

Analyse des Bewegungsverhaltens des Jakobshavn Isbræ Gletschers in Grönland durch monokulare Bildsequenzanalyse*

HANS-GERD MAAS, REINHARD DIETRICH, ELLEN SCHWALBE, MICHAEL BÄBLER & PATRICK WESTFELD, Dresden

Keywords: Image sequence analysis, tracking, glaciology

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 20 Metern pro Tag auf und produziert jährlich Eisberge im Gesamtvolumen von ca. 30–40 km³. Aktuell hat sich die Geschwindigkeit des Gletschers auf ca. 35–40 Meter pro Tag beschleunigt, verbunden mit einem dramatischen Rückgang der Gletscherfront. Im Sommer 2004 wurde am Isbræ eine photogrammetrische Messkampagne durchgeführt mit dem Ziel, aus terrestrischen Bildsequenzen einer hoch auflösenden Digitalkamera räumlich-zeitliche Bewegungsmuster des Gletschers zu bestimmen.

Aufgrund der Charakteristik 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 hoch auflösenden Stillvideokamera Kodak DCS14n aufgenommen und ausgewertet. Die Einbringung eines Maßstabes erfolgte über ein geodätisch-photogrammetrisches Netz. Aus der natürlichen Oberflächentextur des Gletschers in den Bildsequenzen wurden durch Korrelationsverfahren Bewegungsvektoren und -trajektorien bestimmt.

Bei einem aufgenommenen Gletscherausschnitt von ca. 2 km Länge kann die tägliche Bewegung von Strukturen der Gletscheroberfläche mit einer Standardabweichung in der Größenordnung von 0,1–0,2% der Länge des Bewegungsvektors bestimmt werden, wobei die Genauigkeit vor allem durch die extreme Topographie der Gletscheroberfläche und den Einfluss von Schat-

Summary: *Analysis of motion patterns of Jakobshavn Isbræ glacier (West Greenland) by monocular image sequence analysis.* Jakobshavn Isbræ at the west coast of Greenland is one of the fastest and most productive glaciers in the world. It has been moving with an average velocity of 20 meters per day over a long time, and it produces a total annual iceberg volume of 30–40 km³. In recent years a dramatic retreat of the glacier front has been observed. At the same time, a significant increase of the moving velocity to 35–40 meter per day has been reported. In summer 2004, a photogrammetric measurement campaign has been conducted at the front of Jakobshavn Isbræ with the goal of determining precise spatio-temporal velocity fields from high resolution terrestrial digital camera image sequences.

The character of the glacier movement suggests a one-dimensional motion field, possibly superimposed by tide-induced height changes. The velocity component perpendicular to the general flow direction of the glacier can be considered negligible. Therefore monocular image sequences, recorded by a high resolution still-video camera Kodak DCS14n were recorded and processed. Trajectories describing the glacier motion were determined by adapted image matching techniques based on the natural surface texture of the glacier. A scale factor for each image space trajectory was derived from a geodetic-photogrammetric network.

From these image sequences, transformed into object space, the daily motion rate of glacier surface structures could be determined at a precision of a few centimeters over a field of view of ap-

* Erweiterte und überarbeitete Fassung eines Beitrages zur DGPF-Jahrestagung 2005.

tenwurf limitiert wird. 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.

proximately 2 kilometers. The results obtained from processing image sequences recorded over 12–36 hours show daily motion rates of 40 meter per day and a clear correlation of the height component with the tidal curve. This indicates that the glacier front is floating on the fjord. The results of the photogrammetric measurements form a valuable basis for glaciological research of the changing behaviour of Jakobshavn Isbræ.

1 Einleitung

Der Jakobshavn Isbræ Gletscher (grönl.: Sermeq Kujalleq) ist einer der aktivsten Gletscher der Welt. Er mündet an der Westküste Grönlands über den etwa 60 km langen Kangia-Fjord in die Davis Strait (Abb. 1). Mit einer Bewegung von etwa 20 Metern pro Tag und einer Eisbergproduktion von ca. 30–40 km³ pro Jahr drainiert er einen substantiellen Anteil von ca. 7%

der jährlichen Niederschlagsmenge des grönländischen Inlandeises (ECHELMMEYER 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 1:50000 Geschwindigkeitsprofile an einer Reihe von Gletschern der grönländischen Westküste

