HM

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Verbundprojekt

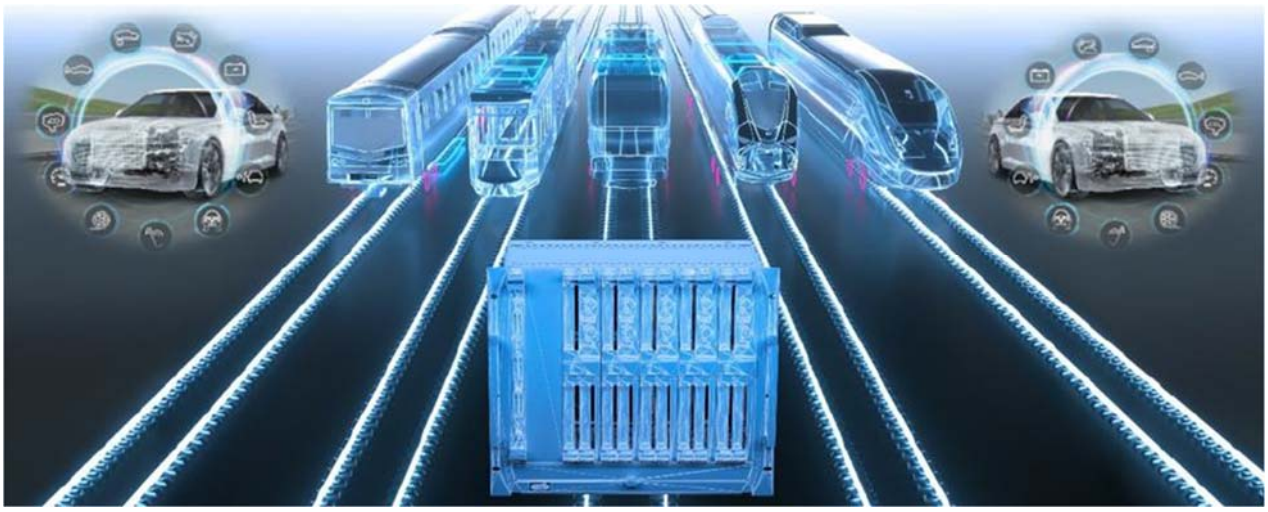
MBPLE4Mobility – Durchgehend modellbasierte Entwicklung und Produktlinien-entwicklung für Steuerungssysteme in der Fahrzeugtechnik

Teilvorhaben

CONSYSVAR – Konzeptentwicklung kombiniertes MBSE mit PLE für variantenreiche Systeme

Schlussbericht

Berichtszeitraum	01.07.2021 - 31.12.2024
Förderkennzeichen / Konsortialpartner	19I21025H / Hochschule für angewandte Wissenschaften München
Laufzeit des Vorhabens	01.07.2021 – 31.12.2024
Leiter des Vorhabens	Prof. Dr. Claudio Zuccaro
Version des Berichts	2.0
Erstellungsdatum	08.10.2025



Dokumenteninformation

Das Dokument ist eine Arbeit der Hochschule München, welche im Rahmen des Förderprojektes MBPLE4Mobility (2021 – 2024) entstanden ist.

Projektleitung CONSYSVAR

Prof. Dr. Claudio Zuccaro
Hochschule für angewandte Wissenschaften München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Lothstr. 64
80335 München

Telefon: +49 (0)89 1265-3496
E-Mail: claudio.zuccaro@hm.edu

Dokumentenhistorie

Version	Datum	Kommentar
1.0	30.06.2025	Erstversion
2.0	08.10.2025	Zweite Version mit Ergänzungen

Inhaltsverzeichnis

1 Projektübersicht ... 5
1.1 Aufgabenstellung ... 5
1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 5
1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ... 6
1.4 Zielgruppe für dieses Dokument ... 6

2 Kurzfassung der Arbeitsergebnisse ... 7

3 Eingehende Darstellung ... 9
3.1 Arbeitspaket 1 – Definition von integrierten Modellierungskonzepten ... 9
3.1.1 AP 1.1 – Systemanforderungsanalyse ... 9
3.1.2 AP 1.2 – Systemarchitektur ... 12
3.1.3 AP 1.3 – Software-Hardware-Entwurf ... 14
3.2 Arbeitspaket 2 – Spezielle Aspekte ... 17
3.2.1 AP 2.3 – Auswirkungsanalyse ... 17
3.2.2 AP 2.4 – Schaltungstechnik ... 18
3.2.3 AP 2.5 - Simulation ... 18
3.3 Arbeitspaket 3 – Evaluierung von MBSE mit PLE anhand eines einfachen Beispiels ... 22
3.4 Arbeitspaket 4 – Entwicklung von Werkzeugen/Prozessen ... 24
3.4.1 AP 4.1 – Definition der Anforderungen an Werkzeuge/Prozesse ... 24
3.4.2 AP 4.2 – Entwicklung Werkzeuge/Prozesse für gemeinsame Aspekte ... 25
3.5 Arbeitspaket 5 – Exemplarischer Nachweis am Beispiel der GOA2 Funktionsmodule ... 28
3.6 Arbeitspaket 6 – Validierung der MBPLE-Ansätze ... 29
3.7 Arbeitspaket 7 - Eignungsprüfung ... 29
3.8 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 31
3.9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ... 31
3.10 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse ... 32
3.11 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ... 32
3.12 Veröffentlichungen ... 33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspakete aus der Vorhabensbeschreibung 5
Abbildung 2: Verknüpfung eines 150%-Systemmodells mit einem Variabilitätsmodell beim MBPLE-Ansatz 9
Abbildung 3: VRFLP-Framework 10
Abbildung 4: Beispiel für Variabilität auf verschiedenen Hierarchieebenen 10
Abbildung 5: Direkte Verknüpfung von Elementen des Variabilitätsmodells mit Elementen der anderen Perspektiven 11
Abbildung 6: Direkte Verknüpfungen für das Beispiel des Türbetriebs 11
Abbildung 7: Automatisierte Übersetzung eines FODA-Modells in ein OVM-Modell mit Hilfe eines Plug-Ins der HM 12
Abbildung 8: Zwei Arten von 150%-SysML-Systemmodellen 13
Abbildung 9: Möglichkeiten der SysML v2 im Hinblick auf Vererbung und Redefinition 13
Abbildung 10: Automatisierte Hervorhebung zusammenhängender Komponenten, Interfaces und Verbindungen in einem IBD 14
Abbildung 11: Automatisierte Erstellung von IBD´s aus Aktivitätsdiagrammen und ihre Synchronisierung 15
Abbildung 12: Verwendung eines SysML-Systemmodells als digitaler Zwilling zur Steuerung virtueller oder physischer Prototypen 16
Abbildung 13: Beispielhafte Verknüpfung zwischen Elementen unterschiedlicher Werkzeuge (Cameo Systems Modeler links und Simulink rechts) 17
Abbildung 14: Ableitung von (Code-)Schaltplänen und PCBs aus IBDs in SysMLv2-Modellen 18
Abbildung 15: Verschiedene Arten der Kollaboration eines Systemarchitekten mit einem Simulationsexperten 19
Abbildung 16: Modellierungsablauf bei der Anwendung des Common-Library-Ansatzes für ein einzelnes System 19
Abbildung 17: Common-Library-Ansatz für eine Produktlinie 20
Abbildung 18: Generierung eines 150%-OMNeT++-Simulationsmodells aus einem 150%-SysML-Systemmodell 20
Abbildung 19: Beispielhafte Landschaft, in der ein System-of-Systems bestehend aus Drohnen und einem autonom fahrenden Modellfahrzeug betrieben wird: virtuell (oben) und real (unten) 23
Abbildung 20: Beispielhafte Kette von Engineering-Werkzeugen mit CATIA Magic SoS als Systemmodellierungswerkzeug 25
Abbildung 21: Beispielhafte Kette von Engineering-Werkzeugen mit Windchill Modeler als Systemmodellierungswerkzeug 25
Abbildung 22: Tabelle mit Erfüllungsgrad wichtiger Anforderungen an OSLC 27
Abbildung 23: Beispielhafte Umsetzung des Baukastenkonzeptes 29

1 Projektübersicht

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt CONSYSVAR war Teil des übergeordneten Projekts MBPLE4Mobility. Ziel von MBPLE4Mobility war die Optimierung von Entwicklungsmethoden und -werkzeugen für die modellbasierte Entwicklung und Produktlinienentwicklung im Bahn- und Automobilsektor. Dadurch sollten Projektkosten, Risiken und Entwicklungszeiten reduziert werden. Das Projekt ermöglicht so die Bereitstellung einer breiten Palette zuverlässiger Mobilitätslösungen und trägt zu den Dekarbonisierungsbemühungen in Deutschland bei. Der Schwerpunkt des Teilprojekts CONSYSVAR lag auf der Entwicklung eines Konzepts zur Kombination modellbasierten Systems Engineerings (MBSE) mit dem Ansatz der Produktlinienentwicklung (PLE).

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten in MBPE4Mobility waren in acht Arbeitspakete (AP) aufgeteilt:

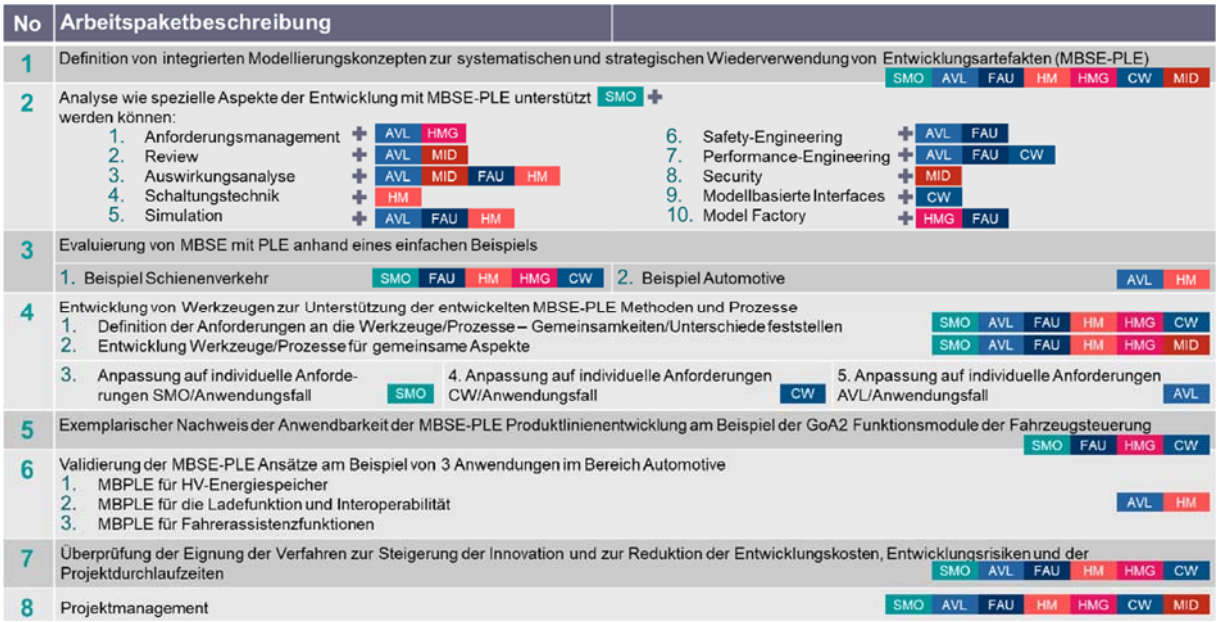


Abbildung 1: Arbeitspakete aus der Vorhabensbeschreibung

Ursprünglich wurde das Projekt mit sechs Meilensteinen über eine Laufzeit von 36 Monaten geplant. Nach der bewilligten kostenneutralen Verlängerung um sechs Monate passte man die Termine für die Meilensteine 5 und 6 im Jahr 2024 an die verlängerte Laufzeit des Projektes an.

1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt MBPLE4Mobility wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. Es wurde gemeinschaftlich durchgeführt von fünf industriellen Partnern (davon drei KMU) und zwei akademischen Projektpartnern. Verbundpartner waren

- Siemens Mobility – SMO
- AVL mit den drei Tochtergesellschaften
    - AVL Deutschland – AVL-DE
    - AVL Schrick – AVL-S
    - AVL Software and Functions – AVL-SFR
- Codewerk – CW
- HMG
- MID
- FAU Erlangen – FAU
- Hochschule München – HM

Im März 2023 wurde die Firma pure-systems als assoziierter Partner aufgenommen.
Die Leitung des Verbundprojektes lag bei SMO. Das Projekt war zunächst für eine Laufzeit von drei Jahren ausgelegt und wurde am Ende um sechs Monate kostenneutral verlängert.
Die Laufzeit des Projektes überlappte sich mit der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Chipkrise.

