

Bayerisches Satellitennetzwerk für Fernerkundung und Biomonitoring

Bavarian Satellite Network for Remote Sensing and Biomonitoring

Rainer Bauer | Roland Pail | Klaus Schilling | Uwe Stilla† | Daniela Schleder |
Michael Dotterweich | Robert Roschlaub | Alexander Kleinschrodt |
Lukas Draschka | Thomas Gruber | Philipp Zingerle | Michael Greza

Zusammenfassung

Ausgehend von den Anforderungen staatlicher Kunden an Satellitendaten werden die Realisierungsschritte beginnend mit einer Studie bis zur konzeptionellen Ausgestaltung eines bayerischen Satellitennetzwerks erläutert. Die Umsetzung des Forschungsvorhabens erfolgt in einem Netzwerk bestehend aus Vertretern der Wissenschaft, Verwaltung und anwendungsnaher Unternehmen. Der Beitrag beschreibt Missionsdesign, inklusive der Satelliten, Prozessierungs- und Auswertekonzepte zum Datenfluss sowie die Simulationen der Orbitdaten, des Kamerasystems und der Auswerteverfahren. Abschließend werden Anwendungsbeispiele zur Nutzung der erfassten Satellitendaten vorgestellt.

Schlüsselwörter: Bayerisches Satellitennetzwerk, CubeSat, Orbit-, Kamera- und Auswerte-Simulatoren, Erdbeobachtung

Summary

Based on the requirements of government customers for satellite data, the realization steps are explained starting with a study and continuing with the conceptual design of a Bavarian satellite network. The research project is implemented in a network consisting of representatives from science, administration and application-oriented companies. The article describes the mission design, including the satellites, processing and evaluation concepts for the data flow, as well as the simulations of the orbit data, the camera system and the evaluation procedures. Finally, application examples for the use of the acquired satellite data are given.

Keywords: Bavarian satellite network, CubeSat, orbit-, camera- and evaluation-simulators, Earth Observation

1 Motivation und Anlass für ein Bayerisches Satellitennetzwerk

Die Vermessungsverwaltungen stellen die Ergebnisse ihrer Arbeiten – heute sind dies i. d. R. digitale Datensammlungen zu Grund und Boden und zur Topographie – ihren Kunden und Nutzern zur Verfügung. Unter diesen sind die staatlichen Verwaltungen von besonderer Bedeutung. Die Anforderungen an Aktualität und Auflösung steigen stän-

dig. In vielen Fällen genügen die Daten der Vermessungsverwaltungen diesen Anforderungen nicht mehr – denkt man etwa an die häufigen Extremwetterereignisse, Informationen aufgrund der unruhigen politischen Weltlage, an neue Anwendungen aus dem Bereich der Informationstechnologie (z. B. für augmented reality) oder auch zur Beantwortung von parlamentarischen Anfragen. Einige staatliche Kunden der Vermessungsverwaltung in Bayern haben dringenden Bedarf nach aktuelleren digitalen Daten flächendeckend für die ganze Landesfläche angemeldet, z. B. für das Biomonitoring oder die Kontrolle von Fördermaßnahmen. Damit stehen die Verwaltungen in Bayern nicht allein; ähnliche Bedarfe gibt es auch in den anderen Bundesländern. Die Vermessungsverwaltung in Bayern hat sich daher die Frage gestellt, ob eine verstärkte Nutzung von Möglichkeiten der Fernerkundung helfen kann, die Kunden mit hochaktuellen Daten zu versorgen. Der mittlerweile operativ erfolgreiche Einsatz von Klein- und Kleinstsatelliten in Form sog. CubeSats, die sich in einer erdnahen Umlaufbahn (sog. low earth oder very low earth orbit, LEO/VLEO) bewegen, kann bei optimaler Einrichtung und Konstellation Erdbeobachtungsdaten mit einer hohen zeitlichen Auflösung und einer Bodenauflösung von wenigen Metern liefern.

Zu klären war, ob die erzielbaren Ergebnisse für die Aufgaben der Vermessungsverwaltung bzw. ihrer Kunden ausreichen und ob überhaupt Satellitenlösungen für die Anforderungen der Kunden zur Verfügung stehen. Das Finanz- und Heimatministerium hat daher vom Ministerrat den Auftrag erhalten, diese Fragen und die Finanzierbarkeit zu prüfen.

Für die Durchführung des Prüfauftrags wurden Partner mit exzellenter Expertise und Erfahrung gesucht, sodass sich Gespräche mit dem Zentrum für Telematik (ZfT, Prof. Schilling) und der Technischen Universität München (TUM, Prof. Pail, Prof. Stilla) ergaben.

Das ZfT hat seit 2005 bereits mehrere Kleinstsatellitenmissionen erfolgreich durchgeführt und große Erfahrungen auf dem Gebiet der häufig genutzten CubeSats (Schilling 2015, 2021). Der Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie (APG) war an Schwerfeldsatellitenmissionen beteiligt (GRACE und GOCE) und betreut u. a. das Masterprogramm ESPACE der TUM, das sich an der Schnittstelle zwischen der Raumfahrt und

der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Nutzung von Satellitendaten bewegt, während die Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung (PF) ihre Erfahrungen mit der Auswertesoftware für die Mars Express Mission einbringt. Das ZfT und das Start-up S⁴ GmbH bieten professionelle, fortschrittliche Weltraumprodukte von Subsystemlösungen bis zu kompletten Satelliten-Formationen an und betreiben die »Forschungsfabrik Kleinsatelliten«, um entsprechende Technologien für die Kleinserienproduktion zu untersuchen (Schilling und Leutert 2023). Das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) komplettiert die Kooperation, u. a. mit der Spezifikation der Produkte, die für die identifizierten Anwendungen notwendig sind, sowie mit der Definition der Prozesskette, um die Produkte mit kurzer Latenzzeit für Standardaufgaben der Verwaltung nutzbar zu machen. Das beim LDBV angesiedelte IT-Dienstleistungszentrum des Freistaats Bayern (IT-DLZ), das u. a. mit dem Handling großer Datenmengen vertraut ist, arbeitet an dem Projekt ebenfalls mit. In forschungsbegleitenden Projekten will das LDBV anhand neuer Erfassungs- und Auswertemethoden, z. B. neben der automatischen Ableitung von Fachdaten aus Fernerkundungsdaten mittels KI-Methoden, CubeSats für Aufgaben der öffentlichen Verwaltung nutzbar machen. Dabei fließen bereits vorhandene Erfahrungen der KI-basierten Baufallerkundung ein (Roschlaub et al. 2022). Bei einer Kombination von Luftbilddaten und Bilddaten aus bestehenden Missionen und der bayerischen Satellitenmission entstehen zusätzlich Synergieeffekte und eine höher auflösende Informationslage in Raum und Zeit.

2 Kundenanforderungen und Prüfung des Einsatzes von CubeSats

Ganz wichtig war von Anfang an, die Datennutzer einzubinden, die heute schon Luftbilddaten für die gesamte Fläche des Freistaats nutzen: die Land- und Forstwirtschaftsverwaltung und die Umweltverwaltung. Diese Kunden haben großes Interesse gezeigt und ihre Anforderungen klar definiert. Sie nehmen zusammen mit den Kooperationspartnern auch an den Sitzungen des Programmausschusses teil. Das Finanz- und Heimatministerium koordiniert und leitet den regelmäßigen Programmausschuss.

Zur Umsetzung eines Prüfauftrags des Ministerrats wurden die Kooperationspartner beauftragt, in einer Machbarkeitsstudie zu prüfen, inwieweit Konstellationen von CubeSats aussichtsreiche Anwendungen für Bayern ermöglichen und ob sich diese technologisch realisieren lassen. Bereits zu Beginn der Untersuchungen war evident, dass es sich bei unserem Projekt um ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben handelt – die Machbarkeitsstudie hat das bestätigt. In ihr wurden im Rahmen einer Markterkundung zunächst die Anforderungen und das Einsatzpotenzial einer für Bayern maßgeschneiderten Kleinstsatellitenkonstellation zur multispektralen, hochauflösenden Erdbeobachtung auf Basis einer von den Spezialisten der bayerischen Verwaltung vorgegebenen Prioritätenliste untersucht. Tab. 1 zeigt Beispiele für Kundenforderungen. Auch die geforderte jährliche Aktualisierung des ATKIS-Basis-DLM könnte mit dem Vorhaben erheblich verkürzt werden. Die Machbarkeitsstudie identifiziert ferner die daraus resultierenden Missionsanforderungen, beschreibt Möglichkeiten für das Satellitendesign und das Bodensegment. Des Weiteren wurden perspektivisch auch neuartige vielversprechende geodätische Nutzungsmöglichkeiten erarbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass eine dedizierte Bayerische Erdbeobachtungsmission auf Basis von Kleinstsatelliten einen erheblichen Mehrwert an Information und technologischer Expertise generieren kann.

