ETH zürich

ETH Library

Digitale Photogrammetrie in 3D-Wolkenmessung

Vortrag an der DACH Konferenz, Wien, 17.-21. September 2001

Conference Paper

Author(s):
Seiz, Gabriela; Grün, Armin

Publication date:
2001

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-004329577

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Vortrag an der DACH Konferenz, Wien, 17. – 21. September 2001

Digitale Photogrammetrie in der 3D-Wolkenmessung

Gabriela SEIZ [1, 2], Armin GRUEN [1]
[1] Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETHZ, CH-8093 Zürich.
[2] MeteoSchweiz, Krähbühlstr. 58, Postfach, CH-8044 Zürich

Kurzfassung

Seit mehr als hundert Jahren werden mit photogrammetrischen Methoden makroskopische Wolkenparameter (Bewölkungsgrad, Wolkenhöhe und -geschwindigkeit) gemessen. Dank der Entwicklung von digitalen Kameras, den Fortschritten in den automatischen Auswerteverfahren der digitalen Photogrammetrie und durch die rasanten Fortschritte im Bereich der Digitalkameras in den letzten Jahren sind Echtzeit-Kamerasysteme konkurrenzfähig geworden zu anderen Messinstrumenten wie Wolkenradar oder Lidar, und können diese auch in integrierten Beobachtungssystemen ergänzen. Damit steht das Thema von Wolkenkamera-Netzwerken im Rahmen der Wetterdienste wieder zur Diskussion und zeigt so eine Alternative zu den oft subjektiven und zeitlich spärlichen Augenbeobachtungen.

Im folgenden beschreiben wir das von uns entwickelte bodengestützte Kamerasystem, bestehend aus zwei (oder drei) kommerziell erhältlichen digitalen CCD Kameras mit Weitwinkel-Objektiven. Das System kann benutzt werden, um ein Oberflächenmodell der Wolkenbasis und die 3D-Wolkengeschwindigkeit (jeder sichtbaren Wolkenschicht) zu bestimmen. Dabei werden moderne Methoden der digitalen Photogrammetrie verwendet. Dazu gehört die genaue Ermittlung der inneren und äusseren Orientierung der Kameras, die in unserem Fall mit einem Nahbereichsphotogrammetrie-Testfeld, Sternen und Flugzeugen (ausgestattet mit DGPS) durchgeführt wurde. Die Matching-Verfahren zum Finden von korrespondierenden Punkten in den Stereobildern wurden erweitert, um mit den speziellen Eigenschaften von Wolken wie schwache Textur, schlecht definierte Kanten, Semi-Transparenz, etc. umgehen zu können. Als Ergänzung werden auch Kanten an Wolkenrändern und an Diskontinuitäten innerhalb von Wolkengebieten extrahiert, um die Wolkenobjekte noch besser zu modellieren.

Die Wolkenmessung mittels Photogrammetrie beschränkt sich heute nicht mehr nur auf Boden- und Flugzeugaufnahmen. Vermehrt werden auf Erderkundungssatelliten (ERS-2, EOS-Terra) stereofähige Sensoren eingesetzt, um Stereobilder von der Wolkenobergrenze zu erhalten. Dabei ist auch hier der Trend von Zwei- zu Multi-Kamera-Systemen zu erkennen. Wir zeigen zum Schluss Resultate der Anwendung unserer Verfahren auf die Stereo-Wolkenbilder von ATSR2 und deren Vergleich mit simultanen Bodenmessungen mit unserem Kamerasystem. Damit wurde bestätigt, dass sich das Bodensystem zur Validierung von Wolkenobergrenzen-Höhen (abgeleitet aus Satelliten-Stereobildern) von vertikal dünnen Wolken eignet; zusätzlich sind aber in den Bodenaufnahmen auch kleinskalige Wolkensysteme zu erkennen, was besonders für ein genaues Nowcasting in Gebieten mit viel Topographie von entscheidender Bedeutung sein kann.