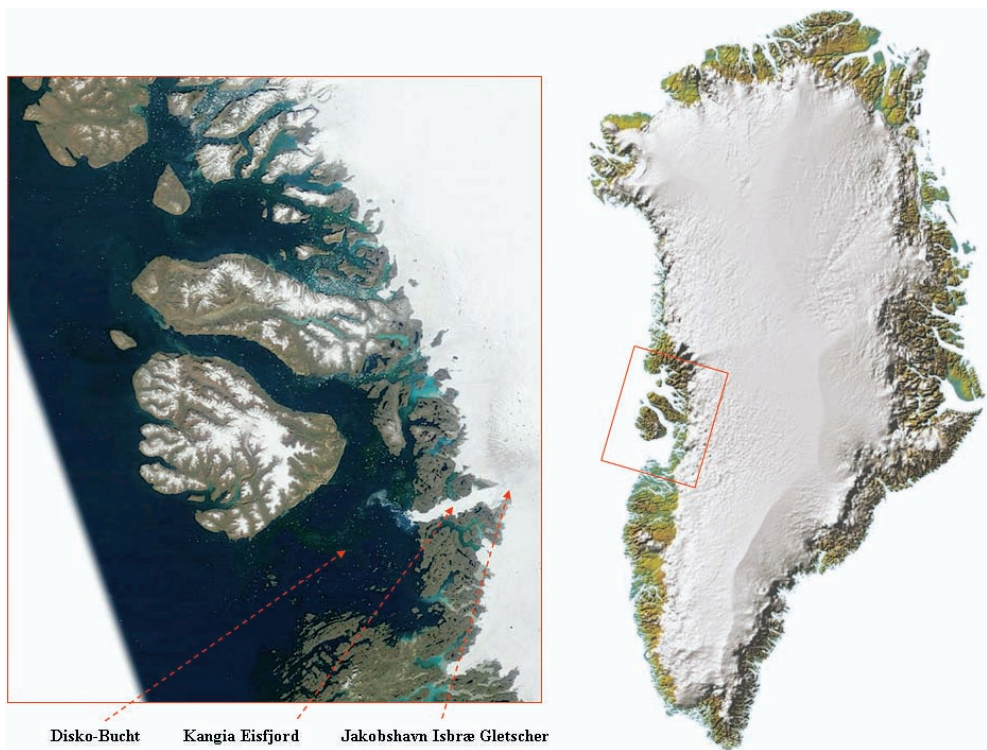


Abb. 1: Geographische Situation von Jakobshavn Isbræ Gletscher und Kangia Eisfjord.

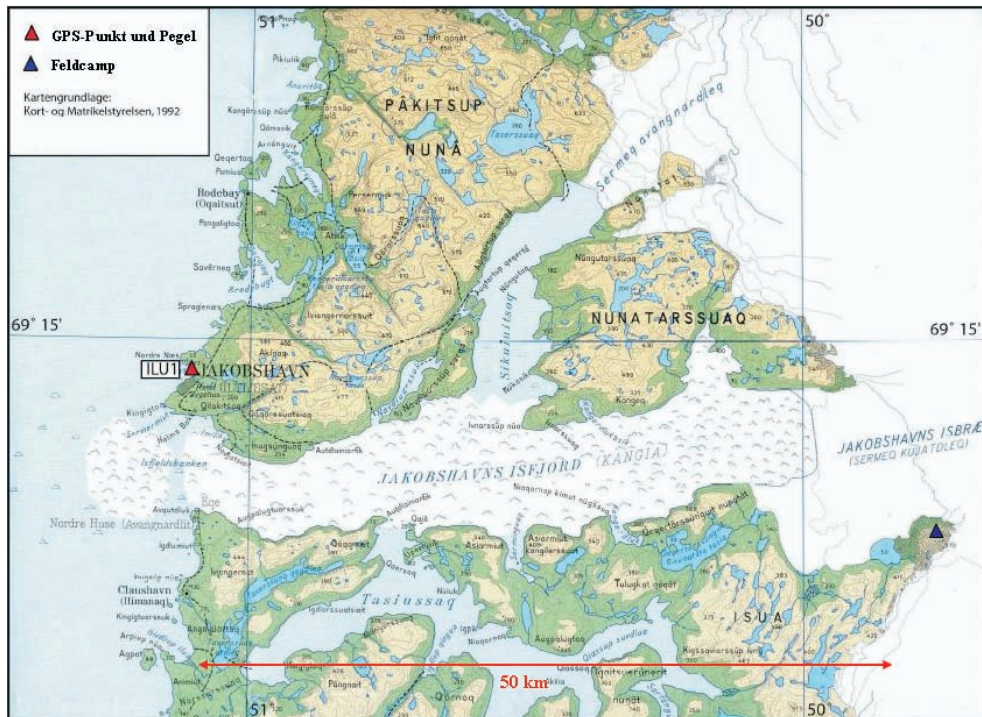


Abb. 2: Kartenausschnitt Jakobshavn Isfjord.

