

**Zeitschrift:** Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

**Herausgeber:** Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

**Band:** 100 (2002)

**Heft:** 10

**Artikel:** 3D-Wolkenmodellierung für Wetter- und Klimamodelle

**Autor:** Seiz, G. / Baltsavias, E. / Grün, A.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-235938>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## 3D-Wolkenmodellierung für Wetter- und Klimamodelle

Im EU-Projekt CLOUDMAP2 werden durch das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich satelliten- und bodengestützte Messungen von Wolken stereophotogrammetrisch ausgewertet, zur Bestimmung der makroskopischen Parameter «Wolkenhöhe» und «Wolkengeschwindigkeit». Diese Wolkenprodukte können anschliessend zur genaueren 3D-Modellierung und Visualisierung der Wolkensituation verwendet werden.

*Dans le projet européen CLOUDMAP2, l'Institut de Géodésie et Photogrammétrie (ETHZ) travaille avec des mensurations satellitaires et terrestres de nuages pour calculer les paramètres macroscopiques «hauteur de nuage» et «vitesse de nuage». Ces produits vont alors être utilisés pour une modélisation 3D plus précise et la visualisation de la situation nuageuse.*

Nell'ambito del progetto europeo CLOUDMAP2, l'Istituto di fotogrammetria e telerilevamento del Politecnico federale di Zurigo (ETHZ) valuterà la misurazione di nuvole tramite tecniche fotogrammetriche da satellite e da terra, per la determinazione di parametri macroscopici quali l'«altezza delle nuvole» e la «velocità delle nuvole». Questi prodotti riguardanti le nuvole potranno conseguentemente venir utilizzati per una più precisa modellizzazione e visualizzazione dello stato di nuvolosità.

G. Seiz, E. Baltasvias, A. Grün

### Einleitung

Nachwievor ist der Einfluss der Wolken in der globalen Klimaänderung nicht ausreichend bekannt. Ein Grund ist unter anderem, dass numerische Wetter- und Klimamodelle mit stark vereinfachten Wolken-Strahlungs-Modellen arbeiten. CLOUDMAP2 ist eines von mehreren EU-Forschungsprojekten im 5th Framework Programme, die sich mit der Integration von Wolkenparametern in numerische Wettermodelle befassen. Ein Ziel von CLOUDMAP2 ist die Verbesserung dieser Modellparameterisierungen, was ein verbessertes Verständnis des Streu- und Absorptionsverhaltens von Wolken voraussetzt. Zu diesem Zweck werden in CLOUDMAP2 global sehr genaue 3D-Wolkendaten (makro- und mikrophysikalische Parameter) gesammelt, und zwar von verschiedenen Sensoren und mit unterschiedlichen Methoden (CLOUDMAP2, 2002). Die Resultate der Ober- und Unterseite der Wolken werden abschlies-

send zu einer 3D-Visualisierung der Wolkenobjekte zusammengefügt.

Der Beitrag des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich beinhaltet die Bestimmung der Wolkenhöhe mittels photogrammetrischer Methoden (satelliten- und bodengestützt), die Entwicklung eines bodengestützten Prototyp-Kamerasystems zur stereoskopischen Wolkenvermessung und die 3D-Wolkenmodellierung und -Visualisierung. In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (Meteo Schweiz) wird zudem die Assimilation von hochaufgelösten 3D-Wolkendaten in das operationelle numerische Wettermodell aLMo der Meteo Schweiz getestet.

### Bodengestützte Messungen

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; Lacmann, 1950). Dank der Entwicklung von digitalen Kameras, den



Abb. 1: CCD-Kamerasystem zur terrestrischen Wolkenmessung.

Fortschritten in den automatischen Auswerteverfahren der digitalen Photogrammetrie und durch die rasanten Fortschritte im Bereich der Digitalkameras sind Echtzeit-Kamerasysteme in den letzten Jahren konkurrenzfähig geworden zu anderen Messinstrumenten, wie Wolkenradar oder Lidar.

