

# Unterstützung von Entwicklung und Test von Lageregelungssystemen durch Simulationsmodelle

K. Großekatthöfer, C. Raschke  
Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH,  
Albert-Einstein-Straße 12, 12489 Berlin

## Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt Techniken und Nutzen der Anwendung dynamischer Simulationsmodelle für die Definition, Entwicklung und Tests des Lageregelungssystems (Attitude Control System – ACS) eines Kleinsatelliten. Zu diesem Zweck können wir auf eine umfangreiche Bibliothek von Simulationsmodellen zurückgreifen, welche im Kontext der TET-1 (Technologie-Erprobungs-Träger) Mission des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) aufgebaut wurden. Alle Modelle bieten einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit und Flexibilität und können daher den Entwicklungsprozess in allen Projektphasen einer Satellitenmission unterstützen. Das Einsatzgebiet der Modelle erstreckt sich dabei von Machbarkeitsstudien über Konzeptplanung bis hin zu Design und Test.

Neben Umweltmodellen und der Satellitendynamik enthält die Modellbibliothek Sensoren und Aktuatoren zur Lageregelung sowie unterschiedlich Regelkonzepte und –algorithmen. Die Interoperabilität zu anderen Subsystemen ist durch definierte Schnittstellen gegeben.

Weiterhin wurden detaillierte Modelle von Reaktionsrädern entwickelt, welche unsere Produktpalette um virtuelle Reaktionsräder erweitern. Diese Modelle repräsentieren eine Emulation der Kommandostrecke, Regelmodi und Motorstrecke. Daher ermöglichen diese virtuellen Reaktionsräder die Durchführung erster Integrationstest lange vor der Lieferung der Hardware.

Dieser Artikel stellt in Kürze die TET-1 Mission des DLR vor sowie den zur Verifikation des Lageregelungssystems verwendeten Teststand. Anschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Simulationsmodelle sowie deren Einsatz anhand von unterschiedlichen Anwendungsfällen.

## 1. EINLEITUNG

Seit 1993 bietet Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH (AFW) Lösungen und Dienstleistungen im Bereich der Luft- und Raumfahrt. Neben Engineering, hochpräziser Fertigung und Umwelttests ist die Kleinsatellitentechnik einer unserer zentralen Geschäftsbereiche. Dort gehören unterschiedliche Hardware-Komponenten zu unseren Produkten, unter anderem Gyroskope und Reaktionsräder in unterschiedlichen Varianten. Als bisher größtes Kleinsatellitenprojekt hat AFW den TET-1 (Technologie-Erprobungs-Träger) Satellitenbus entwickelt, welcher als Plattform für verschiedenste Kleinsatellitenmissionen einsetzbar ist. Unter den unterschiedlichen Subsystemen eines Kleinsatelliten ist das Lageregelungssystem als sehr komplexes mechatronisches System von besonderer Bedeutung und unterliegt höchsten Anforderungen in Bezug auf Leistung und Zuverlässigkeit. Bei der Entwicklung eines ACS und dessen Test müssen viele wechselseitige Abhängigkeiten berücksichtigt werden, was einen hohen Aufwand während des gesamten Projektes bedeutet. Im Kontext der Entwicklung eingebetteter Systeme im Allgemeinen werden Simulationsmodelle erfolgreich eingesetzt für Entwicklung, Optimierung

und Test. Vor allem in der Automobilindustrie ist die Simulation ein wesentlicher Teil des Entwicklungsprozesses geworden. In der Raumfahrt wird der Trend zur simulationsbasierten Entwicklung im Wesentlichen von den großen europäischen Systemhäusern und Raumfahrtagenturen wie ESA oder DLR vorangetrieben und ist im Allgemeinen noch nicht in der Kleinsatellitenindustrie angekommen. Dennoch bieten Simulationsmodelle eine wertvolle Unterstützung gerade in diesem Bereich, da Kleinsatellitenprojekte oft mit einem geringem finanziellen Budget auskommen und einen verkürzten Zeitplan einhalten müssen. Anwendungsfälle für die Simulation finden sich in nahezu jeder Projektphase der Satellitenentwicklung (entsprechend der ECSS [1]). Schon bei Machbarkeitsstudien für Missionsanalysen und vorläufige Designentwürfe erleichtert die Simulation die Evaluierung von Konzepten. In der darauffolgenden detaillierten Definitions- und Designphase, in der Hardware-Komponenten in das System integriert werden, bieten Komponentenmodelle eine Testumgebung unter anderem für Kommunikationsschnittstellen und Datenverarbeitung schon vor der Verfügbarkeit der Hardware. Weiterhin bieten simulierte Referenzdaten eine Unterstützung in der Integrations- und Testphase. Nach dem Satellitenstart unterstützen Simulation und

