

MELISSA – eine LabVIEW-basierte Umgebung zur Simulation von Lebenserhaltungssystemen

Das Untersystem zur Lebenserhaltung der Besatzung (Environmental Control and Life Support System, ECLSS) ist eines der herausragenden Merkmale, welches bemannte Raumfahrzeuge und Raumstationen von Satelliten und unbemannten Plattformen unterscheidet. Aufgrund einer Vielzahl von inneren Verknüpfungen bei gleichzeitig höchsten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit gestaltet sich der Designprozeß auf Subsystemebene sehr anspruchsvoll.

Um die Arbeit des Entwurfsingenieurs in diesem Bereich zu unterstützen, wurde am Institut für Raumfahrtssysteme die Software „MELISSA“ (Modular Environment for Life-Support Systems Simulation and Analysis) entwickelt, die in diesem Aufsatz vorgestellt wird [1]. Als Basis von MELISSA dient das National-Instruments-Produkt LabVIEW, welches eine komfortable graphische Programmiersprache und Benutzeroberfläche zur Verfügung stellt.

Einführung

Nachfolgend wird zunächst ein kurzer Überblick über die Grundlagen von Lebenserhaltungssystemen und Systemsimulation gegeben. Darauf werden die Anforderungen an die Simulationsumgebung spezifiziert und die daran orientierte Auswahl der Basis-Software vorgestellt. Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit den für den LabVIEW-Praktiker relevanten Aspekte der Implementierung von MELISSA und deren Demonstration anhand einer Simulation des Lebenserhaltungssystems der geplanten internationalen Raumstation. Zusammenfassung und Literaturverzeichnis schließen den Aufsatz ab.

Lebenserhaltungssysteme

Lebenserhaltungssysteme (ECLSS) sind ein charakteristisches Element der bemannten Raumfahrt, werden jedoch auch in anderen Bereichen – z. B. in Unterseebooten – eingesetzt. Ihr Zweck ist, menschliche Präsenz durch Bereitstellung von Luft, Wasser, Nahrung sowie sonstiger Notwendigkeiten zu ermöglichen. Abbildung 1 zeigt dies schematisch, wobei der hohe Grad der Vernetzung zwischen den einzelnen Funktionen deutlich wird.

Der Entwurf von ECLSS stellt den Ingenieur vor besondere Herausforderungen. Das Zusammenwirken der benötigten verschiedenartigen Geräte muß unter Berücksichtigung der Randbedingungen für Energiebedarf, Masse und Nachschubaufwand optimiert werden. Das Lebenserhaltungssystem, das selbst wiederum in das Gesamtsystem „Raumstation“ eingebunden ist, stellt so ein synergetisches Subsystem dar, bei dem aus der Verknüpfung bzw. teilweisen Verschmelzung von Komponenten Vorteile auf Gesamtsystemebene entstehen.

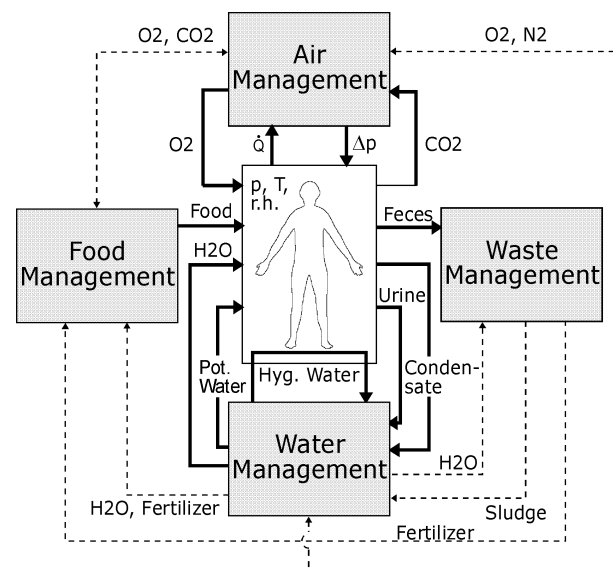


Abbildung 1: Grundfunktionen eines ECLSS [3]