Das neue ETH Stereo-Kamerasystem (Skycam) (Abb. 1) besteht aus mindestens zwei Kamera-Stationen, welche horizontal 100 m bis 1 km voneinander entfernt installiert werden. Jede Kamera ist mit einem Laptop mit Funkuhr verbunden, was eine synchrone Auslösung der Stereobilder garantiert. An der Aussenseite ist zudem eine automatisch nachgeführte Sonnenabschattung angebracht, die Sonneneffekte («blooming») in den Bildern verhindert. Als Objektiv wurde für unsere Messungen ein 18mm Nikon-Objektiv mit einem Öffnungswinkel von 100° verwendet. Für die Messungen im Rahmen des Mesoscale Alpine Programme (MAP) im Herbst 1999 wurde die Kodak DCS460 Kamera verwendet; die neueste Version des Systems, welche seit Herbst 2001 auf dem Flughafen Zürich-Kloten installiert ist, arbeitet mit der Fujifilm S1 Pro Kamera. Die Kalibrierung der Kameras umfasst die Bestimmung der inneren (Kamerakonstante, Hauptpunkt, Objektivverzerrung) und der äusseren Orientierung (Standort, Winkel). Der Kalibrierungspro-

zess ist im Detail in Seiz et al., 2002 beschrieben. Die Parameter der inneren Orientierung können mit unserem photogrammetrischen Testfeld mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Die Koordinaten der Kamera-Standorte wurden mit GPS gemessen. Für die Bestimmung der Winkel sind Passpunkte am Himmel («sky control points») notwendig. Während der MAP 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. 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 (Abb. 2).
- **Sterne:** Während weitgehend wolkenlosen Nächten wurden zur Kalibrierung Nachtaufnahmen mit langen Belichtungszeiten aufgenommen. Ein ungekühlter CCD Sensor registriert neben dem eigentlichen Signal immer noch

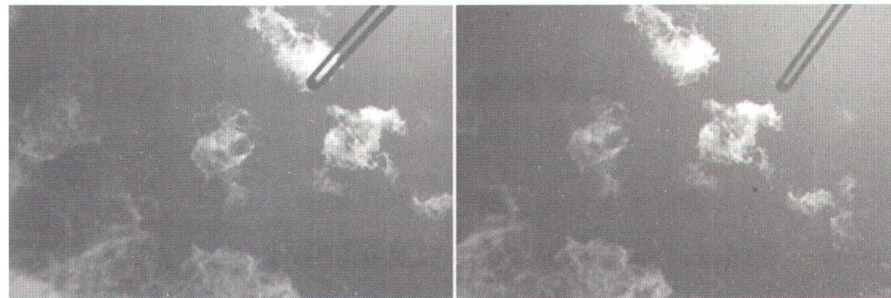


Abb. 3: Stereopaar, 8.10.1999 (Teil der Sonnenabschattung in beiden Bildern oben rechts sichtbar).

ein beträchtliches Hintergrundrauschen, das hauptsächlich aus dem thermisch bedingten Dunkelstrom besteht. Obwohl die Nachtaufnahme zusätzlich noch Himmelssignale aufzeichnet (wie z.B. in der Atmosphäre gestreutes Licht), kann das Hintergrundrauschen praktisch perfekt mit einem Bild gleicher Belichtungszeit und geschlossenem Objektivdeckel simuliert werden. Durch Differenzbildung der Nachtaufnahme und des Rausch-Bildes können die Sternsignale extrahiert werden (Abb. 2).

Mit bekannter innerer und äusserer Orientierung können nun die 3D-Koordinaten für jeden Wolkenpunkt, der in beiden Bildern lokalisierbar ist, berechnet werden (Abb. 3). 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 inner-

halb 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 (Grün, 1985; Baltsavias, 1991), basierend auf Least-Squares-Matching (LSM), wird darum speziell für diese Matching-Probleme von Wolken erweitert und angepasst (Seiz et al., 2002). Die automatische Punktzuordnung ist in fünf Schritte gegliedert: Bild-Vorverarbeitung → Merkmalsextraktion (Punkte, Kanten) → Bestimmung der Näherungswerte für das Matching → hierarchisches Matching → Qualitätskontrolle.

Aus den Stereo-Bildsequenzen kann zusätzlich 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, die für detaillierte Phänomene zu grob aufgelöst sind.

