

## PRISMA Betrieb @ GSOC - Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: DLR, GSOC

Förderkennzeichen: 50 RA 1020

Vorhabenbezeichnung: Experimentbetrieb der Technologie-Erprobungsmission PRISMA durch das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum in Oberpfaffenhofen

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2010 – 30.09.2012

Dokument Nummer : PRI-GSO-RPT-018

Ausgabe : 1.0

Revision : Freigegeben

Date : 26.02.2013

	Date	Name
Erstellt:	15.02.2013	B. Schlepp, G. Gaias, A. Ohndorf, W. Kruse, R. Faller
Freigegeben (PL GSOC):	26.02.2013	R. Faller

## Change log

Version	Date	Type of Change	Comment	Author
0.1	09.01.2013	Entwurf	Erste Version als Auszug aus dem projektinternen Ergebnisbericht	RFA
0.2	15.02.2013	Entwurf	Interne Review	GGA, RFA
1.0	26.02.2013	Freigabe	Finalisierung	RFA

## Inhalt

2.1	Anwendbare Dokumente .....	7
2.2	Referenz Dokumente .....	7
3.1	Zielsetzungen.....	8
3.2	Rahmenbedingungen.....	8
4.1	Erste Konzepte und Projektdefinition .....	9
4.2	Vertragliche Grundlagen .....	9
4.3	Zuwendung durch das BMWi .....	9
4.4	Einrichtung angemessener Dokumentation sowie Qualitäts- und Managementprozessen .....	10
4.5	Einrichtung des GSOC Bodensegments.....	10
4.5.1	Kontrollräume und Flugbetriebssoftware .....	10
4.5.2	Bodenstationen und Netzwerk.....	10
4.5.3	Flugbetriebspersonal .....	11
4.6	Gemeinsames Training / Training on-the-job.....	11
4.7	Aktive Unterstützung des Flugbetriebs in Schweden.....	11
4.8	Satellitenübernahme und Flugbetrieb durch das GSOC.....	11
4.9	Unterbrechung des Experimentbetriebs nach zwei Anomalien .....	12
4.10	Übernahme der SSC Space Systems Division durch OHB .....	12
4.11	Rückgabe der Satellitenformation .....	12
4.12	Durchführung des ARGON Experiments .....	13
5.1	Wissenschaftlich technische Ergebnisse .....	14
5.1.1	Formationsflugexperimente und -erfahrungen.....	14
5.1.2	Rendezvous und Betrieb im Nahbereich .....	15
5.1.3	Betrieb einzelner Raumfahrzeuge .....	15
5.1.4	Re-Akquisition eines passiven Targets.....	16
5.1.5	Generierung von Kameradaten .....	17
5.1.6	Flugdynamik System .....	18
5.1.7	Erfahrungen mit halbautomatischem Passagenbetrieb .....	19
5.1.8	Entwicklung von Betriebskonzepten für den engen Formationsflug .....	19
5.1.9	Durchführung von aufeinanderfolgenden Passagenzügen.....	19
5.1.10	Angepasste Projektziele .....	20
5.2	Ergebnisse der Bodensegmententwicklung.....	21

---

5.2.1	Bodensegmententwicklung.....	21
5.2.2	„Klonen“ des schwedischen Bodensegments.....	21
5.2.3	Erfahrungen mit TM/TC System RAMSES.....	21
5.2.4	Einrichtung der Inuvik-Bodenstation für PRISMA.....	22
5.2.5	Beteiligung durch das Raumfahrtmanagement des DLR.....	22
5.3	Veröffentlichungen.....	22
5.4	Zusammenfassung.....	22
Appendix A	Projektzeitplan.....	24

---

## Abbildungen

Fig. 5-1 Kamerabasierte Annäherungen auf $\pm 20$ m und auf 10 m Entfernung.....	15
Fig. 5-2 DVS Aufnahme aus circa 30 m Entfernung zu TANGO.....	18
Fig. 5-3 Test-Passage vom 08.06.2011 mit Weilheim, Kiruna und Inuvik.....	20
Fig. 5-4 Projektzeitplan und wichtige Meilensteine .....	24

# 1 Einführung

Dieser Bericht gibt eine Zusammenfassung des PRISMA Missionsbetriebs durch das GSOC sowie eine Übersicht über die erzielten Ergebnisse.

In Kapitel 3 werden zunächst die Zielsetzungen des Vorhabens sowie die Rahmenbedingungen beschrieben, unter denen das Projekt durchzuführen war. Anschließend gibt Kapitel 4 eine Übersicht über den Projektverlauf und beschreibt die wichtigsten Ereignisse. Kapitel 5 beschreibt die wichtigsten Ergebnisse des Vorhabens und schildert gemachte Erfahrungen.

## **2 Anwendbare und Referenzdokumente**

Folgende Dokumente gelten als anwendbare bzw. Referenzdokumente.

### **2.1 Anwendbare Dokumente**

keine

### **2.2 Referenz Dokumente**

keine

---

## 3 Zielsetzungen des Projekts und Rahmenbedingungen

### 3.1 Zielsetzungen

Als Ziele für die Durchführung des PRISMA Betriebs durch das GSOC wurden zu Beginn des Projekts folgende Themen definiert:

- Erstellung von notwendigen Konzepten zum sicheren Betrieb von Satelliten im engen Autonomen Formationsflug sowie für Rendezvous & Docking
- Entwicklung von entsprechenden Experimenten sowie die praktische Verifizierung
- Entwicklung von Konzepten für bodengestützte Indikations- und Benachrichtigungsmechanismen im Fall von Ausfällen der bord-autonomen Sicherungsmaßnahmen
- Kollisionsvermeidung durch schnelle Wahl der „richtigen“ Ausweichmaßnahme, sofern das PRISMA System hierzu die entsprechenden Möglichkeiten bietet
- Durchführung von Anflugmanövern in den Bereich näher als ein Meter als letzte Vorstufe zum Docking
- Relativnavigation zu einem Zielobjekt mit und ohne spezielle Kennung (Markierungs-Beleuchtung) im Hinblick auf DEOS

### 3.2 Rahmenbedingungen

Zu Beginn des Projekts wurden eine Reihe von Herausforderungen und Rahmenbedingungen identifiziert, die bei der Umsetzung zu erwarten waren:

- Bodensegment muss unter hohem Zeitdruck entwickelt werden
- „Klonen“ des schwedischen Bodensegments nur teilweise möglich
- PRISMA-Dokumentationstiefe zu berücksichtigen
- Vorhandene Dokumente erklären Bodensysteme und Satelliten nur unzureichend
- Know-How muss im persönlichen Kontakt erarbeitet werden
- Intensive Reiseaktivitäten erforderlich (Schichtbetrieb)



## 4 Projektverlauf

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die Projektdurchführung.

### 4.1 Erste Konzepte und Projektdefinition

Die erste Idee einer Beteiligung des GSOC am Betrieb der PRISMA Mission entstand im Oktober 2009. Das schwedische Projekt, an dem das GSOC durch die Abteilung RB-RFT mit Bereitstellung von Satellitenkomponenten (GPS System Hard- und Software) und Kontrollsoftware zum autonomen Formationsflug und autonomen Orbit-Keeping, sowie den entsprechenden Experimenten bereits vertreten war, stand zu diesem Zeitpunkt wenige Monate vor dem Start. Nachdem es aber Schwierigkeiten mit der Finanzierung der anstehenden Betriebsphase gab, wurde nach einer Lösung gesucht.

