

# DIE SATELLITENMISSION BIRD ALS MEILENSTEIN FÜR EIN BORDGESTÜTZTES AUTONOMES NAVIGATIONSSYSTEM

E. Gill, O. Montenbruck, Th. Rupp, K. Brietz\*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V., Raumflugbetrieb,  
D-82230 Wessling, eberhard.gill@dlr.de

\*DLR, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, D-12489 Berlin

## 1. ÜBERSICHT

Der deutsche Mikrosatellit BIRD ist mit einem autonomen Navigationssystem ausgestattet, das mithilfe von GPS-Positionslösungen eine bordgestützte Bahnbestimmung in Echtzeit ermöglicht. Neben der Struktur des Navigationssystems werden die Algorithmen vorgestellt, die erforderlich sind, um eine bessere Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung zu erreichen, als dies ausschließlich mit GPS-Positionslösungen möglich ist. Das BIRD-Navigationssystem trägt dabei erheblich zur Steigerung der Bordautonomie bei, da es bordgestützte Positionsvorhersagen erlaubt. Damit wird eine Geokodierung von Satellitenbildern bereits an Bord möglich, wodurch sich die Nachprozessierung der Bilddaten am Boden erheblich vereinfacht und beschleunigt. Ferner reduziert sich der Aufwand für den Satellitenbodenbetrieb, was das Navigationssystem besonders attraktiv für zukünftige hoch-autonome Satellitenmissionen macht.

## 2. EINLEITUNG

Der zunehmende Einsatz von GPS-Empfängern bei kommerziellen und wissenschaftlichen Satellitenmissionen beschleunigt die Entwicklung bordgestützter autonomer Navigationssysteme. Deren Anwendungsbereich reicht dabei von der Geokodierung von Nutzlastdaten an Bord bei Erdbeobachtungsmissionen über die bordgestützte Einsatzplanung von Experimenten bis hin zur bordautonomen Bahnhaltung mittels eines Antriebssystems. Autonome Navigationssysteme kommen unter anderem bei den französischen SPOT-Satelliten und der europäischen PROBA-Mission zum Einsatz.

Bei der deutschen Kleinsatellitenmission BIRD wird das am GSOC entwickelte Onboard Navigation System (ONS) eingesetzt. Hauptaufgabe des ONS ist die Bereitstellung aktueller Positionsinformation für die Lageregelung. Während die inertielle Satellitenlage mithilfe von zwei Sternkameras und einem 3-Achsen-Gyroskop bestimmt wird, kann aus den ONS-Positionsdaten die Nadirrichtung ermittelt werden, die für die Aufnahmen der Erdoberfläche durch eine Stereokamera und zwei Infrarot-Sensoren notwendig ist. Darüber hinaus ermöglicht das ONS die bordgestützte Geokodierung von Bilddatenprodukten, wie sie im Rahmen eines Klassifikationsexperiments an Bord entstehen. Schließlich ermöglicht die bordseitige Geokodierung eine Beschleunigung des Auswertezyklus der Bilder am Boden.

Im folgenden werden die Grundzüge der BIRD-Mission vorgestellt. Daraus leiten sich die Anforderungen an das ONS ab, sowie die geeigneten Kräfte- und Messmodelle einschließlich des ONS-Software-Konzeptes. Das besondere Augenmerk gilt dabei einem realistischen Simulationsszenario, das zur Verifikation des ONS-Systems dient. In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse einer Hardware-in-the-Loop-Simulation vorgestellt. Schließlich werden die Konsequenzen aus der unlängst erfolgten Abschaltung der GPS-Signaldegradierung Selective Availability (SA) diskutiert.

## 3. DIE BIRD-MISSION

BIRD ist eine vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) finanzierte Kleinsatellitenmission. Die Entwicklung von BIRD wird ferner unterstützt durch die Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) und DaimlerChrysler Aerospace.

