

TECHNOLOGIEDEMONSTRATION MIT DEM DLR-KLEINSATELLITEN BIRD

Brieß¹, K., Bärwald¹, W., Gill², E., Kayal¹, H., Lorenz¹, E., Montenbruck², O., Montenegro³, S., Halle¹, W. Schlicker¹, M., Skrbek¹, W., Studemund¹, H., Terzibaschian¹, T.

1 - DLR, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin

2 - DLR, Raumfahrtkontrollzentrum, DLR, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling

3 – Fraunhofer/FIRST, Kekuléstr. 7, 12489 Berlin

1. EINLEITUNG

Am 22. Oktober 2001 startete der DLR-Kleinsatellit BIRD gemeinsam mit dem indischen Hauptsatelliten TES und dem ESA-Satelliten PROBA auf der indischen Rakete PSLV-C3 in einen 572km hohen kreisförmigen Erdorbit. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) demonstriert mit dem Kleinsatelliten BIRD erstmals die Möglichkeit, die Ausdehnung und die auftretenden Flammentemperaturen von Waldbränden vom Weltall aus zu bestimmen. Gegenwärtig gibt es keinen weiteren Satelliten im Weltraum, der speziell für die Erkennung und Untersuchung von Bränden ausgelegt ist. Feuer wird über die Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich erkannt. Da Vegetationsfeuer wie Wald- oder Buschbrände einen immer größer werdenden Einfluss auf die Ökosysteme der Erde und das menschliche Leben nehmen, dieser aber in Folge fehlender globaler Messsysteme bisher nur ungenügend erforscht werden konnte, hat das DLR eine neuartige Infrarot-Sensorik entwickelt, die es erstmals erlaubt, Feuertemperaturen und -flächen aus dem Weltall zu bestimmen.

Unter Führung des Berliner DLR-Instituts für Weltraumsensorik und Planetenerkundung entwickelten und bauten Forscher, Ingenieure, Techniker aus dem Raumflugkontrollzentrum des DLR, des Deutschen Fernerkundungsdaten-zentrums, der SISTEC des DLR und der Technischen Betriebe in Köln und Braunschweig des DLR gemeinsam mit dem Adlershofer Institut FIRST der Fraunhofer Gesellschaft, der Firma Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH, der TU Berlin, und mit der Unterstützung weiterer Adlershofer und Berliner Institute und KMUs, sowie der Firma Jena-Optronik GmbH einen Satelliten modernster Technologie. Erst durch die enge Verzahnung verschiedener Spitzeninstitute und High-Tech-Firmen wurde es möglich, einen leistungsfähigen Wissenschaftssatelliten in der 100kg-Satellitenklasse zu entwickeln und zu bauen.

2. MOTIVATION UND GRUNDANSATZ

Zu Beginn des Raumfahrtzeitalters wurden hauptsächlich Kleinsatelliten ins All geschickt. Dies war in erster Linie auf die begrenzten Startkapazitäten zurückzuführen. Später dann wurden sowohl die Raketen als auch die Satelliten größer. Heute nun befinden sich zahlreiche hochkomplizierte Großmissionen im All. Moderne Technologien ermöglichen es heutzutage, diese großen Missionen

durch Kleinsatellitenmissionen zu ergänzen. Mit Kleinsatelliten können neue Technologien und Methoden erforscht und getestet und auf diese Weise neue Experimente und Technologien für Großmissionen entwickelt werden. Die Vorzüge der Kleinsatelliten liegen auf der Hand, wie z. B.:

- geringe Budgetanforderungen
- kurze Entwicklungs- und Herstellungszeiten
- Vielzahl dedizierter Missionsziele
- kleinere Nutzergemeinschaften
- Implementierung neuer Technologien mit höherem Risiko möglich.

Die Anforderungen an Kleinsatelliten sind hoch gesteckt: sie müssen hohe Leistungsansprüche erfüllen unter anspruchsvollen Randbedingungen wie geringe Masse, geringes Volumen, geringer Leistungsumsatz und kleines Budget. Neben allen anderen Aspekten ist der Kostenaspekt der wichtigste Treiber für Kleinsatellitenmissionen. Üblicherweise entfällt der Hauptanteil an den Gesamtmissionskosten auf das Raumfahrzeug (ohne Nutzersegment). Die Startkosten, ca. 20 – 50 % der Gesamtkosten, rangieren an zweiter Stelle, gefolgt von den Kosten für Bodensegment und Betrieb (bis zu 15 %) [1].

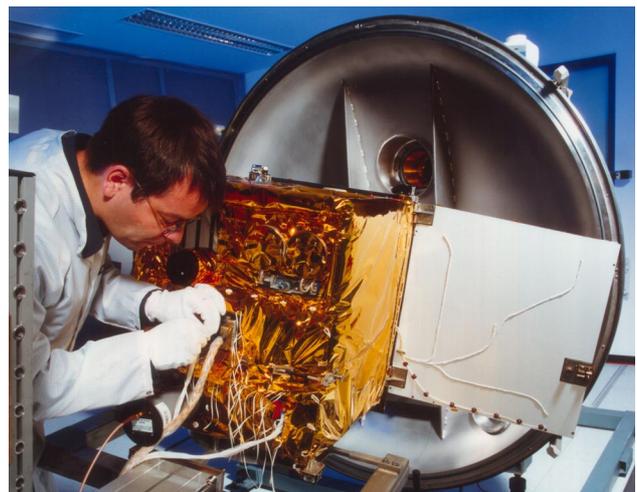


BILD 1. BIRD vor der Weltraumsimulationskammer

Um im Niedrigkostenrahmen zu bleiben und trotzdem den hohen Erwartungen an den Satelliten zu entsprechen, wird dem Einsatz neuer, nicht weltraumqualifizierter Technologien auf Satelliten und hier speziell im Lagerege-

lungssystem größte Bedeutung beigemessen. Die Technologieexperimente von BIRD sollen Vorzüge und Grenzen der neuentwickelten Komponenten, Methoden, Algorithmen und Technologien aufzeigen.

Die neuen Technologien lassen sich in einer Design-to-Cost-Philosophie jedoch nur realisieren, wenn die Bauelementekosten niedrig sind. Um das damit verbundene höhere Risiko zu reduzieren, wurden folgende Maßnahmen getroffen

- Überlastentwurf (und Unterlastbetrieb),
- extensives Redundanzkonzept,
- extensive Modell- und Testphilosophie auf Systemebene (21/2: STM+EM, FM),
- zugeschnittenes Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9000ff., ECSS, DLR-QMS, inkl. Audit- und Alertsystem, protokollierte Fertigung u.a.,
- Risiko-Managementsystem: Risikoanalysen und -bewertungen, z.B. nach MIL-STD-882D u.a.

