

Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ Gletscher in Grönland

H.-G. Maas, R. Dietrich, E. Schwalbe, M. Bäßler, P. Westfeld¹

Zusammenfassung: Der Jakobshavn Isbræ an der Westküste Grönlands ist einer der schnellsten und produktivsten Gletscher der Welt. Er wies über einen langen Zeitraum eine etwa konstante Bewegung von mehr als 20 Metern pro Tag auf und produziert jährlich Eisberge im Gesamtvolumen von ca. 30 km³. Aktuell hat sich die Geschwindigkeit des Gletschers auf ca. 35 Meter pro Tag beschleunigt. Im Sommer 2004 wurde am Isbræ eine photogrammetrische Messkampagne durchgeführt mit dem Ziel, aus terrestrischen Bildsequenzen einer hochauflösenden Digitalkamera räumlich-zeitliche Bewegungsmuster des Gletschers zu bestimmen.

Aufgrund des Charakters der Gletscherbewegung ist zunächst mit einem eindimensionalen Bewegungsvektorfeld zu rechnen, welches jedoch durch gezeiteninduzierte Höhenänderungen überlagert wird. Die Bewegungskomponente quer zur Fliessrichtung kann dagegen als vernachlässigbar angesehen werden. Daher wurden zur Bestimmung zweidimensionaler Bewegungsvektorfelder monokulare Bildsequenzen mit einer hochauflösenden Stillvideokamera Kodak DCS14n aufgenommen und ausgewertet. Die Einbringung eines Maßstabes erfolgte über geodätische Messungen sowie stereoskopische Aufnahmen in der ersten Epoche. Aus den Sequenzen wurden durch Kreuzkorrelation und Least-Squares-Matching aus der natürlichen Oberflächentextur des Gletschers Bewegungsvektoren bestimmt, wobei die Genauigkeit durch die extreme Topographie der Gletscheroberfläche und den Einfluss von Schattenwurf beeinträchtigt wird. Eine Signalisierung von Punkten auf dem Gletscher ist aufgrund der Unzugänglichkeit nicht möglich.

Bei einem aufgenommenen Gletscherausschnitt von ca. 2 km Länge kann die tägliche Bewegung von Strukturen der Gletscheroberfläche mit einer Standardabweichung in der Größenordnung von 0,2% der Länge des Bewegungsvektors bestimmt werden. Aus der Auswertung von Bildsequenzen mit einem Zeitintervall von 30 Minuten über eine Messdauer von 12 - 36 Stunden ist über die lineare Fliessbewegung hinaus deutlich eine Gezeitenabhängigkeit der Höhenkoordinate im vorderen Bereich des Gletschers zu erkennen. Die Resultate der terrestrischen photogrammetrischen Messungen stellen damit eine wertvolle Basis für glaziologische Untersuchungen am Jakobshavn Isbræ dar.

1. Einleitung

Der Jakobshavn Isbræ Gletscher (grönl. Sermeq Kujalleq) ist einer der aktivsten Gletscher der Welt. Er mündet an der Westküste Grönlands über den Kangia-Fjord in die Davis Strait (Abb. 1). Mit einer Bewegung von etwa 20 Metern pro Tag und einer Eisbergproduktion von ca. 30km³ pro Jahr drainiert er einen substantiellen Anteil von ca. 7% der jährlichen Niederschlagsmenge des grönländischen Inlandeises (Echelmeyer et al., 1992). Erste geodätische Messungen zur Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit des Gletschers im Bereich der Gletscherzunge wurden bereits vor mehr als 100 Jahren von (Hammer, 1893) und (Engell, 1904) durchgeführt. In den 50er und 60er Jahren wurden aus Luftbildern im Maßstab 1 : 50'000 Geschwindigkeitsprofile an einer Reihe von Gletschern der grönländischen Westküste bestimmt (Carbonell 1968, Bauer 1968). Die Resultate zeigen für den Jakobshavn Isbræ ein

¹ Technische Universität Dresden (hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de)

relativ gleichmäßiges Bewegungsmuster mit maximalen Bewegungen von 20-22 Metern pro Tag. Die Standardabweichung des Bewegungsvektors wird von (Carbonell, 1968) mit weniger als 1% der Länge des Bewegungsvektors angegeben.

