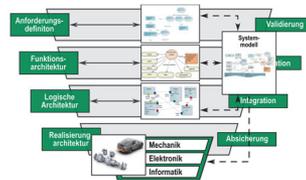


Model-based Systems Engineering: Verständnis und Mehrwert für die Entwicklung komplexer Produkte

Schumacher, T.; Inkeremann, D.

Aktuelle Produktentwicklungen sind durch eine hohe und kontinuierlich zunehmende Komplexität der Produkte selbst sowie der Prozesse geprägt. Etablierte Entwicklungsmethoden und -vorgehensweisen sind häufig nicht geeignet, dieser Komplexität zu begegnen. Systems Engineering und Model-based Systems Engineering stellen Ansätze dar um die Entwicklung komplexer Produkte besser zu strukturieren und handhaben zu können. Dieser Beitrag führt in die Grundlagen des Model-based Systems Engineering ein, stellt dessen Mehrwert dar und gibt einen Einblick in die Anwendung von Model-based Systems Engineering anhand eines Anwendungsbeispiels. Zudem werden zukünftige Forschungsfelder aufgezeigt.



Current product developments are characterized by high and continuously increasing product and process complexity. Established development methods and approaches often cannot handle this complexity sufficiently. Systems engineering and model-based systems engineering are approaches for a more structured development and handling of complex products. This article introduces the basics of model-based systems engineering, presents its benefits and gives an insight into the application of model-based systems engineering based on an application example. Additionally future research fields will be presented.

Einführung in das Model-based Systems Engineering

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Entwicklung komplexer Produkte ist ein domänenübergreifendes Systemverständnis, welches die domänenspezifischen Entwicklungslösungen zu einer systemorientierten Anforderungs- und Funktionserfüllung sowie Systemrealisierung integriert. Ein komplexes Produkt lässt sich mindestens anhand der Einheiten Vielfalt und Dynamik charakterisieren. Dabei stellt die Vielfalt die Anzahl der verknüpften Systemelemente und deren Heterogenität dar. Die Dynamik beschreibt die Veränderbarkeit des Systems über die Zeit, z.B. anhand unterschiedlicher Systemzustände /1/. Darüber hinaus zeichnet sich die Entwicklung komplexer Produkte durch parallele Entwicklungsaktivitäten unterschiedlicher Disziplinen, wie bspw. Mechanik-, Elektronik- und Softwareentwicklung, aus. Vorgehensmodelle des Systems Engineering, wie das V-Modell, unterstützen bei diesen Entwicklungsaktivitäten, indem eine Abfolge („Top-Down-Vorgehen“ bzw. „Vom Groben zum Detail“ /2/) vorgeschlagen wird und insbesondere die Notwendigkeit einer systemorientierten Betrachtungsweise und

einer kontextspezifischen Dekomposition sowie Integration des Systems adressiert wird /3/. Systems Engineering (SE) adressiert somit gleichzeitig die Prinzipien Ganzheitlichkeit und Reduktion während der Entwicklung komplexer Produkte. In der industriellen Praxis sind meist dokumentenbasierte Entwicklungsansätze verbreitet, welche oft Inkonsistenzen oder Unzulänglichkeiten, wie bspw. eine unzureichende Rückverfolgbarkeit zwischen Systemrealisierung und -anforderungen, aufweisen /4/. Um hieraus resultierende Fehlerquellen während der Entwicklung zu vermeiden, wurde das modellbasierte Systems Engineering (engl. Model-based Systems Engineering) entwickelt /5/. Das modellbasierte Systems Engineering (MBSE) zielt auf die Durchgängigkeit und Konsistenz von Systembeschreibungen unterschiedlicher Entwicklungsdomänen, wie Mechanik, Elektrik / Elektronik und Software, ab und verwendet verstärkt formale Modelle für die domänenübergreifende Systemmodellierung. SE und MBSE können dabei als zwei aufeinander aufbauende Handlungsfelder im Rahmen des Advanced Systems Engineering betrachtet werden, siehe Abbildung 1.