Das GSOC bot sich in einem ersten Anlauf an, die Durchführung des Betriebs einschließlich Launch & Early Orbit Phase und Commissioning (L&C) von Deutschland aus zu übernehmen und gleichzeitig als zusätzlicher Experimentator für DEOS-relevante Themen ins Projekt zu kommen. Dieser Vorschlag wurde aber im Rahmen eines ersten Management-Meetings Mitte November 2009 in Solna von schwedischer Seite abgelehnt.

Nach einigen Verhandlungen konnte man sich auf ein grobes Konzept einigen, welches die Aufteilung des Flugbetriebs beinhaltete. SSC sollte mit der Mission beginnen und LEOP, Commissioning sowie die erste Phase des Experimentbetriebs durchführen. Während dieser Phase sollte das GSOC sein Bodensegment einrichten und testen, das GSOC-Team trainieren und zusätzlich den schwedischen Betrieb durch Bereitstellung von Betriebspersonal unterstützen. Das GSOC sollte anschließend 4-6 Monate die Formation übernehmen und den Experimentbetrieb weiterführen.

Am Ende des Projekts sollte der Hauptsatellit MANGO wieder an Schweden übergeben werden. Der Kontakt zum kleineren TANGO war nach vollendeter Basissmission nicht mehr vorgesehen.

### 4.2 Vertragliche Grundlagen

Die vertragliche Grundlage für die Kooperation beim Betrieb von PRISMA bildete eine Erweiterung eines bereits vorhandenen MoUs von 2005. Diese Erweiterung war Ende Mai 2010 unterzeichnet. Mit unterzeichnetem MoU konnte GSOC Personal auch offiziell an den schwedischen Vorbereitungen für die LEOP teilnehmen.

Zuvor wurde noch im Januar 2010 ein Non-Disclosure Agreement unterzeichnet. Dieses war die Voraussetzung für die Bereitstellung vorhandener Dokumentation und der RAMSES TM/TC-Software.

### 4.3 Zuwendung durch das BMWi

Zur teilweisen Finanzierung der Kosten für den PRISMA Betrieb durch das GSOC wurde ein Antrag auf Zuwendung DLR RD-RR (RfM) gestellt. Eine entsprechende Vorhabenbeschreibung mit einem Kostenplan wurde Ende Juni 2010 erstellt und im September 2010 gewährt.

## 4.4 Einrichtung angemessener Dokumentation sowie Qualitäts- und Managementprozessen

Bereits in der Frühphase des Projekts wurde mit Unterstützung des GSOC Prozess-Managements ein Umfang von Projektdokumentation definiert, der zwar einerseits wegen zur Verfügung stehender Zeit- und Personalressourcen auf ein notwendiges Minimum zu begrenzen war, andererseits aber trotzdem die sichere Projektdurchführung gewährleisten und damit der Rolle eines nach DIN ISO 9001 zertifizierten Instituts Rechnung zu tragen hatte.

Darüber hinaus fanden alle am GSOC etablierten Mechanismen der Multimissionsumgebung zum Reporting und zur Fehlererkennung und Verfolgung Anwendung. Zwei Reviews einschließlich dazugehöriger Bearbeitung von RIDs wurden zur Qualifizierung des Bodensegments durchgeführt.

## 4.5 Einrichtung des GSOC Bodensegments

Mit den Arbeiten für das Bodensegment wurde schon parallel zu den Abstimmungen zwischen SSC und GSOC begonnen. Der generelle Ansatz sah vor, das bereits vorhandene schwedische Bodensegment soweit wie möglich zu replizieren („klonen“), um den Aufwand für Einrichtung und Test möglichst gering zu halten und um höchstmögliche Kompatibilität zu erreichen. Des Weiteren sollten wo möglich die Komponenten des GSOC-Multimissionssystems (z.B. Räume, Geräte, Netzwerk, Personal) genutzt werden.

Zum Nachweis der Bereitschaft des Bodensegments wurden zwei Reviews durchgeführt. In einer internen kombinierten Review aus CDR und TAR am 14.12.2010 sowie einer ORR am 08.02.2011, letztere wurde von RfM geleitet, dienten zur Abnahme des GSOC Bodensegments für die operationelle Übernahme der PRISMA-Formation.

### 4.5.1 Kontrollräume und Flugbetriebssoftware

In einem Multimissionskontrollraum (K9) wurden entsprechende Konsolen als Arbeitsplätze für das Flugbetriebsteam eingerichtet. Acht Konsolen standen für PRISMA zur Verfügung, womit genügend Platz für das GSOC Flugbetriebsteam und externe Gäste und Experimentatoren bereit stand.

Als Kernelement der Flugbetriebssoftware wurde das schwedische TM/TC-System RAMSES gewählt.

### 4.5.2 Bodenstationen und Netzwerk

Das Bodenstationskonzept sah vor, den PRISMA-Betrieb mit der GSOC-Station Weilheim und zusätzlichen Passagen mit der schwedischen Antenne in Kiruna durchzuführen.

Zur Verringerung der Passagenkosten und wegen der operationell günstigeren Sichtbarkeitsbedingungen (Betrieb zu Tagzeiten) wurde darüber hinaus noch die Bodenstation des DLR in Inuvik eingerichtet und seit Ende April 2011 erfolgreich genutzt.

### 4.5.3 Flugbetriebspersonal

Das Flugbetriebspersonal setzte sich aus Operatoren des GSOC-Multimissionsteams und Projekt-Ingenieuren der Abteilungen RB-RFT und RB-MIB zusammen, die während der aktiven Phasen den Flugbetrieb durchführten. Dieses Team wurde unterstützt durch schwedische Spezialisten, die zu Büro-Zeiten bei Fragen verfügbar waren (on-call Support).

### 4.6 Gemeinsames Training / Training on-the-job

Aufgrund der geringen Dokumentationstiefe war eine vernünftige Einarbeitung des GSOC Personals nur vor Ort in Schweden möglich. Es wurde aber, wohl wegen mangelnden Ressourcen, kein spezifisches Training des GSOC Personals seitens SSC angeboten. GSOC Personal konnte nach der Unterzeichnung des MoUs während den letzten Betriebsvorbereitungen in Solna mit dabei sein, d.h. an deren letzten Simulation teilnehmen.

Mit diesem Hintergrund hatte die Einarbeitung folgende Schwerpunkte:

- Umgang mit dem Bodensystem und deren Komponenten (RAMSES, PDC, etc.)
- Durchführung der Flugbetriebsabläufe (Planung, Durchführung, Nachbereitung)
- Umgang mit den PRISMA Satelliten (Flugprozeduren, usw.)
- Erlernen der Subsystemfunktionalitäten
- Kompetenzaufbau zum PRISMA Autonomiekonzept

Darüber hinaus wurden parallel zur Einarbeitung eigene Dokumente erstellt, in denen das erlangte Know-how festgehalten und an das übrige Team weitergegeben werden konnte. In dieser Form wurde der Wissenstransfer an die übrigen Teammitglieder vollzogen.

GSOC Personal war auch beim Start und während der ersten Betriebsphase in Solna präsent.

### 4.7 Aktive Unterstützung des Flugbetriebs in Schweden

Eine der Absprachen mit SSC gemäß MoU sah vor, den schwedischen Flugbetrieb in der Phase des Experimentbetriebs durch GSOC Personal zu unterstützen. Entsprechend waren ab Mitte August 2010 bis Ende Februar 2011 ein bis drei GSOC Vertreter in Solna präsent, um zusätzlich zum Lernprozess die Schicht des Command-Operators (OCC Position) abzudecken.