Visualisierung der Satellitentelemetrie bei Analysen und Entscheidungen in der operationellen Phase. Aufgrund des erwähnten begrenzten Budgets ist die Entwicklung eines neuen Modells in jeder Phase nicht möglich und weiterhin nicht praktikabel in der Anwendung und Wartung. Desweiteren sollen alle Modelle in zukünftigen Missionen des TET-1 Bus eingesetzt werden. Demzufolge müssen die Modelle sehr flexibel und gut dokumentiert sein. Dies kann nur durch einen Modellentwicklungsprozess erreicht werden, der besonderen Wert auf Wiederverwendbarkeit und Dokumentation legt. Das staatlich geförderte Forschungsprojekt WieMod (Wieder verwendbare Modelle für die virtuelle wissensbasierte Produktentwicklung, Förderkennzeichen 01IS08015A) hat sich unter anderem mit diesem Thema beschäftigt. Angelehnt an Methoden aus der Softwareentwicklung wurde ein Entwicklungsprozess definiert, welcher Wiederverwendung in jeder Modellentwicklungsphase ermöglicht. In Abschnitt 4 wird dieser Entwicklungsprozess vorgestellt. Er wurde innerhalb des WieMod-Projektes eingesetzt, um ein generisches Simulationsmodell des TET-1 Satellitenbus zu erstellen. Dies geschah unter der Führung von AFW mit Unterstützung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Dieses Satellitenmodell ist in Abschnitt 5 beschrieben. Darüber hinaus beschreibt dieser Artikel detaillierte Modelle von Reaktionsrädern, die nach dem Entwicklungsprozess erstellt wurden und eine virtuelle Repräsentation unserer Hardware RW90-2 darstellen. Abschließend werden Anwendungsfälle für die Simulation in jeder Phase der Satellitenentwicklung vorgestellt.

## 2. TET-1 MISSION

Der TET-1 (Technologie-Erprobungs-Träger) Satellit ist die erste Mission und das Kernelement des „On Orbit Verification“ (OOV) Programms des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH ist in diesem Programm für das Design, den Bau und die Verifikation des Satellitenbusses verantwortlich. Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem Bi-Spectral InfraRed Detection (BIRD) Satelliten [3] stellt der entwickelte TET-1 Satellitenbus einen hochzuverlässigen Kleinsatellitenbus für zukünftige Low-Earth-Orbit (LEO) Missionen zur Verfügung. Aufgrund seines Aufbaus kann er leicht an verschiedene Nutzlastkonfigurationen angepasst werden. In der derzeitigen Konfiguration ist bei 70 kg Satellitenbusmasse eine Nutzlastkapazität von 50 kg vorhanden [2]. BILD 1 zeigt eine Konstruktionszeichnung des TET-1 Proto-Flight-Modells mit allen Nutzlasten.

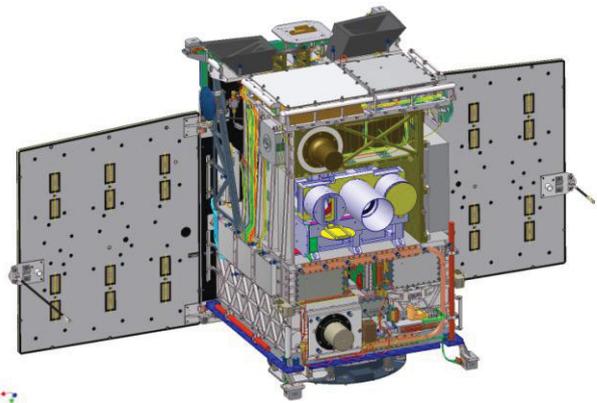


BILD 1. Proto-Flight-Model des TET-1 mit Nutzlasten

TET-1 wird im dritten Quartal 2011 vom Weltraumbahnhof Baikonur (Kasachstan) starten.