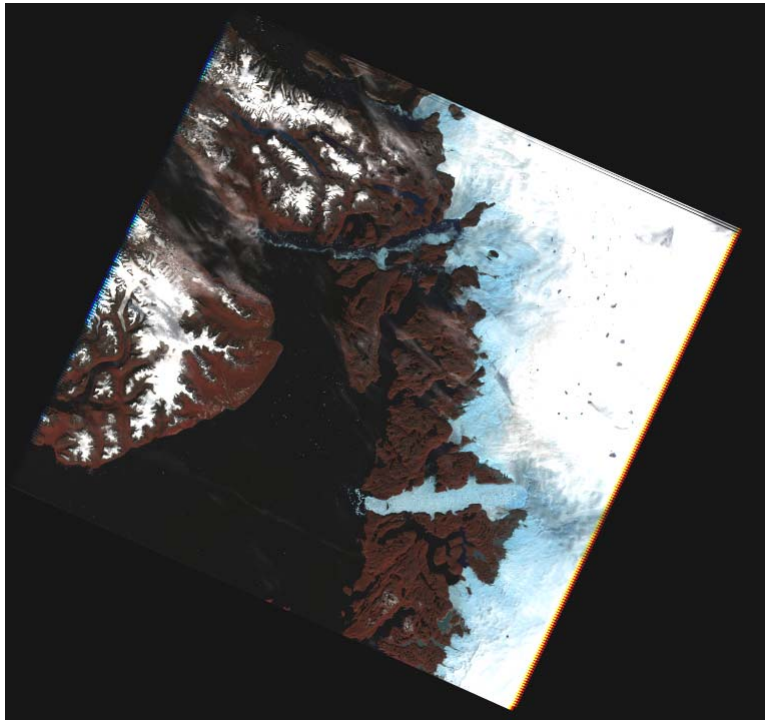


Abb. 1: Falschfarbeninfrarotaufnahme eines Gebiets von 185x185 km² an der Westküste Grönlands (Landsat, 8.9.2004). Unten im Bild ist der Kangerlussuaq Fjord zu erkennen, über welchen der Jakobshavn Isbræ in die Disko-Bucht mündet. Links ist die Disko-Insel zu sehen.

Die Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ und der Kangerlussuaq-Fjord bilden zusammen den Ilulissat Isfjord, welcher 2004 zum UNESCO-Weltnaturerbe erklärt wurde (Weidick et al., 2004; Bennike et al., 2004). Bis etwa 2000 befand sich der Gletscher in einer quasi-stabilen Periode und bestand aus einem einzigen Eisstrom. Seitdem ist ein dramatischer Rückzug der Gletscherfront zu beobachten, so dass der Gletscher nun in Form zweier getrennter Eisströme aus Norden und Osten in den Kangerlussuaq-Fjord mündet (Abb. 2).