### 4.8 Satellitenübernahme und Flugbetrieb durch das GSOC

Nach erfolgter Abnahme des GSOC Bodensegments im Rahmen der ORR wurde der Flugbetrieb am 14.03.2011 von Solna an Oberpfaffenhofen übergeben. Der Experimentbetrieb wurde zwei Tage später aufgenommen.

In der ersten Woche wurde das GSOC noch durch einen SSC Spezialisten vor Ort unterstützt. Danach gab es nur noch On-call Unterstützung während normaler Büro-Zeiten.

Als Bodenstation wurde zunächst nur Kiruna genutzt, da die Datenaufzeichnung und Archivierung wegen der zeitlichen Aspekte bei der Anbindung der Stationen noch in Schweden lief. Nach der Umstellung auf Archivierung durch das GSOC konnte zwei Wochen später auch Weilheim eingebunden werden. Mit der Hinzunahme der DLR Station in Inuvik konnte Ende April 2011 das Stationsnetzwerk so erweitert werden, das Flugbetrieb auch zu Bürozeiten möglich war. Das verbesserte die Remote-Unterstützung durch Schweden wesentlich.

Die ersten Wochen des Experimentbetriebs liefen weitgehend reibungsfrei. Experimente zum autonomen Formationsflug, Rendezvous und Nahbereichsbetrieb mittels GPS und dem Vision Based Navigationssystem sowie Erprobungen des alternativen Antriebssystems HPGP konnten termingerecht durchgeführt werden.

#### **4.9 Unterbrechung des Experimentbetriebs nach zwei Anomalien**

Mitte Juni 2011 kam es zu Beginn des OOS Experiments des GSOC aufgrund von Verkettungen mehrerer Fehler zu zwei Anomalien. Zur Klärung der Vorfälle wurde der Experimentbetrieb ausgesetzt. Nach einem ausführlichen Reporting und Diskussion der Vorfälle folgten gemeinsame Maßnahmen zur Verbesserung der Betriebssicherheit.

So wurde am 18.07.2011 der Experimentbetrieb wieder aufgenommen. Bis zum Re-Handover wurden die Experimente Autonomous Orbit Keeping AOK und Prisma Mass Analyzer PRIMA erfolgreich durchgeführt und die beiden Satelliten, nachdem sie sich während des AOK erwartungsgemäß auf über 55 km voneinander getrennt hatten, im Rahmen des Formation Flying Re-Acquisition (FFReAc) Experimentes wieder zusammengeführt.

Durch die späte Wiederaufnahme des Experimentbetriebs konnte die Zielsetzung des OOS Experiments des GSOC nicht mehr vollständig während der Betriebsphase des GSOC durchgeführt werden. Nach längeren Verhandlungen konnte mit der schwedische Seite vereinbart werden, ein weiteres GSOC Experiment von Schweden aus durchzuführen (siehe 4.12).

#### **4.10 Übernahme der SSC Space Systems Division durch OHB**

Nahezu zeitgleich mit den Vorgängen um die zwei Anomalien (siehe 4.9) gab die schwedische Seite die Übernahme der SSC Space System Division durch die Firma OHB bekannt. Diese neue Tochter der OHB Gruppe wird unter dem Namen OHB Sweden AB geführt.

#### **4.11 Rückgabe der Satellitenformation**

Die PRISMA Formation wurde wie geplant pünktlich am 23.08.2011 wieder an das schwedische Kontrollzentrum in Solna übergeben. Entgegen der ursprünglichen Planung, die nur die Rückgabe von MANGO vorsah, gingen beide Satelliten voll betriebsbereit an Solna zurück.

Seitdem ist das GSOC Betriebssegment außer Funktion. Personal, Netzwerk und Kontrolleinrichtungen wurden zunächst für eine mögliche Wiederholung des noch ausstehenden OOS-Experiments bereitgehalten. Nachdem aber die noch offenen

---

Experimentthemen mittels des ARGON Experiments in Schweden durchgeführt werden konnten (siehe 4.12), wurde Ende April 2012 diese Bereithaltung eingestellt.

## **4.12 Durchführung des ARGON Experiments**

Wegen der noch ausstehenden Experimente wurde seit der Rückgabe der Formation mit OHB-Schweden über eine weitere Möglichkeit zur Durchführung verhandelt. Unter Berücksichtigung der zur Vorbereitung des Experiments zur Verfügung stehenden Zeit und den bisher erzielten Ergebnissen des FFRaC Experiments wurde das ursprüngliche OOS-Experiment komplett erneuert. Dazu berücksichtigt wurden die zusätzlichen Kosten und die zur Verfügung stehende Experimentzeit. In einem neuen Experimentvorschlag für „Advanced Rendezvous using GPS and Optical Navigation“, genannt ARGON, wurden die wichtigen Themen und Inhalte innerhalb einer 5-tägigen Experimentphase neu geplant. Mit diesem Vorschlag konnte dann mit OHB Sweden eine Einigung erzielt werden. Aufgrund der kurzen Zeitdauer wurde aber eine erneute zeitweise Übergabe des PRISMA-Betriebs an das GSOC aufgrund des hohen Aufwands nicht in Betracht gezogen.

So fand also in der Zeit vom 23.-27.04.2012 das ARGON Experiment statt, betreut von fünf Experten des GSOC, wobei der Flugbetrieb vom Schwedischen Kontrollzentrum in Solna durchgeführt wurde.

---

## 5 Ergebnisse und Erfahrungen

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die erzielten Ergebnisse durch den Betrieb von PRISMA durch das GSOC und geben eine Übersicht über Erfahrungen („Lessons Learned“) bei der Projektdurchführung.

### 5.1 Wissenschaftlich technische Ergebnisse

Neben dem reinen Missionsbetrieb wurden außerdem sowohl externe Experimente unterstützt und durchgeführt als auch eigene Experimente geplant, vorbereitet und durchgeführt. Die Ergebnisse daraus werden im Folgenden erläutert.

#### 5.1.1 Formationsflugexperimente und -erfahrungen

Im Bereich Formationsflug ist zunächst das vom DLR entwickelte Spaceborne Autonomous Formation Flying Experiment (SAFE) erwähnenswert, in dessen Zuge zwei Experimente zu Autonomous Formation Control (AFC) erfolgreich bedient wurden. Der erste Teil AFC1 dieses Experiments wurde bereits in der operativen Phase bei SSC abgeschlossen. Der am GSOC betriebene Experiment-Slot AFC2 dauerte 19 Tage und es wurde demonstriert, dass die on-board Software in der Lage ist enge Formationen autonom zu halten und selbständig gewünschte Rekonfigurationen durchzuführen. Details und weitergehende Informationen finden sich im Missions Blog von DLR oder SSC und in diversen Publikationen des DLR Experiment-Teams<sup>1,2</sup>. Das GSOC-Team hatte sich im Vorfeld in diversen Simulationen mit dem Experiment vertraut gemacht und konnte so in dieser Phase eng mit dem Experimentator zusammenarbeiten. Unterstützung, Konfliktlösung, Entwicklung von Abläufen und das Ändern der Rahmenbedingungen auf spezielle Anfrage des Experimentators zeichneten diese Phase besonders aus.

Anschließend fand das Experiment von OHB Sweden (ehemals SSC) zum Formationsflug statt. Auch hier konnte gezeigt werden, dass der von SSC entwickelte Autonomous Formation Flying (AFF) Controller zuverlässig funktioniert. Autonome Annäherungen auf unter 15m relativer Distanz mit anschließender sicherer Trennung wurden am GSOC demonstriert. In den acht Tagen Experimentdauer konnte auch hier das GSOC-Team einen umfassenden Einblick in die Abläufe erhalten und hat einiges zum Flugverhalten in der engen Formation lernen können.

