

Titel: Schlussbericht "Gekoppelte Systeme für zukünftige Oberstufen - Entwicklung eines
Title: Softwaretools"
DLR FKZ 50 RL 0723

Dokumenten Typ:
Document Type:

Konfigurations-Nr.:
Configuration Item No.:

Referenz- Nr.:
Reference No.:

Klassifikations-Nr.:
Classification No.:

Lieferbedingungs-Nr.:
DRL/DRD No.:

Freigabe Nr.:
Release No.:

Gruppierung (Dok.):
Group (Doc.-related):

Gruppierung (Version):
Group (Version-related):

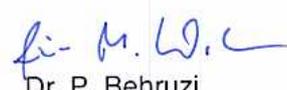
Thema:
Subject:

Kurzbeschreibung:
Abstract:

Autor: 
Prepared by: F. De Rose

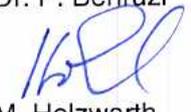
Org. Einh.: TEB12
Organ. Unit:

Unternehmen: Astrium GmbH
Company:

Geprüft: 
Agreed by: Dr. P. Behruzi

Org. Einh.: TEB12
Organ. Unit:

Unternehmen: Astrium GmbH
Company:

Genehmigt: 
Approved by: M. Holzwarth

Org. Einh.: TEB12
Organ. Unit:

Unternehmen: Astrium GmbH
Company:

Genehmigt:
Approved by:

Org. Einh.:
Organ. Unit:

Unternehmen:
Company:

Daten/Dokument-Änderungsnachweis/Data/Document Change Record (DCR)

| Ausgabe Issue | Datum Date | Betroffener Abschnitt/Paragraph/Seite Affected Section/Paragraph/Page | Änderungsgrund/Kurze Änderungsbeschreibung Reason for Change/Brief Description of Change |
|------------------|---------------|--|---|
| 1 | 23.12.2010 | Alle | Erstellung der ersten Ausgabe |

Inhaltsverzeichnis/Table of Contents (ToC)

| | |
|--|-----------|
| 1. EINLEITUNG | 4 |
| 2. REFERENZDOKUMENTE..... | 5 |
| 3. KURZDARSTELLUNG | 6 |
| 3.1 AUFGABENSTELLUNG..... | 6 |
| 3.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE..... | 7 |
| STATUS ZU BEGINN DES VORHABENS: | 7 |
| 3.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS | 8 |
| 3.4 WISSENSCHAFTLICHEM UND TECHNISCHEM STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE | 9 |
| 3.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN | 10 |
| 4. EINGEHENDE DARSTELLUNG..... | 11 |
| 4.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DES ERZIELTEN ERGEBNISSES IM EINZELNEN, MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER VORGEgebenEN ZIELE..... | 11 |
| 4.2 WICHTIGSTEN POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES | 13 |
| 4.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT | 14 |
| 4.4 VORAUSSICHTLICHEN NUTZENS, INSBESONDERE DER VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANS | 17 |
| 4.5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZE BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITTS AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN..... | 18 |
| 4.6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES NACH NR.11 | 19 |
| 5. ZUSAMMENFASSUNG..... | 20 |

1. Einleitung

Das vorliegende Dokument stellt den Schlussbericht für das Projekt "Gekoppelte Systeme für zukünftige Oberstufen - Entwicklung eines Softwaretools" dar.

Das Projekt wurde vom DLR unter der Förderkennziffer FKZ 50 RL 0723 unterstützt.

Wir möchten dem DLR für die Förderung danken.

