

# Bewegungsanalyse schnell fließender Gletscher aus multi-temporalen terrestrischen Laserscanneraufnahmen

ELLEN SCHWALBE & HANS-GERD MAAS, Dresden

**Keywords:** Glaciology, point cloud matching, terrestrial laser scanning, tracking

**Summary:** *Motion Analysis of Fast Flowing Glaciers from Multi-temporal Terrestrial Laser Scanning.* Long range terrestrial laser scanners may depict a rather interesting measuring device for glaciology research. The paper reports on practical experiences using a Riegl LPM-321 laser scanner at an outlet glacier in West Greenland. With the instrument positioned on a hill, a maximum range of 4000 meter could be achieved on glacier ice. The scanner delivers a high quality glacier surface model, which can be used to determine parameters such as the height of the glacier front and the width of crevasses. Moreover, multi-temporal scans allow for the determination of 3D glacier surface velocity information by point cloud matching techniques. For the Jacobshavn Isbræ glacier velocities up to 40 meter per day could be observed.

**Zusammenfassung:** Terrestrische Laserscanner mit hoher Reichweite stellen ein interessantes Messwerkzeug für die Glaziologie dar. Der Beitrag berichtet über praktische Erfahrungen mit einem Laserscanner Riegl LPM-321 an einem grönländischen Gletscher, an dem die lokale Topographie die Messung der Gletscheroberfläche von einem Hügel erlaubte. Bei der Messung auf Gletschereis konnte eine Reichweite von 4000 Meter erreicht werden. Der Scanner liefert ein hochwertiges Modell der Gletscheroberfläche, aus dem u. a. die Höhe der Gletscherfront und die Breite von Gletscherspalten extrahiert werden kann. Multi-temporale Laserscanneraufnahmen erlauben über die Herstellung von Korrespondenzen in 3D-Punktwolken die Bestimmung von Bewegungen der Oberfläche des Gletschers, der eine Geschwindigkeit von bis zu 40 Metern pro Tag aufweist. Hierzu wurden Verfahren der Kreuzkorrelation sowie eine Iterative Closest Point (ICP)-Implementation verwendet.

---

## 1 Einleitung

Mehrere grönländische Gletscher zeigen seit einigen Jahren signifikante Änderungen ihres Bewegungsverhaltens. Der größte und prominenteste unter diesen Gletschern ist der Jacobshavn Isbræ an der Westküste Grönlands (Abb. 1), der einer der schnellsten und produktivsten Gletscher der Welt ist. Seine Gletscherfront hat sich innerhalb weniger Jahre um fast 15 km zurückgezogen (WEIDICK et al. 2004), und seine Bewegungsgeschwindigkeit hat sich von 20 Meter pro Tag auf bis zu 40 Meter pro Tag verdoppelt (MAAS et al. 2008).

Eine Reihe von Publikationen beschreiben Messverfahren zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit des Jacobshavn Isbræ: (HAM-

MER 1893) und (ENGELL 1904) nutzten geodätische Messverfahren zur Bestimmung der Gletschergeschwindigkeit. (BAUER 1968) und (CARBONELL & BAUER 1968) bestimmten Geschwindigkeitsprofile aus monokularen kleinmaßstäbigen Luftbildern, die in einem Zeitabstand von wenigen Tagen aufgenommen wurden. (JOUGHIN et al. 2004) nutzten multi-temporale Satellitenradaraufnahmen. (ROSENAU 2008) bestimmte die Fließgeschwindigkeit aus multi-temporalen ASTER-Aufnahmen. Bei den vorliegenden Geschwindigkeitsspektren weisen Satellitenbilddaten den Nachteil relativ großer Zeitabstände auf. Schrägvisuren hoch auflösender optischer Satelliten verbieten sich aufgrund der stark zerklüfteten Gletscheroberfläche (Abb. 2), welche zudem



**Abb. 1:** Jakobshavn Isbræ (Landsat-Aufnahme 2001).



— Gletscherfront

**Abb. 2:** Helikopteraufnahme im Bereich der Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ.

einer großen zeitlichen Variabilität unterworfen ist.

Geschwindigkeitsfelder mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung können durch die Aufnahme und Auswertung terrestrischer Bildsequenzen einer stationären hoch auflösenden digitalen Kamera bestimmt werden.