3 Satellitennetzwerk Bayern (SNW)

Die Machbarkeitsstudie hat das Potenzial und die Möglichkeiten einer Fernerkundungsmission bestätigt. Dies war auch Anlass, das Satellitennetzwerk Bayern (zunächst als Demonstratormission) mit Beschluss des Ministerrats im September 2020 in die High Tech Agenda PLUS – die Technologieoffensive der Bayerischen Staatsregierung – aufzunehmen. Mit dem Projekt stehen die Kooperationspartner vor großen Herausforderungen, die aber mit erzielbaren Fortschritten enorme wissenschaftliche und wirtschaftliche Perspektiven versprechen (neben dem Aspekt der digitalen Souveränität). Somit ist das Vorhaben in der High Tech Agenda PLUS richtig platziert. Ziel ist der, auf den Erfahrungen der Demonstratormission aufbauende, anschließende Vollausbau.

Tab. 1: Nutzeranforderungen (Auszug)

Bereich	Anwendungen	Notwendige Sensoren	Notwendige Auflösung
Landwirtschaft	Extensiver vs. intensiver Anbau	Multispektral	< 5 m, wöchentlich
Forstwirtschaft	Vitalitäts- und Trockenheitsmonitoring	Multispektral	< 5 m, alle 3 Monate
Kartographie	ATKIS-Basis-DLM: <ul style="list-style-type: none"> ■ Ableitung »Landbedeckung« ■ Änderungsdetektion ■ Qualitätssicherung 	Multispektral	< 10 m, jährlich
Naturgefahren	Hochwasser, Sturmschäden, Brandverfolgung	Multispektral	< 10 m, alle 1 bis 2 Tage

Die Projektpartner haben im Dezember 2021 eine Kooperationsvereinbarung zur Entwicklung einer Demonstratormission zur Realisierung des Bayerischen Satellitennetzwerks abgeschlossen (Forschungs- und Entwicklungsvorhaben). Die Kooperationsvereinbarung legt u. a. die näher zu behandelnden Themenkomplexe fest. In 36 detailliert beschriebenen Arbeitspaketen werden die Aufgaben auf die Projektpartner verteilt. Sehr vereinfacht lassen sich die Zuständigkeiten, wie folgt, zusammenfassen:

- **ZfT und S⁴**: Systemintegration und Test der Satelliten, Telemetrie und Telekommando, Übertragung der Nutzlastdaten zur Bodenstation, Vorbereitung für den Raketenstart, Betrieb der Mission im All,
- **TUM**: Anforderungsanalyse (mit ZfT), Bahn- und Konstellationsdesign (mit ZfT), Bestimmung der absoluten Lage der Kamera, Erarbeitung dreidimensionaler Prozessierungsmodelle,
- **LDBV**: Entwicklung eines zweidimensionalen Prozessierungsmodells, Datenspeicherung, Produktentwicklung (Mosaikerstellung), Datenmanagement, Langzeitarchivierung, Koordinierung der beteiligten Ressorts.

Zur Durchführung der in der Machbarkeitsstudie empfohlenen Demonstratormission waren noch vertiefende Untersuchungen in einer Missionsdesignstudie notwendig, um in einem iterativen Ansatz die Komponenten der Satellitenmission und ihres Zusammenwirkens, insbesondere Satellitensystem, Instrumentensystem, Bahnkonfiguration und Bodensegment zu optimieren sowie die Alleinstellungsmerkmale unseres Vorhabens und die Finanzierung zu dokumentieren.

3.1 Missionsdesignstudie

Auf der Machbarkeitsstudie aufbauend wurde ein Missionsdesign für eine Konstellation von Kleinsatelliten ausgearbeitet, welches die identifizierten Anforderungen adressiert. Hier wurden einerseits Aspekte des Satellitendesigns, des Instrumentensystems und des notwendigen Bodensegments untersucht sowie andererseits mit Hilfe eines numerischen Simulators mögliche Bahnkonfigurationen und erzielbare Genauigkeiten der Endprodukte analysiert. Als Ergebnis dieser Arbeiten wurde ein erstes Konzept für das Gesamtsystem entworfen, welches als Basis für die Entwicklung einer Demonstratormission dient. Die wichtigsten Parameter des Missionsdesigns können, wie folgt, zusammengefasst werden:

- Mit der Demonstratormission, die aus fünf Satelliten besteht, werden die technologischen Entwicklungen für den Vollausbau vorbereitet, die Satelliten, die Instrumente und der Betrieb im Orbit getestet und parallel dazu die Algorithmen für die Auswerteverfahren und die Produkterstellung verifiziert.

- Zur optimalen Integration des Instrumentariums, zur ausreichenden Energieversorgung mit Solarzellen und für die erforderliche hochgenaue Ausrichtung bei den photogrammetrischen Beobachtungen wurde eine geeignete 6U-Satellitenstruktur ($30 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$, ca. 7 kg) identifiziert.
- Es ist eine Bahnhöhe von ca. 460 km geplant, welche sich als günstiger Kompromiss zwischen erzielbarer Bodenauflösung und Mindestlebensdauer der Satelliten von fünf Jahren mit Hilfe des Antriebssystems zur Kompensation des Luftwiderstandes ergibt.
- Die Satelliten sollen in einer sonnensynchronen Bahn die Erde umkreisen – seitlich hintereinander in einer Formation versetzt für optimale photogrammetrische Beobachtungen mit ausreichender Überlappung der Bilder. Die Orbits wiederholen sich nach drei Tagen, die Beobachtung erfolgt jeweils zur selben Tageszeit von ca. 11 Uhr Ortszeit. Damit wird sichergestellt, dass theoretisch (abhängig von der Wolkenbedeckung) ganz Bayern unter gleichen Lichtbedingungen mit dreitägigem Zyklus beobachtet werden kann.
- Im Gesamtausbau werden ca. 25 Satelliten benötigt, um eine vollständige Abdeckung von ganz Bayern während eines Überflugs der Gesamtkonstellation sicherzustellen. Die Anzahl der Satelliten hängt dabei von der gewünschten Überlappungsbreite der Kameraaufnahmen der Satelliten ab, welche mindestens 10 % betragen soll. Die Überlappungsbreite hängt wiederum von der Qualität der Ausrichtung der Satellitenkamera sowie der Ausrichtgenauigkeit des Lageregelungssystems ab, wofür detaillierte Anforderungen analysiert wurden.
- Um alle Rohdaten der Multi-Spektralkamera zeitnah zum Boden zu übertragen, wird eine X-Band-Kommunikationsantenne eingesetzt. Die Anforderungen an das Bodenstationsnetz wurden definiert. Eine Empfangsstation in hohen Breiten ermöglicht häufige Kontaktzeiten für die gesamte Formation und ergänzt die Bodenstation des ZfT in Würzburg, um einen zügigen Datentransfer zu gewährleisten.
- Das Prozessierungsschema von den Rohdaten zu den Nutzerprodukten wurde definiert und mögliche Produkte der verschiedenen Verarbeitungsstufen identifiziert.