1.4 Zielgruppe für dieses Dokument

- TÜV Rheinland Consulting GmbH. Forschungsmanagement. Projektträger Bodengebundene Verkehrstechnologien (PT BVt)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
- LEIBNIZ-Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften Universitätsbibliothek

2 Kurzfassung der Arbeitsergebnisse

Die Hochschule für angewandte Wissenschaften München (kurz HM) hat im Rahmen des Forschungsprojektes MBPLE4Mobilty in verschiedenen Themen- und Aufgabenbereichen Ergebnisse erhalten. Ein Schwerpunkt der Arbeit der HM war die Definition integrierter Modellierungskonzepte für Model-Based Product Line Engineering (MBPLE). Beispielsweise hat die HM der Norm ISO 26580 entsprechend einen Modellierungsansatz definiert, bei dem ein 150%-SysML-Systemmodell auf der Basis eines RFLP-Frameworks mit einem orthogonalen Variabilitätsmodell verknüpft wird, welches die Variabilität im Sinne einer weiteren Perspektive auf verschiedenen Hierarchieebenen einbringt. Dabei werden Elemente des Variabilitätsmodells auf unterschiedlichen Hierarchieebenen miteinander und mit Artefakten aus anderen Perspektiven verknüpft [1]. Dieser „VRFLP“ genannte Ansatz ist geeignet, um große, komplexe Systeme (sog. Large-Scale Complex Engineered Systems) top-down zu entwickeln. Die HM hat darüber hinaus einen Modellierungsansatz betrachtet, bei dem bottom-up auf der Basis eines Baukastens wiederverwendbarer Module sowie einer Referenzarchitektur ein geeignetes 100%-Systemmodell erstellt werden kann. Dieser alternative Ansatz ist für weniger komplexe Produktlinien von Bedeutung.

Zur Modellierung der Variabilität hat die HM Regeln zur Strukturierung des Variabilitätsmodells definiert, wobei realistische Beispiele von AVL und SMO für die Variabilität ihrer Produkte zu Hilfe genommen worden sind. Außerdem hat die HM die Sprachen FODA und OVM im Hinblick auf ihre Eignung näher untersucht, miteinander verglichen und ein Tool zur Übersetzung von FODA in OVM entwickelt.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit der HM war die automatisierte Ableitung von Simulationsmodellen (z. B. Simulink-Modellen oder Modelica-basierten Modellen) aus SysML-Spezifikationsmodellen. Hierzu ist die Zusammenarbeit zwischen den Rollen des Systemarchitekten sowie des Simulationsexperten in einem Unternehmen analysiert worden. Basierend auf dieser Analyse ist ein Kollaborationsmodell entwickelt worden, bei dem der Systemarchitekt die Architektur des zu entwickelnden Systems unter Verwendung einer Bibliothek von Simulink-/Modelica-Komponenten in einem SysML-Tool zu Spezifikationszwecken erstellt und dann exportiert. Die in das Simulationstool importierte Architektur lässt sich anschließend sofort simulieren [2]. In einem weiteren Schritt hat die HM dieses „Common-Library“-Konzept um variable Komponenten erweitert, um mit diesen ein 150%-SysML-Systemmodell zu Spezifikationszwecken erstellen zu können, welches die effiziente Simulation verschiedenster Architekturen ermöglicht [3]. Dieses Konzept ist bereits von einem Unternehmen in der Bahnindustrie, welches nicht dem Konsortium angehört hat, angewandt worden (Knorr-Bremse SfS GmbH) [3]. Ein ähnliches Konzept ist zusammen mit dem Konsortialpartner FAU entwickelt worden. Bei diesem wird ein OMNeT++ 150%-Simulationsmodell aus einem 150%-SysML-Systemmodell generiert. Dabei sind die Möglichkeiten der neuen Version v2 der Modellierungssprache SysML, insbesondere ihrer standardisierten API, angewandt und eine Modelltransformation von SysMLv2 zu OMNeT++ entwickelt worden [4].

Zur frühen Validierung von Produktlinien hat die HM zusätzlich zur Ausleitung von Simulationsmodellen aus 150%-SysML-Systemmodellen auch die Erzeugung digitaler Zwillinge aus dem SysML-Modell untersucht [5, 6]. Diese digitalen Zwillinge steuern virtuelle Prototypen in einer simulierten Umgebung oder sogar physische Prototypen in einer realen Umgebung und lassen sich z. B. zur frühen Validierung autonomen Fahrens anwenden. Sie können in späteren Phasen des Lebenszyklus einer Produktlinie z. B. auch zur Unterstützung der Wartung oder des Service eingesetzt werden. Wie die reale Software und Hardware der Elemente einer Produktlinie aus dem 150%-SysML-Systemmodell generiert werden können, hat die HM ebenfalls untersucht, teilweise in engem Austausch mit SMO und deren Partnern.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit der HM ist die Definition von Anforderungen an Werkzeugen und Prozessen gewesen, z. B. im Rahmen der Verknüpfung eines Requirements Management-Werkzeuges wie Doors mit einem SysML-Systemmodellierungswerkzeug wie Cameo Systems Modeler (heißt nun CATIA Magic), im Rahmen der Integration von Testwerkzeugen sowie im Rahmen der Verknüpfung des Variabilitätsmodellierungs-werkzeuges pure::variants mit diesen anderen Werkzeugen. Die Anforderungen sind durch Interviews insbesondere mit den Projektpartnern sowie mit Toolherstellern und auch durch die Analyse von Use Cases erhoben worden. Außerdem hat die HM eigene Toolketten unter Verwendung von Tools, wie sie von den Projektpartnern AVL und SMO eingesetzt werden, aufgebaut, um Anwendungen in der Industrie reproduzieren zu können. Dabei hat sich gezeigt, dass die Verlinkung von Modellelementen weiterhin zu großen Teilen dadurch realisiert wird, dass man Daten aus einem Tool in ein zweites exportiert und regelmäßig synchronisiert. Eine zu dieser Duplizierung von Daten alternative Lösung ist, Daten zu referenzieren. Zu diesem Zweck wurde der OSLC-Standard von der HM im Hinblick auf seine Eignung für industrielle Anwendungen näher untersucht. Als Ergebnis dieser Untersuchung kann der OSLC-Standard als eine geeignete Basis angesehen werden, um die zentralen Bedürfnisse der Industrie im Bereich der Toolinteroperabilität zu bedienen. Dennoch sind sowohl die Tools als auch der Standard zu verbessern, um nicht nur einfache Anwendungen wie die Erstellung von Traces unterstützen zu können sowie die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen. Diese Erkenntnisse sind auch im Austausch mit anderen Mobilitätsunternehmen gewonnen bzw. validiert worden [7, 8].

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit der HM in diesem Projekt sind auf zahlreichen Fachkonferenzen vorgestellt und publiziert worden.

3 Eingehende Darstellung

3.1 Arbeitspaket 1 – Definition von integrierten Modellierungskonzepten

3.1.1 AP 1.1 – Systemanforderungsanalyse

Die Arbeitsinhalte dieses Arbeitspakets 1.1 waren für die HM die Entwicklung von Regeln zum Aufbau des Variabilitätsmodells, die Erforschung von Möglichkeiten der Automatisierung der Erstellung des Variabilitätsmodells sowie die Spezifizierung von Regeln zur Verifikation und Validierung des Variabilitätsmodells. Ergebnisse sind zu allen diesen Arbeitsinhalten erarbeitet worden. Wichtige Ergebnisse werden im Folgenden beispielhaft erläutert.

Die Abbildung 2 zeigt die grundsätzliche Idee des Model-Based Product Line Engineerings (MBPLE), bei dem ein 150%-Systemmodell als Grundlage des Model-Based Systems Engineerings (MBSE) mit einem Variabilitätsmodell als Basis des Product Line Engineerings (PLE) verknüpft wird [1, 9].

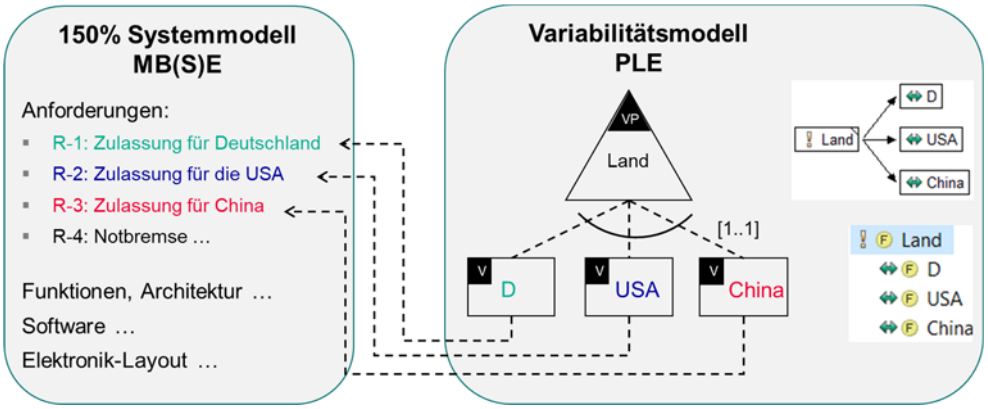


Abbildung 2: Verknüpfung eines 150%-Systemmodells mit einem Variabilitätsmodell beim MBPLE-Ansatz

Die HM hat Konzepte sowohl zum Aufbau des Variabilitätsmodells (AP 1.1), als auch zum Aufbau des 150%-SysML-Systemmodells (AP 1.2) sowie zur Verknüpfung beider Modelle entwickelt (AP 1.2).

Als Grundlage für die Modellierung hat die HM das RFLP-Framework, welches häufig zur Modellierung einzelner Systeme in SysML benutzt wird, um eine weitere Perspektive erweitert, welche die Variabilität der Produktlinie widerspiegelt [2]. Bei dem so entstandenen VRFLP-Framework wird das Variabilitätsmodell in die gleichen hierarchischen Systemebenen unterteilt wie die anderen Perspektiven und geht den RFLP-Sichtweisen voraus, s. Abbildung 3.

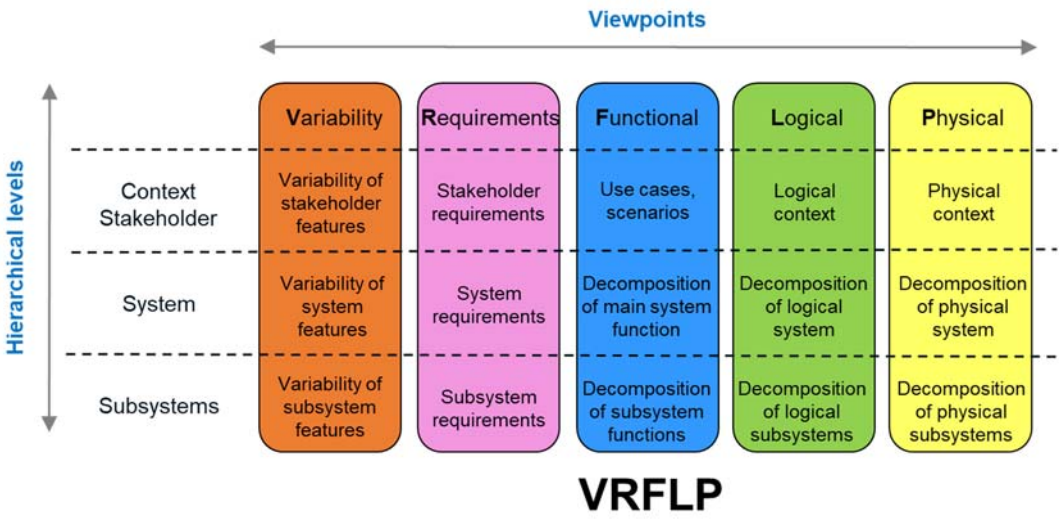


Abbildung 3: VRFLP-Framework

Beispiele für die verschiedenen hierarchischen Systemebenen erleichtern die Anwendung des VRFLP-Ansatzes und sind daher gemeinsam mit Projektpartnern definiert worden [2], s. Abbildung 4.

