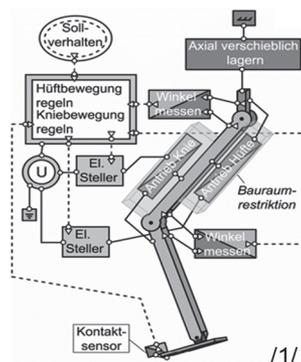


Vorgehen zur Evaluation digitaler, heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering

Schumacher, T.; Inkeremann, D.

Die effiziente Interaktion verschiedener Entwicklungsdisziplinen und die Vermeidung von Modellinkonsistenzen stellen zentrale Herausforderungen innerhalb heutiger Systementwicklungen dar. Um bei dieser Herausforderung zu unterstützen, erläutert dieser Beitrag die Anwendung heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering. Hierzu wird ein technisches Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle vorgestellt. Kernelement dieses Beitrags ist die Einführung eines beabsichtigten Bewertungsvorgehens, um den Nutzen heterogener Modelle initial zu evaluieren.



The efficient interaction of different engineering disciplines and the avoidance of model inconsistencies represent crucial challenges within today's system developments. This article explains the application of heterogeneous models in Model-based Systems Engineering to support this challenge. To this end, a technical realisation concept for developing digital, heterogeneous models is presented. The core element of this article is the introduction of an intended evaluation procedure to evaluate the advantages of heterogeneous models initially.

Einführung und Problemstellung

Industriebranchenübergreifende Interviews belegen, dass eine zentrale Herausforderung in heutigen Systementwicklungen die interdisziplinäre Kollaboration verschiedener Entwicklungsdisziplinen darstellt /2/. Model-based Systems Engineering (MBSE) schlägt daher die Anwendung semi-formaler, abstrakter Modelle für einen verbesserten disziplinübergreifenden Informationsaustausch und Kollaboration vor /3/. Hierbei ist insbesondere die Anwendung der Modellierungssprache SysML (Systems Modeling Language) in Industrie und Wissenschaft etabliert /2, 4/. Zusätzlich zu den interdisziplinären Entwicklungsaufgaben, wie Anforderungsmanagement oder Architekturentwicklung, benötigt die Entwicklung mechatronischer Systeme auch eine domänenspezifische Entwicklung, wie Mechanik-, Elektrik/Elektronik- und Softwareentwicklung /5,6/. Als Resultat entstehen während der Systementwicklung verschiedene Arten von produktbeschreibenden Modellen, wie SysML-, CAD- oder Modelle der Softwareentwicklung. Eine zentrale Herausforderung in der Anwendung von MBSE besteht darin, die Modellkonsistenz zwischen diese unterschiedlichen Modelle sicherzustellen /6/. Daher schlagen frühere Veröffentlichungen die Anwendung

heterogene Modelle vor, um interdisziplinäre und domänenspezifische Modelle zu verknüpfen und integrieren /7, 8/.

Zielstellung und Forschungsfrage

Dieser Beitrag greift die Anwendung heterogener Modelle im Systems Engineering auf und erläutert das geplante Vorgehen, um den Nutzen heterogener Modelle initial zu evaluieren. Aus dieser Zielstellung lässt sich nachfolgende Forschungsfrage ableiten:

- Welches Evaluationsvorgehen ermöglicht eine initiale Bewertung des Nutzens heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering?

Nachfolgend wird der Aufbau dieser Beitrag dargestellt. Zunächst werden notwendige Grundlagen zu der Modellierungstechnik heterogene Modelle eingeführt. Anschließend wird die entwickelte Lösung zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle grundlegend erläutert. Nachfolgend wird das entwickelte Vorgehen zur Evaluation digitaler, heterogener Modelle vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einen Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten.

Grundlagen und Stand der Technik

Dieser Abschnitt erläutert die Grundlagen der Modellierungstechnik heterogene Modelle und stellt ein Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle grundlegend vor.

Heterogene Modelle

Heterogene Modelle erlauben die Integration verschiedenartiger Partialmodelle und Modellelemente in eine gemeinsame Visualisierung /1/. Jansen /1/ zeigt die Anwendung heterogener Modelle an dem Beispiel eines mechatronischen Beins. Hierbei kombiniert das heterogene Modell sowohl 3D-Objekte, zweidimensionale Ersatzmodelle, funktionale Systembeschreibungen sowie Kontextinformationen, wie Bauraumvorgaben, und deren Verknüpfungen, siehe Titelbild dieses Artikels.

