s_{\Delta H} = 0,1$ m und ein ebenfalls geringer Lagefehler von $s_{xr} = 0,6$ m. Unter Annahme einer Höhengenaugigkeit der Basislinienendpunkte von 5 m (Handheld-GPS) würde für das gewählte Beispiel ein Höhenfehler von 2,5 m und ein Lagefehler von 17 m resultieren. Der Einfluss des Höhenfehlers der Basislinienendpunkte wirkt entfernungsunabhängig.

$$s_{xr}^2 + s_{\Delta H}^2 = \alpha \cdot r \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{\sqrt{2}}{B} \cdot s_{HB} \quad \text{und} \quad r = \sqrt{xr^2 + \Delta H^2} \quad (6.5)$$

$$s_{xr}^2 + s_{\Delta H}^2 = \alpha \cdot r \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{\sqrt{2}}{B} \cdot s_{HB} \quad \text{und} \quad r = \sqrt{(xr + s_{xr})^2 + (\Delta H + s_{\Delta H})^2} \quad (6.6)$$

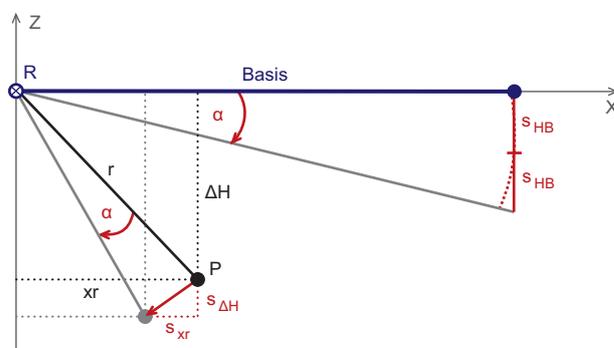


Abbildung 6.8: Auswirkung des Höhenfehlers s_{HB} der Basislinienendpunkte. Die Höhenfehler der Basislinienendpunkte bewirken eine Rotation der Basis um den Winkel α , woraus ein Lagefehler und ein Höhenfehler eines Messpunktes resultieren.

Je nach Fragestellung, die untersucht werden soll, und je nach der Art der Vergleichsdaten, mit denen die abgeleiteten Bewegungsvektorfelder verglichen werden, ist gegebenenfalls auch eine Handheld-GPS-Genauigkeit ausreichend. Dennoch sollte in diesem Fall die Länge der Basis zusätzlich z.B. mittels Laser-Entfernungsmesser mit hoher Genauigkeit bestimmt werden, da sich der Fehler der Basislänge als Maßstabsfehler nicht nur auf die absolute Position der Bezugspunkte für die Trajektorien im Objektraum auswirkt, sondern auch auf die Translationen selbst, die als relative Größen bestimmt werden.

6.1.3 Betrachtung der äußeren Genauigkeit

Als Vergleichsdaten, anhand derer eine Einschätzung der äußeren Genauigkeit der aus den monoskopischen Bildsequenzen abgeleiteten Geschwindigkeiten vorgenommen werden kann, stehen Ergebnisse aus einer zeitnahen Bildsequenzmessung, Ergebnisse aus Geschwindigkeitsmessungen auf der Basis von Satellitenbildern (Landsat7) sowie Referenzbewegungskurven aus Pegelmessungen zur Verfügung. In Kapitel 6.2.2 erfolgt zudem ein Vergleich zwischen den Ergebnissen einer Bildsequenz- und einer multi-temporalen Laser-scannermessung. Für eine fundierte äußere Genauigkeitsbetrachtung wären Referenzdaten mit übergeordneter Genauigkeit notwendig. Die genannten verfügbaren Vergleichsdatensätze können nicht als solche angesehen werden, aber sie stellen unabhängige Messungen dar, anhand derer zumindest die Plausibilität der abgeleiteten Werte eingeschätzt werden kann.

Vergleich mit einer zeitnahen Bildsequenzmessung

Für die Messungen am Jakobshavn Isbræ im Mai 2010 stehen zwei Bildsequenzen zur Verfügung, die von unterschiedlichen Standpunkten aus zeitgleich aufgenommen wurden. Abbildung 6.9 zeigt den Vergleich von aus diesen Bildsequenzen abgeleiteten Geschwindigkeiten, die jeweils als Mittel über einen Zeitraum von 24 h berechnet wurden.

Der Mittelwert, um den die Abweichungen zwischen beiden Datensätzen streuen, ist mit 0,09 m/Tag gering und entspricht der Größenordnung der bei Betrachtung der inneren Genauigkeit bestimmten Fehlerwerte. Im Mittel stimmen die beiden unabhängigen Datensätze sehr gut überein. Die einfache Standardabweichung der Differenzen gibt Aufschluss über die Größenordnung der Fehler, die in einem der beiden Datensätze oder auch in beiden noch enthalten sein können. Ca. 70 % der verglichenen Werte weichen mit einer Differenz voneinander ab, die geringer ist als $\pm 0,8$ m/Tag.

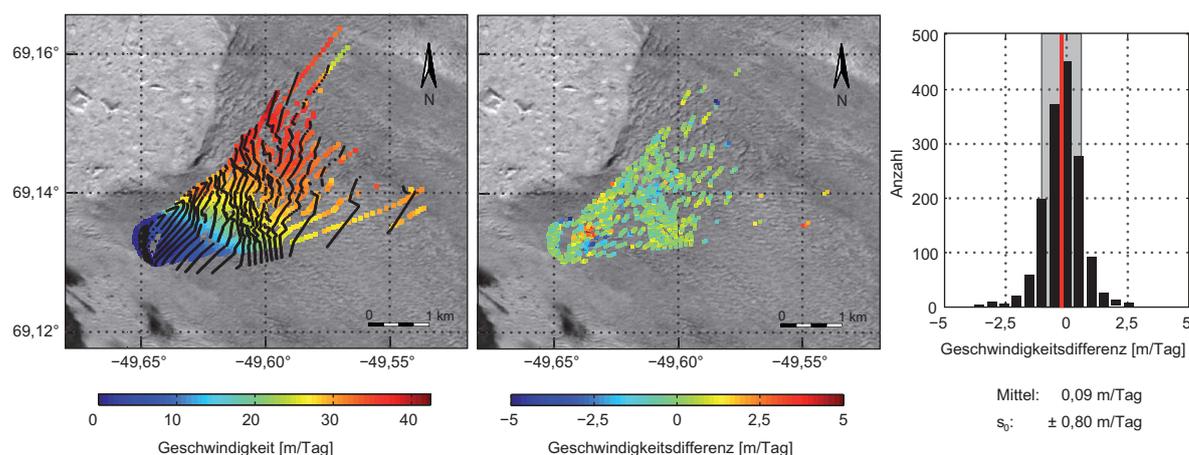


Abbildung 6.9: Vergleich zweier zeitgleich aufgenommener Bildsequenzmessungen (Bsp. Jakobshavn Isbræ, 09. Mai 2010). Die Abbildung zeigt das farbodierte Geschwindigkeitsfeld einer Bildsequenzmessung sowie die Punkte (schwarz), für welche Vergleichswerte aus einer Bildsequenzmessung vorliegen, die von einem anderen Standpunkt aus zeitgleich aufgenommen wurde (links). Für diese Punkte werden Geschwindigkeitsdifferenzen ermittelt (Mitte). Die Verteilung der Geschwindigkeitsdifferenzen ist im Histogramm (rechts) abgebildet. Das Mittel der Geschwindigkeitsdifferenzen wird als rote Linie dargestellt, der Bereich der einfachen Standardabweichung ist grau unterlegt.

Bestimmte Fehlereinflüsse werden bei der Betrachtung der inneren Genauigkeit nicht mit erfasst, sind aber in den Differenzen beim obigen Vergleich der Messergebnisse enthalten. Dies sind z. B. Fehler zweiter Ordnung, die durch Mehrdeutigkeiten beim Matching entstehen können. Die Standardabweichung des Matchings ist in diesem Fall gering, obwohl aufgrund sich wiederholender oder schwacher Textur im Suchbereich ein falscher Punkt zugeordnet wurde. Einen weiteren Einfluss auf die Differenzen hat die Genauigkeit des Bezugspunktes der Messwerte. Diese ergibt sich zum einen aus der entfernungsabhängigen Genauigkeit der Georeferenzierung eines Messpunktes, welche für einen identischen Messpunkt in den Bildern der beiden Sequenzkameras unterschiedlich ist, da die Kameras eine unterschiedliche Distanz zum Messobjekt aufweisen. Zum anderen decken die Patches für einen homologen Punkt in den Bildern der beiden Sequenzkameras im Objektraum keinen vollkommen identischen Bereich des Gletschers ab, da die beiden Bildsequenzkameras eine unterschiedliche Blickrichtung auf die Gletscheroberfläche haben. Die Geschwindigkeiten, die unter Verwendung der Patches bestimmt werden und die einen integralen Wert über die jeweilige Patchfläche im Objektraum darstellen, könnten sich folglich auch aus diesem Grund geringfügig unterscheiden.

Vergleich mit Ergebnissen von Geschwindigkeitsmessungen auf der Basis von Satellitenbildern

Beim Vergleich der Ergebnisse der Bildsequenzauswertung mit Ergebnissen, die aus Satellitenbildern abgeleitet wurden, kommt zum Problem der unterschiedlichen räumlichen Interpolation eines Messwertes aufgrund der Patchgrößen das Problem der zeitlichen Interpolation der Messwerte durch lange Zeitbasen zwischen den Satellitenbildern hinzu. In Abbildung 6.10 werden Geschwindigkeitswerte, die aus zwei Landsatzenen abgeleitet wurden, mit Geschwindigkeiten einer zeitgleichen Bildsequenz verglichen. Das Zeitintervall

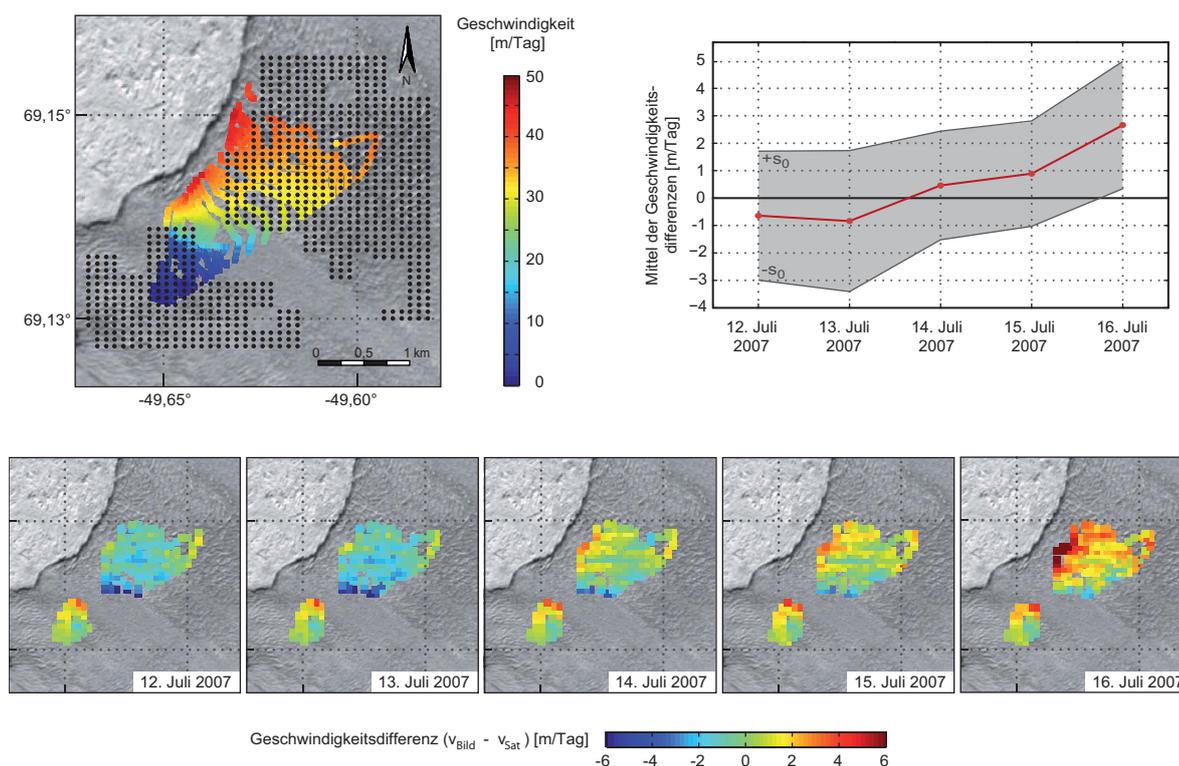


Abbildung 6.10: Vergleich von Geschwindigkeiten aus Bildsequenzen mit Geschwindigkeiten aus Landsatdaten (Bsp. Jakobs-havn Isbræ, Juli 2007). Die Abbildung zeigt das farbkodierte Geschwindigkeitsfeld einer Bildsequenzmessung (12.–16. Juli 2007) sowie die Punkte (schwarz), für welche Vergleichsgeschwindigkeiten vorliegen, die aus Landsatbildern vom 08.07.2007 und 24.07.2007 abgeleitet wurden (oben, links). Für diese Punkte wurden Geschwindigkeitsdifferenzen ermittelt. Dies erfolgt getrennt für die fünf einzelnen Tage der Bildsequenz. Die jeweiligen Geschwindigkeitsdifferenzen werden farbkodiert dargestellt (unten). Das Mittel der Geschwindigkeitsdifferenzen (rot) sowie der Bereich der einfachen Standardabweichung (grau) wird für diese fünf Tage oben rechts im Diagramm dargestellt. (Bestimmung der Geschwindigkeiten aus Landsatdaten: Ralf Rosenau; Satellitenbild der Abbildung: bearbeitetes Landsatbild vom 24.07.2007, Quelle: <http://landsat.usgs.gov/>)

zwischen der Aufnahme der beiden Satellitenbilder beträgt 16 Tage, die Länge der Bildsequenz umfasst fünf Tage innerhalb dieses Zeitintervalls. Eine aus den beiden Satellitenbildern abgeleitete Geschwindigkeit für eine bestimmte Position stellt also einen gemittelten Wert über alle Geschwindigkeitsvariationen des Gletschers innerhalb des Zeitraumes von 16 Tagen dar. Die Ergebnisse von Bildsequenz- und Satellitenbilddatenauswertung wären folglich nur miteinander vergleichbar, wenn die Geschwindigkeit des Gletschers innerhalb dieser 16 Tage konstant bliebe. Dass dies nicht der Fall ist, wird insbesondere für das hier betrachtete Beispiel deutlich, bei dem am 15.07.2007 ein größeres Kalbungsereignis stattfand. Die Ergebnisse der Bildsequenzauswertung dokumentieren einen Geschwindigkeitsanstieg von 3–4 m/Tag innerhalb von fünf Tagen (vgl. auch Kapitel 7.1.4). Die Variabilität der Frontgeschwindigkeiten innerhalb weniger Tage vor und nach einem Kalbungsereignis spiegelt sich somit auch in den Werten des Vergleichs zwischen den als 24-h-Mittel bestimmten Geschwindigkeiten für die einzelnen Tage der Bildsequenz mit den einem 16-Tage-Mittel entsprechenden Geschwindigkeiten aus Satellitenbildern wider.

Als Fazit des Vergleichs kann ausgesagt werden, dass die Ergebnisse der Bild- und Satellitenauswertung mit einer Genauigkeit übereinstimmen, die für ca. 70 % der Werte besser als 2–3 m/Tag ist. Diese Abweichungen sind aber stark durch den zeitlichen Interpolationseffekt aufgrund der großen Zeitbasis der Satellitenbilddatenauswertung beeinflusst. Um für den Frontbereich schnellfließender Gletscher exakte Geschwindigkeiten ableiten zu können, sind Verfahren mit hoher zeitlicher Auflösung der Auswertung von Satellitenbildern vorzuziehen.

Vergleich mit Referenzbewegungskurven

Eine weitere Möglichkeit zur Einschätzung der äußeren Genauigkeit ist der Vergleich der Trajektorien mit einer Referenzbewegungskurve. Diese Methode und die daraus resultierenden Ergebnisse für die Messung am Jakobshavn Isbræ im Jahr 2004 werden in [Dietrich u. a., 2007] beschrieben. Bei der Bildsequenzmessung von 2004 befindet sich ein Großteil der gemessenen Trajektorien noch auf dem schwimmenden Bereich der Gletscherzunge des Jakobshavn Isbræ und zeigt ein deutliches Gezeitensignal. Für die Bewertung dieser Trajektorien konnte eine Referenzbewegungskurve aus Werten einer Pegelmessung im Kangiafjord erstellt werden. Für die Trajektorien erfolgte dann eine Kleinste-Quadrate-Anpassung an die Referenzkurve, wobei verschiedene, die Trajektorien beschreibende Parameter, und deren Fehlerwerte mitgeschätzt wurden. Auf diese Weise wurden unter anderem auch Geschwindigkeiten aus den 24-h-Trajektorien abgeleitet und der Fehler der Geschwindigkeitswerte abgeschätzt. Er variiert für mehr als 90 % der Trajektorien im Bereich zwischen 0,05 und 0,25 m/Tag. Der Mittelwert für das gesamte Messgebiet liegt bei ca. 0,13 m/Tag. Die Größenordnung der ermittelten Geschwindigkeitsfehler stimmt mit der Größenordnung der für die Messung von 2010 nach inneren Genauigkeitskriterien ermittelten und in Abbildung 6.6 dargestellten Fehlerwerte gut überein.

6.2 Terrestrische Laserscannerdaten

6.2.1 Fehlereinflüsse

Die Genauigkeit, mit der mittels multi-temporaler Laserscannermessungen Bewegungsvektoren bestimmt werden können, wird zunächst von der Genauigkeit der Einzelpunktmessung beeinflusst. Diese wiederum wird beeinflusst durch Streckenmessgenauigkeit, Winkelgenauigkeit und Strahldivergenz des Scanners (vgl. Kapitel 3.2.2.3). Der Einfluss dieser drei Größen auf die Punktlagegenauigkeit nimmt linear mit der gemessenen Strecke zu. In Abbildung 6.11 sind die Auswirkungen der vom Hersteller angegebenen Fehlerwerte in Abhängigkeit von der Entfernung für den Distanzbereich dargestellt, innerhalb dessen die Laserscannermessung am Jakobshavn Isbræ erfolgte.

Der Streckenmessfehler beträgt hier in einer Entfernung von 3.000 m weniger als ± 10 cm und wirkt zudem in Blickrichtung des Scanners, also orthogonal zur Hauptbewegungsrichtung des Gletschers. Sein Einfluss auf die Messung ist somit vernachlässigbar. Eine deutlich größere Auswirkung hat die Winkelmessgenauigkeit des Scanners. Hier interessiert vor allem der Einfluss des Horizontalwinkelfehlers, da dieser in Bewegungsrichtung des Gletschers wirkt. Für eine Distanz von 3.000 m beträgt er für den LPM-321 ca. $\pm 0,5$ m. Bedeutenden Einfluss hat auch die relativ große Strahldivergenz des verwendeten Laserscanners. Der Radius

des Laserspots am Objekt beträgt in einer Entfernung von 3.000 m ca. 1,2 m. Innerhalb dieses Bereichs ist die Lage des Punktes, von dem aus die tatsächliche Reflexion des Laserpulses erfolgt, nicht eindeutig definiert. Demzufolge ist also für einen Punkt in 3.000 m Entfernung orthogonal zur Blickrichtung des Scanners eine Punktlageunsicherheit von $\pm 1,2$ m zusätzlich zur Winkelungenauigkeit zu berücksichtigen. Orthogonal zur Blickrichtung des Scanners ergibt sich somit ein maximaler Punktlagefehler von $\pm 1,7$ m. Daraus würde für die Komponente eines Translationsvektors orthogonal zur Scanrichtung, der aus zwei korrespondierenden Einzelpunkten zweier Scanepochen ermittelt wurde, ein Fehler von $\pm 2,4$ m resultieren.

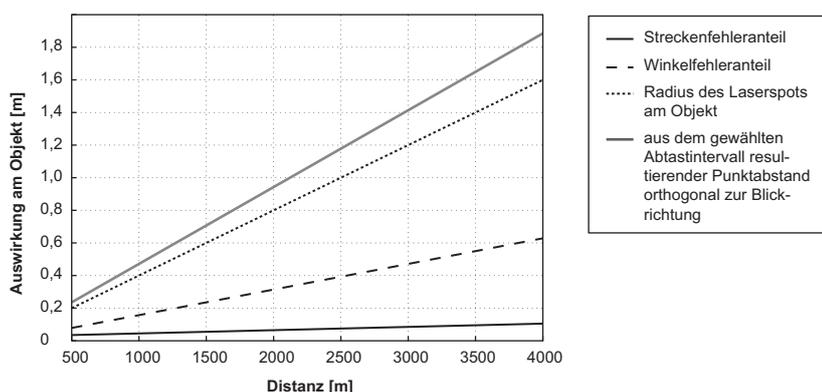


Abbildung 6.11: Auswirkung einzelner Fehlereinflüsse der Laserscannermessung auf die Punktlagegenauigkeit (schwarze Kurven). Punktdichte des Scans in Abhängigkeit von der Distanz (graue Kurve).

Translationsvektoren werden jedoch nicht über die Zuordnung zweier Einzelpunkte bestimmt, sondern indem segmentierte Punktwolken zugeordnet werden. Die dadurch gegebene höhere Redundanz sollte (in Bezug auf den Einfluss des Punktlagefehlers) eine deutlich genauere Bestimmung der Translation erlauben. Da während zweier Scans nicht exakt die gleichen Punkte angemessen werden, kann eine Zuordnung nur durch einen Fit der durch zwei korrespondierende Punktwolken mit unterschiedlicher Punktverteilung repräsentierten Oberfläche des Messobjektes erfolgen (hier mittels ICP-Algorithmus). Die Zuordnungsgenauigkeit des ICP-Algorithmus hängt neben der Punktlagegenauigkeit und Anzahl der Punkte auch von der Oberflächenstruktur des Gletschers im Bereich der segmentierten Punktwolke und insbesondere auch vom Punktabstand ab.

Während bei anderen 3D-Zuordnungsverfahren, wie z.B. dem Matching in TIN-Daten [Maas, 2000; Akca, 2007], statistische Fehlermaße mitbestimmt werden können, liefert der ICP-Algorithmus keine entsprechenden Werte zur Einschätzung der Genauigkeit. Untersuchungen zur Zuordnungsgenauigkeit mittels ICP-Algorithmus wurden im Rahmen der Diplomarbeit von [Junker, 2008] durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Translationsparameter mit einer Genauigkeit bestimmt werden können, die kleiner ist als der Punktabstand innerhalb der segmentierten Punktwolken. Die Punktdichte innerhalb eines Scans wird mit zunehmender Entfernung geringer. In Abbildung 6.11 wird der aus der gewählten Winkelauflösung resultierende Punktabstand orthogonal zur Blickrichtung des Scanners in Abhängigkeit von der Distanz angegeben. Er beträgt am Rand des Eisstroms, in einer Entfernung vom Scanner von 1.500 m, ca. 0,7 m und in der größten messbaren Entfernung von 4.000 m ca. 2 m. Die Genauigkeit, mit der Bewegungsvektoren bestimmt werden können, ist demzufolge am Gletscherrand größer als in der Gletschermitte.

Die Georeferenzierung der Laserscans erfolgte mittels retroreflektierender Zylinder, deren Koordinaten von den Endpunkten der Basislinie aus durch polares Anhängen bestimmt wurden. Wird diese Messung der Retrozylinder als fehlerfrei betrachtet, so gelten die Aussagen über den Einfluss des Fehlers der Basislinienendpunkte, die in Kapitel 6.1.2.5 getroffen wurden, auch bezüglich der Genauigkeit der Punkte der Laserscans. Die Messung der Koordinaten der Retrozylinder ist aber sowohl von der Strecken- und Winkelmessgenauigkeit des Tachymeters als auch von dessen Orientierungsgenauigkeit (Achsenfehler) beeinflusst. Weiterhin

kann der Mittelpunkt der Zylinder selbst nicht direkt angezielt werden. Somit wird geschätzt, dass die Retrozylinder mit einer Genauigkeit von ca. 1–3 cm bestimmt werden können. Zusätzlich wirken also auch die Fehler der Koordinaten der Retrozylinder – abhängig von ihrer Distanz zum Laserscanner – auf dessen Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeit und damit auch auf die Koordinaten jedes einzelnen Messpunktes. Der Einfluss der Retromarkenfehler wirkt sich dabei umso geringer aus, je weiter entfernt vom Laserscanner sie angebracht werden können.