2. Referenzdokumente

- [1] P. Behruzi, M. Michaelis, and G. Khimeche, "Behavior of the Cryogenic Propellant Tanks during the First Flight of the Ariane 5 ESC-A Upper Stage", AIAA 2006-5052, AIAA Joint Propulsion Conference, Sacramento, 2006
- [2] Klotz, H., and Burkert, R., "Coupled Flow-3D Simulation for Analysis & Modelling of Dynamics of Upper Stages Containing Liquids", 5th Int. Conf. on Launcher Techn. , Madrid, Nov. 2003
- [3] H. Klotz, R. Burkert and F. De Rose, "Coupling Dynamic Simulations of Spacecraft Containing Liquids", FLOW-3D User's Conference, Santa Fe, Sept. 1999
- [4] R. Burkert, H. Klotz, "Coupled Flow-3D Simulation for Analysis and Modelling of Dynamics of Upper Stages Containing Liquids", 5th International Conference on Launcher Technology: *Missions, Control and Avionics*, Madrid, Spain, 25th-27th November 2003
- [5] H. Strauch, "*Attitude Control of the Landing Demonstrator PHOENIX*", IEEE International Conference on Control Application, Munich, Germany, 2006
- [6] H. Strauch, et al., "Drag-Free Attitude and Orbit Control for LISA", Proceedings of the Third International Conference on Space Guidance, Navigation and Control Systems, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1997
- [7] H. Strauch, et al., "Controller Design for RVB with a HERA Type Manipulator", Proceedings of the Third International Conference on Space Guidance, Navigation and Control Systems, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1997
- [8] H. Strauch, "Sloshing Modellization by Neural Networks", Proceedings of the Second International Conference on Space Guidance, Navigation and Control Systems, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1994
- [9] H. Strauch, H. Klotz, A. Lopez-y-Diaz, "Attitude and Orbit Control Algorithm for Multiple Payload Launchers", Proceedings of the First International Conference on Space Guidance, Navigation and Control Systems, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1991
- [10] H. Strauch, "Automatische Landung des NASA Crew Rescue Vehicle", 237. Kolloquium am Berliner Tor, Hamburg, Germany, 2003
- [11] T. Görlach et al., "Deutsche Beiträge zur Flugführung, Flugregelung und Navigation des Raumgleiters X-38", DGLR Jahrestagung, DGLR-2001-186, München, 2001
- [12] U. Soppa et al., "GNC Concept for Automated Landing of a Large Parafoil", 14th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, San Francisco, C.A, USA 1997
- [13] R. Prigge H. Strauch, "Space craft attitude control using magnetic torquers and gas jets", Proceedings of the First International Conference on Space Guidance, Navigation and Control Systems, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1991
- [12] T. Holzhüter, H. Strauch, "A commercial adaptive auto pilot for ships: Design and operational experiences", 10th IFAC World Congress on Automatic Control Munich, FRG, 1987
- [13] M. Vepa. H. Strauch, "Experiences on Online Parameter Identification of Nonlinear Nonstationary Systems", Third IASTED International Symposium, Innsbruck, Austria, 1984

3. Kurzdarstellung

3.1 Aufgabenstellung

Folgende Verbesserungen werden im Rahmen der Förderung erbracht:

- Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Vereinfachung der Handhabung des Programms
- Portierung der Software in MATLAB/Simulink zur Vereinfachung der Integration unterschiedlicher Module (z.B. Regleralgorithmen, Tankmodelle)
- Integration einer Nachbearbeitungsroutine mit der Fähigkeit eine animierte Visualisierung der Simulationsergebnisse (z.B. als Flüssigkeitsoberflächen in Tanks) zu erzeugen. Dies kann eine wichtige Hilfe bei der Beurteilung der Plausibilität von Ergebnissen sein.
- Entwicklung eines Lageregelungsalgorithmus für Oberstufen, der auch das Sloshing Phänomen explizit berücksichtigt und damit zukunftsweisend ist.
- Die Schwappbewegungen der Flüssigkeiten haben sowohl bei Satelliten, als auch bei Oberstufen schon immer einen signifikanten Einfluss auf die Auslegung der Tanks gehabt. Insbesondere bei Oberstufen ist in ballistischen Phasen, im Gegensatz zu Satelliten, die gegenseitige Beeinflussung der Lageregelung und der Schwappbewegung sehr groß. Dies ist auf die im Vergleich zu Satelliten relativ hohen Treibstoffmengen bei gleichzeitig hohen Störimpulsen durch das Lageregelungssystem (hohe Bond Zahl) zurückzuführen. Das führt zu besonderen Aspekten hinsichtlich der Algorithmenentwicklung für die gekoppelte Analyse ballistischer Phasen:
 - Der Kontrollalgorithmus für Oberstufen muss gleichzeitig eine wesentlich höhere Anzahl von Regelaufgaben bewältigen:
 - Dreiachsen Stabilisierung
 - Spin-up, Nutationsdämpfung und Ausrichtung des Drehmomentenvektors unter der Bedingung dynamischer Unwucht.
 - kleinere Orbitkorrekturmanöver um die verschiedenen Nutzlasten und Stützstrukturen in Umlaufbahnen ohne Kollisionsgefahr abzusetzen.