bestimmt (CARBONELL 1968, BAUER 1968). Die Resultate zeigen für den Jakobshavn Isbræ ein 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.

Die Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ und der Kangia-Fjord bilden zusammen den Ilulissat Isfjord (Abb. 2), 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 mündete als 10 km breiter Eisstrom in den Kangia-Fjord. 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 Kangia-Fjord mündet (Abb. 3).

Bei einer Breite des Kangia-Fjords von ca. 9–10 km am östlichen Ende beträgt der Rückzug der Gletscherfront in einem Zeit-

raum von nur drei Jahren etwa 10 km. Gleichzeitig wurde durch Flugzeug-Laserscannermessungen 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 nach Satellitenbilddauswertungen der NASA auf ca. 35 Meter pro Tag (JOUGHIN et al. 2004).

2 Messkampagne der TU Dresden 2004

Im August 2004 führte die TU Dresden (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Institut für Planetare Geodäsie) 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 terrestrischen Bildsequenzen. Diese Messungen dienten zunächst zur Verifikation aktueller Publikationen hin-

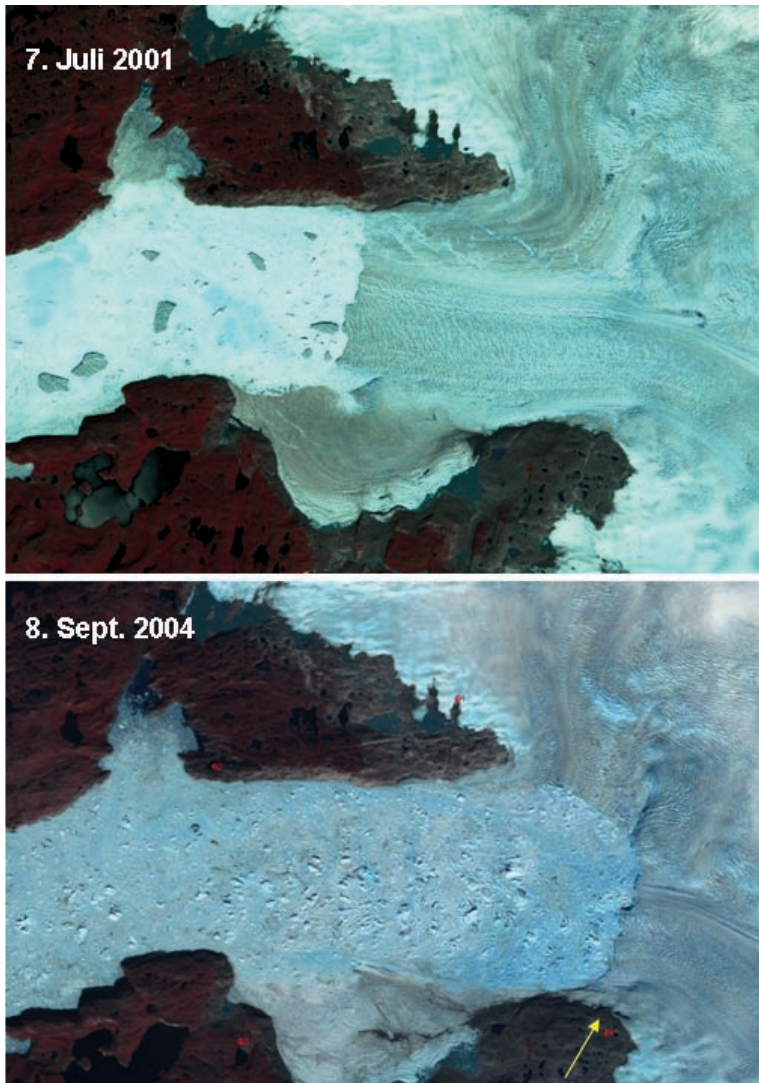


Abb. 3: Rückgang der Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ (Landsat-Aufnahmen vom 7. 7. 2001 und 8. 9. 2004).

sichtlich 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 des Gletschers. Diese sind vor allem zu erwarten, wenn die Gletscherzunge auf dem Fjord auf-

schwimmt. 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 Gezeiten-induzierten Variation der Fließgeschwindigkeit die Erstellung von Modellen

zur Korrektur von aus Satelliten-InSAR bestimmten Geschwindigkeitsvektoren.