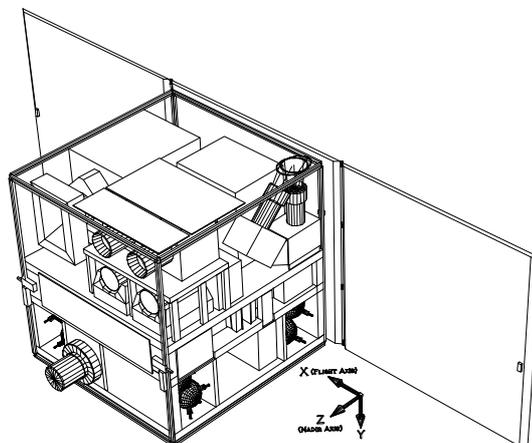


BILD 1. BIRD Flugkonfiguration

### 3.1 Missionsziele

Die Satellitenmission BIRD (Bi-Spectral Infrared Detection) dient der weltraumgestützten Detektion und Klassifikation von terrestrischen Infrarotquellen vom Welt- raum aus mithilfe einer neuen Generation von Infrarot-Flächensensoren. Zu diesem Zweck kommt ein bispektrales gekühltes Infrarot-Sensorsystem (MIR/TIR) zum Einsatz, mit dem Infrarotquellen, wie Wald- und Buschbrände, Vulkanausbrüche oder brennende Ölfelder

nachgewiesen werden können. Ferner wird der Wide-Angle Optoelectronic Stereo Sensor (WAOSS) für die Vegetationsanalyse und die Feuerklassifikation verwenden

Sonne ausgerichtet sein. Für die Bildaufnahmesequenzen wird der Satellit jedoch in den Earth-Pointing-Mode gedreht, in dem die Antennen und die Nutzlast in Nadirrichtung

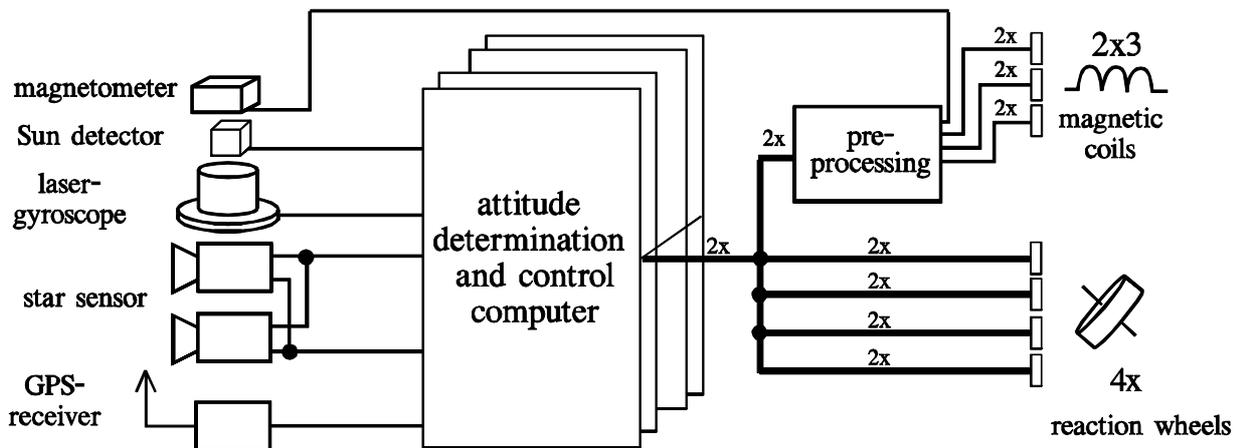


BILD 2 Blockschema des ACS-Systems

det. Basierend auf einer Klassifikation mithilfe eines neuronalen Netzwerkes wird ferner eine bordgestützte thematische Datenprozessierung erreicht.

### 3.2 Satellitenstruktur

Der dreiachs-stabilisierte Satellit (BILD 1) ist eine Neuentwicklung des DLR. Er besteht im wesentlichen aus einer kubischen Struktur mit einer Kantenlänge von 50 cm und zwei entfaltbaren Solarflächen. Die gesamte Satellitenmasse beträgt, zusammen mit Nutzlast und dem Adapter zur Trägerrakete, weniger als 100 kg. Die Nutzlastinstrumente, als auch die S-Band-Antenne für die Kommunikation mit den Bodenstationen, sind in die +z-Richtung orientiert.

### 3.3 Bird-Bahnparameter und Missionsablauf

Die BIRD-Mission ist als Kleinsatellitenmission für einen Piggyback-Start konzipiert. Die Mission befindet sich derzeit in der Phase C/D.

Die aktuelle Planung geht von einem Start mit der indischen Trägerrakete PSLV-C3 Anfang des Jahres 2001 aus. Dabei wird BIRD in eine kreisförmige sonnensynchrone Erdumlaufbahn mit einer Bahnhöhe von 572 km und einer Inklination von 98.7° eingeschossen. Die lokale Zeit des Knotendurchgangs beträgt 10:30 Uhr. Der Satellitenbetrieb wird in der einjährigen Missionszeit vom DLR Satellitenkontrollzentrum in Oberpfaffenhofen durchgeführt.