So wurde z.B. in der EEE-Bauteilerauswahl eine gemischte Strategie festgelegt, die besagt, dass grundsätzlich Industrietypen eingesetzt werden, außer dort, wo Analysen (z.B. FMCA) und Risikobewertungen Schwachpunkte bezüglich der Zuverlässigkeit aufzeigten. So konnten sowohl die Kosten als auch die Risiken für die geplante Entwurfslebensdauer von 1 Jahr im Orbit niedrig gehalten werden.

3. DER BIRD-SATELLITENBUS

Aus den Missionsrandbedingungen bestand die Grundforderung, dass die Missionsziele im Rahmen einer Mikrosatelliten-Mission erreicht werden müssen, d.h. mit einem Satelliten der 100kg-Klasse, der gemeinsam mit einem größeren Satelliten in den Orbit „mitgenommen“ werden kann. Dies stellte hohe Anforderungen an den Satellitenbus, die mit einer Reihe innovativer technologischer Lösungen in einem engen Kostenrahmen erfüllt wurden. Wesentliche Merkmale des BIRD-Satellitenbusses sind:

- Mikrosatellitenstruktur mit hoher mechanischer Stabilität in Kompaktbauweise, die an verschiedene Mitstart-Plattformen anpassbar ist,
- Weltraumqualifikation der Struktur für mehrere unterschiedliche Mitstartmöglichkeiten
- Bus-Nutzlast-Masseverhältnis = 64kg: 30Kg
- Hoher Spitzenleistungsumsatz von 200W für ca. 10 bis 20 min bei einem mittleren Leistungsumsatz von ca. 60W
- Modernes (im wesentlichen) passives Thermalkontrollsystem mit Radiatoren, Wärmrohre, Temperaturfühler und Notheizer
- Neu entwickelter Hochleistungsbordrechner (4fache Ausführung) mit integriertem Latch-up-Schutz und Fehlererkennungs- und -korrektursystem,
- Lageregelung im Zustandsraum mit neu entwickelten Präzisionsdrallrädern und neu entwickelter Sternkamera
- Hochgenaues An-Bord-Navigationssystem auf Basis von GPS-Daten und an Bord Orbitschätzung (10m Genauigkeit nachgewiesen)
- S-Band Kommunikation in hoher (2Mbps) und niedriger Bitrate für Kommando- und Datenübertragung
- Redundantes An-Bord-Datensystem für die Nutzlast mit 1Gbit-Massenspeicher.

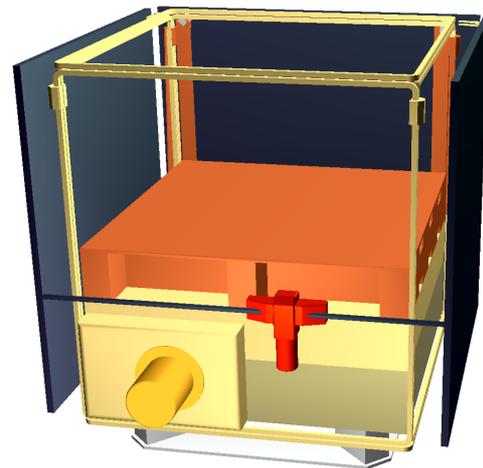


BILD 2. BIRD-Satellitenbus (hier ohne austauschbarer Nutzlastplattform) als Kompaktsatellit in Kubusform

Die konstruktive Lösung ist ein Kompaktsatellit in Kubusform, dessen Grundkörper aus drei Segmenten besteht (BILD 2). Ein Dienstsegment, das satellitentypische Baugruppen, wie Batterien, die Reaktionsräder, Inertiales Messsystem u.a. enthält, ein Elektroniksegment (in BILD 2 rot), das die meisten elektronischen Baugruppen des Satellitenbusses und das Nutzlastdatensystem enthält und ein austauschbare Nutzlastplattform mit der Instrumentierung.

4. TECHNOLOGIEDEMONSTRATION

4.1. Low-Cost Star Sensor

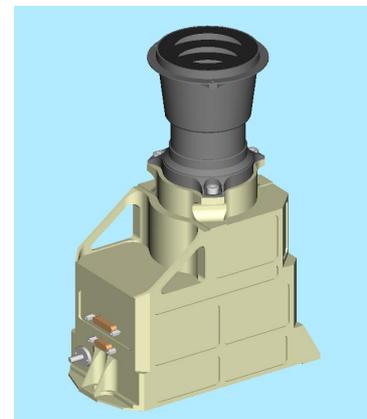


BILD 3. Sternsensor für Mikrosatelliten

Ein autonomer Sternensensor ist für eine hoch-präzise Lageinformation unabdingbar. Für den Einsatz auf Mikrosatelliten kommen nur kleine autonom arbeitende Sternsensoren in Frage, die zu günstigen Preisen verfügbar sind. Die bisher auf dem Markt erhältlichen Sternsensoren sind leistungsfähig, aber zu schwer, zu groß oder/und zu teuer. Um diese Marktnische auszufüllen, wurden die BIRD-Sternsensoren in enger Kooperation zwischen der Fa. Jenaoptronik und dem DLR entwickelt. Nach erfolgreicher Orbiterprobung werden sie durch Jenaoptronik auf dem Weltmarkt angeboten.

Die neu entwickelten Sternsensoren weisen ein robustes kompaktes elektro-optisches Design auf und haben ein Gesamtgewicht von 1,2 kg. Bei den Sensoren wurden eine CCD-Matrix-Kamera mit einem internen Sternenkatalog, sowie einer Bildanalyse-Software zur Sternidentifizierung und -suche kombiniert. Die Sensoren geben ihre Lageinformation in Quaternionen aus. Sie wurden im Kalibrierlabor radiometrisch und geometrisch kalibriert und in Feldexperimenten am Boden getestet, indem sie auf den klaren Nachthimmel gerichtet wurden. Die Robustheit ließ sich bereits durch Bodentests nachweisen, da hierbei die Beeinträchtigung der Sensormessdaten durch Atmosphäre und mechanische Instabilität nicht ausgeschlossen werden konnte. In Ergänzung dazu bestehen einige technologische Ziele der BIRD-Mission darin, die Funktionsweise und Genauigkeit der Sternsensoren unter Weltraumbedingungen zu testen und zu demonstrieren.