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

3 Photogrammetrische Datenakquisition

Im Rahmen einer 14-tägigen Feldkampagne wurden mehrere lange Bildsequenzen im Bereich der Gletscherfront aufgenommen. Dazu wurde eine hoch auflösende digitale Stillvideokamera Kodak DCS 14n verwendet (Abb. 4). Die Kamera weist einen 4500x3000 Pixel CMOS-Sensor mit Bayer-Farb-

muster auf und kann mit Wechselobjektiven ausgestattet werden. Durch ihren Intervallometer-Modus 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 Gelbatterien verwendet, die eine Messdauer von ca. 48 Stunden erlaubten.

Die Bildsequenzen decken Zeiträume von 12–36 Stunden ab. Längere Sequenzen konnten aufgrund der Wetterbedingungen und mangels regengeschützter Aufstellmöglichkeiten der Kamera zunächst nicht aufgenommen werden. Zum Nachweis der vermuteten gezeiteninduzierten Variationen der Bewegungsgeschwindigkeit sollten Bildsequenzen eine Länge von mindestens 24 Stunden aufweisen. Dank der Lage des Gletschers auf etwa 70° nördlicher Breite stand bis Mitte August auch nachts noch genügend Licht für Aufnahmen zur Verfügung.



Abb. 4: Kodak DCS 14n am Jakobshavn Isbræ.



Abb. 5: Messaufnahme am Jacobshavn Isbræ.

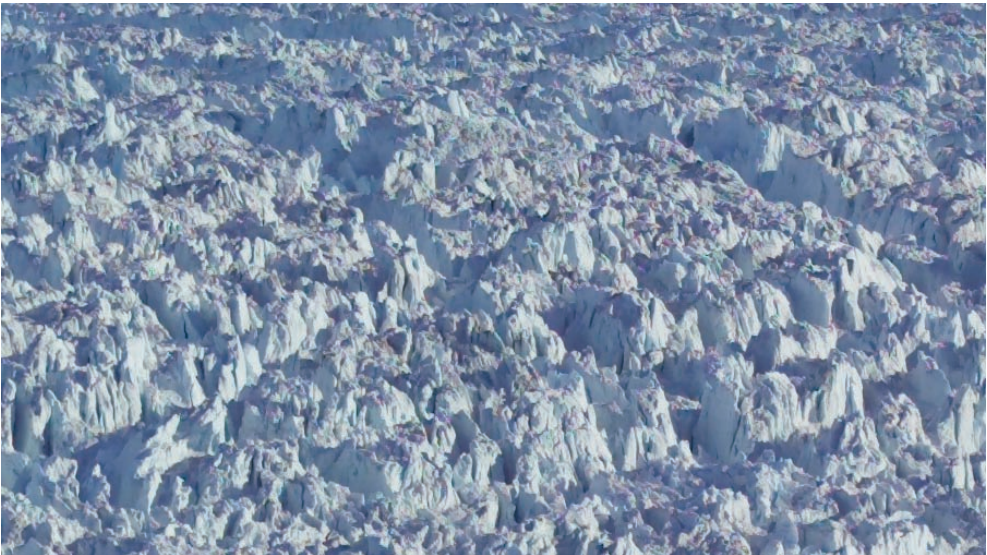


Abb. 6: Ausschnitt aus Abb. 5.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden zeitlichen Auflösung wurde der Intervallometer auf 30 Minuten eingestellt. Bewegungen der Kamera, verursacht durch Windefekte, Einsinken und Aufwärmung der Stativbeine sowie Instabilitäten des Untergrunds wurden durch die Messung der Bildkoordinaten von vier ortsstabilen Zielmarken im Vordergrund des Bildes kompensiert (Abb. 6). 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 (Abb. 6) und wandernde Schatten verursachten starken Dekorrelation der Inhalte stereoskopischer Bilder und auch aufgrund der lokalen Geographie wenig Erfolg versprechend. Die Dynamik der Gletscherbewegung lässt allerdings keine signifikanten Bewegungen quer zur Fließrichtung erwarten, so dass eine senk-

recht zur Fließrichtung orientierte Kamera für die Aufnahme ausreichend ist.