* Universität Stuttgart, Institut für Raumfahrtssysteme, Pfaffenwaldring 31, 70550 Stuttgart. E-mail: osburg@irs.uni-stuttgart.de

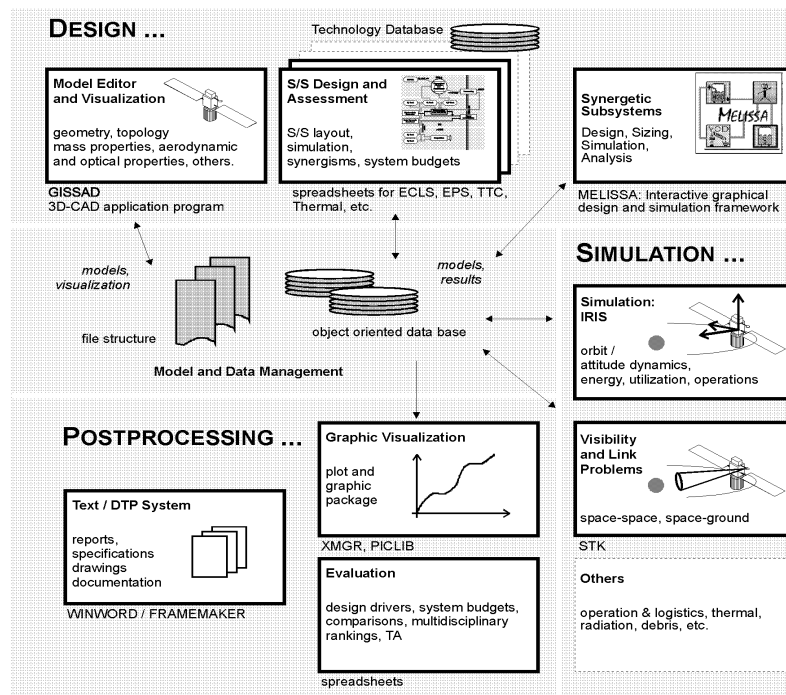


Abbildung 2: Einbindung von MELISSA in den Entwurfsprozeß [3]

Modellbildung und Simulation

Bei der Betrachtung synergetisch vernetzter Systeme kommt der rechnergestützten Simulation besondere Bedeutung zu, da das Verhalten dieser Systeme nicht aus einfacher Überlagerung des Verhaltens ihrer Komponenten bestimmt werden kann. Dies bedeutet für den Entwurfsprozeß, daß aus der Optimierung aller Untersysteme nicht unbedingt ein optimiertes Gesamtsystem hervorgeht [2].

Um optimales Gesamtverhalten zu erreichen, benötigt der Ingenieur ein Modell, in dem sowohl die Untersysteme als auch ihre Verknüpfungen erfaßt sind. Damit kann dann das Systemverhalten in Abhängigkeit von Komponentenkonfiguration und -parametern untersucht und so auf oftmals intuitive Weise ein Optimum gefunden werden.

Auch zur Ingenieurausbildung in Systemtechnik leisten Simulationsprogramme wertvolle Hilfe. Speziell die graphische Programmierung erlaubt eine anschauliche und realitätsnahe Modellierung vernetzter Systeme, und Systemzusammenhänge sowie Gesamtsystemverhalten sind durch interaktive Simulationsrechnungen direkt zugänglich („Hands-on education“).

Am Institut für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart wurde daher in den letzten Jahren unter dem Namen „Space Station Design Workshop“ (SSDW) ein Programmpaket entwickelt, das mittels mehrerer Simulationskomponenten die Untersuchung des Gesamtsystems „Raumstation“ aus verschiedenen Perspektiven ermöglicht [4]. MELISSA wurde zur Erweiterung des SSDW im Bereich des Entwurfs vernetzter Subsysteme entwickelt und eingebunden (Abbildung 2).