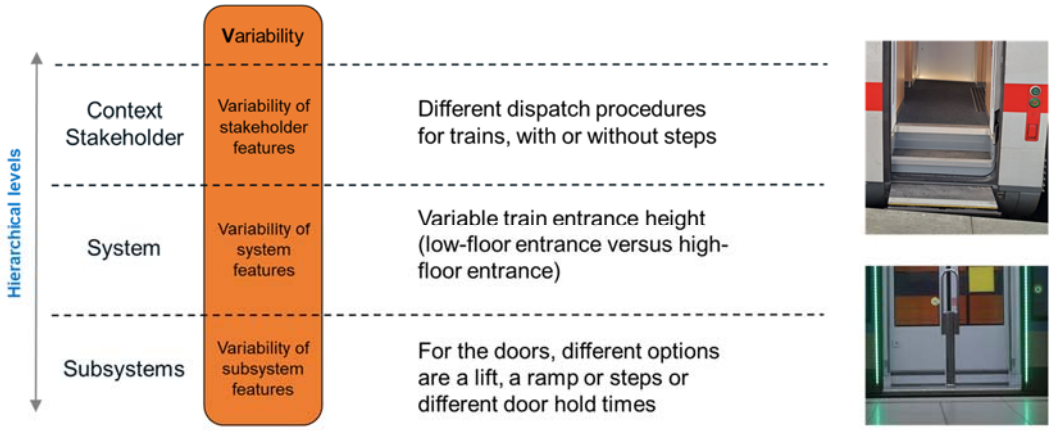


Abbildung 4: Beispiel für Variabilität auf verschiedenen Hierarchieebenen

Elemente des Variabilitätsmodells in unterschiedlichen Hierarchieebenen können miteinander verknüpft werden, wie das obige Beispiel andeutet. So lassen sich Elemente externer (also z. B. kundengetriebener) Variabilität auf der Kontext/Stakeholder-Ebene mit Elementen des Variabilitätsmodells auf unterer Hierarchieebene (z. B. auf der System- oder Subsystemebene) verknüpfen. Elemente des Variabilitätsmodells müssen auch mit Elementen der anderen Perspektiven (üblicherweise auf der gleichen Hierarchieebene) verknüpft werden, nicht nur um die üblichen Vorteile der Rückverfolgbarkeit ausnutzen zu können, sondern auch um bei der Produktkonfiguration eine automatisierte Modelltransformation vom 150%-SysML-Systemmodell zum 100%-SysML-Systemmodell für das ausgewählte Element der Produktlinie zu ermöglichen. Die HM hat mehrere Ansätze zur Verknüpfung der Elemente des Variabilitätsmodells mit Elementen der anderen Perspektiven untersucht. Die Abbildung 5 und die Abbildung 6 zeigen den – unter Verwendung aktueller Modellierungswerkzeuge – favorisierten Ansatz, bei dem ein Element des Variabilitätsmodells i. a. direkt mit Elementen aller anderen Perspektiven verknüpft wird. Dies erleichtert die erwähnte Modelltransformation [2].

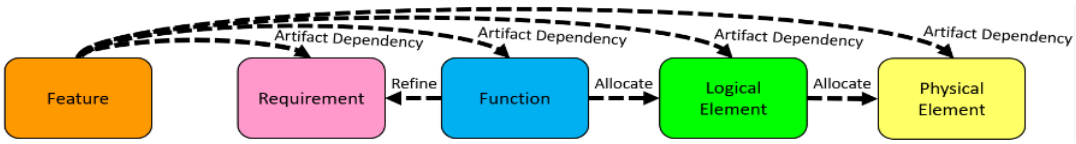


Abbildung 5: Direkte Verknüpfung von Elementen des Variabilitätsmodells mit Elementen der anderen Perspektiven

Ein Beispiel hierzu zeigt die folgende Abbildung:

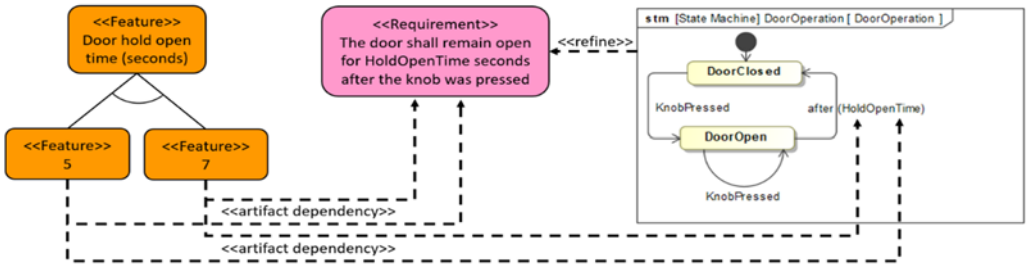


Abbildung 6: Direkte Verknüpfungen für das Beispiel des Türbetriebs

Um den Aufwand zur Erstellung der vielen Verknüpfungen zu reduzieren, hat die HM ein Plug-In entwickelt, das fehlende Verknüpfungen zwischen dem Variabilitätsmodell und den anderen Perspektiven automatisch ergänzt.

Außerdem hat die HM näher untersucht, wie das Variabilitätsmodell in der Perspektive „V“ zu strukturieren ist. In der Tat ist die Unterscheidung verschiedener Hierarchieebenen nicht der einzige Aspekt bei der Modellierung der Variabilität. So ist es z. B. wichtig, Stakeholder-Aspekte (externe Variabilität) von interner Variabilität zu unterscheiden und auch innerhalb einer Hierarchieebene das Modell durch Anwendung von Regeln wie „hohe interne Kohäsion, schwache Kopplung“ möglichst übersichtlich zu gestalten und die Wiederverwendbarkeit von Modellteilen zu erhöhen. Um dies zu verdeutlichen, hat die HM für ein einfaches Beispiel von Variabilität mehr als 10 verschiedene mögliche Variabilitätsmodelle aufgestellt und anhand von solchen Regeln das Modell mit der geringsten Zahl an Abhängigkeit (exclude, require) identifiziert. Um solche Regeln zu definieren, hat die HM realistische Beispiele von AVL und SMO für die Variabilität ihrer Produkte zu Hilfe genommen. Die Modellierungsregeln sind nicht nur hilfreich, Variabilitätsmodelle zu erstellen, sondern auch, die Modelle zu verifizieren und zu validieren.

Zusätzlich hat die HM die Sprachen FODA und OVM im Hinblick auf ihre Eignung näher untersucht und miteinander verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Sprachen FODA und OVM im Wesentlichen äquivalent zueinander sind. Dies hat der HM ermöglicht, ein Tool zu entwickeln, das FODA-Modelle (z. B. Modelle des Tools pure::variants) in OVM-Modelle übersetzt, s. Abbildung 7.

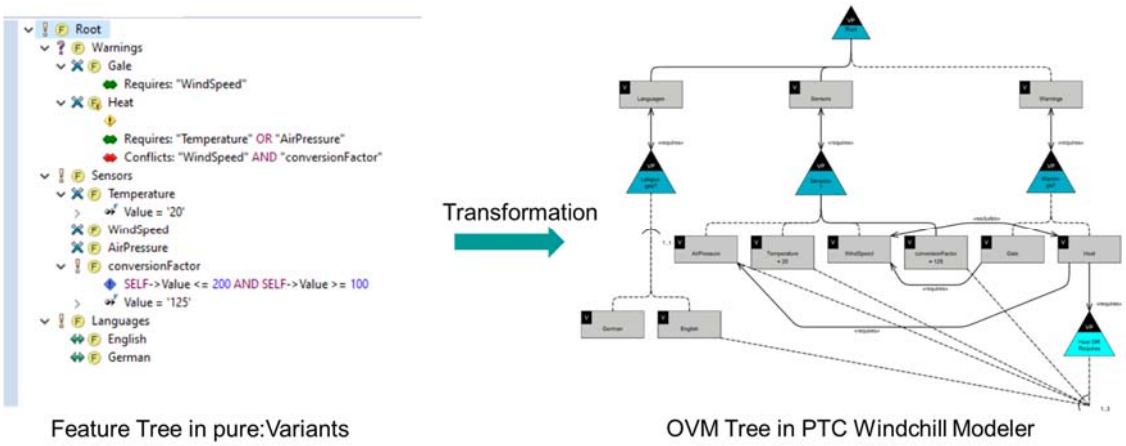


Abbildung 7: Automatisierte Übersetzung eines FODA-Modells in ein OVM-Modell mit Hilfe eines Plug-Ins der HM

Dieses Tool hat dem Projektpartner AVL geholfen, die Tools pure::variants und PTC Windchill Modeler zusammen zu verwenden.

3.1.2 AP 1.2 – Systemarchitektur

Arbeitsinhalte dieses Arbeitspaketes waren für die HM insbesondere die Entwicklung von Regeln zum Aufbau, zur Verifikation und zur Validierung des 150%-Systemmodells einer Produktlinie, die Entwicklung von Regeln zur Verknüpfung dieses Modells mit dem Variabilitätsmodell sowie zur Einbindung anwendungsspezifischer Systemmodellanteile im Rahmen des Application Engineering (MBPLE für Lösungen).

Alle diese Arbeitsinhalte sind von der HM entwickelt worden. So hat die HM untersucht, wie das 150%-SysML-Systemmodell aufgebaut werden kann. Hierzu hat sie das RFLP-Framework (s. Abschnitt 3.1.1), das üblicherweise für einzelne Systeme angewandt wird, um den Aspekt der Variabilität erweitert und beispielsweise verschiedene Möglichkeiten definiert, wie Struktur- sowie Verhaltensdiagramme in SysML in Abhängigkeit von Aspekten wie dem Grad an Heterogenität verschiedener Produktvarianten aufgebaut werden können. Z. B. kann sich die Funktion „Drehmoment erzeugen“, bei einem elektrischen Antrieb deutlich von der eines Antriebes mit Verbrennungsmotor unterscheiden. In diesem Fall ist es womöglich wenig sinnvoll, ein 150%-Aktivität „Drehmoment erzeugen“ mit vielen internen Fallunterscheidungen zu modellieren. Stattdessen wäre es geeigneter, zwei separate Aktivitäten „Drehmoment elektrisch erzeugen“ sowie „Drehmoment durch Verbrennung erzeugen“ zu modellieren.

Weiterhin hat die HM zwei Arten von 150%-SysML-Modellen unterschieden (s. Abbildung 8):

1) Ein 150%-Modell im Sinne der Norm ISO 26580, bei dem alle in einer Produktplattform vertretenen Varianten der Subsysteme/Module/Komponenten im 150%-Modell modelliert und spezifiziert werden müssen. Dabei sieht man alle Subsysteme/Module/Komponenten in der entsprechenden Sicht (Struktur, Verhalten) und eliminiert bei der Produktkonfiguration die Elemente, die nicht benötigt werden.
2) Die Verwendung eines Baukastens auf der Basis einer Referenzarchitektur: Hierbei erleichtert die Referenzarchitektur, auch in Zukunft Subsysteme/Module/ Komponenten als neue spezifische Varianten generischer Elemente zu entwickeln und in einer Asset-Base aufzunehmen. Abhängigkeiten können auch nachträglich in Variabilitätsmodellen aufgenommen werden.

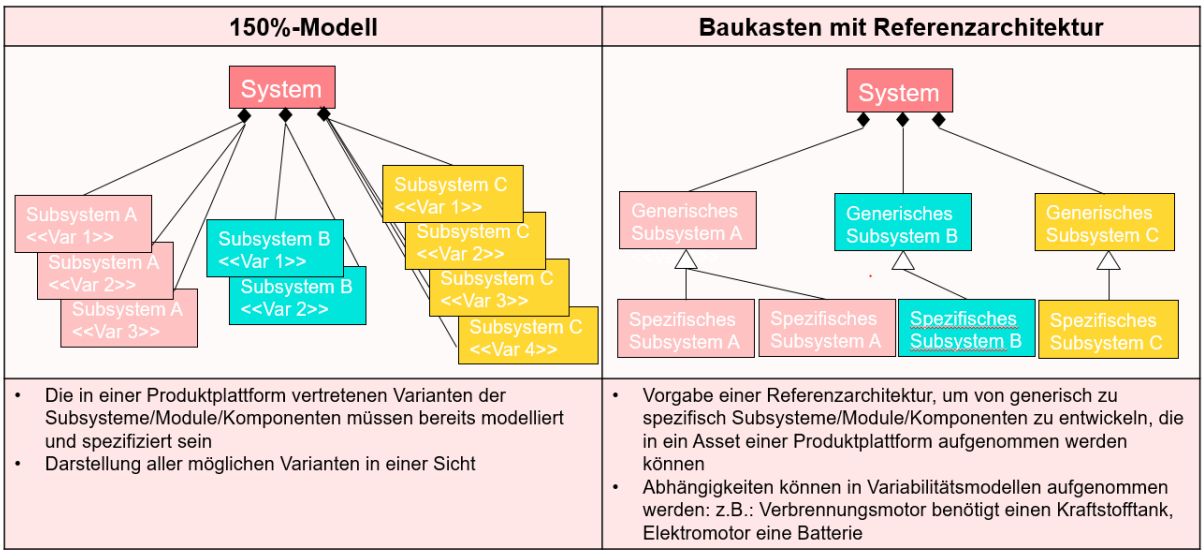


Abbildung 8: Zwei Arten von 150%-SysML-Systemmodellen

Die Verwendung eines Baukastens auf der Basis einer Referenzarchitektur kommt eher bei einfacheren Produktlinien, „brown-field“-Situationen sowie häufigen nachträglichen Ergänzungen der Produktlinie in Frage.

