

Beitrag M: Anna Aumann, Iurii Motroniuk, Ilham Mammadov, Julian Scharnagl, Klaus Schilling

**Prototypen-Mission für die Erstellung von 3D
Wolkenhöhenkarten - Kleinstsatelliten für Erdbeobachtung**

**Prototype Mission for the Creation of 3D Cloud Elevation
Maps - Miniature Satellites for Earth Observation**

Anna Aumann¹, Iurii Motroniuk², Ilham Mammadov³, Julian Scharnagl⁴, Klaus Schilling⁵,

¹Zentrum für Telematik e.V., a.aumann@telematik-zentrum.de

²Zentrum für Telematik e.V., i.motroniuk@telematik-zentrum.de

³Zentrum für Telematik e.V., i.mammadov@telematik-zentrum.de

⁴Zentrum für Telematik e.V., j.scharnagl@telematik-zentrum.de

⁵Zentrum für Telematik e.V., k.schilling@telematik-zentrum.de

Abstract

Since the introduction of CubeSats in the beginning of this millennial, nanosatellites (satellites up to a mass of 10 kg) have developed from an education tool to a low-priced, but still capable alternative to expensive earth observation satellites, especially in the case of optical instruments. Commercial nano-satellite operators have demonstrated ground resolutions up to 3m using 3U satellites which are 10 x 10 x 30 cm in dimensions. With the development of high-precise attitude and orbit control, formations of nano-satellites can deliver three-dimensional earth observation data products on-demand using photogrammetric methods to process synchronously captured images. Currently, the *Zentrum für Telematik e.V.* is preparing a prototype mission (the Telematics earth Observation Mission TOM) which is going to launch in 2020. The TOM satellites will demonstrate 3D cloud mapping using photogrammetric measurements. This contribution introduces nano-satellites and describes TOM as an example mission for earth observation. Furthermore, the typical procedure of a nano-satellite mission is presented.

Zusammenfassung

Seit der Einführung von CubeSats Anfang dieses Jahrtausends haben sich Nanosatelliten (mit einer Masse bis zu 10 kg) von einem Hilfsmittel in der Ausbildung zu einer günstigen, aber dennoch sehr fähigen Alternative zu teuren Erdbeobachtungssatelliten entwickelt, insbesondere im Fall von optischen Instrumenten. Kommerzielle Nanosatelliten-Betreiber haben Bodenauflösungen von bis zu 3m demonstriert, bei 3U Satelliten mit Dimensionen von 10 x 10 x 30 cm. Durch die Entwicklung von hoch-präziser Lage- und Orbit-Regelung können Formationen von Nanosatelliten dreidimensionale Erdbeobachtungsdatenprodukte, die durch die photogrammetrische Weiterverarbeitung von gleichzeitig aufgenommenen Bildern entstanden sind, auf Abruf bereitstellen. Zurzeit bereitet das *Zentrum für Telematik e.V.* eine Prototypenmission (die Telematics earth Observation Mission TOM) vor, die 2020 gestartet werden soll. Die TOM Satelliten werden die Verwendung photogrammetrischer Messungen demonstrieren, um die Höhe von (vulkanischen Asche-) Wolken zu bestimmen. Dieser Beitrag führt Nano-Satelliten ein und beschreibt TOM als Beispielmission. Außerdem wird das typische Vorgehen bei einer Nano-Satellitenmission erläutert.

1 Einführung

Nano-Satelliten sind Kleinstsatelliten mit einer Masse bis zu 10kg. Eine Unterklasse sind Pico-Satelliten, die bis zu 1kg schwer sind. Pico-Satelliten wurden durch die Einführung der sogenannten CubeSats Anfang des Jahrtausends zunächst im universitären Bereich bekannt. Ein CubeSat ist, wie der Name schon sagt, ein würfelförmiger Satellit mit einer Kantenlänge von 10cm, der zunächst bei der Ausbildung von Raumfahrt-Studenten in den USA eingesetzt wurde [SpaceDaily 2016]. Durch die Entwicklung mehrerer Startmöglichkeiten für solche Satelliten (u.a. über die Internationale Raumstation oder spezielle „Deployer“) wuchs auch das Interesse im Forschungs- und kommerziellen Bereich. Der erste deutsche Pico-Satellit UWE (Universität Würzburg Experimentalsatellit) wurde von Prof. Klaus Schilling und seinem Team entwickelt und ist 2005 gestartet [Barza et al. 2006]. Ein weiterer besonderer Erfolg ist UWE-3, der durch sein modulares und redundantes Design bereits mehrere Jahre im Orbit aktiv ist [Bangert et al. 2015]. Derzeit wird an UWE-4 gearbeitet, der ein elektrisches Antriebssystem demonstrieren wird [Bangert et al. 2017].

