

Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Gletschern durch Analyse terrestrischer Bildsequenzen

Ein Beitrag von HANS-GERD MAAS und ELLEN SCHWALBE

Die Auswertung von Bildsequenzen terrestrischer Kameras stellt ein wertvolles Werkzeug zur Analyse von Gletscherbewegungen in Ergänzung zu satellitenbasierten Verfahren dar. Durch subpixelgenaue Verfahren der multi-temporalen Bildzuordnung lassen sich Bewegungen zwischen Bildern einer Sequenz mit Genauigkeiten im Bereich eines Zehntelpixels bestimmen. Durch geeignete Verfahren der Georeferenzierung über geodätisch-photogrammetrische Netze lassen sich diese auf die Gletscheroberfläche übersetzen und erlauben die Bestimmung von Bewegungsvektor- und -trajektorienfeldern mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern in einer Entfernung von einigen Kilometern zur Kamera. Die fast beliebig hohe zeitliche Auflösung erlaubt dabei über die Bestimmung der Bewegungsgeschwindigkeit von Gletschern auch die Analyse dynamischer Prozesse wie gezeitenabhängiger Bewegungen oder Kalbungsereignissen.

Photogrammetrie | Glaziologie | Bildanalyse | Geschwindigkeitsfeld | Georeferenzierung
photogrammetry | glaciology | image analysis | velocity field | georeferencing

Terrestrial camera image sequence processing depicts a valuable tool for the analysis of the motion behaviour of glaciers, complementing and validating satellite based methods. Subpixel accuracy multi-temporal image matching techniques allow for the determination of motion between two consecutive images with a precision in the order of a tenth of a pixel. Suitable methods of georeferencing via geodetic-photogrammetric networks allow to translate velocity information to metric object space with a precision of a few centimetres for points in a distance of several kilometres from the camera. The almost arbitrarily high temporal resolution of terrestrial image sequence acquisition also allows for the analysis of dynamic events such as tide-dependent glacier motion or calving events.

1 Einleitung

Die globale Erwärmung hat weltweit zu einem sehr signifikanten Massenverlust an Eisschildern und Gletschern geführt (Vaughan et al. 2013). Die räumlich-zeitliche Änderung von Gletschern stellt daher einen der Fokuspunkte der klimabezogenen Forschung dar. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), auch als Weltklimarat bezeichnet, ist eine Institution der Vereinten Nationen, in deren Auftrag Wissenschaftler weltweit den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammentragen und anhand anerkannter Veröffentlichungen den Kenntnisstand zum Klimawandel analysieren. Die IPCC WG 1 beschäftigt sich dabei unter anderem auch mit der Analyse von globalen Gletscherinventaren (Church et al. 2013) und dem Beitrag von Gletschern zum globalen Meeresspiegelanstieg. Solche Inventare sind z. B. das Projekt *Global Land–Ice Measurements from Space (GLIMS)*, in dem 60 Institutionen weltweit Informationen zur Veränderung von Gletschern primär auf Basis von Satellitenbilddaten zusammen-

tragen (www.glims.org, Bishop et al. 2004), und das *Randolph Glacier Inventory (RGI)* mit Daten zu den Umrissen von 200 000 Gletschern ohne Grönland und Antarktis (Pfeffer et al. 2014).

Neben Gletschern in der Arktis und Antarktis sind Gebirgsgletscher von besonderem Interesse, da sie wegen ihrer sensitiven Reaktion auf Klimaänderungen als wichtige Klimaindikatoren anzusehen sind (Oerlemans 1994). Laut Gardner et al. (2013) trugen Gebirgsgletscher im Zeitraum von 2003 bis 2009 etwa ein Drittel zum globalen Meeresspiegelanstieg bei, obwohl sie nur etwa 1 % der globalen Eismasse ausmachen.

Die an Gletschern zu beobachtenden Veränderungen zeigen sich neben Änderungen der Temperatur und Beschaffenheit des Gletschereises primär in Form eines Rückzugs der Gletscherfront, einer Reduktion der Eisdicke und einer Veränderung des Bewegungsverhaltens. In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Techniken zur Überwachung der Veränderung von Gletschern auf lokalen und globalen Skalen entwickelt. In

Autoren

Prof. Dr. Hans-Gerd Maas lehrt an der TU Dresden Photogrammetrie.

