

# SATELLITENARCHITEKTUREN MIT KOMMERZIELLEN „OFF-THE-SHELF“-KOMPONENTEN

A. Peukert

Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, TU München  
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, Deutschland

## Zusammenfassung

Dieses Manuskript gibt eine kurze Übersicht über die Ergebnisse der Dissertation des Autors wieder, die am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik an der TU München angefertigt wurde und die im Rahmen des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses 2009 mit dem Reinhard-Furrer-Preis ausgezeichnet werden soll. Die Arbeit beschäftigt sich mit zwei Ansätzen zur Kostenreduktion in Raumfahrtprojekten: der Reduktion von Satelliten-Komponentenkosten durch Nutzung von „Commercial Off-The-Shelf (COTS)“-Komponenten und effizientere Satelliten-Entwicklungsprozesse durch die Standardisierung der Beschreibung von Satellitenarchitekturen. Es folgt zuerst eine Zusammenfassung der drei Hauptkapitel der Arbeit. Dieser Teil erklärt auch die inhaltliche Verbindung dieser Kapitel. Danach bringt das Manuskript alle Teilergebnisse der Arbeit zusammen und zieht umfassende Schlussfolgerungen daraus. Die komplette Dissertation ist unter dem Titel „Spacecraft Architectures Using Commercial Off-The-Shelf Components“ veröffentlicht worden.

## 1. ZUSAMMENFASSUNG DES INHALTES DER FORSCHUNGSARBEIT

Die Arbeit mit dem Titel „Spacecraft Architectures Using Commercial Off-The-Shelf Components“ besteht aus drei Hauptteilen, in denen verschiedene Aspekte des Themas behandelt werden. Die Arbeit untersucht zwei Herangehensweisen, um eine Kostenreduktion in modernen Raumfahrzeugen (S/C) zu erreichen:

- Reduktion von S/C-Komponentenkosten durch Nutzung von „Commercial Off-The-Shelf (COTS)“-Komponenten und
- Effizientere S/C-Entwicklungsprozesse durch Standardisierung der Beschreibung von S/C-Architekturen.

Diese beiden Ansätze führen auf zwei zu beantwortende Fragen hin: „Bringt der Einsatz von COTS-Komponenten einen Vorteil für ein Projekt?“ und „Was ist die Architektur eines S/C und wie kann dessen Beschreibung standardisiert werden?“ Zuerst behandelt die Arbeit die standardisierte Beschreibung von S/C-Architekturen durch die Definition eines Architecture Frameworks für S/C. Danach wird ein generischer Evaluationsprozess für die Beurteilung von COTS-Komponenten beschrieben. Am Ende werden Hilfsmittel gezeigt, mit denen man die Leistung von S/C-Architekturen mit und ohne COTS-Komponenten beurteilen kann.

Die grundlegende Annahme des ersten Hauptteils der Forschungsarbeit ist, dass eine standardisierte Beschreibung oder Modellierungsmethode für Satellitenarchitekturen notwendig ist, wenn man diese miteinander vergleichen will. Im hier vorliegenden Fall bedeutet dies den Vergleich von Satellitenarchitekturen mit und ohne den Einsatz von Commercial Off-The-Shelf

(COTS)-Komponenten. Das erste Hauptkapitel beginnt mit der Analyse von gängigen Methoden für die standardisierte Beschreibung von Systemarchitekturen in der Raumfahrt domäne. Architecture Frameworks (AFs) werden hierbei als die bevorzugte Herangehensweise identifiziert. Auf Grund der Nicht-Existenz eines AF für Satelliten definiert die vorliegende Arbeit das neue Spacecraft Architecture Framework (SCAF). Dieses Framework beinhaltet die Identifikation von relevanten Systemansichten, welche in den beiden implementierten Systemansichten „Form“ und „Verhalten“ in der ersten Version von SCAF realisiert werden. Diese beiden Systemansichten werden in der Arbeit „Physical Architecture“ und „Functional Architecture“ genannt. Beide Ansichten werden mit großer Genauigkeit spezifiziert und enthalten viele individuelle Aspekte, welche letztendlich zusammen eine ausführliche Beschreibung der Architektur eines Satelliten ergeben. Das Framework benutzt die standardisierte Modellierungssprache SysML, um die allgemeine Anwendbarkeit und weite Akzeptanz unter Satelliten-Entwicklungsteams zu erhöhen. SCAF wurde anschließend in einer Fallstudie angewendet, in der der reale Satellit „CryoSat“ nachmodelliert wurde, um die Anwendbarkeit an einem praktischen Anwendungsbeispiel zu demonstrieren und erste Erfahrungen mit dessen Praxistauglichkeit zu sammeln. Am Ende des Kapitels wird SCAF formal evaluiert, um dessen aktuellen Stand der Anwendbarkeit und offene Punkte für weiter führende Arbeiten zu ermitteln.