Ziele:

- Entwicklung eines neuen preiswerten Sternsensors für Mikrosatelliten
- Technologiedemonstration eines neuen Sternsensors im Weltraum
- Referenzmission für künftige Vermarktung

Aufgaben:

- Leistungsnachweis für den Sternsensor im Weltraum
- Ermittlung der relativen und absoluten Genauigkeit der beiden Sternsensoren auf BIRD
- Erforschung sowohl des zeitlichen Verhaltens der Sternsensoren unter Weltraumbedingungen als auch der Strahlungseinflüsse und der Alterungsprozesse
- Untersuchung des Störeinflusses heller Objekte
- Statistischer Nachweis der Sternidentifikation unter verschiedenen Zielbedingungen (Test der Robustheit der Sternidentifikation)
- Nachweis der Drehratenbegrenzung des Satelliten für eine zuverlässige Lageinformation und Drehratenbestimmung
- Nachweis der verbesserten Genauigkeit durch Kombination zweier Sternsensoren

Ergebnisse:

Erste Tests im Orbit ergaben, dass beide Sternkameras ihre Orientierung vorzeichenrichtig und zuverlässig bestimmen und auch bei Drehraten bis 0.5 °/s eingeloggt bleiben.

4.2. Präzisionsreaktionsrad

Die 3-Achsen-Stabilisierung für Mikrosatelliten kann vorzugsweise durch das den Einsatz von momentum wheels, einen Satz Reaktionsräder, ein Kaltgas-System oder einen Satz Magnetspulen erreicht werden. Die bevorzugte Lösung für die 3-Achsen-Stabilisierung von Mikrosatelliten im LEO mit hohen Anforderungen an die Ausrichtungspräzision und Stabilität besteht in der Implementierung von 3 oder 4 Reaktionsrädern, da hierbei hohe Flexibilität bei geringen Kosten realisiert wird. Zur Entsättigung der Räder müssen Magnetspulen oder ein Gasjet-System ergänzt werden. Für BIRD wurde ein System aus 4 Reaktionsrädern mit 2 x 3 Magnetspulen kombiniert. Gegenwärtig gibt es auf dem Markt keine große Auswahl an verschiedenen Reaktionsrad-Typen für Mikrosatelliten. Deshalb wurde ein neuer Typ eines Hochleistungs-



Ing.-büro
Voss



Astro- und Feinwerktechnik
Adlershof GmbH

BILD 4. Präzisionsreaktionsrad von BIRD

Präzisionsreaktionsrades für Mikrosatelliten entwickelt und mit BIRD im Weltraum erprobt. Die Entwicklung basiert auf einer Drallradentwicklung an der Technischen Universität Berlin (Prof. Renner) und wurde in enger Zusammenarbeit zwischen Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH, der TU Berlin, dem Ingenieurbüro Voss und dem DLR realisiert. Besondere Merkmale sind:

- Masse < 1kg, max. Drehimpuls > 0,3Nm
- Maximales Drehmoment 0.016 Nm
- hohe Steuerungsgenauigkeit mittels intelligenter Steuerungselektronik und zeitgetakteter Regelung im Zustandsraum auch in der Nähe der Drehzahl Null
- geringe Vibrationserzeugung dank des verbesserten mechanischen Designs
- integrierte Elektronik bei kompakter Bauweise.
- Einfache Kommandierung und Rückmeldung interner Zustandsgrößen inklusive Beschleunigungsreserven
- Intelligente interne Kompensation von Zeitverzögerungen der Kommandierung gegenüber einem äußeren Regeltakt bzw. auch gegenüber dem internen Regeltakt von 125 ms
- Einfrieren des Radzustandes bei äußeren Kommunikationsproblemen.

Das Drehmoment, das durch die Reaktionsräder generiert wird, ist durch einen überlagerten Rauschprozess gekennzeichnet. Um den Einfluss des das Drehmomentrauschens auf den Pointing-Fehler zu minimieren, wurde eine Rad-Zustandsrückkopplung mit einem Kalman-Filter in den Steuerprozessor für das Rad implementiert. Die Inputs für die Reaktionsräder sind das Drehmoment bzw. die Umdrehungen pro Minute oder deren Variationen. Dabei meldet das Rad zu jeder Zeit seinen inneren Zustand (geschätzte Drehzahl, Stromaufnahme, Spannung, Beschleunigungsreserven nach oben und unten, Temperatur,...) zurück. Bei BIRD werden alle 4 Räder seriell mit einem zeitlichen Versatz von jeweils 10 ms angesprochen, während sich die kommandierten Drehmomente alle auf den Zeitpunkt Null des aktuellen ACS-Taktes (500 ms) beziehen. Dieser individuelle Zeitversatz ist den Rädern bekannt und wird intern so kompensiert, dass ein Rad im zeitlichen Mittel über 500 ms exakt den gewünschten Drehimpuls oder das kommandierte Drehmoment umsetzt. Damit konnten alle 4 Räder anstatt parallel über einen seriellen Bus angesteuert werden, ohne Genauigkeitseinbußen zu haben.

Die Reaktionsräder wurden für den Weltraum qualifiziert und intensiv, einschließlich Langzeitverhalten, im Labor

und in Testeinrichtungen getestet. Allerdings ist es nicht möglich, die Präzision der Kontrollaktivitäten im Weltraum unter Laborbedingungen nachzuweisen. Hierfür ist die experimentelle Bestimmung der Kontrollaktivitäten im Weltraum notwendig.

Ziele:

- Nachweis der Reduktion des Drehmomentrauschens mittels der internen Feedback-Kontrolle der Reaktionsräder für Mikrosatelliten unter Weltraumbedingungen
- Untersuchung des Reaktionsradverhaltens unter Weltraumbedingungen

Aufgaben:

- Untersuchung des autonomen und asynchronen Radsteuerungsmodus der 4-Rad-Anordnung
- Untersuchung des zeitabhängigen Verhaltens des Reaktionsrad-Systems einschließlich der Alterungseffekte unter Weltraumbedingungen
- Untersuchung des Drehmomentrauschens bei konstanter Radgeschwindigkeit
- Untersuchung des Drehmoments und des Radverhaltens bei Radgeschwindigkeit 0 im Zeitbereich
- Untersuchung von „speed reversal runs“ und „run-downs“ mit Blick auf das Radverhalten im Bereich nahe 0
- Untersuchung des Drehmoments und des Radverhaltens beim Anlaufen („start-up runs“)

Ergebnisse:

Bereits am Boden zeigte sich, dass Drehmomente mit einem mittleren Fehler von 10^{-7} Nm und einer Streuung von < 0.0016 Nm umgesetzt werden. Damit liegen zu erwartende Pointing-Fehler für BIRD im Bereich von < 22 Bogensekunden. Die präzise interne Steuerung ermöglicht, dass die Fehler nahezu unabhängig von der Dreh-

zahl und dem kommandierten Drehmoment sind, wenn man innerhalb der vom Rad selbst online bestimmten Beschleunigungsreserven bleibt, was auch im Orbit bisher immer ausreichend war. Bis heute arbeiteten alle 4 Räder von der ersten Sekunde an einwandfrei.