Dr. Ellen Schwalbe ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU Dresden.

hans-gerd.maas@tu-dresden.de



Foto aus: Schwalbe et al., 2020

Abb. 1: Installation einer Kamera in wetterfestem Gehäuse am Lange Glacier, King George Island

vielen Fällen beschränkt sich die Überwachung auf das Monitoring der Lage (bzw. des Rückzugs) von Gletscherfronten, welche als guter Indikator für klimainduzierte Änderungen gilt, und zwar aus monoskopischen Satellitenaufnahmen (z. B. Meier et al. 2018; Winsvold et al. 2016). Fernerkundungsdaten stellen darüber hinaus auch eine gute Basis für die Analyse des Bewegungsverhaltens von Gletschern dar. Beispielsweise verwendet Kääh (2005) optische und Radarfernerkundungsaufnahmen zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten von Gletschern im Himalaya, und Rosenau et al. (2015) nutzten 37 000 Landsat-Szenen, um Geschwindigkeitsfelder grönländischer Gletscher für den Zeitraum von 1972 bis 2015 zu bestimmen.

Neben diesen Fernerkundungsverfahren mit globalem Fokus spielt auch die Analyse der Aufnahmen terrestrischer Kameras eine wichtige Rolle im Kontext von glaziologischen Anwendungen mit lokalem Bezug. Dabei haben Kameras, die primär zur Visualisierung des Rückgangs von Gletscherfronten und von kapitalen Kalbungsereignissen eingesetzt werden, in den letzten Jahren einige Medienaufmerksamkeit erhalten (z. B. Jason Box' *Extreme Ice Survey*, www.extremeicesurvey.org).

Im Rahmen dieses Beitrags werden photogrammetrische Verfahren gezeigt, die aus Bildsequenzen solcher terrestrischer Kameras räumlich-zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsfelder als Basis für Analysen des Bewegungsverhaltens (bzw. der Änderung des Bewegungsverhaltens) von Gletschern bestimmen. Im Vergleich zu satellitenbasierten Verfahren weisen diese Verfahren den offensichtlichen Nachteil der lokalen Beschränkung auf. Demgegenüber steht jedoch im Vergleich zu den durch die Satellitenorbits gegebenen Aufnahmefrequenzen eine praktisch beliebig hohe zeitliche Auflösung, die auch kurzzeitige Analysen wie z. B. Gezeitenabhängigkeiten oder Kalbungsereignisse erlaubt. Außerdem weisen terrestrische Aufnahmesysteme

meine geringere Wetterabhängigkeit auf als optische Fernerkundungssysteme, und die genauen terrestrischen Messungen können zur Validierung von aus Fernerkundungsdaten gewonnenen Geschwindigkeitsinformationen dienen.

Der Beitrag gibt dabei einen kompakten Überblick über die Methodik der Bestimmung räumlich-zeitlich hochaufgelöster Geschwindigkeitsfelder aus terrestrischen Bildsequenzen sowie über Anwendungen in Grönland, Patagonien und der Antarktis (Schwalbe und Maas 2017; Maas et al. 2013; Maas et al. 2008; Schwalbe et al. 2020). Die folgenden Kapitel stellen kurz die verwendete Kamera-Hardware vor, stellen Methoden der Bildsequenzanalyse und der Georeferenzierung vor und zeigen exemplarische Resultate. Für detailliertere Beschreibungen der Methodik sowie der Resultate sei auf die genannten Publikationen verwiesen.

2 Kameras zur Gletscherbeobachtung

Zur Aufnahme der terrestrischen Bildsequenzen dienen handelsübliche hochauflösende Spiegelreflex- oder Systemkameras, die in einem wetterfesten Gehäuse installiert sind (Abb. 1) und so aufgestellt werden, dass ihre Blickrichtung etwa orthogonal zur Bewegungsrichtung des Gletschers ist. Wenn, wie in den meisten Fällen, signifikante Querkomponenten des Bewegungsvektorfeldes ausgeschlossen sind, reicht eine einzelne Kamera zur Aufnahme aus. Zur Stromversorgung dienen Solarpanels und eine Pufferbatterie. Die Kameras werden über einen Intervallometer ausgelöst, welcher je nach Gletschergeschwindigkeit und Aufnahmemaßstab typischerweise auf Aufnahmeintervalle von 15 bis 60 Minuten eingestellt ist. Die aufgenommenen Sequenzen erstrecken sich je nach Zielstellung über wenige Tage bis zu zwei Jahren. Die Bilddaten werden auf einer internen Speicherkarte gespeichert, bei Echtzeitanforderungen ist zusätzlich eine aufwendige Satellitendatenverbindung zu implementieren.

