

DIE DEUTSCHE ENMAP MISSION – EIN NEUARTIGER HYPERSPEKTRAL SENSOR FÜR DIE ZUKÜNSTIGE SATELLITENGESTÜTZTE ERDBEOBACHTUNG

S. Hofer, Kayser-Threde GmbH, Wolfratshauser Str. 48, 81371 München, Deutschland
T. Stuffler, Kayser-Threde GmbH, Wolfratshauser Str. 48, 81371 München, Deutschland
K.-P. Förster, Kayser-Threde GmbH, Wolfratshauser Str. 48, 81371 München,
Deutschland
M. Leipold, Kayser-Threde GmbH, Wolfratshauser Str. 48, 81371 München, Deutschland
J. Schubert, Kayser-Threde GmbH, Wolfratshauser Str. 48, 81371 München, Deutschland
B. Sang, Kayser-Threde GmbH, Wolfratshauser Str. 48, 81371 München, Deutschland
H. Kaufmann, Geoforschungszentrum Potsdam, Telegrafenberge, 14473 Potsdam,
Deutschland
B. Penné, OHB System AG, Universitätsallee 27-29, 28359 Bremen, Deutschland
C. Chlebek, DLR e.V., Königswinterer Str. 522-524, 53227 Bonn, Deutschland
A. Müller, DLR DFD, 82234 Wessling, Deutschland

Zusammenfassung

Für die kommenden Generationen von Satellitensensoren für die Erdbeobachtung werden hyperspektrale Instrumente eine beachtliche Rolle spielen. Sie werden bereits jetzt weltweit in den verschiedenen Missions-Planungen vorgesehen. Unser Team hat die Phase B Studie für die hyperspektrale Mission EnMAP erfolgreich zu Ende geführt. EnMAP wird spätestens 2013 im Orbit in Betrieb genommen werden. Die wissenschaftliche Betreuung der Mission liegt beim GeoForschungsZentrum-Potsdam (GFZ), die industrielle Führungsaufgabe wird im Auftrag der DLR-Agentur von Kayser-Threde wahrgenommen.

Das EnMAP Instrument stellt über 240 Spektralkanäle im Wellenlängenbereich zwischen 420 – 2450 nm mit einer Bodenauflösung von 30 m x 30 m zur Verfügung. Die Leistungsfähigkeit des hyperspektralen Instruments erlaubt im Vergleich zu Multispektralsensoren eine wesentlich detailliertere und differenziertere Überwachung, Charakterisierung und Analyse des Zustandes und der Zusammensetzung der festen Erdoberfläche, der Vegetation sowie der Binnengewässer und der Küstenbereiche. EnMAP ermöglicht somit die Erforschung und Etablierung neuer Erdbeobachtungs-Anwendungen für die Land- und Forstwirtschaft, das Gewässer- und Landmanagement sowie die Geologie. Des Weiteren unterstützt EnMAP die Aufgaben der klassischen optischen Fernerkundung, wie sie derzeit mit Multispektralsensoren ermöglicht werden.

Als Wegbereiter hat EnMAP die Aufmerksamkeit einer breiten, internationalen Wissenschaftsgemeinde und der Value Adder auf sich gezogen. Dieser Artikel präsentiert den aktuellen Stand der Mission und der Entwicklung des EnMAP Raumsegments, bestehend aus Bus, Instrument und Launcher.

1. EINFÜHRUNG

Die ständigen Veränderungen der Umweltbedingungen und die wachsenden anthropogenen Einflüsse, bedingt durch Faktoren wie Bevölkerungszuwachs und klimatische Veränderungen, liefern die Hauptargumente für die Entwicklung von EnMAP. Die Einsatzmöglichkeiten eines hyperspektral arbeitenden Systems sind prädestiniert für die Lösung moderner Fernerkundungsaufgaben. Ziel von EnMAP ist es, die relevanten Oberflächenparameter in einer Genauigkeit zu bestimmen, wie sie derzeit mit den verfügbaren Sensoren nicht erreicht werden kann. Diese Parameter werden für die Ökosystem-Modellierung im globalen Maßstab benötigt, und ermöglichen die Erstellung von Informationen bzw. Produkten, die für das

moderne Ökosystem Management benötigt werden.