Definition der Anforderungen

Im Rahmen des für dieses Projekt verwendeten qualitätsorientierten Entwurfsprozesses ([5], [6]) kommt der anfänglichen Definition der Anforderungen besondere Bedeutung zu. Diese erfassen die Kundenwünsche und dienen somit in jedem Schritt als Prüfsteine für die Qualität der geleisteten Arbeit. Als „Kunde“ tritt dabei der zukünftige Benutzer aus Forschung oder Lehre auf.

Folgende Anforderungen wurden im Hinblick auf diese Anwender als relevant angesehen:

- ✧ intuitive Bedienbarkeit, interaktives Erstellen und Ausführen von Simulationen,
- ✧ objektorientierter modularer Aufbau mit einfacher Erweiterbarkeit,

- ✧ Unterstützung unterschiedlicher Beschreibungstiefen,
- ✧ grafische Darstellung und einfache Weiterverarbeitung der Ergebnisse,
- ✧ kontextsensitive Hilfefunktion, ausführliche Dokumentation,
- ✧ automatisierter Datentransfer von und zu den anderen Komponenten des SSDW,
- ✧ hohe Ausführungsgeschwindigkeit, gegebenenfalls Verwendung mehrerer Prozessoren,
- ✧ Einsetzbarkeit auf mehreren Plattformen.

Auswahl der Basissoftware

Die Entwicklung der Simulationsumgebung sollte durch Nutzung einer Basis-Software erleichtert werden, die Programmier- und Grafikfunktionen zur Verfügung stellt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene vorhandene Programme auf ihre Eignung hin untersucht. Die in Betracht gezogenen Anwendungen, die alle über eine graphische Benutzeroberfläche verfügen, entstammen folgenden Bereichen:

- ✧ Flowsheet-Simulatoren der Verfahrenstechnik,
- ✧ regelungstechnisch orientierte Simulationsprogramme,
- ✧ graphische Programmiersprachen,
- ✧ dedizierte ECLSS-Simulationssoftware.

Tabelle 1 zeigt zusammenfassend die einzelnen Programme mit ihren wichtigsten Vor- und Nachteilen. Bei der Auswahl berücksichtigt wurden Kriterien wie Modellierungsansatz, Erweiterbarkeit, Einschränkungen, etc. Die Auswertung führte zur Entscheidung für LabVIEW, welches am geeignetsten schien, die Erfüllung der Kundenforderungen durch MELISSA zu unterstützen.

LabVIEW wird also nicht in seiner ursprünglichen Eigenschaft als Meßwerterfassungsprogramm eingesetzt, sondern als allgemeine graphische Programmiersprache mit ansprechender graphischer Benutzeroberfläche. Die Integration von Lebenserhaltungs-Hardware über Meß- und Steuerkarten in Simulationen (*Hardware-in-the-loop*-Simulation) ist jedoch bei Bedarf jederzeit möglich.

Tabelle 1: Übersicht über die als Basissoftware in Betracht gezogenen Programme

Programm	Typ	Vorteile	Nachteile
AspenPlus	Flowsheet	detailgetreue Modellierung chemischer und physikalischer Prozesse	nur stationäre Simulation möglich; detaillierte System- und Komponentenkenntnis nötig; aufwendige Einarbeitung
DIVA	Flowsheet	detailgetreue Modellierung chemischer und physikalischer Prozesse; auch dynamische Simulation möglich	detaillierte System- und Komponentenkenntnis nötig; aufwendige Einarbeitung
Matlab / Simulink	regelungstechnisch	zeitkontinuierliche Simulation durch Zustandsraumdarstellung	nur einfache graphische Oberfläche; großer resultierender Zustandsvektor
LabVIEW	graphische Programmierung	allgemeine graphische Programmiersprache; ansprechende Benutzeroberfläche; MELISSA-Konzept frei umsetzbar	keine vordefinierten Simulationsfunktionen
CASE/A	ECLSS-Simulation	ECLSS-spezifische Bibliotheken	plattformspezifisch; schlecht erweiterbar; teuer
ECOSIM	ECLSS-Simulation	ECLSS-spezifische Bibliotheken	plattformspezifisch; schlecht erweiterbar

