

V3C: KONTROLLZENTRUM AUF EINEM LAPTOP

S. A. Gärtner*, A. Ohndorf*

* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Raumfahrtkontrollzentrum GSOC, Münchener Straße 20, 82234 Weßling, Deutschland

Zusammenfassung

Im Rahmen von „Responsive Space“ wird das Missionsbetriebssystem V3C (Verlegefähiges Compact Control Center) entwickelt. V3C ist auf handelsüblicher mobiler Hardware integriert, wird autark betrieben und kann schnell an verschiedene Orte verlegt werden. Wir zeigen Design, Implementierung und Bereitstellung von V3C, berichten über den erfolgreichen Demonstrationsbetrieb des BORIS-Satelliten und beleuchten verschiedene Betriebskonzepte, insbesondere die Koppelung mit einem GEO-Relais-Link.

Keywords

Responsive Space; Missionsbetrieb

ABKÜRZUNGEN

CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
CI/CD	Continuous Integration/Continuous Deployment
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FDS	Flight Dynamics System
FTP	File Transfer Protocol
GDS	Ground Data System
GECCOS	GSOC Enhanced Command and Control System for Operating Spacecraft
GEO	Geostationärer Orbit
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSOC	German Space Operations Center
LEO	Low Earth Orbit
LEOP	Launch and Early Orbit Phase
MCS	Monitoring and Control System
MPS	Mission Planning System
NCTRS	Network Control and TM/TC Router System
NTP	Network Time Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
ProToS	Procedure Tool Suite
SLE	Space Link Extension
SOTM	Satcom on the Move
SSB	SLE Switch Board
TC	Telecommand
TLE	Two-Line Elements
TM	Telemetry
V3C	Verlegefähiges Compact Control Center
VM	Virtual Machine
VSAT	Very Small Aperture Terminal

1. EINFÜHRUNG

Im Zuge des Aufbaus einer nationalen Fähigkeit „Responsive Space“, das heißt der Fähigkeit reaktionsschnell Satelliten ins All zu verbringen, wird das Missionsbetriebssystem V3C (Verlegefähiges Compact Control Center) entwickelt, das selbst diesem Ansatz entspricht und für den Betrieb entsprechender Satelliten eingesetzt werden kann. Der Begriff „Responsive Space“ wird dabei in einem größeren Kontext als ausschließlich die zeitnahe Verbringung eines Satelliten ins Weltall betrachtet. So gehört beispielsweise die schnelle Inbetriebnahme eines Satelliten während der LEOP und außerhalb der Infrastruktur eines Kontrollzentrums dazu, und V3C kann einen Beitrag für eine solche Fähigkeit liefern. V3C zeichnet dabei aus, dass es auf handelsüblicher mobiler Hardware integriert ist, autark betrieben und schnell an verschiedene Orte verlegt werden kann. Somit erschließt V3C neue Möglichkeiten für den Satellitenbetrieb, vor allem im Hinblick auf dezentrale Datenverteilung und Kommandierung, sowie die dadurch ermöglichte neue Stufe an Resilienz, wenn ein oder mehrere V3C-Instanzen als Erweiterung eines klassischen Kontrollzentrums verwendet werden. Abbildung 1 zeigt das operationell betriebene V3C-System auf einem Laptop. Wir zeigen die Besonderheiten im Design, der Implementierung und der Bereitstellung dieses Missionsbetriebssystems und berichten über den erfolgreichen Demonstrationsbetrieb des BORIS-Satelliten, einem Kleinsatelliten des DLR im niedrigen Erdorbit mit Infrarot- und RGB-Nutzlast. Der Demonstrationsbetrieb in mehreren Kampagnen umfasst dabei die

Erladigung von Routineaufgaben, in diesem Fall die Durchföhrung von Erdbeobachtungsaufgaben. Dazu wird die Abarbeitung einer vollstündigen Kette von Aufnahmewunsch über Planung, Kommandierung, Monitoring, Prozessierung und Bahnbestimmung gezeigt. V3C integriert flugerprobte Komponenten des Deutschen Raumfahrtkontrollzentrums GSOC, unter anderem ein Missionsplanungssystem, ein Monitoring- und Kontrollsystem sowie ein Flugdynamiksystem.

Auch als autarkes System ist V3C in bestimmtem Umfang auf externe Schnittstellen angewiesen, die im Zuge des Projekts genau identifiziert wurden. Die wichtigste dieser Schnittstellen ist die Echtzeitverbindung zu einer Bodenstation. Wird diese Verbindung für die erste Demonstrationenkampagne noch mit Hilfe von GSOC-Infrastruktur hergestellt, so sieht das Betriebskonzept für die zweite Kampagne bereits den Anschluss der Antenne direkt und vor Ort über ein standardisiertes Protokoll vor. Für noch weitergehende Flexibilität untersuchen wir die Möglichkeit der Verwendung eines sogenannten GEO-Relais-Links und bereiten diese vor. Bei einem GEO-Relais-Link wird V3C an eine starr ausgerichtete und damit vergleichsweise einfache Antenne zur Kommunikation mit einem geostationären Satelliten angeschlossen. Dieser dient dabei als Relais zu einer Kopfstation am Boden, die vom geostationären Signal auf eine bewegliche Antenne umsetzt, um eine Kommunikationsstrecke zum gewünschten Satelliten in niedriger Umlaufbahn herzustellen. Wir beleuchten die technische Machbarkeit und die Umsetzung für eine entsprechende weitere Demonstrationenkampagne.



BILD 1. V3C-System integriert auf einem handelsüblichen Laptop.