## 3. LAGERREGELUNGSTESTSTAND

Im Rahmen des TET-1 Projektes wurde zur Verifikation des Lageregelungssystems ein von der Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH entwickelter Teststand eingesetzt. Der Teststand besteht aus einem Luftlagertisch, einem Magnetfeldsimulator und einem Sonnensimulator (siehe BILD 2).

Mit dem Teststand kann das Lageregelungssystem inklusive dem dynamischen Antwortverhalten des Satelliten getestet werden.

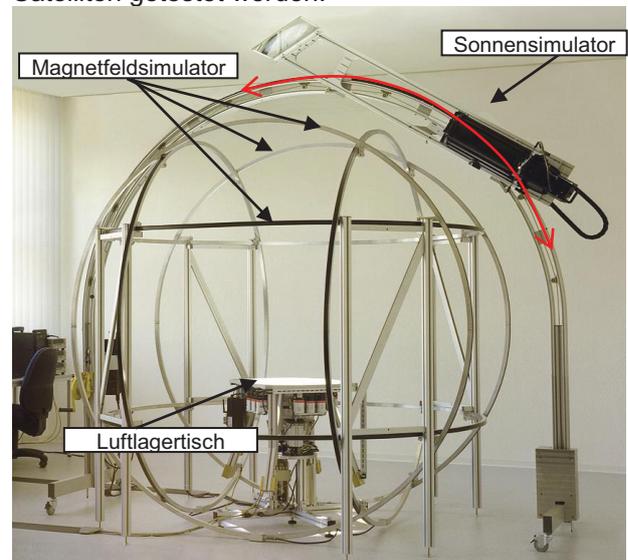


BILD 2. Übersicht Lageregelungsteststand

Der Luftlagertisch ist das Kernstück des Teststandes und besteht aus einem Präzisionsluftlager, einer Tragplattform (Aufnahme des ACS), Batterien zur Energieversorgung, Sicherheitsmechanismen und einem WLAN-Modul (Kommunikation, Kalibrierung Schwerpunkt).

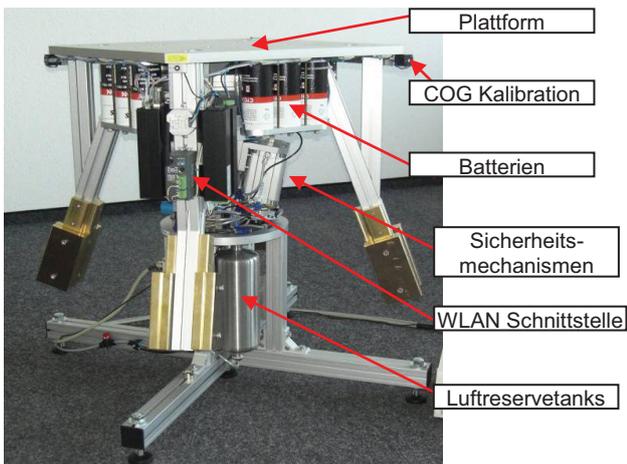


BILD 3. Luftlagertisch

Der Luftlagertisch kann um die vertikale Achse um 360° und um die horizontalen Achsen um ca. 25° rotiert werden. Auf der Tragplattform wird das ACS integriert. Im Rahmen des TET-1 wurde ein ACS-Engineering Model (EM) inklusive dem Bordrechner aufgebaut (ohne kalte Redundanz).