Im arktischen Sommer sind dank der Mitternachtssonne 24-Stunden-Aufnahmen möglich. Aufgrund des Bewegungsverhaltens des Gletschers reicht hier eine monokulare Aufnahme aus. Bei entsprechend hoher Bildrate ist auch die Analyse von Gezeitenabhängigkeiten in Geschwindigkeitsfeldern möglich

(MAAS et al. 2006, 2008). (DIETRICH et al. 2007) ermittelten aus solchen Geschwindigkeitsfeldern die Aufsetzlinie des Gletschers. Als recht aufwendig erweist sich bei der Auswertung monokularer Bildsequenzen die Bestimmung lokaler Maßstabsinformation zur Transformation vom Bildraum in den Objekt-raum. Eine automatische Auswertung stereoskopischer Bilddaten scheitert in vielen Bereichen an einer zu großen Dekorrelation, welche durch die zerklüftete Gletscheroberfläche verursacht wird. Weitere Schwierigkeiten bei der Bildsequenzanalyse ergeben sich durch Schatten, welche während der Mitternachtssonne eine 360°-Wanderung ausführen.

Eine interessante Alternative zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern ergibt sich durch multi-temporales Laserscanning. (ABDALATI & KRABILL 1999) verwendeten hierzu Flugzeuglaserscannerdaten aus niedriger Flughöhe. Wenn eine hohe zeitliche Auflösung gefragt ist, wird der Aufwand der mehrfachen Laserscannerbefliegung allerdings sehr groß. Die Topographie am Jacobshavn Isbræ erlaubt die Aufnahme größerer Teilgebiete der Gletscheroberfläche im Bereich der Gletscherfront mit einem auf einem Hügel aufgebauten terrestrischen Laserscanner. Hierdurch werden Wiederholungsmessungen in kurzen Zeitabständen möglich. Die Aufgabe bei der Bestimmung von räumlich-zeitlich aufgelösten Geschwindigkeitsfeldern besteht dann in der Zuordnung von Oberflächenstrukturen in aufeinanderfolgenden Scan-Epochen. Die zerklüftete Gletscheroberfläche (siehe Abb. 2) mit

Strukturen von mehreren Metern Höhe und Ausdehnung liefert hierzu genügend Information. Im Gegensatz zur Bildsequenzanalyse ist die Verfolgung von Oberflächenstrukturen in multi-temporalen Laserscannerdatensätzen unabhängig von variierenden Beleuchtungsverhältnissen und Schattenwurf. Durch die direkte 3D-Messung entfällt außerdem die aufwendige Prozedur der Bestimmung lokaler Bildmaßstabsinformation. Einschränkungen ergeben sich bei der Anwendung eines terrestrischen Laserscanners allerdings durch den deutlich höheren logistischen Aufwand sowie durch die beschränkte Messrate und Reichweite aktueller Instrumente.

## 2 Instrument und Aufnahme

Die Topographie am Jacobshavn Isbræ erlaubt die Aufnahme des Gletschers von einem Hügel am südlichen Gletscherrand, der sich etwa 150 m über die Oberfläche des Gletscherstroms erhebt. Die Entfernung zum südlichen Rand des mehrere Kilometer breiten Hauptstroms beträgt dabei etwa 1,5 km. Diese Minimalentfernung liegt jenseits der Reichweite fast aller Instrumente am Markt, zumal die Reflektivität von Gletschereis im Wellenlängenbereich der meisten Scanner eher ungünstig ist. Das einzige Gerät, das nach seinen Spezifikationen für die Messung in Frage kommt, ist der Riegler LPM-321 (siehe Abb. 3). Dieser ist mit einer maximalen Reichweite von bis zu 6 km spezifiziert, welche allerdings



Abb. 3: Riegler LPM-321 am Jacobshavn Isbræ.