Die Missionsdesignstudie hat aber auch die Alleinstellungsmerkmale des Satellitennetzwerks mit CubeSats dokumentiert. Im Wesentlichen sind dies:

- stabile Orbithöhe: dadurch gleichbleibende Bodenauflösung,
- regelmäßige Überlappung der Bildstreifen durch ein präzises Lageregelungssystem,
- Orbitkontrolle mit chemischem Antriebssystem zur Sicherung einer Wiederholungsbahn, sodass Bilder stets am gleichen Ort unter demselben Sonneneinfallswinkel gut vergleichbar (Ortszeit) aufgenommen werden,
- Formationsflug der fünf Satelliten, Selbstorganisation im Orbit, um die Beobachtungsqualität zu optimieren,

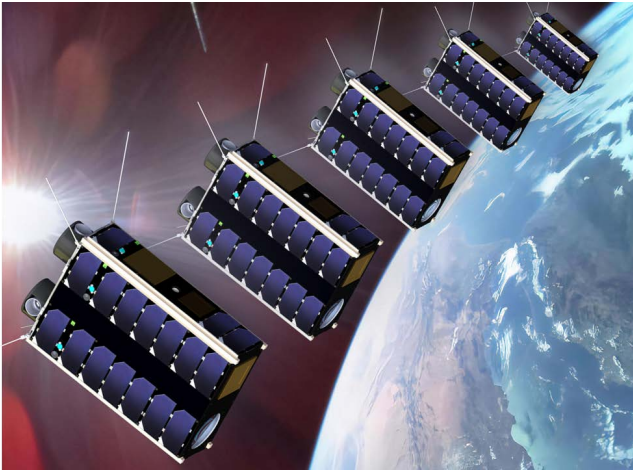


Abb. 1: Satellitenformation

- schnelle Verfügbarkeit der Daten und
- Zugriff auf die gesamte Prozesskette von den Rohdaten bis zu den veredelten Produkten (Beitrag zur digitalen Souveränität).

Durch die vollständige Kontrolle über das Satellitensystem und den Zugriff auf die gesamte Prozesskette von den Rohdaten mit allen systemrelevanten Daten bis zu den finalen Produkten (bei Konstellationen, die mehrere Nutzer bedienen, ist dies nicht realisierbar) ergeben sich vielfältige Perspektiven in der Datenverarbeitung, damit Kundenanforderungen erfüllt werden können.

Auf Basis der Erkenntnisse der Missionsdesignstudie wird derzeit die Demonstratormission mit fünf Satelliten (siehe Abb. 1) als Vorstufe zum Vollausbau entwickelt. Dessen detailliertes Missionsdesign sowie die Vorbereitungen zur Datenprozessierungskette und den Nutzerprodukten werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

3.2 Satelliten-Systemdesign

Die vorgegebenen Nutzeranforderungen (Beispiele siehe Tab. 1) werden durch eine geeignete Kombination einer kompakten Multi-Spektralkamera mit einer niedrigen Erdumlaufbahn erfüllt. Sie liefert mit einem panchromatischen und sieben multispektralen Bändern bei einer Bahnhöhe von 350 bis 475 km eine Bodenauflösung von 3,3 bis 4,5 m. Hier wird in einer Push-Broom-Konfiguration entlang einer Linie abgetastet. Durch die Vorgabe der stabilen Orbithöhe wird ein Antriebssystem zum Ausgleich der Abbremsung durch Luftpartikel benötigt. Die genaue Ausrichtung des Schubvektors wird dabei durch das Lageregelungssystem vorgenommen. Dessen Präzision wird auch durch die vorgegebene Überlappung von 10 % der Bilder von aufeinanderfolgenden Satelliten bestimmt.

Diese herausfordernden Bedingungen im Bereich der Kleinstsatelliten werden durch Lagebestimmung mit Sonnensensoren und zwei Sternensensoren sichergestellt, während mit einem GNSS-Empfänger und insgesamt vier GNSS-Antennen, die jeweils auf den großen Seiten-

paneelen untergebracht sind, die Position bestimmt wird (siehe Abb. 2 und Abb. 3). Eine Lageregelungssoftware realisiert mit Miniatur-Reaktionsrädern die Ausrichtung in drei Achsen. Zur Entsättigung werden Magnetorquers eingesetzt. So wird in einem typischen Orbit während der Aufnahmeperiode die Kamera auf Nadir ausgerichtet (vgl. Abb. 3 links) und anschließend werden durch eine Drehung des Satelliten um 90° die Antennen mit hoher Übertragungskapazität (S-/X-Band, vgl. Abb. 3 rechts) auf die Bodenstation (nahe Nadir) orientiert, um die Nutzlastdaten zu übertragen. Während des größten Teils der Umlaufperiode wird der Satellit so ausgerichtet, dass geringstmöglicher Luftwiderstand besteht – mit den kleinen Oberflächen in Flugrichtung –, um den Treibstoffverbrauch zur Luftwiderstandskompensation zu minimieren. Bevor der nächste Überflug für Aufnahmen der Oberfläche erfolgt, steht ausreichend Zeit zum Zurückdrehen der Kamera in die Nadirausrichtung zur Verfügung.

Eine Satellitenformation mit fünf CubeSats wird eingesetzt, um entsprechende Überdeckungstreifen des bayerischen Gebietes in seiner Breite zu erzielen. Entsprechende anspruchsvolle Technologien zur Selbstorganisation der fünf Satelliten im Orbit bauen im Hinblick auf eine optimale Konfiguration für die Beobachtungen auf den Grundlagen vernetzter Kontrollsysteme auf, die für die NetSat-Mission mit vier Satelliten (Start erfolgte 2020) vorbereitet wurden (siehe Schilling 2021).

In Vorbereitung des Starttermins Anfang 2025 wurden alternativ verfügbare Raketenoptionen identifiziert und die Zulassung der entsprechenden Funkfrequenzen beantragt. Parallel zum Satelliten wird auch das für den Betrieb vorgesehene Bodensegment in Würzburg aufgebaut und getestet. Dies umfasst entsprechende geeignete Hardware- und Softwarekomponenten.

4 Daten Prozessierungs- und Auswertekonzepte

4.1 Datenfluss und Datenspeicherung

Das Missionskontrollzentrum des ZfT überwacht und steuert die CubeSats. Sobald Abweichungen zum Sollzustand detektiert werden (z. B. Hardwarestörungen, Abweichungen in der Umlaufbahn), werden in einfachen Fällen automatisch die entsprechenden Gegenmaßnahmen sofort autonom von der Betriebssoftware eingeleitet und die verantwortlichen Bediener umgehend informiert. Telecommando-Daten werden per S-Band oder UHF an die betroffenen CubeSats übertragen, um entsprechende Korrekturen auszuführen.

Mit einem Speicherbedarf von 3,5 GB je CubeSat und einem Überflug, der für den Downlink auf 2,4 GB komprimiert werden kann, hat die Multispektralkamera im Vergleich zu allen anderen Subsystemen mit Abstand den größten Anteil am entstehenden Datenvolumen. Die Rohdaten der CubeSats werden als Datenpakete an die

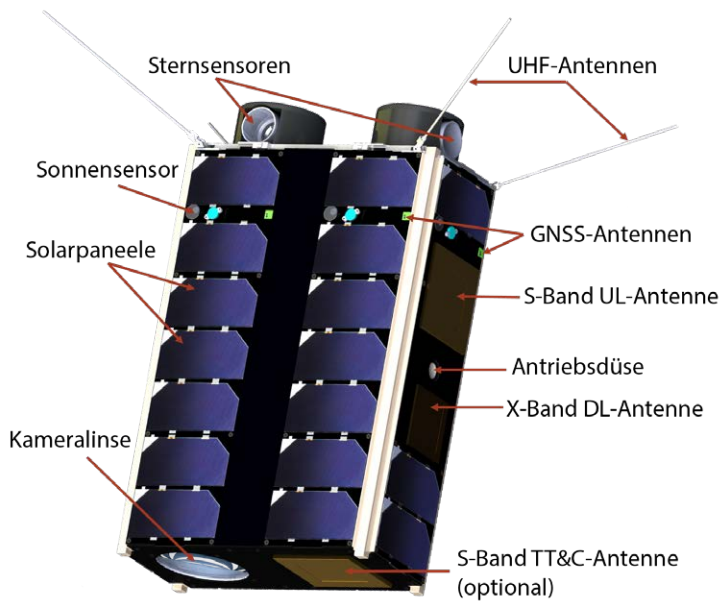


Abb. 2: Unterbringung der Komponenten für die fünf baugleichen Einzelsatelliten. Es sind GNSS-Antennen auf allen vier großen Außenflächen angebracht, sodass eigentlich immer Satellitenkontakt zur Positionsbestimmung besteht. Ansonsten wäre auch Software zur Orbit-Vorhersage an Bord, die bei kurzzeitigen Kontaktunterbrechungen die Bahn extrapoliert.