Der Mittelteil der Arbeit befasst sich näher mit dem Thema der kommerziellen Off-The-Shelf-Komponenten für Anwendungen in der Raumfahrt. Das Kapitel beginnt mit der Definition von wichtigen Begriffen in diesem Themengebiet und der Analyse des Problemfeldes. Sehr wichtig ist dabei die Identifikation aller allgemeinen und speziellen Eigenschaften von COTS-Komponenten im Vergleich mit traditionellen Komponenten der Raumfahrttechnik. Es werden dabei beide Seiten ausführlich untersucht: potentielle Vorteile aber auch

<sup>1</sup> Genaue Definition des Begriffs COTS und dessen Bedeutung für die Raumfahrt erfolgt in der Arbeit selbst.

auf tretende Probleme und Risiken, wenn diese Komponenten verwendet werden. Diese Untersuchung beinhaltet ebenfalls eine Auflistung der Lösungsansätze nach dem Stand der heutigen Technik, um diesen Probleme entgegenzuwirken. Im nächsten Schritt wird ein neuer standardisierter Evaluationsprozess definiert, der zeigt wie man COTS-Komponenten bewerten und potentielle Kandidaten für Raumfahrtprojekte identifizieren kann. Dies ist notwendig, um dem Themenkomplex von Problemen, welche mit der Verwendung von COTS-Komponenten verbunden sind, ein solides Fundament zu geben. Der generische Prozess startet am Anfang des Entwicklungsprozesses, wo ein sehr geringer Informationsstand vorausgesetzt wird. Es werden daraufhin drei große Schritte definiert, welche alle jeweils einem speziellen Zeithorizont zugeordnet werden. Der Prozess startet bei der langfristigen Strategieplanung für (Raumfahrt)-Unternehmen und endet bei konkreten Entscheidungen für einzelne Raumfahrtprojekte. Diese drei Schritte werden

- Potentialanalyse von Komponentenfamilien
- Konsistente Modellierung und direkter Vergleich von Komponenten und
- Bewertung des Einflusses von COTS-Kandidaten auf Satellitenarchitekturen

genannt. Die beiden ersten Schritte werden innerhalb dieses Mittelteils genauer definiert und ebenfalls in einem Fallbeispiel angewendet. Der letzte Schritt erfordert die Existenz einer standardisierten Beschreibung von Satellitenarchitekturen zusätzlich zu der Leistungsansicht eines Satelliten. Auf Grund der Komplexität dieser Leistungsansicht wurde diese in den letzten Teil der Arbeit verlagert und nicht innerhalb dieses zweiten Hauptteiles behandelt. Die Anwendung der zwei ersten Schritte wird dann in einer Fallstudie demonstriert, wo die Vor- und Nachteile der Verwendung eines COTS-Drehratensensors auf MEMS-Basis in Satelliten untersucht werden. Diese Fallstudie gibt einen Einblick in die Anwendbarkeit des Evaluationsprozesses für COTS-Komponenten in der Raumfahrt. Dieser zweite Hauptteil schließt mit einer Beschreibung der gesammelten Erfahrungen während der Fallstudie und einer kurzen Bewertung des generischen Evaluationsprozesses.