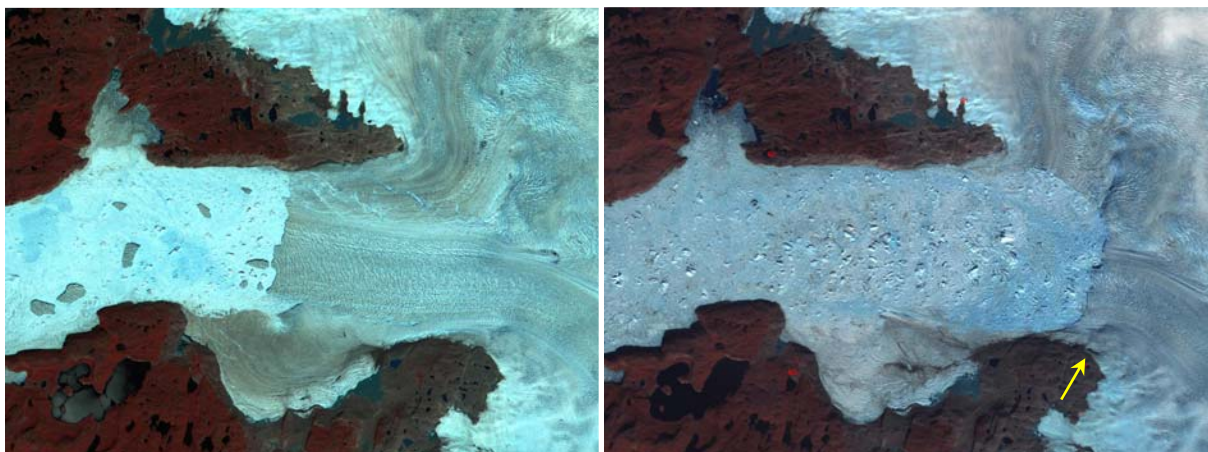


Abb. 2: Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ (Landsat-Aufnahmen vom 7.7.2001 + 8.9.2004)

Bei einer Breite des Kangerlussuaq-Fjords von ca. 7-10 km beträgt der Rückzug der Gletscherfront in einem Zeitraum von nur drei Jahren etwa 10 km. Gleichzeitig wurde durch Flugzeuglaser-scannermessungen eine Abnahme der Dicke des Gletschers von mehr als 10 Metern pro Jahr

festgestellt (Thomas et al., 2003), und die Fließgeschwindigkeit des Gletschers erhöhte sich auf ca. 35 Meter pro Tag (Joughin et al., 2004).

2. Messkampagne der TU Dresden 2004

Im Sommer 2004 führte die TU Dresden eine Messkampagne im Bereich der Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ durch. Das Ziel der photogrammetrischen Messungen dieser Kampagne war die Bestimmung von räumlich-zeitlich aufgelösten Geschwindigkeitsfeldern aus terrestrische Bildsequenzen. Diese Messungen dienen zunächst zur Verifikation aktueller Publikationen hinsichtlich der Zunahme der Fließgeschwindigkeit im Frontbereich des Jakobshavn Isbræ. Über die Bestimmung einzelner Geschwindigkeitsvektoren hinaus erlaubt die Aufnahme und Auswertung von Bildsequenzen die Bestimmung von Trajektorien und damit eine Analyse von Kurzzeitschwankungen der Geschwindigkeit. Diese sind vor allem zu erwarten, wenn die Gletscherzunge auf dem Fjord aufschwimmt. Zeitlich und räumlich aufgelöste Bewegungsfelder können somit einen Hinweis auf die Aufsetzlinie des Gletschers geben, die den Übergang zwischen dem auf dem Land aufliegenden und dem auf dem Fjord aufschwimmenden Teil des Gletschers darstellt. Darüber hinaus erlauben Aussagen über die Größe einer eventuellen gezeiteninduzierten Variation der Fließgeschwindigkeit die Erstellung von Modellen zur Korrektur von aus Satelliten-InSAR bestimmten Geschwindigkeitsvektoren.

Aus Gründen der Erreichbarkeit mussten die Messungen auf den südlichen, von Osten kommenden Eisstrom beschränkt werden. Dieser kann aus einer Entfernung von 1-3 km von Hügeln am südlichen Gletscherrand beobachtet werden (Pfeil in Abb. 2). Der nördliche Eisstrom ist in der gegenwärtigen Situation des Gletschers für terrestrische Messungen schlecht zugänglich.

3. Photogrammetrische Datenakquisition

Im Rahmen einer 14-tägigen Feldkampagne wurden mehrere lange Bildsequenzen im Bereich der Gletscherfront aufgenommen. Dazu wurde eine hochauflösende digitale Stillvideokamera Kodak DCS 14n verwendet. Die Kamera weist einen 4500x3000 Pixel CMOS-Sensor mit Bayer-Farbmuster auf und kann mit Wechselobjektiven ausgestattet werden. Durch ihren Intervallometermodus erlaubt sie die Aufnahme von Bildsequenzen über längere Zeiträume in vordefinierten Zeitintervallen. Mit einem Stromverbrauch von etwa 6 Watt im Standby-Modus ist dazu allerdings eine externe Stromversorgung notwendig. In der Feldkampagne wurden hierzu 24 AH Trockenbatterien verwendet, die eine Messdauer von ca. 48 Stunden erlaubten.