### 3.4 Lagekontrollsystem

Das BIRD Lagekontrollsystem (ACS) unterstützt im wesentlichen zwei Lagemodi:

- den Sun-Pointing-Mode
- den Earth-Pointing-Mode.

Den überwiegenden Teil des Orbits wird BIRD in einer inertial-festen Orientierung mit den Solarzellen auf die

tion orientiert sind. Der Earth-Pointing-Mode wird für eine typische Dauer von 20 Minuten aufrechterhalten, bevor der Satellit zum Aufladen seiner Batterien wieder in den Sun-Pointing-Mode schwenkt.

Die Anforderung an die Lagebestimmungsgenauigkeit beträgt 0.2 Bogenminuten, während die Ausrichtungsgenauigkeit in jeder Achse 7 Bogenminuten ( $3\sigma$ ) beträgt. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, umfasst das ACS die folgenden Komponenten (BILD 2):

- Sternsensoren (Neuentwicklung)
- 3-Achsen Laserkreisel
- Sonnendetektoren für den Safe-Mode
- 3-Achsen Magnetometer
- Reaktionsräder (Neuentwicklung)
- Magnetspulen (Neuentwicklung)
- GPS-Empfänger
- Onboard Navigation System (S/W, Neuentwicklung)
- Satelliten-Bord-Computer SBC.

## 4. DAS ONBOARD NAVIGATION SYSTEM

### 4.1 Funktionale Anforderungen

Die inertielle Lage des BIRD-Satelliten basiert auf den Daten der beiden Sternkameras. Um jedoch die Nutzlastsensoren im Earth-Pointing-Mode in Nadirrichtung zu orientieren, ist die Kenntnis der inertialen Satellitenposition (bzw. äquivalente Darstellung) erforderlich. Zu diesem Zweck stellt das ONS dem ACS die Lage als Quaternionen zur Verfügung, die die Orientierung des sogenannten local-horizontal local-vertical-Systems (LHLV) bezüglich des inertialen True-of-Date Systems angeben. Die Quaternionen sollen einen Lagefehler von maximal 0.5 Bogenminuten beinhalten, entsprechend einem inertialen Positionsfehler von 1 km (TAB. 1). Da andererseits der GPS-Empfänger während der Kamera-Aufnahmesequenz aus energetischen Gründen ausgeschaltet ist, müssen mithilfe des ONS Quaternionen über einen Zeitraum von bis zu 30 Minuten vorhergesagt werden.

Eine weitere Anforderung an das ONS resultiert aus dem BIRD-Nutzlastdatensystem (Payload Data Handling

PDH), das eine Geokodierung der Bilddaten mit einer Genauigkeit eines halben Pixels, entsprechend 90 m bei einer Bahnhöhe von 570 km, vorsieht. Wie beim ACS sollen auch für das PDH während des GPS-freien Zeitraums von maximal 30 Minuten Positionsdaten bereitgestellt werden.

Schließlich ist ein stabiles Backup-Konzept erforderlich, das eine Unterstützung von ACS und PDH selbst dann garantiert, wenn der GPS-Empfänger ausfällt.

TAB. 1 Anforderungen an das Onboard Navigation System

Ursprung	ACS	PDH
Datentyp	LHLV-Quaternion	Position
Genauigkeit	0.5 arcmin	90 m
Bezugssystem	True-of-Date	WGS84
Verfügbarkeit	Echtzeit	Echtzeit
Dauer	30 Minuten	30 Minuten

## 4.2 GPS-Empfänger

Die GPS-Positionsdaten, die das ONS als Messungen nutzt, liefert ein Empfänger des Typs GPS Embedded Module III (GEM-S) [1] von Rockwell Collins. GEM-S ist ein SPS-Empfänger mit fünf Kanälen, der die C/A- und P-Kodes auf der Frequenz L1 (1575.42 MHz) empfängt. Die physikalische Dimension des GEM-S entspricht etwa der eines CD-ROM-Laufwerkes. Der Empfänger hat eine Masse von 0.4 kg und verbraucht im Normalbetrieb eine elektrische Leistung von etwa 6.5 W. Für BIRD wird eine bidirektionale asynchrone RS422-Schnittstelle mit einer Datenrate von 9600 Baud verwendet.

Neben der Bereitstellung von Positionsdaten für die bordgestützte Bahnbestimmung wird das One-Pulse-Per-Second (1PPS) Signal des GEM-S-Empfängers zur Synchronisierung der BIRD Borduhr genutzt.

