

Hierarchie von Entwurfsentscheidungen im modellbasierten Entwurf komplexer Systeme

Johannes Groß¹, Stephan Rudolph¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Pfaffenwaldring 27, 70569 Stuttgart, gross@isd.uni-stuttgart.de, rudolph@isd.uni-stuttgart.de

Zusammenfassung: Es wird ein generelles Schema für die Anwendung graphenbasierter Entwurfssprachen im Entwurf komplexer Systeme vorgestellt. In einem Beispielszenario werden für das Kommunikationssystem eines Satelliten verschiedene Varianten untersucht. Dazu werden Bauteil- und Subsystemanalysen durchgeführt. Hierbei wird gezeigt, dass die Entwurfsentscheidungen vom gewählten Fokus der Analyse abhängen. Es wird veranschaulicht, wie die Entscheidungsfindung in Anbetracht dieser Abhängigkeiten hierarchisch gestaltet werden kann. Abschließend werden für die Analyse des Gesamtsystems verschiedene Analysemodelle in einer konsistenten Form durch die Entwurfssprache generiert.

1 Einleitung

Der Entwurf von komplexen Systemen zeichnet sich durch einen überaus hohen Grad an Abhängigkeiten unter den verschiedenen Komponenten aus. Diese Situation kann als starke Kopplung des Entwurfs bezeichnet werden. In solchen Fällen führen lokale Entscheidungen bestenfalls zu lokal optimalen (Subsystem-)Entwürfen. Dass die Kombination von zwei lokalen (Subsystem-)Optima ein globales (System-)Optimum ergibt, ist jedoch aufgrund der Kopplungen zwischen den Systemkomponenten i.A. nicht gegeben. Im Folgenden wird daher erläutert, wie derartige Situationen im modellbasierten Entwurf komplexer Systeme systematisch und erfolgreich gehandhabt werden können.

2 Entwurfssprachen im modellbasierten Entwurf

Das Konzept der *graphenbasierten Entwurfssprachen* [Rud03] wird seit längerer Zeit am Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart wissenschaftlich untersucht. Diese werden von einem so genannten Entwurfscompiler 43 übersetzt, der von der ILS GmbH in Kooperation mit der Universität Stuttgart entwickelt wurde und die Verarbeitungsschritte der in Bild 1 dargestellten Prozesskette übernimmt. Das Wissen der jeweiligen Ingenieurdomäne wird hierbei in den *Vokabeln* (d.h. Bausteinen) abgelegt, die in diesem Fall in Form von UML-Sprachelementen abgespeichert sind. Die *Vokabeln* werden über *Regeln* miteinander verknüpft, durch die Regelverarbeitung im Entwurfscompiler entsteht ein *Entwurfsgraph*, der alle relevanten Informationen des Entwurfs enthält. Aus diesem Entwurfsgraphen können dann verschiedenste Analysemodelle, wie in Bild 1 rechts dargestellt, generiert werden.

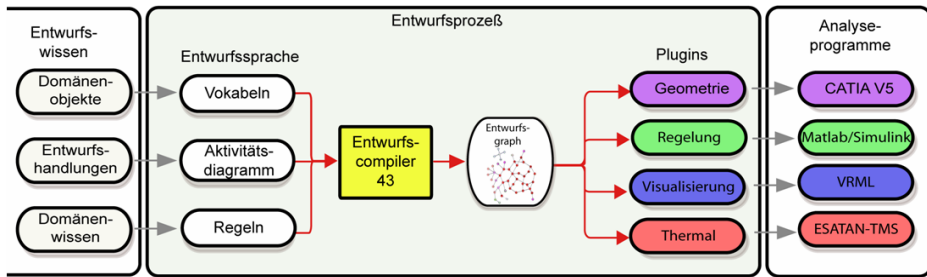


Bild 1: Prozesskette des Entwurfscompilers 43

Die Regeln für den Aufbau des Modells bestehen hauptsächlich aus *InstanceSpecifications* der UML. In Bild 2 ist eine solche Regel, zum Einbau einer Antenne abgebildet. Auf der linken Seite (*LHS*) können Vorbedingungen eingegeben werden. Sind die dort abgebildeten Instanzen nicht vorhanden, wird die Regel nicht ausgeführt. In dem abgebildeten Beispiel wird eine Instanz mit beliebigem Namen (ausgedrückt durch den regulären Ausdruck ".*") der Klasse "SatelliteLink" gesucht. An diese Instanz wird im rechten Teil der Regel (*RHS*) eine neue Instanz mit dem Namen "parabolicAnt" der Klasse "ParabolicAntenna" eingebaut. Die neue Instanz wird über eine Assoziation mit der vorhandenen Instanz verbunden. Dies ist durch die (blaue) Linie erkennbar.