Mit der Zeit verlagerte sich das Interesse auf die größeren 3U-CubeSats, mit Dimensionen von 10 x 10 x 30 cm. Mit dieser Satellitengröße gab es auch die ersten großen kommerziellen Erfolge.

Die Möglichkeiten, Nano-Satelliten im Bereich der Erdbeobachtung einzusetzen, wurden bereits vor einigen Jahren untersucht [Selva & Krejci 2012]. Laut dieser Veröffentlichung sind unter anderem folgende Instrumente für Erdbeobachtung im Nano-Satellitenbereich machbar oder bereits realisiert: Sonden für Atmosphären-Temperatur und -Feuchtigkeit, Radiometer zur Bestimmung des Strahlungshaushalts der Erde, Gravitationsmessgeräte, Imager zur Erfassung von Blitzen, Magnetfeldmessgeräte sowie Messgeräte zur Bestimmung der Farbe der Ozeane.

Jedoch sind mittlerweile auch multi-spektrale Instrumente für Nano-Satelliten in der Entwicklung. Erhältliche optische Kameras erlauben Bodenauflösungen zwischen 30 und 50 m, mit Sonderanpassungen sind Auflösungen im Bereich weniger Meter möglich. So erreicht die kommerzielle Nano-Satelliten Konstellation von Planet eine Auflösung von 3 m [Boshuizen et al. 2014].

Mithilfe von Formationen und verteilten Satellitensystemen eröffnen sich weitere Möglichkeiten für die Verwendung von Nano-Satelliten. Anstelle der Verwendung mehrerer Instrumente auf einem sehr großen, sehr komplexen und dadurch fehleranfälligen Satelliten, ist es möglich, die Instrumente auf mehreren kleineren Satelliten zu verteilen. So bleibt der Vorteil der gleichzeitigen Erfassung unterschiedlicher Messdaten für ein direktes Ziel erhalten, der Missionserfolg ist jedoch nicht mehr von einem einzigen Raumfahrzeug abhängig. Wie im Beispiel von TOM sichtbar, kann die Verwendung einer Formation sogar die Methode unterstützen, mithilfe derer die Messungen weiterverarbeitet werden. Satelliten, die in einer Formation fliegen, sind in der Lage, ihre relative Position und Orientierung mit hoher Genauigkeit zu regeln [Alfriend et al. 2010].

2 Photogrammetrie

Photogrammetrische Methoden erlauben die Rekonstruktion von Position, Orientierung, Form und Größe von Objekten anhand von photographischen Aufnahmen [Kraus 2007]. Die photogrammetrischen Methode, die zur Wolkenhöhenbestimmung in TOM eingesetzt wird, wurde bereits an Aufnahmen des

Sarychev Peak Vulkanausbruchs im Jahr 2009, die von der Internationalen Raumstation ISS getätigt wurden, demonstriert [Zakšek et al. 2018]. Dabei wird beispielsweise Structure-from-Motion Software verwendet, um die 3-D Form der Aschewolke aus gleichzeitig oder kurz aufeinander folgenden Aufnahmen zu rekonstruieren.