Daher muss der Lageregelungsalgorithmus von Oberstufen wesentlich flexibler sein als dies bei Satelliten notwendig ist.

- Neben den schon bisher verwendeten Methoden hat es auch in letzter Zeit, angestoßen durch den Versuch Vibrationen zu regeln, neuere Ansätze in der Regelungstechnik gegeben, die zur Betrachtung des Treibstoffschwappens in Tanks geeignet sind.
- Auswahl einiger repräsentativer Fälle, die der derzeitige EPS/ESCA Algorithmus nur unzulänglich beherrscht.
- Analyse der verschiedenen Methoden, wie sie in Satelliten verwendet werden.
- Analyse neuerer Regeltechniken aus dem Bereich der Schwingungs- und Vibrationsdämpfung.
- Auswahl und Adaption viel versprechender Kandidaten für die Lageregelung von Oberstufen
- Implementierung und Test im geschlossenen Regelkreis mit CFD Dynamik.

3.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Rahmen der ARIANE 5-Entwicklung ist ein Programm namens FiPS (Final Phase Simulator) zur Simulation der Kinematik und Dynamik einschließlich aller relevanten Manöver wie Auf- und Abspinnen, Schwenken und delta-v der Oberstufe, während der Phase zwischen der Oberstufentrennung und der Trennung der letzten Nutzlast, entwickelt worden. Das Programm ist sowohl als Testumgebung für die Lage- und Bahnregelungsalgorithmen als auch für die Bewertung der Leistungsanforderungen an die Oberstufe bezüglich der Nutzlast herangezogen worden [2, 3, 4].

Für den zuletzt genannten Zweck hat sich schnell gezeigt, dass das Flüssigkeitsschwappen in den Tanks der Oberstufe und/oder der Nutzlast nicht zu vernachlässigen war. Vereinfachte Feder-Masse- oder Pendelmodelle erwiesen sich als ungeeignet, insbesondere für ballistische Phasen, oder zumindest als nicht hinreichend für alle Betriebsarten validiert. Andererseits können hochgenaue kommerziell verfügbare CFD Programme zur Berechnung von Flüssigkeitsdynamik wie Flow-3D nur als eigenständige Prozesse zur Darstellung des Flüssigkeitsverhaltens unter Einwirkung vorgegebener äußerer Beschleunigungen verwendet werden.

In dieser Situation wurde entschieden ein Programm zu entwickeln, welches in der Lage ist die hochgenauen Flüssigkeitsbewegungen mit den realen Bewegungen eines manövrierenden Raumfahrzeugs zu koppeln. Unter „Gekoppelter Analyse“ verstehen wir in diesem Zusammenhang das Koppeln der Starrkörperdynamik eines Raumfahrzeugs mit der Dynamik der sich im Fluggerät befindlichen Flüssigkeit (Treibstoff).

Status zu Beginn des Vorhabens:

- Die Software ist teils in FORTRAN und teils in C geschrieben.
- Das Programm ist im Rahmen des ARIANE 5-Programms erfolgreich für die Durchführung diverser Analysen (Simulation von bis zu 6 Tanks gleichzeitig) eingesetzt worden.
- Das Aufsetzen einer neuen Simulation erfordert einen gewissen Aufwand; jedoch ist es aufgrund der modularen Struktur relativ einfach, mehrere gleichartige Tanks einzubinden, da nur die geometrische Position und Ausrichtung im Raumfahrzeug angepasst werden muss.
- Die Ergebnisse sind in der Regel als Zeitverläufe verfügbar.
- Bisher hat das Phänomen des Treibstoffschwappens (im Folgenden kurz mit „Sloshing“ bezeichnet) für die Lageregelung von Oberstufen (d.h. für die Regelung nach dem Brennschluss) keine besondere Herausforderung dargestellt, da erst im Rahmen der neuen Oberstufe A5ME ballistische Flugphasen vorgesehen werden.
- Der Ariane 5 EPS/ESCA Lageregelungsalgorithmus besitzt kein gesondertes Entwurfsmerkmal für Störungen, die durch Sloshing hervorgerufen werden.
- Im Zuge der Algorithmenentwicklung wird Sloshing von Stufe und Payload im Allgemeinen nur im Nachhinein bei der Stabilitätsanalyse betrachtet.
- Der Einfluss auf die erwartete Regelgenauigkeit wird dann an Hand von Simulationen im Zuge der Pre-Flight Analyse für einen spezifizierten Sloshing-Parameterbereich analysiert.
- Zurzeit tritt jedoch eine Änderung in den operationellen Anforderungen für Oberstufen ein. Dadurch wirkt sich der Einfluss des Sloshing wesentlich stärker aus. Dies gilt sowohl für die Regelgenauigkeit als auch für die Stabilitätsreserven.
- Zurzeit gibt es keine Einstellmöglichkeiten, die es erlauben, den EPS/ESCA Lageregelungsalgorithmus auf Sloshingeffekte anzupassen.

3.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der im Haus vorhandenen Simulator FiPS (Final Phase Simulator) für die Simulation gekoppelter Flüssigkeits- und Starrkörperdynamik soll im Rahmen des Projekts überarbeitet und in der Funktionalität erweitert werden, um in der Lage zu sein, Lageregelungstechnisch bezüglich Flüssigkeitschwappen den Anforderungen an zukünftige Oberstufen gerecht zu werden.

Für die Erweiterung des Simulators sind eine Reihe numerischer Modelle zu erstellen und in den Simulator einzubinden.

Im Einzelnen gliedern sich die geplanten Arbeiten wie folgt:

- **Anpassung und Erweiterung des vorhandenen Simulators als Vorbereitung für die Implementierung neuer Regelalgorithmen:** Der Simulator wird hinsichtlich vorhandener Schnittstellen analysiert und um notwendige Schnittstellen erweitert.
- **Erstellung eines Haupttriebwerksmodells und Implementierung in den Simulator einschließlich Test:** Dies ist notwendig, um die Funktionalität des Simulators um die Boost-Phase zu erweitern.
- **Erstellen von Sloshing Modellen:** Ziel ist es eine Bibliothek vereinfachter Sloshing Modelle bereitzustellen und in den Simulator einzubinden, um neben den hochgenauen Rechenzeit intensiven Flow-3D Modellen schnelle weniger genaue Alternativen nutzen zu können.
- **Lageregelung Ballistische Phasen:** Erstellung eines Regelalgorithmus, der für die Anforderungen zukünftiger Oberstufen bezüglich Koppelung von Sloshing Effekten ausgelegt ist.
- **Lageregelung Boost Phase:** Erstellung eines Regelalgorithmus der für die Anforderungen zukünftiger Oberstufen bezüglich Koppelung von sloshing Effekten während der Boost Phase ausgelegt ist.
- **Implementierung, Test und Validierung:** Die entwickelten Regelalgorithmen und Sloshing Modelle werden in den Simulator eingebunden und auf ihre Funktionalität hin getestet. Anschließend wird anhand von Flugdaten (ARIANE 5) der Simulator validiert.

3.4 Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

Bei den Arbeiten im Förderzeitraum wurde an Status der Software wie unter 3.2 beschrieben angeknüpft.

3.4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Keine

3.4.2 Verwendete Fachliteratur / Informations- und Dokumentationsdienste

Es wurde die in der unter 2. angegebene Dokumentation verwendet.

3.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

keine

4. Eingehende Darstellung

4.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Der hier vorgelegte Studienvorschlag soll in erster Linie die Oberstufen-Kompetenz am Standort Bremen stärken und uns in die Lage versetzen die besonderen Anforderungen, die zukünftige Oberstufen an die Lageregelung stellen, zu beherrschen. Dabei wird ein Werkzeug bereitgestellt, mit dessen Hilfe es möglich ist, bei der Auslegung das Schwappen der Treibstoffe in den Oberstufen explizit zu berücksichtigen. Diese Phänomene werden durch die zurzeit eintretenden operationellen Änderungen für Oberstufen immer stärker hervortreten. Dadurch erhöhen sich die Anforderungen sowohl an die Regelgenauigkeit als auch an die Stabilitätsreserven.