4.3. Autonome Lageregelung

Die moderne Erderkundung mit optischen Instrumenten erfordert, dass der Mikrosatellit über eine 3-Achsen-Stabilisierung mit hoher Ausrichtungsstabilität und -genauigkeit, über geringes Jitter sowie ein präzises Orbitbestimmungssystem verfügt. Das Lageregelungssystem (ACS) ist üblicherweise das in jeder Hinsicht aufwendigste Subsystem eines 3-Achsen-stabilisierten Satelliten. Es beinhaltet ein System von Lagesensoren (unterschiedliche Sensorprinzipien möglich), ein komplexes Modell der Satellitenumgebung und der Umgebungseinflüsse, ein Regelungssystem und ein System von (zumeist nichtlinearen) Aktuatoren, das durch ein Feedback- und Kontrollsystem gesteuert bzw. geregelt wird. Darüber hinaus erfordert das Lageregelungssystem, gemessen an den übrigen Subsystemen des Satelliten, üblicherweise auch den aufwendigsten Bodensupport. Damit die hohen Anforderungen an die Lageregelung – erforderliche Lagemanöver eingeschlossen – erfüllt werden können, bedarf es eines sehr komplexen Gesamtsystems. Wird das Lageregelungssystem an Bord des Satelliten mit möglichst autonomen Regelungsalgorithmen unter Einbeziehung der Schätz- und der Entscheidungstheorie betrieben und in einem entsprechendem modernen Softwaresystem implementiert, erhöht dies die Autonomie des Satelliten und senkt die Kosten am Boden. Letztendlich ist damit eine Gesamtkostenreduzierung der Satelliten-Lageregelung realisierbar.

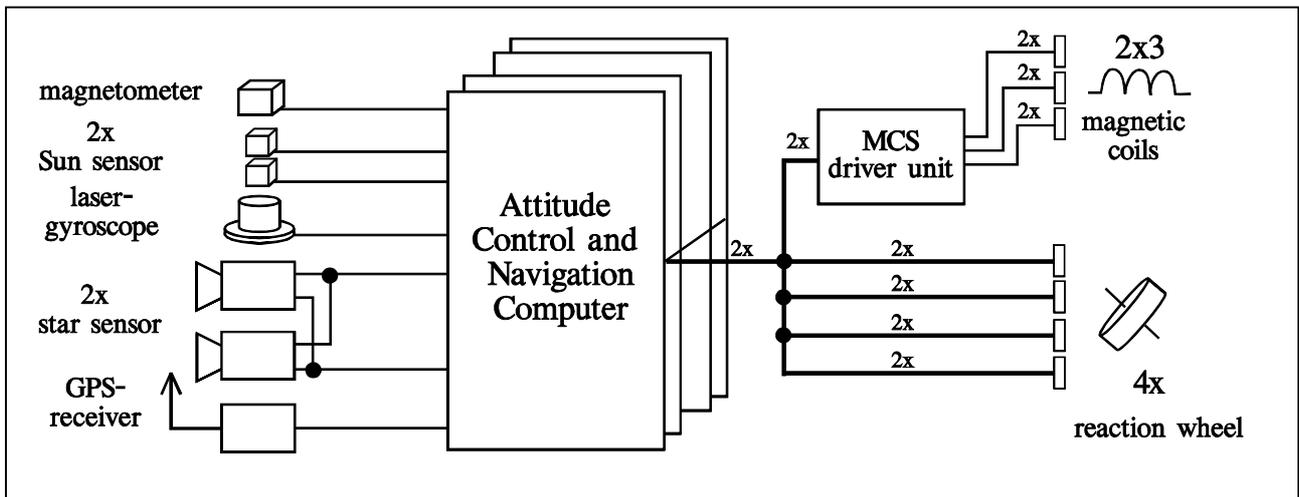


BILD 5. Schema der Komponenten des Lageregelungssystems

Die in BIRD umgesetzte Lageregelung basiert auf dem Regelungskonzept im Zustandsraum (im Unterschied zur klassischen Regelungstheorie). Die Sensorsignale werden durch spezielle Schätzer und Prediktoren bewertet, bevor sie in die Regelung eingehen. Auf dieser Ebene

wird auch eine umfangreiche "Low Level" Konsistenzprüfung sämtlicher Daten umgesetzt, um bei Ausfällen oder "Merkmäßigkeiten" die Regelung auf redundante Mechanismen zu rekonfigurieren. Neben einfachen Prüfsummen Checks geschieht das überwiegend durch Vergleich der

vorhergesagten Werte mit den tatsächlich gemessenen. Die ACS Konfiguration erfolgt autonom durch Bitvektoren, die z.B. über physisches Power ON /OFF, logisches Power ON/OFF, Health status und "In use" steuern, welche Hardware und welche Softwaremodule momentan in die Regelung einfließen.

Die Nichtlinearität der Satellitendynamik wird durch das Regelungskonzept im Zustandsraum beherrscht. Das innovative Lageregelungssystem soll in der vollen Ausbaustufe ermöglichen, dass der Satellit nach Eingabe der Zielgebiete bzw. -zeiten die notwendigen Manöver autonom durchführt. Softwaretechnisch realisiert wird die Lageregelung durch DLR-SISTEC Braunschweig mit einer UML-basierten objektorientierten Lösung. Das Konfigurationsmanagement an Bord wurde über sogenannte "Zustandsmaschinen" in den Softwaredesign abgebildet. Die gesamte "Mathematik" zur Steuerung des Satelliten wurde softwaretechnisch von den benutzten Aktuatoren /Sensoren so abgekoppelt, dass zwischen der Regelung und den „Devices“ nur Vektoren bzw. Quaternionen ausgetauscht werden. Die Umsetzung erfolgt in einer "Low level" Schicht in einer Art "Treiber - Ebene". Das war die Voraussetzung für das autonome Ausgleichen von Ausfällen an Bord und macht die Software oberhalb der Treiber "wiederverwendungsfähig" und offen für neue Sensoren/ Aktuatoren.

Damit wurden in der Entwicklung, Testung und Implementierung von Flugsoftware ein sehr fortschrittlicher und innovativer Ansatz gewählt. Mit BIRD wird dieses autonome und innovative Konzept als Teil der Technologieerprobung im Weltraum demonstriert.

- Das BIRD-Lageregelungssystem besteht aus Sensoren und Aktuatoren unterschiedlichen Leistungsvermögens und dem Regelungsteil, sowie der Gesamtsteuerung durch den Satellitenbus-Computer (siehe BILD 5):
- Kombination zweier Sternsensoren für Mikrosatelliten (Neuentwicklung) mit unterschiedlichen Sichtlinien zur präzisen Lagemessung in allen Richtungen
- 3-achsiges Lasergyroskop (Zulieferteil)
- 3-Achsen-Magnetometer (Zulieferteil)
- 4 hochpräzise Reaktionsräder für Mikrosatelliten in Tetraeder-Anordnung (Neuentwicklung)
- Magnetspulensystem (2x3) zur Entsättigung der Räder (Neuentwicklung)
- GPS-Empfänger (Zulieferteil)
- Kombination der Lageregelung mit einem An-Bord-Navigationssystem (Software, Neuentwicklung)
- ACS-Bordcomputer (Neuentwicklung)
- Embedded Software-Systemlösung zur Steuerung/Regelung im Echtzeitbetriebssystem
- hoch-autonom arbeitendes Lageregelungssystem, das auf Lageschätzungen, -vorhersage und -kontrolle im Zustandsraums basiert.