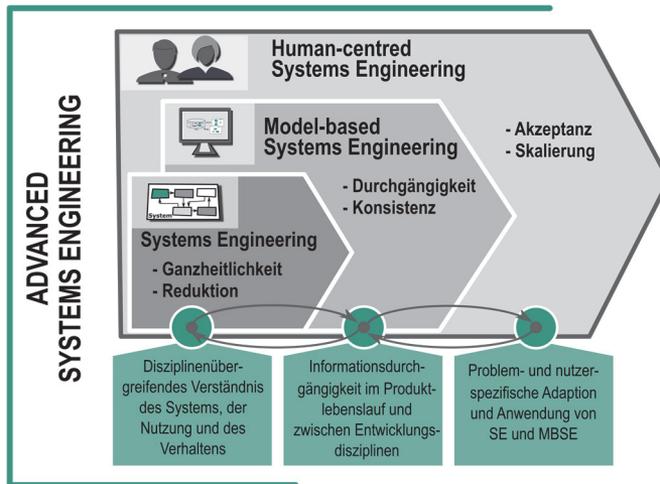


Abbildung 1: Handlungsfelder und Zielsetzungen des Advanced Systems Engineerings, Zielsetzungen basierend auf /6/

Das Advanced Systems Engineering erweitert die Handlungsfelder SE und MBSE um die Humanzentrierung, welche insbesondere für die Umsetzung von Systems Engineering in der Praxis von großer Bedeutung ist. Das human-centred Systems Engineering zielt dabei auf die Akzeptanz und Skalierung von Entwicklungsmethoden, -werkzeuge und Vorgehensweisen an die individuellen Problemstellungen und Anforderungen ab. Gleichzeitig bestehen zwischen den drei Handlungsfeldern Abhängigkeiten, so bedarf eine erfolgreiche Umsetzung von MBSE die Prinzipien des Systems Engineering, wie eine systemorientierte Entwicklung und eine zweckmäßige Reduktion, und stellt gleichzeitig Anforderungen

an bspw. Entwicklungsmethoden und –vorgehensweisen, welches das Handlungsfeld des human-centred Systems Engineering betrifft /7/.

Eine zentrale Zielstellung des MBSE ist eine durchgängige, konsistente Systemmodellierung. Diese erfolgt üblicherweise durch Anwendung semiformaler Modellierungssprachen, wie SysML oder UML, und zielt auf die Beschreibung des Systemkontextes, der Systemanforderungen, der Systemfunktionen, des Systemverhaltens und der Systemstruktur in einem Systemmodell ab /8, 9/. Das Systemmodell beschreibt neben den einzelnen Systemelementen auch deren Schnittstellen und funktionalen Wechselwirkungen um das dynamische und emergente Systemverhalten abzubilden. Dabei lässt sich das emergente Systemverhalten nicht direkt mit dem Verhalten der einzelnen Systemelemente begründen, sondern leitet sich aus den Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen untereinander und zum System ab /10/.

Industrielle Anwendung von Systems Engineering und Ziel dieses Beitrags

Um Anwendung und Bedarf von Systems Engineering in der industriellen Praxis zu ermitteln, wurden in den vergangenen Jahren wiederholt Interviews mit Vertretern verschiedener Industriebranchen durchgeführt /11, 12, 13/. Dabei ergab sich ein heterogenes, branchenabhängiges Ergebnis. In der Luft- und Raumfahrttechnik sind Vorgehensweisen des Systems Engineering weitgehend etabliert. Gleichzeitig sieht die Fahrzeugindustrie eine zunehmende Bedeutung von Systems Engineering, um komplexer Produkte effizient zu entwickeln. Aber im Maschinen- und Anlagenbau, welcher den breiten Mittelstand der deutschen Industrie repräsentiert, wird Systems Engineering mehrheitlich nicht angewendet und dessen Nutzen ist nur unzureichend bekannt. Dieser Beitrag stellt den Nutzen von Systems Engineering und insbesondere des modellbasierten Systems Engineering basierend auf etablierter Literatur dar und erläutert die Anwendung von MBSE an einem konkreten Anwendungsbeispiel. Außerdem werden weitere Forschungsfelder im Rahmen der systemorientierten Entwicklung vorgestellt.

Mehrwert und Nutzen von Systems Engineering und MBSE

Systems Engineering stellt einen interdisziplinären Ansatz zur Entwicklung und Realisierung von Systemen dar. Dabei betrachtet SE insbesondere die geforderten Systemfunktionen auf Ebene des Gesamtsystems und unter Berücksichtigung des Systemumfeldes und der Nachbarsysteme und beabsichtigt diese möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess zu definieren. Gleichzeitig stellt SE immer eine Betrachtung des zu entwickelnden Systems auf unterschiedlichen Hierarchieebenen in den Vordergrund. Einerseits wird das zu entwickelnde System geöffnet, um die Systemstruktur (Systemelemente und deren Wechselwirkungen) besser zu verstehen und andererseits werden übergeordneter Systeme, mit denen das zu entwickelnde System interagiert oder in die es eingebettet wird, betrachtet. Basierend auf diesen Erläuterungen, welche auf dem INCOSE Handbuch /9/ beruhen, lassen sich bereits zentrale SE-Vorteile ableiten:

- Verbindung unterschiedlicher Entwicklungsdisziplinen
- Frühzeitige Definition des funktionalen Systemverhaltens
- Systemstruktur basiert auf den erforderlichen Systemfunktionen
- Berücksichtigung des Systemkontextes im Entwicklungsprozess

Grundsätzlich werden dem Systems Engineering weitere generelle Vorteile, wie eine kürzere Produktentwicklungsdauer, eine Reduktion der Änderungen während der Entwicklung, eine Reduzierung von Entwicklungsschleifen und eine Verringerung der Herstellungskosten, zugeschrieben /14/.

Die Anwendung des modellbasierten Systems Engineering, welches sich von dem klassischen, dokumentenorientierten SE insbesondere durch den Einsatz von Modellen unterscheidet, bietet weitere Vorteile. Zur Sicherstellung eines effizienten Entwicklungsprozesses ist eine durchgängige Abstimmung und Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen erforderlich, welches jedoch oft aufgrund unterschiedlicher Fachtermini und heterogener Entwicklungsvorgehensweisen und -modellen scheitert. Diese Herausforderung greift MBSE durch den Einsatz digitaler Modelle als zentrales Informationsmedium auf und verbessert damit die Kommunikation, den Informationsfluss und die Zusammenarbeit verschiedener Entwicklungsdisziplinen. Gleichzeitig können digitale Modelle die Informationskonsistenz verbessern, welches die Fehleranzahl und die Anzahl zusätzlicher Entwicklungszyklen reduziert /15/. Ein weiterer zentraler Nutzen von MBSE ist ein verbessertes Systemverständnis. Die Generierung eines umfassenden Systemverständnisses ist die Grundlage für die Entwicklung eines komplexen Produkts, da Auswirkungen aufgrund getätigter Entwicklungsentscheidungen sonst nicht absehbar und planbar sind. Nachfolgend wird eine Auswahl weiterer MBSE-Vorteile die auf einer Literaturanalyse von Henderson und Salado basieren aufgeführt /15/. Die Auswahl wird mit einem besonderen Mehrwert bezüglich der Produktentwicklung (Prozess) oder dem zu entwickelnden Produkt selbst begründet. Wichtige Vorteile von MBSE sind demnach /15/:

- Erhöhung der Produktqualität
- Wiederverwendung von Systemelementen
- Besseres Systemdesign und Systemarchitektur
- Umfängliche Bewertung von Änderungen und deren Auswirkungen
- Verbessertes Anforderungsmanagement (bspw. Stakeholderanalysen)
- Frühere Systemvalidierung und –verifikation
- Verbesserte Traceability (bspw. zwischen Design und Anforderungen)
- Bessere Fehleranalysefähigkeit
- Besserer Umgang mit Komplexität
- Umfangreiche Risikobewertung

Der in diesem Abschnitt dargestellte Mehrwert von SE und MBSE stellt nur eine Auswahl an möglichen Potentialen für die Entwicklung komplexer Produkte dar. Es soll an dieser Stelle jedoch auch erwähnt werden, dass die dargestellten Potentiale auf einer Analyse von etablierter Literatur basieren und diese mehrheitlich bisher nicht durch empirische Erkenntnisse belegt werden konnten /15/. Grundsätzlich ist jedoch festzustellen, dass mit ansteigender Produktkomplexität (z. B. aufgrund zunehmender Vernetzung) die Bedeutung von SE und MBSE zunimmt.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit MBSE bedarfsorientiert einzusetzen, um etablierte Entwicklungsaktivitäten zu unterstützen. Husung et al. führen hierzu den Nutzen von MBSE bezogen auf konkrete Entwicklungsaktivitäten auf /16/. Beispielhaft soll hier die Aktivität *Systemintegration planen* aufgegriffen werden. Die Aktivität umfasst die frühzeitige Festlegung der Integrationsstrategie, welche eine zentrale Tätigkeit für eine effiziente Systemintegration darstellt. Dem Einsatz von MBSE wird hierzu folgender Nutzen zugeschrieben:

- Besserer Vergleich von Systemarchitekturalternativen
- Eindeutige Kontext- und Schnittstellendefinitionen der Systemelemente
- Reduzierung des Koordinationsaufwands
- Reduzierung von Fehlern und Inkompatibilitäten

Die Anwendung von MBSE kann somit sowohl als genereller Entwicklungsansatz als auch als bedarfsorientierte Unterstützung etablierter Entwicklungsaktivitäten einen Mehrwert für die Entwicklung komplexer Produkte bieten.