1.1. Anwendungen

Das System V3C ist sehr leistungsfähig, kann eine Kontrollzentrumsinfrastruktur jedoch nicht vollumfänglich ersetzen. Als weiteres Backup „im Feld“ für ein solches Kontrollzentrum, also als mobile Notfallsteuerungskomponente in einem Satellitenboden-

segment, ist es jedoch vielversprechend einsetzbar. Weiterhin kann es eine Anwendung für die Kontrolle unter Responsive Space-Bedingungen gestartete Satelliten (Mikro-, Minisatelliten) nahe beim Nutzer im Einsatzort finden, um die Zeitdauer zwischen Anforderung und Auslieferung eines Datenproduktes (Bildaufnahme eines optischen Satellitensensors) zu minimieren.

1.2. Designtreiber

Folgende Designtreiber waren maßgeblich bei der Entwicklung des V3C-Systems:

- Das Bodensegment soll zwischen verschiedenen Betriebsstätten verlegt werden können.
- Das Bodensegment soll autark betrieben werden können, d. h. ohne tiefe Integration in Einrichtungen und Infrastruktur sowie ohne dauerhafte Internetverbindung.
- Externe Schnittstellen (z. B. zu Bodenstationen) sollen standardkompatibel sein.
- Aktualisierungen und Klone des Bodensegments sollen schnell ausgerollt werden können.
- Das Bodensegment soll durch einen Operator bedient werden können.
- Das Bodensegment soll den Demonstrationbetrieb des BORIS-Satelliten und dessen optischer Bildgebungsnutzlast ermöglichen.

Wir verfolgen dabei das Ziel Routineaufgaben so weit wie möglich zu automatisieren bzw. in Bodenbetriebsprozeduren zu verschriftlichen, damit diese ohne Experten- und Detailwissen durchlaufen werden können. Explizit ausgenommen ist damit die Behebung von Störfällen am Satelliten oder Boden, die nach wie vor durch erfahrene Spezialisten und/oder in dafür ausgerüsteten Kontrollzentren vorgenommen werden sollte. Dementsprechend ist V3C als Ergänzung zu einem erfahrenen Betriebsteam und einem voll ausgestatteten Kontrollzentrum zu sehen, um neuartige Betriebs- und Resilienzkonzepte zu ermöglichen.

2. SYSTEMÜBERSICHT

Das V3C-System besteht aus flugerprobten Subsystemen und Komponenten, die auch bei anderen, durch das GSOC betriebenen Missionen Verwendung finden. Das als Übersicht in Abbildung 2 dargestellte Design ist abgeleitet vom bestehenden Missionsbetriebssystem für den BIROS-Satelliten [1], da jener – umbenannt zu BORIS – als Demonstrationsobjekt für V3C dient. Eine Anpassung auf andere Missionen ähnlichen Typus, d. h. kleiner Erdbeobachtungssatelliten in einem niedrigen Erdorbit, ist möglich. Die in der Abbildung gezeigten Systeme „Monitoring- und Kontrollsystem“ (MCS), „Missionsplanungssystem“ (MPS) und „Flugdynamiksystem“ (FDS) sind vollständig auf dem Laptop integriert.

Das „Bodenstationsdatensystem“ (GDS) ist dabei extern und kennzeichnet die Antenne bzw. das Antennennetzwerk. Eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Komponenten ist [2] zu entnehmen und soll hier nur so weit zusammengefasst werden wie für das Verständnis dieses Papers notwendig.

2.1. Monitoring- und Kontrollsystem (MCS)

Das Monitoring- und Kontrollsystem ermöglicht sowohl die Erhebung, Auswertung, Verteilung und Archivierung von Satellitentelemetrie (TM), als auch das Vorbereiten und Absetzen von Telekommandos (TC) an den Satelliten. Dafür baut das MCS über die Bodenstation eine Echtzeitverbindung zum Satelliten auf. Die Prozessierung der Nutzlastdaten ist in diesem Falle ebenfalls dem MCS zugeschlagen, geschieht aber wie auch die Prozessierung des vollständigen Telemetriesatzes üblicherweise nicht in Echtzeit, sondern arbeitet auf Grundlage aufgezeichneter Daten nach jedem Kontakt („offline“). Auf Kommandierungsseite arbeitet das MCS üblicherweise nicht auf einzelnen Kommandos, sondern auf sogenannten Flugprozeduren, die durch die Subsystemingenieure erstellt und validiert werden und auch die Schnittstelle zum Missionsplanungssystem darstellen. Die wichtigsten Komponenten des MCS sind GECCOS [3] als zentrale Monitoring- und Kontrollsoftware, Satmon [4] zur Darstellung der Telemetrie und ProToS [5] zum Erstellen, Verwalten und künftig auch Ausführen von Flugprozeduren.

2.2. Missionsplanungssystem (MPS)

Das Missionsplanungssystem für V3C, das vom Missionplanungssystem für BIROS [6] abgeleitet wurde, verantwortet die Erstellung einer konsistenten und konfliktfreien „Timeline“, aus der Sequenzen von Flugprozeduren und deren Parameter abgeleitet werden, um sowohl die Nutzlast als auch den Satellitenbus zu steuern. Die Timeline wird dabei nach Uplink autonom durch den Satelliten abgearbeitet, sodass auch außerhalb von Bodenstationskontakten der Satellit betrieben werden kann. Die wichtigsten Komponenten sind SPOT, das der Aufnahmeplanung dient und Pinta/Plato, womit die Timeline erstellt und mit Hilfe entsprechender Algorithmen die Konsistenz und Konfliktfreiheit garantiert wird.