Abb. 3: Kodak DCS 14n am Jakobshavn Isbræ

Die Bildsequenzen decken Zeiträume von 12-36 Stunden ab. Längere Sequenzen konnten aufgrund der Wetterbedingungen und mangels regengeschützter Aufstellmöglichkeiten der Kamera nicht aufgenommen werden. Zum Nachweis der vermuteten gezeiteninduzierten Va-

riationen der Bewegungsgeschwindigkeit sollten Bildsequenzen eine Länge von mindestens 24 Stunden aufweisen. Dank der Lage des Gletschers auf etwa 70° nördlicher Breite stand im August auch nachts noch genügend Licht für Aufnahmen zur Verfügung. Zur Gewährleistung einer ausreichenden zeitlichen Auflösung wurde der Intervallometer auf 30 Minuten eingestellt. Bewegungen der Kamera, verursacht durch Windeffekte, Aufwärmung der Stativbeine und Instabilitäten des Untergrundes wurden durch die Messung der Bildkoordinaten von Zielmarken im Vordergrund des Bildes kompensiert. Je nach verwendeter Objektivbrennweite betragen diese Bildbewegungen bis zu 10 Pixel.

Die Aufnahme beschränkte sich auf monokulare Bildsequenzen. Eine stereoskopische Aufnahme erscheint aufgrund der durch die extrem zerklüftete Struktur der Gletscheroberfläche verursachten starken Dekorrelation der Inhalte stereoskopischer Bilder wenig erfolgversprechend. Die Dynamik der Gletscherbewegung lässt allerdings auch keine signifikanten Bewegungen quer zur Fliessrichtung erwarten, so dass eine senkrecht zur Fliessrichtung orientierte Kamera für die Aufnahme ausreichend erscheint.

Zur Skalierung der im Bildraum gemessenen Geschwindigkeitsinformation ist bei der monokularen Auswertung Tiefeninformation zur Bestimmung des lokalen Bildmaßstabes notwendig. Dafür ergeben sich folgende Optionen:

- Aufnahme von Stereopaaren: Zusätzlich zur monokularen Bildsequenz wurden zu jedem Datensatz am Anfang der Sequenz Stereopaare aufgenommen, die eine Bestimmung der 3D-Koordinaten von Punkten im lokalen System ermöglichen. Die Datumsinformation für die absolute Orientierung der Stereopaare erfolgt über geodätisch bestimmte Passpunkte; alternativ kann ein minimales Datum über eine einzelne Streckenmessung im Vordergrund des aufgenommenen Bereichs definiert werden. Aus den 3D-Koordinaten der Stereoauswertung kann ein lokaler Maßstab bestimmt werden, der unter Annahme einer Fliessrichtung parallel zur Bildebene auf die Skalierung in der Bildsequenz verfolgter Punkte übertragen werden kann.
- Skalierung auf geodätisch bestimmte Geschwindigkeitsvektoren: Prinzipiell kann die Geschwindigkeitsinformation für Gletscherpunkte auch geodätisch durch Vorwärtsschnitte bestimmt werden (Hammer, 1893). Der damit verbundene Aufwand erlaubt jedoch lediglich die Bestimmung von Geschwindigkeitsvektoren einzelner Punkte und keine zeitaufgelösten Trajektorien. Die geodätisch bestimmten Geschwindigkeitsvektoren können jedoch bei synchroner Messung zur Skalierung photogrammetrisch bestimmter Trajektorien verwendet werden. Der hiermit verbundene Aufwand ist jedoch jedenfalls so hoch, dass er allenfalls für die Transformation von Einzelpunkten in Frage kommt.
- Entzerrung auf Basis einer Landsat-Aufnahme: Prinzipiell bietet sich auch die Nutzung der in Abb. 1 gezeigten georeferenzierten Landsat-Szene als Basis für eine Entzerrung der Schrägaufnahmen der Bildsequenz mit dem Ziel der Bestimmung des lokalen Maßstabes an. Die angestrebte Genauigkeit der Maßstabsbestimmung von 1% ist damit allerdings nicht erreichbar.