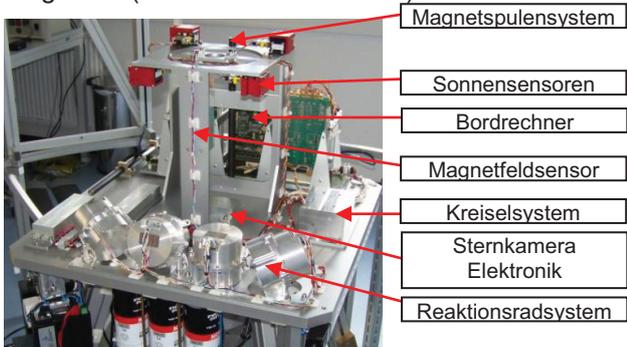


BILD 4. Trageplattform mit TET-1 EM

Der Magnetfeldsimulator besteht aus einem Helmholtz-Spulensystem und einem Steuerrechner. Mit dem System kann das lokale Magnetfeld aufgehoben werden und ein Feld entsprechend der aktuellen Orbitposition generiert werden. Mit dem Teststand wurde die Entwicklung des ACS von TET-1 unterstützt, sowie ein Teil der Verifikation durchgeführt. Beispielsweise wurden verschiedene ACS-Moden wie Ausrichtung des Satelliten zur Sonne oder auf die Erde getestet. Oder es wurde getestet, ob das ACS den Satelliten nach der Separation autonom stabilisiert (Umverteilung und Abbau Drehimpuls) und zur Sonne ausrichtet. Im Rahmen der Tests konnte neben den Algorithmen auch die Baugruppen getestet werden, so zum Beispiel die korrekte Wirkungsweise der Aktuatorssysteme. Einige der Tests wurden zusätzlich durch die Simulationsmodelle unterstützt, entweder durch Referenzdaten oder durch Visualisierung der Telemetriedaten (siehe Abschnitt 7). [7][8]

#### 4. MODELLENTWICKLUNGSPROZESS

Der Prozess zur Entwicklung der Simulationsmodelle wurde mit dem Ziel erarbeitet, hochflexible und wiederverwendbare Modelle zu liefern. Er ist ähnlich dem aus der Softwareentwicklung bekannten Wasserfallmodell aufgebaut und definiert zusätzlich zwei Rollen für den Workflow. Auf der einen Seite liefert der System- oder ACS-Ingenieur sein technisches Know-How, auf der anderen Seite setzt der Software-Ingenieur seine Techniken zur Modellierung und zum Wissensmanagement ein. Die Qualitätssicherung im Prozess wird durch sogenannte Quality Gates sichergestellt, welche einen Review-Prozess nach dem Vier-Augen-Prinzip beinhalten. Dadurch liefert jede Entwicklungsstufe gut dokumentierte Modelle auf unterschiedlichem Abstraktionsgrad. BILD 5 zeigt alle Prozessstufen und die darin erzeugten Dokumente [4].

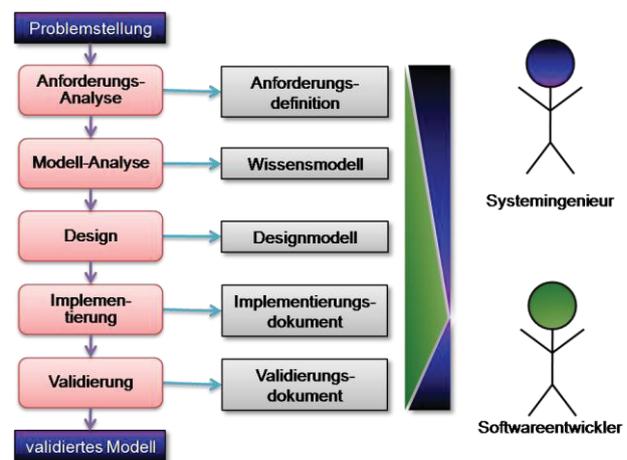


BILD 5. Modellentwicklungsprozess

Zu Beginn werden in der Problembeschreibung die Anforderungen an das Modell definiert. Das zentrale Element des Workflows ist die Modellanalyse, die eine Beschreibung des modellierten Systems in natürlicher Sprache darstellt und eine mathematische Repräsentation des Systemverhaltens liefert. Das Ergebnis dieser Phase, das (plattformunabhängige) Wissensmodell, stellt sicher, dass alle funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen erfüllt sind und dass der Modellinhalt verständlich und nachvollziehbar beschrieben ist. In der gängigen Praxis verhindert eine unzureichende Dokumentation in dieser Phase die Wiederverwendbarkeit eines Modells, da wichtige Quellen oder Randbedingungen fehlen und somit der Korrektheit des Modells kein Vertrauen geschenkt wird. Auf die Analyse folgt das Modelldesign, welches die Schnittstellen und interne Struktur des Modells definiert. Diese Definition ist noch immer eine abstrakte Beschreibung in Form einer