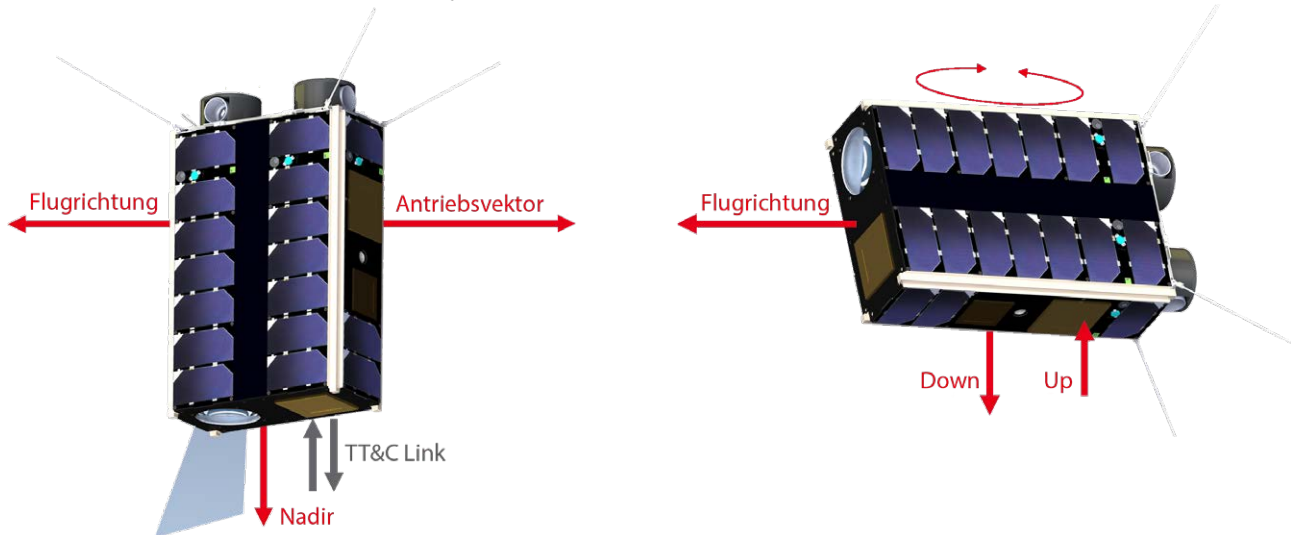


Abb. 3: Die beiden Betriebszenarien des Satelliten: links sieht die Kamera, die auf der langen Achse des Satelliten untergebracht ist, nach unten für Aufnahmen der Erdoberfläche, in der rechten Abbildung zeigen die X-Band- und die S-Band-Antenne während der Übertragung der Nutzlastbilder auf die Bodenstation; in Flugrichtung wird zudem die Luftwiderstandsfläche minimiert.

Bodenstationen in hohen Breiten und nach Würzburg übermittelt (Abb. 4).

Die von den Bodenstationen empfangenen Rohdatenpakete (Chunks) der CubeSats werden anschließend über das Missionskontrollzentrum des ZfT ausgewertet (Abb. 4). Dabei werden die von verschiedenen Bodenstationen empfangenen Chunks von einem CubeSat wieder zu einem Bild zusammengeführt. Sämtliche auf Vollständigkeit und Lesbarkeit zusammengeführten Chunks entsprechen im Sinne finaler Missionsprodukte einem Produkt des Level 0 (Top of Atmosphere).

Die Level 0-Daten werden zur Archivierung in das IT-DLZ übertragen (Abb. 4). Die Datenübertragung erfolgt mit dem HTTP(S)-basierten S3-Protokoll. Diese, vom Cloud-Computing-Anbieter Amazon Web Services (AWS) ursprünglich für seinen Webspeicherdienst Simple Storage Service (S3) entwickelte Zugriffsschnittstelle hat sich mittlerweile als ein De-facto-Standard für die Datenspeicherung über das Internet etabliert. Dadurch sind Möglich-

keiten eines etwaigen Speichersystemwechsels oder eine Etablierung von Cloudlösungen gewährleistet. Zur Speicherung kommt im IT-DLZ ein als Digitalisierungsspeicher bezeichneter Object Storage zum Einsatz, welcher mit einer herstellereigenen Content Platform realisiert ist. Das System bietet eine betriebsredundante dreifache Speicherung. Integrierte Managementfunktionen überwachen Datenintegrität und Aufbewahrungsfristen. Zusätzlich unterstützt das System die Anreicherung der Daten mit anwendungsspezifischen Metadaten. Neben S3 wäre ein Zugriff über die Cloud-Protokolle OpenStack, Swift oder REST ebenso möglich.

Im Object Storage werden zunächst die Level 0-Rohdaten der CubeSats in Form von versionierten Objekten gespeichert. Der Zugriff von Nutzern wird über Schnittstellen ermöglicht. Eine Aufbereitung dieser Daten, beispielsweise durch eine erste grobe Georeferenzierung, führt zu einem versionierten Datenbestand in Level 1. Eine Kombination der Level 1-Daten in weiteren Verarbeitungsschritten

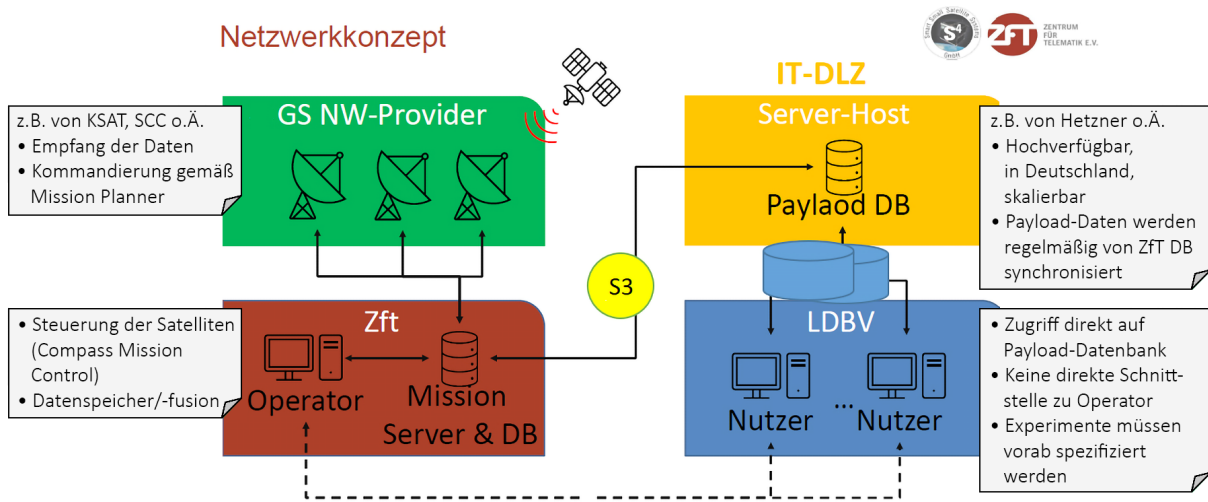


Abb. 4: Datenfluss vom Satelliten über das Missionskontrollzentrum des ZfT in den Digitalisierungsspeicher des IT-DLZ und Bereitstellung zur Prozessierung am LDBV

führt zu Produkten des Levels 2. Hierzu zählen insbesondere die automatisierte Passpunktbestimmung, die Georeferenzierung und die Orthorektifizierung – d.h. die Berechnung georeferenzierter Bilder. Für das Zusammenfügen der orthorektifizierten Bilder zu einem Mosaik werden radiometrisch nicht korrigierte Daten verwendet. Es entspricht einem Nutzerprodukt in Level 2.