1. Einleitung

Die Verteilung und Eigenschaften der Wolken haben einen grossen Einfluss sowohl auf die totale Strahlungsmenge am Boden wie auch auf die reflektierte Strahlung oberhalb der Wolkenschicht. Die Höhe der Wolkenuntergrenze ist dabei ein dominierender Faktor in der Bestimmung der IR-Strahlungseigenschaften von Wolken (Allmen and Kegelmeyer, 1996). Die automatische Bestimmung von Wolkenparametern ist nun wegen ihrer grossen räumlichen und zeitlichen Variabilität sehr schwierig; auch heutzutage werden nachwievor die meisten Messungen als Augenbeobachtungen manuell durchgeführt; daneben hat sich vor allem der Ceilometer (Laser) als Fernerkundungsgerät bewährt, um auf Flughäfen in kurzen Zeitabständen die Wolkenhöhe zu messen.
Dass sich die Photogrammetrie hervorragend für die Messung von Wolkenparametern eignet, wurde bereits vor mehr als hundert Jahren, während des Internationalen Wolkenjahres 1896/97 erkannt (Koppe, 1896). Es handelte sich damals insbesondere um die

Bestimmung der Höhe der Wolken sowie ihrer Geschwindigkeit nach Grösse und Richtung. Diese Aufgabe wurde dem damaligen Stand der Photogrammetrie entsprechend messtischphotogrammetrisch gelöst, wobei die Ermittlung zusammengehöriger Bildpunkte oft auf Schwierigkeiten stiess (Lacmann, 1950). Weitere wolkentopographische Arbeiten wurden von Räthjen (1930) durchgeführt; der Schwerpunkt seiner photogrammetrischen Untersuchungen lag aber nicht primär bei den beschriebenen quantitativen Wolkenparametern (Höhe und Geschwindigkeit), sondern zusätzlich bei der Erfassung der Wolkenformen und -gebilde, boden- und flugzeuggestützt, zur visuellen Unterstützung der Meteorologen beim Nowcasting. Flugzeuggestützt (wie auch satelliten-gestützt; siehe Kapitel 6) ergibt sich aber das Problem, dass zwar grosse Basislängen möglich sind, indem die Bewegung der Plattform und die unterschiedlichen Blickwinkel der montierten Kameras ausgenutzt werden, gleichzeitig aber keine synchronen Stereo-Aufnahmen der Wolkenpunkte möglich ist. Ein Zeitunterschied von wenigen Minuten ergibt bereits eine markante Verschiebung der Wolken. Neben dem Bewegungsfehler (der zB. mit Wind-Sondierungsdaten korrigiert werden könnte) erschwert der Zeitunterschied aber auch das automatische Erkennen gleicher Punkte in den quasi-Stereopaaren, da sich auch signifikante Strukturen innerhalb der Wolken in dieser Zeitspanne bereits verändert haben (Deformation). Räthjen erwähnt noch die zweite Variante von flugzeuggestützten Stereobeobachtungen, indem die Flügelspannweite des Flugzeugs die Basis bestimmt, und an jedem Flügelende je eine Kamera montiert ist. Wegen der sehr kleinen Basis ist diese Methode für genaue Messungen jedoch nicht geeignet.
Bradbury und Fujita (1968) zeigen die Verwendung von Stereo-Kamerasystemen mit Fisheye-Objektiven (sogenannte Whole-Sky Systeme) in einem kleinen Prototyp-Netzwerk. Die berechneten Wolkengeschwindigkeiten (und -höhen) wurden anschliessend zur Validierung von satelliten-basierten Wolkenwind-Daten verwendet.
Ein operationeller Einsatz von filmbasierten Kamerasystemen im Wetterdienst ist aber nicht sinnvoll, da die Bilder dem Prognostiker mehr oder weniger in Echtzeit zur Verfügung stehen müssen. Mit der Entwicklung von digitalen Whole-Sky-Systemen und der Anwendung von automatischen Verfahren zur Auswertung der Stereobilder kann dieser Zeitfaktor heutzutage ausreichend berücksichtigt werden. Erste Feldmessungen mit digitalen Systemen wurden an einigen ARM Stationen (Atmospheric Radiation Measurement Program; Stokes and Schwartz, 1994) mit dem WSI System von Shields et al. (1999) durchgeführt, während kurzer Zeit auch in Stereo (Allmen und Kegelmeyer, 1996). Die Resultate zeigen drei zentrale Punkte, die bei der Entwicklung eines solchen Kamera-Messsystems speziell zu beachten sind: die Wahl des Sensors, die genaue Kalibrierung der Kameras und die automatischen Verfahren zum Finden von korrespondierenden Punkten in den Stereobildern (Matching).
Wir beschreiben im folgenden das bei uns am Institut entwickelte Kamerasystem, das einerseits im Mesoscale Alpine Programme, Teilprojekt FORM im Rheintal (CH), Teil des umfassenden ‘Composite Observing Networks’ war und das andererseits im EU-Project Cloudmap zur Validierung von satelliten-basierten Wolkenhöhen von Cirren eingesetzt wurde.