2.3. Flugdynamiksystem (FDS)

Das Flugdynamiksystem dient der Berechnung jeglicher bahnbezogener Daten und Lagedaten. Für die Bahnbestimmung werden die Daten des GNSS-Empfängers an Bord des Satelliten verarbeitet. Die Bahndaten werden in Form von Two-line Elements (TLEs) an die Bodenstation und das Missionsplanungssystem verteilt. Für weitere Produkte wird die Bahn in die Zukunft propagiert und ermöglicht so

die korrekte Ausführung von Bahnmanövern als auch dem Missionsplanungssystem die Planung von künftigen Beobachtungen. Das Flugdynamiksystem ist zumindest sporadisch auf einen Satz externer Daten angewiesen, die Schwankungen in der Erdrotation und der Sonnenaktivität beschreiben. Wie genau sich diese Abhängigkeit auf die Autarkie des V3C-Systems auswirkt, wurde in [2] untersucht.

3. BEREITSTELLUNGSKONZEPT

Die Anforderung V3C im Responsive Space-Kontext zu betreiben bedeutet unter anderem die prinzipielle Möglichkeit das System möglichst schnell ausrollen zu können, d.h. innerhalb weniger Stunden oder Tage. Daher ist V3C nicht fest an die Laptop-Hardware gekoppelt, sondern kann automatisiert auf jeder geeigneten Hardware ausgerollt werden – insbesondere können auf diese Weise schnell mehrere V3C-Instanzen aufgesetzt werden, z.T. auch auf derselben Hardware, was während der Entwicklung des Systems unter Pandemiebedingungen ausgiebig genutzt wurde. Um dies zu erreichen, werden sogenannte „Infrastructure as Code“-Techniken eingesetzt, die die gesamte Systemarchitektur in maschinenlesbaren Dateien abbilden und somit automatisiert ausrollbar machen. Das Konzept soll hier nur angerissen werden und ist im Detail in [2] nachzulesen.

V3C selbst besteht aus einer Reihe von virtuellen Maschinen (VMs), in die die einzelnen Systeme und Komponenten aus Abbildung 2 installiert werden, und einem virtuellen Netzwerk, das diese Maschinen verbindet. Die VMs laufen gesteuert durch einen Typ-2-Hypervisor (Oracle VirtualBox¹) auf handelsüblicher Hardware, in diesem Fall einem Laptop mit 128 GiB RAM, 8-Kern CPU, 4 TB SSD unter einem Ubuntu Linux-Betriebssystem². Das Betriebssystem ist ohne Änderungen gegen Microsoft Windows austauschbar, der Hypervisor mit einigen Änderungen ebenfalls. Für die Provisionierung kommen drei Open Source-Werkzeuge zum Einsatz: HashiCorp Packer³ wird verwendet zum Erstellen einer „Basisbox“ für jedes eingesetzte VM-Betriebssystem auf Grundlage eines ISO-Abbilds des Betriebssystemherstellers sowie einer maschinenlesbaren Beschreibung zur Installation des Betriebssystems. HashiCorp Vagrant⁴ erzeugt aus diesen Basisboxen und einer maschinenlesbaren Beschreibung der virtuellen Hardware die konkreten VMs inklusive deren Netzwerkschnittstellen und Speicherplatz, auf den z. T. mehrere VMs gemeinsam zugreifen können. Red Hat Ansible⁵

¹<https://www.virtualbox.org/>

²<https://ubuntu.com/>

³<https://www.packer.io/>

⁴<https://www.vagrantup.com>

⁵<https://www.ansible.com/>

installiert und konfiguriert anschließend auf den im vorigen Schritt erzeugten VMs die Satellitenbetriebssoftware und deren Abhängigkeiten. Die Schritte bis zur Erzeugung der Basisboxen nehmen ca. 1,25 h in Anspruch, müssen aber in der Regel nur einmal zu Projektbeginn durchgeführt werden. Die Schritte, um von den Basisboxen zu einem fertig ausgerollten und benutzbaren System zu gelangen, benötigen ca. 20 min. Somit ist es möglich auf vorbereiteter Hardware (d.h. Betriebssystem installiert, Projektdateien auf den Festspeicher kopiert und Netzwerkverbindungen eingerichtet) in weniger als 2 h ein vollständiges funktionsfähiges Bodenbetriebssystem für einen bestimmten Satelliten aufzusetzen.

Die Spezifikationen der Hardware sind großzügig bemessen, sodass während der Entwicklungsarbeiten mehrere V3C-Instanzen gleichzeitig ausgeführt werden konnten. Dazu wurde das System in einen „Continuous Integration/Continuous Deployment“-Workflow (CI/CD) eingebunden, sodass Änderungen der in einem Versionskontrollsystem eingepflegten maschinenlesbaren Beschreibungsdateien automatisch zu laufender und provisionierter virtueller Infrastruktur führen. In [2] ist der CI/CD-Workflow genauer beschrieben.

4. BETRIEBSKONZEPTE

4.1. Externe Schnittstellen

Für den praktischen Einsatz von V3C in einem Betriebskonzept ist maßgeblich wie sich das Bodenbetriebssystem in das Gesamtsystem der jeweiligen Mission einfügt. Zwar ist V3C als autarkes System konzipiert, jedoch müssen in der Praxis immer externe Schnittstellen bedient werden. Diese können aufgeteilt werden in allgemeine, für jede Mission zwingend nötige Schnittstellen, sowie spezielle Schnittstellen, die nur für einen bestimmten Anwendungsfall bedient werden müssen. Folgende allgemeine Schnittstellen wurden identifiziert:

- Echtzeitverbindung zur Bodenstation, z. B. mittels des Standardprotokolls SLE,
- „Offline“-Verbindung zur Bodenstation zum Transfer des vollständigen Satzes aufgezeichneter Telemetrie nach einem Kontakt,
- Ausrichtungsdaten für die Bodenstationsantenne, z.B. in Form von TLE-Dateien, die an die Bodenstation transferiert werden,
- Zeitquelle, z. B. zur Verfügung gestellt durch einen NTP-Server im Netzwerk,
- Flugdynamik-Hilfsdaten zur korrekten Bahnbestimmung, welche Erdrotationsparameter und Sonnenaktivitätsdaten umfassen.