Anwendung MBSE an einem elektromechanischen Wankstabilisator

Dieser Abschnitt soll einen Einblick in die Anwendung von MBSE anhand eines ausgewählten Anwendungsbeispiels geben. Hierzu wird die Modellierungssprache SysML (v1.5) unter Verwendung des Softwaretools Enterprise Architect von Sparx Systems eingesetzt. Als Anwendungsbeispiel dient der elektromechanische Wankstabilisator, welcher einerseits ein komplexes Produkt darstellt, jedoch einen überschaubaren Systemumfang aufweist und andererseits als Teilsystem des Fahrzeugchassis zentrale SE-Themenfelder wie Systemdekomposition und -integration adressiert.

Zur Strukturierung des Entwicklungsprozesses schlägt MBSE eine Trennung zwischen Problem- und Lösungsraum vor, siehe Abbildung 2. Indem die Problemerkklärung von der Lösungsentwicklung abgegrenzt wird, soll die Ermittlung eines umfangreichen Problemverständnisses gefördert werden.

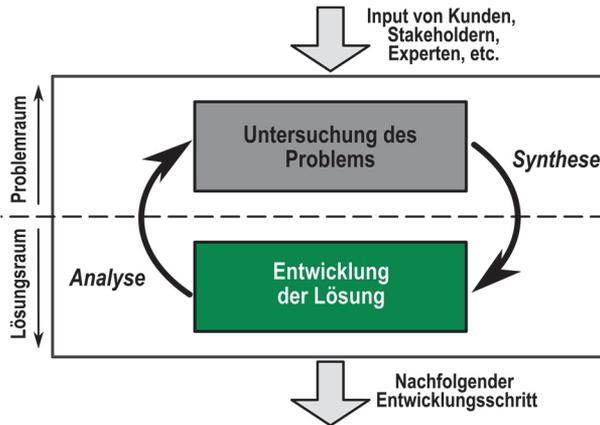


Abbildung 2: Top Level Systems Engineering Prozess als Zyklus der Problemerkklärung und Lösungsermittlung, in Anlehnung an /17/

Übergeordnet kann ein MBSE-orientierter Entwicklungsprozess als ein sich wiederholender Zyklus von Problemuntersuchung und Lösungsentwicklung auf unterschiedlichen System- und Detaillierungsebenen betrachtet werden. Für die Anwendung von MBSE sollte dieser generische Prozess jedoch in weitere Prozessschritte zergliedert werden. Im Rahmen dieses Beitrags wird dazu mindestens eine Unterscheidung in die folgenden sechs Entwicklungs- bzw. Modellierungsphasen vorgeschlagen, wobei die ersten drei Phasen den Problemraum und die letzten drei Phasen den Lösungsraum detaillieren, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Phasen der Systemmodellierung und deren Zielstellung

Problem- / Lösungsraum	Modellierungsphase	Zielstellung
Problemraum	Identifizierung und Modellierung des Systemkontextes	Identifizierung von Personen oder Systemen mit Anforderungen oder Erwartungen an das System
	Identifikation und Modellierung von Systemanwendungsfällen	Beschreibung des Systemzwecks anhand relevanter Anwendungsfälle
	Ermittlung und Modellierung der Stakeholder- und Systemanforderungen	Ermittlung und Dokumentation aller relevanten Stakeholder-Anforderungen und Überführung in Systemanforderungen
Lösungsraum	Entwicklung und Modellierung des Systemverhaltens	Erarbeitung einer funktionale Systembeschreibung
	Entwicklung und Modellierung der Systemstruktur	Festlegung der Funktionsträger (Systembestandteile) inklusive deren Wechselwirkungen untereinander und zur Umwelt
	Vernetzung der Modellelemente	Vervollständigung und Visualisierung der Abhängigkeiten zwischen Modellelementen

Die dargestellten Phasen werden im folgendem kurz erläutert. Dazu werden zur Visualisierung SysML-Diagrammausschnitte des Wankstabilisator Systemmodells verwendet. Ein Diagramm stellt dabei eine spezifische Sicht auf das System aus der

Perspektive eines bestimmten Interessenstandpunktes (bspw. Entwicklungsdomäne und -tätigkeit) dar /18/.