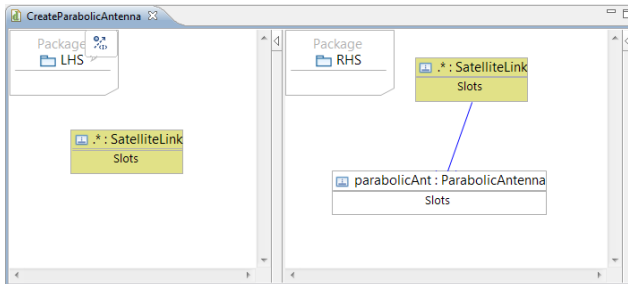


Bild 2: Beispiel einer Regel für den Einbau einer Antenne

Aus mehreren Regeln wird dann in einem oder mehreren UML-Aktivitätsdiagrammen, die zudem noch hierarchisch geschachtelt werden können, der gesamte Ablauf des Entwurfs modelliert. In Bild 3 ist das Beispiel eines Aktivitätsdiagramms zum Einbau eines Kommunikationssystems in einen Satelliten dargestellt.

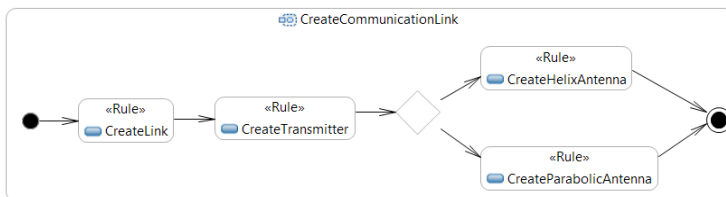


Bild 3: Aktivitätsdiagramm zum Bau des Kommunikationssystems

Die Ausführung beginnt in Bild 3 auf der linken Seite mit dem ausgefüllten Kreis. Als erstes wird die Regel "CreateLink" ausgeführt. Nach dem diese und die nachfolgende Regel „Create Transmitter“ ausgeführt wurden, kommt der Ablauf zu einem *DecisionNode*. In diesem Element kann mittels OCL (Object Constraint Language) eine Entscheidung über den weiteren Verlauf der Aktivität getroffen werden. Im vorliegenden Fall wird darüber entschieden, ob im Satellit eine Helixantenne (über die Regel „CreateHelixAntenna“) oder eine Parabolantenne (über die Regel „CreateParabolicAntenna“) eingebaut wird. Schließlich kommt der Ablauf nach einer dieser beiden Regeln zum Endknoten, der die Aktivität beendet und zur darüberliegenden Aktivität übergibt.

Für die skizzierte Vorgehensweise bietet es sich im Entwurf komplexer Systeme an, auf das bewährte Schema der Konstruktionssystematik nach Pahl/Beitz [PB03] zurückzugreifen und dieses in einer graphenbasierten Entwurfssprache umzusetzen. Diese Konstruktionssystematik beschreibt, wie in Bild 4 dargestellt, die Entwicklung eines Systementwurfs über vier verschiedene Räume hinweg.

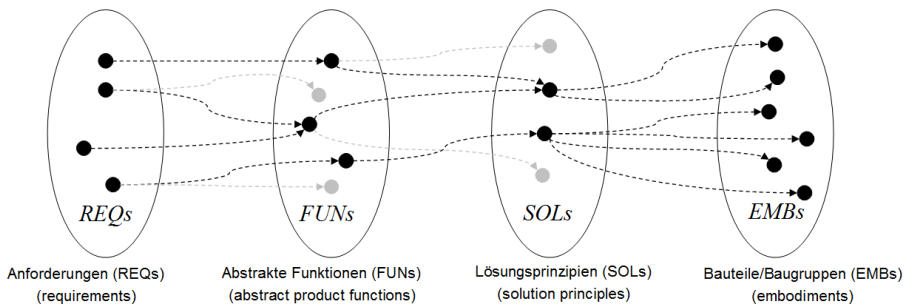


Bild 4: Konstruktionssystematik nach [PB03]