2. Terrestrisches Kamerasystem

Die Auswahl des Sensors und der Kamera ist entscheidend für die Genauigkeit der anschliessenden Auswertungen. Bei der Kamerawahl sind folgende Kriterien zu beachten: die Stabilität der inneren Orientierung (Chip, Kamerakonstante), die Steuerbarkeit via Laptop (Auslösung, Einstellung Parameter wie Belichtungszeit, Blende, etc., Datentransfer, Programmier-Interface), die maximale Belichtungszeit (idealerweise sollten > 120s möglich sein), die Geschwindigkeit der Datenspeicherung bzw. des Datentransfers, das Datenformat, der Stromverbrauch und der Preis.
Die zu berücksichtigenden Sensor-Kriterien sind die räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung des Chips und das Hintergrund-Rauschen (temperaturabhängig).
Für die Messungen im Rahmen des Mesoscale Alpine Programme (MAP) im Herbst 1999 wurde die Kodak DCS460 Kamera verwendet. Diese Kamera erfüllte die meisten der genannten Kriterien, ausser dass längere Belichtungszeiten (> 30s) manuell an der Kamera

ausgelöst werden müssen und dass durch die einseitige Montierung des Chips Veränderungen der Lage des Hauptpunktes nicht ausgeschlossen werden können (siehe Kapitel 3). Die Details zur Kodak DCS460 Kamera und Sensor sind in Seiz und Baltsavias (2000a) beschrieben.

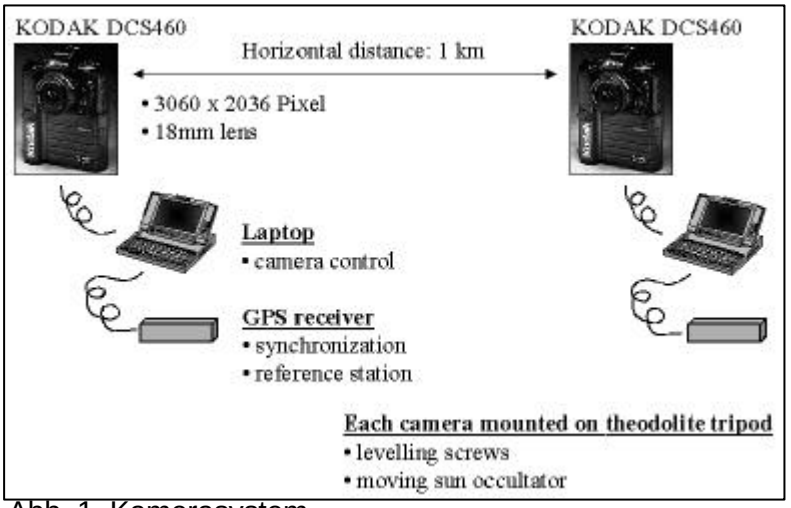

Abb. 1. Kamerasystem.