Phase 1: Identifizierung und Modellierung des Systemkontextes

Im Rahmen der Systemkontextmodellierung werden sämtliche Stakeholder und Systeme beschrieben, die mit dem zu entwickelnden System wechselwirken bzw. einen Einfluss haben. Dabei empfiehlt sich eine Unterscheidung in Systemumfeldmodellierung (technischer Kontext) und Stakeholdermodellierung (sozio-technischer Kontext). Ziel dieser Phase ist die Identifizierung von Personen oder Systemen die Anforderungen oder Erwartungen an das zu entwickelnde System haben. Die Abbildung 3 stellt dazu einen Ausschnitt aus dem Systemumfelddiagramm des elektromechanischen Wankstabilisators dar.

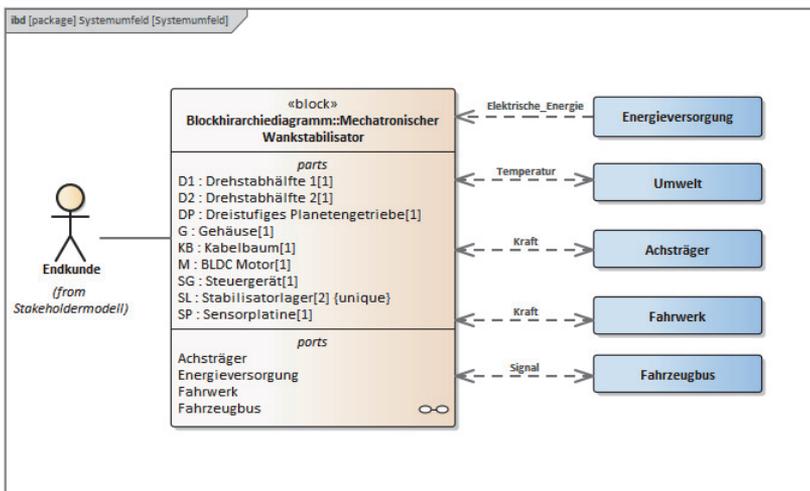


Abbildung 3: Systemumfelddiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Phase 2: Identifikation und Modellierung von Systemanwendungsfällen

Diese Phase dient der Beschreibung des Systemzwecks indem Anwendungsfälle, die das zu entwickelnde System im Verlauf des Lebenszyklus einnehmen kann, identifiziert werden, siehe Abbildung 4. Ein Anwendungsfall stellt dabei eine lösungsneutrale Beschreibung der Systemfunktionen dar und dient bspw. der Anforderungsanalyse.

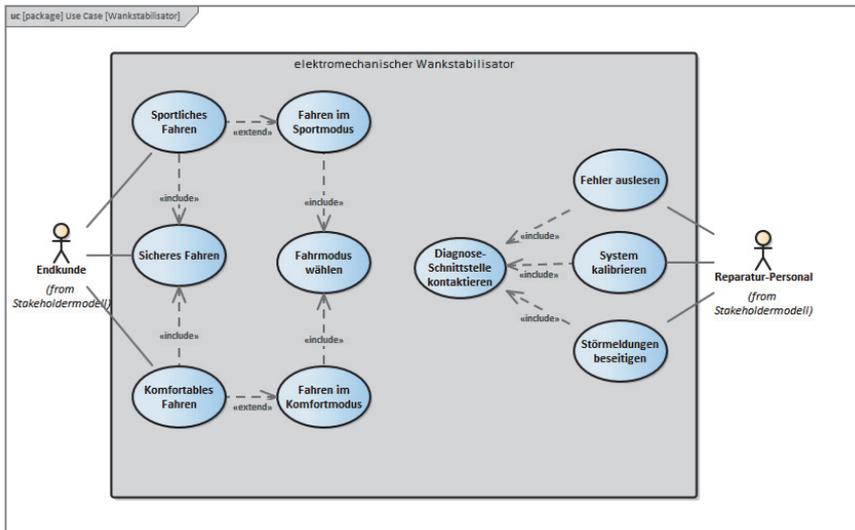


Abbildung 4: Anwendungsfalldiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Das Anwendungsfalldiagramm zeigt auch, dass zwischen den einzelnen Anwendungsfällen Wechselwirkungen existieren, die anhand unterschiedlicher Pfeilstereotypen visualisiert werden.

Phase 3: Ermittlung und Modellierung der Stakeholder- und Systemanforderungen

Eine zentrale Aufgabe des modellbasierten Systems Engineering ist die Ermittlung und Dokumentation aller relevanten Anforderungen an das System. Dazu werden zunächst alle Stakeholder-Bedürfnisse anhand unterschiedlicher Anwendungsfälle (Phase 2) identifiziert und diese anschließend in konkrete technische und nicht-technische Systemanforderungen überführt. Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt aus einem Anforderungsdiagramm am Beispiel des Wankstabilisators. Die Anforderungsmodellierung unterstützt dabei die Abhängigkeiten zwischen den Anforderungen zu identifizieren und im Design zu berücksichtigen.