Neben den Erfahrungen in der Experimentbetreuung und deren Betrieb, hat das GSOC-Team zudem eine eigene Software zur Manöverplanung entwickelt, um die Formationskonfiguration den Ansprüchen entsprechend zu ändern. Insbesondere die

---

<sup>1</sup>D'Amico S., Ardaens J.-S., Larsson R.;  
Spaceborne Autonomous Formation Flying Experiment on the PRISMA Mission;  
AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 8-11 Aug. 2011, Portland, USA (2011).  
Submitted to Journal of Guidance, Control and Dynamics.

<sup>2</sup>D'Amico S., Ardaens J.-S., Larsson R.;  
In-Flight Demonstration of Formation Control based on Relative Orbital Elements;  
4th International Conference on Spacecraft Formation Flying Missions & Technologies; 18-20 May 2011, St-Hubert, Quebec (2011).

Anforderungen an die Formationsgeometrie zu Beginn jedes neuen Experimentes konnten so erfüllt werden.

Über den gesamten Betrieb konnten im Hinblick auf den Formationsflug zudem weitere Erkenntnisse gesammelt werden zum "Verhalten" der Formation bei verschiedenen Relativbahn-Geometrien (e-/i-Vektor), bei Entfernungen von bis zu 55 km Abstand in Flugrichtung und der erfolgreichen Re-Akquisition.

### 5.1.2 Rendezvous und Betrieb im Nahbereich

Im Laufe der Mission wurde in diversen Experimenten verschieden Rendezvous Szenarien durchgeführt. So geschehen in den bereits erwähnten Experimenten AFC und AFF (siehe 5.1.1) als auch im SSC Experiment ARV. Dieses Experiment zum Autonomen Rendezvous erfolgte ausschließlich mittels kamerabasierter Relativnavigation. Ausgehend von einem initialen Abstand von 30 km erfolgte ein Rendezvous bis auf 50 m vollständig autonom mit Überwachung vom Boden.

Über die Rendezvousexperimente hinaus gab es verschiedene Aktivitäten im Nahbereich. Basierend auf GPS Navigation konnte eine Annäherung bis auf 2 m Abstand geflogen werden. Kamerabasiert konnte eine relative Distanz von 10 m erreicht werden (siehe Fig.5-1). Erwähnenswert ist hier besonders der Ausgangspunkt der Nahbereichsexperimente. Dabei handelt es sich um einen Haltepunkt in einer sicheren e-/i-Vektor Separation in einem mittleren relativen Abstand von 55 m. Dieser wurde auch über Nacht und Wochenenden treibstoffsparend gehalten. Insbesondere die Nahbereichs-Experimente brachten dem GSOC erste Kenntnisse mit kontinuierlichem Schub in unmittelbarer Nähe eines anderen Raumfahrzeugs ein. Hinzu kommen viele neue Erfahrungen im Bereich der optischen Relativnavigation.

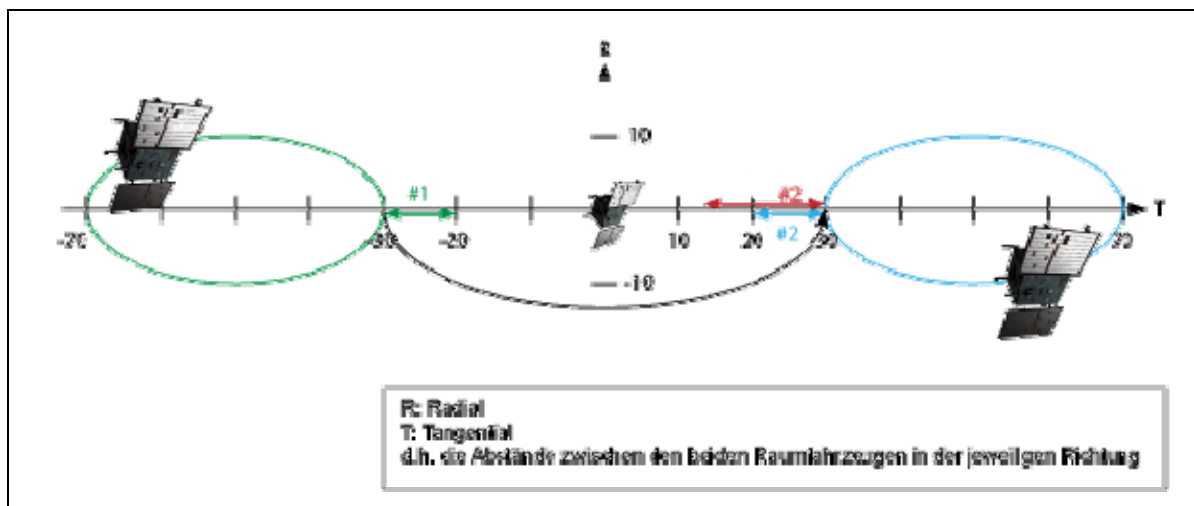


Fig. 5-1 Kamerabasierte Annäherungen auf  $\pm 20$  m und auf 10 m Entfernung

### 5.1.3 Betrieb einzelner Raumfahrzeuge

Zudem beinhaltete die PRISMA Mission Phasen in denen der Fokus allein auf MANGO lag. In diesem Rahmen wurde das DLR Experiment Autonomous Orbit Keeping (AOK) erfolgreich betrieben. Ziel war die Demonstration einer routinemäßigen autonomen Bahnhaltung eines

einzelnen Raumfahrzeugs (hier: MANGO). MANGO wurde dazu nicht mehr relative zu TARGET kontrolliert, sondern bezüglich eines Referenzorbits. Dies hatte zur Folge, dass die Satelliten sich voneinander entfernten. Auch hierzu finden sich weitere Informationen zum Experiment in Veröffentlichungen des DLR Experiment-Teams<sup>3,4</sup>.

Aus Sicht des Betriebs lag die Herausforderung vor allem darin das Raumsegment in einen funktionsfähigen "Mono-Betrieb" zu versetzen, in dem die Informationen aus der relativen Bahnbestimmung nicht zur Verfügung standen. AOK wurde ursprünglich so entworfen, dass es am Ende der PRISMA Mission durchgeführt werden sollte, während TANGO bereits abgeschaltet ist. Aufgrund der Missionsverlängerung war TANGO aber noch aktiv und somit waren einige Änderungen im Vergleich zu früherer Tests und Simulationen nötig. Hierzu war ein tiefes Verständnis des Raumsegments erforderlich, um die richtigen Einstellungen zu finden. Schließlich musste auch das Flugdynamik System angepasst werden, um den "Mono-Betrieb" zu unterstützen. Insbesondere musste ein Monitoring System entwickelt werden (siehe 5.1.6), welches die Formation weitergehend überwacht ohne allerdings auf GPS Informationen von TANGO zurückgreifen zu können. Vergleichbar ist dies mit einem On-Orbit Servicing Szenario. Eine detailliertere Beschreibung erfolgt weiter unten.