Beim Ansatz „Baukasten mit Referenzarchitektur“ werden die Mechanismen der Vererbung und Redefinition der Modellierungssprache SysML angewandt. Im Fall der bisherigen Version 1 der SysML sind allerdings nur im Fall der Struktur (BDD, IBD) die Mechanismen der Vererbung und Redefinition für MBPLE geeignet, nicht jedoch im Fall des Verhaltens (Aktivitäten etc.). Daher hat die HM im Verlauf des Projektes die neue Version 2 der SysML im Hinblick auf ihre Eignung für den MBPLE-Ansatz analysiert und ist zum Schluss gekommen, dass diese neue Version auch im Fall des Verhaltens passende Mechanismen für die Vererbung und Redefinition bietet, s. Abbildung 9.

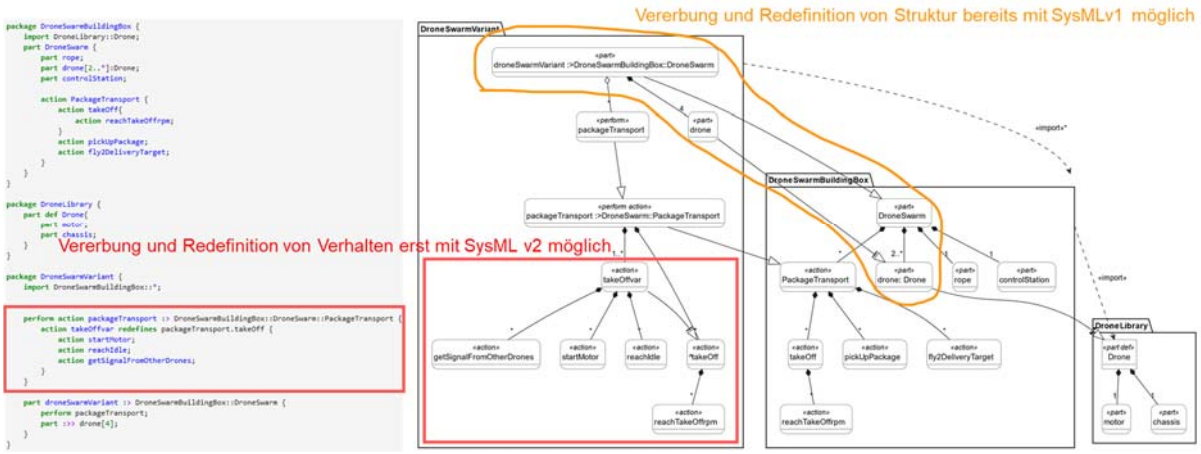


Abbildung 9: Möglichkeiten der SysML v2 im Hinblick auf Vererbung und Redefinition

Der Ansatz „Baukasten mit Referenzarchitektur“ ermöglicht die Einbindung anwendungsspezifischer Systemmodellanteile im Rahmen des Application Engineering. Methoden, auch im Fall des 150%-Modells anwendungsspezifische Systemmodellanteile nachträglich zu integrieren, sind ausführlich mit dem Projektpartner SMO diskutiert worden.

Regeln zur Verknüpfung des SysML-Systemmodells mit dem Variabilitätsmodell sind bereits im Abschnitt 3.1.1 erläutert worden.

3.1.3 AP 1.3 – Software-Hardware-Entwurf

Der Arbeitsinhalt dieses Arbeitspaketes war für die HM insbesondere die Entwicklung von Regeln zur Verbindung des Systemmodells mit HW- und SW-Modellen unter Berücksichtigung der Variabilität.

Hierzu hat die HM im Rahmen dieses Arbeitspakets u. a. spezielle Sichten und Hilfsmechanismen im Modellierungstool Cameo Systems Modeler basierend auf den Anforderungen aus den Fachdomänen Software und Hardware ausgearbeitet. Dazu zählt eine Wirkkettensicht, die in einem internen Blockdiagramm (IBD) Komponenten, Interfaces und Verbindungen hervorhebt, die einer bestimmten Funktion zugeordnet sind (s. Abbildung 10), so dass man die Spezifikation dieser Funktion für eine bestimmte Produktvariante leichter überprüfen kann.

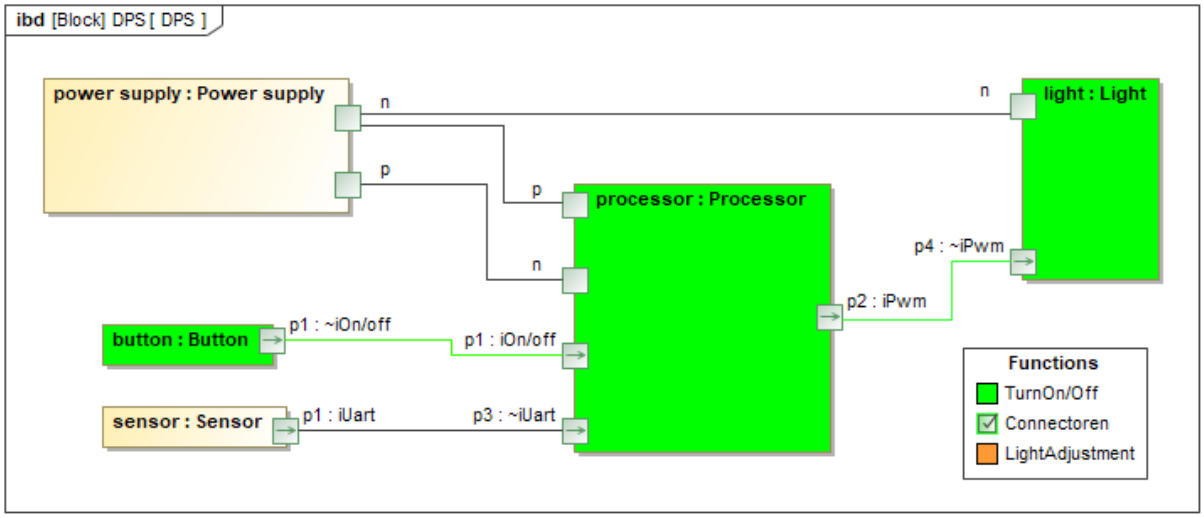


Abbildung 10: Automatisierte Hervorhebung zusammenhängender Komponenten, Interfaces und Verbindungen in einem IBD

Weiterhin hat die HM ein Diagramm in Form einer Entscheidungsmatrix definiert, welches das Verhalten von SW-Komponenten an den äußeren Schnittstellen (Input/Output) übersichtlich beschreibt. Außerdem ist ein Mechanismus erarbeitet worden, der ermöglicht, interne Blockdiagramme aus Aktivitätsdiagrammen zu erstellen und diese über Änderungen hinweg konsistent zueinander zu halten (s. Abbildung 11). Dieser Mechanismus ist von am Projekt beteiligten Vertretern der SW-Entwicklung gefordert worden.

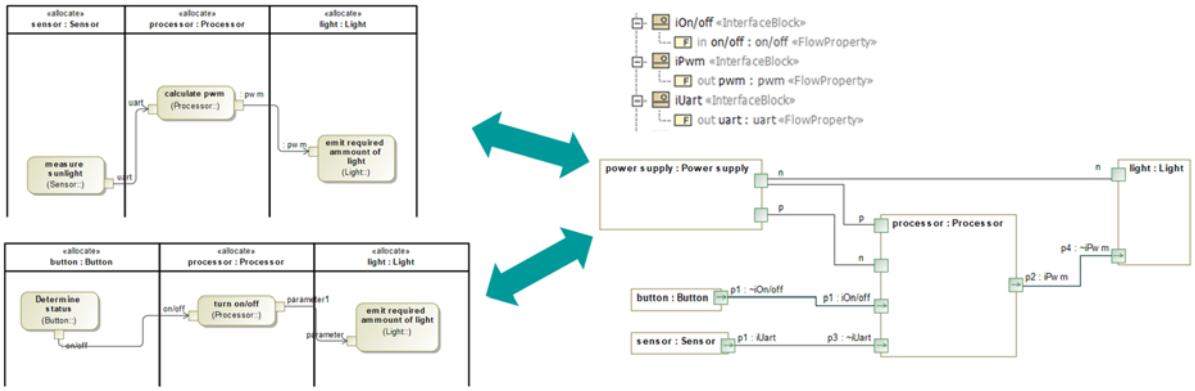


Abbildung 11: Automatisierte Erstellung von IBD´s aus Aktivitätsdiagrammen und ihre Synchronisierung

Über die Zielsetzungen der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung hinaus hat sich die HM im Arbeitspaket 1 auch sehr intensiv mit der Validierung von Systemmodellen speziell für variantenreiche modulare Systeme oder auch Systems-of-Systems (SoS), sogar unter Einbezug der Zielsoftware sowie prototypischer Hardware beschäftigt, weshalb die Ergebnisse dieser Arbeiten im Rahmen dieses Arbeitspaketes 1.3 wie folgt berichtet werden.

Ein erster Schritt zur Validierung des Modells ist dessen Überprüfung durch relevante Stakeholder. Dies ist zwar unerlässlich, reicht aber aufgrund seines fehleranfälligen und informellen Charakters nicht aus. Diese Überprüfungen können durch die Ausführung von Verhaltensdiagrammen unterstützt werden – typischerweise durch Tool-Add-ons basierend auf fUML. Dies ermöglicht beispielsweise die systematische Untersuchung von Verzweigungen in Aktivitätsdiagrammen oder von Transitionen in Zustandsmaschinen. Solche Techniken sind zweifellos nützlich, reichen jedoch nicht aus, wenn es darum geht, physikalische Interaktionen oder die Auswirkungen der Zielsoftware zu erfassen, die, wenn überhaupt, nur abstrakt dargestellt werden. Die physikalischen Aspekte können teilweise durch die Modellierung von System- oder Kontextelementen in Simulationswerkzeugen wie Simulink und Simscape und die Integration dieser Simulationen in das ausführbare SysML-Modell berücksichtigt werden (s. Ergebnisse der HM zum Arbeitspaket 2). Da die Simulationsmodelle jedoch typischerweise die Implementierungsdetails der umgebenden Systeme (z. B. Zielsoftware oder Firmware) oder des Kontexts nicht ausreichend präzise abbilden, ist ein Ansatz mit höherer Genauigkeit erforderlich. Der von der HM entwickelte Ansatz basiert auf der Idee, dass das SysML-Systemmodell mit virtuellen oder physischen Prototypen – oder einer Kombination aus beiden – interagiert. Dabei wird das zu validierende SysML-Systemmodell zum digitalen Zwilling, welches Daten von den virtuellen oder physischen Prototypen erhält, analysiert und auf der Basis der Analyse die Prototypen steuert, s. Abbildung 12.

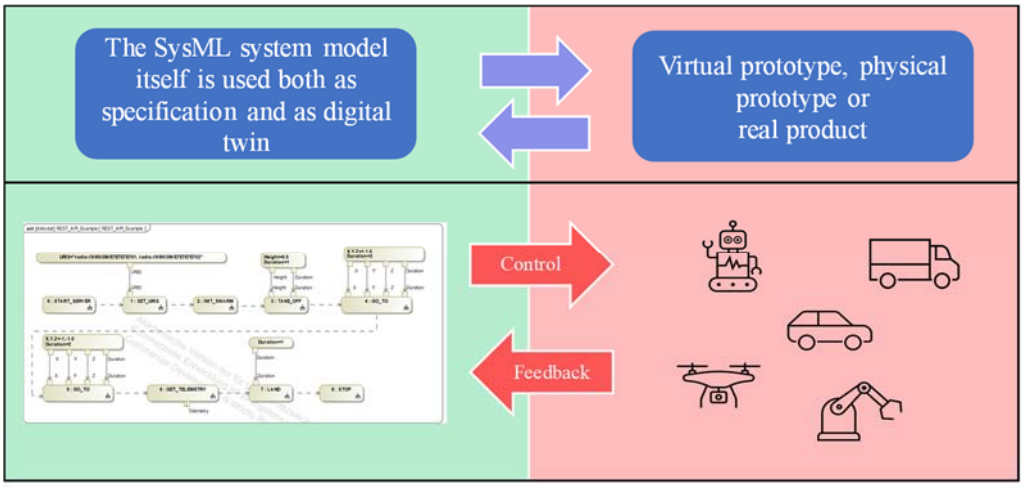


Abbildung 12: Verwendung eines SysML-Systemmodells als digitaler Zwilling zur Steuerung virtueller oder physischer Prototypen

Die in diesen Ansätzen verwendeten virtuellen Prototypen können sehr realistisch sein und ermöglichen beispielsweise die Simulation von Fahrzeugen in einer realen städtischen Umgebung, um Szenarien des autonomen Fahrens oder der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu evaluieren. Unterschiedlichste Zusammensetzungen des Systems oder Systems-of-Systems und unterschiedlichste Anwendungsszenarien können mit Hilfe dieses Ansatzes der HM unter Berücksichtigung realer Einsatzbedingungen und sogar der Ziel-Software bzw. Firmware sehr effizient validiert werden [3, 4].