6.2.2 Betrachtung der äußeren Genauigkeit

Zur Einschätzung der äußeren Genauigkeit der aus den terrestrischen Laserscannerdaten abgeleiteten Geschwindigkeiten steht als Vergleichsdatensatz eine zeitnahe Bildsequenzmessung vom 16.07.2007 zur Verfügung. Die Laserscannermessung erfolgte am 17.07.2007. Abbildung 6.12 (links) zeigt das Geschwindigkeitsfeld, welches aus den Laserscannerdaten abgeleitet wurde, sowie die Positionen, für die Geschwindigkeitswerte aus der Bildsequenzmessung verfügbar sind (dargestellt als schwarze Punkte). Für Letztere wurde für jeden Punkt die mittlere Geschwindigkeit über einen Zeitraum von 7 h bestimmt, welcher der Zeitbasis der Laserscannermessung entspricht. Für jeden Geschwindigkeitswert der Bildsequenzmessung wird die Differenz mit dem nächstgelegenen Geschwindigkeitswert aus dem Laserscannergeschwindigkeitsfeld gebildet. Die Verteilung dieser Differenzen wird im Diagramm in Abbildung 6.12 (rechts) dargestellt.

Auch wenn die Abweichungen zwischen beiden Datensätzen einer Normalverteilung zu unterliegen scheinen (vgl. Histogramm), wird bei Anwendung des χ^2 -Tests die Annahme einer Normalverteilung für ein Signifikanzniveau von 5 % zurückgewiesen. Es kann demzufolge nicht ausgeschlossen werden, dass noch systematische Anteile in den Differenzen enthalten sind. Ursachen dafür werden einerseits in der, durch technische Probleme des Laserscanners bedingten Unterteilung jedes Epochenscans in kleinere Teilsfans vermutet. Die Daten könnten noch Resteffekte der aufgetretenen Nullrichtungsfehler enthalten, die durch die angewandte Korrekturmethode nicht vollständig eliminiert werden konnten. Da zwischen der Aufnahme der beiden verglichenen Datensätze ein Abstand von ca. 24 h liegt und die Aufnahme nach einem größeren Kalbungereignis erfolgte, können andererseits Geschwindigkeitsänderungen des Gletschers selbst Ursache für die im Mittel um ca. 0,7 m/Tag abweichenden Geschwindigkeiten sein. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte lässt der durchgeführte Vergleich die Aussage zu, dass ca. 70 % der Werte mit einer Genauigkeit übereinstimmen, die mindestens 2,5 m/Tag beträgt. Dieser Wert wird aber hier aufgrund des sich um einen Tag unterscheidenden Aufnahmezeitpunktes der beiden verglichenen Datensätze vermutlich zu schlecht eingeschätzt.

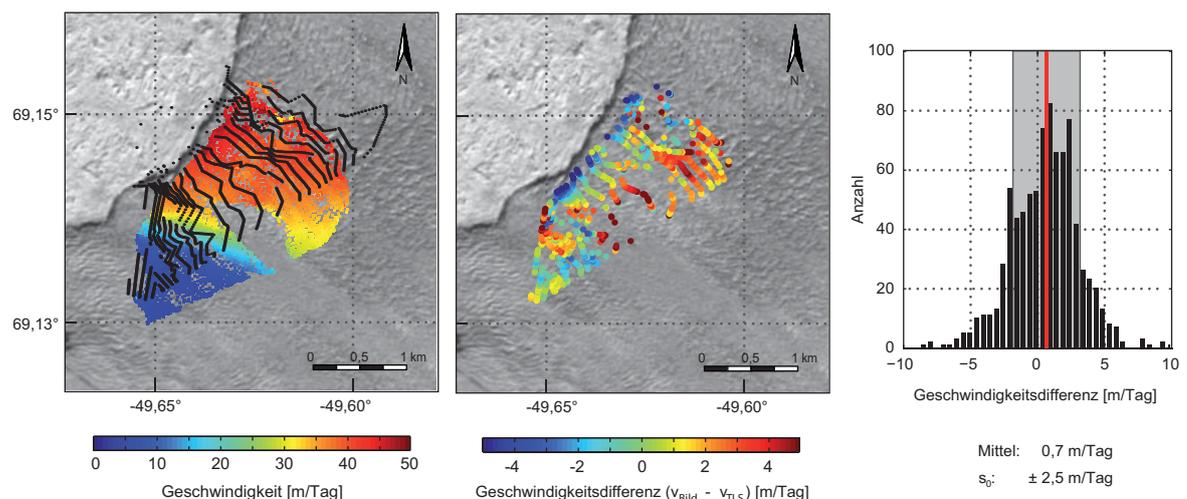


Abbildung 6.12: Vergleich der aus Laserscannermessungen abgeleiteten Geschwindigkeiten mit Ergebnissen der Bildsequenzmessung (Bsp. Jakobshavn Isbræ, Juli 2007). Die Abbildung zeigt das farbgekodierte Geschwindigkeitsfeld aus der Laserscannermessung sowie die Punkte (schwarz), für welche Vergleichswerte aus einer Bildsequenzmessung vorliegen (links). Für diese Punkte werden Geschwindigkeitsdifferenzen ermittelt (Mitte). Die Verteilung der Geschwindigkeitsdifferenzen ist im Histogramm (rechts) abgebildet. Das Mittel der Geschwindigkeitsdifferenzen wird als rote Linie dargestellt, der Bereich der einfachen Standardabweichung ist grau unterlegt.

7 Weiterverwendung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird anhand verschiedener Beispiele gezeigt, welche unterschiedlichen Erkenntnisse durch eine weiterführende Analyse und Interpretation der zeitlich hochaufgelösten Bewegungsvektorfelder abgeleitet werden können. Des Weiteren wird das Potenzial der beiden verwendeten photogrammetrischen Verfahren zur Vermessung frontnaher Gletscherbereiche diskutiert und es werden die jeweiligen Vor- und Nachteile beider Methoden gegenübergestellt.

7.1 Terrestrische Bilddaten

Nach Auswertung der Bildsequenzen liegt für die einzelnen Gletscher jeweils ein dichtes Raster an Trajektorien vor, dessen weitere Analyse die Beantwortung spezieller glaziologischer Fragestellungen ermöglicht. Die Entwicklung entsprechender Analysemethoden sowie die Interpretation der Daten wurden in Zusammenarbeit mit Projektpartnern durchgeführt. An dieser Stelle soll ein Überblick über die Ergebnisse gegeben werden, die aus den terrestrischen Bildsequenzmessungen abgeleitet werden konnten. Sie lassen sich in die folgenden vier Punkte untergliedern:

- Bestimmung aktueller frontnaher Geschwindigkeitsfelder mit hoher räumlicher Auflösung für fünf schnellfließende Gletscher in Westgrönland
- Bestimmung der Lage der Aufsetzlinie aus gezeiteninduzierten Vertikalbewegungen der Gletscherzunge [Dietrich u. a., 2007]
- Bestimmung der Migration der Aufsetzlinie des Jakobshavn Isbræ für den Zeitraum 2004 bis 2010 [Rosenau u. a., 2013]
- Bestimmung des Geschwindigkeitsverhaltens im Frontbereich des Jakobshavn Isbræ bei Großkalbungsereignissen [Rosenau u. a., 2013]

7.1.1 Frontnahe Geschwindigkeitsfelder

Aus den gemessenen Bewegungsvektorfeldern konnten anhand der Aufnahmezeitpunkte der Sequenzbilder direkt die aktuellen frontnahen Geschwindigkeitsfelder für die gemessenen Gletscher abgeleitet werden (vgl. Abbildung 7.2). Für den Jakobshavn Isbræ besteht der Sonderfall, dass hier mit zwei Wiederholungsmessungen (2007 und 2010) die Veränderungen der frontnahen Geschwindigkeiten zur ersten Messung im Jahr 2004 dokumentiert werden konnten (vgl. Abbildung 7.1).

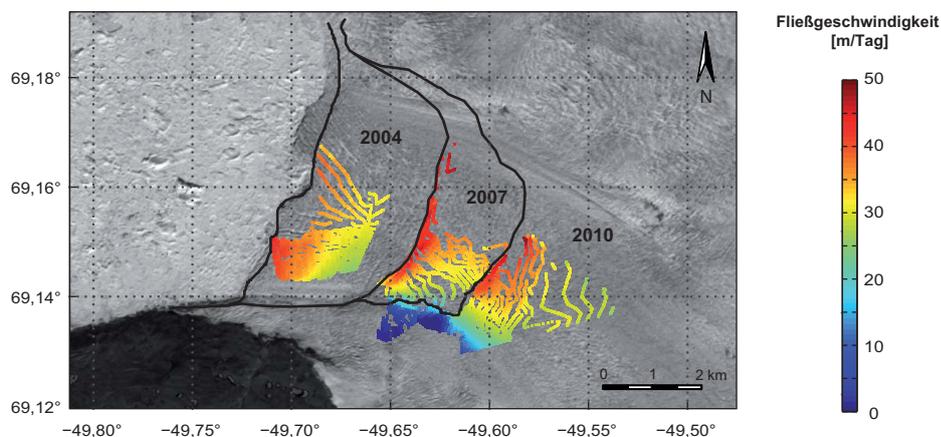


Abbildung 7.1: Geschwindigkeitsfelder aus Bildsequenzmessungen am Jakobshavn Isbræ. Die Abbildung stellt die Geschwindigkeitsfelder, die im August 2004, im Juli 2007 und im August 2010 gemessen wurden, als Überlagerung einer Landsat-Szene (bearbeitet) von 2004 dar. Die Frontlage der Gletscherzunge zu den jeweiligen Messzeitpunkten ist jeweils als schwarze Linien dargestellt. (Quelle Landsat-Szene: <http://landsat.usgs.gov/>)

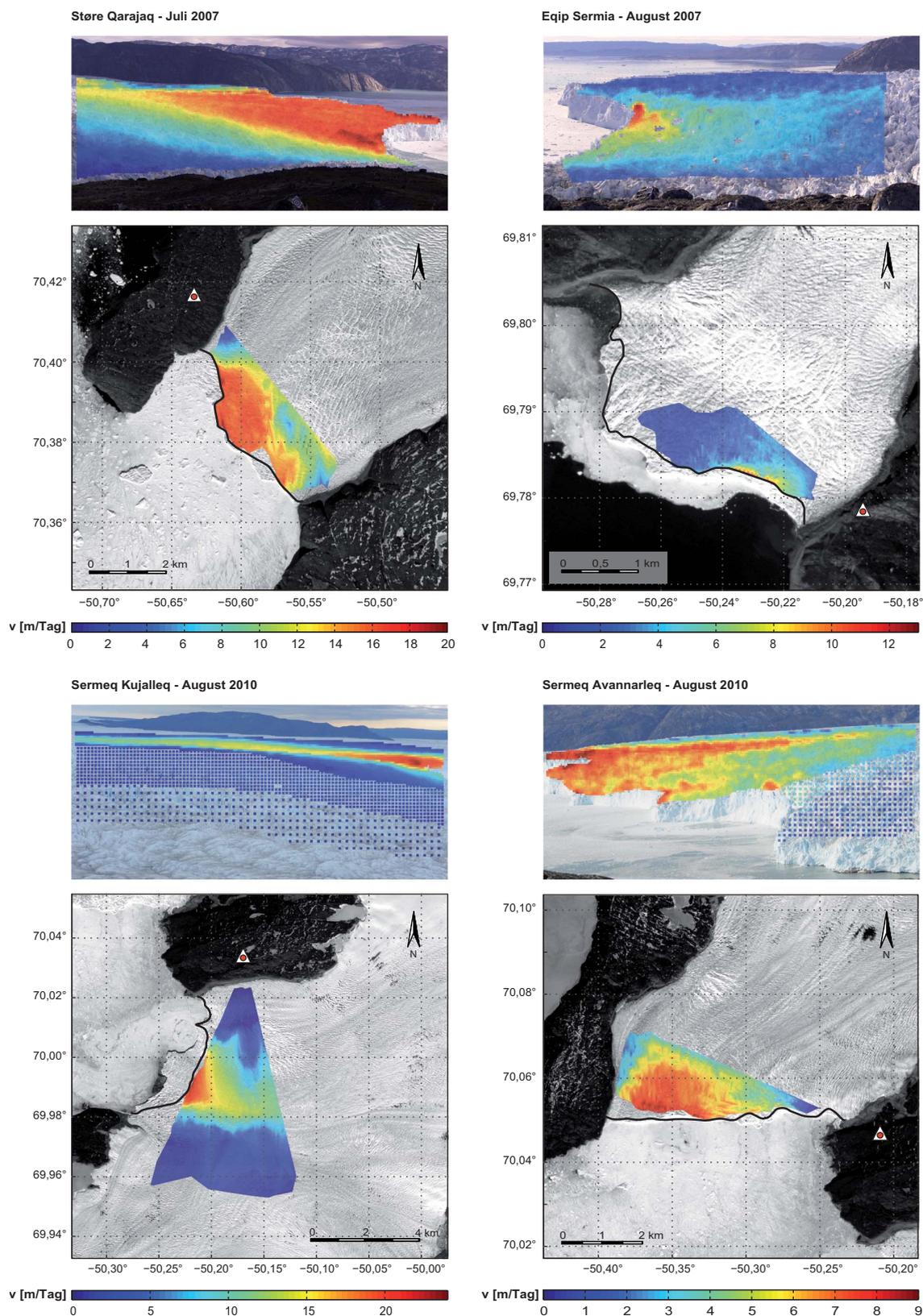


Abbildung 7.2: Geschwindigkeitsfelder aus Bildsequenzmessungen für die Gletscher Støre Qarajaq (2007), Eqip Sermia (2007), Sermeq Kujalleq (2010) und Sermeq Avannarleq (2010). Es wird das Geschwindigkeitsfeld für den entsprechenden Gletscher jeweils als Überlagerung im Messbild (oben) sowie als Projektion in ein SPOT5-Orthophoto (© Centre national d'études spatiales (France) und SPOT Imaging Services) von 2008 dargestellt (unten). Die Standorte der Sequenzkameras sind als Dreieck mit rotem Kreis und die zum Messzeitpunkt aktuellen Frontlagen als schwarze Linie markiert.

Ein direkter Vergleich diskreter Geschwindigkeitswerte mit älteren Messungen ist zeitlichen und räumlichen Problemen unterworfen (z. B. aufgrund saisonal unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten oder veränderter Frontlagen). Es können aber Entwicklungstrends für die Geschwindigkeitsänderung abgeschätzt werden. Die tendenzielle Entwicklung der Fließgeschwindigkeiten der fünf gemessenen Gletscher wird in Tabelle 10 dargestellt. Die Messungen zeigen ein unterschiedliches Verhalten für die gemessenen Gletscher im Bereich der Diskobucht in Westgrönland. Während sich die Geschwindigkeit am Jakobshavn Isbræ seit den 1980er Jahren mehr als verdoppelt hat, sind an anderen Gletschern wie dem Støre Qarajaq in dieser Hinsicht kaum Veränderungen festzustellen.

Tabelle 10: Vergleich gemessener maximaler Fließgeschwindigkeiten aus dieser Arbeit mit Geschwindigkeitsmessungen aus anderen Veröffentlichungen.

	Jakobshavn Isbræ			Støre Qarajaq	Eqip Sermia	Sermeq Avannarleq	Sermeq Kujalleq
Messzeitpunkt	Aug. 2004	Juli 2007	Aug. 2010	Juli 2007	Aug. 2007	Aug. 2010	Aug. 2010
Max. Frontgeschwindigkeit	42 m/Tag	46 m/Tag	47 m/Tag	20 m/Tag	9 m/Tag	8 m/Tag	23 m/Tag
Geschwindigkeitsänderung (Zeitraum)	Zunahme 1998–2010			Keine 1999–2010	Zunahme 2000–2007	Zunahme 2000–2010	Keine 2004–2010
Mit Bezug auf folgende Veröffentlichungen	[Joughin u. a., 2008b]			[Howat & Eddy, 2011]	[Rignot & Kanagaratnam, 2006]	[Joughin u. a., 2010]	[Joughin u. a., 2010]

7.1.2 Gezeiteneinfluss und Freefloatberechnung

Die vertikale Bewegungskomponente der Trajektorien gibt Aufschluss über gezeiteninduzierte Bewegungen des frontnahen Bereichs der Gletscherzunge. Abbildung 7.3 (links) zeigt die vertikale Bewegungskomponente einer einzelnen Trajektorie im Vergleich mit Werten einer Druckpegelmessung. Unter Verwendung von Gezeitenmodellen oder Pegelmessungen als Referenzkurve werden für die gemessenen Trajektorien verschiedene Parameter, wie Maßstabsfaktoren, Phasenverschiebung und Neigung, geschätzt. Dies erfolgt durch Minimierung der Differenzen zwischen den Translationen der Trajektorien in y -Richtung und den Referenzwerten nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die ermittelten Parameter charakterisieren die Unterschiede der Bewegung der Gletscheroberfläche im Vergleich zur Gezeitenkurve. Speziell der Maßstabsfaktor in y -Richtung, der als Dämpfungsfaktor der Amplitude zu interpretieren ist, kann als Indikator zur Detektion schwimmender Gletscherbereiche genutzt werden (Abbildung 7.3, rechts) und somit auch zur Bestimmung der aktuellen Position der Aufsetzlinie des Gletschers dienen.

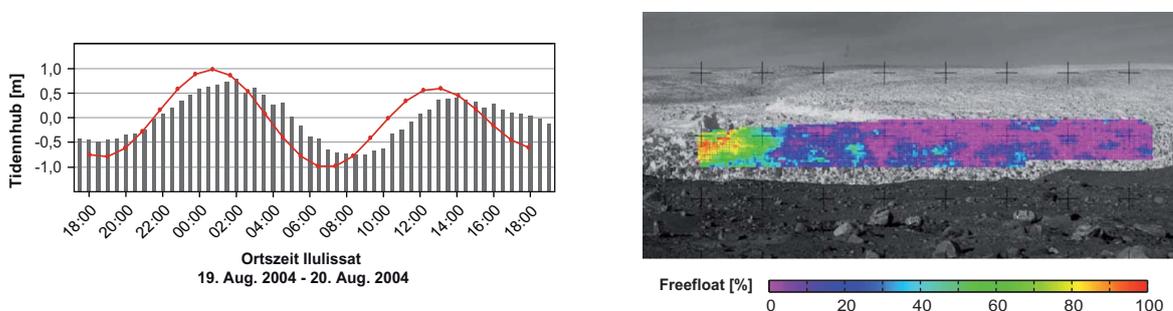


Abbildung 7.3: Einfluss der Gezeiten auf die Gletscherbewegung (Bsp. Jakobshavn Isbræ, August 2004). Im Diagramm (links) wird exemplarisch die gemessene Vertikalbewegung eines frontnahen Gletscherpunktes (graue Balken) im Vergleich zur Referenzgezeitenkurve aus Pegelmessungen in Ilulissat (rot) dargestellt. Aus Vergleichen mit Referenzwerten für die Gezeiten kann flächenhaft der prozentuale Anteil der vertikalen Gletscherbewegung am Tidennhub (Freefloat) abgeleitet und so der schwimmende Bereich der Gletscherzunge bestimmt werden. Die als Freefloat bezeichneten Werte sind farbkodiert, dem Messbild überlagert dargestellt (rechts, [Dietrich u. a., 2007]).

Die ausführliche Vorgehensweise zur Berechnung des prozentualen Anteils der vertikalen Gletscherbewegung am Tidenhub (Freefloat) wird in [Dietrich u. a., 2007] erläutert. Eine schwimmende Gletscherzunge konnte auf diese Weise lediglich am Jakobshavn Isbræ nachgewiesen werden. Für alle weiteren beobachteten Gletscher waren keine gezeiteninduzierten Bewegungen detektierbar.

7.1.3 Migration der Aufsetzlinie

Die Mehrfachmessungen am Jakobshavn Isbræ in den Jahren 2004, 2007 und 2010 ermöglichten die Dokumentation der Veränderung der Aufsetzlinie des Gletschers innerhalb dieses Zeitraumes. Während 2004 noch eine schwimmende Gletscherzunge von bis zu 0,6 km hinter der Gletscherfront gemessen wurde, hatte sich die Gletscherfront im Jahr 2007 schon hinter die 2004 bestimmte Aufsetzlinie zurückgezogen. In den Messungen von 2007 konnte kein Gezeiteinfluss mehr detektiert werden.

Mit dem weiteren Rückzug des Jakobshavn Isbræ bis zum Jahr 2010 gelangte die Gletscherfront in einen tieferen Bereich des Gletschertroges, wodurch wieder ein kleiner Teil der Gletscherzunge aufzuschwimmen begann. Die aus den Messungen von 2010 berechnete Position der Aufsetzlinie ergab einen Rückzug in östlicher Richtung von ca. 3,5 km gegenüber dem Jahr 2004 (vgl. Abbildung 7.4). Ihre Position befand sich zudem 370 m tiefer als die Position der Aufsetzlinie von 2004. Eine detaillierte Beschreibung zur Analyse und Interpretation findet sich in [Rosenau u. a., 2013].

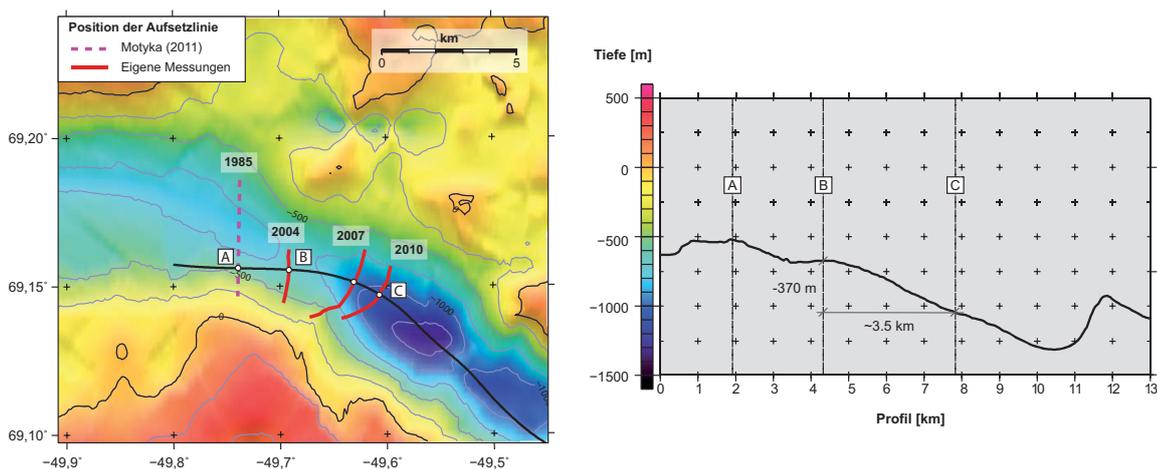


Abbildung 7.4: Migration der Aufsetzlinie am Jakobshavn Isbrae [nach Rosenau u. a., 2013]. Die Abbildung zeigt links die abgeleiteten Aufsetzlinien (rot) aus den Sequenzdaten der Jahre 2004, 2007 und 2010 sowie eine von [Motyka u. a., 2011] approximierte Position der Aufsetzlinie für 1985 (Hintergrund: Subglazialtopografie aus [Plummer u. a., 2008]). Die zentrale Fließlinie ist als schwarze Linie abgebildet. Das Profil der Subglazialtopografie entlang dieser Linie wird in u.a. der rechten Abbildung dargestellt.

7.1.4 Bewegungsverhalten bei Kalbungsereignissen

Die Aufnahme terrestrischer Bildsequenzen ermöglicht die Untersuchung der Veränderung des Geschwindigkeitsfeldes während Kalbungsereignissen. Diese finden einerseits innerhalb eines kurzen Zeitrahmens statt, wodurch eine hohe zeitliche Auflösung des Messverfahrens erforderlich ist, und andererseits ist der Beginn einer Kalbung kaum präzisierbar, was eine autonome Messung der Gletscherfront über einen längeren Zeitraum notwendig macht. Mittels einer mehrwöchigen Bildsequenz im Mai/Juni 2010 konnte ein Großkalbungsereignis am Jakobshavn Isbræ mit einer zeitlichen Auflösung von 20 min dokumentiert und untersucht werden.

Die ausgewerteten Geschwindigkeitsfelder zeigten während des Abbruchs einen Anstieg der Frontgeschwindigkeiten auf maximale Werte von 70 m/Tag innerhalb eines Zeitraumes von wenigen Stunden. Die Fließgeschwindigkeit verdoppelte sich damit im Bereich der neuen Gletscherfront. Der Anstieg der Fließge-

schwindigkeit nahm mit größer werdender Entfernung zur Gletscherfront ab, es konnten aber noch bis zu 1 km stromaufwärts Auswirkungen des Kalbungsereignisses auf das Fließverhalten des Gletschers festgestellt werden.

Dem schnellen Anstieg während der Kalbung folgte ein langsames Abklingen der Fließgeschwindigkeiten über einen Zeitraum von 4–5 Tagen. In Abbildung 7.5 wird für drei Punkte mit unterschiedlichem Abstand zur Gletscherfront die Veränderung der jeweiligen Geschwindigkeit vor und nach einer Kalbung dargestellt. Die entsprechenden Analysemöglichkeiten und weitere Ergebnisse in Bezug auf die Untersuchung von Kalbungsereignissen sind in [Rosenau u. a., 2013] ausführlich beschrieben.