3 Verfahren der subpixelgenauen Bildzuordnung auf der Zeitachse

Abb. 2 zeigt ein Einzelbild einer Sequenz am Jacobshavn Isbrae in Grönland, das mit einer 14-Megapixel-Kamera aufgenommen wurde. Zugehörige Videos finden sich auf der Webseite des IPF der TU Dresden.

Die primäre Aufgabe bei der Bestimmung von Geschwindigkeitsvektorfeldern aus monokularen Bildsequenzen besteht in einer Zuordnung auf der Zeitachse. Hierfür stehen eine Reihe von merkmals- oder flächenbasierten Bildzuordnungsverfahren zur Verfügung. Für die Auswertung der vorliegenden Bildsequenzen wurde eine modifizierte Variante des Least-Squares-Matching (LSM) verwendet, da dieser Ansatz die Verschiebung von Bildinhalten zwischen zwei (oder mehr) Bildern mit Subpixelgenauigkeit bestimmt und damit eine Vo-



Foto aus: Maas et al. 2008

Abb. 2: Einzelbild einer Sequenz am Jacobshavn Isbrae, Grönland

raussetzung für ein hohes Genauigkeitspotenzial liefert. Das Grundprinzip des LSM liegt hier darin, die Parameter einer Transformation zwischen zwei Ausschnitten (»Patches«, Abb. 3) zweier aufeinanderfolgender Bilder einer Bildsequenz so zu bestimmen, dass die Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen zwischen den Patches minimal wird. Die Form der Patches kann dabei quadratisch oder rechteckig gewählt werden. Als Transformation wird meist eine Translation angesetzt oder eine 6-parametrische Affintransformation, durch die auch Maßstabsänderungen, Rotationen und Scherungen zwischen den beiden Patches kompensiert werden können. Bei der stark zerklüfteten Oberfläche vieler Gletscher insbesondere in der Nähe der Gletscherfront (siehe auch Abb. 2) kann die durch den Sonnengang verursachte Bewegung von Schatten das Resultat systematisch verfälschen. Der LSM-Ansatz wurde daher so modifiziert, dass durch Schattenwurf betroffene Pixel ausmaskiert werden (Schwalbe und Maas 2017).

Als Resultat des LSM liegen für jedes Patch (typischerweise mehrere tausend Punkte pro Bild) die beiden Komponenten des Verschiebungsvektors im Bild vor. Zusätzlich bestimmt LSM die Standardabweichungen für die Parameter, die bei dem vorliegenden Datenmaterial meist in der Größenordnung von ca. 0,1 Pixeln lagen. Die beiden Patches in Abb. 3 liegen in einer Entfernung von etwa 3 km zur Kamera. Aufgenommen mit einem Normalwinkelobjektiv entspricht ein Pixel etwa $60 \times 60 \text{ cm}^2$, sodass sich hier eine Standardabweichung der Geschwindigkeitsvektorkomponenten von etwa 6 cm ergibt.

Ein wichtiger Aspekt bei der Auswertung der Bildsequenzen ist die Trennung zwischen Gletscherbewegungen und scheinbaren Bewegungen, die durch windinduzierte Kamerabewegungen verursacht werden. Zu diesem Zweck können z. B. im Vordergrund des Bildes feste Zielmarken installiert werden (unten in Abb. 2 sichtbar), die eine Kompensation der windinduzierten Effekte erlau-

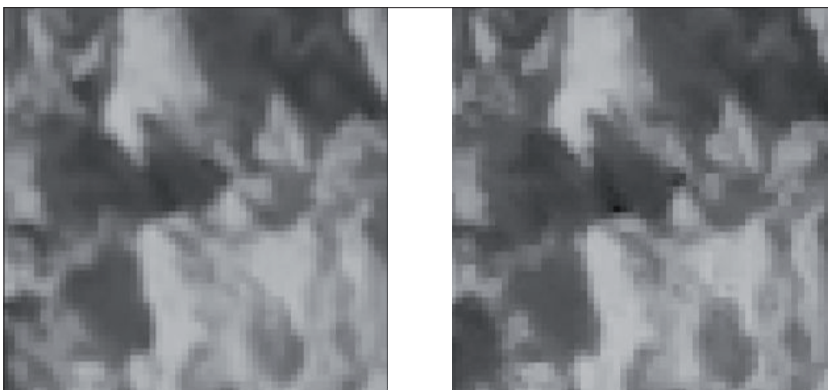


Abb. 3: Patches in zwei aufeinander folgenden Bildern einer Sequenz am Jacobshavn Isbrae, Grönland