3.2 Arbeitspaket 2 – Spezielle Aspekte

3.2.1 AP 2.3 – Auswirkungsanalyse

Durch die Verwendung der in den Modellen enthaltenen Traceability lassen sich Auswirkungen z. B. einer Anforderungsänderung im Rahmen des Change Control Managements ermitteln. Selbst bei einem einzelnen System ist jedoch zu klären

- wie die beeinflussten Modellelemente übersichtlich dargestellt werden
- wie indirekte Beeinflussungen höheren Grades in einem stark vernetzten System beurteilt werden können

Dies waren die Arbeitsinhalte dieses Arbeitspaketes für die HM.

Dieses Arbeitspaket hängt mit den Inhalten mehrerer anderer Arbeitspakete zusammen, so dass entsprechende Ergebnisse in anderen Abschnitten erläutert werden. So hat die HM im Rahmen des AP 1.1 – Systemanforderungsanalyse die Traceability zwischen Elementen des Variabilitätsmodells untereinander sowie zwischen Elementen des Variabilitätsmodells einerseits und solchen des 150%-SysML-Systemmodells andererseits definiert. Dabei hat es sich als hilfreich herausgestellt, Elemente des Variabilitätsmodells direkt mit allen relevanten Elementen der Perspektiven R, F, L und P zu verknüpfen, anstatt das Element des Variabilitätsmodells nur mit z. B. Anforderungen zu verknüpfen und dann Links dieser Anforderungen mit entsprechenden Funktionen (F), logischen (L) bzw. physischen Elementen (P) zu folgen. So lassen sich Modelltransformationen bei der Produktkonfiguration (vom 150%- zum 100%-Modell) leichter umsetzen und auch leichter alle mit dem entsprechenden Feature zusammenhängenden Elemente überblicken.

Modellierungswerkzeuge wie Cameo System Modeler können Verknüpfungen zwischen Elementen innerhalb des Werkzeugs übersichtlich darstellen. Verknüpfungen zwischen Elementen, die in unterschiedlichen Werkzeugen gespeichert werden, können mit Hilfe solcher Werkzeuge nicht unbedingt dargestellt werden, erst recht nicht übersichtlich. Hier hilft die Technologie OSLC weiter, deren Eignung die HM im Rahmen des Arbeitspaketes 4 näher analysiert hat. Beispielhaft zeigt Abbildung 13 eine mit Hilfe des Werkzeugs Smartfacts vom Projektpartner MID erstellte Verknüpfung zwischen Elementen der Werkzeuge Cameo Systems Modeler zur Erstellung von SysML-Modellen sowie Simulink zur Simulation. Die Verknüpfungen werden sehr intuitiv, benutzerfreundlich dargestellt.

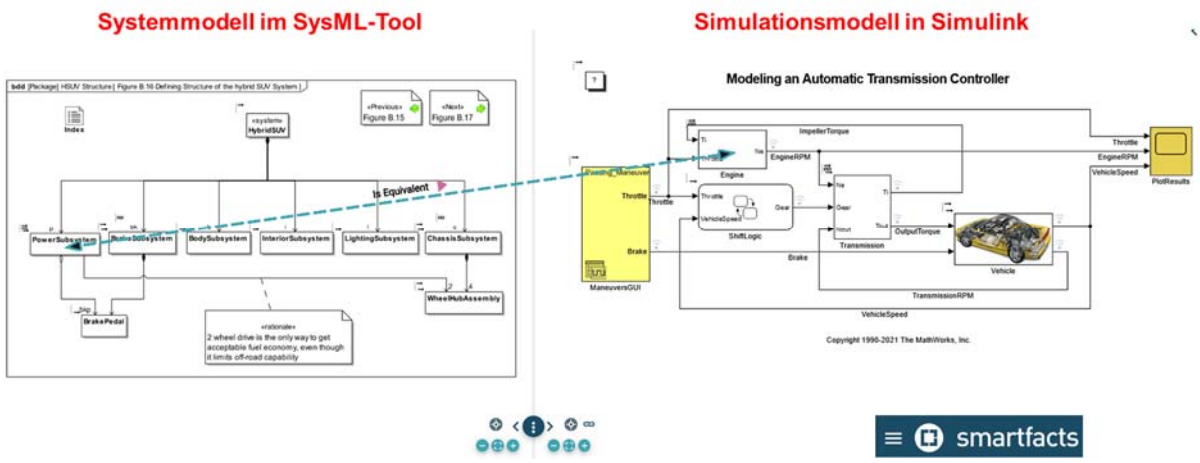


Abbildung 13: Beispielhafte Verknüpfung zwischen Elementen unterschiedlicher Werkzeuge (Cameo Systems Modeler links und Simulink rechts)

3.2.2 AP 2.4 – Schaltungstechnik

Die Aufgabe der HM in diesem Arbeitspaket war, den Projektpartner SMO vor allem bei der Konzeption einer modularen Schaltungstechnik und einer geeigneten Integration der Variabilität zu unterstützen.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes 2.4 hat die HM unter anderem auf der Basis der SysML v2 und der dazugehörigen API einen Mechanismus erarbeitet, um aus internen Blockdiagrammen für elektrische und elektronische Systeme formale Schaltpläne und grafische Leiterplattenentwürfe zu erzeugen, s. Abbildung 16. Hierbei wurden die Python-Bibliothek SKiDL (Spice-KiCAD Digital Library) und das Open Source Werkzeug KiCAD verwendet.

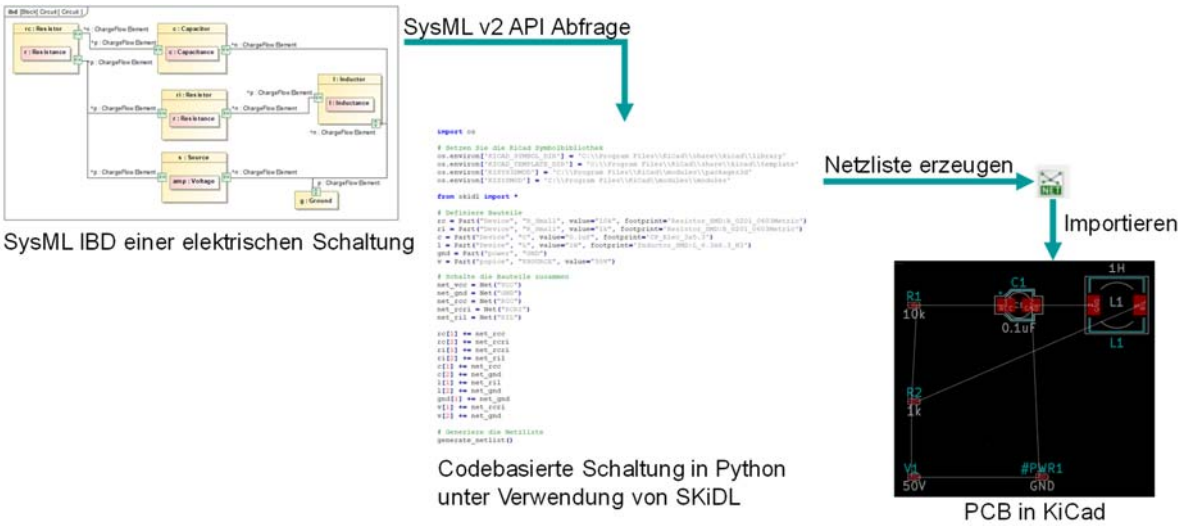


Abbildung 14: Ableitung von (Code-)Schaltplänen und PCBs aus IBDs in SysMLv2-Modellen

Dieses Arbeitspaket hing eng mit dem Arbeitspaket AP 1.3 – Software-Hardware-Entwurf zusammen, d. h. einige der in dem entsprechenden Abschnitt 3.1.3 erwähnten Ergebnisse sind in diesem Arbeitspaket erarbeitet worden und umgekehrt. Ein Beispiel hierfür ist die bereits erwähnte automatisierte Hervorhebung zusammenhängender Komponenten, Interfaces und Verbindungen in einem IBD.

3.2.3 AP 2.5 - Simulation

Ein Schwerpunkt der Arbeit der HM im Arbeitspaket 2 war die automatisierte Ableitung von Simulationsmodellen (z. B. Simulink-Modellen oder Modelica-basierten Modelle) aus SysML-Spezifikationsmodellen. Hierzu ist die Zusammenarbeit zwischen den Rollen des Systemarchitekten sowie des Simulationsexperten in einem Unternehmen analysiert worden, s. Abbildung 16: Modellierungsablauf bei der Anwendung des Common-Library-Ansatzes für ein einzelnes System

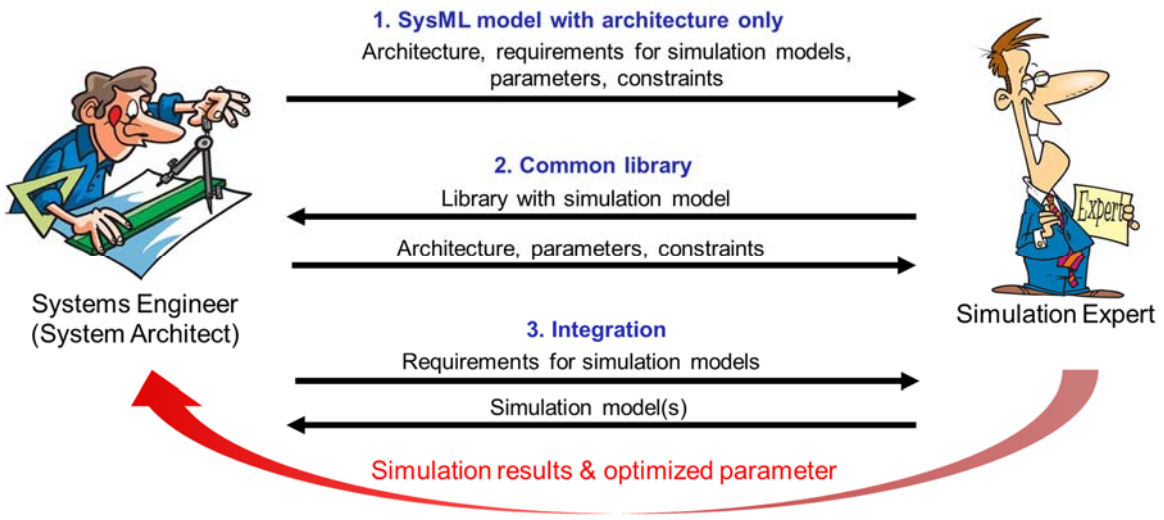


Abbildung 15: Verschiedene Arten der Kollaboration eines Systemarchitekten mit einem Simulationsexperten

Basierend auf dieser Analyse ist ein Kollaborationsmodell entwickelt worden, bei dem der Systemarchitekt die Architektur des zu entwickelnden Systems unter Verwendung einer Bibliothek von Simulink-/Modelica-Komponenten in einem SysML-Tool zu Spezifikationszwecken erstellt und dann exportiert („Common-Library"-Ansatz). Die in das Simulationstool importierte Architektur lässt sich anschließend sofort simulieren [2], s. Abbildung 16.