Modellierungssprache wie SysML und für verschiedene Simulationsumgebungen umsetzbar. In der Implementierungsphase wird das abstrakte Modell in der Zielumgebung oder -sprache formuliert, wobei Modellierungsrichtlinien und Dokumentation die Verständlichkeit des Modells sicherstellen. Abschließen beschreibt das Validierungsdokument Testdurchführung und Ergebnisse. [4]

Die technische Umsetzbarkeit des Modellentwicklungsprozesses wurde durch die Erstellung eines Simulationsmodells des TET-1 Satellitenbus gezeigt. Das Ergebnis ist eine Modellbibliothek mit mehr als einhundert Modellen unterschiedlicher Komplexität und Granularität. Alle Simulationsmodelle wurden in Matlab/Simulink implementiert. Aufgrund eines hohen Grades an Modularisierung können alle Modelle leicht zu neuen Modellvarianten rekombiniert werden und so die Modellbibliothek erweitern. Somit ist ein komplettes Baukastensystem für die Entwicklung von Lageregelungssystemen mit vorhanden. Das TET-1 Modell wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

### 5. SATELLITENMODELL

Das Modell beschreibt eine geschlossene Simulation des TET-1 Satellitenbusses. Auf der obersten Ebene, dargestellt in BILD 6, besteht das Modell aus den vier Elementen Umwelt, Satellit, Dynamik und Mission. Das Submodell Umwelt propagiert des Satellitenorbit entsprechend der SGP 4 Theorie [5] und enthält alle relevanten Weltraumobjekte und deren Einwirkung auf den Satelliten gemäß den ECSS Standards [6], während der Missionsblock den Startzeitpunkt der Mission definiert.

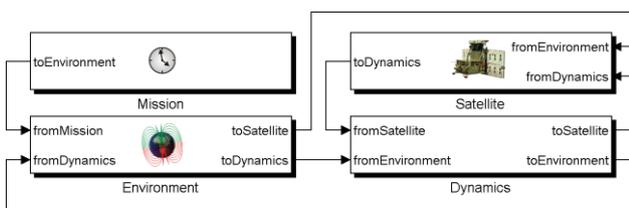


BILD 6. Grundstruktur des Satellitenmodells

Ein weiteres Submodell beschreibt die interne Konfiguration des Satelliten mit seinen Subsystemen, in unserem Fall Power, Thermal und Lageregelung. Der Dynamik-Block formuliert die Wechselwirkung des Satelliten mit seiner Umwelt, d.h. die Bewegungsgleichungen sowie dreidimensionale Bestimmung der Störmomente durch z.B. das Erdmagnetfeld. [4] Das Lageregelungsmodell beinhaltet Aktuatoren, Sensoren sowie Software und ermöglicht die Umsetzung unterschiedlicher Regelalgorithmen und Hardwarekonfigurationen. Alle Modelle von Hardware-Komponenten basieren auf den in TET-1 verwendeten Baugruppen und stellen deren Verhalten in der Detailstufe entsprechend einer

Phase B des Raumfahrt-Entwicklungsprozesses [4] dar. Ihre Verwendung zusammen mit den übrigen Subsystemen ist durch definierte Schnittstellen sichergestellt.