Nach Abschluss der Datenprozessierung aus dem temporären Datenspeicher erfolgt die versionierte Speicherung der Daten im Object Storage am IT-DLZ. Damit sollen vor allem behördliche Nutzergruppen aus den Fachressorts die Möglichkeit erhalten, mosaikierte Satellitenbilder über einen standardisierten Webdienst in eigene Webanwendungen einzubinden sowie weiterführende Auswertungen durchzuführen oder eigene Anwendungen und Prozesse bis hin zu nutzerspezifischen, höherwertigen Datenprodukten in den Levels 3 oder 4 zu entwickeln.

4.2 Simulatoren zur Orthorektifizierung und Mosaikierung

Noch vor Beginn der Satellitenmission ist über Simulatoren die Prozessierung der rohen Satellitendaten zu einem Produkt georeferenzierter, orthorektifizierter und mosaikierter Bilder zu testen, um nach dem Start eine rasche Datenbereitstellung sicherzustellen. Die Ergebnisse der Simulatoren sind der grundsätzliche Nachweis einer zwei- und einer dreidimensionalen Verfahrenslösung zur automatisierten Georeferenzierung und Mosaikierung von CubeSat-Satellitenbildern. Darüber hinaus können Elemente des Satelliten- und Missionsdesigns durch Grenzfalltestungen überprüft werden. Die einzelnen Simulatorelemente werden im Folgenden vorgestellt.

4.2.1 Orbitalsimulatoren

Auf Grundlage der in der Missionsdesignstudie festgelegten Anforderungen an die Konstellation werden zunächst

Referenzorbits für die gesamte Satellitenkonstellation generiert. Diese Referenzorbits legen die Beobachtungsgeometrie der Satelliten während ihres Überflugs über Bayern unter Optimalbedingungen, d.h. zunächst unbeeinträchtigt von Reibungskräften der Restatmosphäre und Orientierungsfehlern, fest. Als solches bestehen die Referenzorbits aus einem Satz von Positionen und Orientierungen entlang ihrer Bahntrajektorie. Im Zuge der Simulationen zur photogrammetrischen Auswertung können diese Referenzorbits in Position und Lage beliebig mit Rauschen belegt werden, um z.B. verschiedene Szenarien von Instrumentenfehlern zu simulieren oder auch kritische Anforderungen an den operationellen Betrieb der Satellitenkonfiguration zu identifizieren und eine Einschränkung der Qualität der Endprodukte zu vermeiden.

Darauf aufbauend werden detaillierte Orbitalsimulationen als Teil des gesamten Satellitensystemsimmersors

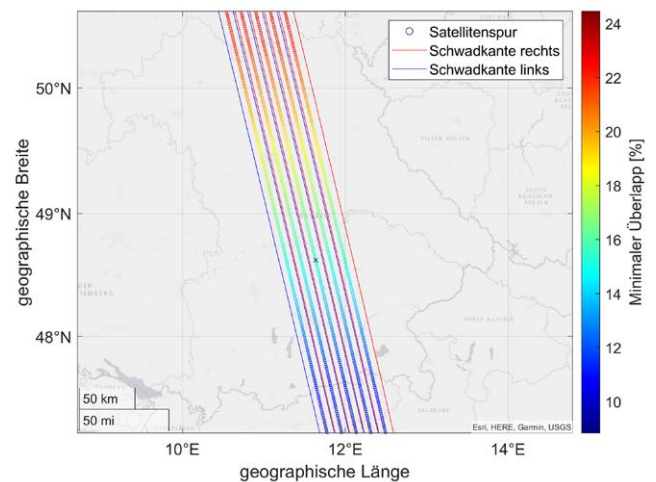


Abb. 5: Darstellung der Bodenspuren der Referenzorbits eines Überflugs der Demonstratormission (fünf Satelliten) über Bayern. Der farbliche Verlauf stellt die Variation der Überlappung der Sichtfelder der Kameras bei vorgegebener und kontrollierter Bahn dar (aufgrund von Abplattung der Erde und Meridiankonvergenz).

durchgeführt, welche u. a. sowohl das Verhalten von Reibungskräften, Sensoren und Aktuatoren (z. B. auch Orbitmanöver) berücksichtigen. Abschließend werden diese realistischen Orbit- und Lagedaten für weiter verfeinerte Simulationen des Kamerasystems bzw. der resultierenden Endprodukte herangezogen. Dieses systematische Vorgehen erlaubt es bereits vor dem Start der Satellitenkonfiguration, mögliche kritische Elemente zu identifizieren und das Betriebskonzept entsprechend planen zu können.

Abb. 5 zeigt die nominalen Bodenspuren der geplanten Demonstratormission mit fünf Kleinsatelliten in einer Perlenkettenkonfiguration (siehe Abb. 1) unter Annahme einer minimalen Bildüberlappung von 10 % für einen Überflug.

4.2.2 Passpunktsimulator

Die automatisierte Ermittlung von Passpunkten erfolgt mit Hilfe von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) auf Basis von resampelten, lagerichtigen Digitalen Orthophotos (TrueDOPs) unter Verwendung eines KI-Netzwerks und resampelter Gebäudegrundrisse aus dem amtlichen Liegenschaftskataster (Roschlaub et al. 2023, 2022). Die Übertragbarkeit der Passpunktbestimmung auf Satellitendaten wurde anhand von zwei WorldView-3-Szenen durchgeführt.

4.2.3 Bildaufnahmesimulator und Bündelblockausgleichung

Um die Aufnahme der Bildstreifen und das resultierende Bildmaterial zu simulieren, wurde eine virtuelle Satellitenkamera erstellt (Lenz und Greza 2023). Die virtuelle Kamera folgt den generierten Satellitenorbits (siehe Kap. 4.2.1) und nimmt dabei hochaufgelöste TrueDOPs aus der

Bayernbefliegung in einer Bodenpixelgröße von ca. 40 cm Zeile für Zeile auf. Im ersten Schritt wird unter Berücksichtigung der Kamera- und Orbitparameter bestimmt, welchen Bildausschnitt die Sensorzeile in ihrer momentanen Orientierung aufnimmt. Das Ergebnis wird auf die korrekte Auflösung (ca. 4 m) heruntergerechnet. Anschließend wird die resultierende Bildzeile mittels Filterung und zusammengesetzter Modulationsübertragungsfunktionen radiometrisch verändert, um einem Level 0-Produkt zu entsprechen. Abb. 6 zeigt einen Vergleich zwischen originalem TrueDOP, einem simplen Downsampling auf 4 m und der Simulation. Die Erkenntnisse aus den Kamertesten (siehe Kap. 4.2.4) werden zusätzlich genutzt, um den Kamerasimulator weiter an die radiometrischen Eigenschaften der echten Satellitenkameras anzugleichen. Es ist zu erwähnen, dass der Sensor tatsächlich in Bildzeilen mit physischem Abstand simuliert wird. So lässt sich bei einem multispektralen Eingangsbild auch eine zeilenweise Aufnahme der einzelnen Spektralkanäle mit einem Versatz zwischen den Kanälen erzeugen.

Darüber hinaus können die Bilder weiter verfremdet werden, um die widrigen Bedingungen einer realen Satellitenaufnahme mit einzubeziehen. Es können künstliche Wolken (siehe Abb. 7), die Effekte von Schmutzpartikeln auf der Linse sowie die Auswirkungen von Strahlung und atomarem Sauerstoff (z. B. Pixelausfall oder Okklusions-effekte auf der Linse) generiert werden. Ziel dabei ist es, dem erwarteten realen Produkt so nahe wie möglich zu kommen und die Prozessierungskette auch unter grenzwertigen Bedingungen zu testen. Problematische Situationen wie ein Taumeln des Satelliten oder schlechte Sichtbedingungen erschweren die automatische Bildverarbeitung. Mit Hilfe des Simulators kann sichergestellt werden, dass die Prozessierungskette robust gegenüber diesen Problemen ist. Ferner kann der Simulator zur Generierung

und Augmentierung von Trainingsdaten für die KI-Systeme genutzt werden.