Die EnMAP Mission wird in einem nationalen Rahmen mit internationaler wissenschaftlicher Ausrichtung durchgeführt. Dabei wird ein starker Fokus im Bereich der kommerziellen Anwendung hinsichtlich der Unterstützung der GMES Services liegen. Kayser-Threde übernimmt innerhalb der EnMAP Mission die Stellung des Hauptverantwortlichen hinsichtlich der gesamten Mission sowie der wissenschaftlichen Nutzlast. OHB Systems wird den Satellitenbus liefern.

Eine enge Zusammenarbeit zwischen den Wissenschaftlern, der Industrie und den Kunden wird während allen Phasen der Entwicklung erfolgen, um das Erreichen der Missionsziele zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde

zur Gewährleistung der Qualität eine wissenschaftliche Beratungsgruppe (EnSAG) gegründet.

2. ENMAP MISSION

Die wesentlichen Missionsziele können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Bereitstellung spektral hoch aufgelöster Reflektionswerte mit einer spektralen Bandbreite von 5 nm bis 10 nm im Wellenlängenbereich von 420 nm bis 2450 nm bei einer geometrischen Boden-Pixelgröße von 30 m x 30 m.
- Die Bereitstellung von entsprechenden Daten mit hoher radiometrischer Genauigkeit und hohem Signal-zu-Rauschverhältnis.
- Die Beobachtung von ökologischen Parametern für Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft, für die Analyse der Binnengewässer und Küstenbereiche sowie für Boden- und Landmanagement auf dem gesamten Globus mit Ausnahme der Polargebiete (hohen Breiten >70°).
- Die Akquisition von Daten gleicher geographischer Lage innerhalb relativ kurzer Zeitintervallen.
- Die Unterstützung der Entwicklung hochwertiger Informationsprodukte der Fernerkundung in Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern des GFZ und des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) des DLR e.V.

Der EnMAP Sensor arbeitet in einer „push-broom“ Konfiguration. Der Sensor bietet die Möglichkeit von nahezu jedem Gebiet der Erdoberfläche spektral aufgelöste Bildinformation unter senkrechter bis annähernd senkrechter Blickrichtung (d.h. unter max. $\pm 5^\circ$) zu gewinnen. Der Orbit ist sonnensynchron und stellt damit über die geplante aktive Betriebsdauer von 5 Jahren annähernd gleiche Beleuchtungsbedingungen für wiederholte Aufnahmen gleicher Gebiete sicher. Die lokale Überflugszeit (LTDN) wird auf 11:00 ± 15 Minuten eingestellt und stellt damit einen guten Kompromiss zur Erzielung einer möglichst guten Beleuchtungsstärke bei möglichst geringem Bewölkungsgrad dar. Mit einer nominalen Streifenbreite von 30 km und einer Sensor-Schwenkmöglichkeit von bis zu $\pm 30^\circ$ beträgt der erfassbare Bereich auf der Erdoberfläche ca. ± 390 km. Damit erlaubt das hyperspektrale Instrument (HSI) Daten eines gewünschten Gebietes innerhalb eines zeitlichen Intervalls von maximal 3 bis 4 Tagen zu erfassen.

Die wichtigsten Missionsparameter von EnMAP werden in Tabelle 1 präsentiert.

| Parameter | Anforderungen |
|-----------------------------|--|
| Abdeckung | Globale Datenerfassung möglich, im quasi-nadir Beobachtungsmodus (unter $<5^\circ$ Aufnahmewinkel) |
| Wiederholrate | 4 Tage bei Aufnahmewinkeln von maximal $\pm 30^\circ$ |
| Aufnahmewinkel | $\pm 30^\circ$ quer zur Flugrichtung |
| Lokale Überflugszeit (LTDN) | 11:00 hrs ± 15 Minuten |
| Kenntnis der | 100 m auf Meereshöhe |

| | |
|-------------------|---|
| Sensorausrichtung | |
| Mittlere Bahnhöhe | 643,7 km |
| Orbitale Periode | ca. 98 Minuten |
| Orbit Inklination | 97,96° |
| Wiederholzyklus | 21 Tage (quasi wiederholender Orbit) |
| Lebensdauer | 5 Jahre |