Der beschriebene Modellierungsansatz wird in diesem Beitrag aufgegriffen, um interdisziplinäre und domänenspezifische Modellelemente zu verknüpfen. Somit besteht beispielsweise die Möglichkeit SysML-Modellelemente, wie funktionale Systembeschreibungen oder Schnittstellen an der Systemgrenze, mit CAD-Objekten in einem heterogenen Modell zu kombinieren, siehe Abbildung 1.

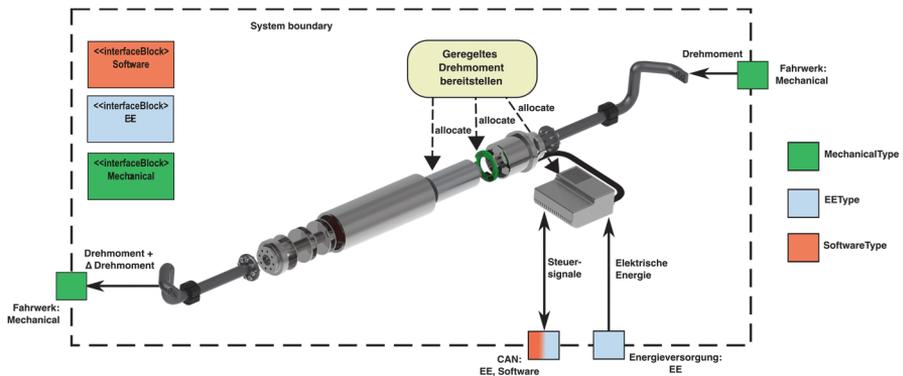


Abbildung 1: Konzeptdarstellung heterogene Modelle /7/

Diese integrierte Visualisierung kann die Kollaboration unterschiedlicher Disziplinen unterstützen, indem z.B. Domänenexperten in die Modellierung eingebunden werden können. Darüber hinaus sollen heterogene Modelle auch bei der Sicherstellung der Modellkonsistenz unterstützen. Hierzu ist vorgesehen, dass die zu erzeugenden heterogenen Modelle auf eine verknüpften Datenstruktur basieren. Zusammenfassend, soll die Anwendung heterogener Modelle interdisziplinäre Entwicklungsaufgaben, wie die Architekturentwicklung mechatronischer Systeme, durch eine bessere Kollaboration in interdisziplinären Teams, informativere Modelle und erhöhte Modellkonsistenz unterstützen /9/.

Der folgende Abschnitt stellt ein Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle vor.

Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle

Zur Erzeugung heterogener Modelle, welche sowohl unterschiedliche Modellelemente in eine gemeinsame Visualisierung integrieren als auch zur Sicherstellung der Modellkonsistenz beitragen, wurde eine Umsetzungskonzept entwickelt, siehe Abbildung 2. Zentrales Element ist die Entwicklung einer Programmierschnittstelle (*Application Programming Interface, API*) zum Verknüpfen der eingesetzten SysML- und CAD-Modellierungswerkzeuge. Hierbei soll die zu entwickelnde API das CAD-Werkzeug um die notwendigen Funktionen zur Erzeugung heterogener Modelle erweitern und gleichzeitig auf die vorhandenen Funktionen zur CAD-Modellierung zurückgreifen.

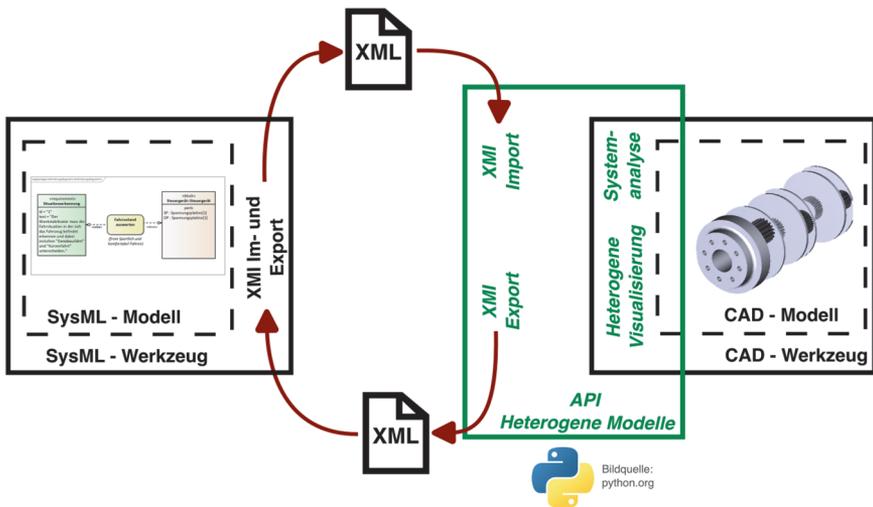


Abbildung 2: Konzept zur Realisierung digitaler, heterogener Modelle /10/

Entsprechend dem dargestellten Realisierungskonzept beinhaltet die zu entwickelnde API vier Hauptfunktionen:

1. **Heterogene Visualisierung.** Zentrale Funktion der zu entwickelnden API ist die Visualisierung von CAD- und SysML-Modellelemente in einer gemeinsamen Visualisierung. Hierzu müssen die vorhandenen Funktionen der CAD-Modellierung mit neuen Funktionen zur Erzeugung von SysML-Elementen erweitert werden.
2. **Systemanalyse.** Die zu entwickelnde API soll außerdem bei der Analyse bestehender Systemarchitekturen unterstützen. Hierzu soll das CAD-Tool um Funktionen erweitert werden, um Objekte einerseits visuell hervorzuheben und andererseits textuelle Informationen attributiv in das heterogene Modelle zu integrieren.
3. **XMI Import.** Zur Sicherstellung der Modellkonsistenz sollen heterogene Modelle auf Basis einer verknüpften Datenstruktur erzeugt werden. Hierzu sieht das Umsetzungskonzept einen datenbasierten Austausch zwischen den Modellierungswerkzeugen vor. Als Datentyp werden XML-Dateien mit XMI Datenstruktur (Version 1.1) verwenden. Diese Funktion ermöglicht das Einlesen von (partiellen) SysML-Modellen in das CAD-Werkzeug. Hierzu ist ein Python-basierter Einlesealgorithmus umzusetzen.
4. **XMI Export.** Die Vermeidung von Modellinkonsistenzen erfordert gleichzeitig, dass die Ergebnisse der Architekturentwicklung (heterogenes Modell) auch an das SysML-Werkzeug zurückgeführt werden. Hierzu wird erneut die XMI-Datenstruktur aufgegriffen. Zentrales Element ist hierbei, dass die erzeugten 3D-Objekte aus der CAD-Modellierung in SysML-Blockelemente überführt werden.

Die softwarebasierte Realisierung des vorgestellten Konzepts soll durch die Erzeugung heterogener Visualisierungen bei der Ausführung interdisziplinärer Entwicklungsaufgaben unterstützen, indem einerseits informativere Modelle erzeugt und außerdem der Modellierungsprozess unterstützt wird, durch bspw. eine bessere Einbindung von Domänenexperten und eine verbesserte Kollaboration und Kreativität während der Modellierung. Außerdem soll die realisierte API ebenfalls bei einer zentralen Herausforderung im MBSE unterstützen, die Wahrung von Modellkonsistenz. Hierzu sieht das Umsetzungskonzept einen datenbasierten Austausch von XML-Daten vor, welche automatisiert in das heterogene Modell importiert und exportiert werden. Die Verwendung von XML-Daten mit XML-Datenstruktur liegt darin begründet, dass die etablierten SysML-Modellierungswerkzeuge üblicherweise bereits eine Import- und Exportfunktion für diesen Datentyp bereitstellen. Somit kann durch Einlesen von SysML- und CAD-Modellen (z.B. durch Importieren von STEP-Dateien) Wissen aus früheren Produktgenerationen in das heterogene Modell eingelesen werden. Dies ermöglicht die Erzeugung einer initialen Version der Systemarchitektur, welche auf Architekturentscheidungen aus früheren Produktgenerationen basiert. Dieses Vorgehen ermöglicht somit Wissen aus früheren Produktgenerationen wiederzuverwenden und die Konsistenz zwischen SysML- und CAD-Modellen sicherzustellen. Beide Faktoren tragen zu einem effizienteren Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme bei. Neben der zuvor dargestellten Unterstützung der Architekturentwicklung (Synthesepfad) soll die zu entwickelnde Lösung ebenfalls bei der Analyse bestehender Systemarchitekturen unterstützen, um bspw. externe Einflussfaktoren zu analysieren. Diese Analyse trägt zu einer robusteren Systemarchitektur bei, indem externe Einflussgrößen, wie Temperatureinflüsse, im Design berücksichtigt werden. Im Umsetzungskonzept ist daher vorgesehen, dass die API während der Systemanalyse sowohl Objekte visuell hervorheben als auch textuelle Hinweise im heterogenen Modell erlaubt.

Um den erwarteten Nutzen digitaler, heterogener Modelle initial zu bewerten, wurde ein Evaluationsvorgehen entwickelt, welches der nachfolgende Abschnitt erläutert.