Zum Betrieb eines einzelnen Raumfahrzeugs gehören auch diverse Kampagnen des Experiments High Performance Green Propulsion System (HPGP - sogenannte Grüne Treibstoffe), welche als Tests für ein von Ecological Advanced Propulsion Systems (ECAPS) entwickeltes Antriebssystem dienen. Tatsächlich wurde das Antriebssystem viel häufiger und intensiver genutzt, als das Hydrazine-System während regulärer Bahnkorrektur Manöver. Daher war ein großes Verständnis des MANGO Raumfahrzeugs und vor allem dessen Antriebssystems von Nöten, um eine angemessene Lageregelung, Wahl der Antriebsdüsen und Antriebsrichtung zu gewährleisten. Ohne dieses Wissen wäre eine vernünftige Experiment Planung zusammen mit dem Experimentator im Hinblick auf Sicherheit und Treibstoffersparnis nicht möglich gewesen.

#### 5.1.4 Re-Akquisition eines passiven Targets

Im GSOC eigenen Experiment FormationFlying Re-Acquisition (FFReAc) wurde erfolgreich demonstriert, dass das GSOC auch in der Lage ist eine Annäherung an einen nicht-kooperativen Satelliten durchzuführen. Wie erwähnt wurde im Zuge des Experiments AOK die Formation "aufgelöst" (siehe 5.1.3) und MANGO hat sich auf über 55 km von TANGO entfernt. In dieser Distanz war kein TM/TC Link zwischen den Satelliten mehr vorhanden. Somit waren auch keine GPS Informationen von TANGO verfügbar.

Zur Bestimmung der Formation wurde daher für TANGO die von NORAD bereitgestellten Two-Line Elements (TLE) genutzt, während für MANGO die zur Verfügung stehenden GPS Daten genutzt wurden. Mit Hilfe dieser Informationen konnte ein erstes Monitoring

---

<sup>3</sup>De Florio S.;

Flight Results of the Precise Autonomous Orbit Keeping Experiment on the PRISMA Mission;  
DLR/GSOC TN, PRISMA-DLR-OPS-56, Version 1.0, 15 September 2011, Oberpfaffenhofen (2011).

<sup>4</sup>De Florio S., D'Amico S., Radice G.;

Operation Concept of the Precise Autonomous Orbit Keeping Experiment on the PRISMA Mission;  
8th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, 4-8 April 2011, Berlin (2011).



gewährleistet und der aktuelle Abstand, sowie die Drift zueinander bewertet werden. Des Weiteren wurden täglich einige Stunden Kameradaten gesammelt (VBS, siehe 5.1.5) mit deren Hilfe dank guter Lichtverhältnisse von Beginn an (also ab einer Distanz von etwa 55 km) eine exaktere Ground-in-the-loop Navigation möglich war. Dieses Wissen wurde genutzt, um die nötige Manöverplanung am Boden durchzuführen, und die Satelliten auch ohne die TANGO GPS Navigation sicher wieder aneinander heranzuführen. Nach erfolgreicher Re-Akquisition auf circa 4 km Abstand wurde die Mission wie geplant an OHB Sweden übergeben.

Zum Zeitpunkt von FFR<sub>e</sub>Ac war die Software zur relativen Bahnbestimmung anhand von Bilddaten noch im Entwicklungsstadium. Daher wurden neben den Kameradaten auch TLEs zur Formationsbestimmung genutzt. Um die Sicherheit der Satelliten zu gewährleisten, wurden sobald möglich auch GPS-Daten zur Betrachtung der Geometrie herangezogen. Die Weiterentwicklung der Software und die gesammelte Erfahrung führten dazu, dass man selbstbewusster wurde und das Folge-Experiment ARGON - Advanced Rendezvous using GPS and Optical Navigation - durchführte (siehe auch 4.12). Dieses wurde im wirklichen "Blindflug", d.h. ohne jegliches Nutzen der GPS-Daten von TANGO, geflogen und nutze die reine extrahierte Information aus den Bilddaten. Außerdem wurde der finale Haltepunkt auf 3 km reduziert. Im Anschluss erfolgte Analysen bestätigen simulierte Kontrollgenauigkeiten und eine sichere Annäherung während des gesamten Experimentes in Bezug auf Abstand und Formationsgeometrie. Erläuterungen und genauere Ergebnisse finden sich in entsprechender Dokumentation<sup>5,6</sup>. Damit wurde im Hinblick auf On-orbit Servicing Missionen, wie etwa DEOS, ein großer Schritt gemacht und der Anflug an ein nicht-kooperatives Objekt erfolgreich demonstriert.

### 5.1.5 Generierung von Kameradaten

PRISMA bot dem GSOC eine einmalige Chance reale Bilddaten aus verschiedenen Flugphasen und -szenarien zu sammeln, d.h. mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Raumfahrzeugen und diversen Relativbahn-Geometrien ( $e/i$ -Vektoren). Dabei konnte beide Kamerasystem genutzt werden: das Digital Video System (DVS) und das Vision Based System (VBS). Das DVS wurde vermehrt während AFC2, AOK und einiger SSC Experimente genutzt, da es lediglich Bilddaten in relativen Abständen kleiner 200 m liefert. Das VBS wurde hauptsächlich während ARV, PROX/FARM und der Re-Akquisition (siehe 5.1.4) verwendet, da es nachweislich Bilddaten in bis zu 55 km Entfernung liefert. Auch für das noch ausstehende Experiment OOS ist die Benutzung beider Kamerasysteme geplant.

<sup>5</sup> G. Gaias, S. D'Amico, J.-S. Ardaens;

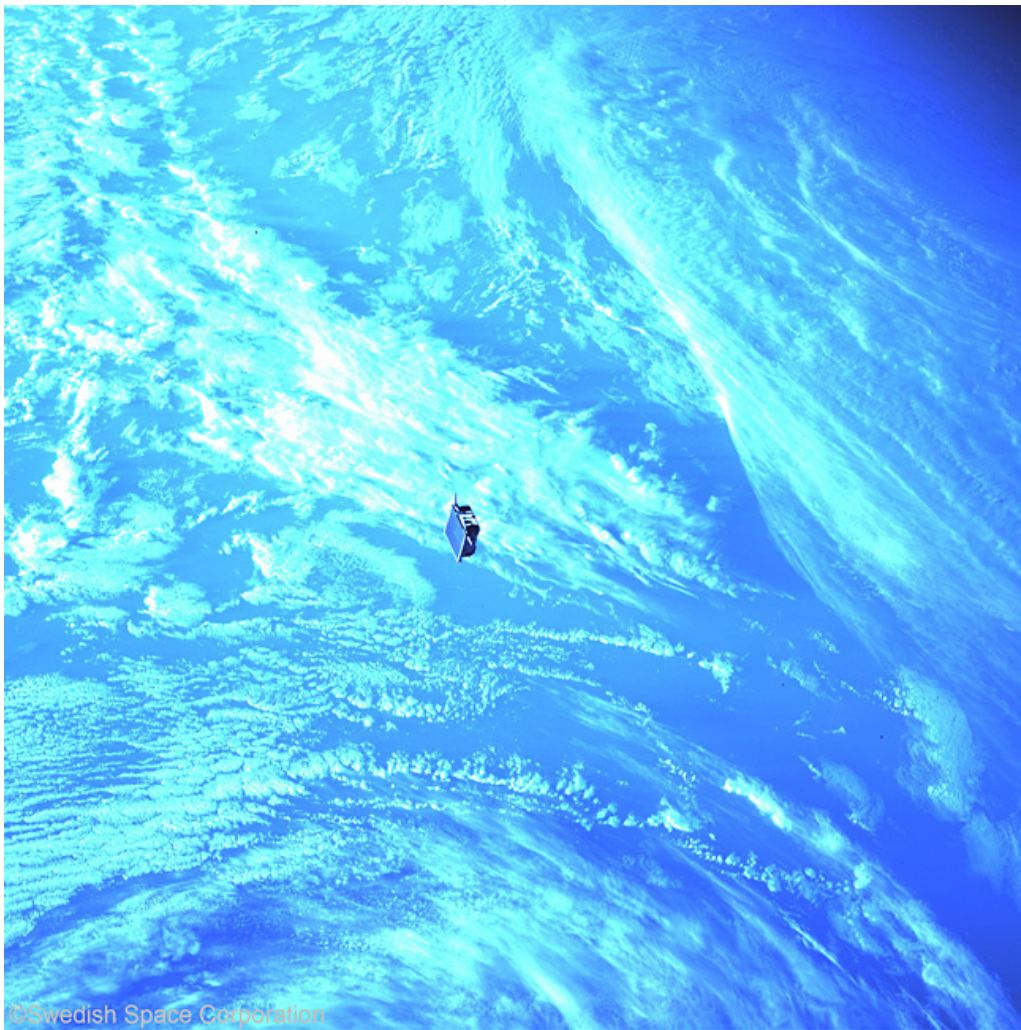
Angles-only Navigation to a Non-Cooperative Satellite using Relative Orbital Elements;  
2012 AIAA/AAS Astrodynamics Specialists Conference, Minneapolis, MN, 13-16 August 2012.