Zur geometrischen Korrektur der Bildstreifen wird ein iterativer Ansatz genutzt (Greza et al. 2023). Mittels Featuredetektion sowie per KI (siehe Kap. 4.2.2) werden zunächst Verknüpfungspunkte zwischen den Streifen sowie dreidimensionale Passpunkte aus erkannten Gebäuden generiert. Diese werden gemeinsam mit den Gebäudekoordinaten aus dem amtlichen Liegenschaftskataster, einem digitalen Geländemodell



↑ Abb. 6:
Simulationsdaten: Links: Ausgangsbild (TrueDOP, 40 cm).
Mitte: Aufnahme und Downsampling (perspektivisches Zeilenbild, 4 m). Rechts: simuliertes Satellitenbild (gefiltertes und modifiziertes perspektivisches Zeilenbild, 4 m)



← Abb. 7:
Künstlich erzeugte Wolkenbedeckung zur Erschwerung der Gebäudedetektion

und den Lage- und Orientierungsdaten des Satelliten für eine Bündelblockausgleichung genutzt. Die resultierende verbesserte Lage und Orientierung dienen der genaueren Ausrichtung der einzelnen Bildzeilen sowie Bildstreifen zueinander. Da nach einer ersten Optimierung anzunehmen ist, dass mehr Gebäude detektiert werden können, kann das Verfahren erneut durchgeführt werden, um das Ergebnis zu verbessern. Eine Kombination mit den unter Kap. 4.2.5 beschriebenen Verfahren ist dabei zur Erhöhung der Robustheit des Prozessierungssystems durch redundante bzw. sich ergänzende Prozessierungssysteme vorgesehen.

4.2.4 Kamera-Testbed am ZfT

Zur Verifikation der Vorverarbeitung der Multispektralkamera sowie für deren späteren Integrationstest wurde ein Hardware-in-the-Loop (HiL)-Testbed genutzt. Dieses ist darauf ausgelegt, alle frühen Kameratests durchführen zu können und ist mit minimalen Modifikationen auch für andere Kameras verwendbar. Da die Wiederholbarkeit der Experimente von höchster wissenschaftlicher Bedeutung ist, besteht der Aufbau aus steifen 40 mm-Aluminiumprofilen. Während die originale Linse für den Weltraum Einsatz fest auf unendliche Distanzen fokussiert ist, muss für diesen Testaufbau eine angepasste, fokussierbare Linse genutzt werden. Sie zeichnet sich durch sehr geringe Bildfehler aus und wird mit einem Adapter auf dem Sensor montiert. Um die hohe Fluggeschwindigkeit im Orbit von etwa 7 km/s zu simulieren, wurden verschiedene Methoden in Erwägung gezogen. Auf den ersten Blick erscheint es sinnvoll, die Kamera an einem Ziel vorbei zu bewegen. Doch sind diese hohen Relativgeschwindigkeiten nicht fehlerfrei zu erzeugen. Der gewählte Ansatz besteht aus einer Leinwand, auf welche ein 4K-Projektor ein in Simulation erzeugtes, realitätsnahes Überflugvideo projiziert (siehe Abb. 8). Die zu testende Kamera ist fix zur Leinwand montiert und filmt das Video ab. Dieses Vorgehen bietet eine höhere Wiederholbarkeit. Hierbei kann es dennoch abhän-



Abb. 8: Test der erzielbaren Aufnahmequalität mit der eingesetzten Kamera mit am Bildschirm eingeblendeten Überflugdaten, in die unterschiedliche Störungs-niveaus eingeblendet werden können.

gig von der verwendeten Abbildungstechnologie zu Fehlern kommen. Einerseits werden durch das Mischen der Farben durch rote, grüne und blaue LEDs nicht alle Farben ideal wiedergegeben. Andererseits sind Farben in höheren oder niedrigeren Spektren hierbei gar nicht abbildbar. Zusätzlich definieren Auflösung und Bildwiederholrate des Projektors die Grenzen des Testaufbaus.

Die zugrundeliegenden Videos wurden durch Simulationen erzeugt und sollen den späteren Satellitenorbit und die entsprechenden Bodenspuren möglichst genau nachbilden. Die Datengrundlage hierfür bilden unter anderem Befliegungsdaten. In die Simulation lassen sich verschiedene Umwelteinflüsse und Fehlermodi, wie z. B. Taumeln, Ausrichtungsfehler, Schwingungen usw., einbinden und deren Auswirkungen auf die resultierenden Kamerabilder untersuchen.

Abb. 9 zeigt Bilder für drei Störschwingungen, wie sie beispielsweise durch Lageregelungsaktivitäten oder Änderungen der Umgebungstemperatur (Bahnübergang vom

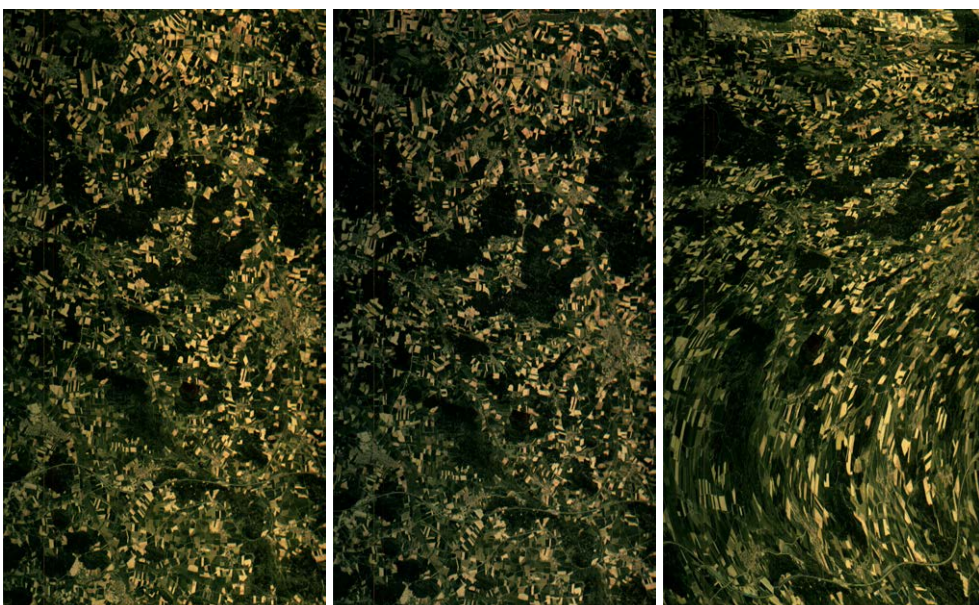


Abb. 9:
HiL-Testergebnisse (koloriert) mit verschiedenen Schwingungen:
Links: schwingungsfrei
Mitte: 0,002° bei 10 Hz
Rechts: 1° bei 2 Hz

Erdschatten in den sonnenbeschienenen Orbitabschnitt entstehen. Für die Bildqualität spielt die maximale Auslenkung (Amplitude in °) und die Frequenz (gemessen in Hertz) der Störung die entscheidende Rolle. In Abb. 9 ist links das störungsfreie Bild, in der Mitte das kaum veränderte Bild mit Störung bei Amplitude 0,002°/Frequenz 10 Hz, während rechts deutliche Abweichungen bei Amplitude 1°/Frequenz 2 Hz sichtbar sind. Im hier genutzten »Time Delay and Integration (TDI)«-Prozess wird derselbe Bodenpunkt in aufeinanderfolgenden acht Zeitschritten in Flugrichtung betrachtet, um die Belichtungszeit und so die eingesammelte Menge an Licht zu erhöhen.

4.2.5 2D-Netzausgleichung und Mosaikierung

Neben dem klassischen photogrammetrischen Ansatz der dreidimensionalen Bündelblockausgleichung aus Kap. 4.2.3 werden alternativ zweidimensionale Verfahren und Algorithmen zur Georeferenzierung und Mosaikierung entwickelt und getestet. Sie ermöglichen eine direkte Koregistrierung auf bereits georeferenzierte Satellitenbilder ohne DGM mittels eines neuronalen Netzes. Dies dient dazu, Aussagen zum Rechenaufwand sowie zur erreichbaren Genauigkeit abzuschätzen, die bei einer bestmöglichen zweidimensionalen Passpunktzuordnung unter optimalen atmosphärischen Bedingungen möglich sind.