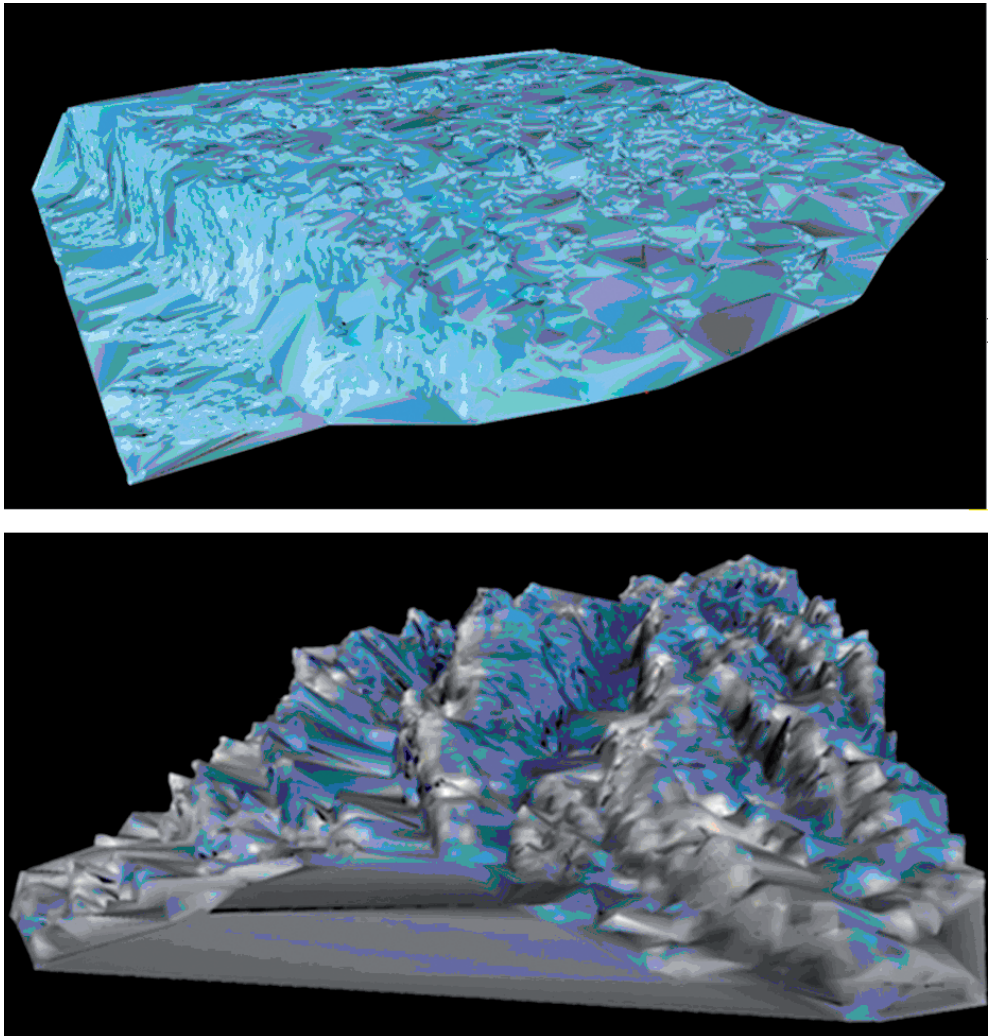


nur bei einer sehr niedrigen Messrate von 10 Punkten pro Sekunde erzielt wird. Von der Firma Riegl wurde zur Unterstützung einer Messkampagne am Jacobshavn Isbræ im Juli 2007 ein Prototyp des Geräts zur Verfügung gestellt.

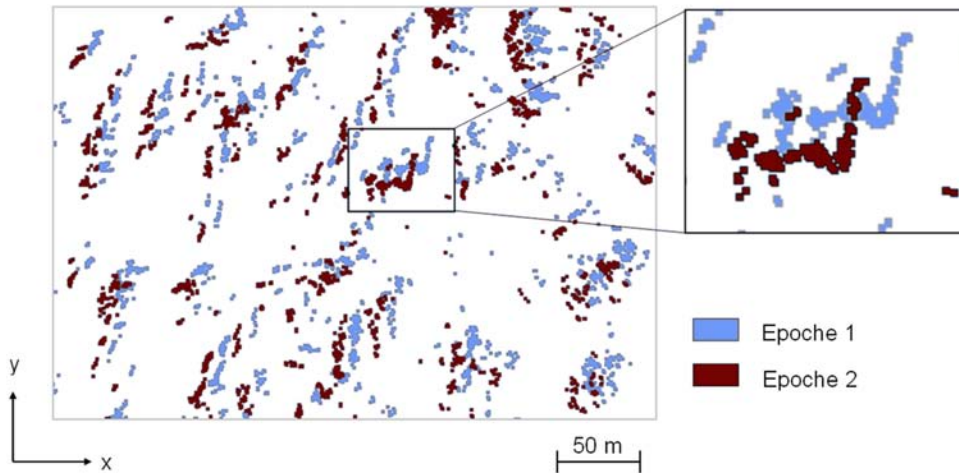
In der praktischen Anwendung konnten mit dem Instrument Reichweiten bis 4 km erzielt werden, was angesichts der Reflektivitätseigenschaften von Gletschereis als sehr guter Wert zu betrachten ist. Bei einer Strahldivergenz von 0,8 mrad entspricht dies einem Punktdurchmesser von 3,2 Metern. Ein-