Der letzte Hauptteil befasst sich mit der Frage, wie komplette Satellitenarchitekturen bewertet werden können, die COTS-Komponenten beinhalten. Dies erfordert die standardisierte Beschreibung der Satellitenarchitektur, wie sie bereits im ersten Teil der Arbeit teilweise mit SCAF vorgestellt wurde. Es erfordert jedoch auch die standardisierte Modellierung der Leistungsansicht eines Satelliten, welche bisher nicht in SCAF enthalten ist. Der erste Schritt in der Definition einer Leistungsansicht beinhaltet die Definition von wichtigen Metriken, welche zur Bewertung einer Satellitenarchitektur verwendet werden. Die Basis für die Implementierung der Leistungsansicht ist die standardisierte Beschreibung von Satellitenarchitekturen mit SCAF. Auf Grund der begrenzten Funktionalität von existierenden SysML-Modellierungswerkzeugen kann die Leistungsansicht nicht direkt in SCAF integriert werden. Es wurde daher das Spacecraft Performance Model (SCPM) entwickelt. Dieses Modell nutzt eine objektorientierte quantitative Modellierungsmethode, welche ebenfalls am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik der TU München entwickelt und die in der Modellierungssoftware (v)Sys implementiert wurde.

SCPM hat drei Hauptmodellteile:

- Produktmodell
- Umweltmodell
- Auslegungsmodell

Alle Modellteile wurden mit einer Bibliothek von Modellklassen ausgestattet, welche leicht und schnell in Raumfahrtprojekten angewendet werden können. Diese Klassen enthalten viele Berechnungsmodelle, welche die automatische Berechnung wichtiger Satelliteneigenschaften (z.B. Gesamtmasse, Schwerpunkt, Delta-V-Bedarf, Energiebudget) als auch der vorher definierten Evaluationsmetriken für Satellitenarchitekturen erlauben. SCPM wurde ebenfalls in einer Fallstudie angewendet, um dessen Anwendbarkeit zu demonstrieren. Dort wird die Verwendung eines COTS-Computerprozessors in einem existierenden Satelliten untersucht und dessen Einfluss auf die erwähnten Evaluationsmetriken. Abschließend wird SCPM hinsichtlich seiner aktuellen Anwendbarkeit untersucht, um offene Punkte zu identifizieren. Hier wird unter anderem die Erfahrung aus der Fallstudie verwendet.

## 2. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ERGEBNISSE DER ARBEIT

Eine der beiden grundlegenden Fragen, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollten, war: „Bringt der Einsatz von COTS-Komponenten insgesamt einen Vorteil für ein Raumfahrtprojekt?“ Die übergreifende Schlussfolgerung dieser Arbeit ist, dass es keine einfache Antwort für diese Frage gibt. Sie kann nicht beantwortet werden, ohne alle notwendigen Aspekte dieses Themas zu differenzieren. Der wichtigste Beitrag dieser Arbeit für die Disziplin der Raumfahrttechnik ist die Identifikation und strukturierte Präsentation dieser Aspekte, die zur Beantwortung dieser Frage betrachtet werden müssen. Neben der Auflistung von relevanten Aspekten, die beachtet werden müssen, wenn man sich mit COTS-Komponenten in der Raumfahrt beschäftigt, beinhaltet diese Arbeit die Entwicklung von Werkzeugen und Methoden, mit denen man das Problemfeld organisieren und eine Herangehensweise ermitteln kann:

- Spacecraft Architecture Framework (SCAF)
- Generischer Evaluationsprozess zur Bewertung von COTS-Komponenten und
- Spacecraft Performance Model (SCPM)

Diese drei Hilfsmittel sind essentiell, wenn man die potentielle Anwendung von COTS-Komponenten in der Raumfahrt mit einem objektiven und ökonomischen Ansatz untersuchen will.

Obwohl es keine allgemein anwendbare Antwort auf die Frage gibt, ob COTS-Komponenten insgesamt einen Vorteil für Raumfahrtprojekte bringen, liefert diese Arbeit dennoch einige individuelle Erkenntnisse in dieser Problematik:

- 1) COTS-Komponenten, welche nicht formal raumfahrtqualifiziert sind, können das Potential haben, Vorteile für ein Raumfahrtprojekt zu bringen. Diese Aussage trifft nicht auf alle Komponentenfamilien gleichermaßen zu. Einige Komponenten kategorien zeigen höheres Potential als andere. Die vorliegende Arbeit definiert ein Hilfsmittel, die so genannte Potentialanalyse, um