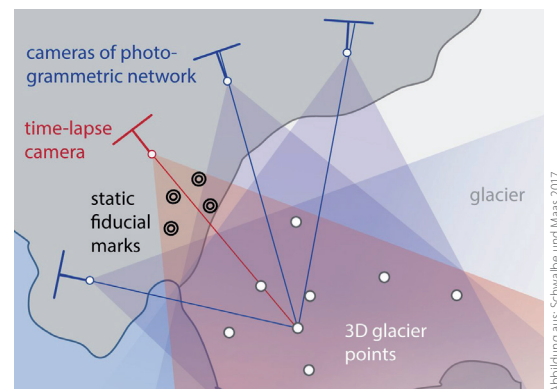


Abbildung aus: Schwalbe und Maas 2017

Abb. 4: Geodätisch-photogrammetrisches Netz zur Georeferenzierung monoskopischer Bildsequenzen

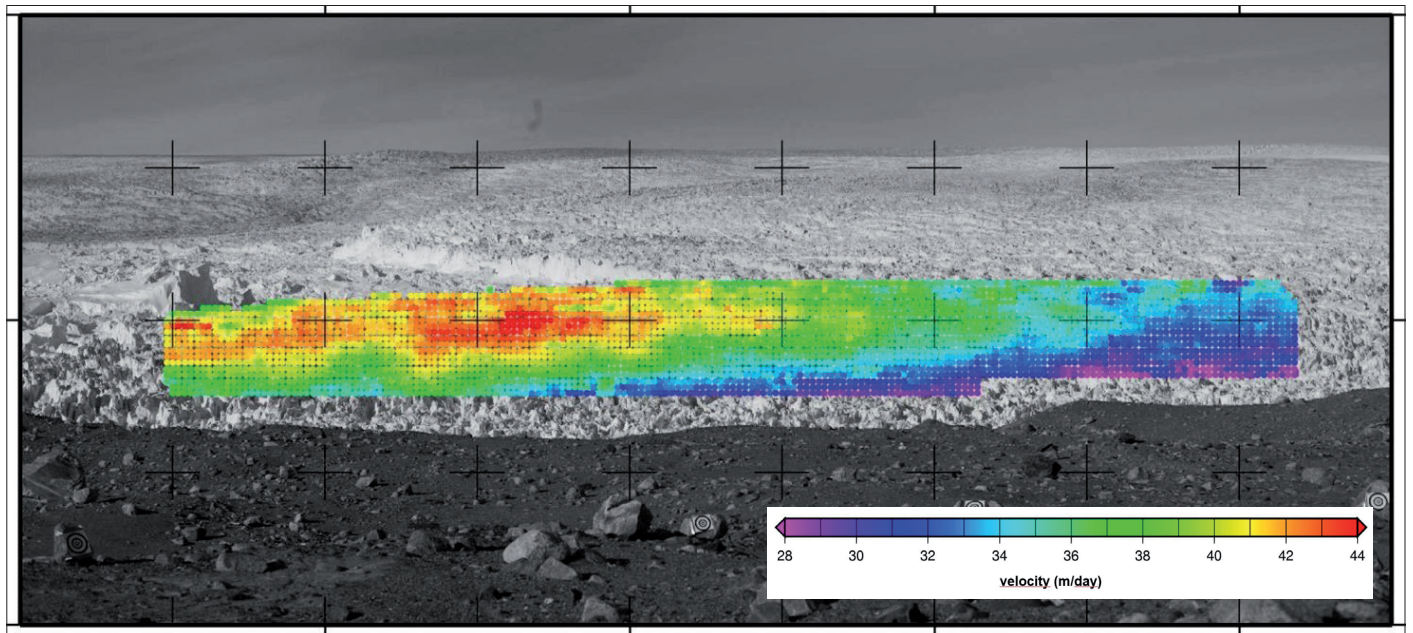


Abb. 5: Farbcodierte Darstellung der täglichen Bewegung im Frontbereich des Jacobshavn Isbrae, Grönland

ben. Bei entsprechender Topographie und geeigneten Beleuchtungsbedingungen können auch ortsfeste natürliche Merkmale im Vorder- oder Hintergrund als statische Referenz verwendet werden.