Vorgehen zur Evaluation digitaler, heterogener Modelle

Die Evaluation der entwickelten API zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle ist anhand von Studierendenbefragungen geplant. Dazu nehmen Studierende, mit geeignetem Vorwissen, an einem Übergabeexperiment (*Handover Experiment*) teil. Hiermit wird die Zielstellung verfolgt, den Nutzen heterogener Modelle gegenüber klassischen SysML-Modellen innerhalb der Architekturentwicklung zu ermitteln.

Experimentablauf

Innerhalb des Übergabeexperiments sollen zunächst zwei unabhängige Studierendenteams die Architektur eines mechatronischen Systems modellieren. Hierbei verwendet ein Team die etablierten SysML-Modelle und das zweite Team

die entwickelte Modellierungstechnik zur Erzeugung heterogener Modelle. Als Ergebnis liegen zwei unterschiedliche Architekturmodelle vor, welche als Artefakte an eine dritte Studierendengruppe übergeben (*Handover*) werden. Aufgabe der dritten Studierendengruppe ist es, basierend auf dem jeweiligen Architekturmodell das detaillierte Design des Systems in Form eines CAD-Modell zu erzeugen. Abbildung 3 stellt den geplanten Ablauf schematisch dar.

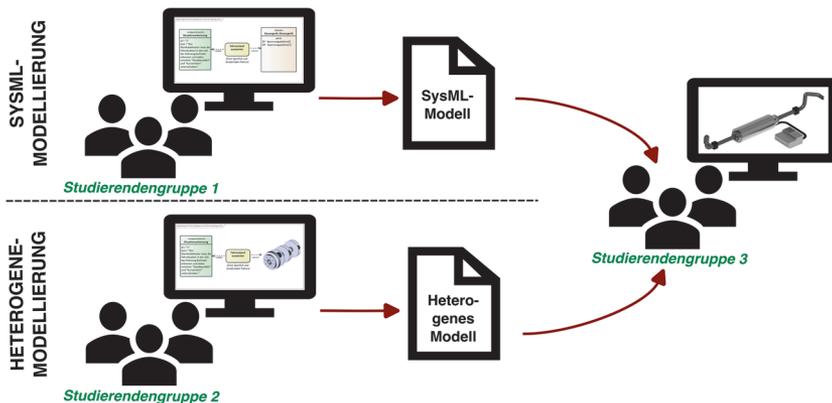


Abbildung 3: Ablauf Übergabeexperiment

Evaluation der Modellierungstechnik

Nach Abschluss des Übergabeexperimentes werden die Studierendengruppen anhand eines Fragebogens befragt. Studierendengruppe 2 hinsichtlich der Anwendung der entwickelten Modellierungstechnik für einen konkreten Anwendungsfall und Studierendengruppe 3 hinsichtlich der Verständlichkeit und Anwendbarkeit der unterschiedlichen Übergabeartefakte (Architekturmodelle) als Grundlage für die anschließende domänenspezifische Entwicklung.

Die Rückmeldungen der Studierenden sollen dazu beitragen, den Nutzen heterogener Modelle initial zu evaluieren. Hierzu stellt der folgende Abschnitt den erwarteten Nutzen der Modellierungstechnik gegenüber klassischer SysML-Modellierung vor.

Zielstellung

Anhand des geplanten Übergabeexperimentes soll der erwartete Nutzen heterogener Modelle, als integrierte Architekturmodelle, gegenüber klassischen SysML-Modellen von Studierenden bestätigt werden. Konkret sollen folgende Vorteile bzw. Nutzen der Modellierungstechnik evaluiert werden:

- Informativere Modelle zur Ausführung interdisziplinärer Entwicklungsaufgaben
- Bessere Wiederverwendung vorhandenen Wissens, in Form von SysML- und CAD-Modellen
- Höhere Modellkonsistenz zwischen interdisziplinärer und domänenspezifischer Entwicklung
- Einfacheres Modellierungsvorgehen
- Vereinfachte Definition des Modellierungszwecks
- Unterstützung bei der Ausführung von Entwicklungsaufgaben
- Verbesserung der Kollaboration in den Entwicklungsteams
- Erhöhung der Modellierungskreativität innerhalb der Entwicklungsteams
- Verbessertes Systemverständnis

Die erwarteten Vorteile der eingeführten Modellierungstechnik bilden die Grundlage für die Entwicklung eines geeigneten Fragebogens, um gezielt Rückmeldungen der Studierenden zu den erwarteten Vorteilen zu erhalten.