<sup>6</sup> D'Amico S., Ardaens J.-S., Gaias G., Schlepp B., Benninghoff H., Tzschichholz T., Karlsson T., Jørgensen J. L.;

Flight Demonstration of Non-Cooperative Rendezvous using Optical Navigation;

23th International Symposium on Space Flight Dynamics, October 29 - November 2, 2012, Pasadena, CA, USA (2012)

All rights reserved. Disclosure to third parties of this document or any part thereof, or the use of the information contained herein for other purposes than here intended, is not permitted except with the prior and written permission of DLR.



**Fig. 5-2 DVS Aufnahme aus circa 30 m Entfernung zu TANGO**

Die gesammelten Daten sind der Schlüssel für zukünftige Forschung auf diesem Gebiet. Bilder mit realen Lichtverhältnissen, zusammen mit dem Wissen über Position und Lage der Raumfahrzeuge sowie die dazugehörige Zeit können genutzt werden, um bestehende Software zu validieren und zu verbessern und die kamera-basierte Navigation weiter voran zu bringen.

Erste Erfolge in diesem Bereich konnte das GSOC im genannten FFR<sub>e</sub>Ac Experiment erzielen. Während der Re-Akquisition wurden täglich VBS Daten gesammelt und eine erste Version eines vom GSOC entwickelten kamerabasierten Relativ-Navigations-Filters verwendet werden (siehe 5.1.4). Die Weiterentwicklung parallel zum Betrieb hatte eine tägliche Verbesserung des Filters und damit der Navigationslösung zur Folge. So konnten die Satelliten im Zuge der Gound-in-the-loop Re-Akquisition sicher wieder zusammen geführt werden.

### 5.1.6 Flugdynamik System

Zur Entwicklung des nötigen Flugdynamik Systems (FDS) am GSOC konnten einige Prozesse aus früheren Formationsflug Missionen, wie etwa TerraSAR-X und TanDEM-X,

adaptiert werden. So mussten nur wenige Prozesse neu entwickelt werden, und daher war es möglich auch dieser Anforderung in so kurzer Entwicklungsdauer gerecht zu werden und ein stabiles und vertrauensvolles, vollautomatisches FDS bereitzustellen. Zusätzlich wurde ein Überwachungssystem zur Überwachung des Anflugs an ein passives Ziel entwickelt, das TLE-Daten der NORAD Datenbank verwendet, und dessen Zuverlässigkeit mit zusätzlichen Filtern so verbessert wurde.

### **5.1.7 Erfahrungen mit halbautomatischem Passagenbetrieb**

Zum Kerngeschäft des GSOC gehört der Betrieb von aufwendigen Raumflugmissionen bzw. der Betrieb in kritischen Missionsphasen (z.B. Launch and Early Orbit Phase, LEOP). Für diese Art von Missionen ist während der Kontaktzeiten mit Bodenstationen schon aus Gründen der Betriebssicherheit immer operationelles Personal anwesend. In Routinephasen wäre es aber schon aus Kostengründen durchaus sinnvoll, einfache operationelle Aktivitäten wenn möglich zu automatisieren, um Kosten zu reduzieren.

Mit PRISMA wurde nun ein halbautomatischer Betrieb erfolgreich durchgeführt. In Passagen ohne Aktivitäten (z.B. an Wochenenden) lief das komplette Bodensystem im Kontrollraum unbemannt mit. Alle anfallenden Daten, wie Telemetrie, Logs usw. wurden regulär aufgezeichnet und vollautomatisch an die entsprechenden internen und externen Archive verteilt. Diese Daten wurden dann wieder von schwedischer Seite nachprozessiert, sodass die gesamte Aufzeichnungs- und Verarbeitungskette Richtung Boden automatisch lief. GSOC Operatoren überprüften nur noch zwischen den Passagen den Zustand des Bodensystems und der beiden Satelliten. Die Betriebspezialisten des GSOC waren in diesen Phasen on-call für den Fall von Problemen.

### **5.1.8 Entwicklung von Betriebskonzepten für den engen Formationsflug**

Parallel zur Einrichtung des halbautomatischen Passagenbetriebs wurden Konzepte für den sicheren Betrieb der Formation im engen Formationsflug sowie der anderen Experimentschwerpunkte entwickelt und angewandt. Dazu gehörten:

- Abläufe zur Verteilung von Informationen und Benachrichtigungen
- Regeln und zugelassene Maßnahmen für das Schichtpersonal im Anomalie-Fall

Aufgrund der permanenten Präsenz von Betriebspersonal im Multimissionsbetrieb wurden automatisierte Benachrichtigungsmechanismen, wie sie bereits für andere Missionen am GSOC existieren, für PRISMA nicht implementiert, könnten aber bei zukünftigen Missionen, wie DEOS, direkt implementiert werden.

### **5.1.9 Durchführung von aufeinanderfolgenden Passagenzügen**

Sich überlappende Sichtbarkeitsbereiche von Bodenstationen treten beim Betrieb von Satelliten immer wieder auf und gehören quasi zum operationellen Standard. Dabei sind die Zeiten für das Umschalten von einer Bodenstation zur nächsten in der Regel nicht kritisch. Im Hinblick auf Missionen mit hohen Anforderungen an Gesamtdauer und Unterbrechungsfreiheit (z.B. Telepräsenzbetrieb und Kontakt zu vorher überflogenen und nachfolgenden Bodenstationen bei DEOS) von aufeinanderfolgenden Passagen ging es darum, mit PRISMA aussagekräftige Werte für diese Umschaltzeiten zu erhalten.

Zu diesem Zweck wurden mehrere Tests mit aufeinanderfolgenden Passagen gemacht und die Zeiten für die Umschaltungen ermittelt. Fig. 5-3 zeigt einen solchen Test mit Verwendung der Stationen Weilheim, Kiruna und Inuvik. Dabei ließ sich ermitteln, dass beim Wechsel von einer Station zur nächsten die Umschaltung der Telemetrie verlustfrei, also ohne Unterbrechung realisierbar ist. Unterbrechungen beim Kommandieren sind operationell und technisch bedingt. Im Test konnten aber mit untrainierten Beteiligten Unterbrechungen im Uplink von weniger als 40s erreicht werden. Damit steht für weitere Betrachtungen in dieser Thematik ein erster belegbarer Orientierungswert fest.