4. Datenverarbeitung



Abb. 4: Messaufnahme am Jacobshavn Isbræ

Abb. 4 zeigt ein Einzelbild einer 24-Stunden Sequenz, aufgenommen mit einem 50mm-Objektiv. In den monokularen Bildsequenzen können durch Kreuzkorrelation an vorgegebenen oder auf einem regelmäßigen Raster definierten Stellen Muster verfolgt werden. Dabei erwies sich die extrem zerklüftete Oberfläche des Gletschers in Kombination mit einem aufgrund des Sonnenganges stark variierenden Schattenwurf teilweise als problematisch. Zusätzliche Irregularitäten wurden durch Schatten durchziehender Wolkenfelder verursacht. Diese Effekte bewirken an vielen Stellen eine starke Dekorrelation identischer Bildausschnitte aufeinanderfolgender Zeitpunkte, welche eine signifikante Verfälschung der Ergebnisse der Punktzuordnung bewirken kann. Eine strenge Modellierung der Effekte würde ein Oberflächenmodell des Gletschers voraussetzen, was allenfalls – unter erheblichem Aufwand – aus gleichzeitig aufgenommenen Flugzeuglaserscannerdaten sehr hoher Punktdichte generiert werden könnte. Da solche Daten nicht zur Verfügung stehen, können die Effekte nur durch eine gezielte Wahl der zu verfolgenden Muster, zusätzliche Bedingungen bei der Kreuzkorrelation, eine nachträgliche Filterung der Trajektorien sowie die Wahl großer Korrelationsfenster reduziert werden. In den hier vorgestellten ersten Auswertungen wurden Korrelationsfenster von 40×40 Pixel mit einem vorwärtsorientierten beschränkten Suchbereich verwendet. Die daraus erhaltenen Trajektorien wurden um die aus der Beobachtung der Zielmarken im Bild ermittelten Kamerabewegung korrigiert und anschließend gefiltert. Trajektorien mit nicht plausiblen Sprüngen wurden dabei gelöscht. Auch mit diesen Zusatzmaßnahmen war in der Regel nur eine Verfolgung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern möglich. Eine aus Sicht der Fehlerfortpflanzung wünschenswerte Zuordnung aus dem ersten Bild in alle weiteren Bilder scheiterte in den meisten Fällen.

Ähnliche Probleme bei der Bestimmung korrespondierender Punkte in multi-temporalen Aufnahmen des Jacobshavn Isbræ berichtet auch (Carbonell, 1968) für die interaktive Auswertung von analogen Luftbildern, welche mit einem Zeitabstand von wenigen Tagen aufgenommen wurden.

Die Umsetzung der in Kapitel 3 diskutierten Ansätze zur Transformation der im Bildraum bestimmten Trajektorien in den Objektraum erwies sich zunächst als unerwartet schwierig:

- Die Zuordnung homologer Punkte in Stereobildpaaren und die Übertragung von Punkten aus den Stereopaaren in die Bildsequenz kann aufgrund der Dekorrelation homologer

Bildregionen, welche hier zusätzlich durch unterschiedliche Perspektiven verstärkt wird, in der Regel nur interaktiv erfolgen. Geodätisch gemessene Passpunkte auf dem Gletscher sind in den Bildern teilweise nur schwer identifizierbar. Durch die Gletschertopographie und die schrägen Visuren ergibt sich eine ziemlich ungünstige Netzgeometrie. Manche Datensätze erwiesen sich damit als nicht auswertbar.

- Die Realisierung der Entzerrung auf der Basis geodätisch bestimmter Passpunkte scheiterte aufgrund der Schwierigkeit der Erkennung identischer Punkte im Vorwärtsschnitt und in der Übertragung in den Bildraum sowie an der ungünstigen Geometrie mit extremer Schrägvisur.
- Eine Entzerrung auf die Landsat-Szene scheiterte ebenfalls aufgrund der Unmöglichkeit der Übertragung von Punkten aus den terrestrischen Aufnahmen in die Landsat-Szene, der schrägen Visur und des Einflusses der Gletschertopographie.