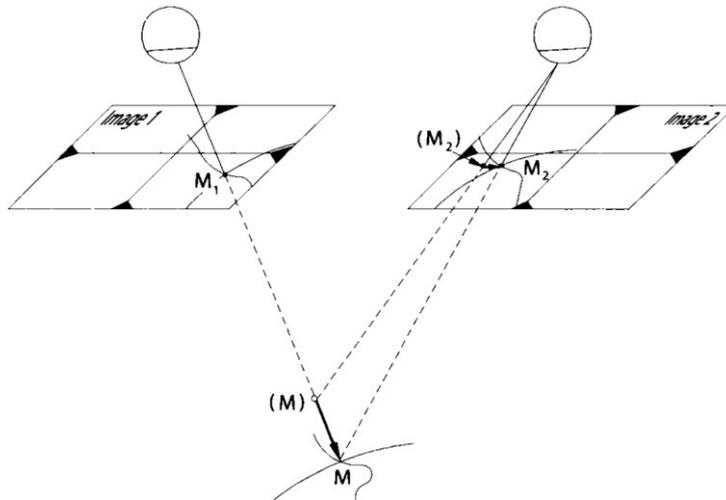


Abbildung 1: Das Prinzip stereoskopischer Messungen, aus [Kraus 2007, S. 297]

Die Photogrammetrie bedient sich dabei der Grundsätze der Stereoskopie: Ein Objekt, das von zwei Kameras aufgenommen wird, erscheint auf den Aufnahmen aufgrund der Perspektive an unterschiedlichen Stellen. Durch Messung des Unterschieds (der sogenannten Parallaxe), die unter anderem vom Abstand zwischen beiden Kameras abhängt, kann die Höhe des Objekts bestimmt werden. Das Prinzip ist auch auf Abbildung dargestellt. Das Modell und die Höhenkarte, die aus den Sarychev Aufnahmen erstellt wurden ist in Abbildung dargestellt.

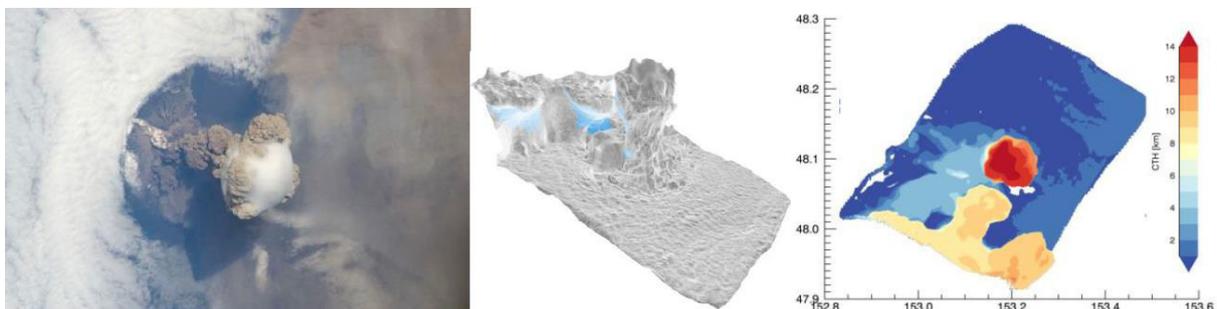


Abbildung 2: Das Originalbild des Sarychev Peak Ausbruchs (links), sowie das Modell der Aschewolke (Mitte) und die erstellte Höhenkarte (rechts). Das Modell ist online unter <https://skfb.ly/SN8J> erreichbar.

3 Telematics earth Observation Mission

Die Telematics earth Observation Mission (im Weiteren TOM) ist eine deutsche Nano-Satelliten Mission, die durch die Partner *Zentrum für Telematik e.V.*, *Julius-Maximilians-Universität Würzburg*, das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) sowie die *Technische Universität München* (TUM) realisiert wird [Schilling et al. 2017]. Ziel der Mission ist die Demonstration von photogrammetrischen Vermessungen, z.B. von (Vulkanasche-) Wolken, durch eine Formation dreier gleicher Satelliten. Eine künstlerische Interpretation ist in Abbildung dargestellt.