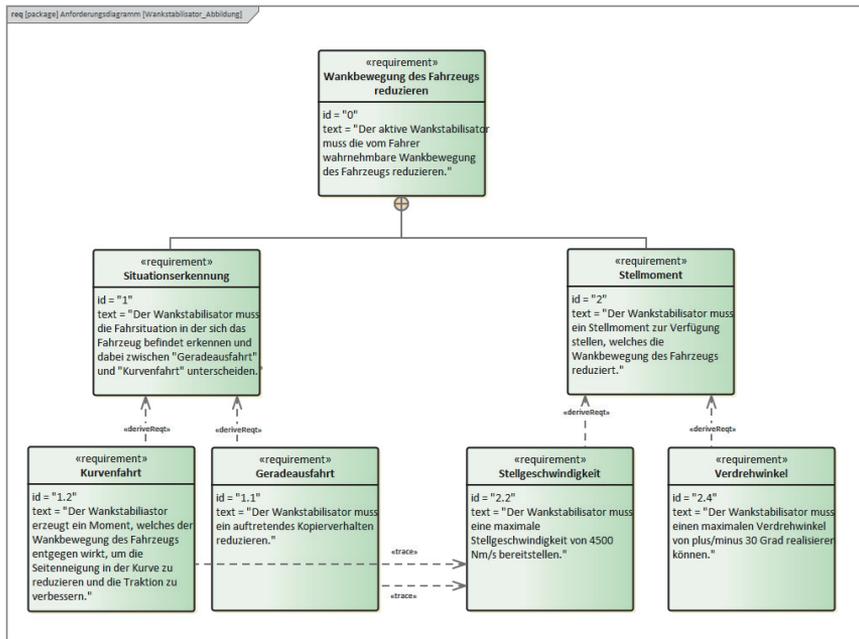


Abbildung 5: Anforderungsdiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Phase 4: Entwicklung und Modellierung des Systemverhaltens

Bevor die Festlegung des konkreten Systemsaufbaus erfolgt, sollte eine funktionale Systembeschreibung erarbeitet werden. MBSE verwendet dafür u. a. Aktivitätsdiagramme, siehe Abbildung 6, mit denen die einzelnen Aktionen bzw. Schritte, die das System durchläuft, in Form von Aktivitäten beschrieben werden. Dabei werden die einzelnen Aktivitäten üblicherweise in einem zeitlichen Ablauf dargestellt und möglichen Systemelementen zugewiesen (in Form von Schwimmbahnen). Außerdem werden die Objektflüsse (Energie, Information und Stoff), die zwischen den verschiedenen Aktivitäten fließen, modelliert.

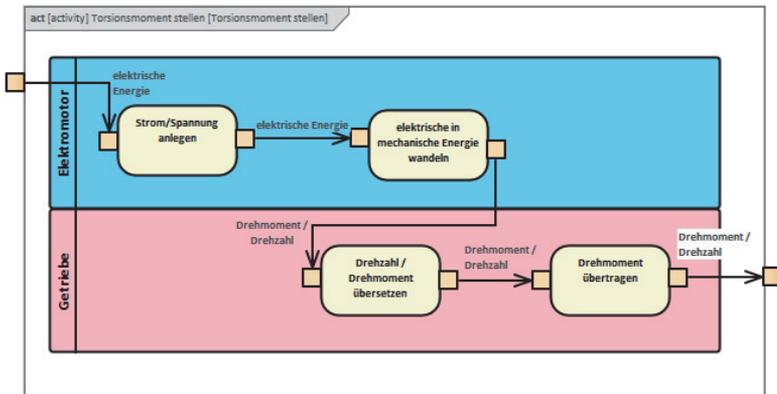


Abbildung 6: Aktivitätsdiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Das Aktivitätsdiagramm stellt in stark vereinfachter Form die einzelnen Aktionen und deren Objektflüsse zwischen einander und zur Umwelt dar, die zur Beschreibung der Aktivität *Torsionsmoment stellen* benötigt werden.