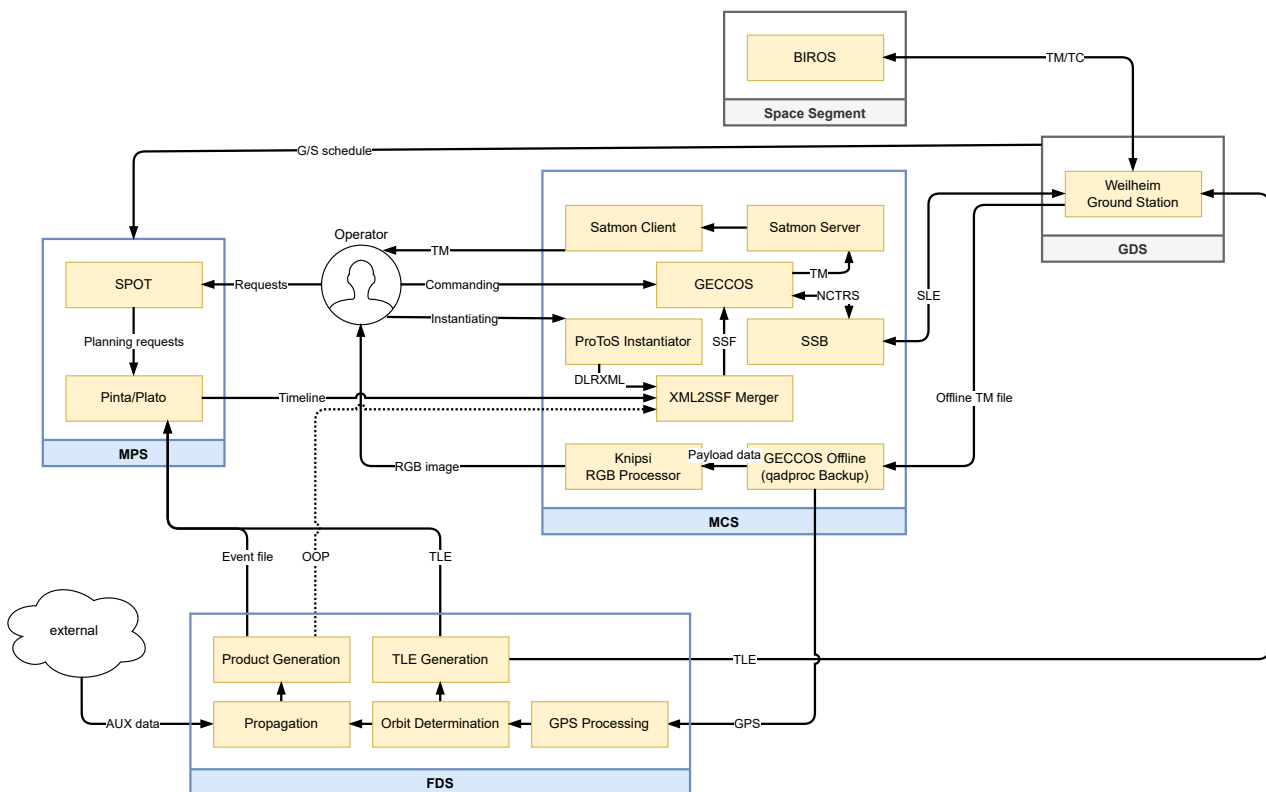


BILD 2. Übersicht über das Systemdesign des V3C-Bodensegments (aus [2]).



BILD 3. Satellitenbetrieb mit Hilfe von V3C (links im Bild) während der ersten Demonstrationenkampagne.

Für die Demonstrationenkampagnen mit dem BORIS-Satelliten sind weiter folgende spezielle Schnittstellen erforderlich, die vor allem auf die Integration in ein bestehendes System zurückzuführen sind:

- Bodenstationsbelegung, da die Antenne eine gemeinsam genutzte und zentral geplante Ressource darstellt,
- Synchronisationsprodukte, um den Satellitenbetrieb jederzeit durch das bereits bestehende Missionsbetriebssystem fahren zu können, was vor allem der Sicherheit bei unvorhergesehenen Problemen mit dem Satelliten oder V3C dient.

In den folgenden Abschnitten zu während verschiedener Demonstrationenkampagnen realisierten Betriebskonzepten wird die jeweilige Behandlung der externen Schnittstellen genauer erläutert.

4.2. Demonstrationenkampagnen

4.2.1. Demonstration #1 am GSOC

Die erste operationelle Demonstration fand am 13. und 14. Dezember 2021 am GSOC in Oberpfaffenhofen statt. Der zeitliche Ablauf wurde auf zwei Tage aufgeteilt und ist aus Tabelle 1 ersichtlich. Zusätzlich zu den dort aufgeführten Aktivitäten wurde kurz vor der Demonstration durch das integrierte Flugdynamiksystem eine initiale Bahnbestimmung auf Grundlage von Daten, die parallel aus dem Regelbetrieb mitgeschnitten wurden, durchgeführt. Die daraus resultierende TLE-Datei wurde an die Bodenstation weitergeleitet um die Antenne korrekt auf den Satelliten ausrichten zu können. Die Bahnbestimmung wurde nach jedem weiteren Kontakt während der Demonstration wiederholt und die entsprechenden TLE-Dateien an die Bodenstation transferiert. Während und nach jedem Kontakt wurde die Satellitentelemetrie ausgewertet, um Zustand des Satelliten und Status der Datenaufnahme fest-