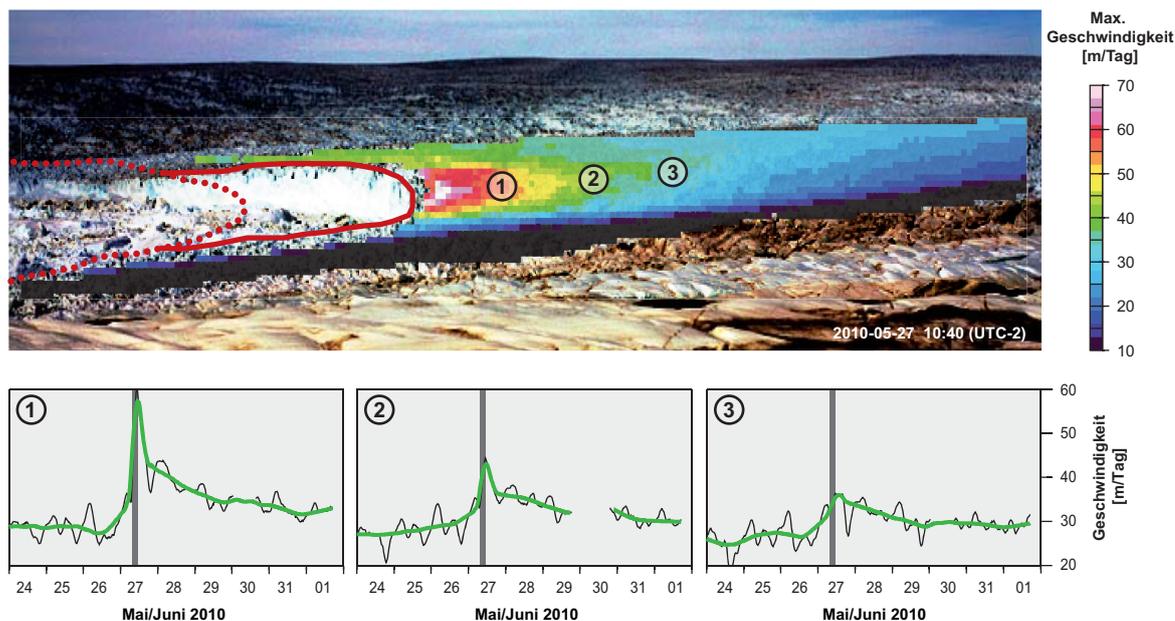


Abbildung 7.5: Fließgeschwindigkeiten während eines Kalbungsereignisses am Jakobshavn Isbrae [Rosenau u. a., 2013]. Die Abbildung zeigt die maximalen Geschwindigkeiten, die während der Kalbung auftraten, als farbkodierte Überlagerung eines Messbildes (oben). Die Position der Gletscherfront nach dem Kalbungsereignis ist als rote Linie abgebildet, ihre Position vor der Kalbung als gepunktete rote Linie. Für die im Bild angegebenen Positionen 1–3 ist unten jeweils die Veränderung der Geschwindigkeit während des Kalbungsereignisses dargestellt. Die vertikale graue Linie markiert den Zeitpunkt der Hauptkalbung. Die schwarze Kurve repräsentiert die ungefilterten Messwerte, die grüne Kurve entspricht der gefilterten Messreihe.

7.2 Terrestrische Laserscannerdaten

Werden für die Messung im Frontbereich grönländischer Ausflussgletscher terrestrische Laserscanner eingesetzt, so ist aufgrund der Dimensionen dieser Gletscher ein Gerät erforderlich, welches eine Reichweite von mehreren Kilometern besitzt. Mit dem Riegl LPM-321 kam 2007 der erste Laserscanner auf den Markt, mit dem diese Messungen möglich wurden. Bei dem erstmaligen Einsatz eines terrestrischen Laserscanners für die Geschwindigkeitsbestimmung eines arktischen Gletschers konnten zwei wesentliche Ergebnisse abgeleitet werden:

- Dokumentation von Fronthöhen und Gletscherstrukturen mittels eines hochaufgelösten digitalen Oberflächenmodells
- Bestimmung eines 3D-Geschwindigkeitsfeldes mit hoher räumlicher Auflösung.

7.2.1 Digitales Geländemodell

Ein einzelner Laserscan liefert zunächst ein digitales Geländemodell der Gletscherfront und des frontnahen Gletscherbereichs in hoher Auflösung. Die am Laserscanner integrierte Digitalkamera liefert Bildinformationen, mit welcher die Punktwolke oder der vermaschte Scan zur besseren Visualisierung texturiert werden kann. Anhand des DGM können beliebige Streckenmaße zwischen einzelnen Punkten abgegriffen oder Volumen berechnet werden. Als wesentliche Informationen lassen sich somit z. B. die Höhe der Gletscherfront ableiten sowie Struktur, Dimension und Ausrichtung von Gletscherspalten dreidimensional dokumentieren und messen. Für den Messzeitpunkt am 15.07.2007 wurde die Fronthöhe am Jakobshavn Isbræ an ihrer höchsten Stelle mit 135 m bestimmt.

Darüber hinaus kann die Laserscannerpunktwolke für zeitnah aufgenommene Bildsequenzen zur Georeferenzierung der Daten und zur Skalierung von im Bild gemessenen Größen genutzt werden.

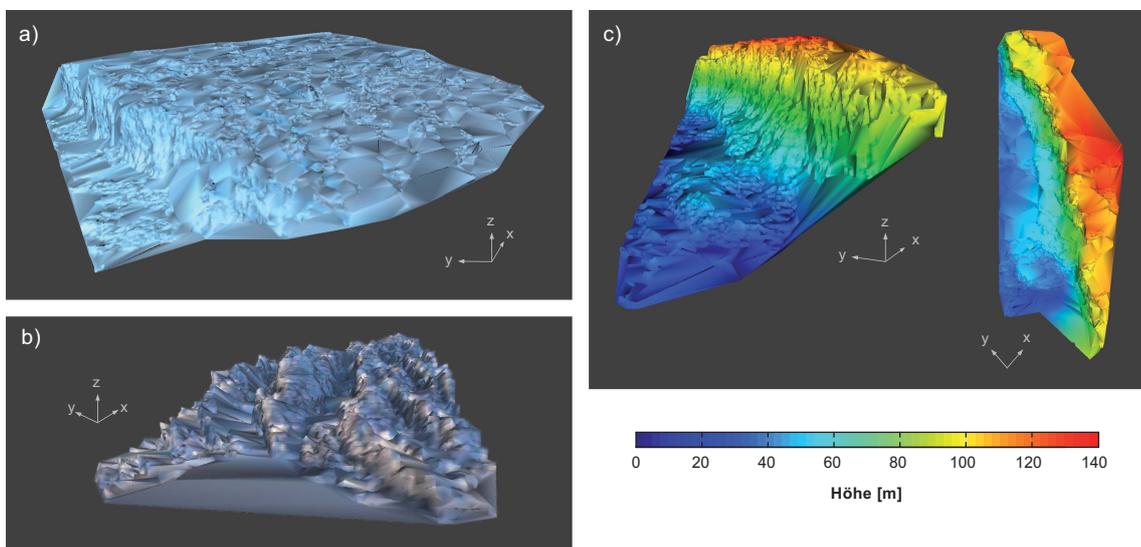


Abbildung 7.6: Digitale Geländemodelle aus terrestrischen Laserscannerdaten (Bsp. Jakobshavn Isbræ, Juli 2007).

- a) Texturiertes Oberflächenmodell im Bereich der Gletscherfront (Scanfläche ca. 0,8 km², 29.000 Punkte)
- b) Texturierter Detailscan (Scanfläche ca. 16.000 m², 13.000 Punkte)
- c) Der Höhe nach farbkodierter Scan der Gletscherfront aus Blickrichtung des Scanners (links) und als Horizontalprojektion (rechts).

7.2.2 Geschwindigkeitsfeld

Aus zwei Laserscanepochen, aufgenommen im Sommer 2007, konnte für den Frontbereich des Jakobshavn Isbræ ein räumlich hochaufgelöstes Geschwindigkeitsfeld abgeleitet werden (Abbildung 7.7).

Die ermittelten Geschwindigkeiten stimmen gut mit den Ergebnissen der Bilddatenauswertung überein. Mittels terrestrischem Laserscanning kann aufgrund des sequenziellen Messprinzips nicht die hohe zeitliche Auflösung für Geschwindigkeitsfelder erreicht werden, die mit Bildsequenzmessungen möglich ist. Doch können aus den Laserscannerdaten nicht nur die Geschwindigkeitsbeträge, sondern auch die 3D-Bewegungsrichtung direkt abgeleitet werden. Bei der Bildsequenzmessung dagegen ist die Bewegungsrichtung als Modellannahme im Auswerteprozess mit vorzugeben.

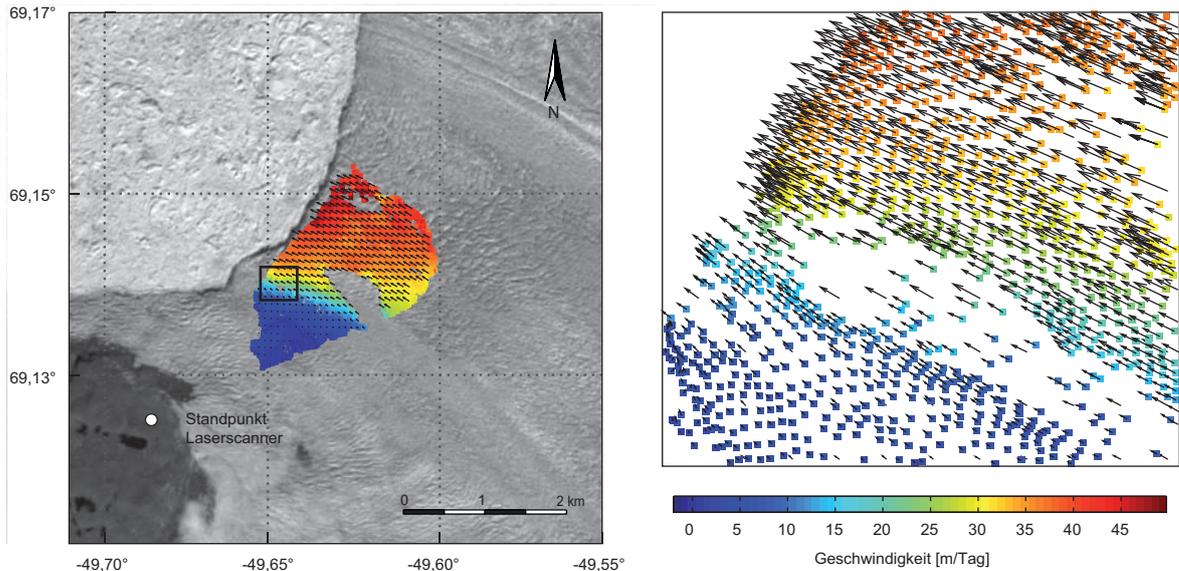


Abbildung 7.7: Geschwindigkeitsfeld aus Laserscannermessungen am Jakobshavn Isbræ. Die Abbildung stellt das Geschwindigkeitsfeld, welches im Juli 2007 gemessen wurde, als farbkodierte Überlagerung einer Landsatszene (bearbeitet) dar (links). Der schwarz markierte Ausschnitt ist rechts vergrößert abgebildet. Die horizontalen Bewegungsvektoren der einzelnen Messpunkte sind mit abgebildet. (Quelle Landsatszene: <http://landsat.usgs.gov/>)

7.3 Potenzial der Messverfahren

Weitere Ergebnisse der Messkampagnen sind neben den gewonnenen Messwerten der Gewinn von Erkenntnissen zum Einsatz terrestrischer photogrammetrischer Verfahren zur Vermessung schnellfließender arktischer Gletscher sowie die entwickelten, an diese Messverfahren angepassten, automatisierten Auswertemethoden und Arbeitsabläufe.

Terrestrische photogrammetrische Verfahren erlauben eine stichprobenartige Untersuchung des Frontbereichs von Gletschern. Die Messgebiete besitzen gegenüber flugzeug- oder satellitengestützten Verfahren nur eine vergleichsweise kleine räumliche Ausdehnung. Der wesentliche Vorteil liegt aber in der sehr hohen zeitlichen Auflösung der Messdaten. Terrestrische Messungen bilden somit eine gute Ergänzung zu flugzeug- oder satellitengestützten Verfahren, um speziell bei schnellfließenden Gletschern den frontnahen Bereich messtechnisch erfassen zu können. Die Tatsache, dass terrestrische Verfahren zudem die Bestimmung von Vertikalbewegungen der Gletscherzunge ermöglichen, erlaubt darüber hinaus die Beantwortung spezieller glaziologischer Fragestellungen. Im Bereich der terrestrischen Messmethoden besitzen die photogrammetrischen Verfahren wiederum den Vorteil einer hohen Messpunktdichte bei hoher räumlicher Auflösung sowie den einer möglichen autonomen Arbeitsweise der Messgeräte.

Die beiden angewandten Verfahren (Bildsequenzmessung und multi-temporale Laserscannermessung) eignen sich aufgrund ihrer verschiedenen Messprinzipien unterschiedlich gut für bestimmte Aufgaben und weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. Die wichtigsten sind in Tabelle 11 gegenüber gestellt.

Der maximale Messbereich, der mit terrestrischem Laserscanning abgedeckt werden kann, liegt gegenwärtig bei einem Entfernungsbereich von ca. 6 km. Bei der Messung auf Gletschereis konnten bis zu einer maximalen Entfernung von 4 km Messpunkte aufgenommen werden. Die Aufnahme von Bilddaten ermöglicht, abhängig von Objektivbrennweite und Sensorauflösung, Messungen in größeren Distanzen. Im Rahmen der in der Arbeit durchgeführten Bildsequenzanalyse wurden Messwerte bis zu einem Entfernungsbereich von ca. 8 km erhoben.

Tabelle 11: Monoskopische Bildsequenzanalyse vs. Analyse multi-temporalen Laserscannerdaten. Die Tabelle gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der einzelnen Messverfahren. Die Vorteile sind jeweils grau unterlegt.

Monoskopische Bildsequenzanalyse	Analyse multi-temporaler Laserscannerdaten
+ Momentaufnahme → geeignet für die Bestimmung kurzzeitlicher Geschwindigkeitsvariationen	- Sequenzielle Messmethode → eingeschränkte zeitliche Auflösung
+ Geringe Kosten, hohe Flexibilität	- Höhere Kosten, höherer logistischer Aufwand
+ Autonom einsetzbar, auch über lange Zeiträume	- Stärker an Operator gebunden, begrenzte Einsatzdauer
- Originär nur 2D-Information ableitbar → zur Überführung in 3D-Informationen zusätzliche Messungen notwendig	+ Direkte und zuverlässige Messung von 3D-Koordinaten
- Beeinflusst von Schatteneffekten und Lichtverhältnissen	+ Unabhängig von Schatten- und Lichtverhältnissen

Die zeitliche Auflösung, mit der Wiederholungsmessungen mit einem terrestrischen Laserscanner durchgeführt werden können, ist gerätespezifisch sehr unterschiedlich. Durch die sequentielle Aufnahme der Messpunkte ist das realisierbare Zeitintervall maßgeblich von der Messrate abhängig, mit welcher der Laserscanner arbeitet. Darüber hinaus sind das zu messende Gesichtsfeld und die gewählte Scanauflösung Faktoren, die die zeitliche Auflösung limitieren. Mit dem in der vorliegenden Arbeit genutzten Riegl LPM-321 betrug das geringstmögliche Zeitintervall für Wiederholungsmessungen, bezogen auf einen horizontalen Scanbereich von 30° (vergleichbar mit dem Gesichtsfeld der parallel eingesetzten Sequenzkamera) und eine Scanauflösung von $0,027^\circ$ (maximal mögliche Scanauflösung: $0,018^\circ$), etwa 7 h. Die zeitliche Auflösung der Bildsequenzen dagegen ist lediglich limitiert durch die notwendige Belichtungszeit für eine Aufnahme und die Dauer der Bildspeicherung, wodurch theoretisch Bildmessintervalle im Sub-Sekundenbereich möglich wären. Je nach Messaufgabe, Gesamtmessdauer und verfügbarem Speichervermögen waren bei den praktischen Messungen Bildmessintervalle von 10–30 min sinnvoll und realisierbar. Die Bildsequenzanalyse besitzt damit das größere Potenzial für die Bestimmung kurzzeitlicher Geschwindigkeitsvariationen einer Gletscherzunge. Somit konnten als Ergebnis Gezeiteneffekte untersucht, die Lage der Aufsetzlinie bestimmt und das Geschwindigkeitsverhalten bei Kalbungseignissen ermittelt werden.

Hinsichtlich der Länge des Messzeitraumes, innerhalb dessen die Verfahren eingesetzt werden können, eignet sich die Bildsequenzanalyse speziell für Langzeitmessungen. Bei entsprechender Stromversorgung und Speicherkapazität sowie wetterfester Installation der Kamera kann eine beliebig lange autonome Datenakquise realisiert werden. Damit ist die Methode z. B. auch für die Untersuchung saisonaler Veränderungen im Bewegungsverhalten eines Gletschers geeignet. Terrestrische Laserscanner sind in dieser Hinsicht weniger flexibel einsetzbar, da ihr Einsatz stärker an einen Operator gebunden ist als die Aufnahme von Bildsequenzen. Sollen mittels eines terrestrischen Laserscanners Veränderungsmessungen über längere Zeiträume realisiert werden, bieten sich eher Wiederholungsmessungen zu diskreten Zeitpunkten an als eine permanente Datenaufnahme. Dadurch ist der Einsatz eines Laserscanners allerdings auch mit einem größeren Logistikaufwand und höheren Kosten verbunden.

Der Vorteil des terrestrischen Laserscannings gegenüber der Bildsequenzanalyse liegt in der direkten und zuverlässigen Gewinnung von 3D-Punkten und in der Unempfindlichkeit des Verfahrens gegenüber Schatteneffekten und sich ändernden Beleuchtungsverhältnissen.

Beide Messverfahren sind geeignet, um unzugängliche Gebiete zu vermessen. Die Auswertemethoden verlangen keine signalisierten Punkte am Messobjekt, sondern verwenden die natürliche Textur bzw. Oberflächenstruktur des Gletschers zur Identifikation der Messpunkte.

Aufgrund ihrer komplementären Eigenschaften ergeben sich beim gleichzeitigen Einsatz beider Messmethoden Synergieeffekte. So kann das genaue und hochaufgelöste Laserscanner-DGM zur Skalierung von im Bild gemessenen Trajektorien genutzt und auf diese Weise mit der hohen zeitlichen Auflösung der Bildsequenzmessungen kombiniert werden.

7.4 Weitere Anwendungsbereiche der Methodik

Die Verfahren der monoskopischen Bildsequenzanalyse und der Analyse multi-temporaler Laserscannerdaten sind prinzipiell für verschiedene Skalenbereiche und für unterschiedliche zeitliche Auflösungen adaptierbar. In der vorliegenden Arbeit wurden die jeweiligen Verfahren für großskalige Messaufgaben im Außenbereich optimiert und speziell auf die schnellfließenden Ausflussgletscher Grönlands angewandt. Abschließend sollen im Folgenden nun anhand von ausgewählten Beispielen mögliche andere Einsatzbereiche beleuchtet werden, für die eine Anwendung dieser Methoden denkbar wäre. Dabei soll kurz diskutiert werden, worin sich die Anforderungen an die Messmethodik unterscheiden und welche Anpassungen notwendig wären, um die in der Arbeit verwendeten Verfahren auch für andere Aufgabenstellungen nutzbar zu machen.

7.4.1 Anwendungsmöglichkeiten der monoskopischen Bildsequenzanalyse

In Bezug auf die Untersuchung besonders dynamischer Prozesse bzw. auf Untersuchungen, die ein über einen längeren Zeitraum autonom arbeitendes Messgerät erfordern, sind Bildsequenzmessungen der Aufnahme von Laserscannerdaten überlegen. Dies beinhaltet Messaufgaben in gefährlichen Umgebungen, Messaufgaben, bei denen nicht vorhersagbare Ereignisse untersucht werden sollen, und Messaufgaben, die eine hohe zeitliche Auflösung der Messwerte erfordern. Unter diesen Gesichtspunkten werden im Folgenden Anwendungen beschrieben, für die die monoskopische Bildsequenzanalyse ein geeignetes Werkzeug darstellt.

Die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methoden zur monoskopischen Bildsequenzanalyse wurde bislang nur am Beispiel arktischer Ausflussgletscher beschrieben. Die Verfahren konnten aber auch in einem verwandten Forschungsvorhaben am Gletscher San Rafael im Nördlichen Patagonischen Eisfeld angewandt werden. Die entsprechenden Resultate werden in [Maas u. a., 2013] vorgestellt. Die Aufgabenstellung zur Untersuchung des San Rafael unterscheidet sich nicht wesentlich von den Arbeiten, die in Westgrönland durchgeführt wurden. Auch hier handelt es sich um einen schnellfließenden, ins Meer mündenden Ausflussgletscher, dessen maximale Geschwindigkeit im März 2009 mit 16 m/Tag bestimmt wurde (vgl. Abbildung 7.8). Gezeiteninduzierte Vertikalbewegungen konnten hier nicht nachgewiesen werden, so dass von einer gegründeten Gletscherzunge des San Rafael zum Zeitpunkt der Messung ausgegangen werden kann.

Monokulare Bildsequenzmessungen an Ausflussgletschern in Patagonien unterscheiden sich in praktischer Hinsicht hauptsächlich durch die folgenden zwei Aspekte von den Messungen an arktischen Ausflussglet-

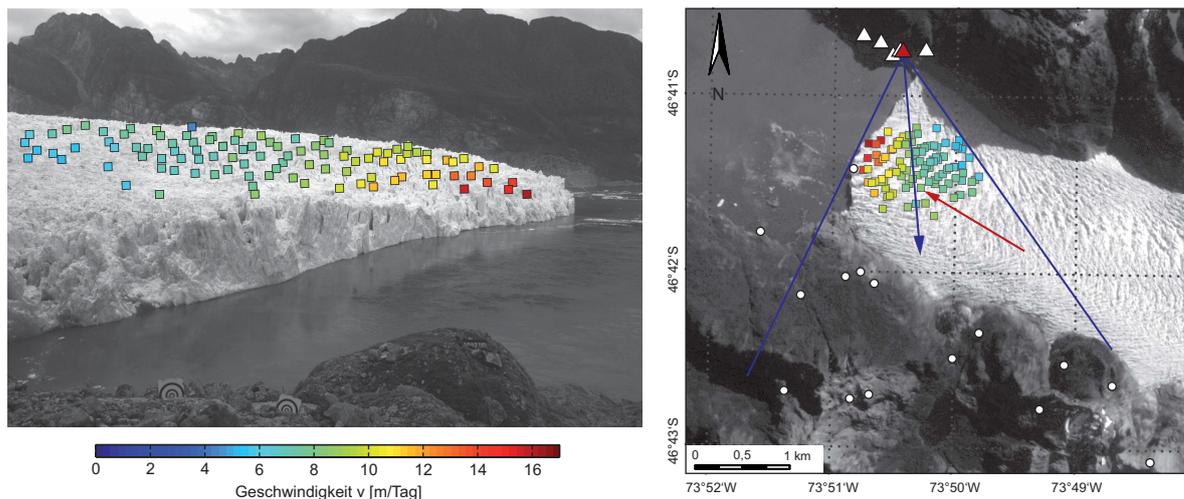


Abbildung 7.8: Oberflächengeschwindigkeiten des Gletschers San Rafael (März 2009). Die Abbildung zeigt ein Sequenzbild sowie die farb-kodierten Geschwindigkeiten für ausgewählte Gletscherpunkte (links). Die Positionen der Kamerastandpunkte des Bildverbandes (weiße Dreiecke), die Position der Sequenzkamera (rotes Dreieck), das Blickfeld der Sequenzkamera (blaue Linien) und die Hauptbewegungsrichtung des Gletschers (roter Vektor) werden als Projektion in ein SPOT5-Orthophoto dargestellt (rechts). Weiße Punkte kennzeichnen Höhenpasspunkte. Die ermittelten Geschwindigkeiten für die entsprechenden Punkte auf der Gletscheroberfläche werden farb-kodiert dargestellt. Orthophoto: © Centre national d'études spatiales (France) und SPOT Imaging Services.

schern: Ein Vorteil ist hier zunächst das schroffere Relief der die Gletscher umgebenden Bergwelt. Dies bietet einen größeren Spielraum bei der Definition von Höhenpasspunkten und Kamerastandorten. Am San Rafael konnte deshalb auf Tachymetermessungen verzichtet werden. Die Georeferenzierung konnte hier auf Basis von GPS-Messungen der Kamerastandorte und auf Basis von Berggipfeln und Uferlinienpunkten, die als Höhenpasspunkte genutzt wurden, erfolgen. Ein weiterer wichtiger Unterschied besteht darin, dass keine 24-h-Messungen durchgeführt werden können, wie dies während des Polartages für die grönländischen Gletscher möglich ist. Geschwindigkeitsvektorfelder für Ausflussgletscher in Patagonien können somit lediglich als Halbtagesmittel bzw. durch das Tracking in Bildern mit einem Zeitintervall von 24 h erfolgen. Auch die Untersuchung von Gezeiteinflüssen auf das Bewegungsverhalten einer Gletscherzunge ist hier aufgrund der nur halbtägig verfügbaren Messwerte erschwert.