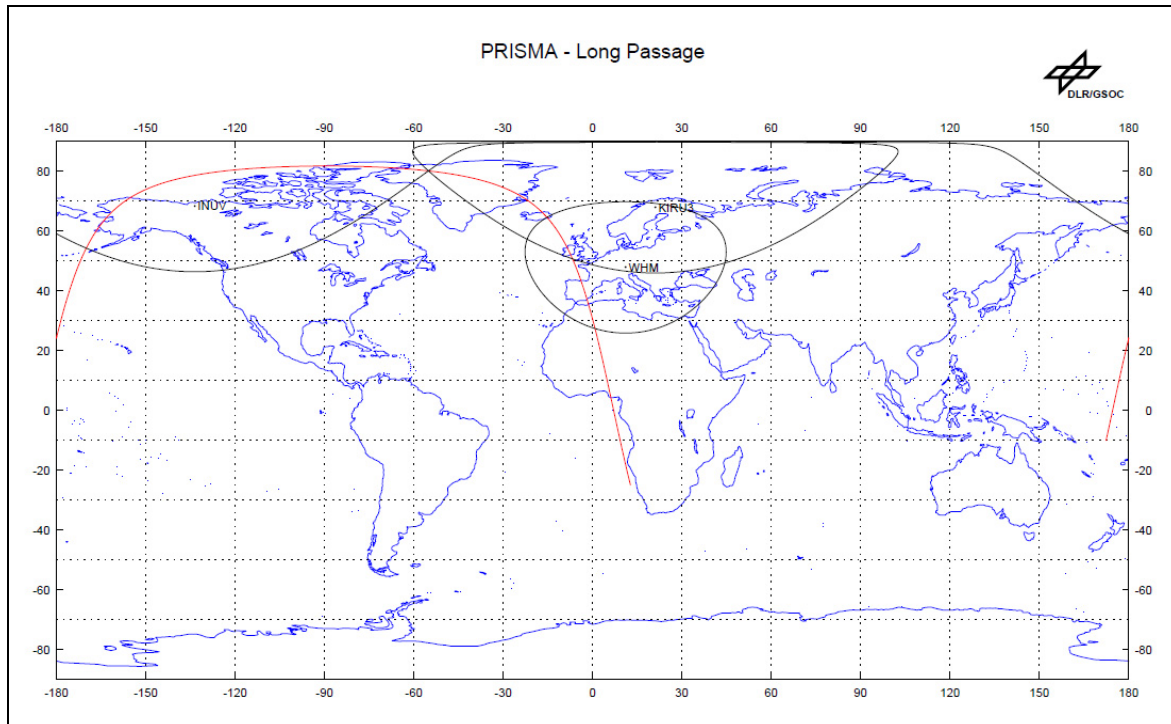


Fig. 5-3 Test-Passage vom 08.06.2011 mit Weilheim, Kiruna und Inuvik

### 5.1.10 Angepasste Projektziele

Folgendes ursprünglich gesetzte Vorhaben-Ziel wurde entsprechend den im Laufe des Projekts gemachten Erfahrungen angepasst:

- Kollisionsvermeidung durch schnelle Wahl der „richtigen“ Ausweichmaßnahme

Im Rahmen der Einarbeitung in die Betriebsabläufe und die Funktionsweise von PRISMA wurde klar, dass zumindest für die PRISMA Satelliten manuelle Abbruchmechanismen nicht vorzusehen und auch nicht sinnvoll waren. PRISMA arbeitet weitgehend autonom ohne unmittelbare Kontrolle durch den Boden. Die Implementierung eines Kollisionsdetektors basierend auf GPS Navigation und Propagation an Board erlaubt es MANGO eigenständig zu entscheiden ob Ausweichmaßnahmen eingeleitet werden müssen. Da die meisten Experimente, auch die mit der größten Annäherung, zu 90% außerhalb der Stationssichtbarkeiten stattfanden, ist ein schnelles Eingreifen auch gar nicht möglich. Kommandos zum Abbruch bzw. Einstellen einer sicheren Konfiguration standen zur Verfügung, die

---

Aktion selbst wurde aber vom Satelliten autonom umgesetzt. Insofern ist es als Erkenntnis im Hinblick auf DEOS zu überdenken, ob und wie entsprechende Ausweichmaßnahmen durch den Boden zu implementieren sind.

## 5.2 Ergebnisse der Bodensegmententwicklung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die erzielten Ergebnisse, die im Rahmen der Entwicklung des PRISMA Bodensegments gemacht wurden.

### 5.2.1 Bodensegmententwicklung

#### 5.2.1.1 Technische Aspekte

Es war von vornherein klar, dass eine PRISMA Mission nur unter hohem Zeitdruck einzurichten und durchzuführen sein wird. Zeiten für Integration und Abnahme waren extrem kurz. So konnte z.B. erst wenige Tage vor dem Handover eine gute Qualität der Datenverbindung nach Kiruna erreicht werden und das auch nur mit erhöhtem Einsatz der Netzwerk-Kollegen des GSOC. Die Anbindung der externen Stationen (Kiruna und Inuvik) stellte mit einer nominalen Downlink-Rate von 1Mbit/s generell eine besondere Herausforderung dar, weil die Verbindungen teilweise über öffentliche Netze und Internet laufen.

#### 5.2.2 „Klonen“ des schwedischen Bodensegments

Erwartungsgemäß ließen sich nicht alle Komponenten des schwedischen Bodensegments direkt im GSOC etablieren. Das TM/TC-System RAMSES ließ sich sehr leicht installieren, die Einrichtung der Datenanbindungen war aber komplexer. Hauptgrund hierfür war die unterschiedliche Philosophie der LAN-Strukturen. Am GSOC sind operationelle Datenbereiche und normale Office- und Internet-Funktionen streng getrennt, in Solna nicht. So mussten entsprechende Transferprozesse und Mechanismen eingerichtet werden, um den Transfer von operationellen Daten zum externen Datenarchiv in Stockholm zu gewährleisten. Zur Nutzung des Simulators in Solna musste RAMSES innerhalb des GSOCs zusätzlich im Office-LAN eingerichtet werden.

Die bei SSC vorhandene Mission Toolbox wurde nicht zur Verfügung gestellt. Diese enthält verschiedene Programme zur automatischen Erstellung von Routineprozeduren und Betriebsprodukten. Diese wurden am GSOC in einem Reverse Engineering Prozess nachgebildet.

Ebenso erforderte die Anbindung von Kiruna für den GSOC-Betrieb zusätzlichen Aufwand. Für eine verlustfreie Datenübermittlung von/zur Station war eine separate Hardware an der Station erforderlich. Zur ORR war eine verlustfreie Datenanbindung noch nicht sicher und so wurde eine separate Leitung in Auftrag gegeben, um Verbindungsengpässe auszuschließen.

#### 5.2.3 Erfahrungen mit TM/TC System RAMSES

Das von SSC entwickelte TM/TC System RAMSES konnte als Beistellung für den PRISMA-Betrieb am GSOC eingerichtet und im laufenden Betrieb getestet werden. RAMSES erwies sich als schnell einzurichten und leicht zu betreiben. Die Betriebssicherheit und Stabilität der Komponenten selbst war aber recht unterschiedlich. So gibt es eine Reihe von Punkten, die

verbesserungswürdig sind, bzw. vor einer Anwendung für andere Missionen besser werden sollten.