Die in Berichtszeitraum betrachteten Themen schließen folgende Aufgaben ein:

- Entwicklung eines Regelalgorithmus für die Lageregelung ballistischer Phasen
- Entwicklung eines Regelalgorithmus für die Lageregelung mit der Hauptdüse während der Boostphase
- Entwicklung vereinfachter Sloshing Modelle
- Simulator- Anpassung und Erweiterung als Vorbereitung für die Implementierung der neu entwickelten Algorithmen und Modelle
- Erstellung eines Haupttriebwerksmodells (Stellmotoren, Getriebe, Aufhängung und Spindel zur Auslenkung des Haupttriebwerks)
- Test der Regel-Algorithmen

Thematisch wurden sechs Arbeitspakete für den Berichtszeitraum definiert:

- WP2000 Regelung
 - WP2100 Lageregelung ballistische Phase
 - WP2200 Lageregelung Boostphase
 - WP2300 Sloshing Modelle
- WP3000 Simulator
 - WP3100 Simulator Anpassung und Erweiterung
 - WP3200 Triebwerks Modell
 - WP3300 Test der Regel-Algorithmen

Die folgende Übersicht gibt eine Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen:

- Arbeitspaket 2100 Lageregelung ballistische Phase
 - Ziel: Erstellung eines Regelalgorithmus für die Lageregelung ballistischer Phasen
 - Ergebnis: Regelalgorithmus für ballistische Phasen
 - Gegenüberstellung: Das Ergebnis stimmt mit der Zielvorgabe überein.
- Arbeitspaket 2200 Lageregelung Boostphase
 - Ziel: Erstellung eines Regelalgorithmus für die Lageregelung mit dem Haupttriebwerk während der Boostphase
 - Ergebnis: Regelalgorithmus für die Boostphase
 - Gegenüberstellung: Das Ergebnis stimmt mit der Zielvorgabe überein.
- Arbeitspaket 2300 Sloshing Modelle
 - Ziel: Erstellung vereinfachter Sloshing Modelle
 - Ergebnis: Feder-Dämpfer Modell
 - Gegenüberstellung: Das Ergebnis stimmt mit der Zielvorgabe überein.

- **Arbeitspaket 3100 Simulator Anpassung / Erweiterung**
 - **Ziel:** Durchführung von für die Reglerentwicklung notwendige Anpassungen und Erweiterungen am Simulator.
 - **Ergebnis:** An neue Regelalgorithmen angepasster Simulator mit um die Boost-Phase erweiterte Funktionalität.
 - **Gegenüberstellung:** Das Ergebnis stimmt mit der Zielvorgabe überein.
- **Arbeitspaket 3200 Modellierung des Oberstufenhaupttriebwerks**
 - **Ziel:** Erstellen eines Modells des Oberstufen Haupttriebwerks.
 - **Ergebnis:** Mathematisches Modell des Haupttriebwerks
 - **Gegenüberstellung:** Das Ergebnis stimmt mit der Zielvorgabe überein.
- **Arbeitspaket 3300 Simulator Anpassung / Erweiterung**
 - **Ziel:** Einbindung der Bereitgestellten Regleralgorithmen und Modelle in den Simulator.
 - **Ergebnis:** Simulator mit Regleralgorithmen, die sowohl während der ballistischen, als auch während der Boost-Phase für das Ausregeln von Sloshing Effekten bei gekoppelten Analysen angepasst ist.
 - **Gegenüberstellung:** Das Ergebnis stimmt mit der Zielvorgabe überein.