Gletscherbewegungen sind nur eine von mehreren Arten natürlicher Massenbewegungen, für deren Untersuchung sich die monoskopische Bildsequenzanalyse anbietet. Ein Beispiel für eine weitere Art von Massenbewegung, die eine ähnliche räumliche Dimension besitzt, sind Lavaströme. Um deren Bewegungsverhalten zu untersuchen, sind ebenfalls Aussagen über horizontale und vertikale Bewegungskomponenten interessant. Aufgrund der Gefahrensituation bei einer Messung an Lavaströmen ist der Einsatz eines autonomen Messsystems von großem Vorteil. [James u. a., 2007] stellen bildbasierte Messungen vor, mit deren Hilfe ein aktiver Lavastrom vermessen wurde. Zum einen führen die Autoren Volumenbestimmungen auf der Basis von wiederholt aufgenommenen Bildverbänden durch, aus denen für die einzelnen Aufnahmezeitpunkte jeweils ein 3D-Modell der Lava erstellt wurde. Zum anderen erfolgen Geschwindigkeitsanalysen anhand von Bildsequenzen, die mit einer Thermalkamera aufgenommen wurden (vgl. Abbildung 7.9).

Trotz der geringeren Auflösung der Thermalkameras gegenüber Kameras mit Sensoren für Bereiche des sichtbaren Lichts bieten sich Erstere für die Untersuchung von Lavaströmen an. Die erzeugten Wärmebilder liefern gegenüber RGB-Bildern, in denen die Lavoberfläche gegebenenfalls nur mit kontrastarmer Textur abgebildet wird, differenziertere Informationen. Ein weiterer Unterschied zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Gletschern ist der, dass hier höhere und zudem stärker fluktuierende Geschwindigkeiten beobachtet werden, die eine zeitliche Auflösung einer Bildsequenz im Bereich von Sekunden bis zu wenigen Minuten erfordern können. Im hier vorgestellten Beispiel wurden für einen Lavastrom am Ätna Geschwindigkeiten von 1,6 m/min gemessen.

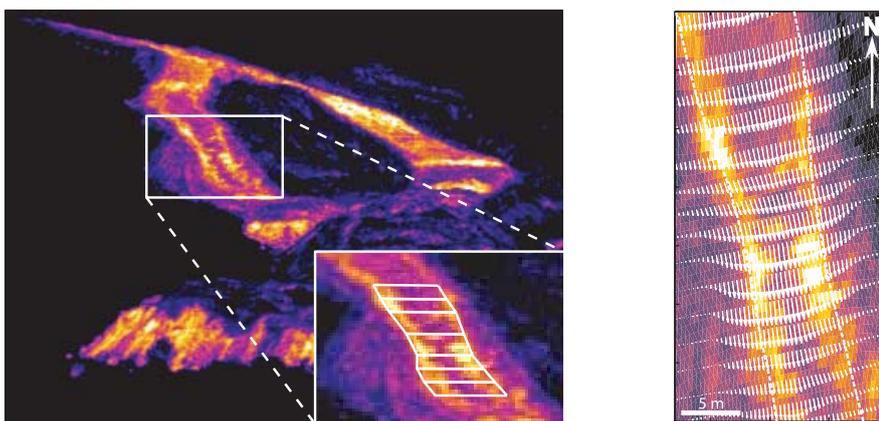


Abbildung 7.9: Lavageschwindigkeiten (aus [James u. a., 2007], bearbeitet). Die Abbildung zeigt links ein Bild der Sequenz sowie den Ausschnitt, für den in der rechten Abbildung die Ergebnisse der Bildzuordnung mittels Optical Flow dargestellt sind. Die gemessenen Translationsvektoren (weiß) für definierte Querprofile des Lavakanals werden hier einem aus dem Sequenzbild-ausschnitt generierten Orthophoto überlagert abgebildet.

Neben der Untersuchung von Massenbewegungen können Bildsequenzanalysen z. B. auch zur Detektion und Überwachung von Wasserstandshöhen genutzt werden. Ein Beispiel dafür ist die in [Mulrow u. a., 2011] beschriebene Methode zur Untersuchung von sich spontan entleerenden Gletscherrandseen (vgl. Abbildung

7.10). Für die hier zugrundeliegenden Fragestellungen ist vor allem die Bestimmung vertikaler Bewegungskomponenten von Bedeutung. Die Herausforderung der Bildmessung besteht dabei insbesondere in der automatischen Verfolgung der Wasserlinie am Ufer des Sees. Im Unterschied zum Tracking von Gletscheroberflächen spielen hier weniger sich verändernde Schatten eine Rolle, als vielmehr extreme Veränderungen der Wasseroberfläche durch Spiegelung, Wellen und Eis. Bezüglich der Skalierung der Bildmessung ist ein DGM des Seebodens notwendig. Da die Entleerungen spontan und unvorhersagbar erfolgen, ist die Aufnahme eines Bildverbandes des leeren Gletscherrandsees schwierig. Es bietet sich deshalb hier die Aufnahme stereoskopischer Bildsequenzen an. Soll die Auswertung aus Gründen der Automatisierbarkeit dennoch monoskopisch erfolgen, so liefert die zweite Kamera zumindest einen Stereopartner zum Sequenzbild bei vollständiger Entleerung des Sees, mit dem die notwendigen 3D-Informationen zur Skalierung der Bildmessungen abgeleitet werden können.

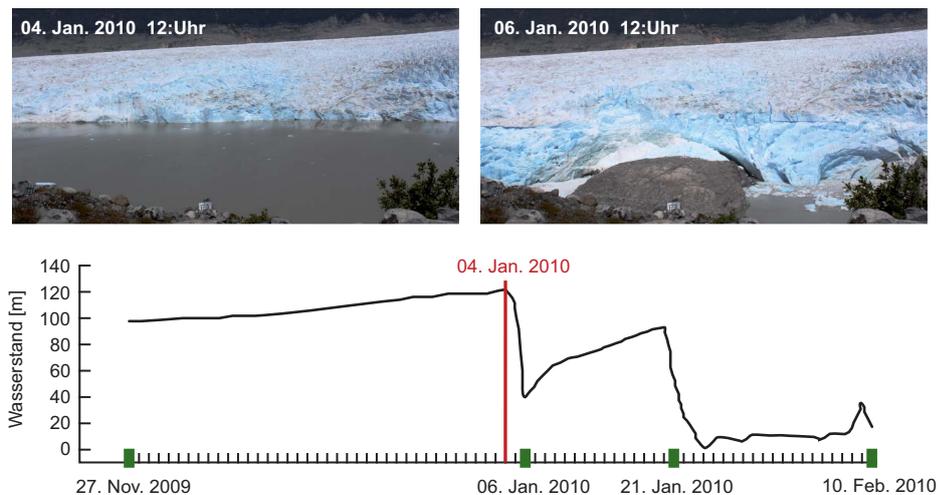


Abbildung 7.10: Wasserstandsvariationen eines Gletscherrandsees (aus [Mulsow u. a., 2011], bearbeitet). Die Abbildung zeigt zwei Sequenzbilder vor und nach der Entleerung des Lago Chachet II im Januar 2010 (oben). Die untere Grafik zeigt die dabei gemessene Wasserspiegelabsenkung während eines Zeitraumes von 17 Tagen, innerhalb dessen zwei Entleerungsereignisse stattfanden.

Da bislang der Einsatz der monoskopischen Bildsequenzanalyse nur zur Bestimmung des Bewegungsverhaltens natürlicher Messobjekte betrachtet wurde, soll nun noch ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Bauwerksüberwachung vorgestellt werden. So wurde z. B. im Rahmen der Diplomarbeit von [Protze, 2007] die Nutzung von Bildsequenzmessungen zur Bestimmung von Auflastdeformationen an Brücken untersucht. Die Zielstellung liegt hier in der Bestimmung von Vertikalbewegungen statisch relevanter Punkte eines Bauwerks und unterscheidet sich darin maßgeblich von der flächenhaften Bestimmung von 3D-Bewegungsvektoren auf Gletscheroberflächen. Da es sich bei Bauwerken in der Regel um zugängliche Messobjekte handelt, können diese mit signalisierten Punkten versehen werden, wodurch eine höhere Zuverlässigkeit und Genauigkeit bei der Punktverfolgung in der Bildsequenz gewährleistet wird. Dies erleichtert darüber hinaus auch die Skalierung der Bildmessung, da die 3D-Koordinaten der interessierenden Punkte direkt mittels Tachymeter gemessen werden können.

7.4.2 Anwendungsmöglichkeiten der Analyse multi-temporaler Laserscannerdaten

Mit multi-temporalem Laserscanning kann nicht die gleiche hohe zeitliche Auflösung erreicht werden, die bei der Bildsequenzanalyse möglich ist, aber das Verfahren ist der monoskopischen Bildsequenzanalyse in Bezug auf die Bestimmung von Bewegungskomponenten überlegen, die von einer Bewegungsrichtung, die orthogonal zur Blickrichtung des Messinstrumentes verläuft, abweichen. Es können auch Bewegungskomponenten in Tiefenrichtung gemessen werden, und anhand der multi-temporalen Daten lassen sich neben Geschwindigkeiten auch direkt Volumenänderungen ableiten.

Die Nutzung multi-temporalen Laserscannerdaten zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens arktischer Gletscher ist eine spezielle Anwendung. Insbesondere wegen der großen Dimensionen dieser Gletscher wurden terrestrische Laserscannerdaten aus gerätespezifischen Gründen dafür bislang nur wenig genutzt. Für das Monitoring von alpinen Gletschern oder Blockgletschern dagegen ist das terrestrische Laserscanning als Messverfahren etabliert. Auch in Bezug auf das multi-temporale Laserscanning gilt die Aussage, dass es sich, abgesehen von Gletscherbewegungsmessungen, auch für die Untersuchung verschiedener anderer Arten von Massenbewegungen eignet.

Als ein weiterführendes Beispiel sei hierzu die Arbeit von [Kenner u. a., 2011] genannt, die mittels wiederholtem terrestrischen Laserscanning Veränderungen in alpinen Permafrostvorkommen untersuchten. Für die Bestimmung von Geschwindigkeiten schnellfließender arktischer Gletscher sind Wiederholungsmessungen innerhalb eines Tages ausreichend. Die Orientierung des terrestrischen Laserscanners muss in diesem Fall zwischen zwei Messungen nicht verändert werden. Darin besteht der Hauptunterschied der in Grönland durchgeführten Messungen zu langfristig angelegten Monitoringaufgaben. Hier besteht die Herausforderung vor allem darin, alle Folgescans in ein gemeinsames Koordinatensystem mit der Referenzmessung zu überführen. Dies kann über die Zuordnung unbewegter natürlicher Punkte in den Datensätzen realisiert werden oder auch durch die Anlage eines dauerhaft vermarkten Netzes aus retroreflektierenden Passpunkten, über die gleichzeitig eine Georeferenzierung der Daten erfolgen kann.

8 Zusammenfassung

Bewegungsvektorfelder mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung sind für die glaziologische Analyse des Bewegungsverhaltens von Gletschern – insbesondere von Gletscherbewegungen mit hoher Dynamik – von großem Wert. Photogrammetrische Messverfahren, wie die Aufnahme von Bildsequenzen und multi-temporalen Laserscans, stellen geeignete Werkzeuge dar, um Messdaten von Gletschern in entsprechend hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu erheben. In der vorliegenden Arbeit wurden Lösungsansätze erarbeitet, um die Auswertung dieser Daten nach dem Prinzip der monoskopischen Bildsequenzanalyse zu ermöglichen und um entsprechende Bewegungsvektorfelder daraus ableiten zu können. Dies erfolgt im Wesentlichen durch die automatische Zuordnung von Grauwertmustern in den Bildsequenzen bzw. durch die Zuordnung von Punktmustern in den multi-temporalen Laserscannerdaten.

Verfahren zur Ableitung von Bewegungsvektorfeldern besitzen einen besonderen Wert für die Untersuchung schnellfließender Gletscher in Grönland. Messwerte, die den Zustand und die Veränderungen des Bewegungsverhaltens der grönländischen Ausflussgletscher dokumentieren, sind wichtige Eingangsgrößen bei der Bestimmung von Massenbilanzen für den grönländischen Eisschild sowie für die Erstellung von Modellen zur Vorhersage des zukünftigen Meeresspiegelanstieges. Im Vergleich mit anderen geodätischen Messverfahren, die zur Beobachtung der Ausflussgletscher eingesetzt werden, bieten die Bildsequenzanalyse und das terrestrische Laserscanning neben dem Vorteil einer höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung, die erzielt werden kann, auch ein höheres Genauigkeitspotenzial. Demgegenüber steht der Nachteil, dass die terrestrischen Messverfahren nicht für flächendeckende Untersuchungen geeignet sind. Sie sind also als ergänzende Verfahren zu den auf Flugzeug- und Satellitenplattformen eingesetzten Messverfahren zu sehen, welche zur Untersuchung hochdynamischer Bewegungsabläufe von Gletschern eingesetzt werden können.

Die Messungen an fünf schnellfließenden Gletschern im Bereich der Diskobucht in Westgrönland bilden die Datengrundlage für die Entwicklung der Methoden zur monoskopischen Bildsequenzanalyse. Es wurden dreifach Bildsequenzmessungen am Jakobshavn Isbræ (2004, 2007 und 2010) sowie einmalig Bildsequenzmessungen am Eqip Sermia (2007), am Støre Qarajaq (2007), am Sermeq Avannarleq (2010) und am Sermeq Kujalleq (2010) durchgeführt. Am Jakobshavn Isbræ wurde darüber hinaus von Mai bis Juni 2010 eine Langzeitmessung vorgenommen. Eine Aufnahme von multi-temporalen Laserscans erfolgte im Jahr 2007 ebenfalls am Jakobshavn Isbræ.

Als Aufnahmegeräte kamen verschiedene digitale SLR-Kameras sowie ein terrestrischer „Long-Range“-Laserscanner zum Einsatz. Während die Hauptanforderung an eine verwendete Kamera eine über einen längeren Zeitraum autonome Arbeitsweise mit vordefinierbaren Aufnahmeintervallen ist, sind die zwei wichtigsten Anforderungen an einen zum Einsatz kommenden Laserscanner eine große Reichweite und ein gutes Reflexionsvermögen auf Eis.

Bei der Konzeption der Aufnahmemethodik sind bestimmte Anforderungen zu beachten, die für eine erfolgreiche Auswertung der multi-temporalen Bild- und Laserscannerdaten notwendig sind. Die Bildsequenzen wurden von einem festen Standpunkt aus mit einem Intervall von 15 bzw. 20 Minuten zwischen den einzelnen Bildern aufgenommen. Um die durch Wind und Aufwärmeeffekte verursachten Eigenbewegungen der Kamera kompensieren zu können, sind im Blickfeld jeder Sequenzkamera ortsstabile Zielmarken anzubringen. Zur Skalierung der in den Bildsequenzen gemessenen Werte wird zusätzlich ein Bildverband vom Gletscher aufgenommen. Die Georeferenzierung erfolgt über eine mittels GPS eingemessene Basis, von der aus wiederum Kamerastandpunkte und Passpunkte mittels Tachymeter aufgenommen werden können. Die Aufnahme der multi-temporalen Laserscans erfolgt durch wiederholtes Scannen der Gletscheroberfläche von einem festen Standpunkt aus. Zur Horizontierung und Georeferenzierung der gescannten Daten werden retroreflektierende Passpunkte eingesetzt, für die mittels GPS- und Tachymetermessungen Koordinaten im übergeordneten Koordinatensystem bereitgestellt werden.

Zur Entwicklung der Auswertemethodik werden etablierte Verfahren der automatischen Bildpunktzuordnung (Kreuzkorrelationsverfahren, Least Squares Matching) und der 3D-Punktwolkenzuordnung (ICP-Algorithmus) genutzt und an die besonderen Eigenschaften der Gletscherdaten angepasst. Diese Verfahren bilden die Basis der Auswertung und werden um Methoden erweitert, die der Lösung von Detailproblemen und zur Georeferenzierung der Daten dienen.

Die Auswertemethodik der monoskopischen Bildsequenzanalyse untergliedert sich in Arbeitsschritte zur Bestimmung von Bewegungsvektoren im Bildraum und in Arbeitsschritte zur Transformation der im Bildraum bestimmten Bewegungsvektoren in den Objektraum. Die unter Verwendung von Bildzuordnungsverfahren ermittelten Bewegungskurven der Gletscherpunkte sind durch das Bewegungsmuster wandernder Schatten auf der Gletscheroberfläche und durch die Eigenbewegung der Kamera beeinflusst. Der Einfluss der Schatten kann im Rahmen der Bildpunktzuordnung eliminiert werden, indem von Schatten beeinflusste Pixel in einem iterativen Prozess vom Matching ausgeschlossen werden. Der Einfluss der Kamerabewegung wird durch die Verfolgung ortsfester Zielmarken in der Bildsequenz bestimmt und als Korrektur an die ermittelten Trajektorien angebracht. Zur Skalierung der Trajektorien werden die entsprechenden Entfernungen zwischen Kameraprojektionszentrum und Messobjekt benötigt, welche durch die Auswertung eines photogrammetrischen Netzes bereitgestellt werden.

Die Auswertemethodik zur Analyse der multi-temporalen Laserscannerdaten untergliedert sich in den Arbeitsschritt der Segmentierung, in Arbeitsschritte zum Tracking in den 3D-Punktwolken und in den Arbeitsschritt zur Bestimmung von Geschwindigkeitswerten. Nach Unterteilung eines gesamten Laserscannerdatensatzes in kleine Punktwolken kann für jedes dieser Punktwolkensegmente nach korrespondierenden Punktmustern in den nachfolgenden Scans gesucht werden. Die Zuordnung erfolgt dabei mittels ICP-Algorithmus direkt auf Basis der 3D-Punkte. Die Näherungswerte, die für diese Methode notwendig sind, werden durch die Reduzierung der Punktwolken auf ein horizontales, zweidimensionales Raster und die Anwendung flächenbasierter Bildzuordnungsverfahren gewonnen. Die Ableitung von Geschwindigkeitswerten aus den so erhaltenen Translationsvektoren bedingt die Interpolation eines Zeitwertes aus den unterschiedlichen Aufnahmezeiten der Einzelpunkte der Punktwolkensegmente.

Die entwickelte Auswertemethodik wird in C++ implementiert und die in den Messkampagnen gewonnenen Bild- und Laserscannerdaten werden prozessiert. Dies erfolgt nach individuellen Arbeitsabläufen für die Auswertung beider Datenarten. Bei der Auswertung der Bilddaten sind dabei besonders die Strukturierung der großen Datenmengen sowie die Bereitstellung von Distanzinformationen für jede einzelne Bildsequenz wichtige Aspekte. Bei den Laserscannerdaten liegt der Schwerpunkt auf einer sorgfältigen Aufbereitung der Rohdaten, um sowohl die Auswertung von multi-temporalen Scans als auch von Einzelscans zu ermöglichen. Als Resultat der Bildsequenzauswertung liegt schließlich für jede Bildsequenz ein dichtes Raster an Trajektorien vor. Die Auswertung der Laserscannerdaten liefert digitale Geländemodelle der Gletscheroberfläche sowie ein dichtes Raster von 3D-Bewegungsvektoren.

Die Fehlerbetrachtung der aus den Bildsequenzen abgeleiteten Trajektorien ergibt, dass die einzelnen Translationen mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von einigen Zentimetern bis zu einem Dezimeter bestimmt werden können. Bei hoher zeitlicher Auflösung der Bildsequenzen haben die Fehlereinflüsse der Bildpunktzuordnung gegenüber den Fehlereinflüssen der Transformation in den Objektraum eine deutlich größere Auswirkung. Die Genauigkeit der Trajektorien ist maßgeblich abhängig von der Entfernung, vom Winkel zwischen Kamerablickrichtung und Gletscheroberfläche sowie von der Position eines Messpunktes im Bild.

Hinsichtlich der Genauigkeit der Bewegungsvektoren, die aus multi-temporalen Laserscannerdaten abgeleitet werden, hat der Punktabstand innerhalb der Punktwolken den größten Einfluss. Untersuchungen zeigen, dass die Punktzuordnung mittels ICP mit einer Genauigkeit erfolgen kann, die besser ist als der mittlere Punktabstand. Dies bedeutet für die im Rahmen der Arbeit ausgewerteten multi-temporalen Laserscannerdaten, dass die Genauigkeit der abgeleiteten Bewegungsvektoren im Bereich von mehreren Dezimetern liegt. Sie ist abhängig von der Entfernung zum Laserscanner.

Die abgeleiteten Ergebnisse werden so aufbereitet, dass auf ihrer Grundlage eine weitere Analyse und eine glaziologische Interpretation erfolgen kann. Es wird an Beispielen nachgewiesen, dass sich die aus monokularen Bildsequenzen abgeleiteten Bewegungsvektorfelder zur Bestimmung frontnaher Geschwindigkeitsfelder mit hoher räumlicher Auflösung, zur Bestimmung der Lage und Migration der Aufsetzlinie aus gezeiteninduzierten Vertikalbewegungen sowie zur Bestimmung des Geschwindigkeitsverhaltens von Gletschern bei Kalbungsereignissen eignen. Aus den Laserscannerdaten können hochaufgelöste digitale Geländemodelle zur Dokumentation von Fronthöhen und Gletscherstrukturen abgeleitet werden. Multi-temporale Laserscannerdaten eignen sich darüber hinaus zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern, die eine sehr hohe räumliche Auf-

lösung besitzen und deren zeitliches Auflösungspotenzial im Vergleich zu anderen Messverfahren zwar hoch ist, das aber dennoch geringer ist als das zeitliche Auflösungspotenzial von Bewegungsvektorfeldern aus Bildsequenzen. Die komplementären Eigenschaften von Bild- und Laserscannerdaten können sich beim gleichzeitigen Einsatz beider Messverfahren unterstützen, indem die direkte 3D-Koordinatengewinnung des Laserscanners mit dem hohen zeitlichen Auflösungspotenzial der Bildsequenzen kombiniert wird.

Die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Ergebnisse bestätigen die eingangs aufgestellte Vermutung, dass die Verfahren der monoskopischen Bildsequenzanalyse und der multi-temporalen Laserscannerdatenauswertung eine gute Ergänzung zu flächendeckenden Gletschermessungen aus Satellitendaten darstellen, da mit ihrer Hilfe genaue, räumlich und zeitlich hochaufgelöste Bewegungsvektorfelder für Gletscher erstellt werden können.

Literaturverzeichnis

- (1) **ABDALATI, W., KRABILL, W. B., 1999:**
Calculation of Ice Velocities in the Jakobshavn Isbrae Area Using Airborne Laser Altimetry. In: Remote Sensing of Environment, 67, S. 194–204.
- (2) **ABDALATI, W., KRABILL, W., FREDERICK, E., MANIZADE, S., MARTIN, C., SONNTAG, J., SWIFT, R., THOMAS, R., WRIGHT, W., YUNGEL, J., 2001:**
Outlet glacier and margin elevation changes: Near-coastal thinning of the Greenland ice sheet. In: J. Geophys. Res., AGU, 106, S. 33729–33741.
- (3) **ACKERMANN, F., 1984:**
Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. In: Photogrammetric Record 11 (64), S. 429–439.
- (4) **AHN, Y., BOX, J. E., 2010:**
Instruments and methods: ice velocities from time-lapse photos: technique development and first results from Extreme Ice Survey (EIS) in Greenland. In: Journal of Glaciology 56, S. 723–734.
- (5) **Akca, D., 2007:**
Matching of 3D surfaces and their intensities. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62 (2), S. 112–121.
- (6) **ALLEN, C., GOGINENI, S., WOHPLETZ, B., JEZEK, K., CHUAH, T., 1997:**
Airborne radio echo sounding of outlet glaciers in Greenland. In: International Journal of Remote Sensing, 18(14), S. 3103–3108.
- (7) **ALLEY, R. B., CLARK, P. U., HUYBRECHTS, P., JOUGHIN, I., 2005:**
Ice-Sheet and Sea-Level Changes. In: Science, 310, S. 456–460.
- (8) **AL-NAJDAWI, N., BEZ, H. E., SINGHAI, J., EDIRISINGHE, E. A., 2012:**
A survey of cast shadow detection algorithms. In: Pattern Recogn. Lett., Elsevier Science Inc., 33, S. 752–764.
- (9) **AMUNDSON, J.M., 2010:**
Iceberg calving dynamics of Jakobshavn Isbræ, Greenland. Dissertation University of Alaska Fairbanks.
- (10) **AVIAN, M., BAUER, A., 2005:**
First results on monitoring glacier dynamics with the aid of terrestrial Laser Scanning on Pasterze Glacier (Hohe Tauern, Austria). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung 41, S. 27–36.
- (11) **BACHER, J., PÖGE, A., WENZIG, K., 2010:**
Clusteranalyse – Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. 3. Auflage. München, Oldenbourg.
- (12) **BAMLER, R., 1997:**
Digital Terrain Models from Radar Interferometry. In: Photogrammetric Week 97, Wichmann Verlag, Heidelberg. S. 93–105.
- (13) **BÄSSLER, M., 2011:**
Untersuchungen zu Topographie und Bewegungsverhalten für das Küstengebiet des RiiserLarsen und Brunt Schelfeises mittels Radarfernerkundung. Dissertation, Technischen Universität Dresden.
- (14) **BAUER, A., 1955:**
Glaciologie Groenland 2. Le glacier de l'Ege. Paris: Hermann, 118 S.
- (15) **BAUER, A., 1968:**
Le glacier de l'Ege (Eqip sermia). Movement et variations du front (1959). Expédition Glaciologique Internationale au Groenlande 1957–1960. In: Meddelelser om Grønland, 174(2), 21 S.
- (16) **BAUER, A.; PAAR, G., KAUFMANN, V., 2003:**
Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring. In: 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Balkema, 1, S. 55–60.