Die oben genannten Neuentwicklungen sollen im Welt- raum hinsichtlich ihrer typischen Leistungsparameter und -grenzen sowie ihres Verhaltens in einer komplexen Um- gebung getestet werden. Diese Untersuchungen sind Teil der Demonstration neuer Weltraumtechnologien.

Das Redundanzkonzept schließt die Fälle kalter, heißer und funktioneller Redundanz der Komponenten ein. In Abhängigkeit vom Fehlererkennungssystem können direkt an Bord des Satelliten autonome Entscheidungen bezüg-

lich der zu nutzenden Sensor-Aktuator-Kombination und des notwendigen Lagemodus getroffen und – gegebenenfalls durch die Bodenstation bestätigt – umgesetzt werden.

Neben dem Redundanzkonzept ist jedoch auch die Lage- regelung von BIRD sowohl durch Bodenkommandos als auch autonom durch den Satelliten steuerbar:

- Steuerung aller Aktuator-Aktivitäten zur Lageregelung (nach Auswertung der Sensorsignale) mittels zeitge- steuerter „low-level“-Kommando-Sequenzen and - prozeduren einschließlich der vom Boden gesteuerten Ausführung von Kommandoprozeduren für Lage-Modi Set-ups und Lage-Modi-Übergänge,
- An-Bord-Bestimmung (Schätzung und Vorhersage) der Lagesensorsignale und autonome Ausführung al- ler Aktuatoraktivitäten zur Lageregelung für die bo- denbetriebenen zeitgesteuerten oder ereignisgesteu- erten Lageregelungsmodi
- Untersuchung und Demonstration der autonomen Lageregelungsprozedur des BIRD-Satellitenbusses unter tatsächlichen Weltraumbedingungen mit Blick auf Anwendbarkeit für zukünftige Raumfahrzeuge.

Ziele:

- Weltraumdemonstration neuer BIRD-Technologien bezüglich Mikrosatelliten-Autonomie
- Weltraumdemonstration der autonomen Redundanz- steuerung für Lageregelungssysteme von Mikrosatelli- ten
- Weltraumdemonstration der Kombination von Lagere- gelungssystem mit An-Bord-Navigationssystem

Aufgaben:

- Implementierung und Test der Lagemodi des Satelli- ten (Earth pointing mode, Sun-pointing mode u. a.) mittels „high-level-mode“ oder „high-level -transition“ - Kommandos
- Implementierung und Test der entsprechenden Re- dundanzstruktur, der autonomen Fehlersuche und re- covery
- Bestimmung von Zustandsvektor und Lage des Satelli- ten über einen Kalmanfilter
- Vorhersage von Zustandsvektor und Lage
- Test der Beständigkeit der Lageregelungsalgorithmen bei verschiedenen Störungen (externe Störungen, in- terne Rauschquellen, Störungen in den Sensorsigna- len, Totalausfall von Sensoren, Dynamik des Satelliten u. a.)
- Untersuchung der relativen und absoluten Genauigkeit der Lageregelung und der Lagemessungen
- Untersuchung des zeit-varianten Verhaltens des Lage- regelungssystems unter Weltraumbedingungen
- Untersuchung der Autonomie des Satelliten im Zu- sammenspiel von Lageregelungssystem und An-Bord- Navigationssystem

Ergebnisse:

Die Erst - Akquisition aus einer Anfangsdrehung mit etwa 5 °/s bis zum stabilen Sun Pointing verlief perfekt, die mittlere Bremsbeschleunigung betrug exakt 0.1 °/s². Auch der Abbau des Drehimpulses durch das Magnetspulen- system funktioniert hervorragend - mit aktiviertem Entsät- tigungssystem gibt es im Satelliten praktisch keinen Dreh- impuls mehr. Die verbleibende Jitterbewegung liegt im

Bereich von < 6 Bogenminuten / Sekunde. Kommandierte Drehungen werden sehr präzise ausgeführt. Das autonome Konfigurieren des ACS wurde sowohl experimentell, als auch durch gelegentliche Sonnenaktivitäten unfreiwillig mehrfach getestet und erwies sich als sehr zuverlässig. Auch bei einem zeitweiligen Ausfall des Kreiselsystems blieb der Satellit in einem akzeptablen Sun-pointing, obwohl die Satellitendrehrate dann nur noch aus Sonnensensor und Magnetometer abgeleitet werden konnte.

4.4. Hochleistungsbordrechner



BILD 6. BIRD-Bordcomputer von Fraunhofer FIRST

Der Satellitenbuscomputer steuert alle Aktivitäten des Satellitenbusses. Es empfängt, speichert und verarbeitet die Kommandos, sammelt und bewertet die Housekeeping-Daten aller Subsysteme und teilweise der Nutzlast und steuert die Telemetrie- und wissenschaftliche Datenformatierung und deren Übertragung an Bord des Satelliten. Der Bordrechner fungiert darüber hinaus als Lageregelungscomputer des BIRD-Satelliten, da in ihn die komplette Hard- und Software des Lageregelungssystems eingebettet wurde. Als primär lassen sich die folgenden Anforderungen an den Bordcomputer von BIRD ableiten:

- Handling zahlreicher verschiedener elektrischer und Datenschnittstellen
- Steuerung verschiedener Softwareaufgaben und – Algorithmen
- Steuerung der zeitabhängigen Aktivitäten und Software-Schleifen
- Hohe Verarbeitungsleistung (nahezu Realzeit)
- Verarbeitung hoher und niedriger Datenbitraten
- Überwachung aller Satelliten- und Bordcomputer-Aktivitäten
- Fehlertoleranz
- ausgezeichnete Robustheit aller Überwachungs- und Steuerungsvorgänge.

Der Bordrechner ist ein Computersystem, dessen außerordentliche Komplexität aus der Vielzahl der Schnittstellen zu allen seinen Subsystemen, Komponenten und Software-Modulen resultiert. Allerdings ist hohe Komplexität nicht notwendigerweise Ausdruck für hohe Zuverlässigkeit. Ein Bordrechner muss jedoch sehr zuverlässig, robust und fehlertolerant arbeiten. Zur Entschärfung dieses Widerspruchs wurden zwei Maßnahmen getroffen:

- Implementierung einer hochredundanten Struktur in Form eines 4fachen Bordrechner-Knotens mit Fehlererkennungs- und -korrektursystem
- Implementierung eines Latch-up-Schutzes und redundanter Verarbeitungs- und Speicherstrukturen.