schränkungen ergeben sich durch die niedrige Messrate von 10 Punkten pro Sekunde: Für die Aufnahme eines Oberflächenmodells mit 250'000 Punkten ergibt sich ein Zeitaufwand von ca. sieben Stunden. Die Sicherstellung der Energieversorgung während dieses Zeitraums unter Expeditionsbedingungen erwies sich als recht aufwendig.

Aus den Daten lässt sich beispielsweise direkt die Höhe der Gletscherfront entnehmen (siehe Abb. 4 links), für die an der höchsten Stelle 135 Meter ermittelt wurden. Zudem erlaubt das Oberflächenmodell Aussagen über



**Abb. 4:** Oberflächenmodell im Bereich der Gletscherfront (links, Scanfläche ca. 0,8 km<sup>2</sup>, 29'000 Punkte); Detail (rechts, Scanfläche ca. 16'000 m<sup>2</sup>, 13'000 Punkte).



**Abb. 5:** Punktkonstellationen in aufeinander folgenden Epochen.

Struktur und Verlauf von Gletscherspalten und die Struktur des randlichen Toteises (siehe Abb. 4 rechts). Gleichzeitig stellt das Oberflächenmodell eine wertvolle Grundlage für die Georeferenzierung und lokale Maßstabsbestimmung simultan aufgenommener terrestrischer Bildsequenzen dar.

Durch mehrmaliges Scannen in kurzen Zeitabständen kann auch hier die Zeit als vierte Dimension eingeführt werden, wodurch sich die Möglichkeit der Bestimmung von räumlich-zeitlich aufgelösten 3D-Geschwindigkeitsfeldern ergibt.

### 3 Tracking in 3D-Punktwolken

Die Verarbeitung multi-temporaler 3D-Punktwolken der Gletscheroberfläche erlaubt die Bestimmung aller drei Komponenten des Bewegungsfeldes ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Messungen zur Skalierung der Trajektorien. Dazu bietet sich die Anwendung von Verfahren der Objektverfolgung in Punktwolken an. Die Grundidee der Geschwindigkeitsbestimmung aus multi-temporalen Punktwolken liegt in der Zuordnung von Punktmustern auf der Zeitachse. Bewegungen der Gletscheroberfläche sind dank der durch Spaltenbildung geprägten Gletschertopographie aus Punktwolken gut erkennbar. Abb. 5 zeigt die

XY-Projektion der Laserscannerdaten aus zwei Aufnahmeepochen. Durch den flachen Winkel, mit dem der Laserstrahl auf dem Gletscher auftrifft, werden stark geneigte, zum Scanner hin ausgerichtete Bereiche der Eisstrukturen mit großer Punktdichte gescannt. An der Rückseite der Eisstrukturen entstehen jedoch Scanschatten. Dies führt zu einer unregelmäßigen Punktverteilung in der XY-Projektion der Laserscannerdaten und zu der Tatsache, dass sich einzelne Eisstrukturen gut voneinander trennen lassen.

Für die Zuordnung bieten sich prinzipiell zwei Vorgehensweisen an:

1. Die Z-Koordinaten der Einzelpunkte werden auf ein regelmäßiges XY-Raster interpoliert, in dem dann die Zuordnung in einem flächenbasierten Ansatz (Kreuzkorrelation, Least-Squares-Matching o. ä.) mit vorgegebener Patch-Größe erfolgt.
2. Die Zuordnung erfolgt anhand geeigneter 3D-Matchingverfahren direkt auf der Basis von 3D Punktwolken, die aus dem Gesamtdatensatz segmentiert wurden.