Zur Skalierung der im Bildraum gemessenen Geschwindigkeitsinformation ist bei der monokularen Auswertung dennoch Tiefeninformation zur Bestimmung des lokalen Bildmaßstabes notwendig. Zu dem Zweck wurden durch ein geodätisches Netz auf der Basis von GPS-Messungen und tachymetrischen Vorwärtsschnitten Passpunkte auf dem Gletscher generiert, welche zur Lagerung eines zusätzlich zur eigentlichen Bildsequenz aufgenommenen photogrammetrischen Bildverbandes aus sechs Aufnahmen diente. Dadurch wird es möglich, durch eine grobe Differentialverzerrung über aus dem Bildverband ermittelte 3D-Koordinaten einen individuellen Maßstab für jede Trajektorie zu bestimmen.

4 Datenverarbeitung

Abb. 5 zeigt ein Einzelbild einer 24-Stunden Sequenz, aufgenommen mit einem 50 mm Objektiv. In den monokularen Bildsequenzen können durch Kreuzkorrelation oder Least-Squares-Matching an vorgegebenen oder auf einem regelmäßigen Raster definierten Stellen Muster verfolgt werden (Abb. 7). Dabei erwies sich die extrem zerklüftete Oberfläche des Gletschers in Kombination mit einem aufgrund des Sonnenanges um beinahe 360° 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 aufeinander folgender 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 zeitgleich aufgenommenen Flugzeug-Laser-scannerdaten sehr hoher Punktdichte generiert werden könnte. Da solche Daten nicht zur Verfügung stehen, können die Effekte nur durch zusätzliche Bedingungen bei der Kreuzkorrelation, die Wahl großer Korrela-

tionsfenster sowie eine nachträgliche Filterung der Trajektorien reduziert werden. In den hier vorgestellten ersten Auswertungen wurden Korrelationsfenster von 40x40 Pixel mit einem vorwärts orientierten und durch Prädiktion 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 aufeinander folgenden Bildern möglich. Eine aus Sicht der Fehlerfortpflanzung wünschenswerte Zuordnung aus dem ersten Bild in alle weiteren Bilder scheiterte in den meisten Fällen. Die Standardabweichung der Verschiebungsparameter der Bild-zu-Bild-Zuordnung liegt meist unter 0,1 Pixel (WESTFELD 2005). Optional kann eine durch die Bild-zu-Bild-Zuordnung verursachte Drift der Trajektorie durch eine zusätzliche Bildzuordnung zwischen zwei Aufnahmen mit 24 Stunden Zeitabstand korrigiert werden.

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

Zur Bestimmung räumlich-zeitlicher Geschwindigkeitsfelder aus den monokularen Bildsequenzen wurden im ersten Bild der Sequenz ca. 1500 Punkte auf einem regelmäßigen Gitter über einen vorgegebenen Bereich ausgewählt und dann durch die gesam-

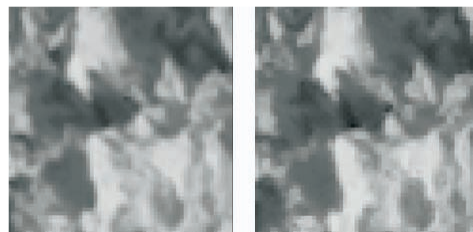


Abb. 7: 40 × 40 Pixel Ausschnitte in aufeinander folgenden Bildern.

te Sequenz verfolgt. Die Umsetzung der Skalierung der im Bildraum bestimmten Trajektorien in den Objektraum erwies sich als aufwendig: Zwar steht aus dem geodätisch-photogrammetrischen Netz die Information für eine 3D-Koordinatenbestimmung der Trajektorienanfangspunkte zur Verfügung, doch scheitert eine automatische Skalierung zunächst an der Unmöglichkeit der zuverlässigen automatischen Detektion homologer Punkte in den Aufnahmen des photogrammetrischen Bildverbandes. Um die Skalierung dennoch automatisch durchführen zu können, wurde für jede der elf Linien des Gitters der Trajektorien-Anfangspunkte interaktiv aus dem zugehörigen Bildverband eine Tiefenkoordinate bestimmt, woraus sich unter Annahme einer großskalig gleichmäßigen Gletschertopographie Skalierungsfaktoren für alle Punkte der Linie bestimmen lassen.