Die neuen Hardware-Technologien des von Fraunhofer

FIRST entwickelten Satellitenbuscomputers werden mit BIRD bezüglich ihres Verhaltens unter Weltraumbedingungen getestet.

Ziele:

- Weltraumdemonstration der neuen Hochleistungsprozessor-Technologien
- Weltraumdemonstration der integrierten Fehlererkennungs- und Fehlerkorrekturtechnologien
- Beispielmision für zukünftige Marktaktivitäten mit Blick auf den Satellitenbuscomputer

Aufgaben:

- Untersuchung der Rechnerleistung während des Flugs
- Untersuchung des zeitabhängigen Verhaltens der Latch-up-Schutzmechanismen (latch-up protection circuits)
- Setzen, Testen und Evaluieren der Schwellenwerte für Latch-up-Erkennung und –Schutz
- Untersuchung der Quellen und Ursachen für Bordrechner-Neustarts (Software-Wächter, Latch-up-Prozedur, Kommando-Decoder-Überwachung)
- Nachweis der Robustheit und Zuverlässigkeit des 2x2-Redundanzkonzepts (2 x 2 = heiß und kalt) unter Weltraumbedingungen

Ergebnisse:

Die Bordcomputer arbeiten von Beginn an ohne Probleme. Das implementierte unix-basierte Betriebssystem arbeitet zuverlässig. Einige Bursts von hochenergetischer Strahlung und extrem hohe Teilchendichten führten zu einem Umschalten der Redundanzstruktur oder ein Schalten in den Safemode. Dabei wurde die volle Funktionsfähigkeit der implementierten Redundanzstruktur nachgewiesen. Die auf der Rechnerkarte vorgesehenen Latch-up-Schutzschaltungen funktionierten ebenfalls ohne Probleme.

4.5. An-Bord-Navigationssystem

Das An-Bord-Navigationssystem (ONS) von BIRD gestattet als Teil des Lageregelungssystems (ACS) die Demonstration der autonomen Navigation für passive Satelliten. Ein ausgeklügeltes, auf einem preisgünstigen GPS-Empfänger basierendes, Orbitbestimmungs- und Orbitvorhersagesystem stellt sicher, dass an Bord des Satelliten exakte Positions- und Geschwindigkeitsangaben verfügbar sind, selbst, wenn keine aktuellen GPS-Daten vorliegen. Damit können dem Lageregelungssystem die Daten zur Verfügung gestellt werden, die für die Aufnahmen und den Datentransfer zur Erde benötigt werden. Zum Beispiel liefert das ONS dem ACS aus Position und Zeit abgeleitete Informationen wie Quaternionen zur Orientierung des WGS 84 Systems und des lokalen "Nadir - Systems" im benutzten Inertialsystem und aus Redundanzgründen den Sonnenvektor sowie den nominellen Magnetfeldvektor im Inertialsystem, der an Bord aus einem Magnetfeldmodell 6. Ordnung abgeleitet wird. Damit können unter Einbeziehung der Sternkameras Ausfälle der entsprechenden Sensorsysteme kompensiert werden.

Des Weiteren werden die exakten Positionsangaben für die Markierung der BIRD-Bilddaten, die bereits an Bord sind, genutzt. Dies beschleunigt einerseits in besonderem Maße den Prozess der Bilddatenprozessierung am Boden. Andererseits werden mit diesem Technologieexperi-

ment die Grundlagen für eine mögliche Geokodierung von an Bord erzeugten Bilddatenprodukten, wie sie z.B. mit dem Neuronalen Netzwerk-Experiment entstehen, geschaffen und demonstriert.

Das ONS unterstützt darüber hinaus die GPS-basierte präzise Zeitsynchronisation der Borduhr. Die hochentwickelte Uhr ermöglicht eine präzise Zeitmessung – auch über längere Zeitintervalle - an Bord. Damit sind weniger Synchronisations-Kommandos von der Erde erforderlich, was sich günstig auf den Satellitenbetrieb auswirkt.

Nicht zuletzt ist das System in der Lage, aus den GPS-Daten die mittleren Orbitalelemente in Form der standardisierten twoline elements zu ermitteln, die normalerweise für den Austausch von Orbitdaten angewandt werden. Die twoline elements werden zu diesem Zweck zur Bodenstation übermittelt, wo die Bodenstationskontakte mittels kommerzieller Off-the-shelf-Tools berechnet werden. Dieses Konzept demonstriert das Neuartige bei der kombinierten Boden-Raum-Autonomie, womit sich auch die Zulieferung der Orbitdaten aus dem Kontrollzentrum erübrigt. Des Weiteren werden die Schattenübergangszeiten und Bodenstationskontakte autonom an Bord des Satelliten berechnet. Dies widerspiegelt ebenfalls das gewachsene Autonomiepotential für den Satellitenbetrieb und die Anwendbarkeit auf ein breites Spektrum zukünftiger Missionen.

Ziele:

- Entwicklung eines GPS-basierten Navigationssystems
- Demonstration eines neuartigen Konzepts für kombinierte Boden-Raum-Autonomie
- Erstmalige Demonstration der Geokodierung von Daten an Bord eines Satelliten in Echtzeit

Aufgaben:

- Entwicklung eines Echtzeit-Orbitbestimmungssystems aus GPS-Daten
- Implementierung einer weiter entwickelten numerischen Integrations- und Interpolationsmethode
- Ermittlung des Zustandsvektors des Satelliten mit Hilfe eines Kalman-Filters
- Implementierung eines exakten dynamischen Modells für die Orbitflugbewegung
- Vorhersage des Satellitenstatus trotz Nichtvorhandenseins von GPS-Daten
- Versorgung des Lageregelungssystems mit Quaternionen für den Earth-Pointing-Mode
- Bereitstellung exakter Positionsdaten für die An-Bord-Geokodierung von Bilddaten
- Unterstützung der GPS-basierten Taktsynchronisation
- Unterstützung des Lageregelungssystems mit Hilfsdaten (Magnetfeld, heliozentrische Erdtrajektorie)
- Berechnung von Schattenübergängen und Stationskontakten zur Umsetzung der gewachsenen Satellitenautonomie

Ergebnisse:

Breits wenige Tage nach der Start des Satelliten konnte das ONS als Technologie-Experiment in Betrieb genommen werden. Die Inbetriebnahme verlief ohne Probleme und innerhalb kurzer Zeit konnte die aktuelle Orbitposition an Bord des Satelliten mit einer Genauigkeit von 10m in allen 3 Achsen bestimmt werden. Der Nachweis erfolgte

durch einen Vergleich mit den Orbitpositionen, die im GSOC auf Grund einer unabhängigen Orbitbestimmung und hochgenauen Orbitmodellierung ermittelten wurden. Die jetzt erreichte Genauigkeit beträgt 5m in allen Achsen. Das Technologieexperiment konnte abgeschlossen werden und das ONS in den sogenannten Routine-Betrieb überführt werden. BIRD demonstriert die hochgenaue An-Bord-Orbitbestimmung und die An-Bord-Generierung der twoline elements in höchster Genauigkeit.