Für den ersten Ansatz wurden die Z-Koordinaten der Einzelpunkte in ein regelmäßiges XY-Raster projiziert. Als Rasterweite wurde in Anlehnung an den Punktabstand und die Struktur der Gletscheroberfläche eine Patchgröße von  $50 \times 50$  Meter gewählt. Aus Gründen der Kompatibilität mit vorhandener Bild-

Analysesoftware wurden die Z-Koordinaten innerhalb eines Patches und des entsprechenden Suchbereichs auf 8 bit skaliert. Da das Bewegungsverhalten des Gletschers lokal primär durch eine Translation quer zur Beobachtungsrichtung des Scanners geprägt ist, können Bewegungen durch eine einfache Kreuzkorrelation mit Subpixelschätzung bestimmt werden (SCHWALBE et al. 2008). Vertikalkomponenten in der Bewegung entsprechen dabei einem Helligkeitsunterschied zwischen Patches bei der Kreuzkorrelation mit Bilddaten und werden über die Mittelwerte der Höhe in den Patches zweier Epochen erfasst. Anhand der Zeitinformation für die Punkte beider Epochen kann anschließend aus der durch die Kreuzkorrelation bestimmten Translation eine Geschwindigkeit berechnet werden.

Ein recht aufwendiger Vorverarbeitungsschritt ergibt sich hier in der Bestimmung einer korrekten Zeitinformation für jeden Messpunkt. Angesichts einer Bewegung des Gletschers von bis zu 40 Metern pro Tag und einer Scazeit von mehreren Stunden können Fehler in der Zeitinformation erhebliche Fehler im Geschwindigkeitsfeld bewirken. Aus Gründen des Energiemanagements unter Expeditionsbedingungen wurden die Scans zum Teil in mehrere Teilscans unterteilt. Damit ergibt sich zusätzlich die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Zeitdifferenz zwischen den Teilscans und von Nullrichtungsfehlern. Ein aufwendiges Schema zur Bestimmung einer korrekten punktweisen Zeitinformation und der Eliminierung der Nullrichtungsfehler wird in (SCHWALBE et al. 2008) gezeigt.

Für den zweiten Ansatz ist es notwendig, den Gesamtscan des Gletschers in zahlreiche geeignete kleine Punktwolken zu unterteilen (Segmentierung), für die jeweils ein Bewegungsvektor ermittelt werden kann. Für zwei korrespondierende segmentierte Punktwolken aus zwei Aufnahmeepochen können dann mittels ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point – CHEN & MEDIONI 1991, BESL & MCKAY 1992) die Transformationsparameter bestimmt werden. Aufgrund der Tatsache, dass sich im Scan Punkte auf einzelnen Eisstrukturen konzentrieren und diese Bereiche durch Scanschatten klar voneinander getrennt sind (siehe Abb. 5) bietet sich als Segmentierungsverfahren eine Clusteranalyse an. Eine weitere Mög-

lichkeit, besteht darin, die Ergebnisse des Kreuzkorrelationsbasierten Ansatzes zur Segmentierung zu nutzen. Wurde zu einem Patch aus Scanepoche 1 das korrespondierende Patch aus Scanepoche 2 gefunden, können die Punkte, die innerhalb dieser Patches liegen, verwendet werden, um deren Translationsparameter mittels ICP-Algorithmus genauer zu bestimmen. Vorteilhaft ist hier außerdem, dass die mittels des Kreuzkorrelationsbasierten Ansatzes bestimmten Translationen als Näherungswerte für die ICP-Auswertung genutzt werden können.

Im Rahmen einer Diplomarbeit (JUNKER 2008) wurde ermittelt, dass der ICP-Algorithmus in der Lage ist, die Translationsparameter mit einer Genauigkeit zu bestimmen, welche kleiner als der Punktabstand ist. Dies stellt eine Analogie zur Subpixelgenauigkeit bei bildbasierten Matchingverfahren und zur Genauigkeit beim Matching in TIN-Daten (MAAS 2000) dar. Da die Punktdichte der Scans mit zunehmender Entfernung abnimmt, können Bewegungsvektoren am Rand des Gletscherflusses (Entfernung zum Scanner ca. 1500 m) mit einer größeren Genauigkeit bestimmt werden, als in der Gletschermitte (Entfernung zum Scanner ca. 4000 m). Der mittlere Punktabstand in den segmentierten Punktwolken am Gletscherrand beträgt ca. 1 m, der mittlere Punktabstand in Punktwolken in der größten Entfernung zum Scanner ca. 3 m.