Der Entwurf beginnt nach dieser Systematik in Bild 4 mit den *Anforderungen (requirements)* an das Produkt. Diese Anforderungen werden auf *abstrakte Funktionen (abstract functions)* übertragen, mit welchen die Anforderungen erfüllt werden können. Für diese abstrakten Funktionen werden dann im nächsten Schritt *Prinziplösungen (solution principles)* gesucht, durch welche ein späteres Bauteil die Funktion bzw. die Anforderungen erfüllen kann. Im letzten Schritt werden dann die konkreten Bauteile (*embodiments*) ausgesucht. Wie in Bild 4 dargestellt, können in manchen Schritten mehrere Alternativen zur Auswahl stehen. Ist ein Punkt in Grau dargestellt, so ist dies eine nicht gewählte Entwurfsalternative. Auf diese Weise werden nicht alle Funktionen oder Lösungsprinzipien bis zur vollen Tiefe durchkonstruiert, sondern scheiden schon in früheren Entwurfsphasen aus. Die Konstruktionssystematik verhindert vorschnelle Festlegungen und hilft daher, die Vielfalt modellierter Entwürfe maschinell zu erzeugen.

Die Zuweisung von einem der oben dargestellten Räume in den jeweils darauf folgenden Raum geschieht dabei durch die Regeln. Auf der linken Seite ist als Vorbedingung das Objekt, welches die Anforderung, Funktion oder das Lösungsprinzip repräsentiert. Auf der rechten Seite ist das Objekt, welches die ausgewählte Funktion, das Lösungsprinzip oder das Bauteil repräsentiert. So kann man durch die Auswahl der Regel entscheiden, welche der Alternativen im aktuellen Entwurf verwendet werden soll.

3 Analyse von Entwurfsalternativen

Im Folgenden wird in einem Beispiel gezeigt, wie sich die vorgestellte Systematik im Entwurf eines Satellitensubsystems einsetzen lässt bzw. auswirkt. Das vorgestellte Beispiel ist hierbei Teil einer Entwurfssprache für Satelliten, die derzeit im Rahmen eines Dissertationsvorhabens neu entwickelt und aufgebaut wird und auf Vorarbeiten in der Arbeitsgruppe von [ScR05] zurückgreift. Es handelt sich bei dem Beispiel um das Kommunikationssystem eines im niedrigen Erdorbit fliegenden Drei-Achsen stabilisierten Satelliten. Dieser Satellit soll für verschiedene Kommunikationsanforderungen mit einer Antenne ausgestattet werden. Dabei kann z.B. durch die Richtwirkung einer Antenne eine höhere Datenrate bei gleicher Sendeleistung erreicht werden.

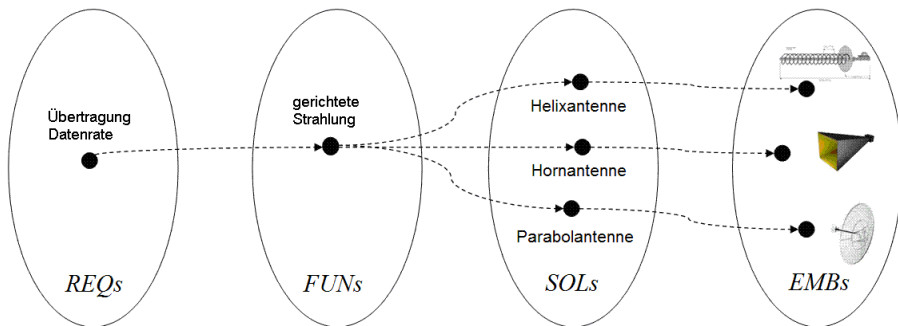


Bild 5: Beispiel einer Verzweigung im Entwurf

In Bild 5 ist diese Situation innerhalb des generellen Schemas nach Pahl/Beitz in Bild 4 dargestellt. Für die Erfüllung der Anforderung „Übertragung Datenrate“ bieten sich bei gleicher (bzw. hier willkürlich gleich gehaltener) abstrakter Produktfunktion „gerichtete (elektromagnetische) Strahlung“ drei verschiedene Prinziplösungen an. Die oberste Lösung ist eine *Helixantenne* nach [Kar10], welche durch einen helikalen Leitungsdraht eine axiale Richtwirkung entfaltet. Die mittlere Lösung ist eine pyramidale *Hornantenne* und der unterste Lösungsast stellt den Einbau einer *Parabolantenne* dar. Für das jeweilige Lösungsprinzip wurde hier nur jeweils eine Bauweise (die jedoch parametrisch noch durchaus unterschiedlich ausgeprägt werden kann) in Betracht gezogen, um das dargestellte Beispiel einfach und übersichtlich zu halten.