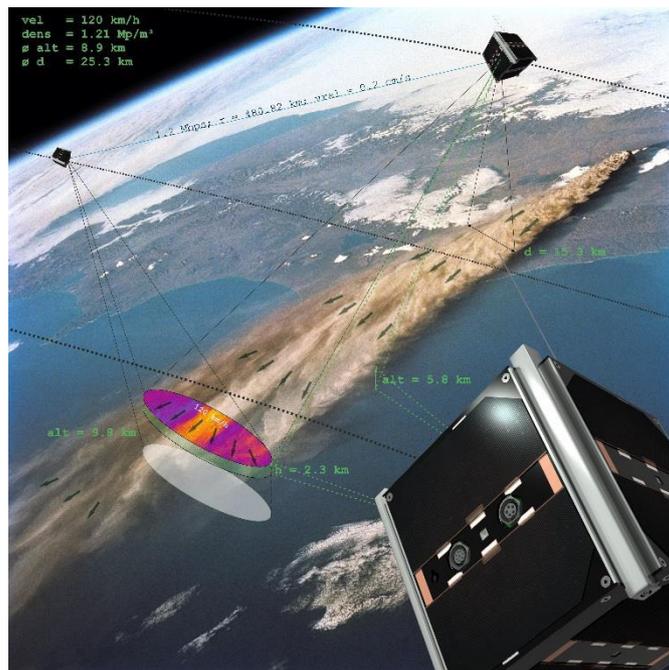


Abbildung 3: Eine künstlerische Interpretation von TOM: die drei Satelliten vermessen die sichtbare Aschewolke

Jeder der Satelliten ist mit einer Kamera sowie einem präzisen Lage- und Orbit-Regelungssystem ausgestattet. Das Orbitregelungssystem erlaubt das Einhalten und die Manipulation der Satellitenformation. Da die geometrische Verteilung der Satelliten die photogrammetrische Genauigkeit beeinflusst, kann so ein wichtiger Parameter eingestellt werden. Das Lage-Regelungssystem wird zusätzlich mit Informationen aus den Aufnahmen gespeist, um die Lage-Regelung und damit die Genauigkeit der Beobachtung zu verbessern.

Die drei TOM Satelliten werden mit demselben Träger gestartet. Nach dem Auswurf beginnen die Satelliten mit der Initialisierung ihrer Formation. Die Beobachtungen können angesetzt werden, sobald diese Initialisierung beendet ist. Nach Festlegung

eines Beobachtungssziels wird dieses allen Satelliten bekannt gemacht. Die Satelliten beginnen ihre Ausrichtung auf das Ziel autonom. Sobald die Beobachtung stabil ist, tauschen die Satelliten untereinander Daten aus, um ihre Lage so zu optimieren, dass der gemeinsam beobachtete Ausschnitt maximal ist. Die Aufnahmen werden beim nächsten Bodenkontakt zur Erde gesendet und dort gemeinsam weiterverarbeitet, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben.

TOM ist Teil der Telematics International Mission TIM. Im Rahmen von TIM tragen internationale Partner weitere Satelliten oder Bestandteile der Mission (z.B. den gemeinsamen Start der Satelliten sowie die notwendigen Qualifikationstests) bei. Derzeit sind insgesamt 9 weitere Satelliten geplant, die die TOM Formation ergänzen werden, um das Anwendungsgebiet durch weitere Sensoren zu erweitern [Schilling 2017].

4 Missionsplanung

Dieser Abschnitt soll einen kleinen Einblick in die Planung von Nano-Satellitenmissionen geben. Eine Nano-Satelliten Mission beginnt wie jede andere Satellitenmission zunächst mit einer Machbarkeitsstudie, in der ein erstes, vorläufiges Gesamtsystem entworfen wird. Zur Mission gehören nicht nur der bzw. die Satelliten, sondern auch das Bodenstationsnetzwerk sowie der Missionsbetrieb. Die Anzahl und die Verteilung der Satelliten im Orbit (z.B. von Formationen) hängt vom Missionsziel ab und wird durch Analysen und Simulationen optimiert, um die gewünschte zeitliche und räumliche Auflösung zu gewährleisten.

Nano-Satelliten begrenzen insbesondere durch ihre Dimensionen aber auch durch die verfügbare Energie die mögliche Nutzlast. Je nach Nutzlast vergrößert sich daher der Satellit. Je nach Komplexität dauert die Entwicklung eines Nanosatelliten bei vorhandener Nutzlast in etwa ein Jahr. Die anschließend notwendigen Umwelt-Tests wurden hierbei noch nicht dazu gezählt.