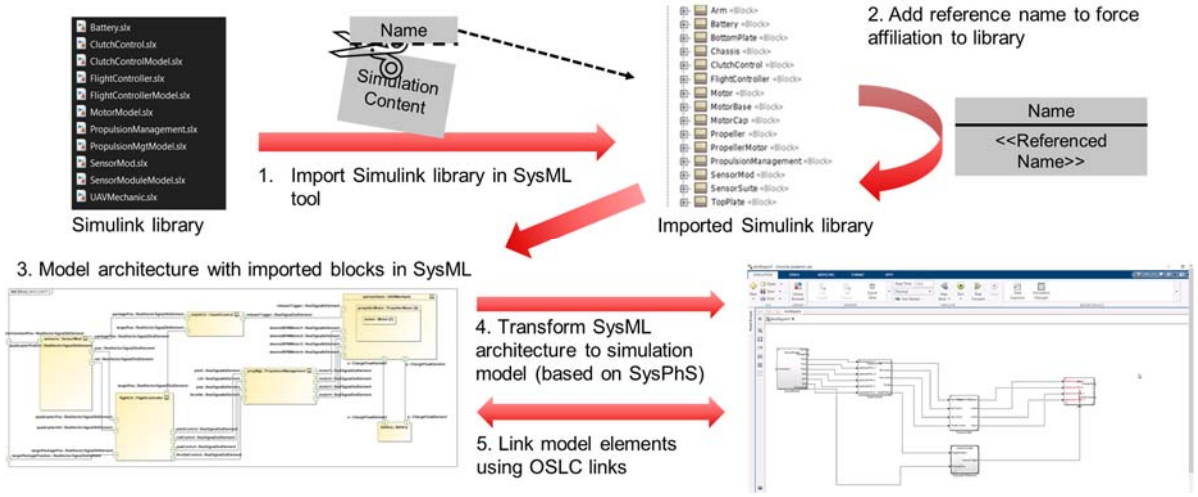


Abbildung 16: Modellierungsablauf bei der Anwendung des Common-Library-Ansatzes für ein einzelnes System

In einem weiteren Schritt hat die HM den „Common-Library"-Ansatz um variable Komponenten erweitert, um mit diesen ein 150%-SysML-Systemmodell zu Spezifikationszwecken erstellen zu können, welches die effiziente Simulation verschiedenster Architekturen ermöglicht [3], s. Abbildung 17.

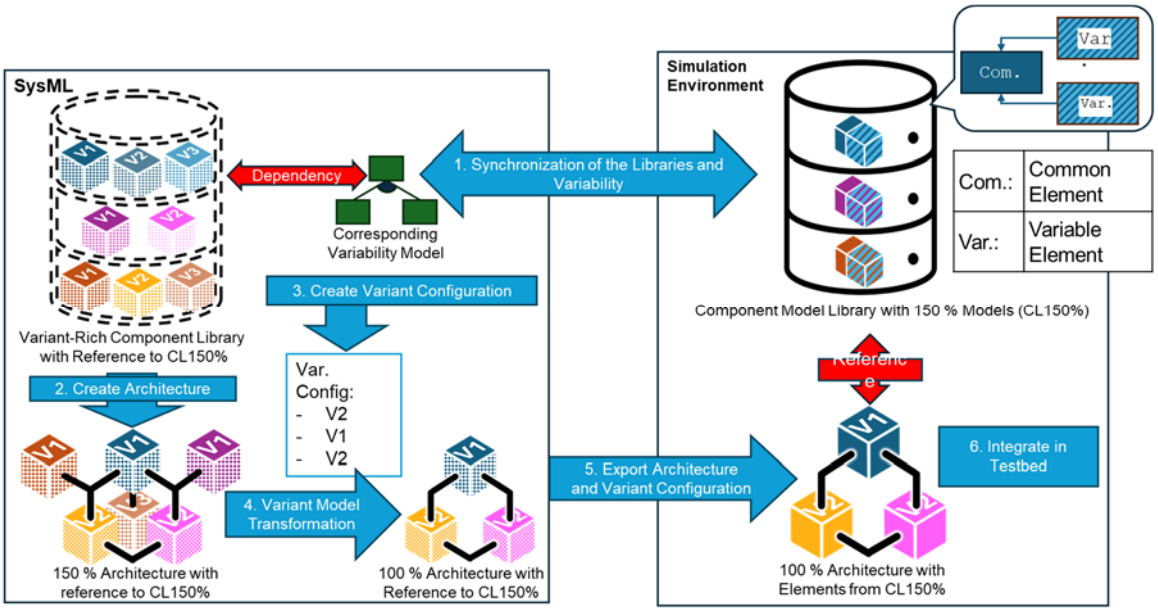


Abbildung 17: Common-Library-Ansatz für eine Produktlinie

Dieses Konzept ist bereits von einem Unternehmen in der Bahnindustrie, welches nicht dem Konsortium angehört hat, angewandt worden (Knorr-Bremse SfS GmbH) [3].

Ein ähnliches Konzept ist zusammen mit dem Konsortialpartner FAU entwickelt worden. Bei diesem wird ein OMNeT++ 150%-Simulationsmodell aus einem 150%-SysML-Systemmodell generiert. Dabei sind die Möglichkeiten der neuen Version v2 der Modellierungssprache SysML, insbesondere ihrer standardisierten API, angewandt und eine Modelltransformation von SysMLv2 zu OMNeT++ entwickelt worden [4], s. Abbildung 18.

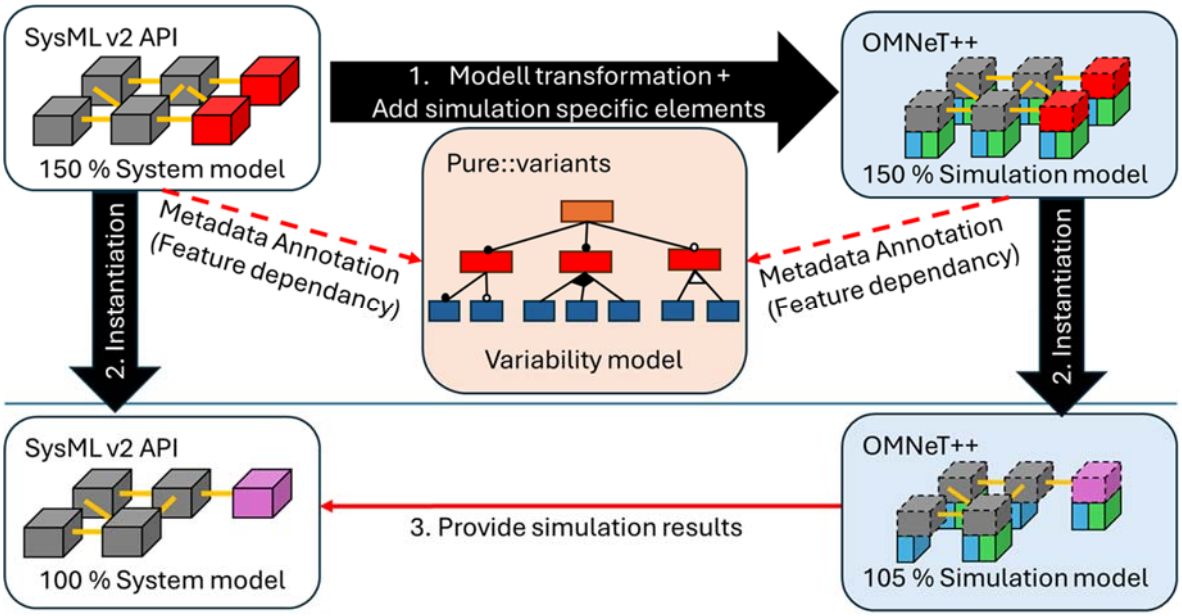


Abbildung 18: Generierung eines 150%-OMNeT++-Simulationsmodells aus einem 150%-SysML-Systemmodell

Ein von der HM entwickeltes Konzept zur frühen Validierung von SysML-Systemmodellen, bei dem das Systemmodell als digitaler Zwilling benutzt wird, um virtuelle oder physische Prototypen zu steuern, ist bereits im Abschnitt 3.1.3 beschrieben worden.

3.3 Arbeitspaket 3 – Evaluierung von MBSE mit PLE anhand eines einfachen Beispiels

Im Rahmen dieses Arbeitspakets waren die Arbeitsinhalte für die HM die Überprüfung des Modellierungskonzepts aus AP1 und der Ergebnisse aus AP2, und zwar anhand der Proof-of-Concepts (POCs) dieses Projekts, insbesondere der POCs von SMO und AVL. Ziel war auch die Verwendung der POCs zur Erhebung von Anforderungen (AP 4.1).

Zur Erfüllung dieser Aufgaben hat die HM verschiedene, sich ergänzende methodische Ansätze verfolgt:

1) Review der Modelle der Projektpartner:
   Die von den Projektpartnern SMO und AVL als Teil ihrer POCs erstellten Modelle wurden systematisch analysiert und bewertet, um die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 und 2 zu überprüfen.

2) Review der Toolketten der Projektpartner:
   Die von den Projektpartnern SMO und AVL vor dem Projekt und als Teil ihrer POCs erstellten Toolketten wurden systematisch analysiert, um im Rahmen des AP4 Anforderungen an Werkzeuge und Prozesse zu erheben.

3) Eigene Modellierung im Rahmen der Entwicklung eigener Demonstratoren:
   Um die Methoden und Tools eigenständig zu erproben und weiterzuentwickeln, wurden seitens der HM eigene Modelle erstellt, und zwar im Rahmen der Entwicklung eigener Demonstratoren. Die Demonstratoren waren
   - ein System-of-Systems, bestehend aus einem autonom fahrenden Fahrzeug in Kombination mit einem Drohnenschwarm (s. u.)
   - mehrere Toolketten, mit denen modellbasierte Entwicklungsprozesse unterstützt wurden (vgl. Abschnitt zu AP4).

Eigener Demonstrator: Insbesondere zur Überprüfung des von der HM im AP 1.3 – Software-Hardware-Entwurf - entwickelten Ansatzes, SysML-Systemmodelle als digitale Zwillinge zu benutzen, um modulare Systeme oder Systems-of-Systems hoher Variabilität frühzeitig zu validieren, hat die HM ein System-of-Systems bestehend aus einem autonom fahrenden Modellfahrzeug und einem Schwarm von Drohnen aufgebaut und getestet, und zwar sowohl mit virtuellen Prototypen als auch mit physischen Prototypen, s. Abbildung 19 [3, 4].

Abbildung 19: Beispielhafte Landschaft, in der ein System-of-Systems bestehend aus Drohnen und einem autonom fahrenden Modellfahrzeug betrieben wird: virtuell (oben) und real (unten)

Der eigene Demonstrator hat der HM mehr Flexibilität bei der Überprüfung und Weiterentwicklung der Ansätze und Ergebnisse aus dem AP 1 gegeben. Die Modelle von SMO und AVL haben der HM die Möglichkeit geboten, die Modellierungsansätze anhand realer Aufgabenstellungen aus der Industrie weiterzuentwickeln.

3.4 Arbeitspaket 4 – Entwicklung von Werkzeugen/Prozessen

3.4.1 AP 4.1 – Definition der Anforderungen an Werkzeuge/Prozesse

In diesem AP hat die HM Anforderungen an die Entwicklungsprozesse und die einzusetzenden Tools erhoben, damit das in AP 1 entwickelte integrierte MBPLE-Modellierungskonzept im industriellen Kontext angewandt werden konnte. Außerdem hat die HM dieses Arbeitspaket koordiniert.

Bei der Anwendung integrierter MBPLE-Modellierungskonzepte ist nicht nur die Definition von Prozessen, sondern auch die Implementierung von Toolketten eine Notwendigkeit und eine Herausforderung. Aus diesem Grund resultierte ein großer Teil der Aktivitäten in diesem Arbeitspaket aus der Realisierung von Toolketten. Fokus war dabei die Umsetzung der Durchgängigkeit und nicht die Anpassung der Tools selbst. So hat die HM Anforderungen an Werkzeugen und Prozessen z. B. im Rahmen der Verknüpfung eines Requirements Management-Werkzeuges (Doors) mit einem SysML-Systemmodellierungswerkzeug (Cameo Systems Modeler = CATIA Magic SoS Architect), im Rahmen der Integration von Testwerkzeugen sowie im Rahmen der Verknüpfung des Variabilitätsmodellierungs-werkzeuges pure::variants mit diesen anderen Werkzeugen definiert.

Bei der Definition der Anforderungen hat die HM folgende Aspekte berücksichtigt:

- die in AP 1 entwickelten Modellierungskonzepte
- die in AP 2 erhaltenen Ergebnisse zu speziellen Aspekten
- Erfahrungen aus der Entwicklung von POCs durch die anderen Projektpartner
- Interviews/Workshops mit den anderen Projektpartnern, wie z. B. MID, SMO und HMG
- Austausch mit externen Toolherstellern (insbesondere PTC)
- Interviews mit anderen Unternehmen (insbesondere MAHLE)
- die Ergebnisse der Analyse von Use Cases
- Erfahrungen aus der Entwicklung von Toolketten an der HM

Die Toolketten, die oben im letzten Aufzählungspunkt angesprochen werden, sind von der HM aufgebaute Toolketten, in denen Werkzeuge integriert werden, die von den Projektpartnern AVL und SMO oder anderen Unternehmen in den entsprechenden Branchen eingesetzt werden. Diese Toolketten wurden aufgebaut, um zukünftige Umsetzungen des sogenannten „Digital Threads“ (der digitalen Durchgängigkeit) in der industriellen Entwicklung erproben zu können. Hierbei sind die Toolketten zur Entwicklung eines realen Systems, nämlich des in Abschnitt 3.3 erläuterten System-of-Systems bestehend aus einem autonom fahrenden Modellfahrzeug und einem Drohnenschwarm angewandt worden. Dies hat erleichtert, Anforderungen zu erheben, den Stand der Technik zu beurteilen und „Best-in-Class“-Umsetzungen zu demonstrieren. Der Prozess der Erhebung der Anforderungen war iterativ, d. h. die Toolketten wurden entsprechend der Anforderungen aufgebaut, anschließend wurden die Anforderungen um die mit der Toolkette erhaltenen Kenntnisse erweitert.