3.1 Auswahl von Bauteilen

Um nun eine Entscheidung zwischen den alternativen Lösungsprinzipien zu ermöglichen, werden die Bauteile in einfacher Weise modelliert, konstruiert und ausgelegt. Um dies zu erreichen verwendet man meist einfachere, algebraische Gleichungen, welche die Funktion, das Lösungsprinzip und das Bauteil beschreiben. Diese Gleichungen werden dann ineinander eingesetzt, um eine Abhängigkeit der Masse der Antenne von dem erreichten Gewinn (antenna gain) angeben zu können. Der Gewinn der Antenne entspricht ihrer Richtwirkung, dem Wirkungsgrad der Antenne. In Bild 6 sind nun die verschiedenen Antennenmassen über einen bestimmten Gewinnbereich aufgetragen.

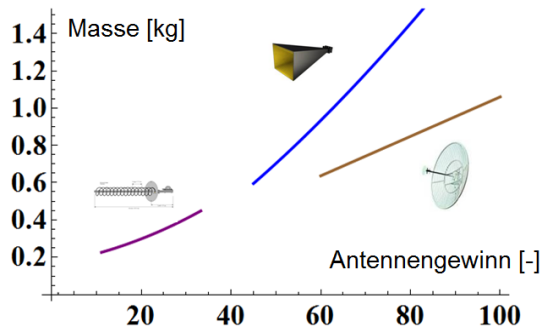


Bild 6: Skalierungsverhalten verschiedener Bauteile

Aus Bild 6 ist zu erkennen, dass die Helixantenne eher für den Bereich schwacher Richtwirkungen zu verwenden ist. Dafür ist es jedoch auch eine leichte Antenne. Bei größeren Gewinnforderungen kommt dann zunächst die Hornantenne zum Einsatz. Bei der Hornantenne wächst jedoch die Masse recht schnell für höhere Gewinne. Dies liegt daran, dass die Seitenflächen der Antenne verlängert werden müssen und dadurch die Oberfläche der Pyramide stark ansteigt. Die Parabolantenne ist für Gewinne kleiner 60 bei der gewählten Wellenlänge nicht einsetzbar bzw. überdimensioniert, da die Bauform dies nicht zulässt. Im Bereich von hohen Gewinnen stellt die Parabolantenne jedoch eine sehr effiziente Bauform dar.

Für die Auswahl des Bauteils kann nun entsprechend der benötigten Richtwirkung die beste Antenne mit der geringsten Masse ausgesucht werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass auch die Größe der Antenne eine entscheidende Rolle spielen kann. In manchen Fällen muss deshalb die größere Masse einer Hornantenne gegenüber einer Parabolantenne in Kauf genommen werden, um die kleinere Bauform dieser Antenne nutzen zu können. Dies führt zu einer Kompromissbildung auf Bauteilebene.

3.2 Auswahl von Subsystemen

Im Entwurf komplexer Systeme tritt ständig die Situation auf, dass die einzelnen Bauteile interagieren und damit nicht mehr isoliert voneinander betrachtet werden können. Die Konsequenzen sind hier Anhand des Kommunikationssystems beschrieben.

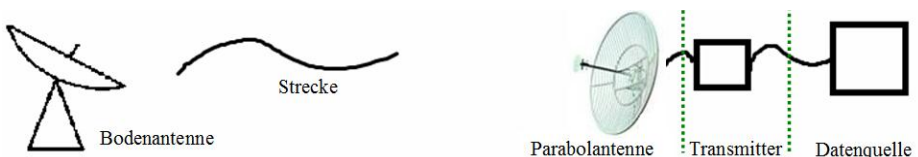


Bild 7: Skizze des Kommunikationssystems

Das Modell eines Kommunikationssystems ist in Bild 7 skizziert. Es besteht aus der Bodenantenne, der Übertragungsstrecke, der Empfangsantenne sowie dem Transmitter.