Jede Kamera ist via SCSI Interface mit einem Laptop mit Funkuhr verbunden, was eine synchrone Auslösung der Stereobilder garantiert. Durch die Montierung auf einem adaptierten Theodolit-Stativ kann die Kamera sehr genau horizontiert werden. Am Stativ ist zudem eine automatisch nachgeführte Sonnenabschattung angebracht, die Sonneneffekte ('blooming') in den Bildern verhindert. Als Objektiv wurde ein 18mm Nikon-Objektiv mit einem Öffnungswinkel von 100° verwendet. (Abb. 1)

3. Kamerakalibrierung

Die Kalibrierung der Kameras umfasst die Bestimmung der inneren (Kamerakonstante, Hauptpunkt, Objektivverzeichnung) und der äusseren Orientierung (Standort, Winkel).
Die Parameter der inneren Orientierung können mit einem photogrammetrischen Testfeld mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden; in unserer Untersuchung wurde ein 4.2 x 2 x 1.2 m^3 Testfeld mit 77 signalisierten und 20 codierten Punkten an unserem Institut verwendet. Der genaue Kalibrierungsprozess ist in Seiz und Baltsavias (2000a) beschrieben.
Die Koordinaten beider Kamera-Standorte wurden mit GPS gemessen. Für die Bestimmung der Winkel sind Passpunkte am Himmel ('sky control points') notwendig. Während der Messkampagne wurden zwei unabhängige Methoden getestet:

- Flugzeug: Eine KingAir der Schweizer Luftwaffe, ausgestattet mit differentiellem GPS, flog entlang eines vorberechneten Flugweges innerhalb der Blickfelder der Kameras. Mit der registrierten Aufnahmezeit der Bilder erhielt man die 3D-Koordinaten des Flugzeuges; die Bildposition des Flugzeuges wurde manuell im Bild gemessen. Mittels Ausgleichung mit bekannter innerer Orientierung und bekanntem Standort können anschliessend die Winkel der beiden Kameras bestimmt werden.
  Wie die Feldmessungen gezeigt haben, ist die Methode zwar technisch durchführbar, verlangt aber einen nicht zu unterschätzenden Planungsaufwand, und ist auch entsprechend teuer für einen operationellen Einsatz. Zudem kann die Fluggeschwindigkeit des Flugzeuges nicht beliebig verringert werden, was eine sehr präzise Zeiterfassung voraussetzt.
- Sterne: Während weitgehend wolkenlosen Nächten wurden zur Kalibrierung Nachtaufnahmen mit langen Belichtungszeiten aufgenommen. Ein ungekühlter CCD Sensor registriert neben dem eigentlichen Signal immer noch ein beträchtliches Hintergrundrauschen, das hauptsächlich aus dem thermisch bedingten Dunkelstrom besteht. Obwohl die Nachtaufnahme zusätzlich noch Himmelssignale aufzeichnet (wie zB in der Atmosphäre gestreutes Licht), kann das Hintergrundrauschen praktisch perfekt mit

einem Bild gleicher Belichtungszeit und geschlossenem Objektivdeckel simuliert werden. Durch Differenzenbildung der Nachtaufnahme und des Rausch-Bildes können die Sternsignale extrahiert werden. Die Detektion der Sternsignale wird zudem durch folgende zwei Faktoren beeinflusst:

- Mit zunehmender Belichtungszeit sind die Sternspuren mehr und mehr als lineare Strukturen klar vom Rauschen trennbar.
- Mit zunehmender Belichtungszeit weichen die Sternspuren vom linearen Modell, das in der Prozessierungssoftware verwendet wird (Stern-Passpunkt = zentraler Punkt der Sternspur), ab.