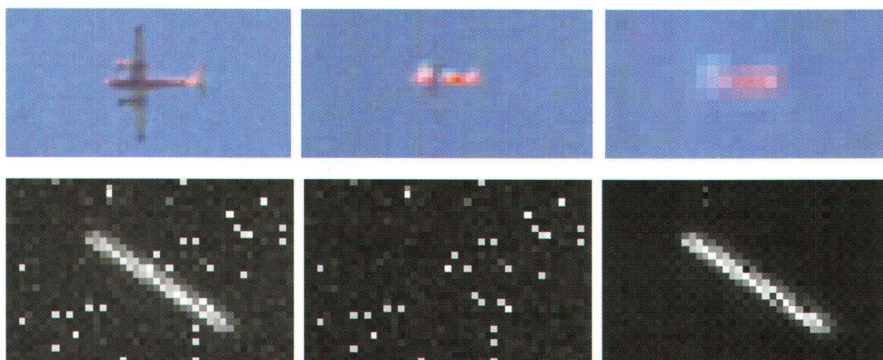


Abb. 2: «Sky control points»; oben: KingAir auf 1000 m (links), 2000 m (mitte) und 4000 m (rechts) Flughöhe; unten: Sternspur mit Hintergrundrauschen (Belichtungszeit: 240 s), Hintergrundrauschen bei geschlossenem Objektivdeckel und extrahierte Sternspur.

## Satellitenbasierte Messungen

Stereophotogrammetrische Auswertungen von Wolken aus Satellitenbildern ha-

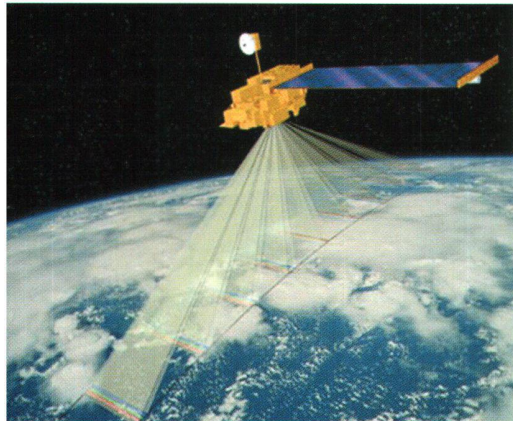


Abb. 4: Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR).

ben eine gewisse Tradition in der Satellitenmeteorologie (Hasler, 1981). Momentan können über Europa folgende Satellitenkonstellationen für Stereo-Auswertungen verwendet werden:

- Polarorbiter mit zwei Aufnahmerichtungen: ERS2-ATSR2 (ENVISAT-AATSR), EOS Terra-ASTER
- Polarorbiter mit mehr als zwei Aufnahmerichtungen: EOS Terra-MISR
- zwei geostationäre Satelliten: Meteosat-6 and Meteosat-7.

Die satellitenbasierten Stereopaare werden mit denselben Algorithmen wie die bodengestützten Bildpaare bearbeitet. Eine Schwierigkeit der Auswertung der Daten von einem Polarorbiter ist der Höhenfehler, der durch die Wolkenbewegung (bzw. genauer durch die Bewegungskomponente in Flugrichtung des Sensors) innerhalb des Zeitintervalls zwischen Aufnahmerichtung 1 und Aufnahmerichtung 2 verursacht wird. Dieser

	ATSR2	Meteosat-6	Skycam	
			Untere Schicht	Obere Schicht
Höhe [km ü. NN.]	0.87 $\mu\text{m}$ : $10.2 \pm 0.7^1$ 11.0 $\mu\text{m}$ : $11.3 \pm 0.2^1$	–	$8.0 \pm 0.11$	$10.9 \pm 0.13$
Wolkenwind, Geschw. [m/s]	–	$19.3^2$	17.8	25.8
Wolkenwind, Richtung [°]	–	$275^2$	274	276

<sup>1</sup> Rechteck mit 20 x 20 Pixel    <sup>2</sup> Rechteck mit 8 x 5 Pixel

Tab. 1: Berechnete Wolkenparameter aus ATSR2, Meteosat-6 und dem bodengestützten Stereo-Kamerasystem (skycam), MAP Target Area «Rheintal», 13. Oktober 1999.