### 6. DETAILLIERTE MODELLE VON LAGEREGLUNGSKOMPONENTEN

Zur Erweiterung der Produktpalette der Astro- und Feinwerktechnik GmbH wurde unter Anderem ein detailliertes Reaktionsradmodell des RW 90-2 entwickelt. Das Modell besitzt dieselbe Telemetrie- und Kommandostrecke wie das reale Hardware. Im Modell sind außerdem alle vier Regelmodi, die Motor-Sensorstrecke sowie das elektrische und thermale Verhalten nachgebildet. Wichtige elektrische, thermale und physikalische Größen werden nach außen zum Umwelt- bzw. Satellitenmodell übergeben (siehe auch BILD 7). Das Modell unterstützt die Entwicklung und Tests des übergeordneten Systems schon bevor die eigentliche Hardware zur Verfügung steht. Dafür ist das Modell Realzeitfähig und kann somit bei Hardware in the Loop (HiL) Tests eingesetzt werden. Als nächster Schritt ist ebenfalls die Modellierung des Kreiselsystems geplant.

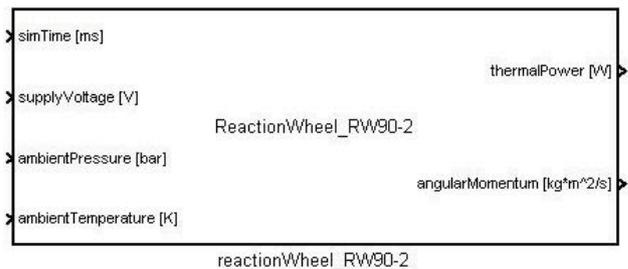


BILD 7. Detailliertes Model des Reaktionsrades

### 7. ANWENDUNGSFÄLLE DER DYNAMISCHEN SIMULATION WÄHREND DER ACS ENTWICKLUNG

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Anwendungsfälle der Simulation während der Entwicklung des Lageregelungssystems (ACS) eines Satelliten vorgestellt. Grundlage dafür bilden die wiederverwendbaren Modelle, welche den Entwicklungsprozess des Gesamtsystems hilfreich unterstützen können.

#### 7.1. Verfügbarkeitsstudie

In der TET-1 Mission ist eine hochgenaue Ausrichtung des Satelliten für einige Nutzlastoperationen (Bildaufnahmen) entscheidend. In dieser Betriebszeit muss der Satellit hochgenau auf die Erde ausgerichtet sein (Nadir Pointing). Dafür ist eine genaue Lagekenntnis erforderlich, welche nur durch den Einsatz einer Sternkamera erreicht wird. Allerdings muss dabei die möglich

Blendung der Sternkamera durch die Sonne bzw. die Erde berücksichtigt werden. Durch eine Vorstudie soll die möglichst optimale Anordnung der Sternkameraköpfe (zwei Stück) gefunden werden, so dass während des Betriebs der Nutzlast mindestens immer ein Kamerakopf nicht geblendet ist.

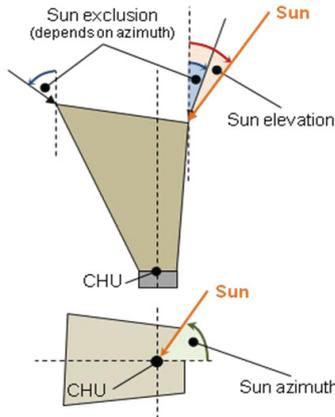


BILD 8. Sonnenausschlusswinkel in Abhängigkeit der Baffelgeometrie

Der Sonnen- bzw. Erdstreulichteinfallswinkel hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum Einen dem Satellitenorbit und zum Anderen der Anordnung der Kameraköpfe und der Baffelgeometrie (Baffel = Blende) wie auch in BILD 8 dargestellt. Durch die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Faktoren ist die Optimierung der Anordnung kein triviales Problem.

In der Studie wurden verschiedene Szenarien simuliert, dabei wurde beispielsweise die Anordnung der Köpfe variiert. Als Beispiel sind die Simulationsergebnisse in BILD 9 für den TET-1 Orbit (sonnensynchrone Bahn mit dem aufsteigenden Knoten bei 11 Uhr) dargestellt.