4.2 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Überblick über den zahlenmäßigen Nachweis kann vollständig dem Verwendungsnachweis entnommen werden. Eine kurze Erklärung zu den wichtigsten Positionen ist wie folgt:

- FE-Fremdleistungen
 - Die Leistungen wurden mit den geplanten Kosten erbracht.
 - Erklärung: Planung wurde erfüllt
- Personalkosten
 - Status: Wert der Gesamtnachkalkulation ist fast entsprechend der Gesamtvorkalkulation
 - Erklärung: Planung wurde erfüllt
- Reisekosten:
 - Status: Wert der Gesamtnachkalkulation ergibt, dass keine Reisekosten angefallen sind. Zu bemerken ist, dass die Reisekosten nur sehr gering angesetzt wurden.
 - Erklärung: Meetings fanden in Bremen statt. Es waren keine Reisen notwendig.

4.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ziel des Projekts ist es, basierend auf dem im Haus vorhanden Programmpaket FiPS einen validierten Regelalgorithmus zur Lösung gekoppelter Probleme zu erstellen. Der Regelalgorithmus ermöglicht dabei die Rückkoppelung des Flüssigkeitsschwappens in den Tanks der Oberstufe und/oder der Last auf die Starrkörper Dynamik der Oberstufe entsprechend den Missionsanforderungen zu kompensieren. Besonders berücksichtigt werden dabei die besonderen Anforderungen an die Lageregelung zukünftiger Oberstufen mit Wiederzündung. Die Kopplung der Flüssigkeitsbewegung mit den Reaktionen der Stufe und den daraus resultierenden Regelmanövern wird als gekoppelte Analyse im geschlossenen Regelkreis bezeichnet.

Hinsichtlich zukünftiger Oberstufenentwicklungen ist zu erwarten, dass diese Art gekoppelter Analysen mit Betrachtung des Regelungsalgorithmus einen sehr hohen Stellenwert haben wird. Analysen dieser Art sind bisher nicht möglich. Dies hängt insbesondere mit den veränderten Missionsprofilen zusammen. So sind in Zukunft ballistische Phasen geplant, die mit einem erheblich größeren Treibstoffvolumen durchgeführt werden. Der erwartete Tankfüllgrad liegt hier in der Größenordnung bis etwas 20% während ballistischer Phasen, was hinsichtlich der Auswirkung der Flüssigkeitsbewegung auf den Lageregelungsalgorithmus besonders stark ist. Weiter spielt der Vorgang bei der Auslegung von Satellitentanks eine große Rolle. Als Beispiel lässt sich hier die Entwicklung der Herschel / Planck Satelliten nennen. Die spezifizierte Mission erforderte eine besonders genaue Positionierung des Satelliten, was ein speziell validiertes Pendelmodell notwendig machte. Pendelmodelle werden im Allgemeinen mittels numerischer Strömungsrechnungen ausgelegt. Die Qualifizierung der vorhandenen Tools stellt hier einen nächsten, notwendigen Schritt zur Bewältigung zukünftiger Aufgaben dar. Als weitere zukünftige Anwendung sind das Rendezvous und Docking des ARV, als zukünftige ATV Erweiterung. Die Analyse der Annäherungsphase an die Raumstation ist ein ideales Aufgabenfeld für die entwickelte Software.

4.3.1 Lageregelung

Der Lageregelungsalgorithmus der Oberstufe der Ariane 5 (EPS) wurde zu Beginn der neunziger Jahre in Bremen entwickelt (siehe auch [2]). Das Schwappen der Treibstoffe in den Tanks (Sloshing) stellte für die Lageregelung (d.h für die Regelung nach dem Brennschluss) damals, bei fast leeren Tanks, keine besondere Herausforderung dar. Der Ariane 5 EPS/ESCA Lageregelungsalgorithmus besitzt deshalb keinen gesonderten Algorithmus für Störungen, die durch Sloshing hervorgerufen werden.

Im Zuge der Algorithmenentwicklung wird Sloshing von Stufe und Payload im Allgemeinen nur im Nachhinein bei der Stabilitätsanalyse analysiert und nicht unmittelbar bei den ersten Schritten des Reglerentwurfs berücksichtigt. Der Einfluss auf die erwartete Regelgenauigkeit wird dann an Hand von Simulationen im Zuge der Pre-flight Analyse für einen spezifizierten Sloshing-Parameterbereich untersucht. Zurzeit tritt jedoch eine Änderung in den operationellen Anforderungen für Oberstufen ein. Dadurch wirkt sich der Einfluss des Sloshing wesentlich stärker aus. Dies gilt sowohl für die Regelgenauigkeit als auch für die Stabilitätsreserven.