Die Nutzlast bestimmt das Satelliten-Design: Je nach anfallender Datenmenge wird die notwendige Kommunikationsverbindung gewählt. Das Lage- und Orbit-Regelungssystem ist abhängig von den notwendigen Genauigkeiten bei der Datenerfassung. Beides hat Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Satelliten. Bei der Entwicklung einer Nutzlast ist es daher bereits sinnvoll, gewisse

Beschränkungen zu berücksichtigen. Das vorläufige Design eines TOM Satelliten mit den Subsystemen Antrieb, Lageregelungssystem, On-Board Computer, Energiesystem, Kommunikationssystem sowie Nutzlast (von unten nach oben) ist unten in Abbildung zu sehen. Erkennbar ist, dass bei einem Satelliten mit Antriebsystem etwa 1U für die Nutzlast verfügbar sind.

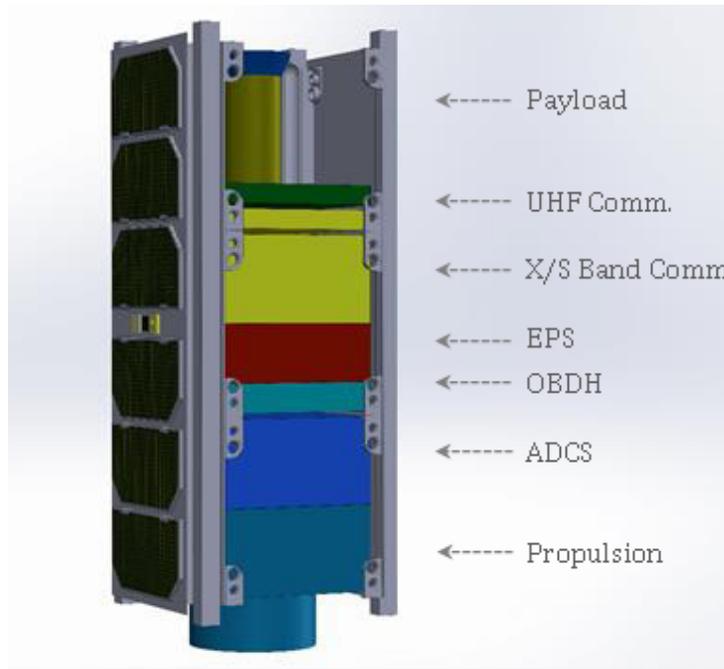


Abbildung 4: Das vorläufige Design der TOM Satelliten

Die Dauer einer Satellitenmission ist zum einen durch die gewählte Orbithöhe und zum anderen durch die verwendeten Komponenten beschränkt. Bei einer niedrigen Orbithöhe beträgt die Dauer einer Mission ohne Orbitkorrekturen aufgrund der auftretenden Störungen nur wenige Monate. Bei höheren Orbits besteht die Gefahr, dass die elektronischen Bauteile aufgrund der Strahlung Defekte erhalten. Solche Defekte können aber durch entsprechende Redundanzen verringert werden.

Der Start der Satelliten ist einer der kritischsten Bausteine einer Satellitenmission, nicht nur aufgrund der relativ hohen Kosten. Ist der gewünschte Orbit flexibel, so ist es möglich gemeinsam mit anderen Nano-Satelliten zu einem vergleichsweise geringen Preis zu starten. Wird ein besonderer Orbit benötigt, so werden die Wartezeiten länger und der Preis höher. Eine Möglichkeit ist der „Piggy Back“ Flug, bei dem der Nano-Satellit beim Start eines größeren Satelliten dabei ist.

Nach dem Start besteht der Kontakt zum Satelliten nur noch über Bodenstationen. Bodenstationen können extra für eine Mission errichtet werden, alternativ können

bestehende Netzwerke gegen Gebühr verwendet werden. Der Missionsbetrieb plant die Aufgaben der Satelliten und ist für das Erreichen des Missionsziel unersetzlich. Bei auftretenden Fehlern kann das Team, zu dem oft einer der Entwicklungs-Ingenieure zählt, direkt reagieren. Zusätzliche Software-Lösungen, die auf dem Satelliten implementiert sind, helfen bei der Vermeidung vom Misserfolg der Mission.