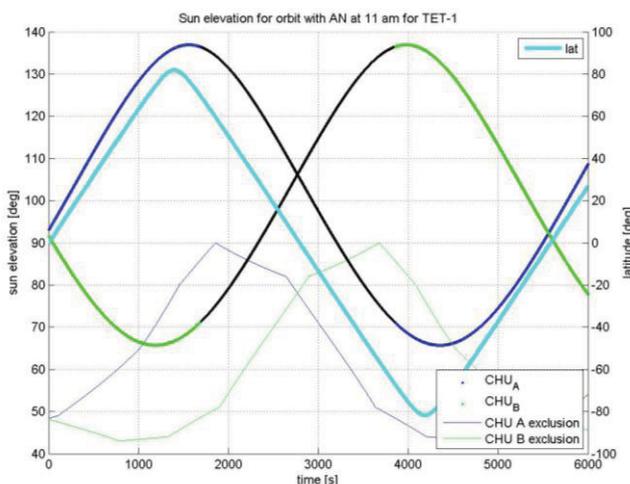


BILD 9. Sonneneinfallswinkel bzgl. Sternkamera für eine sonnensynchrone 11 Uhr Bahn

Es sind die beiden Einfallswinkel der Sonne bzgl. der

beiden Köpfe dargestellt sowie zum Vergleich die beiden Ausschlusswinkel der Köpfe. Es wurde ein kompletter Orbit simuliert. Das Ergebnis zeigt, dass mit dieser Anordnung im gewählten Orbit sogar die Messergebnisse beider Sternkameraköpfe immer zur Verfügung stehen.

## 7.2. Baugruppenintegration

Während der Systemdesignphase werden unter anderem die Schnittstellen zwischen der Software und Hardware festgelegt. Die Beschaffung kann einige Monate, in Extremfällen Jahre, dauern, so dass Entwicklungstests der Schnittstelle Software/Hardware meist erst sehr spät möglich sind. Durch die Verwendung von virtuellen Komponenten können diese Tests vorgezogen werden und insgesamt somit die Entwicklungszeit des Gesamtsystems verkürzt werden.

Es können also einzelne Hardwarekomponenten durch Modelle ersetzt werden, wodurch neben der Low Level Software (Kommunikation, Datenempfang) auch Filter oder FDIR Mechanismen (Fault Detection, Isolation and Recovery) parallel zur Beschaffung entwickelt und getestet werden können.

## 7.3. Referenzdaten für ACS Tests

Zur Verifikation des TET-1 ACS wurde der in Abschnitt 3 beschriebene Lageregelungsteststand verwendet. Während der Verifikation wurden verschiedene Szenarien nachgestellt beispielsweise Ausrichtung zur Sonne oder auf ein Ziel auf der Erde. Zum Vergleich der Testdaten wurden unter anderem Ergebnisse der Simulation herangezogen, welche dasselbe Szenario darstellten. Weiterhin kann die Reaktion des Satelliten durch eine dreidimensionale Animation dargestellt werden, wodurch sich evtl. Fehler leichter erkennen lassen. Des Weiteren kann die Simulation den Teststand ergänzen. Da beispielsweise eine 360° Rotation nicht in jeder Achse möglich ist und folglich nicht jedes beliebige Szenario getestet werden kann, kann an dieser Stelle der Test durch die Simulation ergänzt werden.

Ein Beispiel für die Unterstützung der Verifikation durch die Simulation ist in BILD 10 dargestellt. In dieser Grafik wurden die gemessene und die simulierte Drehrate des Satelliten während eines Target Pointing (Ausrichtung auf ein beliebiges Ziel auf der Erde, in diesem Fall der Nordpol) miteinander verglichen. Die Verifikation der Testergebnisse alleine anhand der Messergebnisse ist sehr schwer (aus Sicht des unbeweglichen Teststandes bewegt sich die Erde um den Satelliten). Durch den Vergleich mit der Simulation kann sehr gut geprüft werden, inwieweit das Verhalten des Satelliten/Testobjektes vom erwarteten Idealverhalten abweicht.