Zukünftige Arbeiten sollen weitere Möglichkeiten einer direkten und genauen Zuordnung auf Basis der Laserscannerdaten untersuchen, indem z.B. die Zuordnung zwischen zwei oder mehr Epochen durch Least-Squares-Matching in einer TIN-Struktur (Triangulated Irregular Network) der Punktwolke durchgeführt wird. Ansätze dazu werden in (MAAS 2000) und (AKCA 2007) gezeigt.

Eine auf den ersten Blick nahe liegende flächenbasierte Zuordnung im Polarkoordinatensystem des Scanners, bei der die Entfernung als Attribut im durch die beiden Richtungskomponenten gegebenen Raster verwendet wird, verbietet sich aufgrund der schrägen Visur, die aufgrund der Topographie der Gletscheroberfläche zu großen Diskontinuitäten in Tiefenrichtung und damit zu starken Schereffekten innerhalb der Suchbereiche führt.

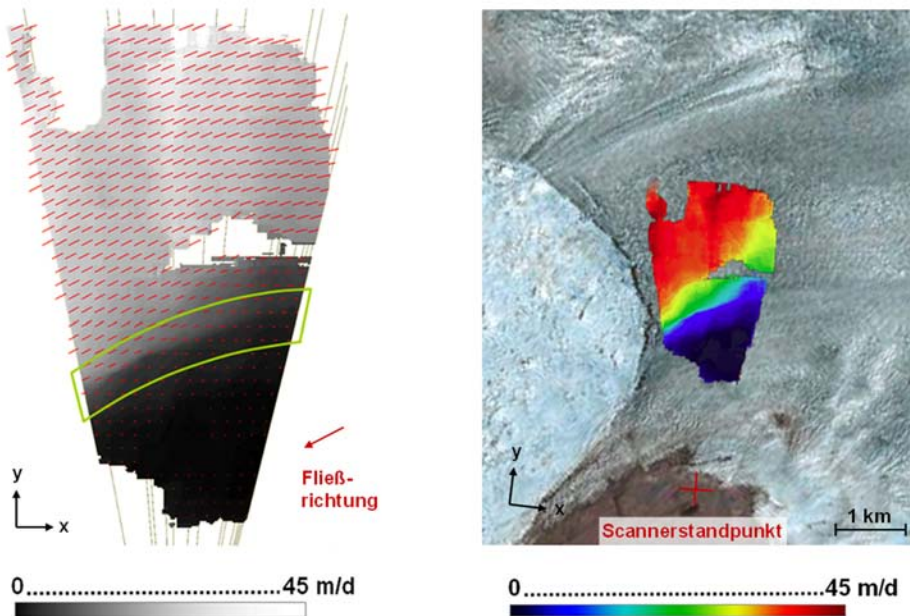
## 4 Resultate

Abb. 6 zeigt das durch Kreuzkorrelation bestimmte Geschwindigkeitsfeld. Lücken sind bedingt durch Verdeckungen. Im rechten Teil der Abbildung ist der Übergang vom Toteis (dunkler Bereich) in den Hauptstrom des Gletschers und eine hohe Richtungsuniformität der Geschwindigkeitsvektoren im Hauptstrom zu erkennen. Der rechte Teil der Abbildung zeigt eine farbcodierte Überlagerung des Geschwindigkeitsfeldes auf eine 10 Tage zuvor aufgenommene Landsat-Aufnahme. Die Geschwindigkeiten betragen bis ca. 40 Meter pro Tag und bestätigen aktuelle Messungen (MAAS et al. 2008, ROSENAU 2008).