«Wolkenwind-Fehler» kann durch das Tracking von simultanen Meteosat-Bildsequenzen abgeschätzt und korrigiert werden (Seiz und Baltsavias, 2000). Mit mindestens drei nicht symmetrischen Aufnahmewinkeln können die korrekte Wolkenhöhe und die Wolkenwind-Komponenten direkt berechnet werden; der Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) auf EOS-Terra, gestartet im Dezember 1999, erlaubt diese Möglichkeit mit seinen neun Blickwinkeln ( $-70.5^\circ$  (= DA),  $-60.0^\circ$  (CA),  $-45.6^\circ$  (BA),  $-26.1^\circ$  (AA),  $0.0^\circ$  (AN),  $26.1^\circ$  (AF),  $45.6^\circ$  (BF),  $60.0^\circ$  (CF), and  $70.5^\circ$  (DF)) (Abb. 4). LSM Matching-Tests haben aber gezeigt, dass das Matching zwischen weiter auseinanderliegenden Aufnahmerichtungen (von DF zu DA sind es ca. 7 min Zeitunterschied; von einer Aufnahmerichtung zur nächsten jeweils ca. 40 s), und vor allem mit den äussersten Blickwinkeln sehr

schwierig sein kann (Abb. 5). Momentan basieren unsere Arbeiten auf den georeferenzierten L1B2 Daten; mit der Entwicklung eines generellen Sensormodells für lineare CCD-Sensoren auf Flugzeugen und Satelliten (Poli, 2002) werden wir unsere Auswertungen in Zukunft direkt mit den L1B1 Rohdaten beginnen, was die Verwendung von geometrischen Bedingungen im LSM Algorithmus erlauben wird. Unsere Validierungsarbeiten mit MISR leisten auch einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung des operationellen NASA-JPL L2TC Produktes (Horvath et al., 2002).

## Vergleich von boden- und satellitengestützten Messungen

Bei vertikal dünnen Wolken können die Satelliten- und Bodenmessungen verglichen werden. Am 13.10.1999 wurden simultan zum Überflug des ERS-2 Satelliten (mit ATSR2-Sensor) Bodenaufnahmen durchgeführt. Das Blickfeld des Bodenkamerasystems entspricht für diesen Fall einer Fläche von 14 x 9 ATSR2 Pixeln. Tabelle 1 zeigt die Resultate aus ATSR2, Meteosat-6 und den Bodenmessungen. Im 11  $\mu\text{m}$  Spektralkanal wird klar die oberste Wolkenschicht detektiert, währenddem im für Wolkendetektion schlechter geeigneten 0.87  $\mu\text{m}$  Kanal sowohl Punkte in der oberen wie auch in der unteren Schicht gemessen werden. Dieser Fall hat

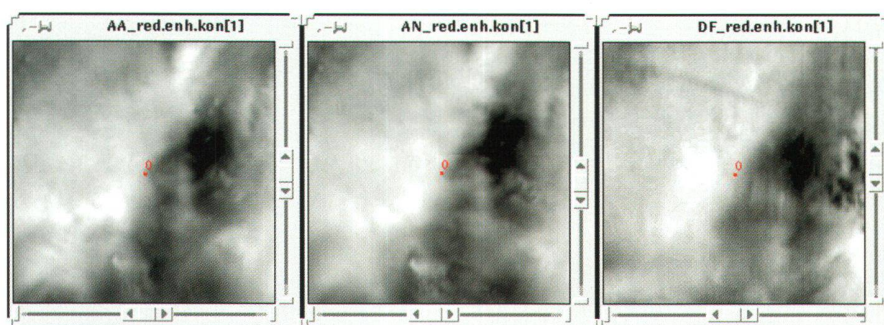


Abb. 5: LSM Matching zwischen den einzelnen MISR Aufnahmerichtungen. Zu beachten sind die viel grösseren Unterschiede von AA/AN zu DF, als zwischen den benachbarten Aufnahmerichtungen AA und AN.

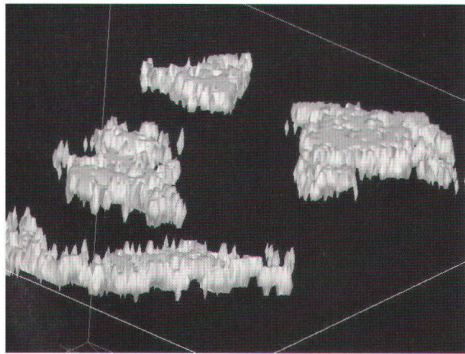


Abb. 6: 3D Visualisierung der Wolkenobjekte.