## 5.2.4 Einrichtung der Inuvik-Bodenstation für PRISMA

Die Einbindung von Inuvik als weitere Bodenstation hat dem Projekt erhebliche Vorteile gebracht und den Flugbetrieb erleichtert. Dadurch konnte nicht nur der Flugbetrieb zu normalen Bürozeiten durchgeführt werden. Es wurde auch die Remote-Unterstützung durch die schwedische Seite, die es ja auch nur zu Bürozeiten gab, wesentlich besser ausgenutzt.

## 5.2.5 Beteiligung durch das Raumfahrtmanagement des DLR

Die Zusammenarbeit von GSOC und RfM im Rahmen der Zuwendungsbeantragung und der Missionsvorbereitung war sehr konstruktiv und zielführend. Die Arbeiten für die von RfM durchgeführten ORR waren zwar eine zusätzliche Arbeitsbelastung für das Team, auf der anderen Seite aber ein klarer Beweis für die Ernsthaftigkeit des Vorhabens und des Ziels, einen sicheren Missionsbetrieb am GSOC zu gewährleisten und notwendige Verbesserungen zu realisieren.

Die aktive Teilnahme von Vertretern von RfM bei den Reviews wurde von den schwedischen Kollegen sehr positiv gesehen.

## 5.3 Veröffentlichungen

Basierend auf den Ergebnissen der PRISMA Flugbetriebsdurchführung wurden folgende Veröffentlichungen gemacht:

<u>Art der Veröffentlichung</u>	<u>Titel</u>	<u>Autoren</u>
<u>Vortrag auf der 2. Nationale Konferenz zur Raumfahrt-Robotik, Berlin, März 2012</u>	<u>PRISMA Flugbetrieb durch das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum</u>	<u>R. Faller</u> <u>B. Schlepp</u> <u>A. Ohndorf</u>
<u>Artikel im DLR Magazin, Ausgabe 133, März 2012</u>	<u>Paarlauf mit Tango und Mango</u>	<u>M. Braun</u>
<u>Co-Autoren für ein Paper auf der SpaceOps 2012 in Stockholm, Juni 2012</u>	<u>PRISMA Mission Control: Transferring Satellite Control Between Organisations</u>	<u>T. Karlsson (OHB-SE)</u> <u>N. Ahlgren (OHB-SE)</u> <u>R. Faller</u> <u>B. Schlepp</u>
<u>Paper auf der IAC2012 in Neapel, voraussichtlich Oktober 2012</u>	<u>Preparation, Handover, and Conduction of PRISMA Mission Operations at GSOC</u>	<u>R. Faller</u> <u>A. Ohndorf</u> <u>B. Schlepp</u> <u>S. Eberle</u>

## 5.4 Zusammenfassung

Das Vorhaben, eine Raumflugmission mitten im laufenden Betrieb mit kurzer Vorbereitungszeit ans GSOC zu holen und durchzuführen, muss als erfolgreich gewertet werden. Trotz nicht optimaler Rahmenbedingungen und des erheblichen Zeitdrucks wurde das Bodensegment eingerichtet und ein erfolgreicher Experimentbetrieb realisiert. Die Zielsetzung der Durchführung von Experimenten zu Rendezvous und engstem

---

Formationsflug konnte erfüllt werden. Gleichzeitig wurden Betriebserfahrungen gesammelt, die für zukünftige Missionen wie DEOS von großem Nutzen sein werden.

Es hat sich aber auch gezeigt, dass sich die Vorbereitungsphasen mit den Teilaufgaben Einrichtung, Test und Validierung sowie Simulationen und Training nicht beliebig verkürzen lassen. Es konnte teamübergreifend nicht das Know-How über die Satelliten erlangt werden, wie sonst bei anderen Missionen üblich. So führte das Flugbetriebsteam zwar den Betrieb erfolgreich durch, war aber abhängig vom Subsystem in Detailfragen und bei Problemen auf die Unterstützung durch die schwedische Seite angewiesen.

## Appendix A Projektzeitplan

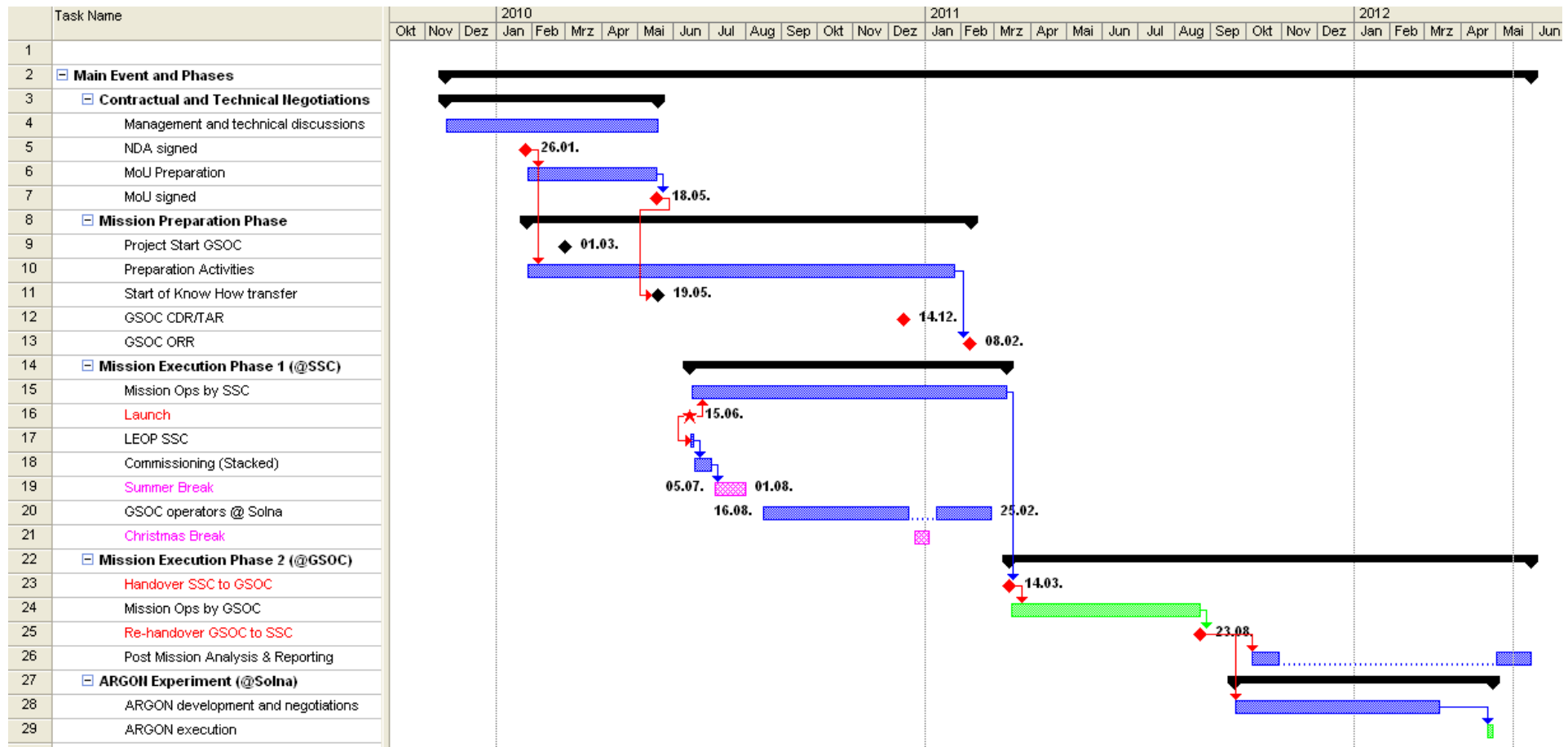


Fig. 5-4 Projektzeitplan und wichtige Meilensteine