## 5 Ausblick

Die Auswertung multi-temporaler terrestrischer Laserscannerdaten kann – geeignete Topographie vorausgesetzt – einen wertvollen Beitrag zur glaziologischen Forschung an sich schnell bewegenden Gletschern liefern. Ober-

flächenmodelle im Bereich der Gletscherfront erlauben die Bestimmung der Gletscherfronthöhe und eine Analyse der Spaltenstruktur. Sie stellen zudem eine wertvolle Grundlage für die Georeferenzierung der Resultate der Verarbeitung terrestrisch aufgenommenen Bildsequenzen dar. Durch Verfahren der Zuordnung zwischen Punktwolken können 3D-Geschwindigkeitsfelder bestimmt werden. Im Vergleich zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung aus terrestrischen Bildsequenzen bietet die Laserscanneraufnahme einige Vorteile: Die Daten liegen direkt dreidimensional vor, und die Aufnahme ist unabhängig von Beleuchtungsbedingungen und Oberflächentextur. Andererseits ist der instrumentelle Aufwand deutlich höher, und die technischen Daten aktueller Geräte setzen vielfältige Limitierungen. Als unter dem Aspekt der maximalen Reichweite geeignetes Gerät erwies sich der Riegl LPM-321, welcher allerdings eine geringe Messrate und eine relative große Strahldivergenz aufweist.



**Abb. 6:** Geschwindigkeitsfeld aus zwei aufeinanderfolgenden Laserscanneraufnahmen (rechts: überlagert auf aktuelle Landsat-Aufnahme).



## Danksagung

Die Arbeiten am Jakobshavn Isbræ sowie die Entwicklung der Auswerteverfahren wurden durch die DFG unterstützt. Für die Ausleihe des Riegl LPM-321 für die 2007er Messkampagne am Jakobshavn Isbræ möchten wir der Firma Riegl herzlich danken.

## Literatur

- ABDALATI, W. & KRABILL, W., 1999: Calculation of Ice Velocities in the Jakobshavn Isbræ Area using Airborne Laser Altimetry. – *Remote Sensing of Environment* **67**: 194–204.
- AKCA, D., 2007: Matching of 3D surfaces and their intensities. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **62** (2): 112–121.
- BAUER, A., 1968: Missions Aériennes de reconnaissance au Groenland 1957–1958. – *Meddeleser om Grønland, Kommissionen for videnskabelige Undersøgelser i Grønland* **173** (3).
- BESL, P.J. & MCKAY, N.D., 1992: A Method for Registration of 3-D Shapes. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14** (2): 239–256.
- 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* **173** (5).
- CHEN, Y. & MEDIONI, G., 1991: Object modeling by registration of multiple range images. – *IEEE International Conference on Robotics and Automation* **3**: 2724–2729.
- DIETRICH, R., MAAS, H.-G., BAESSLER, 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. – *Journal of Geophysical Research* **112** (f3): F03S21.
- ENGBELL, 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* **4**.
- HAMMER, R., 1893: Undersøgelser ved Jakobshavns Isfjord og nærmeste Omegn i Vinteren 1879-1880. – *Meddeleser om Grønland, Kommissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland* **26**.
- JOUGHIN, I., ABDALATI, J. & FAHNESTOCK, M., 2004: Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier. – *Nature* **432**: 608–610.
- JUNKER, S., 2008: Untersuchung zum Potential des ICP-Algorithmus bei der Auswertung von multi-temporalen terrestrischen Laserscannerdaten zur 3D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie. – Diplomarbeit, TU Dresden.
- MAAS, H.-G., 2000: Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **33** (3A): 548–555.
- MAAS, H.-G., DIETRICH, D., SCHWALBE, E., BÄSSLER, M. & WESTFELD, P., 2006: Analyse des Bewegungsverhaltens des Jakobshavn Isbræ Gletschers in Grönland durch monokulare Bildsequenzanalyse. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2006** (1): 93–102.
- MAAS, H.-G., SCHWALBE, E., DIETRICH, R., BÄSSLER, M. & EWERT, H., 2008: Determination of spatio-temporal velocity fields on glaciers in West-Greenland by terrestrial image sequence analysis. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37** (B8): 1419–1424.
- ROSENAU, R., 2008: Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten grönländischer Gletscher mittels Feature Tracking in Satellitenbildern. – Diplomarbeit, TU Dresden.
- SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., DIETRICH, R. & EWERT, H., 2008: Glacier velocity determination from multi temporal terrestrial long range laserscanner point clouds. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37** (B5).
- 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.

### Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. ELLEN SCHWALBE, Prof. Dr. habil. HANS-GERD MAAS, Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstr. 10, D-01062 Dresden, Tel.: +49-351-463-32645, Fax: +49-351-463-37266, e-mail: {Ellen.Schwalbe, Hans-Gerd.Maas}@tu-dresden.de

Manuskript eingereicht: Juli 2008  
 Angenommen: November 2008