die Möglichkeit der Validierung von satelliten-basierten Wolkenhöhen von vertikal dünnen Wolken mit unserem neuen Kamerasystem aufgezeigt. 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 (ATSR2: 1 km) herausgemittelt werden.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Vorteil des photogrammetrischen Bodensystems ist die Auswertung aller sichtbaren Wolkenpunkte im Gegensatz zu einzelnen Punktmessungen der herkömmlichen Messgeräte. Dies erlaubt, die automatisch bestimmten Wolkenpunkte nach dem Matching und der Qualitätskontrolle weiterzuverarbeiten; mit dem Ziel, die einzelnen Wolkenobjekte zu modellieren und schliesslich in einer 3D-Darstellung zu visualisieren (Abb. 6). Solche Echtzeit-Kamerasysteme könnten somit in Zukunft die anderen Messinstrumente, wie Wolkenradar oder Lidar, sinnvollerweise vermehrt in integrierten Beobachtungssystemen ergänzen.

Neben der Weiterentwicklung des Bodensystems ist das Testen von neuen Matching-Strategien auf den MISR Bildern ein wichtiger Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten, vor allem um die Probleme bei weiter auseinanderliegenden Blickwinkeln zu minimieren. Neue Datensätze von simultanen Satelliten- (MISR, ASTER) und

Bodenmessungen im April 2002 bilden die Datengrundlage für Assimilations-Tests mit dem operationellen MeteoSchweiz aLMO Modell. Im internationalen Rahmen haben sich die zahlreichen Validierungsanstrengungen der beteiligten Gruppen in CLOUDMAP2 als wissenschaftlich äusserst wertvoll herausgestellt und werden entsprechend im zweiten Teil des Projektes (bis Februar 2004) noch intensiviert.

### Dank

Wir danken Marc Cocard, ETH-GGL, für die GPS Software und Unterstützung, Kodak Lausanne (M. Pauchon) und FHBB Muttenz (St. Nebiker) für die Ausleihe der DCS460 Kameras während MAP, der Schweizer Luftwaffe für die Kalibrierungsflüge und dem Astronomischen Institut Univ. Bern (M. Ploner) für die Sternkalibrierung. Die Meteosat-6 und Meteosat-7 Daten wurden uns von der EUMETSAT MARF Archive Facility, die ATSR2 Daten via den ESA ATSR2 NRT Service und die EOS-Terra MISR Daten vom NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center zur Verfügung gestellt. Diese Arbeit wird durch das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW) im Rahmen des EU-Projektes CLOUDMAP2 (BBW Nr. 00.0355-1) finanziert.

### Referenzen:

Baltsavias, E.P., 1991. Multiphoto Geometrically Constrained Matching. Ph. D. dissertation, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Mitteilungen No. 49, 221 p.

CLOUDMAP2, 2002. Projekt-Homepage [www.ge.ucl.ac.uk/research/cloudmap2/cloudmap2.html](http://www.ge.ucl.ac.uk/research/cloudmap2/cloudmap2.html)

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.

Hasler, F., 1981. Stereographic observations from geosynchronous satellites: an important new tool for the atmospheric sciences, Bull. Am. Met. Soc., 62 (2), pp. 194–212.

Horvath, A., Davies, R. and Seiz, G., 2002. Status of MISR cloud-motion wind product. 6th International Winds Workshop, May 7–10, 2002, Madison, Wisconsin.

Koppe, C., 1896. Photogrammetrie und Internationale Wolkenmessung. Braunschweig Verlag, 108 p.

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

Poli, D., 2002. General model for airborne and spaceborne linear array sensors. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Denver, CO, Vol. 34, Part B1 (in press).

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

Seiz, G., Baltsavias, E.P. and Grün, A., 2002. Cloud mapping from the ground: use of photogrammetric methods. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS), 68 (9).

Gabriela Seiz  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH Höggerberg  
CH-8093 Zürich  
MeteoSchweiz  
Krähbühlstrasse 58  
CH-8044 Zürich  
[gseiz@geod.baug.ethz.ch](mailto:gseiz@geod.baug.ethz.ch)

Dr. Emmanuel P. Baltsavias  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH Höggerberg  
CH-8093 Zürich.  
[manos@geod.baug.ethz.ch](mailto:manos@geod.baug.ethz.ch)

Prof. Dr. Armin Grün  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH Höggerberg  
CH-8093 Zürich.  
[agruen@geod.baug.ethz.ch](mailto:agruen@geod.baug.ethz.ch)