Zur Prozessierung der Satellitenbilder zu einem Mosaik werden zwei Ausgleichungsverfahren eingesetzt: Dies sind das Ortra-Membranverfahren für die Georeferenzierung und das Ortra-Gitterverfahren für die Orthorektifizierung. Bei einer landesweiten Prozessierung von Satellitenbildern der CubeSats in 4 m Bodenaufklärung sind Gleichungssysteme mit 17,4 Mrd. Unbekannten in nur zwei bis drei Tagen zu lösen. Im Vergleich dazu werden in Bayern Luftbilder für die Hälfte der Landesfläche über den Zeitraum eines Jahres prozessiert. Der Simulator des LDBV muss also in der Lage sein, Big Data mit hoher Performance umzusetzen.

Aufbauend auf das in Bayern aus der Transformation des Liegenschaftskatasters vom GK-Koordinatensystem nach UTM bekannte Ortra-Verfahren (Hampp und Glock 2017), wird das zum Ortra-Membranverfahren weiterentwickelte Ausgleichungsverfahren zum Georeferenzieren von Fernerkundungsdaten, der Qualitätssicherung und der Vorbereitung des Mosaikierens eingesetzt. Für die Orthorektifizierung der Satellitenbilder werden mittels triangulierter Passpunkte Restklaffungen an den Gitterpunkten durch folgende Ansätze untersucht:

- Ein Ortra-Gitteransatz, der im Anschluss an das Ortra-Membranverfahren für unbekannte Gitterpunkte ein Modell eines regelmäßigen, mechanisch versteiften Gitters einführt. Zur exakten Bestimmung der Gitterwerte wird die bei der UTM-Umstellung des Liegenschaftskatasters verwendete NTV2-Methode (Ahrens und Böhrner 2010) angewendet (Glock 2021, Glock et al. 2019). Dieser Ansatz dient zugleich als Referenz für die verbleibenden Verfahren.

- Ein Sibson-Koordinaten-Interpolationsverfahren (Sibson 1980, 1981, Farin 1990), das Restklaffungen anhand von Dreieckseckpunkten des optimiert triangulierten Ortra-Gesamtsystems interpoliert sowie ergänzend eine Interpolation mittels Voronoi-Diagrammen durchführt.
- Interpolation mit dem nächstgelegenen Ortra-System.

4.3 Anwendungen und Produkte

Neben dem Themenschwerpunkt Big Data (Prozessierung großer Datenmengen) und der automatischen Ableitung von Fachdaten mittels Methoden der KI sollen neue Produkte aus Fernerkundungsdaten abgeleitet sowie Erkenntnisse für den geplanten Vollausbau des Bayerischen Satellitennetzwerks zur Abdeckung der gesamten bayerischen Landesfläche gewonnen werden. Die hochaufgelösten Satellitenbilder dienen als Datengrundlage zur aufgabenbezogenen Auswertung in den verschiedensten Fachanwendungen:

4.3.1 Landwirtschaftliche Anwendungen

Im Bereich Landwirtschaft werden allein für Bayern jährlich über 1 Mrd. Euro an EU-Fördergeldern verteilt, deren Auszahlung an eine Vielzahl von Auflagen geknüpft ist. Schon jetzt werden nach EU-Vorgabe einige davon mit Hilfe von Satellitendaten überprüft. Die zeitlich höher aufgelösten Bilder des Bayerischen Satellitennetzwerks werden es künftig ermöglichen, die Situation auf den Flächen präziser zu erkennen und Antragsteller zuverlässig auf Abweichungen hinzuweisen.

Für landwirtschaftliche Belange lassen sich mit den kontinuierlich generierten multispektralen Satellitendaten landwirtschaftlich genutzte Feldstücke voneinander abgrenzen und deren Änderung fortlaufend detektieren. Damit können die Antragsdaten der Landwirte, die in der Feldstückkarte Bayern vermerkt werden, schneller und



Quellen: Luftbild LDBV, Feldstückkarte SMELF

Abb. 10: Mit Hilfe des Bayerischen Satellitennetzwerks können Landwirte bald in der Bearbeitung ihrer Förderanträge zuverlässig und frühzeitig unterstützt werden.

einfacher überprüft und zusammen mit dem Antragsteller aktualisiert werden.

Dadurch können Angaben sanktionsfrei geändert und Bewirtschaftungspflichten rechtzeitig erfüllt werden (vgl. Abb. 10). Die Feldstückkarte kann als ein aus den Satellitenbildern gewonnenes Datenprodukt des Level 3 den Landwirten bei der Antragstellung direkt angezeigt werden, um fehlerhafte Flächenmeldungen gar nicht erst entstehen zu lassen.

Ein weiteres Einsatzgebiet für landwirtschaftliche Belange bietet sich bei der Kontrolle der fach- und förderrechtlichen Einhaltung von Auflagen an. Dazu zählen beispielsweise die Schnittzeitpunkte auf Grünland, Bewirtschaftungsruhe oder Erntezeitpunkte bei Leguminosen. Des Weiteren können optische Aufnahmen durch Satelliten sinnvoll sein, um Anhaltspunkte zu ermitteln, inwiefern ein Betrieb seine Flächen extensiv oder intensiv bewirtschaftet und hierbei ggf. bestimmte Förderbedingungen einhält.

Generell ist davon auszugehen, dass auch die hochtechnologisierten Sektoren der Agrarökonomie und -ökologie von den Bildern profitieren werden. Hochaktuelle Daten zur Pflanzenvitalität können beispielsweise für die Düngedarfbsberechnung eingesetzt werden. Dies kann zur Ressourcenschonung beitragen.

4.3.2 Forstwirtschaftliche Anwendungen

Als Anwendungen im Bereich der Forstwirtschaft sind die Erfassung der Baumarten in Bayern sowie das Monitoring der Vitalität des Waldes und damit verbunden die Bestimmung des Grads der Trockenheit zu nennen.

Neben der Baumarterfassung werden optische Satellitendaten auch zur Detektion von schadhaften Veränderungen am Waldbestand eingesetzt. Dazu zählen beispielsweise Sturmschäden auf einer Fläche von mehr als 2500 m², die idealerweise mit einer hohen räumlichen Auflösung möglichst zeitnah erfasst werden müssen, um eine rasante Ausbreitung des Borkenkäfers zu verhindern. Die multispektralen Satellitendaten bilden eine zusätzliche Informationsquelle zu den üblicherweise verwendeten Stereo-Luftbildern und Oberflächenmodellen, die zur Ermittlung der Flächenanteile von geworfenen, gebrochenen oder angeschobenen Bäumen dienen. Unabhängig von Sturmschäden stellt der Befall des Borkenkäfers aktuell eines der größten Probleme in der Forstwirtschaft dar. Die hohe Wiederholungsrate der multispektralen CubeSat-Satellitenaufnahmen unterstützt die Erfassung der bei einem Schädlingsbefall mit dem Borkenkäfer typischen roten abgestorbenen Baumkronen bei Fichten. In engem Zusammenhang mit der Änderungsdetektion steht zugleich die Erfassung der Mortalität der Buche.

Eine weitere forstwirtschaftliche Anwendung ist das Monitoring der Vitalität des Waldes und der damit verbundenen Aridität. Dabei gilt es, Vegetations- und Trockenheitsindizes zu bestimmen.

4.3.3 Geodätische Anwendungen

Neben der Mosaikierung und der Bereitstellung der CubeSat-Satellitenbilder über einen standardisierten Webdienst als orthorektifiziertes Produkt für räumlich exakte Auswertungen in Fachverfahren, wie am Beispiel der Land- und Forstwirtschaft dargestellt, bestehen darüber hinaus weitere geodätische Anwendungen:

Im Bereich der amtlichen Geobasisdaten sind drei Anwendungsszenarien vorstellbar. Die Satellitendaten aus der Demonstratormission mit CubeSats wären vordringlich in die Prozesskette zur Detektion von Veränderungen und zur Qualitätssicherung der Produkte des ATKIS®-Basis-DLM und in den Objektartenbereich der Tatsächlichen Nutzung des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems (ALKIS-TN) zu integrieren. Sie können die bereits etablierten Datenquellen ablösen oder ergänzen. Dabei ist zu prüfen, für welche Objektklassen und Einsatzszenarien die Daten geeignet sind und inwieweit KI-gestützte Klassifizierungsalgorithmen ausreichend stabil sind, um Veränderungen mit der geforderten Sicherheit zu erkennen. Die hohe zeitliche Verfügbarkeit der Fernerkundungsdaten aus der Demonstratormission stellt einen besonderen Vorteil dar.