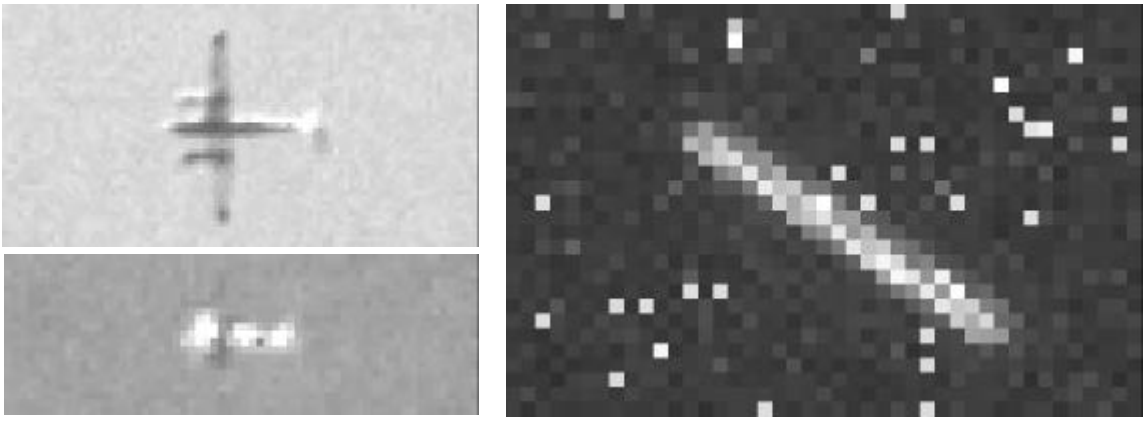

Abb. 2. 'Sky control points'; links: KingAir auf 1000m (oben) bzw. 2000m (unten) Flughöhe; rechts: Sternspur mit Hintergrundrauschen (Belichtungszeit: 240s).

4. Bestimmung der Wolkenhöhe

Mit bekannter innerer und äusserer Orientierung können nun die 3D-Koordinaten für jeden Wolkenpunkt, der in beiden Bildern lokalisierbar ist, berechnet werden.
Um das Kamerasystem auch in einem operationellen Netzwerk verwenden zu können, muss die Suche von korrespondierenden Punkten (Matching) zuverlässig automatisch ablaufen. Das Matching in Wolkenbildern wird u.a. durch die schwache Textur, die Sättigung innerhalb der Wolken, die schlecht definierten Wolkenränder, Diskontinuitäten bei mehreren Wolkenschichten und die teilweise semi-transparente Struktur der Wolken erschwert. Der an unserem Institut entwickelte Multi-Photo Geometrically Constrained Matching Algorithmus (Baltsavias, 1991), basierend auf Least-Squares-Matching (Grün, 1985), wird darum speziell für diese Matching-Probleme von Wolken erweitert und angepasst (Seiz und Baltsavias, 2001). Die automatische Punktzuordnung ist in fünf Schritte gegliedert:
Bild-Vorverarbeitung → Merkmalsextraktion (Punkte, Kanten) → Bestimmung der Näherungswerte für das Matching → hierarchisches Matching → Qualitätskontrolle.

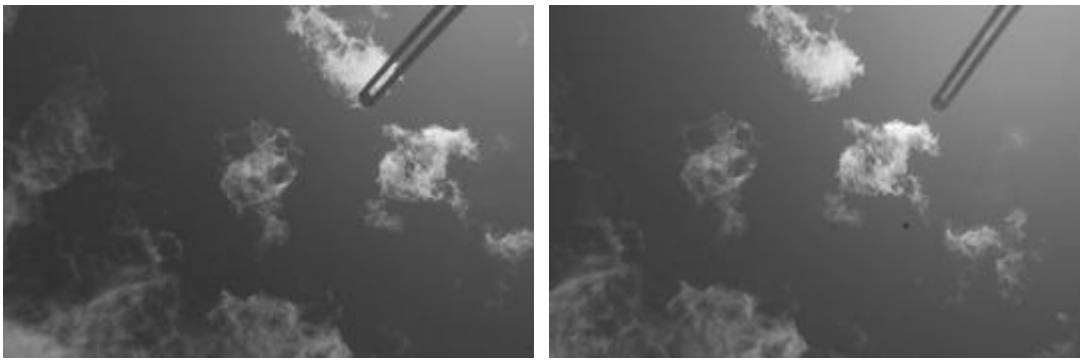

Abb. 3. Stereopaar, 8.10.1999 (Teil der Sonnenabschattung oben rechts sichtbar).