Phase 5: Entwicklung und Modellierung der Systemstruktur

Ausgehend von dem Systemverhalten erfolgt anschließend, im Rahmen des Architekturentwicklungsprozesses /19/, die Festlegung der Funktionsträger (Systemelemente) des Systems. Die Strukturmodellierung verknüpft die Systemelemente einerseits hierarchisch und andererseits bildet es die interne Systemstruktur ab, siehe Abbildung 7.

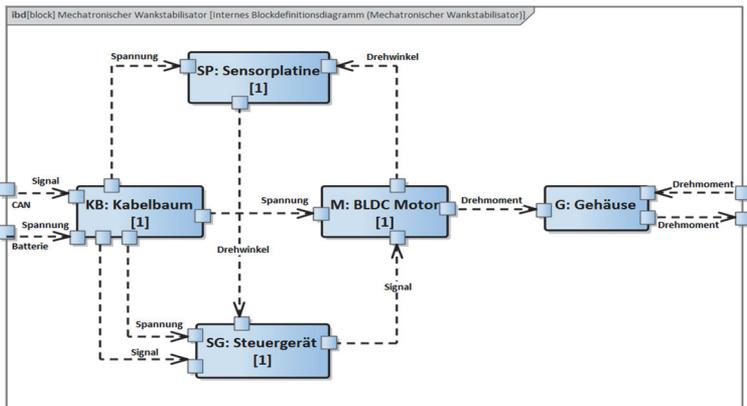


Abbildung 7: Systemstrukturdiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Hierbei wird das Ziel verfolgt, die Systembestandteile inklusive deren Wechselwirkungen untereinander und zur Umwelt darzustellen. Außerdem können die Systemelemente anhand von Parametern detailliert spezifiziert werden.

Phase 6: Vernetzung der Modellelemente

Zielstellung von MBSE ist es alle relevanten Zusammenhänge in einem übergeordneten Systemmodell abzubilden. Hierzu sind insbesondere die Beziehungen zwischen Anforderungen und dem Systemverhalten sowie der Systemstruktur relevant. Der Zweck dieser Modellierungsphase ist die Vernetzung der verschiedenen Modellelemente zu überprüfen und zu vervollständigen. Grundsätzlich sollten sich die verschiedenen Modellbeziehungen bereits im Verlauf der durchgeführten Modellierungsphasen entwickeln. Die Abbildung 8 stellt beispielhaft ein Traceabilitydiagramm dar, welches insbesondere die Verknüpfungen zwischen heterogenen Modellelementen (bspw. Anforderungen, Aktivitäten und Systemelemente) fokussiert. Hierdurch ist es beispielsweise möglich nachzuvollziehen, welche Systemanforderung durch welches Systemelement realisiert wurde.