Implementierung der Simulationsumgebung

Zugrundeliegendes Konzept

Die Simulationsumgebung MELISSA nutzt die von LabVIEW angebotenen graphischen Programmier- und Benutzerschnittstellen. Zur Ausführung einer Simulation modelliert der Anwender zunächst in einem LabVIEW-Diagramm das zu untersuchende System. Dafür stellt MELISSA mehrere Bibliotheken mit spezifischen Bausteinen für das Lebenserhaltungs- und Energieversorgungssystem zur Verfügung, die als Virtuelle Instrumente (VIs) implementiert sind. Für zu verfolgende Simulationsdaten werden auf dem zum Diagramm gehörenden LabVIEW-Panel Anzeigen eingefügt.

Nach Abschluß der Modellierung wird die Simulation durch Ausführen des im Diagramm festgelegten Codes gestartet. Wie jedes LabVIEW-Programm kann sie durch die interaktiven Bedienelemente auf den jeweiligen Front Panels auch während der Laufzeit beeinflusst werden, was besonders zur Simulation von zeitvarianten Systemzuständen von Bedeutung ist. Für simulationsspezifische Aufgaben, wie Anlegen der Protokolldatei oder Einstellung des Simulations-Zeitschritts, stehen MELISSA-Dienst-VIs zur Verfügung, die über ein zentrales Steuerfeld aufgerufen werden können.

Die Simulationsrechnungen beruhen auf numerischer Iteration. Auf explizites Lösen von Differentialgleichungen, wie es beispielsweise in eher prozeßtechnisch orientierter Software wie AspenPlus oder ECOSIM geschieht, wird verzichtet. Statt dessen werden die im System zirkulierenden Stoff- und Energieströme direkt modelliert und bei Bedarf (z. B. in den Tank-VIs) zeitdiskret integriert. Ein Simulationslauf besteht also aus aufeinanderfolgenden Simulationsschritten, die Zeitinkrementen von wählbarer Länge entsprechen.

Die in jedem Schritt auszuführenden Berechnungen werden durch die Diagramm-Komponenten und deren Verknüpfungen vollständig definiert. Um die Ergebnisse eines Berechnungsschrittes als Anfangsdaten des nächsten verwenden zu können, ist es nötig, die Komponenten des modellierten Systems mit einer LabVIEW-„While“-Schleife zu umgeben. Diese stellt in Form der Shift-Register die Elemente zur systembedingt notwendigen Rückführung von Information zur Verfügung, wodurch arithmetische Zirkelbezüge vermieden werden.

Vorhandene Module

MELISSA stellt Komponenten für alle in Abbildung 1 dargestellten Funktionen des Lebenserhaltungssystems zur Verfügung. Diese sind als VIs modelliert und werden vom Benutzer über LabVIEWs graphisches Menü in das Systemdiagramm eingefügt. Zusätzlich stehen Bausteine des Energieversorgungssystems zur Verfügung, um das Zusammenwirken verschiedener Subsysteme untersuchen zu können. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht über die vorhandenen VIs. Abbildung 4 zeigt deren Anwendung im Diagramm eines einfachen Lebenserhaltungssystems mit geschlossenem Wasserkreislauf.

Alle Komponenten sind ausführlich dokumentiert. Neben den Informationen im Benutzerhandbuch werden dem Anwender vor allem durch mit den jeweiligen Dateien abgespeicherten VI-Infos Hinweise zum Einsatz der jeweiligen VIs gegeben, die er über das LabVIEW-Hilfefenster einsehen kann.