Das vorgestellte Vorgehen zur Evaluation heterogener Modelle kann jedoch nur als eine initiale Bewertung und somit das Ergebnis nur eingeschränkt als allgemeingültig betrachtet werden. Die Studierenden weisen zwar die notwendigen Grundlagen zur Anwendung der Modellierungstechnik auf, jedoch sind die Rückmeldungen sowohl aufgrund der begrenzten Anzahl als auch aufgrund der unzureichenden Praxiserfahrung mit Einschränkungen zu betrachten. Eine zusätzliche Anwendung des eingeführten Evaluierungsvorgehen mit Praktikern könnte das initiale Evaluationsergebnis absichern.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag empfiehlt die Anwendung heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering um interdisziplinäre Entwicklungsaufgaben zu unterstützen. Dazu werden heterogene Modelle grundlegend eingeführt und ein Konzept zur technischen Realisierung digitaler, heterogener Modelle vorgestellt. Kernelement dieses Beitrags ist ein entwickeltes Vorgehen zur Evaluation der eingeführten Modellierungstechnik. Anhand eines Übergabeexperiments (*Handover-Experiment*) soll der Nutzen heterogener Modelle gegenüber klassischen SysML-Modellen evaluiert werden. Hierzu wendet eine Studierendengruppe die etablierte SysML-Modellierung und eine weitere Studierendengruppe die eingeführten heterogenen Modelle zur Entwicklung einer Systemarchitektur an. Die entwickelten Architekturmodelle werden anschließend als Übergabeartefakte an eine dritte Studierendengruppe übergeben, welche auf deren Grundlage die Architekturentwicklung abschließen, indem diese den Detailentwurf des Systems anhand eines CAD-Modells entwickeln. Abschließend werden die Studierenden hinsichtlich des Nutzens der eingeführten Modellierungstechnik befragt und die Rückmeldungen ausgewertet. Hierbei stellt das Ergebnis des vorgestellten Evaluierungsvorgehen nur ein initiales Evaluationsergebnis dar, um dieses Ergebnis

abzusichern, empfiehlt sich, dass beschriebene Vorgehen mit Industriepartnern zu wiederholen.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Arbeiten des niedersächsischen Zukunftslabors Mobilität. Das Teilprojekt wird gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (Fördernummer ZN3493) im Niedersächsischen Vorab der VolkswagenStiftung und betreut vom Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN).

Literatur

- /1/ Jansen, S.: Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2007
- /2/ Gausemeier J.; Czaja A.; Wiederkehr O.; Dumitrescu R.; Tschirner C.; Steffen D.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Paderborn, 2013
- /3/ Friedenthal S.: A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language. 3rd ed. San Francisco, Elsevier Science, 2014
- /4/ Berschik MC.; Schumacher T.; Laukotka FN.; Krause D.; Inkermann D.: MBSE within the Engineering Design Community – an Exploratory Study. In: Proc. Des. Soc. 2023; 3:2595–604, <https://doi.org/10.1017/pds.2023.260>
- /5/ Vogel-Heuser B.; Böhm M.; Brodeck F.; Kugler K.; Maasen S.; Pantförder D.; et al.: Interdisciplinary engineering of cyber-physical production systems: highlighting the benefits of a combined interdisciplinary modelling approach on the basis of an industrial case. In: Des. Sci. 2020;6, <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.2>
- /6/ Husung S.; Faheem F.; Li Z.: Wissensbasiertes und kollaboratives Systems Engineering mechatronischer Produkte. In: Entwerfen Entwickeln Erleben 2024 Menschen, Technik und Methoden in Produktentwicklung und Design, Technische Universität Dresden, 2024, p. 46–58
- /7/ Schumacher T.; Inkermann D.: Model Inconsistencies and Solution Approaches to Maintain Consistency in Model-based Systems Engineering. In: Michler O, editor. ICONS 2023: The eighteenth International Conference on Systems April 24th-28th, 2023, Venice, Italy, Wilmington, DE, USA: IARIA; 2023, p. 23–28
- /8/ Schumacher T.; Inkermann D.: Heterogeneous models to Support Interdisciplinary Engineering - Mapping Model Elements of SysML and CAD. In: Procedia CIRP 2022;109:653–8, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.309>
- /9/ Schumacher T.; Inkermann D.: Investigation of advantages of models and the modelling process by introducing a model evaluation concept. In: Proc. Des. Soc. 2024;4:2735–44, <https://doi.org/10.1017/pds.2024.276>
- /10/ Schumacher T.; Stephan R.; Inkermann D.: Development and Implementation of Digital Heterogeneous Models in Model-based Systems Engineering (in Review). In: 35th CIRP Design 2025.