5 Resultate

Die Ergebnisse der Datenverarbeitung zeigen trotz der vorher genannten Erschwernisse einer automatischen Musterverfolgung die erwarteten glaziologischen Phänomene. Die Trajektorien einer zunächst ausgewerteten 24-Stunden Sequenz vom 20. August 2004 zeigen eine sehr gleichmäßige Bewegung des Gletschers in Fließrichtung. Punkte im Vordergrund der Bildsequenz bewegen sich um etwa 130 Pixel pro Tag, was einer Geschwindigkeit von nahezu 40 Metern pro Tag und damit einer Verdopplung gegenüber früheren Messungen entspricht. Dieser Trend wird auch durch Satellitenradarbilddauswertungen der NASA bestätigt, welche für 2003 eine Geschwindigkeit von 35 Meter pro Tag zeigen (JOUGHIN et al. 2004). Die Analyse der Vertikalkomponente der Bewegung zeigt eine eindeutig erkennbare zeitliche Variabilität: Abb. 8 zeigt die Höhenkomponente eines Glet-

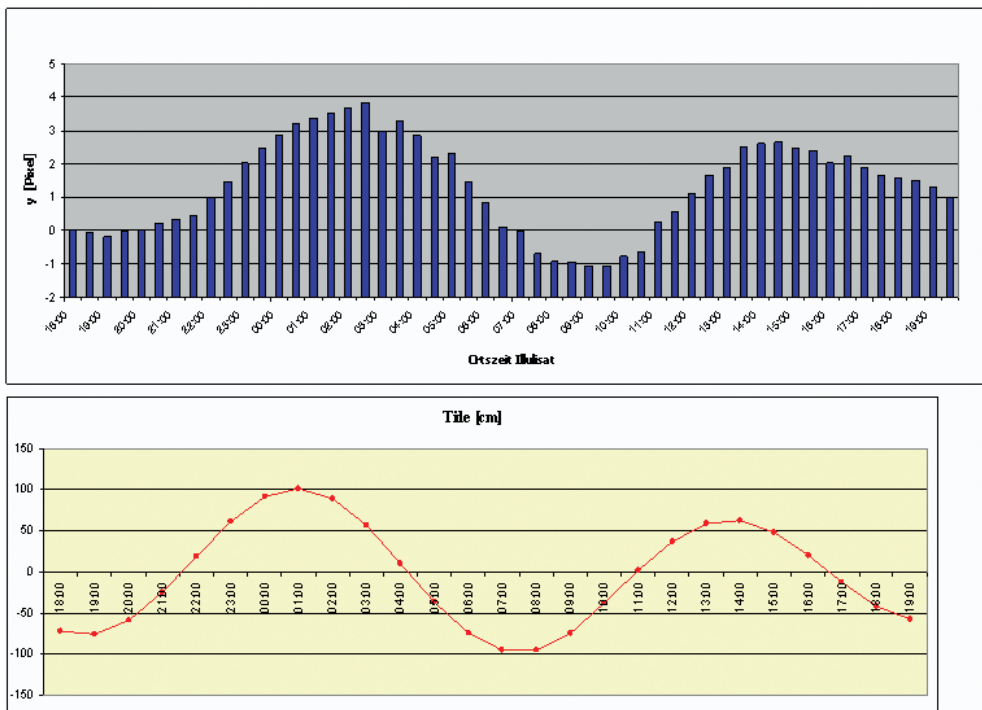


Abb. 8: Bewegung eines Gletscherpunkts über 24 Stunden (oben), zugehörige berechnete Gezeitenkurve für den Pegel Ilulissat.

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

Der Hub der Höhenkoordinate der gezeigten Gletscherpunkttrajektorie, korrigiert um den Trend der Abwärtsbewegung über 24 Stunden, beträgt 5 Pixel, was etwa 1,50 Meter im Objektraum entspricht. Damit ergibt sich gegenüber dem gerechneten Pegel eine leichte Dämpfung der Vertikalbewegung, welche eismechanisch erklärt werden kann. Gleichzeitig ergibt sich eine Verzögerung der Gletscherpunkttrajektorie um etwa eine Stunde gegenüber der Gezeitenkurve. Andere Punkte im Bereich der Gletscherfront bestätigen diese Beobachtungen (Abb. 9). Der vertikale Hub der Trajektorien nimmt in östlicher Richtung – von der Gletscherfront weg – ab. Dies beweist, dass der Gletscher im vorderen Bereich auf dem Kangia-Fjord aufschwimmt, und widerlegt eine entgegengesetzt lautende These, die von BAUER 1968 – trotz einer zu dem Zeitpunkt deutlich weiter in den Fjord reichenden Gletscherzunge – aufgestellt wurde.