4 Verfahren der Georeferenzierung

Als Resultat der Bildsequenzanalyse liegt ein räumlich-zeitlich hochaufgelöstes Geschwindigkeitsvektorfeld vor, welches jedoch noch vom Bildraum in den Objektraum (und damit auch von der Einheit Pixel in ein metrisches Maß) transformiert werden muss. Bei einer Stereokamerakonfiguration kann dies konventionell durch eine relative und absolute Orientierung mittels Verknüpfungs- und Passpunkten erfolgen. Der im Vorigen skizzierte monoskopische Ansatz bedingt hier eine angepasste Vorgehensweise, die in Schwalbe und Maas (2017) im Detail beschrieben ist. Der Ansatz basiert auf der Messung eines geodätisch-photogrammetrischen Netzes (Abb. 4), bei dem vor und/oder nach der Aufnahme der Bildsequenz ein Mehrbild-

verband aufgenommen wird, aus dem ein temporäres Oberflächenmodell des Gletschers bestimmt wird. Die Georeferenzierung kann über GNSS-Messungen an den Kamerastandorten erfolgen, und der Maßstab für jeden Bildpunkt ergibt sich durch einen Schnitt des orientierten Bildstrahls mit dem Gletscheroberflächenmodell.

5 Resultate

Die in den vorigen Kapiteln skizzierten Verfahren wurden in einer Reihe von Pilotstudien eingesetzt und getestet: Jakobshavn Isbræ, Støre Qarajaq, Eqip Sermia, Sermeq Avangnardleq und Sermeq Kujatdleq in Grönland (Maas et al. 2008; Schwalbe et al. 2017), Glaciar San Rafael, Glaciar Colonia und Glaciar Grey in Patagonien (Maas et al. 2013; Schwalbe et al. 2016), Kaskawulsh Gletscher in Kanada sowie Lange Glacier auf King George Island, Antarktis (Schwalbe und Maas 2020).

Abb. 5 zeigt eine Visualisierung der Länge der Bewegungsgeschwindigkeit im Frontbereich des Jacobshavn Isbrae in Grönland für einen Tag im Sommer 2004, abgeleitet aus 4400 Trajektorien (Dietrich et al. 2007; Maas et al. 2008). Die Geschwindigkeiten erreichen dabei teilweise über 40 Meter pro Tag, was eine Verdoppelung gegenüber den Geschwindigkeiten Ende der 1990er Jahre darstellt. Mit Standardabweichungen der Geschwindigkeiten in der Größenordnung von etwa 10 cm (siehe Kap. 3) sind die ermittelten Geschwindigkeiten hoch signifikant und deutlich genauer als aus Satellitenbilddaten bestimmbare Geschwindigkeiten. Die Resultate der Prozessierung terrestrischer Bildsequenzen stellen damit auch eine gute Option zur Validierung der Resultate satellitenbasierter Verfahren dar (Johnson et al. 2020).

Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt eines Geschwin-



Abbildung (Ausschnitt) aus: Dietrich et al., 2007

Abb. 6: Ausschnitt eines Geschwindigkeitsfeldes mit gezeiteninduzierter Vertikalbewegung

digkeitsfeldes, bestehend aus 96 Bildern einer Sequenz, dessen Trajektorien über 24 Stunden eine systematische vertikale Wellenbewegung zeigen. Diese Wellenbewegung ist fast perfekt mit der Gezeitenkurve korreliert und beweist damit, dass die Gletscherzunge auf dem Wasser des Fjordes aufschwimmt und sich mit den Gezeiten auf und ab bewegt. Eine Analyse der Partizipation der Bewegung von Punkten an der Gletscheroberfläche mit der Gezeitenkurve erlaubt somit die Detektion

der Aufsetzlinie des Gletschers, welche unter anderem für eine Vorhersage des Kalbungsverhaltens und damit der Größe der vom Gletscher produzierten Eisberge relevant ist (Maas et al. 2008; Dietrich et al. 2007). Hier zeigt sich der Vorteil der fast beliebig hohen zeitlichen Auflösung ortsfester terrestrischer Kameras (hier mit 15 Minuten Aufnahmeintervall) – auf Basis von Satellitenbilddaten wäre eine solche zeitaufgelöste Analyse nicht möglich. //