Die Abbildung 20 und die Abbildung 21 zeigen zwei beispielhafte, an der HM aufgebaute Toolketten der Produktentwicklung mit jeweils einem SysML-Modellierungswerkzeug als zentralem Bestandteil der Kette (und zwar Cameo Systems Modeler = CATIA Magic SoS Architect in Abbildung 20 sowie Windchill Modeler in Abbildung 21).

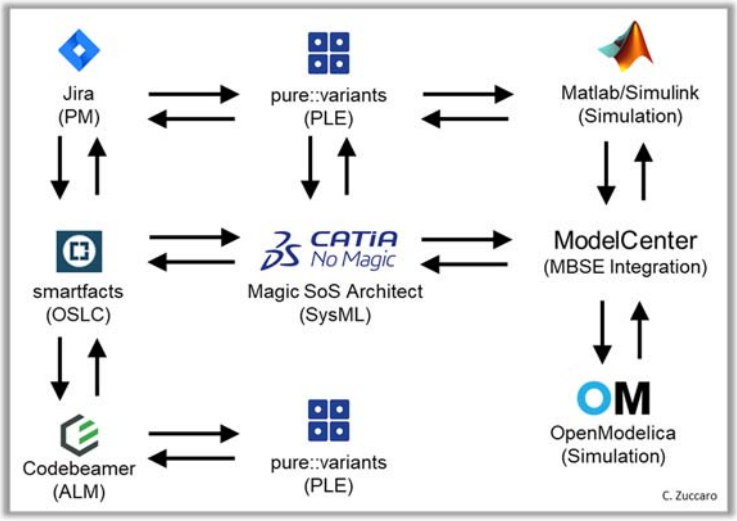


Abbildung 20: Beispielhafte Kette von Engineering-Werkzeugen mit CATIA Magic SoS als Systemmodellierungswerkzeug

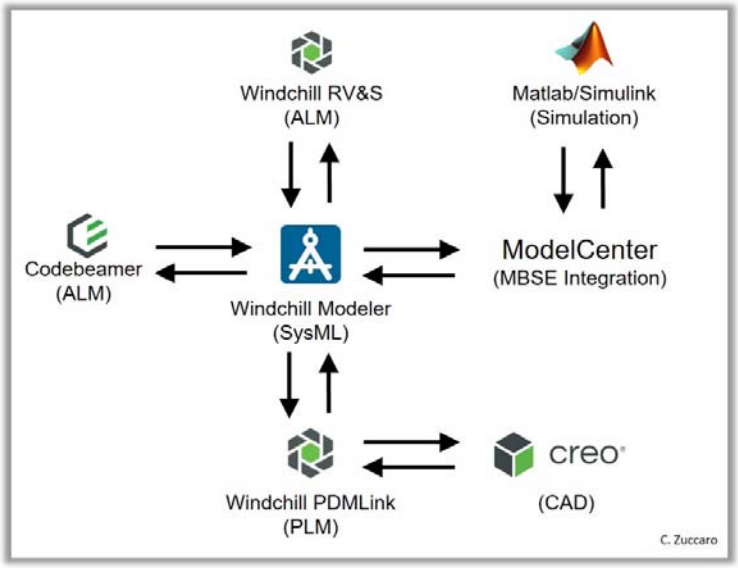


Abbildung 21: Beispielhafte Kette von Engineering-Werkzeugen mit Windchill Modeler als Systemmodellierungswerkzeug

Die in diesem Arbeitspaket erhobenen Anforderungen sind dokumentiert, gruppiert und im Rahmen von Workshops zusammen mit den Projektpartnern validiert worden.

3.4.2 AP 4.2 – Entwicklung Werkzeuge/Prozesse für gemeinsame Aspekte

In diesem Arbeitspaket sollte die HM eine durchgängige Toolkette um den Aspekt der Variabilität erweitern mit dem Ziel

- die in AP1 und AP2 entwickelten Konzepte zu validieren
- Anforderungen an Prozesse und Tools zu erheben (also zur Unterstützung des AP 4.1)

Dabei war auch in diesem Arbeitspaket der Fokus die Umsetzung der Durchgängigkeit und nicht die Anpassung der Tools selbst.

Bei der Toolkette in Abbildung 21 ist das Werkzeug zur Modellierung der Variabilität (und zwar auf der Basis von OVM) im SysML-Modellierungswerkzeug Windchill Modeler integriert. Dies erleichtert die Umsetzung der Verknüpfung zwischen dem Variabilitätsmodell und dem 150%-Systemmodell, erschwert aber die Verknüpfung zwischen dem Variabilitätsmodell und anderen Modellen wie z. B. den Anforderungen in einem Requirements Management-Werkzeug wie Codebeamer oder Windchill RV&S.

Hingegen ist bei der Toolkette in Abbildung 20 das Werkzeug zur Modellierung der Variabilität, nämlich pure::variants (auf der Basis von FODA), separat von anderen Werkzeugen bzw. Modellen. Es hat bereits Schnittstellen zu einer Reihe von Werkzeugen, wie z. B. CATIA Magic oder Codebeamer, so dass es mit dieser Toolkette möglich war, die Modelltransformation von 150% zu 100% nicht nur für Inhalte des SysML-Modells, sondern auch für Anforderungen in einem Requirements Management Werkzeug zu demonstrieren.

Bei der Untersuchung solcher Toolketten hat sich gezeigt, dass die Verlinkung von Modellelementen weiterhin zu großen Teilen dadurch realisiert wird, dass man Daten aus einem Tool in ein zweites exportiert und regelmäßig synchronisiert. Eine zu dieser Duplizierung von Daten alternative Lösung ist, Daten zu referenzieren. Zu diesem Zweck wurde der OSLC-Standard von der HM im Hinblick auf seine Eignung für industrielle Anwendungen näher untersucht. Hierbei sind eine Toolkette des Herstellers PTC (s. Abbildung 21) sowie das Tool Smartfacts des Projektpartners MID angewandt worden (s. Abbildung 20). Beispielhaft wurden unter anderem Anwendungsfälle in folgenden wichtigen Themenbereichen analysiert:

- Rückverfolgbarkeit: Unterstützung der Rückverfolgbarkeit in Übereinstimmung mit Standards wie A-SPICE oder ISO 26262
- Auswirkungsanalyse über Entwicklungsdomänen hinweg: Unterstützung bei der Auswirkungsanalyse, indem OSLC-Lösungen übergreifende Systeminformationen bereitstellen und Rückverfolgbarkeitsverknüpfungen erstellen
- Unterstützung von funktionalen Sicherheitsanalysen: Unternehmen können den Prozess der Sicherheitsanalyse rationalisieren, indem sie ein Werkzeug für funktionale Sicherheit über OSLC mit einem Systemmodellierungstool verbinden
- Entwicklungsbereichsübergreifendes Reporting mit automatisierter Auswertung: OSLC dient der Verbesserung des Prozesses der Systemspezifikation und Dokumentenerstellung für Systemartefakte mit Hilfe der Konsolidierung von Informationen aus verschiedenen Quellen und mit korrekter semantischer Interpretation.

Als Ergebnis dieser Untersuchung kann der OSLC-Standard als eine geeignete Basis angesehen werden, um die zentralen Bedürfnisse der Industrie im Bereich der Toolinteroperabilität zu bedienen, s. Abbildung 22 und Referenz [8].

Requirement number	Compliancy	Notes
Requirement 1	pass	OSLC-links provide sufficient traceability throughout tooling landscape
Requirement 2	fail	OSLC provides visualization of related artefacts via delegated UI`s, but automatically generated overviews are missing
Requirement 3	pass	OSLC provides a highly scalable infrastructure for multiple tools and a high number of interacting system artifacts
Requirement 4	fail	Several semantic inaccuracies are given between the OSLC specifications and specific domain languages
Requirement 5	pass	OSLC provides a common syntax via RDF for interoperability and consistency between tools
Requirement 6	pass	Versioning and saving of configurations is given via versioned links using TRS

Abbildung 22: Tabelle mit Erfüllungsgrad wichtiger Anforderungen an OSLC

Dennoch sind sowohl die Tools als auch der Standard zu verbessern, um nicht nur einfache Anwendungen wie die Erstellung von Traces unterstützen zu können sowie die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen. Diese Erkenntnisse sind auch im Austausch mit anderen Mobilitätsunternehmen gewonnen bzw. validiert worden [7, 8].

3.5 Arbeitspaket 5 – Exemplarischer Nachweis am Beispiel der GOA2 Funktionsmodule

Nach der Vorhabensbeschreibung war kein Beitrag der HM zu diesem Arbeitspaket 5 geplant. Die HM hat jedoch im Rahmen des Arbeitspaketes 2.3 zusammen mit der FAU ein Konzept entwickelt, bei dem ein OMNeT++ 150%-Simulationsmodell aus einem 150%-SysML-Systemmodell generiert wird, s. Abschnitt 3.2.3. Die Evaluierung des Ansatzes erfolgte im Rahmen des Arbeitspaketes 5 an einem Anwendungsfall für den Schienenverkehr.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes 5 hat sich die HM außerdem intensiv mit dem Konsortialpartner SMO ausgetauscht, um bereits erstellte Modellierungsregeln zu validieren und zu ergänzen. Richtlinien und Best-Practices wurden daraus abgeleitet.

3.6 Arbeitspaket 6 – Validierung der MBPLE-Ansätze

Im Rahmen des Arbeitspaketes 6 hat sich die HM intensiv mit dem Konsortialpartner AVL ausgetauscht, um bereits erstellte Modellierungsregeln zu validieren und zu ergänzen. Hierzu hat AVL in einer Reihe von Workshops deren Variabilitätsmodelle für drei Anwendungen im Bereich Automotive (HV-Speicher, Ladefunktion, Fahrerassistenzfunktionen) vorgestellt. Die HM hat die Variabilitätsmodelle anhand eigener Regeln gereviewed, mit Hilfe der Regeln Optimierungsvorschläge gemacht und umgekehrt die eigenen Richtlinien und Best-Practices anhand der realistische Beispiele von AVL ergänzt. Ein wichtiger Aspekt dabei war die Minimierung von Abhängigkeiten zwischen Elementen des Variabilitätsmodells (exclude- bzw. require-Abhängigkeiten), die das Modell übersichtlicher machen, was wiederum die Verifizier- und Validierbarkeit des Variabilitätsmodells verbessert.

Außerdem wurde die Umsetzung des Baukastenkonzeptes (s. AP 1.2 – Systemarchitektur) mit dem Tool Cameo Systems Modeler dem Projektpartner AVL detailliert vorgestellt, um eine zeitnahe Umsetzung dieses Konzeptes beim Konsortialpartner zu ermöglichen, s. Abbildung 23.

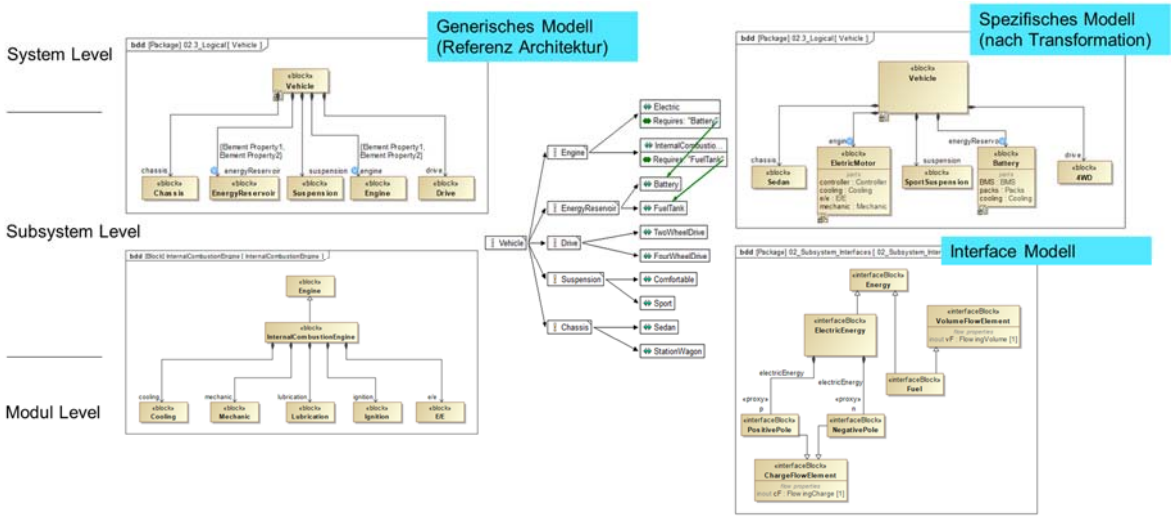


Abbildung 23: Beispielhafte Umsetzung des Baukastenkonzeptes

Wie im Abschnitt zum Arbeitspaket 1 bereits erläutert, hat die HM darüber hinaus ein Tool erstellt, um FODA-Modelle (z. B. Modelle des Tools pure::variants) in OVM-Modelle zu übersetzen, s. dortige Abbildung.