In Tabelle 1 sind die Resultate von zwei ausgewählten Wolkensituationen während der MAP-SOP aufgelistet; in Kapitel 6 werden diese Ergebnisse mit Radiosondierungen und Satellitenmessungen verglichen.

Datum, Zeit	Mittlere Wolkenhöhe [km]	Höhenbereich [km]
08/10/1999, 10:58	4.0	3.8 – 4.2
13/10/1999, 10:16	8.0 10.9	7.8 – 8.1 10.7 – 11.1

Tab. 1. Resultate des Kamerasystems für zwei ausgewählte Fälle (Höhen über N.N.).

Der Vorteil des photogrammetrischen Systems ist die Auswertung aller sichtbaren Wolkenpunkte im Gegensatz zu einzelnen Punktmessungen der herkömmlichen Messgeräte. Dies erlaubt, die automatisch bestimmten 3D-Wolkenpunkte nach dem Matching und der Qualitätskontrolle weiterzuverarbeiten; mit dem Ziel, die einzelnen Wolkenobjekte zu modellieren und schliesslich in einer 3D-Darstellung zu visualisieren.

5. Bestimmung der Wolkengeschwindigkeit

Aus den Stereo-Bildsequenzen kann durch Tracking von markanten Wolkenpunkten die 3D-Wolkenbewegung bestimmt werden. Vor allem in Gebieten, in denen die atmosphärische Strömung durch die Orographie beeinflusst wird, sind die Wolkenbewegung und die Windgeschwindigkeit auf Wolkenhöhe gar nicht oder nur schlecht korreliert. Bisher sind solche Fälle praktisch nicht dokumentiert, da zwar die Windgeschwindigkeit mit Radiosondierungen und Windprofilern operationell gemessen wird, die tatsächlichen Wolkenbewegungen jedoch nur mit Satellitenmessungen aufgezeichnet werden. Diese sind selbstverständlich für kleinskalige Phänomene zu grob aufgelöst.

6. Vergleich mit boden- und satellitengestützten Messungen

a) Vergleich mit Radiosondierungen

Während der MAP-Special Observing Period (SOP) wurden 7 temporäre Radiosondierungsstationen im Gebiet des Rheintales betrieben. Von den zwei Typen, low-level Sonden (Temperatur, Wind) und high-level Sonden (Luftdruck, Temperatur, Feuchte, Wind) können die zweiten für Vergleiche der Wolkenhöhe herangezogen werden. Mit der in Chernykh und Eskridge (1996) beschriebenen Methode werden die Wolkenhöhen in Radiosondierungen berechnet.

Abbildung 3 zeigt die high-level Sondierung vom 8.10.1999, 12:00, der Station Diepoldsau. Die Auswertung der Radiosondierung ergibt eine gut definierte Wolkenschicht bei ca. 630-600 hPa, was einem Höhenbereich von 3.9-4.4 km über Meer entspricht.