Das Zentrum für Telematik e.V. entwickelt in enger Zusammenarbeit mit der Universität Würzburg den UNISEC Standard für eine elektrische Subsystem-Schnittstelle [Unisec]. Durch den UNISEC Standard wird nicht nur die Sicherheit des Satelliten weiter erhöht, sondern auch das Testen und die Integration stark erleichtert.

5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag hat die Prototypen-Mission TOM als Beispiel für eine Nano-Satellitenmission zur Erdbeobachtung sowie die übliche Vorgehensweise bei der Planung einer solchen Mission erläutert. Kleinstsatelliten bieten den Vorteil einer schnellen Entwicklung unter der Berücksichtigung der Einschränkungen von Größe und verfügbarer Energie. Missionen wie TOM, sowie die internationale Mission TIM, zeigen jedoch, dass Nano-Satelliten insbesondere in Multi-Satellitenmissionen zur Erdbeobachtung geeignet sind.

6 Danksagung

Die Autoren danken all ihren Mitarbeitern für ihre Beiträge im Rahmen der „Telematics earth Observation Mission – TOM“, unterstützt durch das bayerische Wirtschaftsministerium sowie dem RLS für die Kooperation in TIM.

7 Literaturverzeichnis

- Alfriend, K. T.; Vadali S. R.; Gurfil P.; How J. P.; Breger, L. S. (2010): *Spacecraft Formation Flying. Dynamics, Control and Navigation*, Elsevier Astrodynamics.
- Bangert, P.; Busch, S.; Schilling, K. (2015): *In-Orbit Performance of the Pico-Satellite UWE-3*. 10th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin.
- Bangert, K.; Kramer, A.; Schilling, K.; (2017): *UWE-4; Integration State of the First Electrically Propelled 1U CubeSat*. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, Propulsion, SSC17-WK-4. <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2017/all2017/15/> (abgerufen am 11.04.2018).
- Barza, R.; Aoki, Y. & Schilling, K. (2006): *CubeSat UWE-1 technology tests and in orbit results*. 57th International Astronautical Congress, Valencia.

- Boshuizen, C. R.; Mason, J.; Klupar, P.; Spanhake, S. (2014): *Results from the Planet Labs Flock Constellation*. Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, Private Endeavors, SSC-14-I-1. <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2014/PrivEnd/1/> (abgerufen am 11.04.2018).
- Kraus, K. (2007): *Photogrammetry, Geometry from Images and Laser Scans*. Berlin · New York, Walter de Gruyter
- Schilling, K.; Tzschichholz, T.; Motroniuk, M.; Aumann, A.; Mammadov, I.; Ruf, O.; Schmidt, C.; Appel, N.; Kleinschrodt, A.; Montenegro, S.; Nüchter, A. (2017): *TOM: A Formation for Photogrammetric Earth Observation by Three Cubesats*. 4th IAA Conference on University Satellite Missions and CubeSat Workshop, Rom.
- Schilling, K., 2017. *TIM – A Small Satellite Formation for Earth Observation*. 9th International Workshop on Satellite Constellations and Formation Flying, Boulder, 2017.
- Selva, D.; Krejci, D. (2012): *A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation*. In: Acta Astronautica, 74, 50-68
- SpaceDaily (2016), *History of the CubeSat*. http://www.spacedaily.com/reports/History_of_the_CubeSat_999.html (abgerufen am 11.04.2018)
- Unisec Europe, *Cubesat Electrical Interface*, <http://unisec-europe.eu/standards/bus/> (abgerufen am 11.04.2018)
- Zaksek, K.; James, M.R.; Hort, M.; Nogueira, T.; Schilling, K. (2018): *Using picosatellites for 4-D imaging of volcanic clouds: Proof of concept using ISS photography of the 2009 Sarychev Peak eruption*. In: Remote Sensing of Environment, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.061>