## 4.3 Kräftemodell und Bezugssysteme

Das Kräftemodell des ONS wurde so konzipiert, dass eine Positionsgenauigkeit von 90 m innerhalb eines Zeitraums von 30 Minuten nach der letzten verfügbaren GPS Positionslösung erreicht wird. Bei einer Bahnhöhe von 570 km kann diese Anforderung nur gewährleistet werden, wenn die Kugelflächenfunktions-Entwicklung des Gravitationsfeldes der Erde komplett bis zum Grad und zur Ordnung 10 berücksichtigt wird. Dagegen muss der Widerstand der Hochatmosphäre, der solare Strahlungsdruck sowie die Drittkörperstörungen von Sonne und Mond nicht berücksichtigt werden [2].

Während die GPS-Messungen in einem erdfesten WGS84-System gegeben sind, beziehen sich die Quaternionen, die an das ACS übertragen werden, auf ein True-of-Date (TOD) System. Die zur Transformation vom

WGS84- zum TOD-System erforderliche Matrix beinhaltet dabei aus Gründen der Einfachheit, Robustheit und Effizienz nur die Sternzeit-Matrix unter der Annahme  $UT1=UTC$  [3]. Andererseits basiert das ACS auf Daten der Sternkameras, welche die Quaternionen im International Celestial Reference Frame (ICRF) zur Verfügung stellt. Die Transformation vom ICRF zum TOD-System, die innerhalb des ACS erforderlich ist, berücksichtigt dabei nur die Präzession, während die Nutation vernachlässigt werden kann.

## 4.4 Numerische Integration der Bewegungsgleichung und Berechnung der Übertragungsmatrix

Zur numerischen Integration der Bewegungsgleichungen des Satelliten verwendet das ONS einen ausgefeilten Algorithmus, der das übliche Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung (RK4) um eine Richardson-Extrapolation und eine Hermit-Interpolation erweitert. Er umfasst insgesamt zwei elementare RK4-Schritten der Länge  $h$  und einen elementaren RK4-Schritt der Länge  $2h$ . Das resultierende Integrationsverfahren ist von 5. Ordnung und benötigt lediglich 5.5 Funktionsaufrufe pro Schrittweite  $h$ . Die vom ONS verwendeten Integrationsschrittweiten hängen von den Zeitpunkten ab, an denen Messungen vorliegen und können zwischen 30 und 65 s variieren.

Mit einer zusätzlichen Auswertung der Ableitung  $dy/dt$  zum Zeitpunkt  $t+2h$  sind insgesamt die Funktionswerte  $y(t)$ ,  $y(t+h)$  und  $y(t+2h)$  des Zustandsvektors sowie die zugehörigen Ableitungen bekannt, womit eine Hermit-Interpolation 5. Ordnung möglich wird. Die Hermit-Interpolation der Satellitenposition erlaubt die effiziente Berechnung einer dichten Folge von Positionsdaten, wie sie für die Geokodierung von Bilddaten erforderlich ist.

Die Übertragungsmatrix wird in der Kepler-Näherung unter Verwendung der Algorithmen von Goodyear [4] und Sheppard [5] berechnet.

## 4.5 Messmodell und Schätzkonzept

Die ONS-Bahnbestimmungssoftware behandelt die GPS-Positionslösungen als statistisch unabhängige Pseudomessungen. Das Schätzkonzept basiert dabei auf einem erweiterten Kalman-Filter, da es sich bei der Bahnbestimmung um ein hochgradig nicht-lineares Problem handelt. Der Filter-Prozess umfasst dabei eine Zeit-Update-Phase, in der die Vorhersage des Zustandsvektors aus dem vorangegangenen Schätzwert, die Berechnung der Übertragungsmatrix und die Kovarianzmatrix erfolgt. Da das verwendete Kräftemodell die komplexe Satellitendynamik nur unvollständig beschreiben kann, wird zur propagierten Kovarianzmatrix in jedem Integrationsschritt eine konstante diagonale Matrix addiert, die das Prozessrauschen beschreibt. Der Zeit-Update-Phase folgt als zweiter Schritt des Filter-Prozesses die Mess-Update-Phase, die von der Annahme unkorrelierter Positionskoordinaten  $(x, y, z)$  ausgeht. Dabei werden die Positionskoordinaten streng sequentiell behandelt, wodurch sich die Matrix des Kalman-Gewinns zu einem sechs-dimensionalen Vektor verjüngt.