TAB 1. EnMAP Missionsparameter

3. ENMAP SENSOR – ÜBERBLICK

3.1. Der EnMAP Satellit

Bild 1 zeigt die Konfiguration von EnMAP, bestehend aus dem Satellitenbus und dem Hyperspektral Instrument, dabei liegt der Fokus auf der detaillierten Darstellung des Instruments. Der Bus bildet den unteren Teil des Satelliten und das Instrument belegt den oberen Teil.

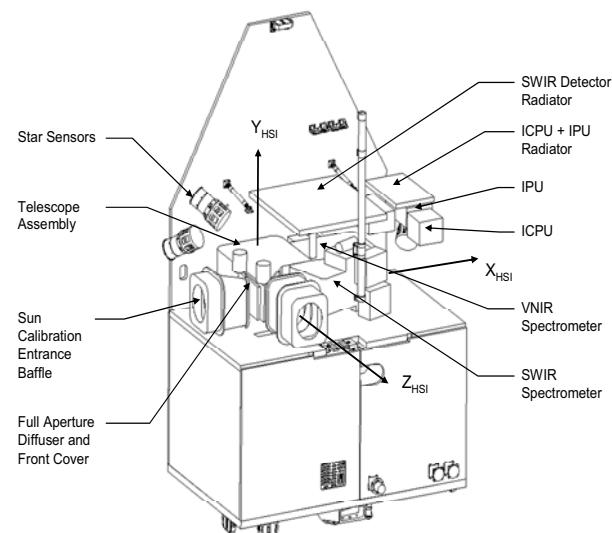


BILD 1. Konfiguration des EnMAP Satelliten

Diese Anordnung erlaubt die Einhaltung genau definierter und stabiler thermo-mechanischer Betriebs-Bedingungen für das Instrumentenabteil, z.B. wird eine exzellente Temperaturstabilität von besser 1 K über den kompletten Orbit und 0,1 K für die sensitiven optischen Teile der Instrument Optik Unit (IOU) erreicht. Die IOU wird direkt auf das Busabteil montiert, womit zusätzlich eine gute mechanische Abkopplung erreicht wird. Die erste Eigenfrequenz der IOU liegt bei nahezu 100 Hz gegenüber 16 Hz lateral bzw. 44 Hz axial für das Busabteil.

Die aktuelle Auslegung der Satelliten-Ressourcen, wie Massenspeicher, Powerversorgung und Downlink-Kapazitäten, erlauben eine Gebietsabdeckung von mehr als den geforderten 150.000 km² pro Tag im „Nadir-looking operation mode“. Die Massenspeicherkapazität beträgt mindestens 512 Gbit nach 5 Jahren Missionsbetrieb. Die

vorgesehene verlustfreie onboard Datenkompression erlaubt mit nur vier Kontakten pro Tag sämtliche Instrument-Rohdaten zuzüglich der Kalibration- und Instrument-Housekeepingdaten eines Tages über X-Band mittels einer Datenrate von 320 Mbps zur deutschen Bodenstation in Neustrelitz zu übertragen.

3.2. Hyperspektral Instrument

Das Hyperspektral Instrument ist aus drei Hauptsubsystemen aufgebaut, der Instrument Optik Unit, der Instrument Power Unit (IPU) und der Instrument Control and Processing Unit (ICPU). Im Folgenden wird die IOU näher vorgestellt.