zustellen. Es wurden mehr Kontakte als benötigt eingeplant, um auf eventuelle Fehlerfälle reagieren zu können, jedoch wurde schlussendlich keiner dieser Zusatzkontakte abgerufen. Vor dem ersten Kontakt wurde mit Hilfe der integrierten Missionsplanungskomponente SPOT das Zielgebiet für die optische Datenaufnahme ausgewählt. Die Wahl fiel aufgrund der Beleuchtungs- und Wetterbedingungen auf die Gegend rund um die Kleinstadt Truth or Consequences in New Mexico, USA. Dieser Aufnahmewunsch wurde durch Pinta/Plato auf der sogenannten „Timeline“ eingeplant, die die für die konkrete Aufnahme, den Satellitenbus und die Nutzlast benötigten Flugprozeduren und deren Parameter enthält. Die Timeline wurde an das Monitoring- und Kontrollsystem übergeben, das aus dieser Information eine Abfolge an Telekommandos erzeugt hat, die dem Operator in einer Stapelansicht durch GECCOS präsentiert wurden. Während des ersten Kontakts nahm GECCOS die von der Bodenstation in Echtzeit weitergeleitete Telemetrie entgegen und stellte sie dem Operator durch Satmon aufbereitet dar, sodass dieser den Zustand des Satelliten beurteilen und das Kommandieren vorbereiten konnte (siehe auch Abbildung 3). Die Liste an vorbereiteten Telekommandos wurde zur späteren Ausführung an den Satelliten abgestrahlt und deren korrekter Empfang bestätigt. Nach dem ersten Kontakt wurden Informationen über die durchgeführten Aktivitäten an das bestehende BIROS-Missionsbetriebssystem weitergeleitet, um im Fehlerfall den Betrieb von dort fortsetzen zu können. Von der Bodenstation wurde der vollständige aufgezeichnete Satz an Telemetrie entgegengenommen und mit Hilfe der darin enthaltenen GNSS-Daten eine Bahnbestimmung durchgeführt. Da keine Probleme aufgetreten sind, wurde Kontakt #2 nicht benötigt und der Satellit hat selbständig die Telekommandoliste zwischen den Kontakten abgearbeitet und die gewünschte Aufnahme angefertigt. Dies wurde in Kontakt #3 bestätigt und der Satellit angewiesen die

TAB 1. Ablaufplan der ersten Demonstrationenkampagne.

UTC			2022-12-13 (DOY 348)		
07:30	Pre-pass #1	TLE-Transfer → Bodenstation			
07:30	Pre-pass #1	Aussuchen des Zielgebiets			
08:07	Pass #1	Timeline Uplink			
09:42	Pass #2	spare – nicht benötigt			
			2022-12-14 (DOY 349)		
07:47	Pass #3	Data Take Downlink			
09:21	Pass #4	spare – nicht benötigt			
18:28	Pass #5	Beobachtungskontakt			

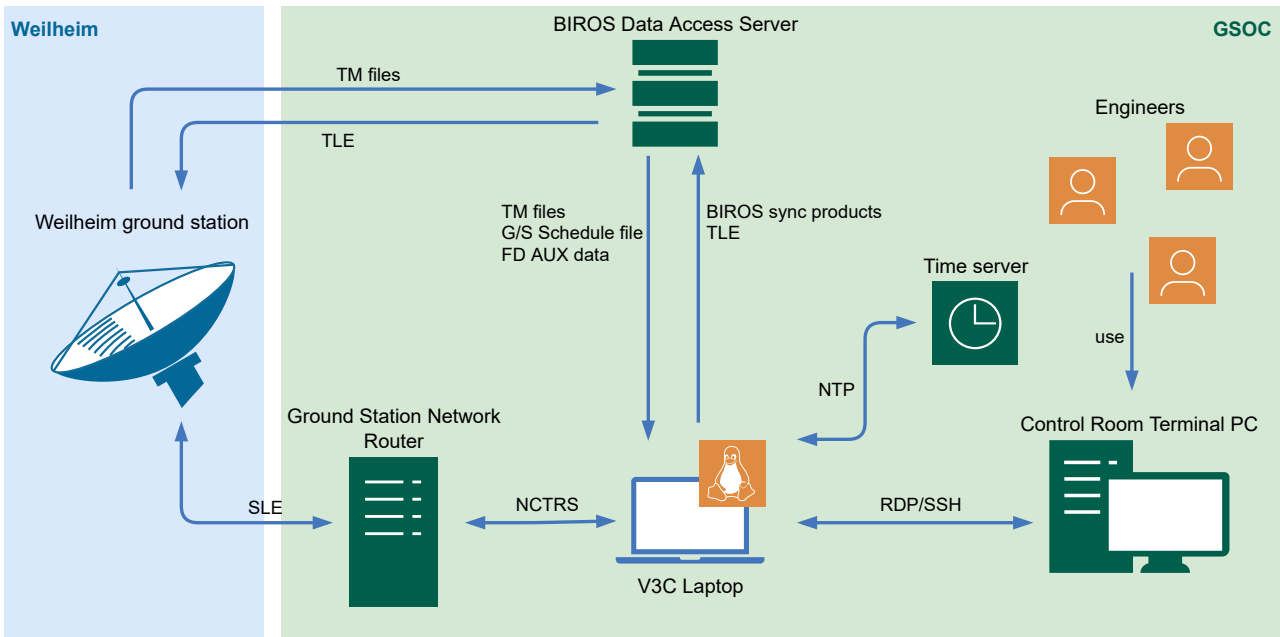


BILD 4. Betriebskonzept der ersten Demonstrationskampagne am GSOC.

Aufnahmen zu übertragen. Diese wurden nach dem Kontakt durch das integrierte Prozessierungssystem verarbeitet und dem Operator dargestellt. Eine der insgesamt zehn Aufnahmen ist in Abbildung 5 zu sehen. Auch die hier folgenden eingeplanten Zusatzkontakte wurden nicht benötigt.

