

Fortschrittskontrolle der Modellierung mechatronischer Produkte

Controlling of the Modeling of Mechatronic Products

Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, Dominik Wiechel, Henrik Thiele
Universität Paderborn, Heinz-Nixdorf-Institut, 33102 Paderborn, Deutschland, {iris.graessler, henrik.thiele, dominik.wichel}@hni.upb.de

Kurzfassung

Die Anforderungen an die Entwicklung mechatronischer Systeme sind seit der Erstfassung der VDI Richtlinie 2206 im Jahr 2004 stetig gestiegen. Nach einer umfassenden Überarbeitung ist 2021 die Richtlinie im Weißdruck neu veröffentlicht worden. Neben dem Systemdenken als gestärktes Kernelement des V-Modells und sechs Kontrollpunkten zur Gliederung der sachlogischen Aufgaben ist die durchgängig explizite „Modellierung und Analyse“ eine wesentliche Neuerung der Richtlinie.

Da sich die Kontrollfragen nur auf den Entwicklungsprozess im Ganzen beziehen, wird durch die Betrachtung der Modellierung eines Batteriesystems aus einem Entwicklungsprojekt eines deutschen Automobilherstellers die folgende Forschungsfrage betrachtet: *Welche spezifischen Kontrollfragen zu Fortschritt und Reifegrad der Modellierung eines Batteriesystems können aus den Kontrollpunkten des V-Modells (VDI 2206:2020) gefolgert werden?* Als Ergebnis der Forschung liegen hinsichtlich der Modellierung eines spezifischen Systems detaillierte Kontrollfragen vor, die eine methodische Unterstützung für die modellbasierte Systementwicklung komplexer mechatronischer Systeme bieten. Zusätzlich ermöglichen sie der Projektleitung die Überprüfung des aktuellen Status der Entwicklung und sichern die Vollständigkeit des Systemmodells ab.

Abstract

The requirements for the development of mechatronic systems have steadily increased since the first version of VDI Guideline 2206 in 2004. After a comprehensive revision, the guideline has been republished in white print. In addition to systems thinking as a strengthened core element of the V-Modell and six control points for structuring the factual-logical tasks, the consistently explicit "modeling and analysis" is an essential innovation of the guideline. Since the control questions only refer to the development process as a whole, the following research question is considered by looking at the modeling of a battery system from a development project of a German automobile manufacturer: *Which specific control questions regarding the progress of the modeling of a battery management system can be derived from the control points of the V-model (VDI 2206:2020)?*

The results of the research are detailed control questions with regard to the modeling of a specific system, which provide methodological support for the Model-Based Systems Engineering of complex mechatronic systems. In addition, they enable the project management to check the current status of the development and ensure the completeness of the system model.

1 Einleitung

Seit der Erstfassung der VDI Richtlinie 2206 im Jahr 2004 sind die Anforderungen an die Entwicklung mechatronischer Systeme stetig gestiegen [1]. Die Veränderungen entstehen primär durch die gestiegene Komplexität von Produkten, die intensive Vernetzung technischer Systeme sowie die Digitalisierung von Produkten und Dienstleistungen. Um diesen Veränderungen gerecht zu werden, wurde die Richtlinie durch ein Expertengremium des VDI überarbeitet. Neben dem Systemdenken als gestärktes Kernelement des V-Modells und sechs Kontrollpunkten zur Gliederung der sachlogischen Aufgaben ist die durchgängig explizite „Modellierung und Analyse“ eine wesentliche Neuerung der Richtlinie [2]. Zur Beherrschung der komplexen Entwicklungsaufgaben ist es nötig, das System von der ersten Entwicklungsaufgabe bis zur Übergabe des Produkts zu modellieren, um konsistente Informationen durchgängig bereitzustellen und zu verarbeiten. Der Ansatz Model-Based Systems Engineering (MBSE) umfasst hierzu

Modellierungssprachen, -methoden und -werkzeuge, die die modellbasierte Entwicklung ermöglichen [3]. Die sechs Kontrollpunkte bieten dabei Reflektionsmöglichkeiten zur Kontrolle des Entwicklungsfortschritts zwischen den sachlogisch vernetzten Aufgaben und gliedern das V-Modell in zusammenhängende Abschnitte, ohne bisher explizit auf den äußeren Strang der Modellierung einzugehen. Durch die Formulierung auf sachlogischer Aufgabenebene, stehen Anwendern wenig konkrete Anhaltspunkte zur Überprüfung des Fortschritts und Reifegrad der Modellierung des Systems zur Verfügung. Da sich die Kontrollfragen nur auf den Entwicklungsprozess im Ganzen beziehen, wird durch die Betrachtung der Modellierung eines Batteriesystems aus einem Entwicklungsprojekt eines deutschen Automobilherstellers die folgende Forschungsfrage betrachtet: *Welche spezifischen Kontrollfragen zu Fortschritt und Reifegrad der Modellierung eines Batteriesystems können aus den Kontrollpunkten des V-Modells (VDI 2206:2020) gefolgert werden?*