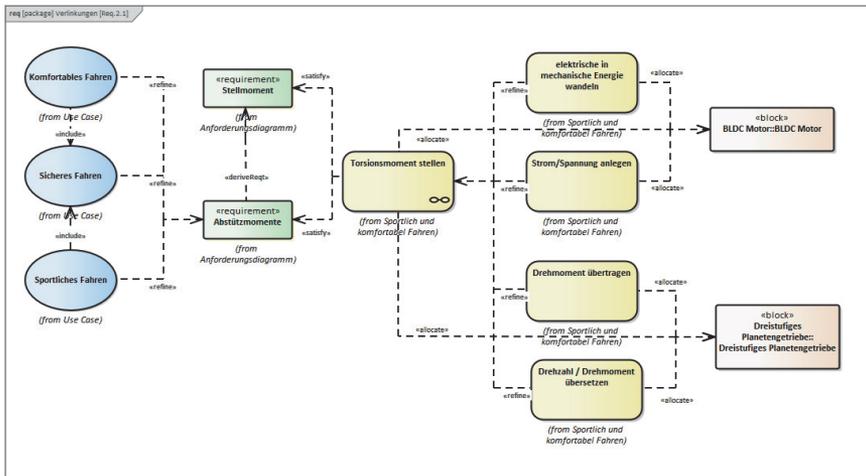


Abbildung 8: Traceabilitydiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Ein wesentlicher Vorteil der durchgängigen Vernetzung der Modellelemente ist die Durchführung von Analysen. Dazu werden die relevanten Informationen aus dem Systemmodell, üblicherweise in Matrizenform, ausgeleitet. Somit kann bspw. geprüft werden, ob die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Anforderungen im Design berücksichtigt wurden, oder welche Systemelemente zwingend für die Erfüllung der Systemfunktionen erforderlich sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag führt in das modellbasierte Systems Engineering, als ein Ansatz zur besseren Handhabung von Komplexität in der Produktentwicklung, ein. Dabei legt MBSE einen besonderen Wert auf die erfolgreiche Kollaboration unterschiedlicher Entwicklungsdisziplinen indem disziplinübergreifende Modelle als zentrales Verständigungs- und Informationsmedium eingesetzt werden. Da die Anwendung von MBSE in der industriellen Praxis als sehr heterogen eingeschätzt werden kann, wurde der Nutzen von MBSE, basierend auf etablierten Literaturquellen, dargestellt. Um einen Einblick in die Anwendung von MBSE zu gegeben, wurde anschließend eine Vorgehensweise zur durchgängigen Systemmodellierung, anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels, vorgeschlagen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollen sich insbesondere auf die Schnittstelle zwischen disziplinübergreifender und disziplinspezifischer Entwicklung konzentrieren, da diese Schnittstelle zum heutigen Zeitpunkt aufgrund Informationsverlust und Modellinkonsistenzen eine wesentliche Fehlerquelle in der Entwicklung komplexer Produkte darstellt. Weitere Aktivitäten im Rahmen der systemorientierten Entwicklung sind die Integration von SE-Prinzipien und Vorgehensweisen in Lehrveranstaltungen, die modellbasierte Beschreibung heterogener Teilsysteme inklusive der Betrachtung von Degradationsverhalten einzelner Teilsysteme (physikalische Leistungsfähigkeit) und die modellbasierte Analyse potentieller Systemstörgrößen für die Erarbeitung robuster Designkonzepte in frühen Entwicklungsphasen.

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/ Ulrich, H., Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: ein Brevier für Führungskräfte. 4. Aufl., Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 1995
- /2/ Eisner, H.: Essentials of Project and Systems Engineering Management, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2008
- /3/ Eigner, M. et al.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Springer-Verlag, S.5, Heidelberg, 2014
- /4/ Kattner, N. et al.: Inconsistency management in heterogeneous models – an approach for the identification of model dependencies and potential inconsistencies, ICED 19, Delft, 2019
- /5/ Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML, Carl Hanser, München, 2012

- /6/ Lohmeyer, Q., Albers, A.: Advanced systems engineering - Towards a model-based and human-centered methodology, Int. Sym. on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE, 2012
- /7/ Inkermann, D.: Shaping Method Ecosystems – Structured Implementation of Systems Engineering in Industrial Practice, ICED21, Gothenburg, 2021, <https://doi.org/10.1017/pds.2021.525>
- /8/ Friedenthal, S. et al.: A Practical Guide to SysML, MK/OMG Press, S. 17, 18, Amsterdam, 2015
- /9/ Morkevicius, A. et al.: MBSE Grid: A Simplified SysML-Based Approach for Modeling Complex Systems, 27th Annual INCOSE International Symposium, Adelaide, 2017
- /10/ International Council on Systems Engineering: INCOSE Systems Engineering Handbuch, Wiley & Sons, Inc., S. 9, 16, Hoboken, 2015
- /11/ Gausemeier, J. et al.: Systems Engineering in der industriellen Praxis, S. 48 – 50, Paderborn, 2013
- /12/ Bretz L. et al.: An analysis of barriers for the introduction of Systems Engineering, 29th CIRP Design, Póvoa de Varzim, 2019
- /13/ Huldts, T., Stenius, I.: State-of-practice survey of model-based systems engineering, Systems Engineering, 2018, <https://doi.org/10.1002/sys.21466>
- /14/ Martin, J.: Systems Engineering Guidebook: A Process for Developing Systems and Products, CRC-Press, S. 5 – 6, London, 1996
- /15/ Henderson, K., Salado, A.: Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature, Wiley, Systems Engineering, 2020, DOI: 10.1002/sys.21566
- /16/ Husung, S. et al.: Using model-based Systems Engineering for need-based and consistent support of the design process, ICED 21, Gothenburg, 2021, DOI:10.1017/pds.2021.598
- /17/ Bonnema, G., Broenink, J.: Thinking Tracks for Multidisciplinary System Design, MDPI, Basel, 2016, DOI: 10.3390/systems4040036
- /18/ Schumacher, T., Inkermann D.: Heterogene Modellierung - Verknüpfung und Integration von Systemmodellen der SysML mit CAD-Modellen, 32. DfX-Symposium, München, 2021, DOI: 10.35199/dfx2021.20
- /19/ Schumacher T., Inkermann D.: Herausforderungen und Anforderungen bei der durchgängigen Architekturmodellierung mechatronischer Systeme, 31. DfX-Symposium, Erlangen, 2020, DOI: 10.35199/dfx2020.6