Die Instrument Optik Unit besteht aus zwei Spektrometern, ausgelegt als zwei optisch separate Prismen-Spektrometer, die jeweils für den Spektralbereich VNIR (Visible to Near InfraRed) bzw. SWIR (Short Wave InfraRed) optimiert sind. Damit beträgt die spektrale Abdeckung 420nm bis 2450nm. Beide Spektrometer werden über ein Frontteleskop mittels einer im Fokus des Frontteleskops befindlichen Spalteinheit ausgeleuchtet. Die Spalteinheit koppelt dabei die vom Teleskop eingehende Strahlung nach dem Prinzip der Feldseparation in die beiden Spektrometer ein. Damit kann ohne Strahlungsverluste eine Überlappung der beiden Spektralbereiche eingestellt werden. Bei EnMAP beträgt die Überlappung 100nm im Bereich von 900nm bis 1000nm.

Die wichtigsten Parameter der IOU sind in Tabelle 2 aufgelistet.

| Parameter | Anforderungen |
|---|--|
| Spektrale Abdeckung | 420 nm - 2450 nm |
| Rauschäquivalente spektrale Strahldichte [mW/cm ² sr μm] | VNIR (420-1000 nm): 0.005 SWIR I (900-1390 nm): 0.003 SWIR II (1480- 1760 nm): 0.003 SWIR III (1950-2450 nm): 0.001 |
| Spektrale Abtastung | VNIR: 5 nm SWIR: 10 nm |
| Spektral Stabilität (VIS-NIR-SWIR) | 0.2 nm |
| Co-Registrierung (VNIR – SWIR „Images“) | ≤ 0.2 pixel |
| Radiometrische Stabilität | ≤ 2.5 % |
| Ground Sampling Distance (GSD) | 30 m x 30 m Nadir auf Meereshöhe |
| Streifenbreite | 30 km |
| Aufnahme Kapazität | 150.0000 km ² pro Tag |

TAB 2. Geometrische und radiometrische Parameter von EnMAP HSI

Bild 2 zeigt die optomechanische Konfiguration der Instrumentenoptik mit deren Hauptelementen.

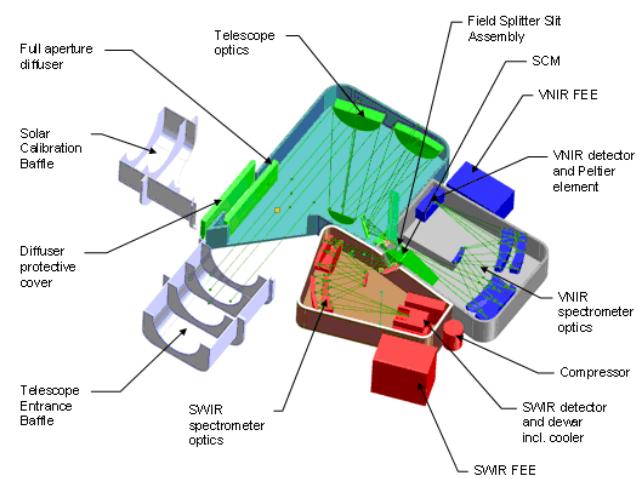


BILD 2. Instrument Optik Unit mit den Hauptelementen

3.3. Instrument Detektoren

Für beide Detektoren, d.h. für das VNIR als auch für das SWIR Spektrometer sind die Hauptfaktoren für die Entwicklung die Signal-to-Noise Anforderungen (SNR) und die „high frame readout“ Frequenz von annähernd 240 Hz. Der SWIR Detektor wird mittels einer individuell angepassten MCT (Mercury-Cadmium-Tellurid) Reihe mit einer Pixelgröße von 1024 x 256 realisiert. Er wird mit 8 Output-Kanälen versehen, um eine 230 Hz Auslese-Bildrate zu bewältigen. Simulationen der Instrument-Performance haben gezeigt, dass eine SNR Anforderung von >150 @ 2200 nm erfüllt werden kann. Um diese Performance zu erreichen, wird der MCT Detektor durch einen Pulsröhrenkühler mit einem „flexure bearing“ Kompressor aktiv auf 120K gekühlt. Die Qualifikation für eine Lebensdauer von 50.000 h Dauerbetrieb im All wird zurzeit durchgeführt.