-
- (17) **BAY, H., ESS, A., TUYTELAARS, T., VAN GOOL, L., 2008:**
Speeded-up robust features (SURF). In: International Journal on Computer Vision and Image Understanding, 110(3), S. 346–359.
- (18) **BENNIKE, O., MIKKELSEN, N., PEDERSEN, H.K., WEIDICK, A., (HRSG.), 2004:**
Ilulissat Isfjord (Danish version), Ilulissat Icefjord (English version), Kangia Eqqaaluu (Greenlandic version), København: Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, 116 S.
- (19) **BERTHIER, E., VADON, H., BARATOUX, D., ARNAUD, Y., VINCENT, C., FEIGL, K., REMY, F., LEGRESY, B., 2005:**
Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. In: Remote Sensing of Environment, 95, S.14–28.
- (20) **BESL, P., MCKAY, H., 1992:**
A method for registration of 3-D shapes. In: Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 14, S. 239–256.
- (21) **BETHMANN, F., LUHMANN, T., 2011:**
Kleinste-Quadrate-Zuordnung mit erweiterten geometrischen Transformationen. In: Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), 2, S. 57–69.
- (22) **BÖHLER, W., BORDAS VICENT, M., MARBS, A., 2003:**
Investigating laser scanner accuracy. In: International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and the Spatial Information Sciences, 34(5/C15), S. 696–701.
- (23) **BRAATEN, D., GOGINENI, S., 2002:**
Radar measurements of ice sheet thickness of outlet glaciers in Greenland. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Toronto, Canada, Proceedings, S. 2188–2189.
- (24) **BRACEWELL, R., 1965:**
The fourier transform and its applications. MacGraw-Hill, New York.
- (25) **BRECHER, H.H., 1986:**
Surface velocity determination on large polar glaciers by aerial photogrammetry. In: Annals of Glaciology, 8, S. 22–26.
- (26) **BROWN, A., HOWAT, I., BEHAR, A., BOX, J. E., TULACZYK, S., 2008:**
Observing Outlet Glacier Motion Using High Rate GPS. In: American Geophysical Union, Fall Meeting 2008, abstract #C31C-0516.
- (27) **BROWN, L. G., 1992:**
A Survey of Image Registration Techniques. In: ACM Computing Surveys, 24, S. 325–376.
- (28) **CARBONNELL, M., BAUER, A., 1968:**
Exploitation des couvertures photographiques aériennes répétées du front des glaciers vélant dans Disko Bugt et Umanak Fjord, juin–juillet 1964. In: Meddelelser om Grønland, 173(5), 78 S.
- (29) **CARTURAN, L., CALLIGARO, S., CAZORZI, F., BALDASSI, G. A., MORO, D., CARTON, A., DALLA FONTANA, G., GUARNIERI, A., MILAN, N., TAROLLI, P., 2012:**
Mass balance and surface dynamics of Montasio Occidentale glacier (Eastern Italian Alps) investigated by Terrestrial Laser Scanner. In: EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, S. 7660.
- (30) **CAZENAVE, A., LLOVEL, W., 2010:**
Contemporary sea level rise. In: Annual Review of Marine Science 2(1), S. 145–173.
- (31) **CHEN, Y., MEDIONI, G. G., 1992:**
Object modelling by registration of multiple range images. In: Image Vision Comput., Butterworth-Heinemann, 10, S.145–155.
- (32) **CHURCH, J.A., U. A., 2001:**
Changes in sea level. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ICPP). Houghton, J.T. u. a. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 639–693.
- (33) **CLARKE, T. S., ECHELMAYER, K., 1996:**
Seismic-reflection evidence for a deep subglacial trough beneath Jakobshavns Isbrae, West Greenland. In: Journal of Glaciology, 43(141), S. 219–232.
-

-
- (34) **CSATHO, B., SCHENK, T., VAN DER VEEN, C., KRABILL, W. B., 2008:**
Intermittent thinning of Jakobshavn Isbrae, West Greenland, since the Little Ice Age. In: Journal of Glaciology, 2008, 54, S. 131–144.
- (35) **DAHL-JENSEN, D., STEFFENSEN, J.P., JOHNSEN, S.J., 1986:**
Least-squares method used in reduction of data from theodolite measurements on fast moving glaciers.
In: Annals of Glaciology, 8, S. 42–46.
- (36) **DEBELLA-GILO, M., KÄÄB, A., 2011:**
Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. In: Remote Sensing of Environment, 115, S. 130–142.
- (37) **DE CASTRO, E., MORANDI, C., 1987:**
Registration of Translated and Rotated Images Using Finite Fourier Transforms. In: IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 9(5), S. 700–703.
- (38) **DELAUNAY, B. N., 1934:**
Sur la sphère vide. In: Bulletin of Academy of Sciences of the USSR, 7, S. 793–800.
- (39) **DE QUERVAIN, A., MERCANTON, P.-L., 1925:**
Résultats scientifiques de l'Expédition suisse au Groenland 1912–1913. In: Meddelelser om Grønland 59, S. 55–271.
- (40) **DIETRICH, R., MAAS, H.-G., BÄSSLER, M., RÜLKE, A., RICHTER, A., SCHWALBE, E., WESTFELD, P. 2007:**
Jakobshavn Isbræ, West Greenland: Flow velocities and tidal interaction of the front area from 2004 field observations. In: Journal of Geophysical Research 112.
- (41) **ECHELMEYER, K., HARRISON, W. D., CLARKE, T. S., BENSON, C., 1992:**
Surficial glaciology of Jakobshavns Isbrae, West Greenland: Part II. Ablation, accumulation and temperature. In: Journal of Glaciology, 38(128) S. 169–181.
- (42) **EIKEN, T., SUND, M., 2012:**
Photogrammetric methods applied to Svalbard glaciers: accuracies and challenges. In: Polar Research, North America, <http://www.polarresearch.net/index.php/polar/article/view/18671>.
- (43) **ENGELL, M.C., 1904:**
Undersøgelser og Opmaalinger ved Jakobshavns Isfjord og i Orpigssuit i Sommeren 1902. In: Meddelelser om Grønland, 26, S. 1–70.
- (44) **FINLAYSON, G. D., HORDLEY, S. D., DREW, M. S., 2002:**
Removing Shadows from Images. In: ECCV '02: Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part IV, London, UK, S. 823–836.
- (45) **FINSTERWALDER, R., 1931:**
Geschwindigkeitsmessungen an Gletschern mittels Photogrammetrie. In: Zeitschrift für Gletscherkunde, 29, S. 251–262.
- (46) **FISCHLER, M. A., BOLLES, R. C., 1981:**
Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: Commun. ACM, ACM, 24, S. 381–395.
- (47) **FLOTRON, A., 1973:**
Photogrammetrische Messung von Gletscherbewegungen mit automatischer Kamera. (Photogrammetric measurements of glacier movements with automatic cameras.) In: Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 71, S. 15–17.
- (48) **FÖRSTNER, W., 1982:**
On the geometric precision of digital correlation. In: International Archives of Photogrammetry, Proceedings of the Symposium of the ISPRS Commission III, Helsinki, 24(3), S. 176–189.
- (49) **FURUKAWA, Y., PONCE, J., 2010:**
Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32(8), S. 1362–1376.
-

-
- (50) **GEIST, T., HÖFLE, B., KODDE, M., KODDE, S., KARIMI, F., LINDENBERGH, R., PFEIFER, N., 2006:**
Experimente am Hintereisferner mit dem terrestrischen Laserscanner Ilris 3D. In: Report, Institute of Geography, University of Innsbruck, S. 1–9.
- (51) **GODONE, D., GODONE, F., 2012:**
The Support of Geomatics in Glacier Monitoring: The Contribution of Terrestrial Laser Scanner. In: Laser Scanner Technology, Rodriguez J. A. M. (Hrsg.), InTech, <http://www.intechopen.com/books/laser-scanner-technology/the-support-of-geomatics-in-glacier-monitoring-the-contribution-of-terrestrial-laser-scanner>.
- (52) **GOGINENI, S. U. A., 2001:**
Coherent radar ice thickness measurements over the Greenland ice sheet. In: Journal of Geophysical Research, 106(D24), S. 33761–33772.
- (53) **GOLDSTEIN, R.M., ENGELHARDT, H. KAMB, B., FROLICH, R. M., 1993:**
Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream. In: Science, 262(5139), S. 1525–1530.
- (54) **GRAY, A., SHORT, N., MATTAR, K., JEZEK, K., 2001:**
Velocities and flux of the Filchner ice shelf and its tributaries determined from speckle tracking interferometry. In: Canadian Journal of Remote Sensing, 27, S. 193–206.
- (55) **GRÜN, A., (1985):**
Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique. In: South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing & Cartography, 14(3), S. 175–187.
- (56) **GRÜN, A., AKCA, D., 2005:**
Least squares 3D surface and curve matching. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59 (3), 151–174.
- (57) **HALL, D.K., MARTINEC, J., 1985:**
Remote sensing of ice and snow. Chapman and Hall, New York, 189 S.
- (58) **HAMILTON, G. S., STEARNS, L. A., FINNEGAN, D. C., 2009:**
Terrestrial LiDAR Measurements on a Large East Greenland Outlet Glacier. American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #G53E-03.
- (59) **HAMMER, R., 1883:**
Undersøgelser ved Jakobshavns Isfjord og nærmeste Omegn i Vinteren 1879–1880. In: Meddelelser om Grønland, 4, S. 1–68.
- (60) **HARRISON, W. D., RAYMOND, C. F., MacKEITH, P., 1986:**
Short period motion events on Variegated Glacier as observed by automatic photography and seismic methods. In: Annals of Glaciology, 8, S.82–89.
- (61) **HAUG, T., KÄÄB, A., SKVARCA, P., 2010:**
Monitoring ice shelf velocities from repeat MODIS and Landsat data – a method study on the Larsen C ice shelf, Antarctic Peninsula, and 10 other ice shelves around Antarctica. In: The Cryosphere Discussions, 4, S. 31–75.
- (62) **HAWBECKER, P., BOX, J. E., BALOG, J. D., AHN, Y., BENSON, R. J., 2010:**
Greenland outlet glacier dynamics from Extreme Ice Survey (EIS) photogrammetry. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, Abstract.
- (63) **HELLAND, A., 1876:**
Om de isfyldte Fjorde og glaciale Dannelser i Nordgrønland. In: Archiv for Matematik og Naturvidenskab 1.
- (64) **HIGGINS, A.K., 1991:**
North Greenland glacier velocities and calf ice production. In: Polarforschung, 60(1), 1–23.
- (65) **HIRSCHMÜLLER, H., 2005:**
Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), San Diego, CA, USA, S. 807–814.
-

-
- (66) **HOLLAND, D. M., THOMAS, R. H., DE YOUNG, B., RIBERGAARD, M. H., LYBERTH, B., 2008:**
Acceleration of Jakobshavn Isbrae triggered by warm subsurface ocean waters. In: Nature Geoscience, 1(10), S. 659–664.
- (67) **HOWAT, I. M., BEHAR, A. E., BROWN, A. K., 2009:**
Measuring the Surface Motion of Fast-Moving Glaciers with Expendable, Low-Cost GPS. In: American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #C54A-06.
- (68) **HOWAT, I. M., EDDY, A., 2011:**
Multi-decadal retreat of Greenland's marine-terminating glacier. In: Journal of Glaciology, 57, S. 389–396.
- (69) **HOWAT, I. M., JOUGHIN, I., TULACZYK, S., GOGINENI, S., 2005:**
Rapid retreat and acceleration of Helheim Glacier, east Greenland. In: Geophys. Res. Lett., AGU, 32, 4 S.
- (70) **JAMES, M. R., PINKERTON, H., ROBSON, S., 2007:**
Image-based measurement of flux variation in distal regions of active lava flows. In: Geochem. Geophys. Geosyst., AGU, 8(3).
- (71) **JOECKEL, R., STOBER, M., 1999:**
Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wittwer Verlag, Stuttgart (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 18).
- (72) **JOUGHIN, I., 2002:**
Ice-sheet velocity mapping: a combined interferometric and speckle-tracking approach. In: Annals of Glaciology, 34, S. 195–201.
- (73) **JOUGHIN, I., ABDALATI, W., FAHNESTOCK, M. A., 2004:**
Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbrae glacier. In: Nature, 432(7017), S. 608–610.
- (74) **JOUGHIN, I., DAS, S. B., KING, M. A., SMITH, B. E., HOWAT, I. M., MOON, T., 2008A:**
Seasonal Speedup Along the Western Flank of the Greenland Ice Sheet. In: Science, 320, S. 781–783.
- (75) **JOUGHIN, I., HOWAT, I. M., FAHNESTOCK, M., SMITH, B., KRABILL, W., ALLEY, R. B., STERN, H., TRUFFER, M., 2008B:**
Continued evolution of Jakobshavn Isbrae following its rapid speedup. In: Journal of Geophysical Research, 113.
- (76) **JOUGHIN, I., SMITH, B., HOWAT, I. M., SCAMBOS, T., MOON, T., 2010:**
Greenland Flow Variability from Ice-Sheet-Wide Velocity Mapping. In: Journal of Glaciology, 56 (197), S. 415–430.
- (77) **JUNKER, S. 2008:**
Untersuchungen zum Potenzial des ICP-Algorithmus bei der Auswertung von multi-temporalen terrestrischen Laserscannerdaten zur 3D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie. Diplomarbeit Technische Universität Dresden.
- (78) **KÄÄB, A., 2001:**
Digitale Photogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, 10, S. 451–458.
- (79) **KANUNGO, T., MOUNT, D. M., NETANYAHU, N. S., PIATKO, C. D., SILVERMAN, R., WU, A. Y., 2002:**
An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation. In: IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 24, S. 881–892.
- (80) **KAUFMANN, V., LADSTÄDTER, R., 2008:**
Application of Terrestrial Photogrammetry for Glacier Monitoring in Alpine Environments. In: IAPRS, 37, Part B8, Proceedings of the 21. Congress of ISPRS, Beijing, China, S. 813–818.
- (81) **KELLERER-PIRKLBAUER, A., BAUER, A., PROSKE, H. 2005:**
Terrestrial laser scanning for glacier monitoring: Glaciation changes of the Gößnitzkees glacier (Schober group, Austria) between 2000 and 2004. In: 3rd Symposium of the Hohe Tauern National Park for Research in Protected Areas, Kaprun, Austria, S. 97–106.
- (82) **KENNER, R., 2010:**
Entwicklung und Verifikation von Datenakquisitions- und Auswerteschemata für Veränderungsmessungen im alpinen Permafrost auf Basis von terrestrischen Laserscannerdaten. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
-

-
- (83) **KENNER, R., PHILLIPS, M., DANIOTH, C., DENIER, C., THEE, P., ZGRAGGEN, A., 2011:**
Investigation of rock and ice loss in a recently deglaciated mountain rock wall using terrestrial laser scanning: Gemsstock, Swiss Alps. In: Cold Regions Science and Technology, 67, S. 157–164.
- (84) **KERN, F., 2003:**
Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laser-Scanner-Daten. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- (85) **KRABILL, W., HANNA, E., HUYBRECHTS, P., ABDALATI, W., CAPPELEN, J., CSATHO, B., FREDERICK, E., MANIZADE, S., MARTIN, C., SONNTAG, J., SWIFT, R., THOMAS, R., YUNGEL, J., 2004:**
Greenland Ice Sheet: Increased coastal thinning. In: Geophysical Research Letters, AGU, 31.
- (86) **KRABILL, W., THOMAS, R., JEZEK, K., KUIVINEN, K., MANIZADE, S., 1995A:**
Greenland ice sheet thickness changes measured by laser altimetry. In: Geophysical Research Letters, 22(17), S. 2341–2344.
- (87) **KRABILL, W., THOMAS, R. H., MARTIN, C. F., SWIFT, R. N., FREDERICK, E. B., 1995B:**
Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet. In: International Journal of Remote Sensing, 16, S. 1211–1222.
- (88) **KRIMMEL, R.M., 2001:**
Photogrammetric Data Set, 1957–2000 and Bathymetric Measurements for Columbia Glacier, Alaska. In: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4089, 46 S.
- (89) **KRIMMEL, R.M., MEIER, M.F., 1975:**
Glacier application of ERTS images. In: Journal of Glaciology, 15(73), S. 391–402.
- (90) **KRIMMEL, R. M., RASMUSSEN, L. A., 1986:**
Using sequential photography to estimate ice velocity at the terminus of Columbia Glacier, Alaska. In: Annals of Glaciology, 8, S. 117–123.
- (91) **LARSSON, H., STEINVALL, O., CHEVALIER, T., GUSTAFSSON, F., 2006:**
Characterizing laser radar snow reflection for the wavelengths 0.9 and 1.5 μ m. In: Optical Engineering, 45(11), 116201, S. 1–11.
- (92) **LEMMENS, M., 2007:**
Terrestrial Laser Scanners (Product Survey). In: GIM International, 21(8).
- (93) **LEWIS, J.P., 1995:**
Fast normalized cross-correlation. In: Vision Interface 10, S. 120–123.
- (94) **LI, Y., SASAGAWA, T., GONG, P., 2004:**
A system of the shadow detection and shadow removal for high resolution city aerial photo. In: IAPRS, 35(B3), Proceedings of the 20. Congress of ISPRS, Istanbul, Turkey, S. 802–807.
- (95) **LICHTI, D. D., JAMTSHO, S., 2006:**
Angular resolution of terrestrial laser scanners. In: The Photogrammetric Record, 21, S.141–160.
- (96) **LINGLE, C. S., HUGHES, T. J., KOLLMAYER, R. C., 1981:**
Tidal Flexure of Jakobshavns Glacier, West Greenland. In: Journal of Geophysical Research, AGU, 86, S. 3960–3968.
- (97) **LOWE, D. G., 2004:**
Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision, 60(2), S. 91–110.
- (98) **LUCCHITTA, B., FERGUSON, H., 1986:**
Antarctica: measuring glacier velocity from satellite images. In: Science, 234, S. 1105–1108.
- (99) **LUCKMAN, A., MURRAY, T., JISKOOT, H., PRITCHARD, H., STROZZI, T., 2003:**
ERS SAR feature-tracking measurement of outlet glacier velocities on a regional scale in East Greenland. In: Annals of Glaciology, International Glaciological Society, S. 129–134.
- (100) **LUHMANN, T., 2010:**
Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
-

-
- (101) **MAAS, H.-G., 1997:**
Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie. Habilitationsschrift Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- (102) **MAAS, H.-G., 2000:**
Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 33 (3A), S. 548–555.
- (103) **MAAS, H.-G., DIETRICH, R., SCHWALBE, E., BÄSSLER, M., WESTFELD, P., 2006:**
Analyse des Bewegungsverhaltens des Jakobshavn Isbræ Gletschers in Grönland durch monokulare Bildsequenzanalyse. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2, S. 93–102.
- (104) **MAAS, H.-G., CASASSA, G., SCHNEIDER, D., SCHWALBE, E., WENDT, A., 2013:**
Photogrammetric techniques for the determination of spatio-temporal velocity fields at Glaciar San Rafael, Chile. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 79(3), S. 299–306.
- (105) **MAYER, H., HERZFELD, U., 2008:**
The Rapid Retreat of Jakobshavns Isbræ, West Greenland: Field Observations of 2005 and Structural Analysis of its Evolution. In: Natural Resources Research, Springer Netherlands, 17, S. 167–179.
- (106) **MEIER, S., 1965:**
Terrestrische Photogrammetrie an einem arktischen Gletscher während der Polarnacht. In: Bildmessung und Luftbildwesen, 33, S. 177–181.
- (107) **MEIER, M.F., RASMUSSEN, L.A., KRIMMEL, R.M., OLSEN, R.W., FRANK, D., 1985:**
Photogrammetric determination of surface altitude, terminus position, and ice velocity of Columbia Glacier, Alaska. U.S. Geological Survey. Professional paper 1258-F, 41 S.
- (108) **MOHR, J. J., REEH, N., MADSEN, S. N., 1998:**
Three-dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry. In: Nature, 391, S. 273–276.
- (109) **MOTYKA, M., TRUFFER, M., FAHNSTOCK, J., MORTENSEN, S., RYSGAARD, I.J., HOWAT, I.M., 2011:**
Submarine melting of the 1985 Jakobshavn Isbræ floating tongue and the triggering of the current retreat. In: Journal of Geophysical Research, 116.
- (110) **MULSOW, C., MAAS, H.-G., WENDT, A., CASASSA, G., 2011:**
Photogrammetrische Überwachung von Gletscherrandseen. In: Beiträge zur DGPF-Jahrestagung, DGPF Tagungsband 20/2011, 8 S.
- (111) **NEITZEL, F., KLONOWSKI, J., 2011:**
Mobile 3D Mapping With a Low-cost UAV System on Example of a Landfill Survey.
In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Proceedings of the UAV-g confer-ence, Zurich, Switzerland.
- (112) **NICK, F. M., VIELI, A., HOWAT, I. M., JOUGHIN, I., 2009:**
Large-scale changes in Greenland outlet glacier dynamics triggered at the terminus. In: Nature Geoscience, 2, S. 110–114.
- (113) **OTTO, G., CHAU, T., 1989:**
A “Region-growing“ algorithm for matching of terrain images. In: Image and Vision Computing, 7, S. 83–94.
- (114) **PELLIKA, P., REES, W.G., 2010:**
Glacier parameters monitored using remote sensing. In: Remote sensing of glaciers, Pellikka, P., Rees, W.G., (Hrsg.), CRC Press/Balkema, S. 41–62.
- (115) **PETRIE, G., 2009:**
Modular Cameras, Multiple Configurations, The IGI DigiCAM Range. In: GEOInformatics, 6, S. 60–63.
- (116) **PILLEWIZER, W., 1938:**
Photogrammetrische Gletscherforschung. In: Bildmessung und Luftbildwesen, 2, S. 66–73.
- (117) **PITKÄNEN, T., KAJUUTTI, K., 2004:**
Close-range photogrammetry as a tool in glacier change detection. In: IAPRS, 35, Part B7, Proceedings of the 20. Congress of ISPRS, Istanbul, Turkey, S. 769–773.
-