Zur Erleichterung der Systemmodellierung trägt auch bei, daß alle VIs nach detaillierten Entwurfsregeln programmiert wurden, um Konsistenz und Anwenderfreundlichkeit auch über mehrere Entwicklergenerationen hinweg sicherzustellen. Diese Richtlinien legen beispielsweise die verwendeten Maßeinheiten fest, standardisieren die allgemeine Struktur von VI-Diagrammen, geben Gestaltungsrichtlinien für die Icons oder definieren die Anforderungen an die Dokumentation.

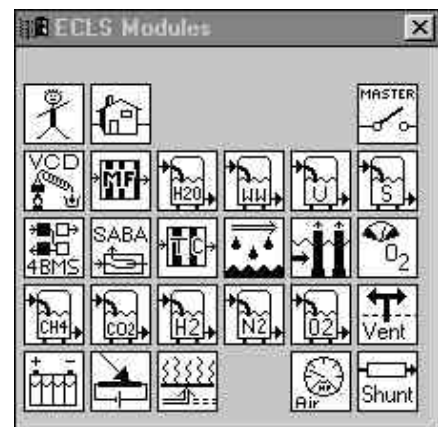


Abbildung 3: MELISSA-Menu mit ECLSS-Modulen

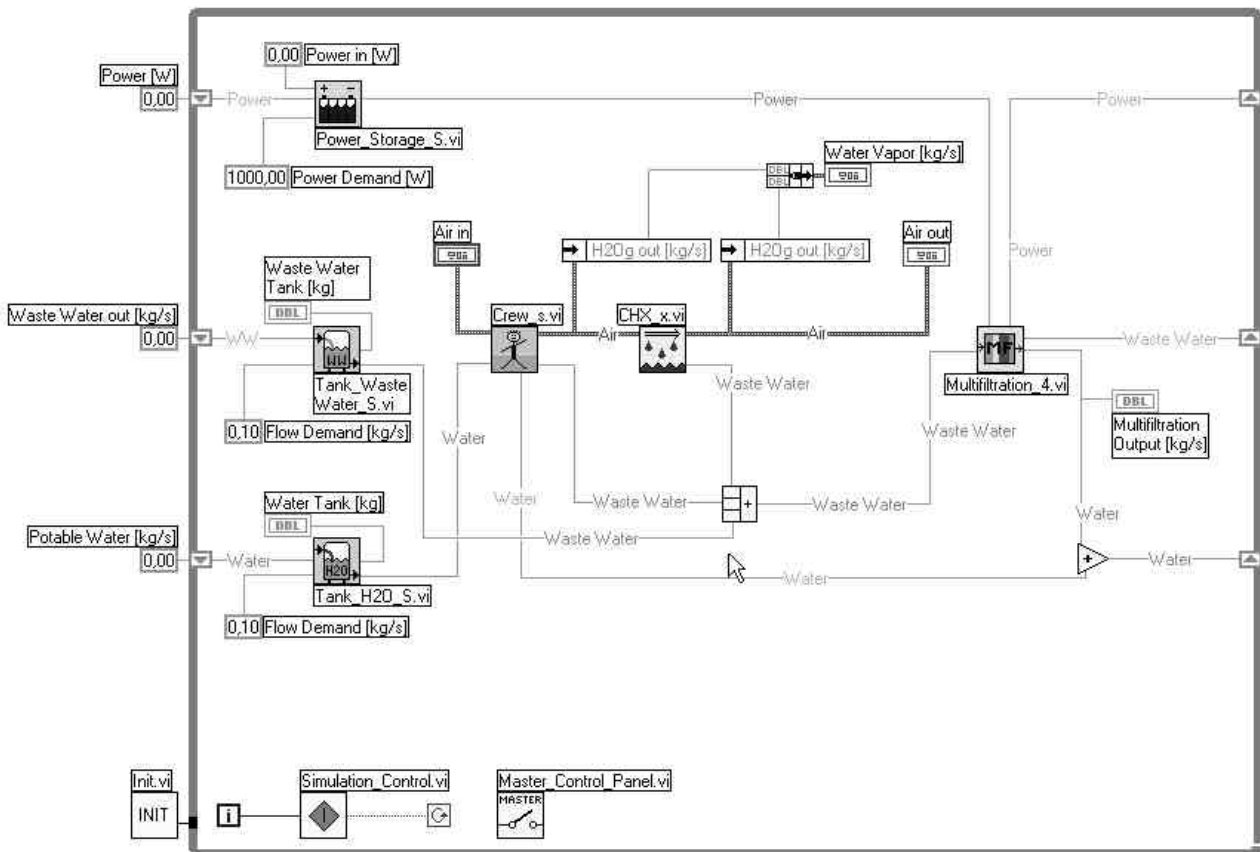


Abbildung 4: MELISSA-Modell eines einfachen Lebenserhaltungssystems

Beispielanwendung: Internationale Raumstation

Als Anwendungsdemonstration soll hier das Lebenserhaltungssystem der Internationalen Raumstation (International Space Station, ISS) modelliert und sein Anlaufverhalten simuliert werden. Die zugrundeliegenden Spezifikationsdaten der ISS sind in [7] einsehbar und werden hier aus Platzgründen nicht wiederholt. Folgende ECLSS-Komponenten kommen zum Einsatz:

- ✧ im Luftkreislauf: Sauerstofftank, Elektrolyse-Sauerstoffherzeuger, Sauerstoffpartialdruck-Regulator, kondensierende Wärmetauscher zur Feuchtigkeitsabfuhr, Vierbett-Molekularsiebe zur Kohlendioxid-Entfernung, sowie Spurengas-Filter zur Luftreinigung;
- ✧ im Wasserkreislauf: Tanks für Trink- und Schmutzwasser sowie für Urin und Fäkalien, Vakuum-Destillationseinheit sowie Mehrfachfilter zur Wasser- und Urinaufbereitung.

Verfolgte Systemzustände sind die Luftzusammensetzung in Form von volumetrischen Anteilen der Leitspezies Sauerstoff und Kohlendioxid sowie die Inhalte der Abwasser-, Urin und Fäkalientanks.

Diskussion der Simulationsergebnisse

Abbildung 5 stellt die Verläufe dieser Größen über der Simulationszeit dar. Erkennbar ist die asymptotische Annäherung des CO₂-Gehalts an einen Gleichgewichtswert, der vom Wirkungsgrad der Kohlendioxid-Siebe abhängt, sowie das verbrauchsbedingte anfängliche Absinken des Sauerstoffgehalts und dessen Stabilisierung nach Ansprechen des Sauerstoffpartialdruck-Regulators.

Die Tankinhalte zeigen lineares Verhalten. Aufgrund leichter Unterdimensionierung der Wasserfilter steigt der Schmutzwassertankinhalt stetig an, während der zur Urinaufbereitung eingesetzte Destillationsapparat ausreichende Kapazität hat und so kein Urin im Tank gelagert werden muß.