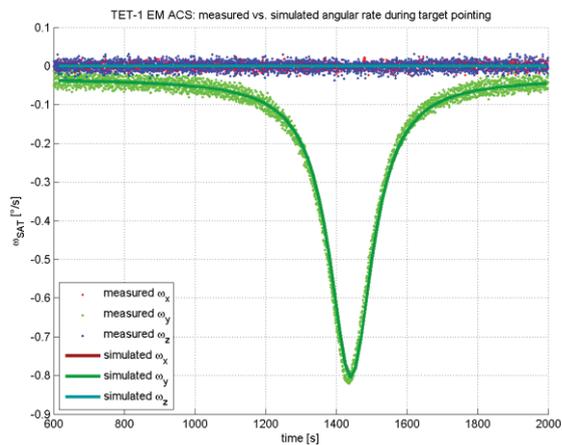


BILD 10. Gemessene und simulierte Satellitendrehrate während des Target Pointing Modes

#### 7.4. Visualisierung von Telemetriedaten

Neben der Definition, Design, Integration und Testphase kann die Simulation auch zur Visualisierung der Telemetrierwerte angewendet werden. So zum Beispiel sogar während des Betriebes des Satelliten, um am Boden die Bewegungen des Satelliten nachvollziehen zu können.

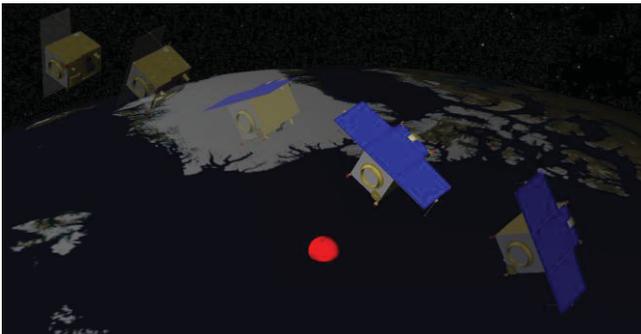


BILD 11. Visualisierung von TET-1 während des Beobachtens des Nordpols

Die Darstellung der Satellitentelemetrie durch eine 3D Animation (BILD 11) hilft den Satellitenzustand schnell und zuverlässig zu bewerten und kann so Entscheidungen beschleunigen. Vor allem bei unerwartetem Verhalten oder unerwarteter Lage und kurzen Kontaktzeiten bietet die Visualisierung ein Vorteil.

Aktuell ist die „On-Line“ Verbindung zwischen der Simulations- und Visualisierungssoftware zum TET-1 Downlink Datenstrom in Bearbeitung und soll zur Unterstützung während der Start- und Inbetriebnahmephase von TET-1 verwendet werden.

#### LITERATUR

- [1] ECSS-M-ST-10C Space project management - Project planning and implementation, ESA Std., Rev. 1, März 2009. [Online] [www.ecss.nl](http://www.ecss.nl)

- [2] S. Roemer, S. Eckert, S. Ritzmann, W. Bärwald, Der TET-1 Satellitenbus - Ein hochzuverlässiger Bus für das OOV-Programm und andere LEO Missionen
- [3] K. Brieß, W. Bärwald, H. Kayal, and W. Halle, The BIRD mission, 5th ONERA-DLR Aerospace Symposium ODAS 2003, Toulouse, Frankreich (2003)
- [4] V. Schaus, K. Großekatthöfer, D. Lütke, and A. Gerndt, Collaborative Development of a Space System Simulation Model, COMETS 2011 - 2nd International Track on Collaborative Modeling and Simulation, Paris, Frankreich (2011)
- [5] D. Vallado, P. Crawford, R. Hujsak, and T.S. Kelso, Revisiting Spacetrack Report #3: Rev 1, AIAA 2006-6753-Rev1, [Online] <http://celestrak.com>
- [6] ECSS, ECSS-E-ST-10-04A Space Engineering - Space Environment, ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements and Standards Division, Noordwijk, Die Niederlande, November 2008
- [7] C. Raschke, K. Großekatthöfer, S. Roemer: Test bed for verification of attitude control system; 28th International Symposium on Space Technology and Science (2011)
- [8] Z. Yoon, T. Terzibaschian, C. Raschke: Optimal Three-Axis Attitude Control Design, Simulation and Experimental Verification for Small Satellites Using Magnetic Actuators; Small Satellites Systems and Services - The 4S Symposium (2008)