#### 4.6 Prozessor-Hardware und Betriebssystem

Der BIRD-Bordrechner wird vom Institut für Computer Architektur und Software Technologie der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD/First) entwickelt. Kern des Bordrechners ist ein Motorola Power PC 823 Prozessor, der mit einer Taktrate von 48 MHz betrieben wird (ohne Gleitkomma-Arithmetik), über einen RAM-Speicher von 8 MB verfügt und verschiedene Ports

Empfänger die Signale von vier GPS-Satelliten akquiriert hat, liefert er Positionslösungen an den Bahnbestimmungs-Thread (Orbit Determination, OD), der alle 30 s ausgeführt wird. In jedem OD-Schritt wird ein Mess-Update mit den zuletzt verfügbaren GPS-Messungen durchgeführt. Schließlich erfolgt die numerische Integration des Zustandsvektors und die Berechnung der Bahnpolynome, die für ein Interpolationsintervall von 35-65 s gültig sind und dem Bahnvorhersage-Thread (Orbit Prediction, OP) übergeben werden. Im Gegensatz zum

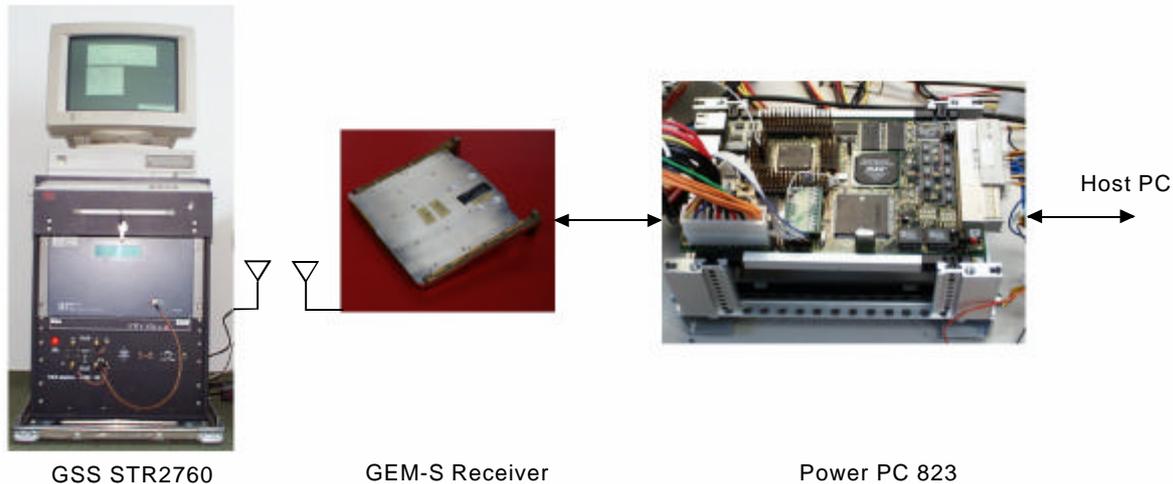


BILD 3 Hardware-in-the-Loop Simulationsszenario für die Verifikation der ONS-Software

für die externe Kommunikation aufweist.

Das verwendete Echtzeit-Betriebssystem von GMD/First ist ein Multitasking-Betriebssystem, das in besonderem Maße für Echtzeit-Anwendungen geeignet ist. Dabei werden die verschiedenen Prozesse in separaten Threads ausgeführt, welche ihrerseits unter Verwendung vordefinierter Prioritäten und Timer zentral gesteuert werden. Mit diesem Konzept lassen sich kurze Aktivitäten mit hoher Priorität (z.B. Kommandierung und Lagekontrolle) gut von langsamen und rechenintensiven Aufgaben, wie der bordgestützten Bahnbestimmung, trennen. Sowohl für das Betriebssystem, als auch für die Applikationen, wird die Programmiersprache C++ eingesetzt.

#### 4.7 ONS Software-Architektur

Ein schematischer Überblick über die ONS-Architektur ist in BILD 4 dargestellt. Dabei verteilt ein spezifischer ONS-Kommando-Dispatcher die ONS-spezifischen Kommandos sowohl zum GEM-S-Empfänger, als auch an die verschiedenen Software-Threads. Nachdem der GEM-S-

OD-Task wird der OP-Task, der effizient die aktuelle Satellitenposition basierend auf den OD-Bahnpolynomen bestimmt, alle 0.5 s ausgeführt. Die Aufspaltung der ONS-Software in unabhängige OD- und OP-Threads erlaubt dabei die Entkopplung des rechenintensiven OD-Threads vom OP-Thread, der zwar viel weniger rechenintensiv ist, aber in kürzeren Zeitabständen ausgeführt wird.