Der Transmitter übernimmt in diesem Fall ebenfalls die Funktion des Verstärkers. Da es schwierig ist, eine allgemeine Auslegungsgleichung für einen solchen Transmitter herzuleiten, wurde für die Analyse eine lineares Wachstum der Masse des Transmitters über der Ausgangsleistung angenommen. Diese Vorstellung ist für große Leistungsbereiche zwar nicht zutreffend, wird hier jedoch mangels einer besseren Modellvorstellung in einem kleinen Leistungsbereich verwendet.

Wenn man nun den Funktionsgraphen der Masse des Kommunikationssystems über der verbrauchten Leistung und der übertragenen Datenrate aufträgt, ergibt sich eine Fläche im 3-dimensionalen Raum. In Bild 8 ist diese Fläche für das System mit der Parabolantenne dargestellt. Hier ist zu sehen, dass es in dem Gewichtsverlauf für jede Datenrate eine Leistung mit minimaler Masse gibt. Ein gewichtsoptimaler Entwurf verläuft also entlang dieser Senke im Entwurfsraum des Kommunikationssystems.

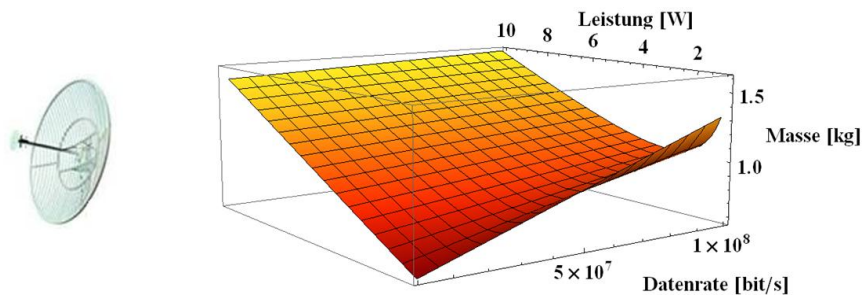


Bild 8: Zustandsfläche des Kommunikationssystems mit einer Parabolantenne

Dies ist nun einer der entscheidenden Punkte im Entwurf komplexer Systeme. Die in Bild 6 gezeigten Kurven der Bauteile verraten zunächst nichts über eine optimale Größe der Antenne. Erst durch das Zusammenspiel zwischen Antenne und Transmitter ergibt sich ein optimales Verhältnis zwischen Transmitterleistung und Antennengewinn. Diese Kopplung wird erst bei der gemeinsamen Betrachtung im Systemzusammenhang wirksam. Aus diesem Grund sind (Kopplungs-)Analysen des (aus Subsystemen oder Bauteilen) integrierten Systems wichtiger Bestandteil im Entwurf komplexer Systeme.

Die Kurvenform in Bild 8 ergibt sich wie folgt: Für sehr kleine Leistungen des Transmitters muss die Antenne einen sehr hohen Gewinn liefern. In diesem (ersten) Fall wird also die Antenne geometrisch sehr groß werden und daher hohe Systemmassen verursachen. Dreht man die Situation um und stellt in einem alternativen (zweiten) Fall dem Transmitter mehr Leistung zur Verfügung, kann die Größe der Antenne wieder kleiner werden („schrumpfen“), da dann weniger Gewinn benötigt wird. Die kleiner werdende Antenne kann jedoch ab einem bestimmten Wert nicht mehr das steigende Gewicht des Transmitters wettmachen. Auf diese Weise ergibt sich an allen „Gleichgewichtspunkten“, die auf einer Linie im Raum liegen, ein Gewichtsminimum, an dem die beiden Bauteile Transmitter und Antenne eine "ausgewogene" Größe besitzen.

Diese systemischen Betrachtungen sind in ihrer Art völlig allgemein zu verstehen und auf beliebige andere Bauteil-, Subsystem- und Systemebenen hierarchisch anwendbar.