Für den VNIR Detektor soll die CCD Technologie angewandt werden. Die Detektoranordnung wird eine Pixelgröße von 1024 (räumlich) x 512 (spektral) haben. Obwohl der kommerzielle Markt viele Detektoren bereit stellt, trifft keiner dieser, die Anforderungen der EnMAP Mission. Neben der Bildrate und den Rauschcharakteristiken, wird die „full well capacity“ ein Design-Treiber, da diese eine hohe Signaldynamik besitzt, welche aus den Zielgebieten resultiert, die einen niedrigen Reflexionsgrad (Wasser) bis zu einem extrem hohen Reflexionsgrad (Schnee) haben. Erste Iterationen in den Simulationen mit unterschiedlichen Lieferanten ergaben, dass das herkömmliche Detektor Design brauchbar ist und ein derartiges System die SNR Anforderungen von 500 @ 495 nm erfüllen kann.

3.4. Instrument Kalibration

Ein essentieller Aspekt für die Sensor Performance ist die Kalibration. Für den EnMAP Sensor wird eine Kombination von on-ground und in-orbit Kalibrationen angewandt. In Bezug auf die Instrument Performance ist die In-flight Kalibration sehr wichtig, um die Instrumentenstabilität zu überprüfen und die Rekalibrierungskoeffizienten zu liefern. Die folgenden Charakteristiken der Instrument Performance werden im Orbit periodisch durch interne und externe Quellen wie z.B. die Sonne verifiziert:

- Absolute und relative Strahlungskalibration
- Wellenlänge / spektrale Kalibration
- Kalibration der Detektoren mit Bezug auf „Dark Signal & Photo Response Non-Uniformities (DS & PRNU).“

3.5. Instrument Massenspeicher

Ein geeigneter Massenspeicher wird verfügbar sein, um die Rohdaten und zugehörige add-on Informationen zu speichern (Kalibrationsdaten, Housekeeping-Daten). Diese Datenspeichereinheit (DSU) wurde modular und skalierbar ausgelegt, um höchste Zuverlässigkeit zu erhalten.

Ein 2-aus-3 Redundanzkonzept wurde vorgesehen. Weitere Maßnahmen gegen Strahlungseffekte wurden implementiert, wie zum Beispiel die Erzeugung von Kontrollsummen, um mögliche bit-Fehler zu korrigieren und ein „latch-up“ Schutz, um einen DRAM Ausfall zu vermeiden. Einige Schlüsselmerkmale der EnMAP DSU sind:

- 512 Gbit Speicherkapazität @ Lebensende
- Eigendatenrate bis zu 1,6 Gbit/s
- Output Interface von der DSU zu der Channel Coding Unit (CCU) und X-Band Downlink.

4. TRÄGERRAKETE

Eine Anzahl von Trägerraketen, wie Eurockot, DNEPR, KOSMOS, SOYUZ, VEGA Falcon und PSLV sind grundsätzlich kompatibel mit den Anforderungen und Charakteristika von EnMAP. Die Entscheidung für die Trägerrakete wird voraussichtlich zu Beginn der Phase C, welche voraussichtlich End 2008 beginnen wird, getroffen werden.

5. AUSBLICK AUF OPERATIONELLE MISSIONEN

EnMAP ist als Wissenschafts- und Forschungsmission gedacht und als Wegbereiter hinsichtlich der Entwicklung von operationellen/kommerziellen Dienstleistungen. Kurz- und mittelfristig zielt man auf die Wissenschaftsgemeinde mit ihren speziellen Anforderungen an Forschung und Entwicklung und auf die Industrie, die wichtige Informationen und deren Verarbeitung im kommerziellen Bereich ermöglicht.