Ein weiteres Anwendungsszenario besteht in der wirtschaftlichen Erfassung und Qualitätssicherung von Photovoltaikanlagen auf Freiflächen in einer deutlich höheren Aktualität gegenüber der Erfassung aus TrueDOPs und einer kostenintensiven Vor-Ort-Erfassung der Solarpanels.

Die dritte Anwendungsoption besteht in der Ableitung des neuen Produkts »Landbedeckung«, gemäß dem bundesweit gültigen Anwendungsschema in der Version 1.0.1. In das Verfahren fließen bisher aus dem Bereich Fernerkundungsdaten hauptsächlich die Geobasisdaten der Länder ein – wie das TrueDOP, das Digitale Oberflächenmodell (DOM), das Digitale Geländemodell (DGM) und Satellitendaten aus dem Erdbeobachtungsprogramm Copernicus in Form der Sentinel 2-Daten. Die multispektralen Satellitenbilder der Demonstratormission könnten hier die Sentinel 2-Daten ergänzen beziehungsweise ersetzen.

Im Rahmen der Demonstratormission kann durch Steuerung der Satelliten der Überlappungsgrad variiert werden, um die Ableitung eines DOM mit hoher temporaler Auflösung zu untersuchen.

4.3.4 Umwelt- und Naturgefahrenmonitoring

Abschließend ist die gezielte Nutzung des Satellitensystems im Rahmen der Prognose von Hochwasserereignissen, dem Monitoring von Klimaveränderungen und von Katastrophenereignissen wie Waldbränden zu nennen. Die zeitnahe Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten bei Großereignissen wie Überflutungen ist essenziell zur Koordinierung von Hilfeleistungen. Auch hier können die Satelliten einen wertvollen Beitrag leisten.

5 Ausblick und Schluss

Das Satelliten-Systemdesign der Demonstratormission mit fünf CubeSats richtet sich an den speziellen Nutzeranforderungen aus. Dabei werden insbesondere Herausforderungen für eine präzise Lageregelung und Orbitkontrolle sowie Selbstorganisation im Formationsflug umgesetzt, um die Bedingungen für die photogrammetrische Beobachtung zu optimieren. In der hier skizzierten Demonstrator-Phase soll nur ein Teil Bayerns beobachtet werden. Sie dient als Proof of Concept für den anschließend geplanten Vollausbau nach erfolgreichem Betrieb der Demonstratormission. Des Weiteren wurden die eingesetzten Datensimulationen – in Vorbereitung des Anfang 2025 geplanten Starttermins – sowie die Strategien und Prozesse für die Nachbearbeitung der Bilddaten vorgestellt.

Das Satellitennetzwerk Bayern kann durch den Bau weiterer CubeSats und den Einsatz weiterer Bodenstationen ausgebaut werden – beispielsweise in Kooperationen mit benachbarten Bundesländern sowie den Ländern Österreich und der Schweiz.

Literatur

- Ahrens, B., Böhmer, K.-H. (2010): NTV2-Gitterdateien zur Überführung katasterbezogener Datenbestände ins ETRS89. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 1/2010, 135. Jg., 16–20.
- Farin, G. (1990): Surfaces over Dirichlet tessellations. In: *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 7, Issues 1–4, 281–291.
- Glock, C.E. (2021): Überführung des Liegenschaftskatasters nach ETRS89/UTM mittels des Homogenisierungsansatzes Orta. Dissertation. Technische Universität München. <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1585252>, letzter Zugriff 5/2023.
- Glock, C., Bauer, R., Wunderlich, T., Pail, R., Bletzinger, K.-U. (2019): Das Orta-Verfahren für die Überführung des Liegenschaftskatasters nach ETRS89/UTM in Bayern. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 1/2019, 144. Jg., 25–40. DOI: 10.12902/zfv-0237-2018.
- Greza, M., Hoegner, L., Hirt, P.-R., Roschlaub, R., Stilla, U. (2023): Satellite Network Bavaria – Mission and Data Processing. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF)*, 43. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 22.–23. März 2023 in München, Band 31, 174–182. DOI: 10.24407/KXP:1841079839.
- Hampf, D., Glock, C. (2017): Ein ausgeglichenes Bayern. In: *Mitteilungen des DVW-Bayern*, Heft 2/2017, 69. Jg., 105–126.
- Lenz, N., Greza, M. (2023): Simulation of Earth Observation Data Utilizing a Virtual Satellite Camera. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF)*, 43. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 22.–23. März 2023 in München, Band 31, 50 – 60. DOI: 10.24407/KXP:1841067350.
- Roschlaub, R., Glock, C., Zerndl, M., Maier, A., Möst, K., Hirt, P.-R., Greza, M. (2023): Grundlagen zur automatisierten Ermittlung hochgenauer Passpunkte für CubeSat-Satellitenbilder mittels Deep-Learning-gestützter Delaunay-Triangulationen basierend auf Gebäudedaten des Liegenschaftskatasters. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2023, 148. Jg., 66–93. DOI: 10.12902/zfv-0424-2023.
- Roschlaub, R., Glock, C., Möst, K., Hümmel, F., Li, Q., Auer, S., Kruspe, A., Zhu, X.X. (2022): Implementierung einer KI-Infrastruktur zur automatisierten Erkennung von landesweiten Gebäudeveränderun-

gen aus Luftbildern. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2022, 147. Jg., 181–193. DOI: 10.12902/zfv-0389-2022.

- Schilling, K. (2015): Winzlinge im Orbit. In: *Spektrum der Wissenschaft*, Heft 5/2015, 48–51.
- Schilling, K. (2021): NetSat – Erste Satellitenformation in 3D. In: *Luft und Raumfahrt*, Heft 1/2021, 16–19.
- Schilling, K., Leutert, F. (2023): Formationen für den Erdorbit – Produktionsherausforderungen für Multi-Satellitensysteme aus Kleinsatelliten. In: *Luft- und Raumfahrt*, Heft 2/2023, 3–37.
- Sibson, R. (1980): A vector identity for the Dirichlet tessellation. In: *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol 87, Issue 1, 151–155.
- Sibson R. (1981): A brief description of natural neighbour interpolation. In: Barnett, V. (Ed.): *Interpreting Multivariate Data*. Wiley, New York, USA, 21–36.

Kontakt

Dr.-Ing. Rainer Bauer
Ministerialdirigent a. D.
Portenschlagerweg 19, 85276 Pfaffenhofen a. d. Ilm
bauer@pfaffenhofen.de

Univ.-Prof. Dr. techn. Mag. rer. nat. Roland Pail |
Dr.-Ing. Thomas Gruber | M. Sc. Phillip Zingerle
Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie, School of Engineering and Design, Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München
roland.pail@tum.de | thomas.gruber@tum.de | zingerle@tum.de

Univ.-Prof. i. R. Dr. rer. nat. Klaus Schilling |
Dipl.-Inform. Alexander Kleinschrodt | M. Sc. Lukas Draschka
Zentrum für Telematik GmbH/e. V.
Magdalene-Schoch-Straße 5, 97074 Würzburg
klaus.schilling@telematik-zentrum.de
alexander.kleinschrodt@telematik-zentrum.de
lukas.draschka@telematik-zentrum.de

Univ.-Prof. i. R. Dr.-Ing. Uwe Stilla† | M. Sc. Michel Greza
Professur für Photogrammetrie & Fernerkundung, School of Engineering and Design, Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München
michael.greza@tum.de

Dipl.-Ing. Daniela Schleder | M. Eng. Michael Dotterweich
Bayerisches Staatsministerium der Finanzen und für Heimat
Odeonsplatz 4, 80539 München
daniela.schleder@stmfh.bayern.de
michael.dotterweich@stmfh.bayern.de

Dr.-Ing. Robert Roschlaub
Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
Alexandrastraße 4, 80538 München
robert.roschlaub@ldbv.bayern.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.