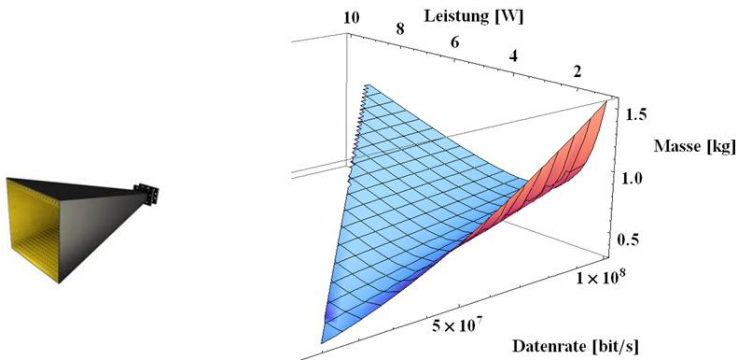


Bild 9: Zustandsfläche des Kommunikationssystems mit einer Hornantenne

Im Fall der Hornantenne (Bild 9) ist die Form der Zustandsfläche in Bild 8 ähnlich, jedoch ergibt sich hier ein Abbruchkriterium, bei welchem die Antenne aus geometrischen Gründen nicht mehr kleiner gebaut werden kann. Dies führt zu einer Kante, welche schräg über die Fläche von kleinen Leistungen bei kleinen Datenraten hin zu größeren Transmitterleistungen bei größeren Datenraten verläuft. Hierbei ist anzumerken, dass beide Flächen nur eine Approximation eines realen Systems darstellen können.

Diese Approximation ist jedoch zum Vergleich der beiden Systeme völlig ausreichend. Hierfür sind in Bild 10 die beiden Flächen aus Bild 8 und Bild 9 überlagert dargestellt. Die rote obere Fläche stellt das Kommunikationssystem mit einer Parabolantenne dar, während die etwas weniger gut sichtbare ocker/grau gehaltene Fläche das System mit der Hornantenne charakterisiert.

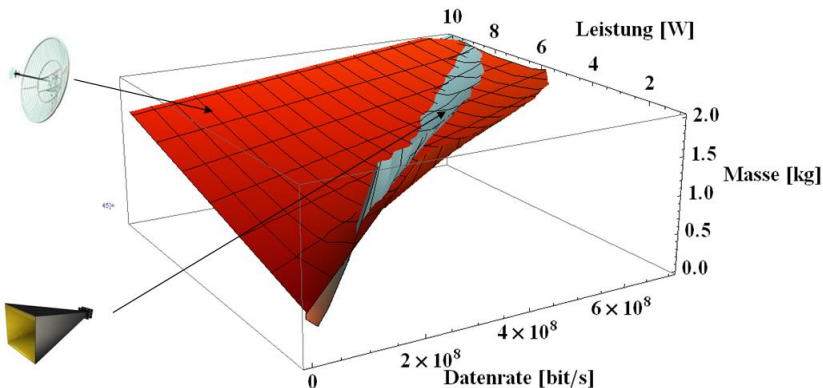


Bild 10: Die beiden Zustandsflächen aus Bild 8 und Bild 9 überlagert

Es ist nun sehr einfach zu erkennen, dass im Bereich niedriger Datenraten das System mit der Hornantenne eine niedrigere Masse besitzt als das System mit der Parabolantenne. Bei steigenden Anforderungen an die Übertragungsrate stößt jedoch die Zustandsfläche der Hornantenne durch jene der Parabolantenne und stellt somit das System mit der größerem Masse dar. Die Schnittlinie der beiden Kurven stellt also in einem idealen

Szenario, in dem die Systemmasse das einzige Auslegungskriterium ist, die (Gleichgewichts-)Linie dar, an der die Technologie der Parabolantenne die der Hornantenne ablöst. Bild 10 kann damit bei der Entscheidung für das Kommunikationssystem direkt Aufschluss darüber geben, welches Antennenbauteil die geringere Masse liefern wird.

3.3 Generierung von Analysemodellen

Für die Entscheidungsfindung im Satellitenentwurf ist es jedoch nicht nur von Bedeutung, die funktionalen und analytisch darstellbaren *starken Kopplungen* des Entwurfs zu untersuchen. Auch Feldprobleme, d.h. die Gesamtzusammenhänge im System können einen wichtigen Einfluss auf die Auswahl und Auslegung der Subsysteme und ihrer Bauteile haben. Dieser Einfluss nimmt mit steigender *Integrationsdichte* des Systems zu. Allerdings wird die Überprüfung deren Einhaltung erst nachgelagert möglich, wenn nach der Festlegung der Entwurfstopologie auch dessen Geometrie (*packaging*) bekannt ist.