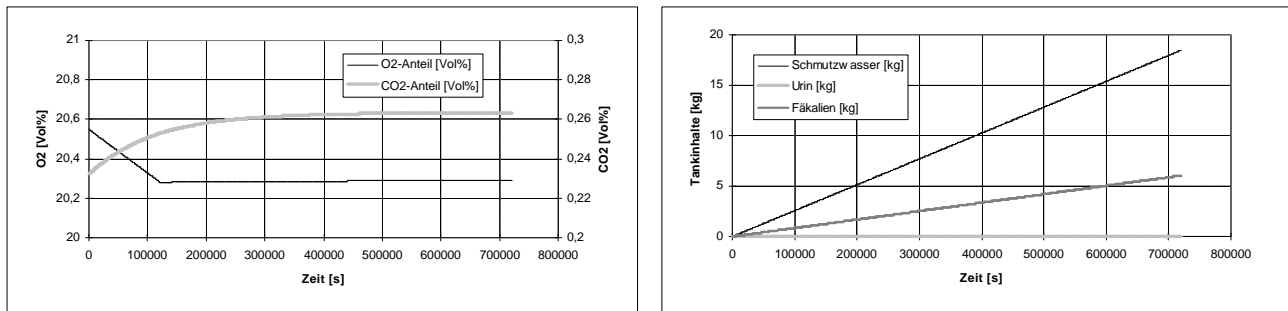


Abbildung 5: Anfänglicher Verlauf von Luftzusammensetzung und Tankinhalten in der ISS

Für Auslegung und Betrieb eines solchen Subsystems sind zusätzlich Untersuchungen der Folgen eines Ausfalles einzelner Komponenten sowie der Auswirkungen von Systemerweiterungen, etwa nach Einbau weiterer regenerativer Bausteine, wichtig. Solche Analysen werden durch den für MELISSA verwendeten graphisch-interaktiven Simulationsansatz erheblich vereinfacht.

Zusammenfassung

Basierend auf der von LabVIEW zur Verfügung gestellten Umgebung wurde MELISSA, eine Anwendung zur graphisch-interaktiven Modellierung und Simulation von vernetzten dynamischen Systemen, entwickelt. Dabei wird das ursprünglich der Meßwerterfassung dienende LabVIEW auf unkonventionelle Weise genutzt, da es allein als graphische Programmiersprache zum Einsatz kommt. Die Simulationsrechnung verwendet einen numerisch-iterativen Algorithmus, der im Gegensatz zu anderen Simulatoren ohne explizite Lösung von Differentialgleichungen auskommt.

Für den Bereich „Lebenserhaltungssysteme“ stehen Bibliotheken vordefinierter Komponenten zur Verfügung, die dem Benutzer die Systemdefinition im graphischen Netzwerkeditor von LabVIEW erleichtern. Auch bei der Simulationsausführung wird der Anwender von der Umgebung durch intuitive Bedienelemente unterstützt. Das verwendete modulare Konzept garantiert leichte Erweiterbarkeit und unterstützt die Verwendung unterschiedlicher Beschreibungstiefen.

Als Anwendungsdemonstration für MELISSA wurde das Lebenserhaltungssystem der ISS modelliert und analysiert. Die erzielten Ergebnisse bestätigen das für die Implementierung gewählte Konzept.

Literaturverzeichnis

- 1 Osburg, Jan: *Entwicklung eines Werkzeugs für Entwurf und Simulation synergetisch vernetzter Subsysteme von Raumstationen*. Diplomarbeit. Institut für Raumfahrtssysteme, Stuttgart 1997.
- 2 Blanchard, Benjamin S.; Fabrycky, Wolter J.: *Systems Engineering and Analysis*. 2nd ed. Prentice-Hall, London 1996. S. 12.
- 3 Messerschmid, Ernst; Bertrand, Reinhold; Pohlemann, Frank: *Raumstationen – Systeme und Nutzung*. 1. Aufl. Springer, Heidelberg 1997. S. 346.
- 4 Bertrand, Reinhold: *Conceptual System Design and Flight Simulation of Space Stations*. Dissertation. Institut für Raumfahrtssysteme, Stuttgart 1997.
- 5 Hauser, John: *The House of Quality*. In: Harvard Business Review, May - June 1988, S. 63 ff.
- 6 Sanchez, Susan M.; et al.: *Quality by Design*. In: Kusniak, Andrew (Hrsg.): *Concurrent Engineering – Automation, Tools and Techniques*. John Wiley & Sons, New York 1993.
- 7 ISS Technical Data Book: Sub-System Environmental Control and Life Support System (ECLSS) on Flight 19A. NASA Web-Veröffentlichung, 20. März 1995. <http://issa-www.jsc.nasa.gov/ss/techdata/ECLSS/19A.html>