Ein Ausblick auf die Perspektiven von EnMAP in Richtung operationellen/kommerziellen Service muss eine Reihe von kritischen operationellen Faktoren berücksichtigen, wie z.B. erwartete Kosten/Gewinn, thematische Genauigkeit, Wiederholrate und die Operationalisierung der Datenprozesskette. Um diesen Ansatz zu unterstützen, wurde eine vorläufige Abschätzung der operationellen Nutzeraspekte basierend auf bereits existierenden Satellitenapplikationen durchgeführt. Der potentielle operationelle Nutzen der von EnMAP erlangten Informationen, für öffentliche und kommerzielle Nutzer wird als sehr hoch eingestuft. Der Betrieb von EnMAP wird zeigen, welche System Design Parameter für zukünftige Missionen weiter optimiert werden sollen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Das hyperspektrale Instrument erfordert ein durchdachtes Design, da dessen Aufbau eine hohe optomechanische Stabilität und Leistungsfähigkeit garantieren muss. Das EnMAP Design ist derzeit ein absolutes Spitzensystem und wegweisend für zukünftige Raumfahrtprogramme und Satelliten. Durch EnMAP ergibt sich für die Erdbeobachtungswissenschaftler und die Industrie die großartige Möglichkeit, Wege und Produkte zu entwickeln, um Endverbraucher mit der stetig steigenden Nachfrage an Informationen in den Bereichen Forst- und Landwirtschaft, dem Katastrophenmanagement, der Binnengewässer und Küstenüberwachung, Boden- und Landmanagement sowie der Geologie zu bedienen.

7. DANKSAGUNG

Der Überblick über die Mission und das Instrument wie in diesem Artikel beschrieben, basiert auf den Ergebnissen der erfolgreich abgeschlossenen EnMAP Phase B Studie. Das diesem Bericht zugrundeliegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 50 EP 0601 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

8. LITERATURANGABEN

Sang, B.; Schubert, J.; Kaiser, S.; Mogulsky, V.; Neumann, C.; Förster, K.-P.; Hofer, S.; Stöffler, T.; Kaufmann, H.; Müller, A.; Chlebek, C.: The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration and technologies, Proceedings of SPIE "Optics and Photonics"

Kaiser, S.; Sang, B.; Schubert, J.; Hofer, S.; Stöffler, T. (2008): Compacts Prism Spectrometer of Pushbroom type for hyperspectral Imaging; Proceedings of SPIE „Europe Optical Systems Design“

Heiden, U.; Segl, K.; Roessner, S.; Kaufmann, H. (2007): Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data, Remote Sensing of Environment, 111, 4, 537-552.

Haubrock, S.-N.; Chabrillat, S.; Lemnitz, C.; Kaufmann, H. (2008): Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions., International Journal of Remote Sensing, 29, 1, 3-29.

Stoffler, T.; Kaufmann, H.; Hofer, S.; Forster, K. P.; Schreier, G.; Mueller, A.; Eckardt, A.; Bach, H.; Penne, B.; Benz, U.; Haydn, R. (2007): The EnMAP hyperspectral imager- An advanced optical payload for future applications in Earth observation programmes, Acta Astronautica, 61, 1-6, 115-120.

Pinet, P. C.; Kaufmann, H.; Hill, J. (2006): Imaging spectroscopy of changing Earth's surface: a major step toward the quantitative monitoring of land degradation and desertification, Comptes Rendus Geoscience, 338, 14-15.

Müller, A.; Richter, R.; Habermeyer, M.; Dech, S.; Segl, K.; Kaufmann, H. (2005): Spectroradiometric Requirements for the Reflective Module of the Airborne Spectrometer ARES, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2, 3, 329-332.

Segl, K.; Roessner, S.; Heiden, U.; Kaufmann, H. (2003): Fusion of spectral and shape features for identification of urban surface cover types using reflective and thermal hyperspectral data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58, 1-2, 99-112.

Thiemann, S.; Kaufmann, H. (2002): Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data : a semi-empirical multisensoral approach for the Mecklenburg Lake District, Germany, Remote Sensing of Environment, 81, 2-3, 228-237.

Mueller, A., Dech, S., Habermeyer, M., Mehl, H., Richter, R., Kaufmann, H., Segl, K., Strobl, P., Haschberger, P., 2003, ARES – A new reflective / emissive imaging spectrometer for terrestrial applications, Proc. 23rd Symposium EARSeL, Ghent, Belgium, 2 – 5 June 2003, ISBN 90 5966 007 2

Staenz, K. et. Al., 2004, The potential of the Canadian Hyperspectral Satellite HERO for Mine Tailings Monitoring and Assessment, ISPRS Congress, Istanbul.