-
- (118) **PLUMMER, J., GOGINENI, S., VAN DER VEEN, C., LEUSCHEN, C., LI, J., 2008:**
Ice thickness and bed map for Jakobshavn Isbræ. In: CRISIS, Tech. Rep. 2008-1.
- (119) **PRATI, A., MIKIC, I., TRIVEDI, M., CUCCHIARA, R., 2003:**
Detecting Moving Shadows: Algorithms and Evaluation. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25(7), S. 918–923.
- (120) **PRATS, P., ANDRES, C., SCHEIBER, R., REIGBER, A., DE MACEDO, K. A. C., FISCHER, J., 2007:**
Glacier displacement field estimation using airborne SAR interferometry. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS), Barcelona, Spain, Proceedings, S. 2098–2101.
- (121) **PRATT, W.K., 1974:**
Correlation techniques of image registration. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 10, S. 353–358.
- (122) **PROTZE, F., 2007:**
Anwendung photogrammetrischer Aufnahme- und Auswerteverfahren zur räumlich-zeitlich aufgelösten 2D-Deformationsanalyse an Brücken. Diplomarbeit Technische Universität Dresden.
- (123) **REDDY, B. S., CHATTERJI, B. N., 1996:**
An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. In: IEEE Transactions on Image Processing, 5(8), S. 1266–1271.
- (124) **REEH, N., OLESEN, O.B., 1986:**
Velocity measurements on Daugaard-Jensen Gletscher, Scoresby Sund, East Greenland. In: Annals of Glaciology, 8, S.146–150.
- (125) **RIEGL LASER MEASUREMENT GMBH, 2010:**
Data Sheet LPM-321 – Long range laser profile measurement system. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_LPM-321_18-03-2010.pdf, Abgerufen am 24. Oktober 2012.
- (126) **RIGNOT, E., 1998:**
Hinge-line migration of Petermann Gletscher, north Greenland, detected using satellite-radar interferometry. In: Journal of Glaciology, 44, S. 469–476.
- (127) **RIGNOT, E., GOGINENI, S. P., KRABILL, W. B., EKOHLM, S., 1997:**
Ice discharge from north and northeast Greenland as observed from satellite radar interferometry. In: Science 276, S. 934–937.
- (128) **RIGNOT, E., KANAGARATNAM, P., 2006:**
Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. In: Science 311, S. 986–90.
- (129) **RINK, H. J., 1857:**
Grønland, geografisk og statistisk beskrevet. Høst A. F., (Hrsg.), København.
- (130) **ROSENAU, R., 2008:**
Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten grönländischer Gletscher mittels Feature Tracking in Satellitenbildern. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- (131) **ROSENAU, R., SCHWALBE, E., DIETRICH, R., MAAS, H-G., 2013:**
Grounding line migration and high resolution calving dynamic of Jakobshavn Isbræ, West Greenland. Erscheint in: Journal of Geophysical Research.
- (132) **RUSINKIEWICZ, S., LEVOY, M., 2001:**
Efficient Variants of the ICP Algorithm. In: Proceedings of the Third Intl. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, S. 145–152.
- (133) **SANZ ABLANEDO, E., CHANDLER, J., IRVINE FYNN, T., 2012:**
Studying Glacial Melt Processes Using Sub-Centimeter DEM Extraction and Digital Close-range Photogrammetry. In: ISPRS12, 39, Part B5, Proceedings of the 22. Congress of ISPRS, Melbourne, Australia, S. 435–440.
- (134) **SCAMBOS, T. A., DUTKIEWICZ, M. J., WILSON, J. C., BINDSCHADLER, R. A., 1992:**
Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data. In: Remote Sensing of Environment, 42, S. 177–186.
-

- (135) **SCHNEIDER, D., 2008:**
Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- (136) **SCHWALBE, E., MAAS, H-G., DIETRICH, R., EWERT, H., 2008:**
Glacier velocity determination from multi-temporal terrestrial long range laserscanner point clouds.
In: IAPRS, 37(B5), Proceedings of the 21. Congress of ISPRS, Beijing, China, S.457–462.
- (137) **SLINEY, D., WOLBARSH, M., 1980:**
Safety with lasers and other optical sources. Plenum Press, New York, 1980.
- (138) **SNAVELY, N., SEITZ, S. M., SZELISKI, R., 2006:**
Photo tourism: exploring photo collections in 3D. In: ACM SIGGRAPH 2006 Papers, ACM, S. 835–846.
- (139) **SOHN, H. G., JEZEK, K. C., VAN DER VEEN, C. J., 1998:**
Jakobshavn Glacier, West Greenland: 30 years of spaceborne observations. In: Geophysical Research Letters, 25, S. 2699–2702.
- (140) **STEARNS, L. A., HAMILTON, G. S., 2007:**
Rapid volume loss from two East Greenland outlet glaciers quantified using repeat stereo satellite imagery.
In: Geophys. Res. Lett., AGU, 34, 5 S.
- (141) **STEENSTRUP, K. J. V., 1883:**
Bidrag til Kjendskab til Bræerne og Bræ-Isen i Nordgrønland. In: Meddelelser om Grønland 4, S. 69–112.
- (142) **STROZZI, T., LUCKMAN, A., MURRAY, T., WEGMULLER, U., WERNER, C.L., 2002:**
Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), S. 2384–2391.
- (143) **STOBER, M., 1974:**
Zur Refraktion in Grönland. In: Polarforschung, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research & German Society of Polar Research, 44(2), S. 127–136 .
- (144) **TANGELDER, J. W., VELTKAMP, R. C., 2008:**
A survey of content based 3D shape retrieval methods. In: Multimedia Tools Appl., Kluwer Academic Publishers, 39, S. 441–471.
- (145) **THOMAS, R. H., ABDALATI, W., FREDERICK, E., KRABILL, W. B., MANIZADE, S., STEFFEN, K., 2003:**
Investigation of surface melting and dynamic thinning on Jakobshavn Isbrae, Greenland. In: Journal of Glaciology, March 2003, 49, S. 231–239.
- (146) **THOMAS, R., FREDERICK, E., KRABILL, W., MANIZADE, S., MARTIN, C., 2009:**
Recent changes on Greenland outlet glaciers. In: Journal of Glaciology, 55, S. 147–162.
- (147) **TUYTELAARS, T., MIKOLAJCZYK, K., 2007:**
Local Invariant Feature Detectors: A Survey. In: Computer Graphics and Vision, 3(3), S. 177–280.
- (148) **VAN DEN BROEKE, M., BAMBER, J., ETTEMA, J., RIGNOT, E., SCHRAMA, E., VAN DE BERG, W. J., VAN MELGAARD, E., VELICOGNA, I., WOUTERS, B., 2009:**
Partitioning Recent Greenland Mass Loss. In: Science, 326(5955), S. 984–986.
- (149) **VAN DE WAL, R. S. W., BOOT, W., VAN DEN BROEKE, M. R., SMEETS, C. J. P. P., REIJMER, C. H., DONKER, J. J. A., OERLEMANS J., 2008:**
Large and Rapid Melt-Induced Velocity Changes in the Ablation Zone of the Greenland Ice Sheet.
In: Science, 321, S. 111–113.
- (150) **VELICOGNA, I., 2009:**
Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. In: Geophysical Research Letters, 36.
- (151) **VIEL, A., JANIA, J., BLATTER, H., FUNK, M., 2004:**
Short-term velocity variations on Hansbreen, a tidewater glacier in Spitsbergen. Journal of Glaciology, 50(170), S.389–398.

- (152) **VIOLA, P., WELLS, W.M., 1997:**
Alignment by maximization of mutual information. In: International Journal of Computer Vision, 24, S. 137–154.
- (153) **VOIGT, U., 1965:**
Die Bewegung der Gletscherzunge des Kongsvegen (Knigsbay Westspitzbergen). In: Pet. Mitt., 109, S. 1–8.
- (154) **VON DRYGALSKI, E., 1897:**
Grönland Expedition der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin 1891–1893. Kühl, W. H. (Hrsg.), Berlin, 1, 555 S.
- (155) **WEIDICK, A., 1995:**
Greenland. In: Satellite image atlas of glaciers of the world. U.S.Geological Survey, Professional Paper 1386-C, Williams, R., Ferrigno, J.G. (Hrsg.), 141 S.
- (156) **WEIDICK, A., BENNIKE, O., 2007:**
Quaternary glaciation history and glaciology of Jakobshavn Isbræ and the Disko Bugt region, West Greenland: a review. In: Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, 14, S. 1–78.
- (157) **WENG, W.L., 1995:**
The area of Greenland and the ice cap. In: Arctic, 48(2), S. 206.
- (158) **WESTFELD, P., 2005:**
Entwicklung von Verfahren zur räumlich und zeitlich aufgelösten 2D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie. Diplomarbeit Technische Universität Dresden.
- (159) **ZICK, W., 1972:**
Eisbewegungen am Eqip Sermia und im westlichen Randgebiet des grönländischen Inlandeises (EGIG Arbeitsgebiet). In: Polarforschung, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research & German Society of Polar Research, 42(1), S. 24–30.
- (160) **ZITOVÁ, B., FLUSSER, J., 2003:**
Image registration methods: a survey. In: Image and Vision Computing, 21, S. 977–1000.
- (161) **ZWALLY, H. J., ABDALATI, W., HERRING, T., LARSON, K., SABA, J., STEFFEN K., 2002:**
Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow. In: Science, 297, S. 218–222.

Abkürzungsverzeichnis

2D, 3D:	Zweidimensional, Dreidimensional
APS-C:	Advanced Photo System Classic
ASCII:	American Standard Code for Information Interchange
ASTER:	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
C++:	ISO genormte Programmiersprache
CMOS:	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DGM:	Digitales Geländemodell
DGPS:	Differential Global Positioning System
DLT:	Direkte Lineare Transformation
DOM:	Digitales Oberflächenmodell
DSLR:	Digital Single Lens Reflex (Digitale Spiegelreflexkamera)
EGIG:	Expédition Glaciologique Internationale au Groenland
EIS:	Extreme Ice Survey
GNSS:	Global Navigation Satellite System
GPS:	Global Positioning System
ICP:	Iterativ Closest Point Algorithmus
InSAR:	Synthetic-Aperture-Radar-Interferometrie
LSM:	Least Squares Matching
MODIS:	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
PMVS:	Patch-based Multi-view Stereo
RANSAC:	Random Sample Consensus
RGB:	Rot Grün Blau
SAR:	Synthetic-Aperture-Radar-Daten (-Daten)
SFM:	Structure-From-Motion
SIFT:	Scale-Invariant Feature Transform
SLR:	Single Lens Reflex (Spiegelreflexkamera)
SPOT:	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SURF:	Speeded Up Robust Features
TIN:	Triangulated Irregular Network
TLS:	Terrestrisches Laserscanning
UNESCO:	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UTM:	Universal Transverse Mercator
VFG:	Varianzfortpflanzungsgesetzes

Formelzeichenverzeichnis

a, b, h	Bezeichnung der Seiten und der Höhe des Dreiecks
a, b	Hauptachsen des Ellipsoides
a_i, b_i, c_i	Parameter der Affintransformation
B	Basis der GPS- und Tachymetermessung
b_S	Sensorbreite einer Kamera
c	Kamerakonstante
D	Distanz zwischen Kameraprojektionszentrum und Objektpunkt
g	Grauwert
i, j, k	Laufindizes
n	Anzahl der Bilder einer Sequenz bzw. Trajektorie
P, P'	Objekt- und Bildpunkt
R	Mittlerer Erdradius
s_{Brel}	Skalierungsfehler aufgrund des Maßstabsfehlers des photogrammetrischen Netzes
s_{DH}	Distanzfehler aufgrund des Höhenfehlers des TIN
s_{Drel}	Skalierungsfehler aufgrund des Distanzfehlers
s_{DT}	Distanzfehler aufgrund des Lagefehlers des TIN in Tiefenrichtung (Kamerablickrichtung)
$s_{D\omega}$	Distanzfehler aufgrund des Fehlers des Rotationswinkels der Kamera um die x-Achse
s_H	Höhenfehler eines Objektpunkts
s_{HB}	Höhenfehler eines Basislinienendpunktes
$s_{kx'}, s_{ky'}$	Punktlagefehler der Korrekturtrajektorie im Bild
s_{lsm}	Fehler der Translationen beim LSM
s_{mx}, s_{my}	Gesamtskalierungsfehler
s_{px}	Fehler der Parallaxe
s_{ref}	Refraktionsbedingter Translationsfehler
s_{sr}	Schattenrestfehler
$s_{m\delta_{rel}}$	Skalierungsfehler der Horizontalkomponente aufgrund des Fehlers des Winkels zwischen Kamerablickrichtung und Gletscherbewegungsrichtung
$s_{m\omega_{rel}}$	Skalierungsfehler der Vertikalkomponente aufgrund des Fehlers des Rotationswinkels um die x-Achse
s_T	Fehler eines Objektpunktes in Tiefenrichtung (Kamerablickrichtung)
s_{xr}	Lagefehler eines Messwertbezugspunktes parallel zur Basislinie
$s_{xy'}$	Bildpunktmessgenauigkeit
s_{AH}	Höhenfehler Messwertbezugspunkt
$s_{Akx'}, s_{Aky'}$	Fehleranteil der Kamerabewegungskorrektur einer Translation
$s_{Ax'}, s_{Ay'}$	Fehler der Translationen im Bild
s_{Ax}, s_{Ay}	Horizontale und Vertikale Fehlerkomponente der Translationen im Objektraum
s_{ω}	Fehler des Rotationswinkels um die x-Achse
t_s	Aufnahmezeitpunkt für einen Laserscanpunkt
u, v	Pixelkoordinaten
v	Geschwindigkeit

x, y, z	Koordinaten Objektpunkt im Gerätekoordinatensystem
x', y'	Bildkoordinaten
X, Y, Z	Koordinaten Objektpunkt im Objektkoordinatensystem
x_0, y_0, z_0	Koordinaten des Projektionszentrums im Gerätekoordinatensystem
xr	Horizontaler Abstand des Messpunktes zur Rotationsachse der Basis
α_K	Öffnungswinkel einer Kamera
β	Winkel zwischen der Flächennormalen der Gletscheroberfläche und dem Bildstrahl
γ	Winkel der Geländeneigung
δ	Winkel der Abweichung von der Orthogonalität zwischen Kamerablickrichtung und Gletscherfließrichtung
ΔH	Höhenunterschied
Δk	Refraktionskoeffizient
$\Delta kx', \Delta ky'$	Translationen im Bildraum hervorgerufen durch die Kamerabewegung
ΔP	Puffer
Δpix	Pixelgröße bzw. -abstand Sensor
ΔPIX	Pixelgröße am Objekt
Δt	Zeitintervall
$\Delta x', \Delta y'$	Translation im Bildraum
$\Delta x, \Delta y$	Translation im Objektraum
$\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$	Kleine Änderungen des Projektionszentrums
$\Delta x'_G, \Delta y'_G$	Suchbereich
$\Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa$	Kleine Änderungen der Kamerarotationswinkel
λ	Wellenlänge Laserscanner
ρ	Kreuzkorrelationskoeffizient
ω, φ, κ	Rotationswinkel um die x-, y- bzw. z-Achse des Kamerakoordinatensystems

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendete Kameras.	19
Tabelle 2:	Technische Daten des Riegl LPM-321 [Riegl GmbH, 2010].....	24
Tabelle 3:	Übersicht der Messkampagnen und der verwendeten Ausrüstung.....	35
Tabelle 4:	Kenngößen für die Auswertung.	96
Tabelle 5:	Zusammenstellung von für die Weiterverwendung der Messwerte relevanten Informationen.....	97
Tabelle 6:	Kenngößen der Beispieltrajektorie.....	102
Tabelle 7:	Fehler der Bildpunktzurordnung.	104
Tabelle 8:	Skalierungsfehler der Beispieltrajektorie.....	108
Tabelle 9:	Fehler der Translationen der Beispieltrajektorie.....	109
Tabelle 10:	Vergleich gemessener maximaler Fließgeschwindigkeiten.....	121
Tabelle 11:	Monoskopische Bildsequenzanalyse vs. Analyse multi-temporaler Laserscannerdaten.	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Arbeitsprogramm zur Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Gletscherbereichen.	3
Abbildung 2.1:	Geschwindigkeitsvektoren aus Theodolitmessungen.	8
Abbildung 2.2:	Beispiel für den Einsatz des terrestrischen Laserscannings zur Gletscherüberwachung.	10
Abbildung 2.3:	Aus Luftbildern abgeleitete Geschwindigkeitsvektoren (rot) am Jakobshavn Isbræ.	12
Abbildung 3.1:	Übersicht der Messgebiete.	15
Abbildung 3.2:	Rückgang der Gletscherfront am Jakobshavn Isbræ.	16
Abbildung 3.3:	Harbortronics Time-Lapse-Kamera-System.	20
Abbildung 3.5:	Riegl LPM-321 am Jakobshavn Isbræ (Messkampagne 2007).	24
Abbildung 3.6:	Reflexionsvermögen von Eis und Schnee für verschiedene Wellenlängen.	25
Abbildung 3.7:	Aufnahmekonfiguration der Bildsequenzmessung.	27
Abbildung 3.8:	Kameraaufstellung.	28
Abbildung 3.9:	Messbild.	29
Abbildung 3.10:	Schattenwurf zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Aufnahme einer Bildsequenz.	30
Abbildung 3.11:	Tachymeteraufstellung (links) und GPS-Messung (rechts) auf einem Basislinienendpunkt.	31
Abbildung 3.12:	Aufnahmekonfiguration der Laserscannermessung.	34
Abbildung 3.13:	Aufnahmesituation am Jakobshavn Isbræ (2004, 2007 und 2010).	36
Abbildung 3.14:	Laserscan des frontnahen Bereichs am Jakobshavn Isbræ (2007).	37
Abbildung 3.15:	Aufnahmesituation am Støre Qarajaq 2007.	38
Abbildung 3.16:	Aufnahmesituation am Eqip Sermia 2007.	39
Abbildung 3.17:	Aufnahmesituation am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq 2010.	40
Abbildung 4.1:	Möglichkeit zur Subpixelinterpolation beim Kreuzkorrelationsverfahren.	45
Abbildung 4.2:	Beispiel für die Zuordnung benachbarter Punkte beim ICP-Algorithmus.	48
Abbildung 4.3:	Monoskopische (links) vs. stereoskopische (rechts) Bildsequenzanalyse.	49
Abbildung 4.4:	3D-Objektpunkte der Gletscheroberfläche.	51
Abbildung 4.5:	Distanzwerte.	51
Abbildung 4.6:	Messpunktraster und gemessene Trajektorien.	52
Abbildung 4.7:	Effekte der Eigenbewegung der Sequenzkamera.	52
Abbildung 4.8:	Geschwindigkeitsfelder im Bild- und Objektraum.	53
Abbildung 4.9:	Zuordnungsprobleme in einem Stererobildpaar.	55
Abbildung 4.10:	Definition des Suchbereichs für die automatische Punktzuordnung in Stererobildpaaren.	56
Abbildung 4.11:	„Region-Growing“-Strategie.	56
Abbildung 4.12:	Ergebnis der automatischen Messung homologer Punkte in einem Stereobildpaar.	57
Abbildung 4.13:	Test der Bildpunktmessung eines Bildverbandes mittels AgiSoft Photoscan.	60
Abbildung 4.14:	TIN-Generierung.	63
Abbildung 4.15:	Einflüsse auf die Distanzgenauigkeit.	64

Abbildung 4.16:	Einfluss wandernder Schatten in Bildsequenzen.....	66
Abbildung 4.17:	Methode zur Eliminierung der Schattenbewegung.....	67
Abbildung 4.18:	Definition von Schattenpixeln im Differenzbild.....	68
Abbildung 4.19:	Definition des Prädiktionsbereichs.....	70
Abbildung 4.20:	Patchgrößendefinition.....	70
Abbildung 4.21:	Matchingstrategien.....	72
Abbildung 4.22:	Drifteffekte bei der Messung einer Trajektorie aufgrund der Schattenbewegung.....	73
Abbildung 4.23:	Auswirkung einzelner Parameter der Kamerabewegung im Bild.....	76
Abbildung 4.24:	Dynamische und statische Bildbereiche.....	77
Abbildung 4.25:	Korrektur der Kamerabewegung bei der Messung an fester Position im Objektraum.....	78
Abbildung 4.26:	Anwendung der Kamerabewegungskorrektur auf eine Trajektorie.....	79
Abbildung 4.27:	Zeitlich variierender Fehler der Kamerabewegungskorrektur.....	80
Abbildung 4.28:	Fehler bei einfacher Skalierung.....	81
Abbildung 4.29:	Auswirkung des Fehlers bei einfacher Skalierung.....	81
Abbildung 4.30:	Objektraumübertragung.....	82
Abbildung 4.31:	Gescannte Oberflächenstrukturen aus zwei Epochen.....	83
Abbildung 4.32:	Aufnahmezeiten der Scans aus zwei Messepochen.....	84
Abbildung 4.33:	Scanmuster.....	85
Abbildung 4.34:	Schematische Darstellung von Möglichkeiten zur Messrasterdefinition und Segmentbildung.....	86
Abbildung 4.35:	Vergleich von Clusteranalyse und Rastersegmentierung.....	87
Abbildung 4.36:	Punktvolkenzuordnung in gerasterten Laserscannerdaten.....	88
Abbildung 4.37:	Direkte Zuordnung von Punktvolken mittels ICP.....	88
Abbildung 4.38:	Zeitwertverteilung und -interpolation innerhalb eines Segmentes.....	89
Abbildung 4.39:	Zeitdifferenzen, Translationsbeträge und Geschwindigkeiten im Scanbereich.....	90
Abbildung 5.1:	Übersicht der gewonnenen Messdaten.....	91
Abbildung 5.2:	Strukturierung der aufgenommenen Messdaten.....	92
Abbildung 5.3:	Ausgabedatei für die Auswertung multi-temporaler Laserscans.....	92
Abbildung 5.4:	Grafische Benutzeroberfläche zum Programm zur Bildsequenz- und Laserscannerdatenauswertung.....	93
Abbildung 5.5:	Ausgabedatei für eine in einer Bildsequenz gemessene Trajektorie.....	94
Abbildung 5.6:	Arbeitsablauf für die monokulare Bildsequenzanalyse.....	94
Abbildung 5.7:	Arbeitsablauf der Laserscannerdatenauswertung.....	98
Abbildung 6.1:	Fehlereinflüsse bei der monoskopischen Bildsequenzanalyse.....	101
Abbildung 6.2:	Schattenrestfehler einer Trajektorie.....	103
Abbildung 6.3:	Fehler der Korrekturtrajektorie.....	105
Abbildung 6.4:	Relativer Distanzfehler und seine Abhängigkeit vom Schnittwinkel des Bildstrahls mit dem TIN.....	107
Abbildung 6.5:	Fehler der vertikalen Translationen einer Trajektorie nach Filterung der Datenreihe.....	110
Abbildung 6.6:	Fehler der abgeleiteten Horizontalgeschwindigkeiten.....	110
Abbildung 6.7:	Auswirkung von Lagefehlern der Basislinie.....	111

Abbildung 6.8:	Auswirkung des Höhenfehlers der Basislinienendpunkte.....	112
Abbildung 6.9:	Vergleich zweier zeitgleich aufgenommener Bildsequenzmessungen.....	113
Abbildung 6.10:	Vergleich von Geschwindigkeiten aus Bildsequenzen mit Geschwindigkeiten aus Landsatdaten.....	114
Abbildung 6.11:	Auswirkung einzelner Fehlereinflüsse der Laserscannermessung auf die Punktlagegenauigkeit.....	116
Abbildung 6.12:	Vergleich von Laserscannergeschwindigkeiten mit Ergebnissen der Bildsequenzmessung.....	117
Abbildung 7.1:	Geschwindigkeitsfelder aus Bildsequenzmessungen am Jakobshavn Isbræ.....	119
Abbildung 7.2:	Geschwindigkeitsfelder aus Bildsequenzmessungen.....	120
Abbildung 7.3:	Einfluss der Gezeiten auf die Gletscherbewegung.....	121
Abbildung 7.4:	Migration der Aufsetzlinie.....	122
Abbildung 7.5:	Fließgeschwindigkeiten während eines Kalbungseignisses.....	123
Abbildung 7.6:	Digitale Geländemodelle aus terrestrischen Laserscannerdaten.....	124
Abbildung 7.7:	Geschwindigkeitsfeld aus Laserscannermessungen am Jakobshavn Isbræ.....	125
Abbildung 7.8:	Oberflächengeschwindigkeiten des Gletschers San Rafael.....	127
Abbildung 7.9:	Lavageschwindigkeiten.....	128
Abbildung 7.10:	Wasserstandsvariationen eines Gletscherrandsees.....	129

Danksagung

Diese Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Fakultät Umweltwissenschaften an der Technischen Universität Dresden angefertigt. Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die mich in dieser Zeit unterstützt, fachlich begleitet und gefördert haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas bedanken. Er hat mich in jeder Hinsicht unterstützt und mir viele Möglichkeiten eingeräumt, mich weiter zu entwickeln. Vielen Dank für die hilfreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen, für Motivation und für zeitliche Freiräume, die ich zum Schreiben der Arbeit nutzen konnte. Nicht zuletzt, möchte ich mich vor allem auch für die Möglichkeit bedanken, Mitarbeiterin des spannenden Forschungsprojektes gewesen zu sein, welches die Grundlage für die entstandene Arbeit ist.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr. Andreas Käab und Prof. Dr. habil. Reinhard Dietrich für das Lesen der Arbeit und die Übernahme der Gutachtertätigkeit bedanken.

Die Arbeit entstand im Rahmen eines Forschungsprojektes, welches in Kooperation mit dem Institut für Planetare Geodäsie (IPG) der TU Dresden durchgeführt wurde. Ein ganz besonderer Dank gilt deshalb allen Kollegen des IPG, mit denen ich während des Projektes zusammenarbeiten durfte. Ihr großer Erfahrungsschatz in Bezug auf Expeditionslogistik und ihr Einsatz bei der Planung und Durchführung der einzelnen Expeditionen haben diese überhaupt erst möglich gemacht. Durch die gemeinsame Bearbeitung des Projektes habe ich viele Anregungen erhalten und viel gelernt, was über den eigenen Fachbereich hinausgeht. Vielen Dank für jede Menge Humor, Gelassenheit, Hilfsbereitschaft und die gute Zusammenarbeit, die mir immer sehr viel Spaß gemacht hat!