Derzeit gibt es keine Einstellmöglichkeiten, die es erlauben, den existierenden EPS/ESCA Lageregelungsalgorithmus auf Sloshing Effekte anzupassen. Ein Ziel der vorgeschlagenen Studie ist die Entwicklung eines Lageregelungsalgorithmus für Oberstufen, der auch das Sloshing Phänomen explizit berücksichtigt und damit zukunftsweisend ist.

Die zentrale Idee der Studie ist, diese neue Möglichkeit einer sehr realitätsgenauen Simulation in direkter Koppelung mit dem Regler zu einer Algorithmen-Neuentwicklung zu verbinden. Es sei dar-

auf verwiesen, dass die Ergebnisse zum Teil auch auf Satelliten übertragen werden können und also auch über den engeren Bereich der Oberstufen hinaus von Interesse seien werden.

Im Einzelnen ist folgendes Vorgehen geplant:

- Auswahl einiger repräsentativer Fälle, die der derzeitige EPS/ESCA Algorithmus nur unzulänglich beherrscht.
- Analyse der verschiedenen Methoden, wie sie in Satelliten verwendet werden.
- Analyse neuerer Regeltechniken aus dem Bereich der Schwingungs- und Vibrationsdämpfung.
- Auswahl und Adaption viel versprechender Kandidaten für die Oberstufen Lageregelung
- Implementierung und Test im geschlossenen Regelkreis mit Flow3D Dynamik. Flow3D ist hierbei das in den gekoppelten Analysen verwendete Software Tool zur Betrachtung der Strömung.

Ein übergeordnetes Ziel dieser Studie ist es, die deutsche Verantwortung für die Oberstufe weiter zu verankern. Neben der zukunftsweisenden Wiederaufnahme der Arbeiten am Lageregelungsalgorithmus, ist daher auch die Ausweitung auf die Phase vor dem Brennschluss geplant. Dies wird im Folgenden beschrieben.

4.3.2 Angetriebener Flug

In der Flugphase mit arbeitendem Haupttriebwerk (Powered flight) gibt es zusätzlich zur Flugregelung (das Pendant zur Lageregelung im schwerelosen Fall) noch die Guidance. Im Allgemeinen handelt es sich hier um kaskadierte Regelungsschleifen. Das heißt der Guidance Algorithmus erwartet von der Flugregelung die korrekte Einstellung der Lage und ist nicht mit Fragen wie Sloshing befasst. Da diese Studie im engen Zusammenhang mit gekoppelten Analysen gesehen wird, soll daher die Fragestellung der Guidance von Oberstufen im Rahmen dieser Studie nicht behandelt werden.

Das Potential der gekoppelten Simulation, das in Bremen entwickelt wurde, kann jedoch auch für den angetriebenen Fall genutzt werden. Die Flugregelung kommandiert Auslenkungen des Haupttriebwerks. Dies regt natürlich direkt die Flüssigkeit an. Wie oben bei der Lageregelung erwähnt, wurde dieser Effekt bisher mit einem einfachen Pendelmodell erfasst (was bei ballistischen Phasen nur eingeschränkt möglich ist, da Pendelmodell den Einfluss vorherrschender kapillarer Kräfte nicht berücksichtigen können) und der Algorithmenentwurf hat dies oft erst in der nachgeschalteten Analyse berücksichtigt. Jetzt ergibt sich die Möglichkeit diesen Effekt mit der hochgenauen gekoppelten Analyse zu untersuchen und mögliche Verbesserungen in der Flugregelung vorzuschlagen.

Durch die Verantwortung des Bremer Standorts für die Entwicklung des EPS Lageregelungsalgorithmus ist die gesamte Simulationssoftware für den antriebslosen Fall verfügbar (tatsächlich wurde sie auch hier entwickelt). Dies gilt jedoch nicht für den angetriebenen Teil der Oberstufentrajektorie.