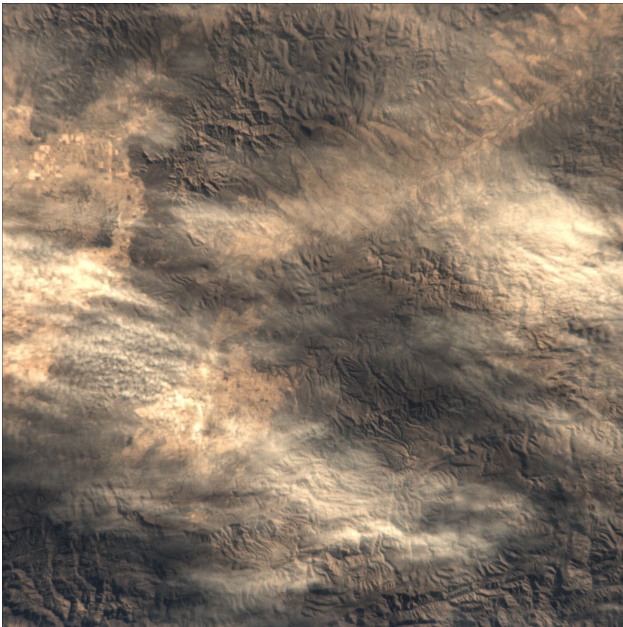


BILD 5. Aufnahme der Gegend um Truth or Consequences, New Mexico, USA, aufgenommen während der ersten V3C-Demonstrationskampagne.

4.2.2. Demonstration #2 direkt an der Antenne

Derzeit in Vorbereitung ist eine zweite Demonstrationskampagne, die zum Ziel hat sich vollständig von der Kontrollrauminfrastruktur zu lösen. Das Betriebskonzept ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt. Dazu wird V3C direkt an einer der Antennen in Weilheim aufgebaut. Der Operator greift nicht über eine Kontrollraumkonsole auf das System zu, sondern bedient den Laptop direkt. Im Gegensatz zur ersten Demonstrationskampagne wird die Verbindung zur Antenne nun nicht mehr über das proprietäre NCTRS-Protokoll gefahren, das eine Umsetzung des CCSDS SLE-Standards [7] innerhalb der GSOC-Infrastruktur benötigt hat. Stattdessen wurde die benötigte Komponente (SSB in Abbildung 2) in V3C integriert. Die Zeit wird von einem Zeitserver aus dem Netzwerk der Bodenstation bezogen. Die gestrichelten Pfeile in Abbildung 6 kennzeichnen Schnittstellen, die nicht für den Demonstrationsbetrieb erforderlich sind. Sie sind vorhanden, um dem bisherigen Missionsbetriebssystem einen vollständigen Satz an Daten zukommen zu lassen, wenn BORIS durch V3C betrieben wird. Dies ermöglicht die reibungslose Umschaltung zwischen beiden Systemen für die reguläre Übergabe oder auch im Fehlerfall. Damit verbleibt als einzige autarkiebrechende Verbindung die Schnittstelle für die Flugdynamikhilfsdaten wie in Abschnitt 2.3 erläutert, sowie die Belegungstabelle für die Bodenstation. Letzteres ist dem Umstand geschuldet, dass die Belegung der Bodenstationen zentral im GSOC geplant wird und die Information für das MPS für die Auswahl der korrekten Bodenstationskontakte zur Verfügung stehen muss. Im Falle einer exklusiven Antenne wür-