- diese Kategorien zu identifizieren.
- 2) Die Identifikation der am meisten versprechenden generischen Komponenten-kategorien durch die Durchführung der komplette Potentialanalyse konnte nicht abgeschlossen werden, da die dazu benötigten Datensätze (hauptsächlich Kostendaten) nicht vollständig ermittelt werden konnten. Es wird empfohlen, dass jede Firma diese Potentialanalyse separat durchführt, um Vertraulichkeitshindernisse zu überwinden und unterschiedliche Kostenstrukturen in den Firmen auf Grund des hohen Einflusses von Einkaufsverhandlungen auf Komponentenpreise zu berücksichtigen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Potentialanalyse zu unterschiedlichen Ergebnissen in den jeweiligen Organisationen führt.
  - 3) Der Auswahl- und Evaluationsprozess für COTS-Komponenten bedarf eines hohen Aufwandes. Falls eine Organisation oder ein Projekt sich dafür entscheidet, den potentiellen Einsatz von COTS-Komponenten zu untersuchen, muss man erkennen, dass zuerst ein gewisses Investment aufgebracht werden muss, das keine Garantie auf Erfolg besitzt. Um das damit verbundene Risiko zu reduzieren, beschreibt diese Arbeit den generischen Evaluationsprozess für COTS-Komponenten, von dem die Potentialanalyse ein Teil ist. Anhand der Erfahrungen aus den Fallstudien lässt sich sagen, dass die subjektive Bewertung des COTS-Komponenten-Marktes durch erfahrene Domänenexperten die größte Rolle in den frühen Phasen der Bewertung spielt. Sie erlaubt eine frühe Aussortierung von unökonomischen COTS-Komponentenklassen mit vertretbarem Aufwand und sollte daher mit großer Sorgfalt durchgeführt werden.
  - 4) Die potentiellen positiven Effekte von COTS-Komponenten auf Satellitenarchitekturen, z.B. geringere Kosten und höhere funktionale Leistung wie sie ausführlich in der Arbeit behandelt werden, werden durch zwei Effekte reduziert oder sogar aufgehoben, wie sie in der Arbeit identifiziert wurden:
    - Modifikationen der originalen COTS-Komponenten, welche zur Anpassung der Komponenten an die Weltraumumwelt notwendig sind, führen oft zu erhöhten Kosten und manchmal auch zu reduzierter Leistungsfähigkeit. Der Kosteneffekt wird durch die Bewertung der direkten Kosten ermittelt, welche Teil der in dieser Arbeit definierten standardisierten Modellierung von Komponenten ist.
    - Änderungen der Satellitenarchitektur, welche zur Anpassung an geänderte Eigenschaften von COTS-Komponenten notwendig sind (oft nicht-funktionale Eigenschaften wie Energiebedarf oder Temperaturbeständigkeit), führen ebenfalls meist zu einer Verschlechterung. Dieser Effekt wird durch die standardisierte Modellierung von Satellitenarchitekturen ermittelt, welche ebenfalls Teil dieser Arbeit ist.
  - 5) Diese Erkenntnis der beiden Effekte lässt die Schlussfolgerung zu, dass konkrete Aussagen über den Nutzen von COTS-Komponenten nur für konkrete Satellitenarchitekturen möglich sind. Idealerweise wird dies mit einer standardisierten Modellierung von Satellitenarchitekturen erreicht. Die vorliegende Arbeit stellt dazu zwei Hilfsmittel zur Verfügung: SCAF und SCPM
  - 6) Das Problem, dass nur unvollständige Daten für COTS-Komponenten verfügbar sind, besonders im Hinblick auf deren Verhalten unter Weltraumbedingungen, tritt in allen Phasen der COTS-Evaluation auf. Die Erfahrungen dieser Arbeit legen nahe, dass dies das größte Hindernis im täglichen Arbeiten mit COTS-Komponenten in der Raumfahrt ist.
  - 7) Diese Arbeit hat auch einen Teufelskreis im Umgang mit COTS-Komponenten identifiziert: Die Nutzung von COTS-Komponenten, welche nicht offiziell weltraumqualifiziert sind, ohne zusätzliche Maßnahmen führt zu einem nicht akzeptablen Risiko für die meisten Raumfahrtprojekte<sup>2</sup>. Wenn COTS-Komponenten für den Einsatz im All fit gemacht werden, verlieren sie allerdings oft den eigentlichen COTS-Status und damit viele der damit verbundenen Vorteile, z.B. niedrigere Kosten durch hohe Stückzahlen oder einfacher Zugang zu den Komponenten. Dieser Verlust des Status kommt zusätzlich zu den reduzierten positiven Eigenschaften der COTS-Komponenten hinzu, die durch notwendige Modifikationen dieser entstehen. Drei Erfolg versprechende Strategien zur Umgehung dieses Teufelskreises, welche beliebig kombiniert werden können, sind:
    - Finde COTS-Komponenten, die entweder keine oder nur geringe Modifikationen benötigen, um in der Raumfahrt eingesetzt werden zu können.
    - Finde COTS-Komponenten, welche überdurchschnittlich hohe potentielle Vorteile haben und daher den zusätzlichen Aufwand für Modifikationen wert sind.
    - Realisiere die notwendigen Modifikationen der COTS-Komponenten selbst, als Satelliten integrierende Organisation, um die meisten der Statusvorteile zu bewahren.
  - 8) Die Ergebnisse der Fallstudie über den möglichen Einsatz eines COTS-Computerprozessors in einem Satelliten zeigen, dass die Nutzung von COTS-Komponenten oft nur einen minimalen Effekt auf die Reduzierung der Gesamtkosten einer Raumfahrtmission haben. Diese Erfahrung führt zu der Schlussfolgerung, dass der isolierte Austausch einzelner traditioneller Komponenten mit COTS-Komponenten in einem Satelliten, während man alle anderen Komponenten unverändert beibehält, zu keiner umfangreichen Kostenreduzierung führt. Es kann daraus geschlossen werden, dass nur eine breite Anwendung von COTS-Komponenten in Satelliten, wo immer es technisch möglich und aus Kostengründen sinnvoll ist, zu deutlichen Reduktionen der Gesamtkosten der Mission führen kann. Dies hat zur Folge, dass die komplette Entwicklungsphilosophie einer Organisation, die Satelliten entwickeln will, daraufhin ausgerichtet werden muss, so viele COTS-Komponenten wie möglich einzusetzen. Dies hat zwei direkte organisatorische Konsequenzen:
    - Anpassung von existierenden Entwicklungsprozessen, z.B. die Integration des COTS-Evaluationsprozesses aus dieser Arbeit in die tägliche Entwicklungsarbeit
    - Änderung der Organisation, z.B. die Errichtung dezidiert Abteilungen für das systematische Testen des Verhaltens von verfügbaren COTS-