Wenn die Auswahl der Bauteile erfolgt ist, kann man im Entwurfsgraph die Geometrieminformation für die einzelnen Bauteile hinterlegen. Mithilfe dieser Informationen lassen sich dann verschiedene Analysemodelle generieren. Zum einen kann man die Geometrie des Gesamtsystems in CATIA V5 anzeigen und bearbeiten. Neben dem Export nach CATIA wird noch eine Schnittstelle für VRML (Virtual Reality Modeling Language siehe[VRM97]) verwendet, um ohne lange Wartezeit ein einfaches 3D Modell anzeigen zu können. In Bild 11 sind die beiden Geometriemodelle dargestellt.



Bild 11: Geometriemodell in CATIA V5 (li.) sowie in einem VRML-Programm (Cortona) (re.).

Neben dem Geometriemodell (*packaging*) ist es für den Satellitenentwurf von essenzieller Bedeutung auch eine Modellierung des Thermalhaushalts durchzuführen. Hierfür wird in einem Thermalsimulationsprogramm ESATAN-TMS, welches in der europäischen Raumfahrtindustrie zur Anwendung kommt [ESA11], verwendet. Dazu wird die Geometrie zusammen mit den notwendigen thermalen Randbedingungen automatisch in ein ESATAN-TMS Modell überführt. Es können dadurch automatisch alle Materialwerte wie z.B. die Abstrahlung, die Wärmekapazität oder die Reflektion eines Bauteils übertragen werden. Für die Verbindungen der Bauteile untereinander ist es wichtig, die Wärmeleitung zu modellieren. Auch diese Werte können aus dem topologischen Modell des Entwurfsgraphen automatisch abgeleitet und nach ESATAN exportiert werden. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [Koc10]. Um die Simulation des Modells konsistent zur Entwurfssprache durchführen zu können, werden auch die Orbitdaten des Entwurfs automatisch an ESATAN übertragen. In Bild 12 sind von links nach rechts die verschiedenen Sichten der generierten Thermalsimulation dargestellt.

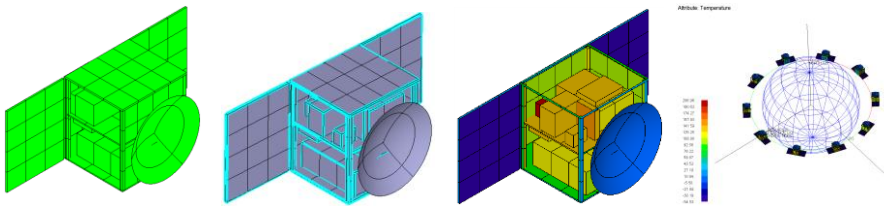


Bild 12: Generiertes ESATAN-TMS Modell des Entwurfs mit der Geometrie (links), den ConductiveInterfaces, den Simulationsergebnissen und der Orbitansicht (rechts)

Um abschliessend das Verhalten des Satelliten im Orbit überprüfen zu können, wird ein Modell für das Programm Matlab-SIMULINK automatisch generiert. Dieses Modell beinhaltet eine einfache Modellierung des Lage- und Bahnregelungssystems wie in [Rie11] beschrieben. Es werden die jeweils verwendeten Aktuatoren berücksichtigt und in Abhängigkeit davon verschiedene Regelungsalgorithmen umgesetzt.

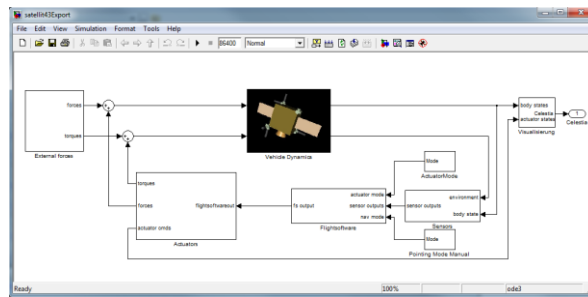


Bild 13: Generiertes Matlab-SIMULINK Modell zur Simulation des Lageregelungssystems

In Bild 13 ist die oberste Ebene des hierarchischen Modells dargestellt. Dort sind die einzelnen Modellkomponenten als Kästchen dargestellt: die Starrkörperbewegung des Satelliten, die Visualisierung, die Flugsoftware, die Modellierung der Aktuatoren sowie die Berechnung der externen Kräfte. Es stehen verschiedene Ausrichtungsoptionen zur Wahl um die verschiedenen Modi (*safe mode*, *tumbling mode*, *pointing mode*, etc.) des Satelliten abzubilden. In einer VRML-Darstellung, wie in Bild 14 dargestellt, kann das Verhalten des Satelliten zudem während der Simulation betrachtet werden.