5. Resultate

Erste Zwischenergebnisse der Datenprozessierung zeigen trotz der im Vorigen genannten Erschwernisse einer automatischen Musterverfolgung die erwarteten Phänomene. Aus geodätischen Messungen an 13 Punkten, welche u.a. zur Skalierung der im Bildraum bestimmten Trajektorien dienten, ergab sich eine mittlere Geschwindigkeit von 35 Metern pro Tag. Die Trajektorien einer ausgewerteten 24-Stunden Sequenz vom 20. August 2004

zeigen eine gleichmäßige Bewegung des Gletschers in Fließrichtung. Die Analyse der Vertikalkomponente der Bewegung zeigt jedoch eindeutig eine zeitliche Variabilität.

Abb. 5 zeigt die Höhenkomponente eines Gletscherpunktes nahe der Gletscherfront in 30-Minuten Schritten über 24 Stunden. Darin sind zwei Maxima und Minima gut erkennbar. Die Extremwerte der Y-Komponente der Trajektorie weisen eine eindeutige Korrelation mit der berechneten Gezeitenkurve für den Pegel Ilulissat (ca. 50 km westlich an der Mündung des Kangia-Fjords in die Disko Bucht) auf.

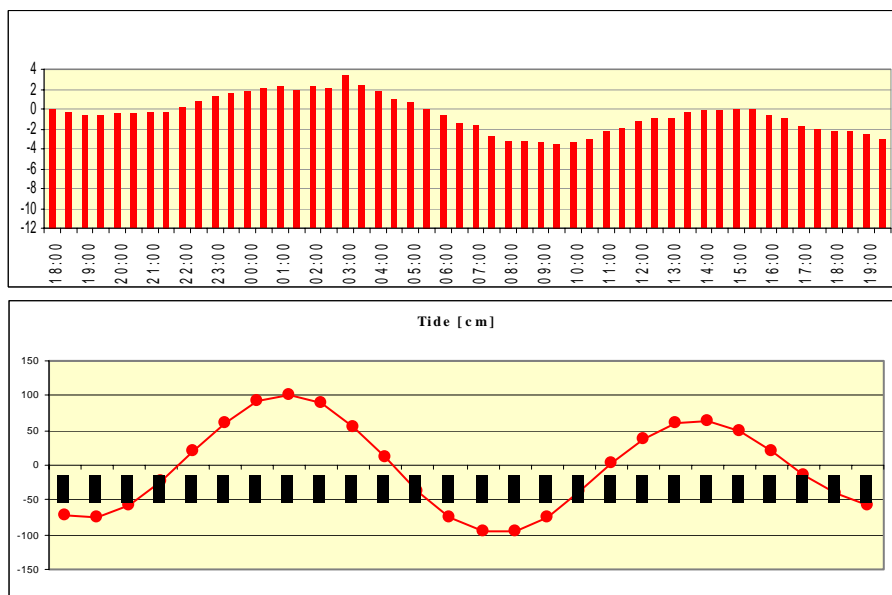


Abb. 5: Bewegung eines Gletscherpunktes über 24 Stunden (oben), zugehörige berechnete Gezeitenkurve für den Pegel Ilulissat

Der Hub der Höhenkoordinate des beobachteten Gletscherpunktes, korrigiert um den Trend der Abwärtsbewegung über 24 Stunden, beträgt etwa 7 Pixel, was sich auf etwa 2 Meter im Objektraum übersetzt. Benachbarte Punkte im Bereich der Gletscherfront bestätigen diese

Beobachtungen, während der vertikale Hub der Trajektorien in östlicher Richtung – von der Gletscherfront weg – abnimmt. Dies beweist, dass der Gletscher im vorderen Bereich auf dem Kangia-Fjord aufschwimmt, und widerlegt eine entgegengesetzt lautende These, die in (Bauer, 1968) – trotz einer zu dem Zeitpunkt deutlich weiter in den Fjord reichenden Gletscherzunge – aufgestellt wird.

6. Ausblick

Die Auswertung terrestrischer Bildsequenzen hochauflösender Digitalkameras kann einen wertvollen Beitrag zur glaziologischen Forschung an schnellen arktischen oder antarktischen Gletschern liefern. Vorteile des Verfahrens liegen in der flexiblen und kostengünstigen Datenakquisition und der hohen zeitlichen Auflösung über kurze Zeiträume bei gleichzeitig erzielbarer räumlicher Auflösung. Ein offensichtlicher Nachteil terrestrischer Aufnahmeverfahren ist die limitierte Sicht sowie die eingeschränkte Eignung für Langzeituntersuchungen. Somit stellt die terrestrische Photogrammetrie hier vor allem eine interessante Ergänzung luftbild- oder satellitenbildgestützter Aufnahmen dar.