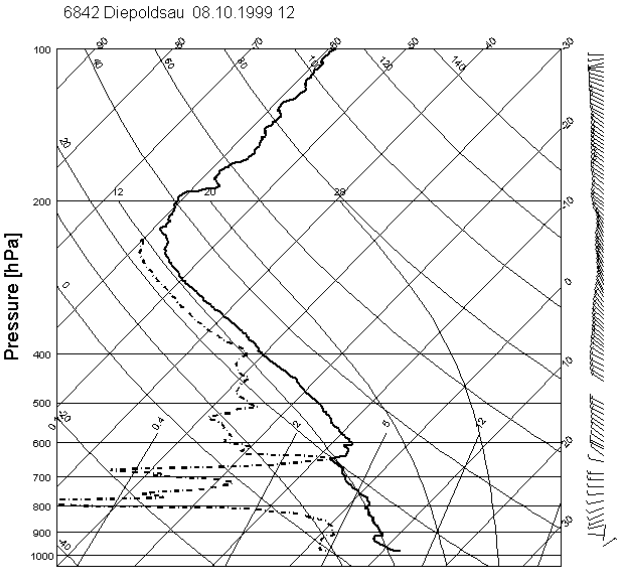

Abb. 4. Radiosondierung, 8.10.1999, 12:00.

b) Vergleich mit Satellitenmessungen bei vertikal dünnen Wolken

Am 13.10.1999 wurden simultan zum Überflug des ERS-2 Satelliten Bodenaufnahmen durchgeführt. Das ATSR2-Instrument an Bord von ERS-2 liefert durch das spezielle Scansystem, das in einer Umdrehung zuerst in Vorwärtsrichtung und dann in Nadirrichtung ein Objekt abtastet, kontinuierlich Stereoaufnahmen. Die verwendete Methodik zur Höhenbestimmung (inkl. Windfehler-Korrektur) ist in Seiz und Baltsavias (2000b) beschrieben. Das Blickfeld des Boden-Kamerasystems entspricht für diesen Fall einer

Fläche von 14 x 9 ATSR2 Pixeln. Die mittlere Wolkenobergrenzen-Höhe, berechnet aus dem ATSR2 11ìm Kanal, beträgt 12.0 km über Meer.
Dieser Fall zeigt die Möglichkeit der Validierung von satelliten-basierten Wolkenhöhen von vertikal dünnen Wolken mit unserem neuen Kamerasystem. Es ist aber zu beachten, dass durch die unterschiedliche Auflösung teilweise zusätzliche Wolkenstrukturen in der höheren Auflösung detektiert, bzw. im Gegenteil gewisse Wolkenstrukturen in der groben Satellitenauflösung (1 km im Nadir) herausgemittelt werden.

7. Schlussfolgerungen

Die Feldmessungen während der MAP-SOP haben das Potential unseres neuen Kamerasystems zur Bestimmung des Oberflächenmodells der Wolkenbasis aufgezeigt. Das photogrammetrische System ist somit eine Ergänzung zu den heute operationellen Beobachtungen und Messungen, die wegen der schlechten zeitlichen Auflösung (Augenbeobachtungen) bzw. wegen der ungenügenden räumlichen Verteilung und der schwierigen Interpretierbarkeit (Punktmessungen mit Ceilometer) die Anforderungen der Prognostiker und als Inputdaten für numerische Wetter- und Klimamodelle nicht erfüllen.
Entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz des photogrammetrischen Systems ist die Sensorwahl, die genaue Kalibrierung der Kameras und das Matching-Verfahren zum Finden von korrespondierenden Punkten in den Stereobildern. Im Moment werden bei uns neue Sensoren (u.a. Fuji CCD Chip mit hexagonalen Pixeln, Cci4 CMOS Chip) evaluiert, welche die genannten Anforderungen für Wolkenmessungen noch besser erfüllen.
Bei der Kalibrierung empfiehlt sich für eine operationelle Anwendung die Methode der Sternaufnahmen für die Winkel, GPS-Messung der Stationskoordinaten und Testfeld-Kalibrierung für die Parameter der inneren Orientierung. Es muss zudem bei kommenden Messungen darauf geachtet werden, dass keine Veränderungen in der inneren und äusseren Orientierung vorkommen können.
Beim Matching ist vor allem die Berechnung von Näherungswerten der extrahierten Punkte noch zu verbessern. Geplant ist zudem der Einsatz von mehr als zwei synchronen Kameras, was die Verwendung von unterschiedlichen Basislängen je nach Wolkensituation erlauben und die Zuverlässigkeit des Matchings durch Reduktion multipler Lösungen (welche vor allem in Wolkenformationen mit wiederholten Texturmustern auftreten) verbessern würde. Erste manuelle Messungen in Bildsequenzen haben zudem das Potential des terrestrischen Kamerasystems zur Bestimmung der 3D-Wolkengeschwindigkeit bestätigt; die Zeitabstände zwischen den Bildern sollten aber nicht grösser als ca. 60 Sekunden sein, da sonst das Tracking der Wolkenpunkte wegen der Deformation der Wolkenstrukturen stark erschwert ist.
Die Vergleiche mit konventionellen Messungen und mit Resultaten von Satelliten-Auswertungen haben gezeigt, dass sich der Einsatz des Systems in Beobachtungs-Netzwerken lohnt, u.a. zur Validierung von satelliten-basierten Wolkenhöhen und -geschwindigkeiten. Es handelt sich dabei aber neben der Validierung gleichzeitig auch um das Detektieren von kleinskaligen Wolkenstrukturen, die in den grob aufgelösten Satellitendaten nicht sichtbar sind, je nach Wettersituation aber für das Nowcasting von entscheidender Bedeutung sein können. Ein neuer Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten ist zudem die Entwicklung einer realistischen 3D-Modellierung und -Visualisierung der Wolkenobjekte aus den terrestrischen und satelliten-gestützten Stereo-Auswertungen.