Es wird deshalb vorgeschlagen im Laufe dieser Studie den vorhandenen Simulator für den angetriebenen Flug zu erweitern. Im nächsten Schritt wird dann ein Fluglageregelungsalgorithmus entwickelt, der speziell auf größere, durch Sloshing hervorgerufene Störungen, ausgelegt ist.

4.3.3 Vereinfachte Sloshing Modelle

Die Attraktivität der vorgeschlagenen Studie besteht in der Verwendung der gekoppelten Simulation. Diese Fähigkeit wird von anderen Firmen nicht beherrscht. Dennoch sind vereinfachte Sloshing Modelle notwendig. Insbesondere bei Monte Carlo Analyse ist es aufgrund des hohen Zeitbedarfs nicht möglich CFD Software zu verwenden. Da die Monte Carlo Analyse ein wichtiger Bestandteil des regelungstechnischen Entwurfes ist, soll daher im Rahmen der Studie auch auf vereinfachte Modelle eingegangen werden.

Die gekoppelte Simulation ermöglicht eine sozusagen verbesserte 'Eichung' dieser Modelle. Das besondere Augenmerk soll aber auf die Eignung der vereinfachten Modelle im geschlossenen Regelkreis, d.h. also im Zusammenspiel mit den Regelalgorithmen liegen.

Ziel dieser Studie ist also neben verbesserten Regelalgorithmen auch verbesserte Sloshing Ersatzmodelle zu liefern. Über den engeren Bereich Oberstufenentwicklung hinaus würden diese besser validierten Modelle auch einen Vorteil beim Vertrieb der hier entwickelten Tanks darstellen. Den Lageregelungsentwicklern potentieller Satellitenkunden kann dann kostengünstiger im Rahmen der Funktionsauslegung ein Modell an die Hand gegeben werden. Bei den meisten Analysen im Rahmen der Tankauslegung von Satelliten ist dies eine Standardforderung. Die Verifikation dieser Modelle im geschlossenen Regelkreis steigert die Qualität der gelieferten Modelle bei reduzierten Kosten, was sich positiv auf die Wettbewerbsbedingungen der EADS Astrium im Rahmen des Tankgeschäftes auswirkt.

4.4 Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Kurz bis Mittelfristig tritt eine Änderung der operationellen Anforderungen für Oberstufen ein. Dadurch wirkt sich der Einfluss des Sloshing wesentlich stärker aus. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich direkt auf die Entwicklung zukünftiger Oberstufen anwenden, z.B. bei der Auslegung der Regelalgorithmen oder bei der Performance Analyse um etwa Aussagen über den Treibstoffverbrauch einer Mission machen zu können.

Die Arbeiten erweitern das physikalische Verständnis bezüglich des Verhaltens zukünftiger Oberstufen. Die Möglichkeit beliebig viele Tanks mit schwappender Flüssigkeit gekoppelt mit die Starrkörperdynamik im geschlossenen Regelkreis darzustellen ist auf diese Weise in Europa bisher nicht verfügbar und durch die explizite Berücksichtigung des Sloshing Phänomens sowohl während der ballistischen Phase als auch während der Hauptschubphase zukunftsweisend.

Im Rahmen vergangener Entwicklungen wurden erhebliche Kenntnisse über das Verhalten gekoppelter Systeme erarbeitet. Diese Arbeiten führen dazu, dass im Rahmen des ARIANE 5 Programms ein Simulator für gekoppelte Systeme aufgebaut werden konnte. Die Erweiterungen der Regelalgorithmen um die explizite Berücksichtigung des Sloshing Phänomens bilden die Voraussetzung dafür, dass die erworbenen Techniken auf zukünftige Oberstufen angewandt werden können. Weiter eröffnen sich Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich der Tank- und Satelliten Entwicklung/Nutzung.

4.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Berichtszeitraums sind keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden.

4.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

keine

5. Zusammenfassung

Dieser Schlussbericht beschreibt die Ergebnisse, die im Rahmen des Fördervorhabens "Gekoppelte Systeme" im Berichtszeitraum von 01.08.2007 bis 31.07.2010 erreicht wurden dar. Es wurde neben dem vorliegenden Bericht ein ergänzender technischer Bericht erstellt, der die Inhalte in vertiefter Art enthält.