4.6. An-Bord-Klassifikationsexperiment

Ein Trend in der Fernerkundung geht in Richtung größerer Anzahl von Spektralbändern und zur verbesserten geometrischen Auflösung der Bildsensoren, was zu immer höheren Datenraten und –volumina führt. Die Datenspeicherung an Bord und der Transfer riesiger Datenmengen in kürzester Zeit ist sehr aufwendig im Hinblick auf Energie, Masse, Volumen und Kosten. Ähnlich hoher Aufwand ist notwendig, die Daten am Boden zu empfangen, systematisch zu verarbeiten (Vorverarbeitung), zu archivieren und wiederzufinden. Der Nutzer wird die Daten verarbeiten, sie so weit wie nötig kalibrieren, bestimmte Bestandteile extrahieren und/oder transformieren und letztendlich den Informationsgehalt nach bestimmten Merkmalen seines Interesses klassifizieren. Die damit verbundenen Prozesse benötigen eine gewisse Zeit, so dass die hochwertigen Datenprodukte mit einer Verzögerung von Tagen bis Wochen zur Verfügung stehen

Für eine Reihe von Fernerkundungsaufgaben wie z. B. die Katastrophenwarnung und -überwachung oder die Umweltbeobachtung sind eine schnelle Klassifizierung und kurze Reaktionszeiten gefordert. Können die erforderlichen Informationen bereits durch die gezielte Beobachtung einiger weniger Fernerkundungsparameter (Umweltverschmutzungsparameter, change detection parameter u. a.) gewonnen werden, dann könnten solche Aufgaben durch Implementierung einer hochentwickelten Datenverarbeitungskette bereits an Bord des Satelliten gelöst werden. Neuste Verarbeitungstechnologien und -algorithmen erlauben es, die Prozesse Datenvorverarbeitung, Kalibrierung, Korrektur, Merkmalsextraktion und Klassifizierung an Bord des Satelliten durchzuführen. Sind die Probleme der Georeferenzierung oder Geokodierung an Bord des Satelliten gelöst, könnten sogar hochwertige Datenprodukte direkt zum Endnutzer gesandt werden. Darüber hinaus können die Kosten für die Datenspeicherung und -übertragung wesentlich gesenkt werden, da die Datenmengen und Datenübermittlungsraten in großem Umfang reduziert würden. Aus diesem Grund wird an Bord von BIRD die autonome thematische Datenverarbeitung mittels eines künstlichen Neuronalen Netzwerkexperiments im Detail untersucht und demonstriert.

Eine komplette Vorverarbeitungskette ist in den Satelliten implementiert und wird die Daten für die Merkmalsextraktion und –klassifizierung vorverarbeiten. Um den Einfluss saisonaler atmosphärischer und Lichtänderungen auf die Klassifikationsergebnisse zu reduzieren, wurde ein adaptives, d. h. lernendes System an Bord des Satelliten installiert. Die thematische Datenverarbeitung an Bord des BIRD-Satelliten wird über eine multispektral überwachte Klassifikation realisiert. Hierfür wurde eine spezielle Hardware auf der Basis des neuronalen Netzwerkprozessors NI1000 entwickelt. Dieses neuronale Netzwerk an Bord ist insoweit lernfähig, dass es neue Trainingsvektoren

ren zur Unterscheidung gewünschter Klassen per Software-Transfer aufnehmen kann. Durch die Nutzung eines neuronalen Netzwerks werden hohe Datenraten für den Klassifikationsprozess ermöglicht. Vor Merkmalsextraktion und Klassifikationsprozess an Bord muss eine Datenvorverarbeitung stattfinden wie z. B. Koregistrierung der Multisensordaten und Datennormalisierung.

Dieses Experiment kann in Zukunft noch erweitert werden. Verbindet man die Positionsdaten des neu entwickelten An-Bord-Navigationssystems mit den Lage- und Höhenmodellen und implementiert man außerdem noch an Bord ein globales Erdhöhenmodell könnte in einer nächsten Ausbaustufe der An-Bord-Klassifikator anspruchsvolle Datenverarbeitungsaufgaben bis zum Datenprodukt level 3 direkt an Bord lösen.

Ziele

- Entwicklung eines An-Bord-Klassifikationsexperiments, das auf dem neuronalen Netzwerk basiert
- Entwicklung einer An-Bord-Datenverarbeitung für geometrischen und radiometrischen Bilddatenkorrektur für Pixel-Koregistrierung und Signalnormierung
- Demonstration eines neuartigen Konzepts zur thematischen An-Bord-Datenverarbeitung
- Untersuchung von Kosten, Qualität und Grenzen der An-Bord-Klassifizierung mittels eines neuronalen Netzwerkchips

Aufgaben

- Entwicklung, Implementierung und Test von Co-Alignment-Konzepten und Pixel-Koregistrierungsalgorithmen zwischen unterschiedlichen Sensoren
- geometrische An-Bord-Korrektur der systematischen Alignment-Fehler
- Entwicklung, Implementierung und Test eines Synchronisationskonzepts für die Datenaufzeichnung über verschiedene Sensoren
- Radiometrischen und geometrischen An-Bord-Korrektur der Sensorsignale
- Datenaufnahme und Speicherung der multispektralen Rohbilddaten
- Geometrische und radiometrische Korrektur und Pixel-Koregistrierung der Bilddaten an Bord
- Off-Line-Klassifizierung und Speicherung der Klassifizierungsergebnisse
- Übermittlung der Rohdaten und der hochwertigen Datenprodukte zur Erde
- Lernen des Klassifikators
- Vergleich der „ground truth“ und Bewertung der Klassifizierungsergebnisse

Optionale Aufgaben:

- Bewertung der sensor line-of-sight im Orbit
- Korrektur der Erdgeoidform und der lokalen Höhen sowie Bewertung des Sub-Nadir-Punkts
- An-Bord-Georeferenzierung der thematisch verarbeiteten Daten

Ergebnisse:

Am 14.6.02 wurde erstmalig an Bord von BIRD eine Szene mit Hilfe des künstlichen Neuronalen Netzwerk-Klassifikators klassifiziert. Es wurden die Klassen Wasser, warme Wolken, kalte Wolken, Feuer und Land bzw. nicht klassifizierbar gebildet. Der Klassifikator wurde an den

Merkmale der Australienszene mit den Buschfeuern vom 04.01.2002 angelernt bzw. trainiert. In weiteren Experimenten konnte die Funktionsweise des Neuronalen Netzwerk-Klassifikators untersucht und demonstriert werden.