<sup>2</sup> Ausnahmen sind oft Studentenprojekte an Universitäten, wo dieses Risiko akzeptiert wird.

### Komponenten in einer Weltraumumwelt

Neben diesen direkt nachvollziehbaren Schlussfolgerungen und Ergebnissen vermitteln die in dieser Arbeit gemachten Erfahrungen zusätzlich einen subjektiven Eindruck, welche Komponentenklassen den größten Erfolg für zukünftige, nähere Untersuchungen versprechen. Diese Eindrücke sind rein subjektiv, da die Potentialanalyse und die detaillierte Modellierung der Komponentenkandidaten nicht für alle Komponentenklassen abgeschlossen werden konnte. Die Komponentenklassen, für die eine weitere, nähere Betrachtung empfohlen wird, sind:

- Datenverarbeitungselektronik (z.B. Prozessoren, Arbeitsspeicher, Massenspeicher), wenn deren höhere Leistungsfähigkeit tatsächlich benötigt wird, z.B. für rechenintensives Bearbeiten von Nutzlastdaten an Bord des Satelliten
- Software-Komponenten, z.B. Betriebssysteme oder Regelungs- und Steuerungssoftware

### 3. WEITERFÜHRENDE FORSCHUNGEN

Die in dieser Arbeit gesammelten Ergebnisse werden derzeit dazu verwendet, am Lehrstuhl für Raumfahrttechnik der TU München weiterführende Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der „Satellitenarchitekturen mit kommerziellen „Off-the-shelf“-Komponenten“ zu definieren und durchzuführen.