6 Ausblick

Die Auswertung terrestrischer Bildsequenzen hoch auflösender 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 wertvolle 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 Gezeiten induzierten Höhenänderungen von Gletscherpunkten im Bereich der Gletscherfront.

Für zukünftige Kampagnen erscheinen eine Reihe von Verbesserungen bzw. Erweiterungen des Verfahrens sinnvoll: Zur Er-

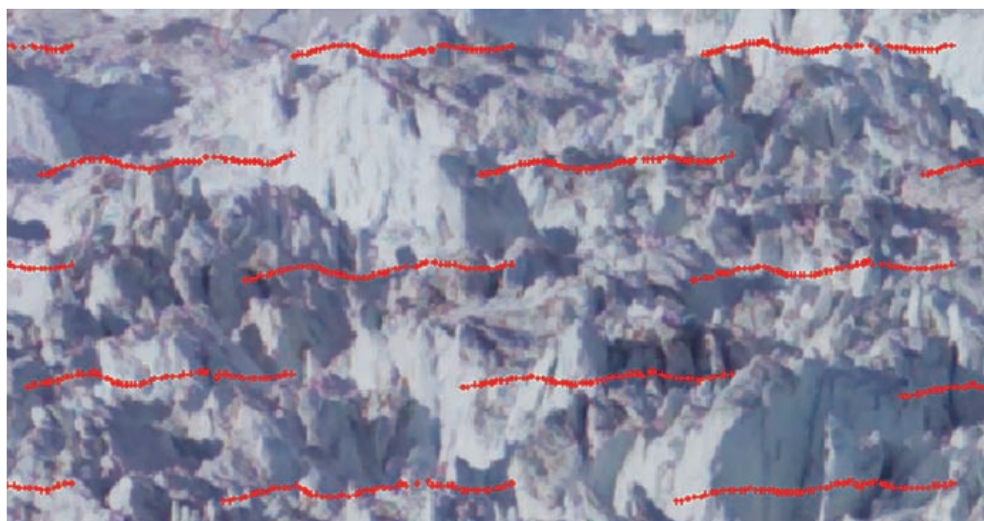


Abb. 9: 2D-Trajektorien eines Ausschnittes aus Abb. 5.

zielung längerer Bildsequenzen sollte eine wettergeschützte Aufstellung der Kamera vorgesehen werden. Eine weitere 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. 500–1000 Meter – die Verwendung terrestrischer Laserscanner als eine interessante Alternative zur Aufnahme durch Kameras. Laserscanner sind unabhängig von der Bildtextur der aufgenommenen Oberfläche und 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 Jakobshavn Isbræ sowie die Auswertung der Daten wurden durch die DFG unterstützt.

Literatur

- 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 Jakobshavn Isbræ, West Greenland: Part II. Ablation, accumulation and temperature. – *Journal of Glaciology*, Vol. 38: 169–181.
- ENGELL, M., 1904: Undersøgelser og Opmaalinger ved Jakobshavn 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 Jakobshavn Isfjord og nærmeste 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: 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: 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: 85–88.
- WESTFELD, P., 2005: Entwicklung von Verfahren zur räumlich und zeitlich aufgelösten 2D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie. – Diplomarbeit IPF TU Dresden.

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr. habil. HANS-GERD MAAS
 hans-gerd.maas@tu-dresden.de
 Dipl.-Ing. ELLEN SCHWALBE
 ellen.schwalbe@tu-dresden.de
 Dipl.-Ing. PATRICK WESTFELD
 patrick.westfeld@mailbox.tu-dresden.de
 TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, 01062 Dresden
 Prof. Dr.-Ing. habil. REINHARD DIETRICH
 dietrich@ipg.geo.tu-dresden.de
 Dipl.-Ing. MICHAEL BÄBLER
 baessler@ipg.geo.tu-dresden.de
 TU Dresden, Institut für Planetare Geodäsie, 01062 Dresden

Manuskript eingereicht: September 2005
 Angenommen: November 2005