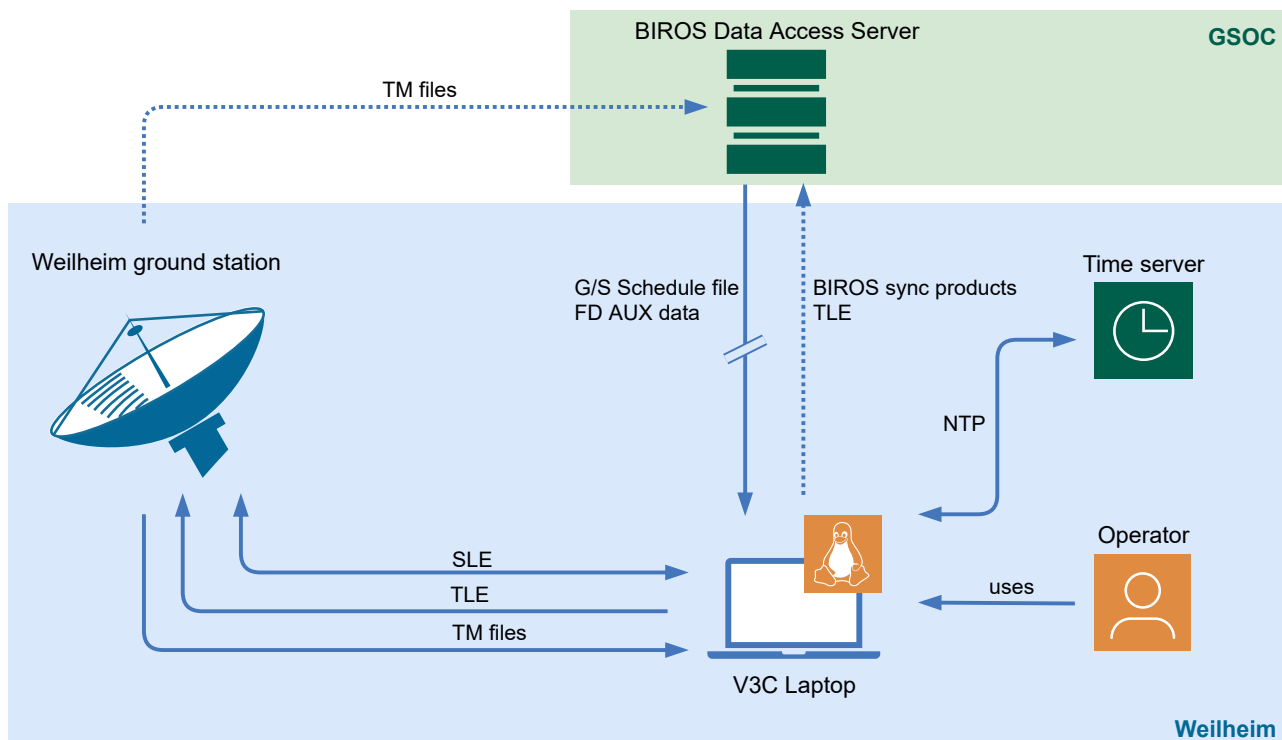


BILD 6. Betriebskonzept der zweiten Demonstrationskampagne von Weilheim aus.

de diese Schnittstelle entfallen. In jedem Fall können Flugdynamikshilfsdaten und Bodenstationsbelegung asynchron bei Gelegenheit, z. B. einmal täglich, eingespeist werden, was durch den unterbrochenen Pfeil angedeutet wird. Der Betriebsablauf für die Demonstration entspricht weitgehend Tabelle 1.

4.2.3. Demonstration über einen GEO-Relais-Link

Einen interessanten Anwendungsfall stellt es dar, V3C an einem beliebigen Ort auf der Welt aufzubauen, wobei das Bereithalten bzw. Mitführen und Betreiben einer beweglichen S-Band-Antenne für den Kontakt zu LEO-Satelliten eine gewisse Hürde darstellt. Daher untersuchen und demonstrieren wir, ob es möglich ist über einen leichter zu erreichenden Relaisatelliten im geostationären Orbit eine Echtzeitverbindung zum LEO-Satelliten über die Umsetzung auf eine ortsfeste Bodenstation aufzubauen, siehe Abbildung 7. Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass neben V3C nur ein handelsübliches „Satcom on the Move“-Terminal (SOTM-Terminal) verlegt werden muss, das ohne Nachführung auskommt und entsprechend kompakt und mobil ist. Ein weiteres VSAT („Very Small Aperture Terminal“) wird an der S-Band-Bodenstation aufgebaut, das die geostationäre Freiraumkommunikationsstrecke auf der V3C-entfernten Seite terminiert. Hier besteht prinzipiell nicht die Anforderung eines möglichst kompakten und verlegefähigen Systems, für die geplante Demonstration wird dennoch ein mobiles Terminal

verwendet. Darüberhinaus entspricht der Aufbau weitgehend demjenigen aus Abschnitt 4.2.2, insbesondere was die verbleibenden Verbindungen zum GSOC betrifft. Über die geostationäre Relaisstrecke werden zum einen die SLE „Protocol Data Units“ für die Echtzeitverbindung zwischen Satellit und V3C transportiert, zum anderen die Bahninformationen für die Antennenausrichtung als auch die aufgezeichnete Bus- und Nutzlasttelemetrie zur Auswertung nach den Passagen. Der Nicht-Echtzeitdatenaustausch erfolgt über das FTP-Protokoll. Die Modems der Antennenterminals können als Netzwerkgeräte auf OSI-Schicht 2 oder 3 konfiguriert werden, womit für die Anpassung von V3C auf die Relaisstrecke keine Änderungen auf Protokollebene erforderlich sind, sondern allenfalls eine korrekte Netzwerkkonfiguration. Somit werden aus Sicht des V3C-Systems die Verbindungen zur Bodenstation transparent über die geostationäre Funkstrecke hergestellt.

Es wird erwartet, dass die zusätzliche Latenz durch die GEO-Strecke keine Auswirkungen auf die Fähigkeit zur Echtzeitkommandierung hat. Ebenso ist das Linkbudget über die beteiligten Antennen ausreichend für die geforderten Datenraten im Uplink (ca. 4 kbit s^{-1}) und Downlink (ca. 140 kbit s^{-1}). Lediglich eine Echtzeitverbindung zur Übertragung der Nutzlastdaten kann zu einer Linksättigung führen (ca. 2 Mbit s^{-1}). Das ist unproblematisch, da diese Daten ohnehin erst nach dem Kontakt in Nicht-Echtzeit an

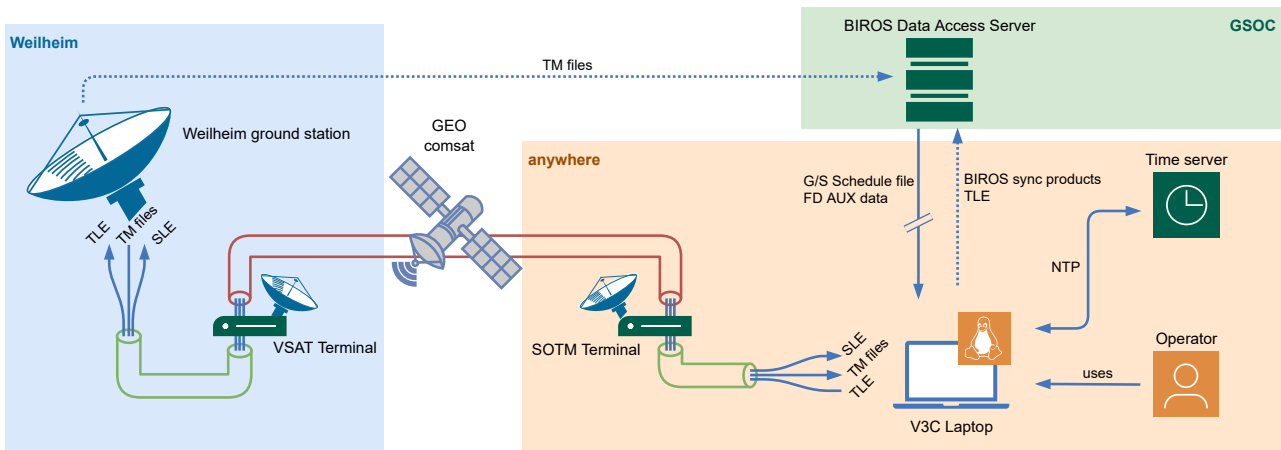


BILD 7. Betriebskonzept der GEO-Relais-Demonstrationskampagne.