Referenzen

- Allmen, M.C., Kegelmeyer jr., W.Ph., 1996. The computation of cloud-base height from paired whole-sky imaging cameras. J. Atmos. Ocean. Techn., 13(2), pp. 97-113.
- Baltsavias, E.P., 1991. Multiphoto Geometrically Constrained Matching. Ph. D. dissertation, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Mitteilungen No. 49, 221 p.
- Bradbury, D.L. and Fujita, T., 1968. Computation of height and velocity of clouds from dual, whole-sky, time-lapse picture sequences. Satellite and Mesometeorology Research Project (SMRP) Paper No. 70. Department of Geophysical Sciences, University of Chicago.

- Chernykh, I.V., Eskridge, R.E., 1996. Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings. J. Appl. Met., 35(8), pp. 1362-1369.

- Grün, A., 1985. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. S. Afr. J. of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14 (3), pp. 175-187.

- Koppe, C., 1996. Photogrammetrie und Internationale Wolkenmessung. Braunschweig Verlag, 108 p.

- Lacmann, O., 1950. Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nicht-topographischen Gebieten. S. Hirzel Verlag, Leipzig.

- Räthjen, P., 1931. Stereoskopische und stereophotogrammetrische Wolkenaufnahmen vom Flugzeug aus. Bildmessung und Luftbildwesen, 6 (2), S. 49-54.

- Seiz, G., Baltsavias, E.P., 2000a. Cloud mapping using ground-based imagers. Int. Arch. Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), Vol. 33, Part B7/4, pp. 1349-1356.

- Seiz, G., Baltsavias, E.P., 2000b. Satellite-and ground-based stereo analysis of clouds during MAP. EUMETSAT Conference Proceedings, pp. 805-812.

- Seiz, G. and Baltsavias, E.P., 2001. Cloud mapping using ground-based imagers. 11th AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Albuquerque, 15 - 18 January 2001. Conference Proceedings, pp.

- Shields, J.E., Karr, M.E., Tooman, T.P., Sowle, D.H., Moore, S.T., 1999. The whole sky imager – a year of progress. http://www-mpl.ucsd.edu/people/jshields/shields_98.pdf.

- Stokes, G.M., Schwartz, S.E., 1994. The Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program: Programmatic background and design of the cloud and radiation test bed. Bull. Am. Met. Soc., 75(7), pp. 1201-1221.