Literatur

- Bishop, Michael P.; Jefferey A. Olsenholler et al. (2004): Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): Remote Sensing and GIS Investigations of the Earth's Cryosphere. Geocarto International, DOI: 10.1080/10106040408542307
- Church, John; Peter Clark et al. (2013): Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Cambridge University Press
- Dietrich, Reinhard; Hans-Gerd Maas et al. (2007): Jakobshavn Isbræ, West Greenland: Flow velocities and tidal interaction of the front area from 2004 field observations. Journal of Geophysical Research, DOI: 10.1029/2006JF000601
- Gardner, Alex S., Geir Moholdt et al. (2013): A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. Science, DOI: 10.1126/science.1234532
- Johnson, Erling; Dana Floricioiu et al. (2020): Calving dynamics derived from satellite SAR data in support of mass balance estimations in Lange Glacier, Antarctica. IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)
- Kääb, Andreas (2005): Combination of SRTM3 and Repeat ASTER Data for Deriving Alpine Glacier Flow Velocities in the Bhutan Himalaya. Remote Sensing of Environment, DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.003
- Maas, Hans-Gerd; Ellen Schwalbe et al. (2008): Determination of spatio-temporal velocity fields on glaciers in West-Greenland by terrestrial image sequence analysis. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII-B8, S. 1419–1424
- Maas, Hans-Gerd; Gino Casassa et al. (2013): Photogrammetric Techniques for the Determination of Spatio-temporal Velocity Fields at Glaciär San Rafael, Chile. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, DOI: 10.14358/PERS.79.3.299
- Meier, Wolfgang J.-H.; Jussi Griebinger et al. (2018): An Updated Multi-Temporal Glacier Inventory for the Patagonian Andes With Changes Between the Little Ice Age and 2016. Frontiers in Earth Science, Vol. 6, Art. 62
- Oerlemans, Johannes (1994): Quantifying global warming from the retreat of glaciers. Science, DOI: 10.1126/science.264.5156.243
- Pfeffer, W. Tad; Anthony A. Arendt et al. (2014): The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. Journal of Glaciology, DOI: 10.3189/2014JG13J176
- Rosenau, Ralf; Mirko Scheinert; Reinhard Dietrich (2015): A processing system to monitor Greenland outlet glacier velocity variations at decadal and seasonal time scales utilizing the Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.012
- Schwalbe, Ellen; Robert Koschitzki; Hans-Gerd Maas (2016): Recognition of drainage tunnels during glacier lake outburst events from terrestrial image sequences. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-537-2016
- Schwalbe, Ellen; Hans-Gerd Maas (2017): The determination of high-resolution spatio-temporal glacier motion fields from time-lapse sequences. Journal of Earth Surface Dynamics, DOI: 10.5194/esurf-5-861-2017
- Schwalbe, Ellen; Robert Koschitzki et al. (2020): Stereophotogrammetric measurement of spatio-temporal velocity fields at Lange Glacier, King George Island. IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)
- Vaughan, David G.; Josefino C. Comiso et al. (2013): Observations: Cryosphere. In: Climate Change 2013, S. 317–382
- Winsvold, Solveig Havstad; Andreas Kääb; Christopher Nuth (2016): Regional Glacier Mapping Using Optical Satellite Data Time Series. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2527063

Danksagung

Die Entwicklung der Methodik zur Bestimmung räumlich-zeitlich hochaufgelöster Geschwindigkeitsfelder aus terrestrischen Bildsequenzen wurde von der DFG gefördert. Die Anwendung der Verfahren unter anderem in Patagonien wurde von der TU Dresden im Rahmen ihres StB-Programms gefördert. Die Arbeiten in der Antarktis wurden von der chilenischen INACH unterstützt.

Die im Rahmen der Arbeiten entwickelte Software für subpixelgenaue Merkmalsverfolgung und Georeferenzierung steht frei zur Verfügung (<https://tu-dresden.de/geo/emt>).