V3C weitergeleitet werden und daher unempfindlich auf die Datenrate sind.

Es werden verschiedene Ende-zu-Ende-Testaufbauten durchgeführt, um die Auswirkung der Relaisstrecke bereits vor Buchung von Kommunikationskapazitäten über den GEO-Satelliten abschätzen und das System entsprechend konfigurieren zu können. So ist es möglich die beiden beteiligten Modems, am V3C-System und an der Bodenstation, „back-to-back“ miteinander zu verbinden und auf diese Art Probleme auf OSI-Schicht 2 und höher auszuschließen. Über das Zwischenschalten eines Kanalemulators werden dem Signal anschließend Latenzen und Rauschen aufgeprägt und die Auswirkungen untersucht werden. In jedem Fall werden erste Tests zunächst mit einem Dummy statt dem LEO-Satelliten durchgeführt, bevor später auch der LEO-Satellit mit einbezogen wird. Zum Abschluss wird letztlich auch der GEO-Kommunikationssatellit eingebunden und eine Demonstration ähnlich zu Abschnitt 4.2.2 mit einem Ablauf analog zu Tabelle 1 gefahren.

5. FAZIT UND AUSBLICK

Wir haben Design, Implementierung, Bereitstellung und Demonstration eines mobilen und kompakten Bodensegments dargestellt, das auf einem handelsüblichen Laptop integriert ist und für den Routinebetrieb kleiner Satelliten verwendet werden kann. Dies wurde erfolgreich durch eine Demonstrationskampagne gezeigt, die den gesamten Betriebsablauf für eine optische Datenaufnahme des BORIS-Satelliten abgedeckt hat. Neuartige Betriebskonzepte wurden eingeführt, die durch zwei weitere Demonstrationskampagnen abgedeckt werden sollen. Die dazu nötigen Überlegungen und Vorbereitungen wurden erläutert, sodass in einem nächsten Schritt die praktische Umsetzung dieser Kampagnen erfolgen kann. Insbesondere der Einsatz eines GEO-Relais-Links

ermöglicht dabei eine zuvor nicht mögliche Resilienz für den Satellitenbetrieb.

DANKSAGUNGEN

Unser Dank geht an Martin Wickler für die Initiierung dieses Projekts und sein Beisteuern von Kernideen und Anschubfinanzierung durch das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum GSOC. Für die weitere Projektfinanzierung bedanken wir uns bei Wolfgang Jung, der mit Unterstützung des deutschen Bundesministeriums der Verteidigung Gelder des DLR Responsive Space Cluster Competence Center RSC³ zur Verfügung gestellt hat. Wir möchten ebenfalls den V3C-Teammitgliedern sowie allen Unterstützer, die dieses Projekt ermöglicht haben, danken.

Kontaktadresse:

stefan.gaertner@dlr.de

Literatur

- [1] Hubert Reile, Eckehard Lorenz, und Thomas Terzibaschian. The FireBird Mission – A Scientific Mission for Earth Observation and Hot Spot Detection. In *Digest of the 9th International Symposium of the International Academy of Astronautics, Small Satellites for Earth Observation*. Wissenschaft und Technik Verlag, April 2013. <https://elib.dlr.de/83866/>.
- [2] Stefan A. Gärtner, Norbert Harder, Jens H. Hartung, Markus Hobsch, und Martin Weigel. A Mobile and Compact Control Center for Quick Decentral Satellite Access. In *Space Operations*, Seiten 419–446. Springer International Publishing, 2022. DOI: [10.1007/978-3-030-94628-9_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94628-9_19).
- [3] Christian Stangl, Boguslav Lotko, Michael P. Geyer, Michael Oswald, und Armin Braun. GECCOS

– the new Monitoring and Control System at DLR-GSOC for Space Operations, based on SCOS-2000. In *SpaceOps Conferences*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2014. DOI: [10.2514/6.2014-1602](https://doi.org/10.2514/6.2014-1602).

- [4] Chris Peat und Harald Hofmann. SATMON - A Generic User Interface for Satellite Control. In *SpaceOps Conferences*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2004. DOI: [10.2514/6.2004-316-163](https://doi.org/10.2514/6.2004-316-163).
- [5] Thorsten Beck, Leonard Schlag, und Jan Philipp Hamacher. ProToS: Next Generation Procedure Tool Suite for Creation, Execution and Automation of Flight Control Procedures. In *SpaceOps Conferences*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2016. DOI: [10.2514/6.2016-2374](https://doi.org/10.2514/6.2016-2374).
- [6] Maria T. Wörle, Andreas K. Spörl, Jens H. Hartung, Christoph Lenzen, und Falk Mrowka. The Mission Planning System for the Firebird Spacecraft Constellation. In *SpaceOps Conferences*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Mai 2016. DOI: [10.2514/6.2016-2621](https://doi.org/10.2514/6.2016-2621).
- [7] CCSDS. Cross Support Concept - Part 1: Space Link Extension, März 2006. Green Book, 910.3-G-3. <https://public.ccsds.org/Pubs/910x3g3.pdf>.