Aus Gründen eines robusten Backup-Konzeptes wird die Position des Satelliten zusätzlich aus einem Datensatz der NORAD Twoline-Elemente (TLE) berechnet, die wöchentlich mithilfe von Kommandos geladen werden. Damit wird sichergestellt, dass Positionsinformationen auch dann verfügbar sind, wenn die vom OD-Thread bestimmte Varianz der Position einen (konfigurierbaren) Grenzwert überschreitet. Mithilfe der NORAD Twoline-Elemente wird die Verfügbarkeit von Positionsdaten selbst dann sichergestellt, wenn es zu einem vollständigen Ausfall des GPS-Empfängers oder des Bahnbestimmungsprozesses kommen sollte.

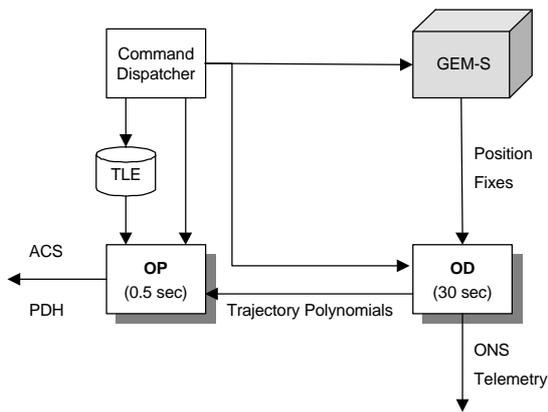


BILD 4 ONS-Software-Struktur

## 5. ONS-VALIDIERUNG

### 5.1 Hardware-in-the-Loop-Simulationen

Wie in BILD 3 gezeigt, wurde eine Validierung des ONS in einer Hardware-in-the-Loop-Simulation durchgeführt. Dazu wurden mit einem GPS-Signalsimulator realistische GPS-Signale erzeugt, die der GEM-S-Empfänger akquirierte und zur Positionsbestimmung verwendete. Die auf dem BIRD Prozessor PPC823 geladene ONS-Software konnte so unter realistischen Bedingungen getestet und validiert werden.

Simulator (GSS) von Global Simulation Systems (Modell STR2760) entworfen und implementiert. Dabei generiert der GSS ein mit C/A-Kode modulierte GPS-Signal auf der L1-Frequenz für maximal 10 Satelliten. Der Simulationszeitraum umfasst vier Stunden, wobei die inertielle BIRD Satellitenlage während der Simulation geeignet modelliert wurde und die Effekte der Selective Availability (SA) des GPS-Systems nachgebildet wurden.

Basierend auf den GEM-S Positionsdaten wurde die ONS-Software dann von einem externen PC auf den BIRD Bordrechner geladen, um eine geeignete Validierung des gesamten ONS zu ermöglichen.

### 5.2 Ergebnisse und Diskussionen

Das Ergebnis der Hardware-in-the-Loop-Simulation ist in BILD 5 dargestellt. Dazu wurden die Abweichungen der vom ONS berechneten BIRD-Ephemeride sowie der Positionsdaten des GEM-S-Empfängers von der Referenz-Ephemeride des Simulationszenarios berechnet und zusammen mit der Varianz der Position dargestellt.

Eine Konvergenz des Kalman-Filters ist nach etwa zwei Stunden erreicht, nachdem die Standardabweichung etwa 30 m erreicht hat. Es zeigt sich jedoch, dass der Filter weiterhin sensitiv für neue GPS-Positionsdaten bleibt, wie man aus den schlechteren GPS-Messungen, und dem daraus folgenden zunehmenden Positionsfehler um 14:00