3.7 Arbeitspaket 7 - Eignungsprüfung

Aufgabenstellung: Im Rahmen dieses Arbeitspakets hatte die Hochschule München (HM) die Aufgabe, die im Projekt eingesetzten und entwickelten Methoden, Prozesse und Tools systematisch zu überprüfen und zu validieren. Ein besonderer Fokus lag dabei auf den Konzeptanteilen, die aus den eigenen Beiträgen in Arbeitspaket 1 (AP1) und Arbeitspaket 2 (AP2) hervorgegangen sind. Ziel war es, die Praxistauglichkeit und Qualität dieser Konzepte fundiert zu bewerten und gegebenenfalls Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Zu diesem

Zweck sollte die HM geeignete Indikatoren vorschlagen, mit deren Hilfe die Eignung der Methoden, Prozesse und Tools durch die Projektpartner objektiv eingeschätzt werden konnte.

Vorgehensweise: Zur Erfüllung dieser Aufgabe hat die HM drei sich ergänzende methodische Ansätze verfolgt:

1) Review der Modelle der Projektpartner:
   Die von den Projektpartnern erstellten Modelle wurden systematisch analysiert und bewertet. Dabei standen insbesondere die Struktur, Verifizier- und Validierbarkeit im Vordergrund. Ziel war es, Stärken und Schwächen in der Anwendung der Methoden und Tools zu identifizieren und daraus Rückschlüsse auf ihre Eignung im praktischen Einsatz zu ziehen.

2) Eigene Modellierung im Rahmen der Entwicklung eigener Demonstratoren:
   Um die Methoden und Tools eigenständig zu erproben und weiterzuentwickeln, wurden seitens der HM eigene Modelle erstellt. Diese dienten der Umsetzung und Validierung zweier konkreter Demonstratoren:
   - einem System-of-Systems, bestehend aus einem autonom fahrenden Fahrzeug in Kombination mit einem Drohnenschwarm (vgl. Abschnitt zu AP1), sowie
   - mehreren Toolketten, mit denen modellbasierte Entwicklungsprozesse abgebildet wurden (vgl. Abschnitt zu AP4).

   Durch die eigenständige Anwendung der Methoden konnte die HM sowohl die technische Machbarkeit als auch die Benutzerfreundlichkeit und Effizienz der Tools und Prozesse unter praxisnahen Bedingungen beurteilen.

3) Validierung außerhalb des Projektkonsortiums
   Zusätzlich wurden die entwickelten Methoden, Prozesse und Tools Unternehmen außerhalb des Projektkonsortiums vorgestellt, um unabhängiges Feedback zur Praxistauglichkeit einzuholen. In enger Zusammenarbeit mit den Firmen Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH (SfS) sowie MAHLE aus dem Automotive-Sektor wurden Anwendungsszenarien diskutiert und evaluiert. Diese Zusammenarbeit führte auch zu gemeinsamen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die das gewonnene Wissen dokumentieren und der Fachöffentlichkeit zugänglich machen.

Ergebnisse: Alle drei Validierungsmethoden haben konsistent gezeigt, dass die betrachteten und weiterentwickelten Methoden, Prozesse und Tools der HM grundsätzlich geeignet sind, um die Entwicklung komplexer Systeme hoher Variabilität effizient zu unterstützen. Die gewonnenen Erkenntnisse lieferten zudem wertvolle Impulse für deren Weiterentwicklung. Als Beispiel sei hier die Weiterentwicklung des OSLC-Standards sowie der OSLC-Fähigkeiten von Modellierungswerkzeugen genannt (s. Abschnitt zum Arbeitspaket 4).

Zur objektiven Bewertung wurden im Vorfeld durch die HM geeignete Indikatoren definiert. Diese orientierten sich insbesondere an folgenden Qualitätsmerkmalen:

- Effizienz bei der Erstellung und Pflege der Modelle
- Benutzerfreundlichkeit der Werkzeuge
- Verifizierbarkeit und Validierbarkeit der erstellten Modelle

Um diese Merkmale quantitativ zu erfassen, wurden messbare Kriterien herangezogen – beispielsweise die Anzahl der Verknüpfungen in einem Variabilitätsmodell, die Aufschluss über die Komplexität und Wartbarkeit der Modelle gibt.

Die enge Verzahnung von interner Anwendung, kritischer Prüfung von Partnerbeiträgen und externem Feedback stellte sicher, dass die Validierung sowohl praxisnah als auch wissenschaftlich fundiert erfolgte. Die Rückmeldungen externer Industriepartner bestätigen zudem die Relevanz der entwickelten Ansätze über das konkrete Projekt hinaus.

3.8 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nach dem im Zuwendungsbescheid festgelegten Gesamtfinanzierungsplan betrugen die geplanten Gesamtausgaben 494.182,86 €. Den größten Anteil an den Gesamtausgaben stellten die Personalkosten für zwei wissenschaftliche Mitarbeiterstellen dar (insgesamt über 80 % der Gesamtausgaben).

Die übrigen Ausgabepositionen umfassten Beschäftigungsentgelte für studentische Hilfskräfte, Ausgaben für Dienstreisen, Aufwendungen für Gegenstände und Investitionen (insbesondere Softwarelizenzen) sowie sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben.

Im Projektverlauf wurden in mehreren Positionen geringere Mittel als geplant in Anspruch genommen. So fielen insbesondere die Ausgaben für studentische Hilfskräfte niedriger aus, da sich die Gewinnung geeigneter Personen als schwierig erwies. Auch die Dienstreisekosten blieben unter Plan, da pandemiebedingte Einschränkungen zu Beginn des Projektes zu einer verstärkten Nutzung von Videokonferenzen führten.

Im Gegenzug wurde – im Rahmen der Verlängerung des Projektes um ein halbes Jahr (s. Abschnitt 1.2) – die Beschäftigung eines der beiden wissenschaftlichen Mitarbeiter um ein halbes Jahr, bis Ende 2024, verlängert. Dennoch wurden die ursprünglich geplanten Gesamtausgaben insgesamt nicht überschritten.

3.9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten waren notwendig, um die im Projekt definierten wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen zu bearbeiten. Neben theoretischen Betrachtungen zum MBPLE-Konzept war insbesondere auch der Aufbau eigener Toolketten und Demonstratoren für die Validierung der Konzepte und damit für die Erreichung der Projektziele unerlässlich.

Der personelle und zeitliche Aufwand war angemessen. Die Arbeiten wurden im Wesentlichen von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt. Die Mittel wurden zweckentsprechend eingesetzt; eine Überfinanzierung oder unangemessene Mittelverwendung lag nicht vor.

Insgesamt steht der Umfang der geleisteten Arbeit in einem angemessenen Verhältnis zu den erzielten Ergebnissen und dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn. Dies wird unter anderem durch die von der HM veröffentlichten Fachartikel belegt (s. Abschnitt 3.12).

3.10 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt erzielten Ergebnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung des Model-Based Product Line Engineering (MBPLE) im Kontext komplexer technischer Systeme. Durch die Kombination modellbasierter Methoden mit variantenorientierten Entwicklungsansätzen konnten neue Modellierungsansätze und prototypische Toolketten entwickelt werden, die eine effizientere Wiederverwendung von Modellen und Artefakten ermöglichen.

Der wissenschaftliche Nutzen liegt in der konzeptionellen und methodischen Weiterentwicklung bestehender MBPLE-Ansätze. Die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 2 kurz und in den Abschnitten 3.1 bis 3.7 dieses Berichts ausführlicher dargestellt. Sie wurden in mehreren Fachartikeln publiziert (siehe Abschnitt 3.10) und stehen damit der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung.

Der praktische Nutzen zeigt sich in der verbesserten Unterstützung von Entwicklungsprozessen durch die im Projekt entwickelten Ansätze und Toolketten. Diese können als Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie für eine Integration in industrielle Entwicklungsumgebungen dienen. Erste Transfers der Projektergebnisse erfolgten bereits im Rahmen von Kooperationen der Hochschule München mit Unternehmen aus zwei unterschiedlichen Branchen (MAHLE als Automobilzulieferer und Knorr-Bremse SfS im Schienenverkehrssektor), in denen Ergebnisse des Projekts CONSYSVAR weiterentwickelt wurden [3, 7, 8]. Weitere Kooperationen, unter anderem mit Partnern aus dem Aerospace-Bereich, sind in Planung.

Eine wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse ist perspektivisch möglich. Die Hochschule München beabsichtigt, die im Rahmen von CONSYSVAR entwickelten Methoden über das Experience Center Systems Engineering interessierten Unternehmen vorzuführen und entsprechende Dienstleistungen im Rahmen von F&E-Projekten oder Weiterbildungsmaßnahmen in den Themenfeldern MBSE und MBPLE, insbesondere für mittelständische Unternehmen, anzubieten.

Eine weiterführende Nutzung der Konzepte im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte ist vorgesehen. Zudem werden die Projektergebnisse bereits in Lehrveranstaltungen an der Hochschule München eingesetzt und in studentischen Arbeiten weitergeführt.

3.11 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens wurden fortlaufend aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet des Model-Based Product Line Engineering (MBPLE) beobachtet, insbesondere im Rahmen einschlägiger Fachkonferenzen und wissenschaftlicher Publikationen. Auch wurde der Kenntnisstand zum Bedarf in der Industrie wiederholt durch Interviews und sogar durch Kollaborationen aktualisiert. Dabei wurden verschiedene methodische Fortschritte anderer Forschungseinrichtungen identifiziert, die Fragestellungen zu diesem Themengebiet adressierten. Diese Entwicklungen hatten jedoch keinen unmittelbaren Einfluss auf die Zielsetzung oder Durchführung des Projektes.

3.12 Veröffentlichungen

Die HM hat insgesamt neun Fachartikel im Rahmen von Peer-Reviewed-Journalen bzw. -Konferenzen veröffentlicht:

[1] “How to Structure Variability in Large-Scale Complex Engineered Systems”, H. Wagner, W. Rössler, C. Zuccaro, TdSE 2023, Würzburg, GfSE Verlag

[2] “Collaboration between System Architect and Simulation Expert”, H. Wagner, C. Zuccaro, 2022 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), Vienna, Austria, 2022, https://doi.org/10.1109/isse54508.2022.10005417

[3] “A Novel Approach to Simulation Model Reuse in SysML: Industrial Applications and PLE Methodologies”, Heinrich Wagner, Claudio Zuccaro, Maximilian Karl, and William Cardozo, 2024 Complex Systems Design & Management (CSD&M) Conference, Paris, France, 2024, akzeptiert, wird noch veröffentlicht

[4] “From Platform Specification to Product Simulation: A Novel Application of SysML v2 in Product Line Engineering”, Wagner, H.; Arestova, A.; Portenlänger, L.; German, R.; Zuccaro, C., 2024 IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE 2024), Proceedings, 2024, DOI: 10.1109/RASSE64357.2024.10773768

[5] “Using SysML Models as Digital Twins for Early Validation of Modular Systems and Systems of Systems”, H. Wagner, L. Portenlänger, C. Zuccaro, 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe), Lille, France, 2023, IEEE, https://ieeexplore.ieee.org/document/10178526

[6] “Managing Variability in Digital Twins and System Development through Product Line Engineering”, Wagner, H.; Zuccaro, C., ISSE 2024 - 10th IEEE International Symposium on Systems Engineering, Perugia, Italy, 2024, IEEE, DOI: 10.1109/ISSE63315.2024.10741090

[7] “Is OSLC Ready for Industrial Applications in Systems Engineering? A Case Study in Automotive”, C. Zuccaro et al., TdSE 2023, Würzburg, GfSE Verlag

[8] “Analysis of the Ability of the OSLC Standard to Improve Data Traceability in System Development”, L. Portenlänger, C. Zuccaro, A. Korff, W. Schönecker, INCOSE International Symposium 2024, Dublin, Wiley, 2024

[9] “Research Project MBPLE4Mobility: Mastering Complex Transportation Systems with a High Degree of Variability”, A. Arestova et al., TdSE 2022, Paderborn, GfSE Verlag