Die automatische Auswertung der Aufnahmen erwies sich aufgrund stark variierender Beleuchtungsbedingungen als teilweise schwierig und bedingt eine vorsichtige Handhabung von Werkzeugen der Bildanalyse und eine Filterung der Resultate. Die erzielten Resultate zeigen eindeutig die erwarteten gezeiteninduzierten Höhenänderungen von Gletscherpunkten im Bereich der Gletscherfront.

Für zukünftige Kampagnen erscheinen eine Reihe von Verbesserungen bzw. Erweiterungen des Verfahrens sinnvoll: Zur Erzielung längerer Bildsequenzen sollte eine wettergeschützte Aufstellung der Kamera vorgesehen werden. Eine wesentliche Verbesserung der Auswerteprozedur ist durch die Integration von Werkzeugen der robusten Schätzung in die zur Musterverfolgung angewandten Bildanalyseverfahren zu erwarten. Schließlich erscheint – derzeit allerdings limitiert auf Aufnahmeentfernungen bis maximal ca. 600 Meter – die Verwendung terrestrischer Laserscanner als eine interessante Alternative zur Aufnahme durch Kameras. Laserscanner sind unabhängig von der Bildtextur der aufgenommenen Oberfläche und sind daher frei von Anfälligkeiten gegenüber Beleuchtungsbedingungen und Schattenwurf; gleichzeitig liefern sie als polares Messverfahren dreidimensionale Koordinaten und erlauben damit die Bestimmung aller drei Komponenten des Bewegungsfeldes ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Messungen zur Bestimmung der Skalierung der Trajektorien.

Danksagung: Die Arbeiten am Jacobshavn Isbræ sowie die Auswertung der Daten wurden durch die DFG unterstützt.

Literaturangaben:

- Bauer, A., 1968: Missions Aériennes de reconnaissance au Groenland 1957-1958. Meddeleser om Grønland, Kommissionen for videnskabelige Undersøgelser i Grønland, Vol. 173, Nr. 3
- Bennike, O., Mikkelsen, N., Pedersen, H., Weidick, A., 2004: Ilulissat Isfjord - a world heritage site. GEUS, Kopenhagen, ISBN 87-7871-136-3
- Carbonell, M., Bauer, A., 1968: Exploitation des couvertures photographiques aériennes répétées du front des glaciers vélant dans Disko Bugt et Umanak Fjord, juin-juillet 1964.

Meddeleser om Grønland, Kommissionen for videnskabelige Undersøgelser i Grønland, Vol. 173, Nr. 5

- Echelmeyer, K., Harrison, W., Clarke, T., Benson, C., 1992: Surficial glaciology of Jakobshavns Isbræ, West Greenland: Part II. Ablation, accumulation and temperature. *Journal of Glaciology*, Vol. 38, pp. 169-181
- Engell, M., 1904: Undersøgelser og Opmaalinger ved Jakobshavns Isfjord og i Orpigsuit I Sommersen 1902. Meddeleser om Grønland, Kommissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland, Vol. 4
- Hammer, R., 1893: Undersøgelser ved Jakobshavns Isfjord og nærmste Omegn i Vinteren 1879-1880. Meddeleser om Grønland, Kommissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland, Vol. 26
- Joughin, I., Abdalati, J., Fahnestock, M., 2004: Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier. *Nature*, 432, pp. 608-610
- Thomas, R., Abdalati, W., Frederick, E., Krabill, W., Manizade, S., Steffen, K., 2003: Investigation of surface melting and dynamic thinning on Jakobshavn Isbræ, Greenland. *Journal of Glaciology* 49, pp. 231-239
- Weidick, A., Mikkelsen, N., Mayer, Chr., Podlech, S., 2004: Jakobshavn Isbræ, West Greenland: The 2002-2003 collapse and nomination for the UNESCO World Heritage List. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 4, pp. 85-88