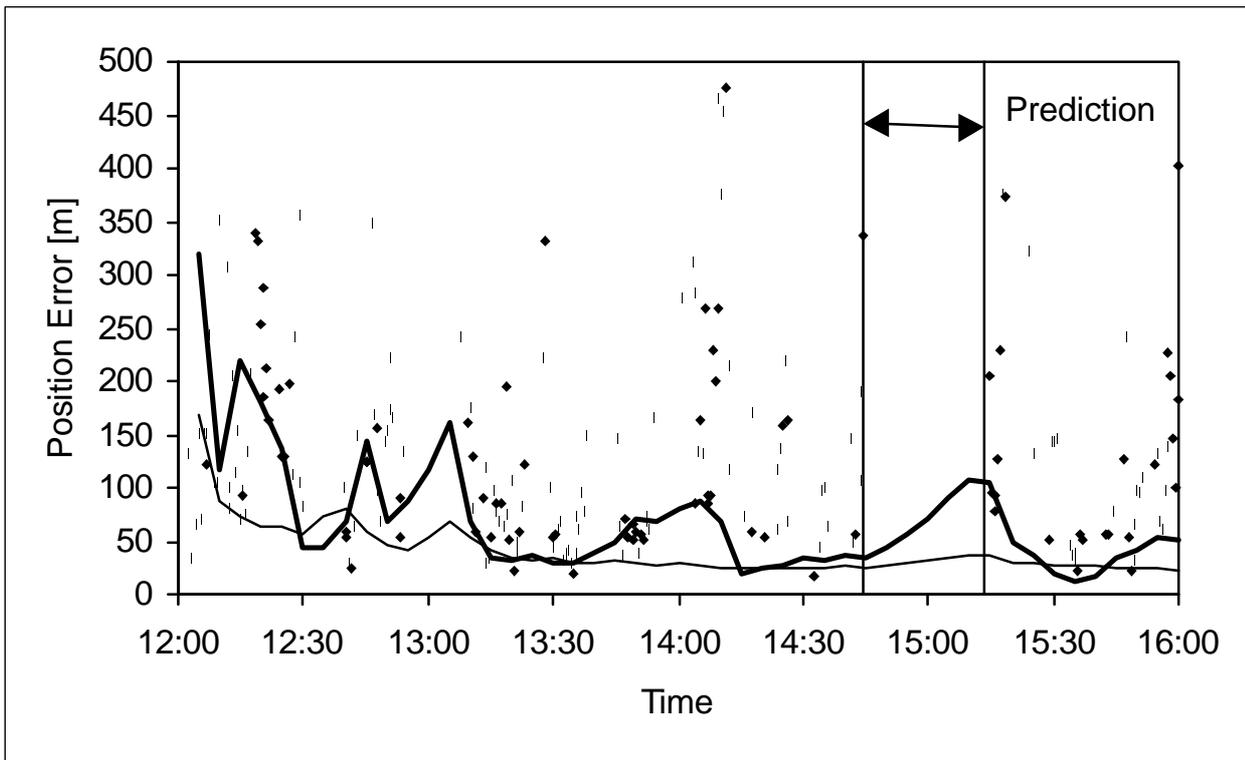


BILD 5 ONS-Ergebnisse einer Hardware-in-the-Loop Simulation über vier Stunden. Die dicke Linie gibt die Differenz der ONS-Filterergebnisse bzgl. einer präzisen Referenzephemeride an. Die dünne Linie beschreibt die Position

Für die Hardware-in-the-Loop-Simulation wurde zunächst ein realistisches BIRD-Szenario für den GPS Signal

UTC entnehmen kann.

Nach einer zwei- bis dreistündigen GPS-Betriebsphase

wird der GPS-Empfänger aus Gründen des Energiebudgets vor der Kamera-Aufnahmesequenz ausgeschaltet. Zu diesem Zeitpunkt wird der Satellit vom Sun-Pointing-Mode in den Earth-Pointing-Mode überführt, gefolgt von einer Aufnahmesequenz von etwa 10 Minuten Dauer, der schließlich wieder eine Reorientierung in den Sun-Pointing-Mode zum Aufladen der Batterien folgt. Die gesamte Dauer einer solchen Sequenz vom Verlassen bis zum Wiedereintritt in den Sun-Pointing-Mode dauert maximal 30 Minuten. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass die ONS-Positionsdaten insbesondere dann erforderlich sind, wenn der GPS-Empfänger nicht betrieben werden kann. Da während dieser Phase somit keine GPS-Daten verfügbar sind, muss die aktuelle Satellitenposition und ihre Varianz vom ONS vorhergesagt werden. Diese Situation wurde in der Hardware-in-the-Loop-Simulation für einen Zeitraum von 14:45-15:15 UTC betrachtet (BILD 5). Dabei beobachtet man eine Zunahme des Positionsfehlers von 40 m auf 100 m, die hauptsächlich auf das reduzierte Kräftemodell des Erdgravitationsfeldes zurückzuführen ist. Innerhalb dieser Bahnvorhersage-Phase wird der tatsächliche gesamte Positionsfehler durch die statistische Varianz der Position signifikant unterschätzt und damit nur unzureichend wiedergegeben.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der BIRD-Satellitenmission stellt das Onboard Navigation System (ONS) dem Lagekontrollsystem (ACS) und dem Nutzlast-System (PDH) Positionsdaten in Echtzeit zur Verfügung. Dies ermöglicht eine Nadir-Orientierung des Satelliten während der Aufnahmen der optischen und der Infrarot-Sensoren. Weiterhin unterstützt das ONS eine Geokodierung der Bilddaten bereits an Bord, was bislang bei Satellitendaten nur während einer Nach-Prozessierung am Boden möglich war. Zu diesem Zweck verwendet das ONS die GPS-Positionslösungen eines GEM-S-Empfängers, die als Messungen mithilfe eines erweiterten Kalman-Filters unter Verwendung eines komplexen Kräftemodells prozessiert werden. Für die Integration der Bewegungsgleichung wurde ein ausgefeiltes numerisches implementiert, das die Generierung einer dichten Folge von Positionsdaten mit minimalem Rechenaufwand ermöglicht.