Ein großes Dankeschön gilt auch meinen Kollegen am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden und allen Freunden, die viel Rücksicht genommen und mich ständig motiviert haben, mit denen ich stets Probleme diskutieren konnte und die viele Anregungen zu dieser Arbeit beigesteuert haben.

Der Firma Riegl Laser Measurement Systems GmbH möchte ich für die Leihgabe des Laserscanners Riegl LPM-321 danken, der, obwohl es sich noch um einen Prototyp handelte, schon während der Expedition im Jahr 2007 für die Messungen am Jakobshavn Isbræ genutzt werden konnte. Der Firma IGI danke ich für die Leihgabe der Kamera IGI DigiCAM und deren individuelle Anpassung, um sie zur Aufnahme von Bildsequenzen an Gletschern in Grönland optimal nutzen zu können. Ich bedanke mich auch für die technische Unterstützung und Beratung bezüglich der Geräte durch diese beiden Firmen.

Bedanken möchte ich mich auch für die Bereitstellung von SPOT5-Orthophotos (die als Hintergrundbild für zahlreiche Grafiken genutzt wurden) durch das SPOT-SPIRIT-Programm (Système Probatoire pour l'Observation de la Terre; Stereoscopic Survey of Polar Ice: Reference Images and Topographies).

Schließlich und vor allem möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Habt vielen lieben Dank für Eure große Geduld, Eure Unterstützung und Euer Verständnis!

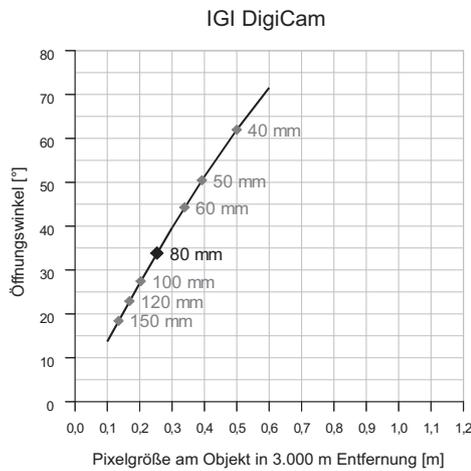
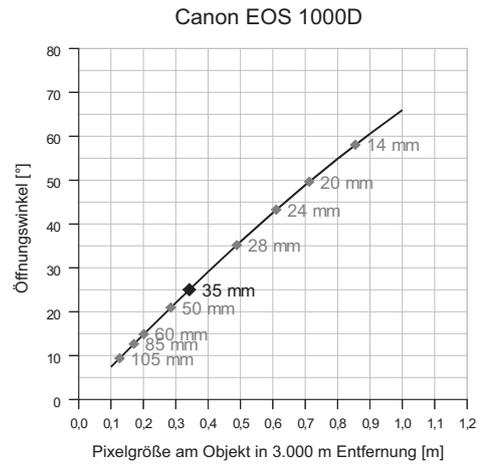
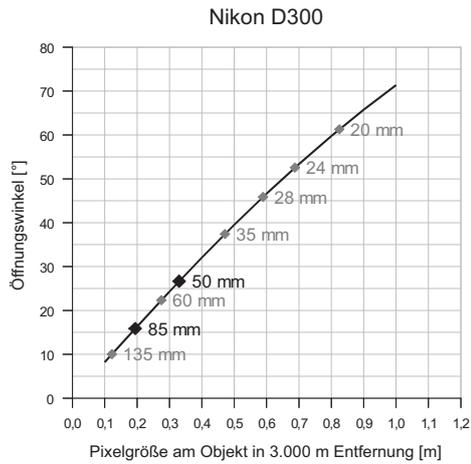
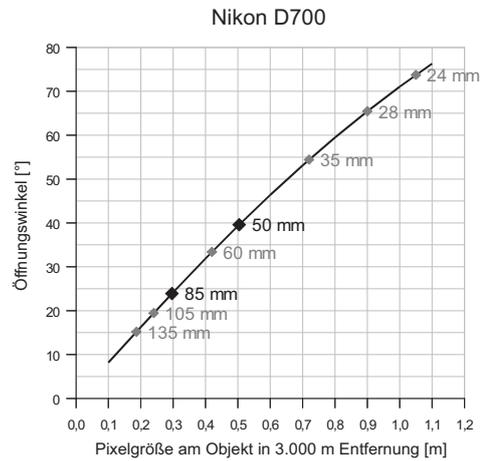
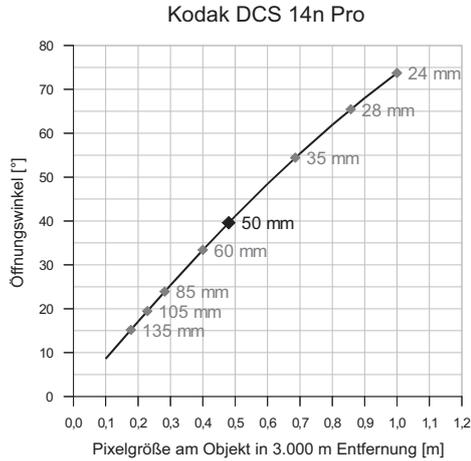
Anhang

A.1 Datenakquisition.....	A - 3
A.1.1 Objektivwahl.....	A - 3
A.1.2 Datenübersicht der Messungen am Jakobshavn Isbræ.....	A - 4
A.1.3 Datenübersicht der Messungen am Støre Qarajaq.....	A - 6
A.1.4 Datenübersicht der Messungen am Eqip Sermia.....	A - 7
A.1.5 Datenübersicht der Messungen am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq.....	A - 8
A.2 Entwicklung der Auswertemethodik – Herleitung der Gleichungen 4.14.....	A - 9
A.3 Datenauswertung und Ergebnisse.....	A -11
A.3.1 Zuordnungstabelle für die Sequenzen und Bildverbände.....	A -11
A.3.2 Programmbeschreibung.....	A -12
A.4 Fehlerbetrachtung – Partielle Ableitungen für die Gleichungen 6.4.....	A -19

A.1 Datenakquisition

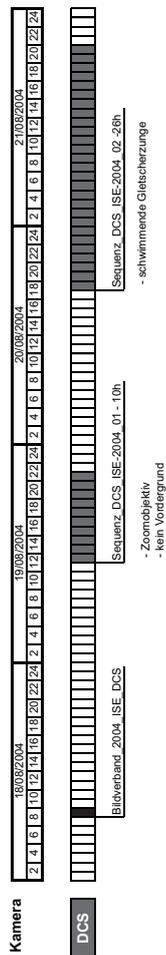
A.1.1 Objektivwahl

Verfügbare Objektive: Schwarz hervorgehoben sind die während der Messungen für die einzelnen Kameras verwendeten Objektive.

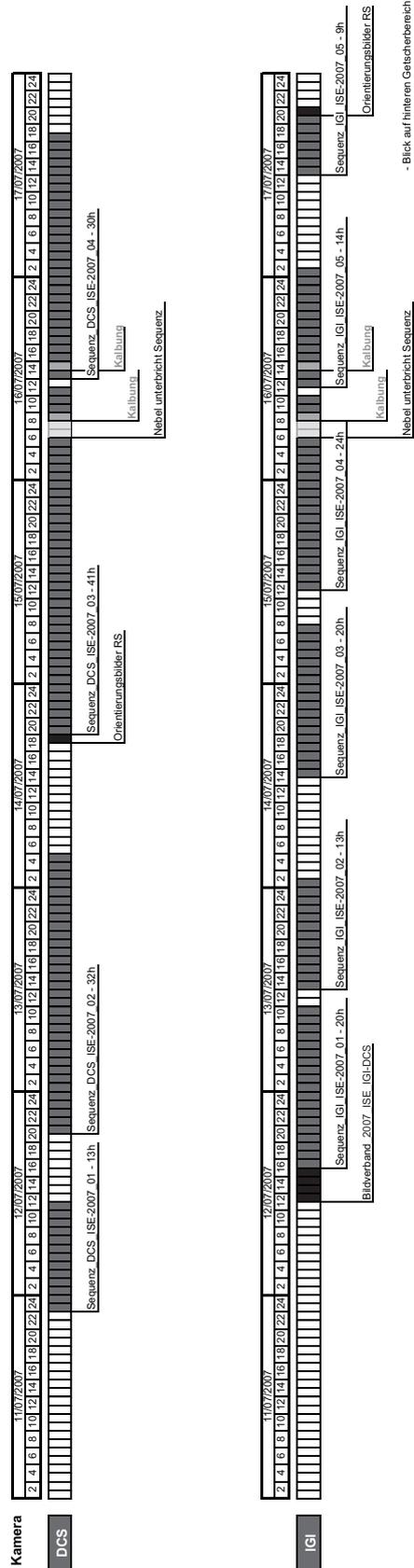


A.1.2 Datenübersicht der Messungen am Jakobshavn Isbræ

Jakobshavn Isbræ - August 2004

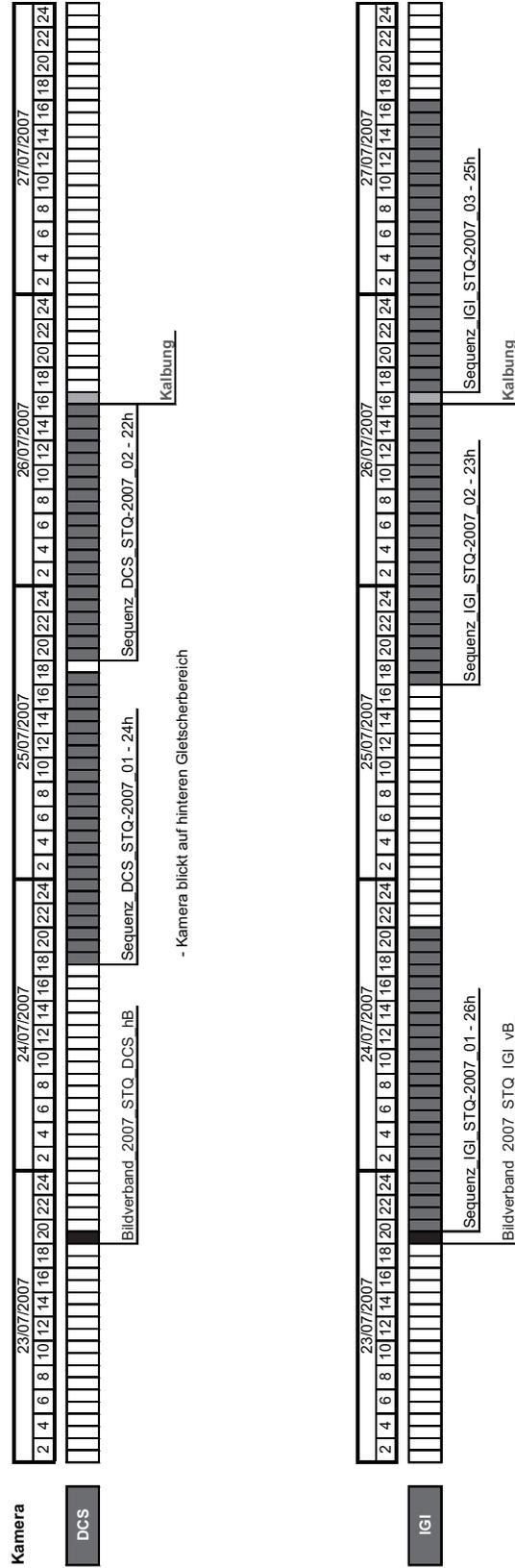


Jakobshavn Isbræ - Juli 2007a



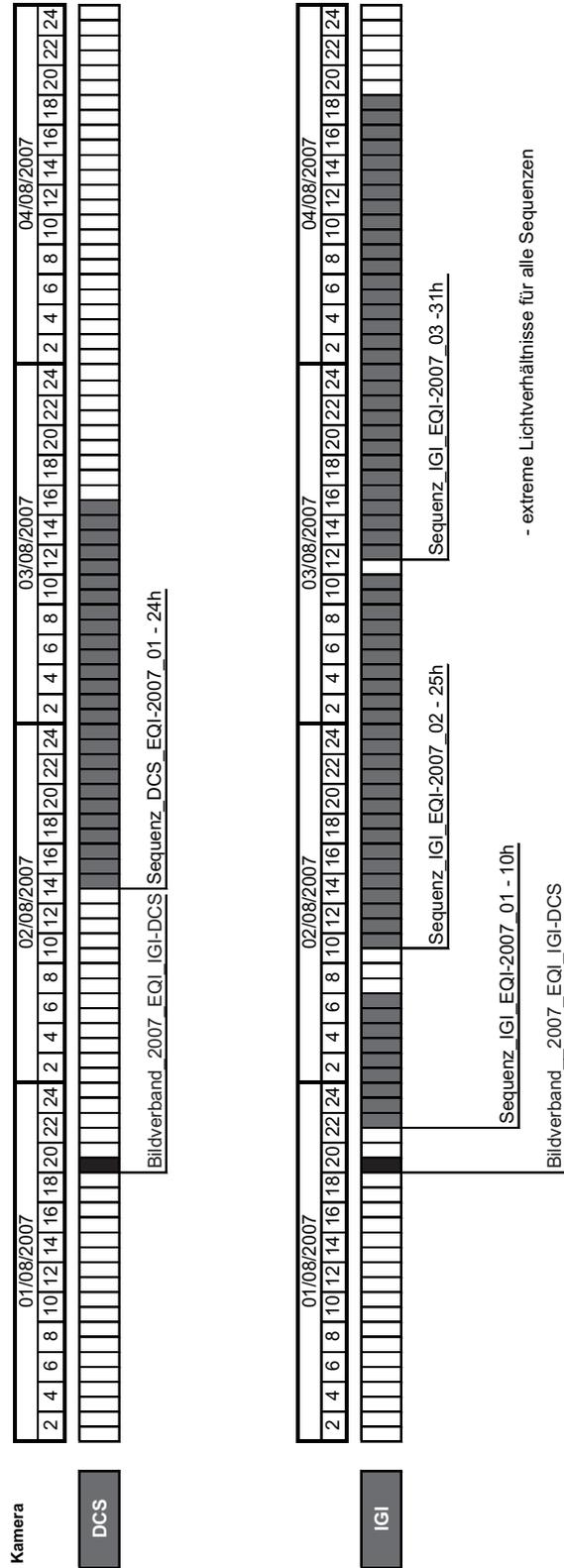
A.1.3 Datenübersicht der Messungen am Støre Qarajac

Støre Qarajac - Juli 2007

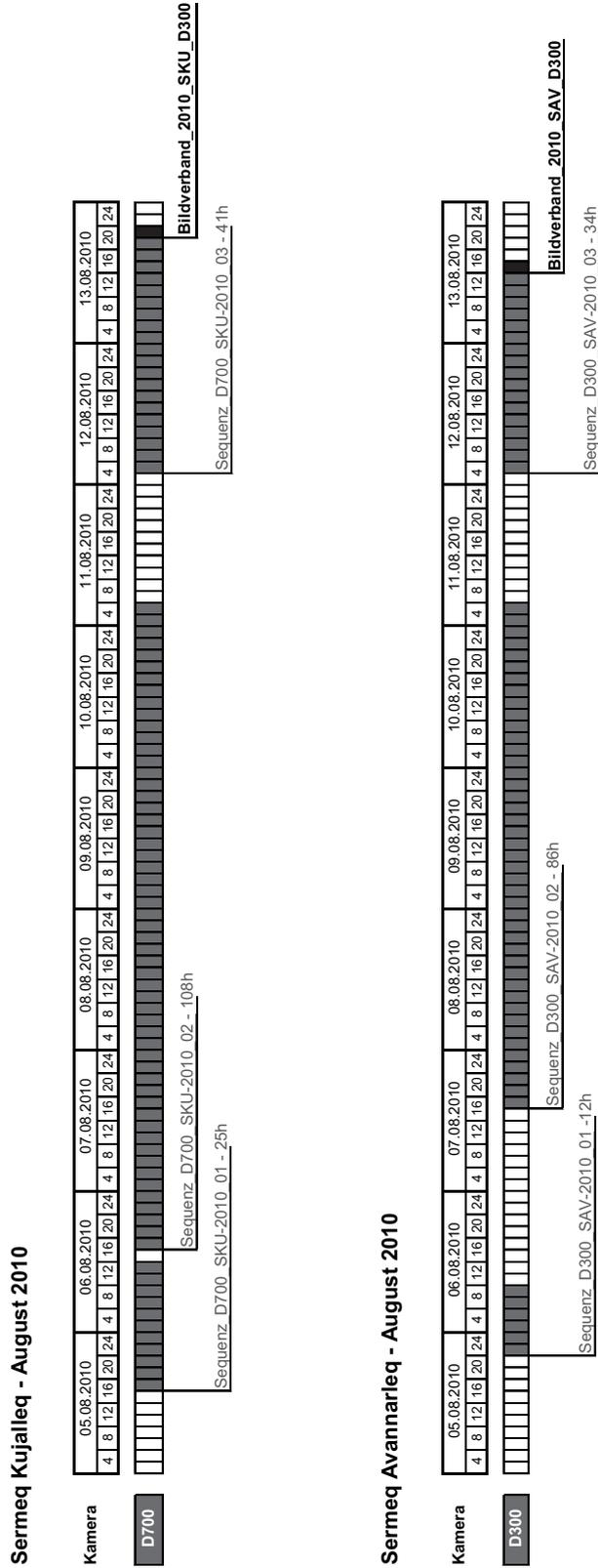


A.1.4 Datenübersicht der Messungen am Eqip Sermia

Eqip Sermia - August 2007



A.1.5 Datenübersicht der Messungen am Sermeq Avannarleq und am Sermeq Kujalleq



A.2 Entwicklung der Auswertemethodik – Herleitung der Gleichungen 4.14

1. Die Abbildungsgleichungen für das Folgebild lauten:

$$x'_{2i} = -c \cdot m \cdot \frac{r_{11} \cdot (x_i - \Delta x_0) + r_{21} \cdot (y_i - \Delta y_0) + r_{31} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x_i - \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y_i - \Delta y_0) + r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)}$$

$$y'_{2i} = -c \cdot m \cdot \frac{r_{12} \cdot (x_i - \Delta x_0) + r_{22} \cdot (y_i - \Delta y_0) + r_{32} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x_i - \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y_i - \Delta y_0) + r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)}$$

mit:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta \kappa \cos \Delta \varphi - \sin \Delta \kappa \sin \Delta \omega \sin \Delta \varphi & -\sin \Delta \kappa \cos \Delta \omega & \cos \Delta \kappa \sin \Delta \varphi + \sin \Delta \kappa \sin \Delta \omega \cos \Delta \varphi \\ \sin \Delta \kappa \cos \Delta \varphi + \cos \Delta \kappa \sin \Delta \omega \sin \Delta \varphi & \cos \Delta \kappa \cos \Delta \omega & \sin \Delta \kappa \sin \Delta \varphi - \cos \Delta \kappa \sin \Delta \omega \cos \Delta \varphi \\ -\cos \Delta \omega \sin \Delta \varphi & \sin \Delta \omega & \cos \Delta \omega \cos \Delta \varphi \end{bmatrix}$$

2. Es werden die Abbildungsgleichungen für das Referenzbild aufgestellt, wobei alle Orientierungsparameter zu Null gesetzt werden:

$$x'_{1i} = -c \cdot \frac{x_i}{z_i}$$

$$y'_{1i} = -c \cdot \frac{y_i}{z_i}$$

3. Es erfolgt die Umstellung der Abbildungsgleichungen für das Referenzbild nach den Objektpunktkoordinaten x_i und y_i im Kamerakoordinatensystem:

$$x_i = x'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c}$$

$$y_i = y'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c}$$

4. Durch Ersetzen der Objektkoordinaten x_i und y_i in den Abbildungsgleichungen des Folgebildes mit diesen Gleichungen ergibt sich:

$$x'_{1i} = -c \cdot m \cdot \frac{r_{11} \cdot (x'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta x_0) + r_{21} \cdot (y'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta y_0) + r_{31} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta y_0) + r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)}$$

$$y'_{1i} = -c \cdot m \cdot \frac{r_{12} \cdot (x'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta x_0) + r_{22} \cdot (y'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta y_0) + r_{32} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y'_{2i} \cdot \frac{z_i}{-c} - \Delta y_0) + r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)}$$

und damit nach Umformung:

$$x'_{2i} = -c \cdot \frac{r_{11} \cdot (x'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{21} \cdot (y'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{31} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)}$$

$$y'_{2i} = -c \cdot \frac{r_{12} \cdot (x'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{22} \cdot (y'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{32} \cdot (z_i - \Delta z_0)}{r_{13} \cdot (x'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta x_0) + r_{23} \cdot (y'_{1i} \cdot z_i + c \cdot \Delta y_0) - c \cdot r_{33} \cdot (z_i - \Delta z_0)}$$

Die Bildkoordinaten des Folgebildes (x_{2i}, y_{2i}) werden in Abhängigkeit von den Bildkoordinaten des Referenzbildes (x_{1i}, y_{1i}) ausgedrückt. Es gehen dabei die Winkel der Orientierungsänderung $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$ und $\Delta\kappa$ sowie die Translationen Δx_0 , Δy_0 und Δz_0 zwischen Referenz und Folgebild ein. Es besteht zudem eine Abhängigkeit von den Koordinaten der Objektpunkte (im Kamerakoordinatensystem) in Tiefenrichtung z_i .

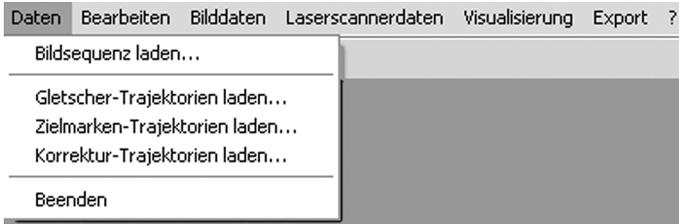
A.3 Datenauswertung und Ergebnisse

A.3.1 Zuordnungstabelle für die Sequenzen und Bildverbände

Jahr	Gletscher	Kamera	Brennweite	Bildverband	Sequenz	
2004	ISE	DCS	50 mm	nicht vorhanden	1 Sequenz_DCS_ISE-2004_01	
				1 Bildverband_2004_ISE_DCS	2 Sequenz_DCS_ISE-2004_02	
2007	ISE	IGI	80 mm	2 Bildverband_2007_ISE_IGI-DCS	3 Sequenz_IGI_ISE-2007_01	
					4 Sequenz_IGI_ISE-2007_02	
					5 Sequenz_IGI_ISE-2007_03	
		6 Sequenz_IGI_ISE-2007_04				
		7 Sequenz_IGI_ISE-2007_05				
		8 Sequenz_DCS_ISE-2007_01				
	DCS	50 mm	50 mm	50 mm	9 Sequenz_DCS_ISE-2007_02	
					10 Sequenz_DCS_ISE-2007_03	
	STQ	IGI	80 mm	3 Bildverband_2007_STQ_IGI_vB	11 Sequenz_DCS_ISE-2007_04	
					nicht vorhanden	12 Sequenz_IGI_ISE-2007_06
					13 Sequenz_IGI_STQ-2007_01	
DCS	50 mm	50 mm	4 Bildverband_2007_STQ_DCS_hB	14 Sequenz_IGI_STQ-2007_02		
				15 Sequenz_IGI_STQ-2007_03		
EQI	IGI	80 mm	5 Bildverband_2007_EQI_IGI-DCS	16 Sequenz_DCS_STQ-2007_01		
				17 Sequenz_DCS_STQ-2007_02		
	18 Sequenz_IGI_EQI-2007_01					
	19 Sequenz_IGI_EQI-2007_02					
DCS	28 mm	28 mm	20 Sequenz_IGI_EQI-2007_03			
21 Sequenz_DCS_EQI-2007_01						
2010	ISE	EOS 1	35 mm	6 Bildverband_2010_ISE_EOS	22 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_01	
					23 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_02	
					24 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_03	
					25 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_04	
					26 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_05	
					27 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_06	
					28 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_07	
		29 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_08				
		30 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_09				
		31 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_10				
		32 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_11				
		33 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_12				
		34 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_13				
		35 Sequenz_EOS 1_ISE-2010_14				
	EOS 2	35 mm	35 mm	35 mm	36 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_01	
					37 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_02	
					38 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_03	
					39 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_04	
					40 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_05	
					41 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_06	
					42 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_07	
	D700	85 mm	85 mm	7 Bildverband_2010_ISE_D700	43 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_08	
44 Sequenz_EOS 2_ISE-2010_09						
D300	50 mm	50 mm	8 Bildverband_2010_ISE_D300	45 Sequenz_D700_ISE-2010_01		
SKU	D700	50 mm	50 mm	9 Bildverband_2010_SKU_D700	46 Sequenz_D300_ISE-2010_01	
					47 Sequenz_D700_SKU-2010_01	
					48 Sequenz_D700_SKU-2010_02	
SAV	D300	80 mm	80 mm	10 Bildverband_2010_SAV_D300	49 Sequenz_D700_SKU-2010_03	
					50 Sequenz_D300_SAV-2010_01	
					51 Sequenz_D300_SAV-2010_02	
					52 Sequenz_D300_SAV-2010_03	

A.3.2 Programmbeschreibung

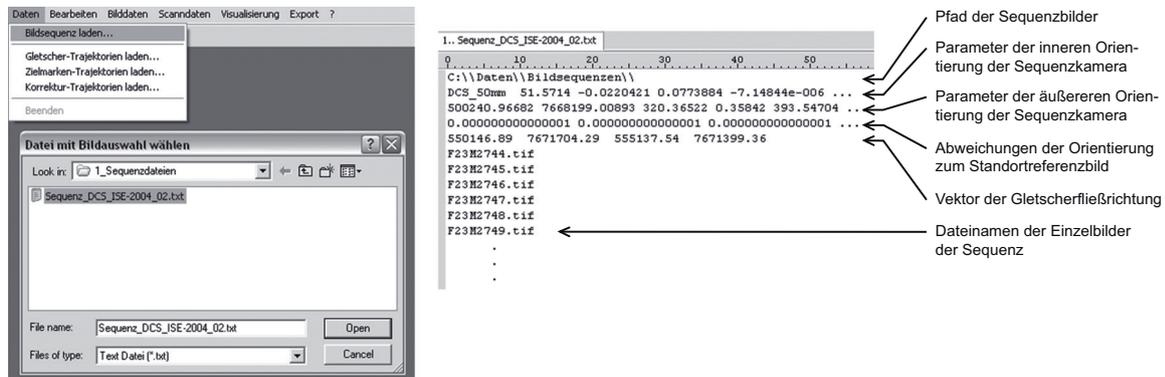
Menüpunkt „Daten“



Unter diesem Menüpunkt können Bildsequenzen und Trajektorien geladen werden

- Bildsequenz laden:

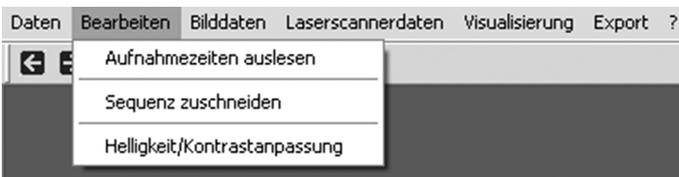
Einzelne Bildsequenzen können durch direkte Bildauswahl oder über eine Textdatei eingelesen werden, die alle notwendigen Informationen für eine Bildsequenz zusammenstellt.