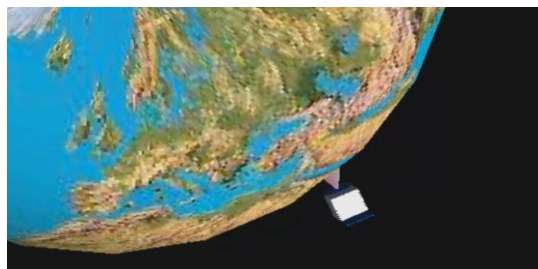


Bild 14: Visualisierung der Lageregelungssimulation (hier: *pointing mode*)

4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, wie die Konstruktionssystematik nach Pahl/Beitz [PB03] als Schema für den Entwurf mit graphenbasierten Entwurfssprachen umgesetzt werden kann. Die systematische Unterteilung der Entwurfsentscheidungen in die vier verschiedenen Räume (Anforderungen → abstrakte Funktionen → Lösungsprinzipien → Bauteile) hilft dabei, die Entwurfsmöglichkeiten nicht sofort durch vorzeitige Festlegung auf Bauteile oder Prinziplösungen einzuschränken. Dadurch kann der Entwurfsraum für ein bestimmtes Problem formal nachvollziehbar und maschinell umfassend erschlossen werden.

Anhand des Kommunikationssystems werden die Auswahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Entwurfsalternativen demonstriert. Die Analysen auf Bauteilebene helfen zunächst eine grobe Vorentscheidung zu treffen. Bei der Untersuchung im Systemzusammenhang können dann klar abgegrenzte Entwurfsgebiete festgestellt werden. Dadurch kann der Ingenieur bei der Entscheidungsfindung auf mathematisch fundierte und im Rahmen der Modellvorstellungen exakte Analysen zurückgreifen.

Graphenbasierte Entwurfssprachen bieten hierbei alle notwendigen Mittel und Verfahren, um die Gleichungen für die erforderlichen Diagramme automatisch abzuleiten. Zudem wird gezeigt, dass sich aus dem konsistenten Modell des Gesamtsystems auch verschiedene Domänenmodelle automatisch generieren lassen. Es sind dies verschiedene Geometriemodelle, ein Modell zu Thermalsimulation mit den notwendigen Randbedingungen sowie ein ausführbares Modell zur Simulation der Lageregelung des Satelliten.

Zukünftig wird die vorgestellte Hierarchie der Entscheidungsfindung noch auf die Gesamtsystemanalyse erweitert werden. Durch den Einsatz graphenbasierten Entwurfssprachen können damit auch in einem späteren Entwurfsstadium zur Systemoptimierung noch Bauteile oder ganze Subsysteme ohne großen Aufwand ausgetauscht werden, dies sollte durch die modellbasierte automatische Modellgenerierung bei gleichbleibender Ergebnisqualität zu einer umfassenden Reduktion der Entwicklungszeiten führen.

Literaturverzeichnis

- [ESA11] Website: www.esatan-tms.com, ->Software Products, letzter Abruf: 25.08.2011
- [Kar10] Kark, K.: Antennen und Strahlungsfelder, 3. erw. Auflage, Vieweg+Teubner Wiesbaden 2010, Seite 401f.
- [Koc10] Kocak, M.: Erstellung einer Schnittstelle zur generischen Thermalsimulation von Satelliten. Diplomarbeit, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, 2010.
- [PB03] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, 6. Auflage, Springer Berlin 2003
- [Rie11] Riestenpatt genannt Richter, M.: Eine Entwurfssprache zur Auslegung der Lage- und Bahnregelung von Satelliten. Studienarbeit, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, 2011.
- [Rud03] Rudolph, S.: Aufbau und Einsatz von Entwurfssprachen für den wissensbasierten Ingenieurentwurf. 3. Forum Knowledge Based-Engineering, CAT-PRO, Stuttgart, 9. Oktober 2003.
- [ScR05] Schäfer, J.; Rudolph, S.: Satellite Design by Design Grammars. In: J. of Aerospace Science and Technology 9, Elsevier 2005, Seite 81-91.
- [VRM97] Carey, R.; Bell, G.: *The Annotated VRML 2.0 Reference Manual*. Add.-Wesley, 1997.