Um realistische GEM-S-Positionsdaten zur Verifikation der ONS-Software zu erzeugen, wurde ein GPS-Signal-Simulator verwendet, der mit einem geeigneten Bahn- und Lageszenario der BIRD-Mission konfiguriert wurde. Die ONS-Software wurde anschließend auf dem PPC 823-Prozessor des BIRD Satelliten-Computers ausgeführt. Damit konnte in einer Hardware-in-the-Loop-Simulation die Verifikation des ONS-Systems nachgewiesen werden, die eine Positionsgenauigkeit von 30-40 m während des GPS Datenbogens ermöglicht. Selbst innerhalb eines Zeitraums von bis zu 30 Minuten, in dem keine GPS-Daten vorliegen, kann die Position des Satelliten mit einer Genauigkeit von etwa 100 m zur Verfügung gestellt werden.

Aufgrund einer Entscheidung des U.S. Präsidenten, die absichtliche Degradierung (SA) der GPS-Signale vom 1. Mai 2000 an zu beenden [6], verbessert sich die Genauigkeit der GPS-Positionslösungen selbst für einfache

Einfrequenz-Empfänger mit C/A-Code von etwa 100 m um eine Größenordnung auf 10 m. Diese Verbesserung betrifft gleichermaßen terrestrische und satellitengestützte GPS-Empfänger. Für den GEM-S-Empfänger auf BIRD bedeutet das eine Verbesserung der Genauigkeit der GPS-Positionslösungen auf 10 m oder besser. Im selben Maß verbessert sich auch die Genauigkeit der Bahnbestimmungsergebnisse für BIRD. Im Gegensatz dazu werden jedoch die Positionsfehler innerhalb des Bahnvorhersageintervalls nur marginal verbessert, da sie im wesentlichen durch das implementierte dynamische Kräftemodell bestimmt sind. Obwohl das ONS-Konzept die Genauigkeitsanforderungen der BIRD-Mission in jedem Fall erfüllt, ermöglicht die Abschaltung des SA-Effektes eine signifikante Verbesserung der erreichbaren bordgestützten Bahnbestimmungsgenauigkeit, und, mit einem verbesserten Kräftemodell, auch eine Verbesserung der Bahnvorhersagegenauigkeit. Dies bedeutet wiederum eine interessante Perspektive für autonomen bordgestützte Navigationssysteme auf zukünftigen Satellitenmissionen.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Rockwell Collins; *Specification for the Rockwell Collins 60J-3 GPS Embedded Module – Phase III (GEM III) Receiver CPN 822-0453-001 and 822-0453-005 for Use in the User Equipment Segment of the NAVSTAR Global Positioning System*; CPN 752-9085-001 Rev. F (1997).
- [2] Gill E., Montenbruck O., Terzibaschian T.; *An Autonomous Navigation System for the German Small Satellite Mission BIRD*; 10<sup>th</sup> AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting FI, Jan. (2000).
- [3] Montenbruck O., Gill, E., Terzibaschian Th.; *Note on the BIRD ACS Reference Frames*; DLR-GSOC TN 00-01, DLR (2000).
- [4] Goodyear W.H.; *Completely General Closed-Form Solution for Coordinates and Partial Derivatives of the Two Body Problem*; Astron. Journal, 70, No.3, April (1965).
- [5] Shepperd S.W.; *Universal Keplerian State Transition Matrix*; Celestial Mechanics, 35 (1985).
- [6] The White House; *Statement By the President Regarding the United States Decision to Stop Degrading Global Positioning System Accuracy*; Office of the Press Secretary; <http://www.whitehouse.gov/library/PressPreleases.cgi>; May, 1<sup>st</sup> (2000).