4.7. Experimentelle Bodenstation

Im Rahmen des Kleinsatellitenprojektes BIRD wird eine Experimentelle Bodenstation entwickelt. Die Grundphilosophie hierfür basiert auf dem Anliegen, dem Nutzer regional begrenzte Daten zu überlassen, für deren Gewinnung nicht unbedingt eine hochleistungsfähige Bodenstation erforderlich ist, können doch die zu empfangenden Datenvolumina reduziert werden. Es soll demonstriert werden, dass einem lokalen oder regionalen Nutzer Satellitendaten ohne Zeitverzug durch Direktempfang und sofortiger Verarbeitung zur Verfügung gestellt werden können. Der experimentelle Charakter der Bodenstation besteht darin, die Möglichkeiten und Grenzen einer solchen Niedrigkosten-Bodenstation auszuloten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt besteht in der Demonstration der Systemkompetenz des DLR in Bezug auf alle 4 Segmente einer Mikrosatelliten-Mission (Programmsegment, Raumsegment, Startsegment und Bodensegment). Mit der Bodenstation soll demonstriert werden, dass das DLR auch im Bodensegment eine zugeschnittene Mikrosatelliten-Systemlösung anbieten kann.



BILD 7. Antenne der experimentellen Bodenstation

Die Antenne solch einer Station (Bild 7) ist eher klein, was den Kosteneinsparungseffekt bedingt. Der Aspekt der geringen Kosten des Systems führt zu einem Design, das auf der extensiven Nutzung existierender kommerzieller Hard- und Software aufbaut. Ein gewöhnlicher PC mit

einem Pentium CPU wird für Datenempfang und Datenverarbeitung ebenso genutzt wie für eine mögliche experimentelle Kommandierung. Damit die Bodenstation kompakt und leicht transportierbar bleibt, wurden die meisten Hardwarekomponenten in den PC eingebaut.



BILD 8. Empfang und interaktive Steuerung des DLR-TUBSAT mit der experimentellen Bodenstation

Die Software der Bodenstation dient sowohl dem Empfang, der Verarbeitung und dem Transfer der Satelliten und der Nutzlastdaten. Sie soll außerdem Anzeige-, Analyse- und Speichermöglichkeiten der Nutzlast- als auch der Housekeeping-Daten bieten. Die Housekeeping-Daten können online dargestellt werden. Dadurch kann entweder das „Wohlergehen“ des Satelliten in Realzeit überwacht werden (Bild 8) oder die bereits erfassten Daten können gespeichert werden, um sie während der kontaktfreien Zeiten des Satelliten zu analysieren. Beim Auftreten von Anomalien können die Alarmmeldungen per Pager, SMS, E-mail oder Fax weitergeleitet werden. Darüber hinaus ist es möglich, twoline elements automatisch, direkt vom BIRD-Satelliten aus zu aktualisieren. Die Nutzlastdaten können mit einer separaten Software verarbeitet werden, die vom DLR entwickelte Algorithmen nutzt. Eine besonders anspruchsvolle Leistung stellt die Implementierung der Algorithmen zur Feuerdetektion dar. Außerdem soll die Telekommando-Software es ermöglichen, auch Daten, z. B. zur Anpassung der An-Bord-Software für die Klassifikationsalgorithmen, zum Satelliten zu senden.

Ziele

- Untersuchung und Demonstration des direkten Satellitendatenempfangs durch den Nutzer mit Hilfe einer „Niedrigkosten“-Bodenstation
- Analyse der Autonomie-Aktivitäten des Satelliten einschließlich der hochentwickelten Bildverarbeitung und Erzeugung von Alarmmeldungen, wie z. B. Feuerdetektions-Algorithmen
- Experimenteller Test des Missionsbetriebs (Kommandierung)

Aufgaben

- Direkter Empfang von wissenschaftlichen und Satellitentelemetrie-Daten
- Darstellung der Satellitentelemetrie
- Autonome Erzeugung und Weiterleitung der Alarmmeldungen im Falle von Satelliten-Anomalien

- Autonome Aktualisierung und Nutzung der twoline elements direkt vom Satelliten
- Demonstration der Kommandierungsfähigkeit
- Autonome Verarbeitung der wissenschaftlichen Daten bis zur Alarmgenerierung im Falle des Aufspürens von Brandherden
- Erzeugung von thematischen Datenprodukten nahezu online

Ergebnisse:

Die Bodenstation empfängt und verarbeitet BIRD-Daten. Die Housekeeping-Daten sind während des Empfangs online sichtbar. Die empfangenen Nutzlastdaten (Bilddaten) können nahezu on-line dekommutiert, vorverarbeitet und zu einer quick-look-Anzeige gebracht werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

BIRD ist eine Mikrosatellitenmission mit wissenschaftlichen und technologischen Zielen. Mit der erfolgreichen Erprobung und Demonstration von neuen Kleinsatelliten-technologien als Bestandteil des Satellitenbusses wird ein fortgeschrittenes Kompaktsatellitenkonzept im Orbit erprobt, das hohen Ansprüchen wissenschaftlicher Nutzlasten gerecht wird. Darüber hinaus werden mit der Demonstration eines an-Bord-Navigationssystems zur Bestimmung und Prediktion der Orbitposition mit höchster Genauigkeit und mit der Demonstration der an-Bord-Datenverarbeitung bis hin zur Generierung von thematischen Datenprodukten an Bord durch einen lernenden Klassifikator völlig neue Systemlösungen für operationelle Fragestellungen der Fernerkundung vorbereitet und im Weltraum erprobt.

Mit der auf Mikrosatellitenmissionen zugeschnittenen experimentellen Bodenstation demonstriert das DLR seine Systemkompetenz auch im Bodensegment. Im Programmsegment und im Startsegment sind ebenfalls typische, zugeschnittene Lösungen für wissenschaftliche Mikrosatellitenmissionen entwickelt worden. Mit BIRD wird demonstriert, dass Heute mit dem vergleichsweise geringen Aufwand einer Mikrosatellitenmission bestimmte Fragen der Fernerkundung der Erde oder auch von Planeten untersucht und geklärt werden können. Der BIRD-Satellitenbus stellt auf Grund seines innovativen Konzeptes eine interessante Plattform für wissenschaftliche Missionen dar.

6. LITERATUR

- [1] Martinez de Aragon, A., Mura, F., Dionisio, C., Howes, S., Slim, R., Erickson, P. D. (1998) Future Satellite Services, Concepts and Technologies, ESA Bulletin - Future Satellite Services