- Trajektorien laden:

Verschiedene Typen von Trajektorien, die berechnet wurden und als ASCII-Dateien vorliegen, können jederzeit wieder geladen werden und werden dem aktuell angezeigten Sequenzbild überlagert dargestellt.

Menüpunkt „Bearbeiten“



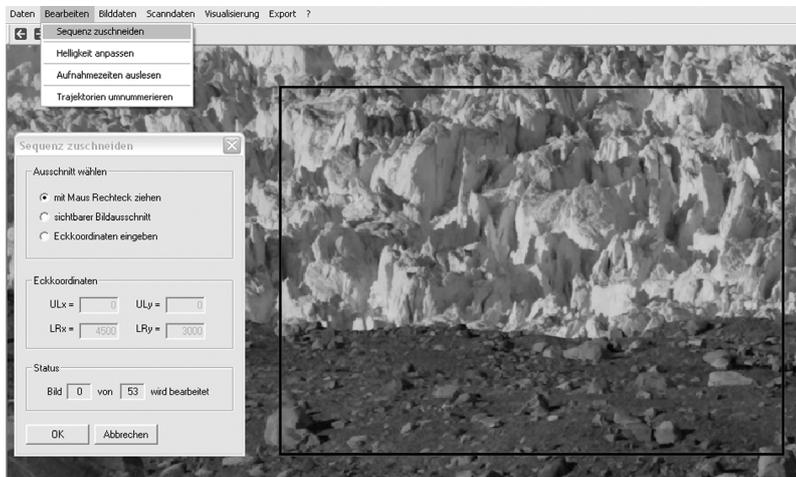
Unter diesem Menüpunkt können Veränderungen an den Sequenzbildern vorgenommen und Bildinformationen ausgelesen werden.

- Aufnahmezeitpunkte auslesen:

Alle Aufnahmezeitpunkte der Bilder einer Sequenz werden mit Datum und Uhrzeit ausgelesen und in einer separaten Datei gespeichert. Auf diese kann in späteren Auswerteschritten zugegriffen werden.

- Sequenz zuschneiden:

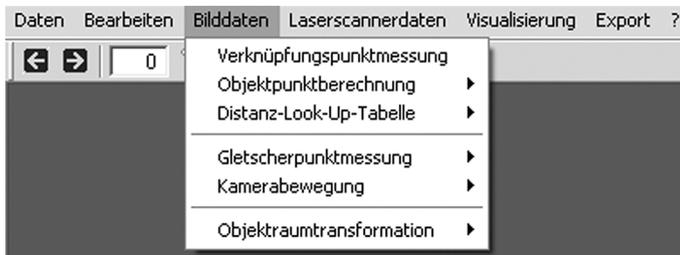
Es besteht die Möglichkeit, alle Bilder einer Sequenz auf einen ausgewählten kleineren Ausschnitt zu reduzieren.



- Helligkeit/Kontrastanpassung:

Es erfolgt eine globale Helligkeits- und Kontrastanpassung aller Bilder einer Sequenz an das Sequenzstartbild.

Menüpunkt „Bilddaten“



Unter diesem Menüpunkt können alle notwendigen Berechnungsschritte für die monoskopische Bildsequenzanalyse durchgeführt werden. Parametereinstellungen können über Dialogfelder vorgenommen werden.

- Verknüpfungspunktmessung:

Hier startet die automatische Verknüpfungspunktsuche (entsprechend Kapitel 4.2.3.2) in zwei geladenen Bildern nach interaktiver Zuordnung eines homologen Startpunktes. Für jede Kamera sind dazu die Parameter der inneren und äußeren Orientierung als ASCII-Datei bereitzustellen.

- Objektpunktberechnung:

→ Rückwärtsschnitt:

Es besteht die Möglichkeit, eine Kamera mittels räumlichem Rückwärtsschnitt zu orientieren.

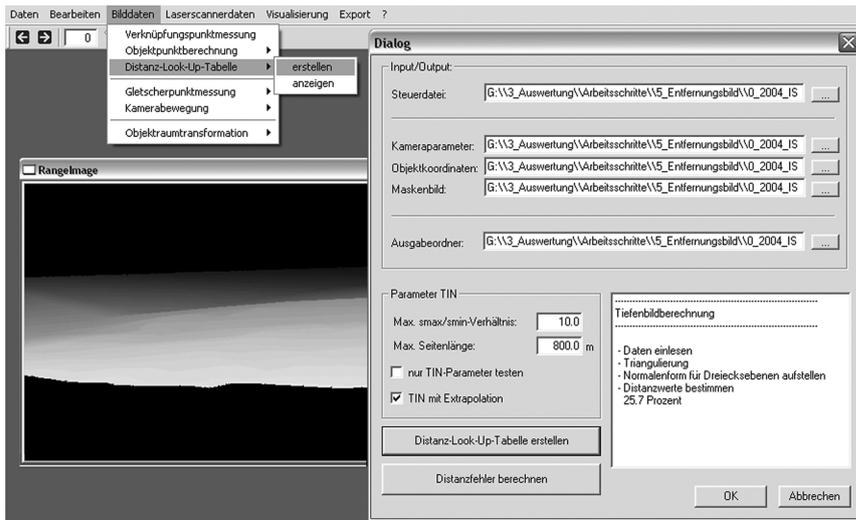
→ Bündelblockausgleichung:

Dieser Menüpunkt startet das extern vorliegende Konsolenprogramm zur Bündelblockausgleichung. Alle dafür notwendigen Inputdaten sind in einem entsprechenden Ordner bereitzustellen. Alle Ausgabe-dateien werden wiederum in einem dafür gewählten Ausgabeordner gespeichert.

- Distanz-Look-Up-Tabelle:

→ Erstellen:

Es öffnet sich der Dialog für die Berechnung von Distanz-Look-Up-Tabellen für einen bestimmten maskierten Bildausschnitt. Es sind die Objektkoordinaten der Gletscheroberfläche sowie die Parameter der inneren und äußeren Orientierung für das Standpunktreferenzbild bereitzustellen. Bei der Berechnung erfolgt die Triangulierung der Objektpunkte. Es können Parameter für den Ausschluss von Randdreiecken des TIN angegeben werden. Alle Parameter, sowie Aus- und Eingabepfade können über eine Steuerdatei geladen werden. Das erstellte TIN wird als VRML-Datei ausgegeben. Die Distanz-Look-Up-Tabelle wird im XML-Format gespeichert.



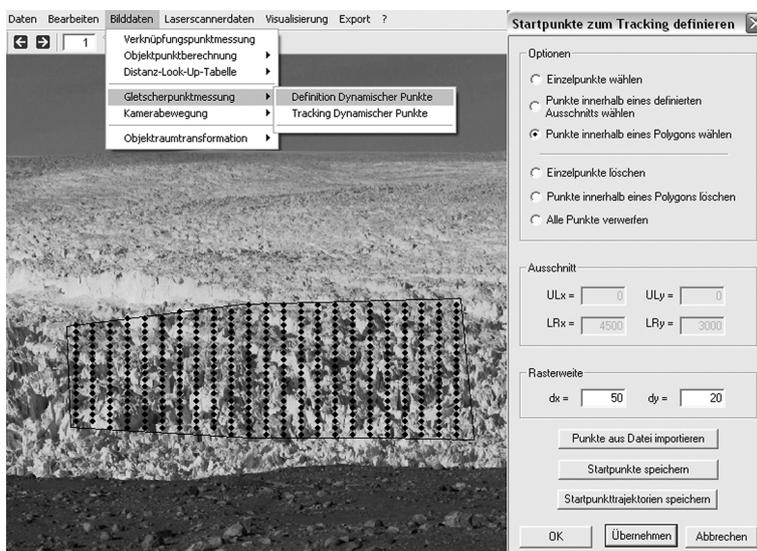
→ Anzeigen:

Die erstellte Distanz-Look-Up-Tabelle wird als farbkodiertes Entfernungsbild angezeigt.

- Gletscherpunktmessung:

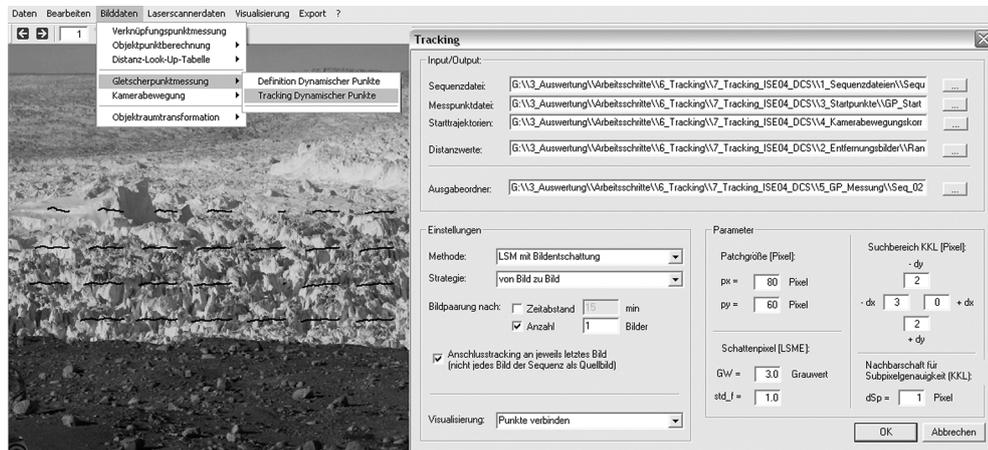
→ Definition dynamischer Punkte:

Es kann das Punktraster im Bild definiert werden, für welches Trajektorien gemessen werden sollen.



→ Tracking dynamischer Punkte:

Es öffnet sich der Dialog für das Tracking dynamischer Gletscherpunkte. Es sind jeweils die Parametereinstellungen der letzten Messung schon eingestellt. Alle Ein- und Ausgabepfade können über eine Steuerdatei geladen werden. Für die Trajektorienmessung können verschiedene Matchingverfahren (Kreuzkorrelationsverfahren, LSM, LSM mit Schattenpixelausschluss) und verschiedene Matchingstrategien gewählt werden.



- Kamerabewegung:

→ Definition unbewegter Punkte:

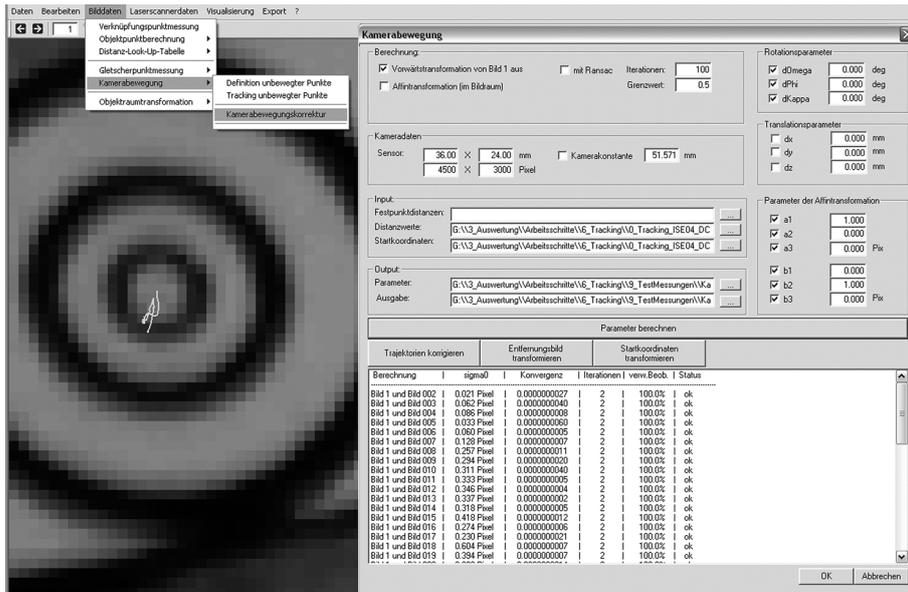
Es können die statischen Punkte im Bild definiert werden, die zur Bestimmung der Kamerabewegung dienen (vgl. Definition dynamischer Punkte).

→ Tracking unbewegter Punkte:

Öffnet den Dialog für das Tracking ortsfester Punkte (vgl. Tracking dynamischer Punkte).

→ Kamerabewegungskorrektur:

Öffnet das Dialogfeld für die Korrektur der Kamerabewegung. Nach Auswahl des Ordners mit den Trajektorien unbewegter Punkte werden die Parameter der Orientierungsänderung der Kamera oder die Parameter der Affintransformation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern der Kamera berechnet und in einer Datei gespeichert. Bei Verwendung natürlicher, ortsfester Punkte ist die Verwendung von RANSAC ratsam. Die Transformation mit den berechneten Parametern kann dann auf die Gletschertrajektorien angewandt werden oder sie werden genutzt, um Messpunkttraster und Distanz-Look-Up-Tabellen vom Standortreferenzbild in das jeweilige Sequenzstartbild zu transformieren.

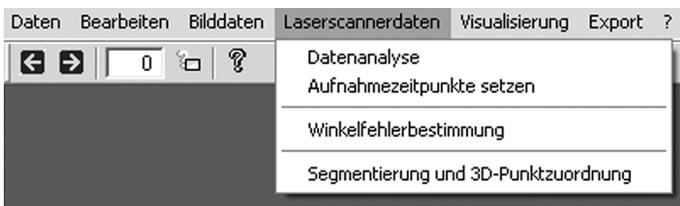


- Objektraumtransformation:

Nach Auswahl des Ordners mit den Trajektoriendateien, die bei der Messung im Bildraum erstellt wurden, sowie der Distanz-Look-Up-Tabelle erfolgt die Transformation der Trajektorien in den Objektraum. Die transformierten Trajektorien mit 3D-Koordinaten im übergeordneten Koordinatensystem werden in einem dafür ausgewählten Ausgabeordner gespeichert.

BildNr	X[m]	Y[m]	Z[m]	x[px]	y[px]	mx[px]	my[px]	m0[GW]	KK_Koeff	KK_Koeff_LSM	KK_Koeff_LSME	Beobachtungen[°]	Matchtyp
1	504196.351	7671836.127	126.955	58.858	518.173								
2	504195.998	7671836.443	126.878	58.241	518.283	0.0253	0.0224	4.0	0.78	0.83	0.88	38.8	2
3	504196.056	7671836.391	126.944	58.339	518.196	0.0285	0.0235	3.9	0.72	0.73	0.89	63.5	2
4	504195.869	7671836.558	127.091	58.002	518.015	0.0168	0.0156	3.7	0.90	0.93	0.96	41.2	2
5	504196.076	7671836.373	127.097	58.366	518.001	0.0182	0.0182	4.2	0.81	0.86	0.91	37.5	2
6	504195.982	7671836.457	126.899	58.211	518.256	0.0078	0.0076	5.3	0.92	0.95	0.97	67.0	2
7	504196.043	7671836.402	126.650	58.334	518.572	0.0078	0.0080	4.8	0.93	0.96	0.98	52.7	2
8	504196.034	7671836.410	126.997	58.298	518.129	0.0088	0.0094	4.9	0.90	0.96	0.98	50.1	2

Menüpunkt „Laserscannerdaten“



Unter diesem Menüpunkt können alle notwendigen Berechnungsschritte für die Analyse der multi-temporalen Laserscannerdaten durchgeführt werden. Parametereinstellungen erfolgen hier im Wesentlichen über Parameterdateien.

- Datenanalyse:

Die maximalen und minimalen Distanzen sowie Horizontal- und Vertikalwinkel jedes Scans werden ausgelesen. Eine Datei mit der entsprechenden Datenstatistik wird angelegt.

- Aufnahmezeitpunkte setzen:

Die individuellen Aufnahmezeitpunkte der einzelnen Scanpunkte werden anhand der Start- und Endzeiten jedes Laserscans bestimmt. Für jeden Scan wird eine Punktdatei erstellt, welche für jeden Punkt, dessen ID, seine kartesischen Koordinaten, seine Polarkoordinaten und seinen Aufnahmezeitpunkt enthält:

ID	X [m]	Y [m]	Z [m]	D [m]	Vz [°]	H _z [°]	Zeit [s]
22	557.91339	-3855.04492	-69.10496	3895.82009	91.016379	278.234836	0.519
23	557.88300	-3854.83496	-71.54942	3895.65211	91.052381	278.234836	0.543
24	557.88843	-3854.87256	-71.55012	3895.69010	91.052381	278.234836	0.567
26	541.00836	-3738.23755	-74.13203	3777.91021	91.124358	278.234836	0.614
27	541.04340	-3738.47974	-76.51134	3778.20231	91.160360	278.234836	0.638
28	540.97595	-3738.01367	-76.50179	3777.73129	91.160360	278.234836	0.661
30	540.79547	-3736.76660	-79.44277	3776.53221	91.205357	278.234836	0.708

- Winkelfehlerbestimmung:

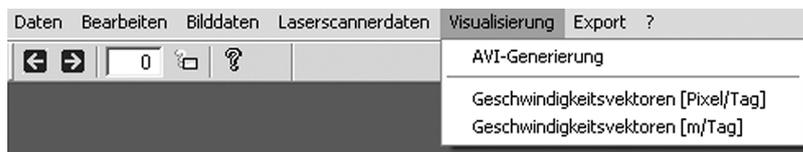
Winkelabweichungen zwischen benachbarten Teilscans können bestimmt werden. Die Berechnung kann im Batchlauf für alle Teilscanpaare durchgeführt werden. Alle Inputdaten werden in entsprechenden Ordnern bereitgestellt und die notwendigen Parameter in einer Parameterdatei vorgegeben. Im Anschluss daran erfolgt zuerst eine Korrektur der einzelnen Teilscans um die ermittelten Winkelabweichungen und dann die Überführung der einzelnen Teilscans in eine gemeinsame Punktdatei für den jeweiligen Epo- chenscan.

- Segmentierung und 3D-Punktzuordnung:

Dieser Menüpunkt umfasst die Segmentierung der Daten, die Punktzuordnung mittels ICP sowie die Be- rechnung der Geschwindigkeiten. Es sind die Punktdateien für die zu berechnenden Scanepochen sowie eine Parameterdatei mit allen notwendigen Auswerteparametern (Messpunktraster, Segmentgrößen, ...) zu wählen.

ID	X [m]	Y [m]	Z [m]	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	dt [s]	v [m/Tag]
27	503139.530	7669352.335	179.484	-2.930	2.587	1.088	29267.137	11.539
28	503210.897	7669359.129	179.138	-3.168	2.466	0.923	29543.256	11.741
29	503244.950	7669361.986	179.456	-3.893	3.746	0.005	29448.598	15.851
30	503443.690	7669516.303	171.123	-5.778	3.831	0.108	28810.427	20.790
31	503472.184	7669522.898	172.941	-7.182	4.895	0.024	28953.576	25.936
32	503507.729	7669537.553	175.806	-7.163	4.618	0.002	28953.776	25.432
33	503550.520	7669561.387	179.060	-7.574	4.642	0.197	28837.463	26.615

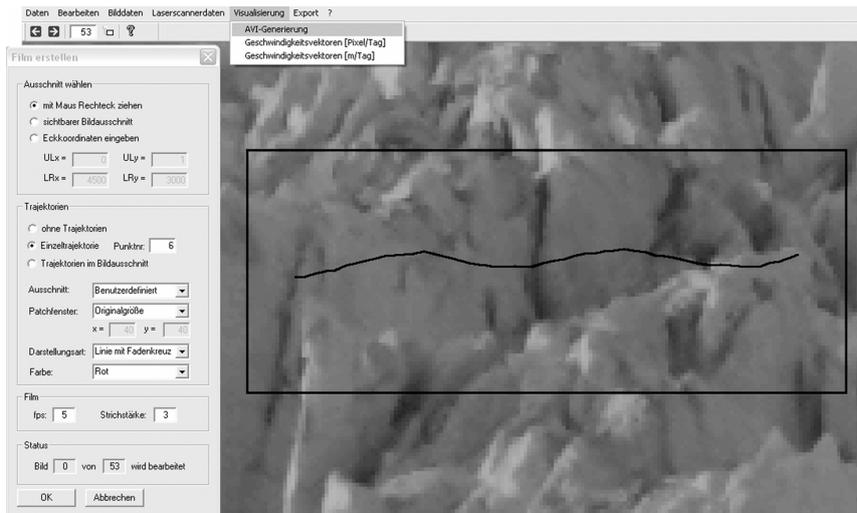
Menüpunkt „Visualisierung“



Unter diesem Menüpunkt be- stehen Visualisierungsmög- lichkeiten für die Ergebnisse.

- AVI-Generierung:

Es besteht die Möglichkeit, für beliebige Sequenzausschnitte Filme zu generieren und diesen die enste- henden Trajektorien zu überlagern.



- Geschwindigkeitsvektoren:

Die Geschwindigkeitsvektoren im Bildraum können als Überlagerung eines Sequenzbildes angezeigt werden. Sie werden dem Betrag ihrer Geschwindigkeit (im Bildraum in [Pixel/Tag] oder im Objektraum in [m/Tag] nach farbkodiert dargestellt. Dazu sind die in den Objektraum transformierten Trajektoriendateien sowie die Distanz-Look-Up-Tabelle auszuwählen.

A.4 Fehlerbetrachtung – Partielle Ableitungen für die Gleichungen 6.4

$$\frac{\partial \Delta x_i}{\partial D} = \frac{\Delta pix \cdot \sin(\alpha) \cdot (\Delta x'_i + \Delta kx'_i)}{c \cdot \sin(\alpha + \delta)}$$

$$\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta x'_i} = \frac{D \cdot \Delta pix \cdot \sin(\alpha)}{c \cdot \sin(\alpha + \delta)}$$

$$\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \Delta kx'_i} = \frac{D \cdot \Delta pix \cdot \sin(\alpha)}{c \cdot \sin(\alpha + \delta)}$$

$$\frac{\partial \Delta x_i}{\partial \delta} = -\frac{D \cdot \Delta pix \cdot \cos(\alpha + \delta) \cdot \sin(\alpha) \cdot (\Delta x'_i + \Delta kx'_i)}{c \cdot \sin(\alpha + \delta)^2}$$

$$\frac{\partial \Delta y_i}{\partial D} = \frac{\Delta pix}{c} \cdot (\Delta y'_i + \Delta ky'_i)$$

$$\frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta y'_i} = \frac{D \cdot \Delta pix}{c}$$

$$\frac{\partial \Delta y_i}{\partial \Delta ky'_i} = \frac{D \cdot \Delta pix}{c}$$