2 Stand der Technik

Der Stand der Technik ist in drei Abschnitte gegliedert. Zunächst werden die Grundlagen des V-Modells erläutert um nachfolgend den Grundansatz des Systems Engineering darzustellen. Im dritten Unterkapitel werden mit dem Model-Based Systems Engineering die Ansätze zur Systemmodellierung im Systems Engineering dargestellt.

V-Modell: Das V-Modell wurde zuerst von BOEHM als Softwareentwicklungsmethode eingeführt [4] und später durch die VDI 2206:2004 [5] an die Entwicklung mechatronischer Systeme angepasst. Das Grundprinzip des V-Modells ist die Dekomposition eines Systems, die disziplinspezifische Implementierung von Sub-Systemen und die Integration mit Verifikation der Systemelemente auf der gleichen Systemebene, auf der sie spezifiziert wurden [6]. Basierend auf den Erfahrungen aus der industriellen Anwendung und dem technologischen Fortschritt sind seither eine Reihe von Weiterentwicklungen des V-Modells veröffentlicht worden [7]. So konzentriert sich das V-Modell von BENDER auf die System-, Subsystem- und Komponentenebene [8], während das V-Modell des INCOSE-Handbuchs auf die wesentlichen Schritte reduziert ist, um an jeden Kontext im Systems Engineering angepasst werden zu können [9]. Das US-Department of Transportation integriert erstmals vor- und nachgelagerte Produktlebenszyklusphasen in Form von Flügeln vor dem Hintergrund systemtechnischer Aspekte. Vorgelagerte Produktlebenszyklusphasen führen zum "V" und nachgelagerte Phasen schließen sich an das "V" an [10]. Ein weiteres Beispiel ist die Erweiterung um eine funktionale Produktbeschreibung und die Schnittstelle zum Product Lifecycle Management nach EIGNER [11].

Systems Engineering:

Systeme sind eine Menge von Elementen, die zueinander in Beziehung stehen. Die Komplexität moderner Systeme ergibt sich aus der zunehmenden Anzahl von Systemelementen, der Dynamik, Unsicherheit und Menge an Informationen und Wissen, die zur Beschreibung des Systems erforderlich sind. Systems Engineering ist ein strukturierter, multidisziplinärer Engineering-Ansatz für die Entwicklung komplexer technischer Systeme, der auf ein disziplinübergreifendes Optimum innerhalb eines vorgegebenen Zeit- und Budgetrahmens abzielt [12]. Dabei werden Entwickler bei der Implementierung und Anwendung von Systems Engineering unterstützt. Im INCOSE Handbook werden dazu 30 Prozesse definiert, die in die Kategorien Technik, Technisches Management, vertragliche Vereinbarung sowie Projekt-Organisation eingeteilt sind und den Rahmen einer ganzheitliche Entwicklung aufspannen [9].

Model-Based Systems Engineering: Im Model-Based Systems Engineering (MBSE) wird der Systems-Engineering-Ansatz formalisiert, um Informationen über Systemanforderungen, Design, Analyse, Verifikation und Validierung zu modellieren [13]. Das betrachtete System wird durch ein Systemmodell dargestellt, das Verhalten, Struktur, Eigenschaften, Einschränkungen und Anforderungen des Systems enthält [14], wobei das Systemmodell als zentrales Repository für Entwurfsentscheidungen dient [13]. Das Systemmodell stellt eine zuverlässige Informationsquelle dar und gewährleistet Konsistenz und

Nachvollziehbarkeit zwischen Anforderungen, Entwurf, Analyse und Verifikation [15]. Die Anwendung von MBSE umfasst eine Sammlung von verwandten Prozessen, Methoden und Werkzeugen, die zur Unterstützung der Disziplin des Systems Engineering in einem "modellbasierten" Kontext eingesetzt werden [14].

DELLIGATTI definiert drei Säulen von MBSE: (a) eine Modellierungsmethode, (b) ein Modellierungswerkzeug und (c) eine Modellierungssprache [3]. Modellierungsmethoden unterstützen den Modeling Engineer bei der Erstellung eines Systemmodells. Praktisch relevante Beispiele sind unter anderem OOSEM oder Harmony SE [16]. Zusätzlich existieren verschiedene IT-Tools (z. B. Cameo Systems Modeler, Eclipse Modelling Framework), die von verschiedenen Industrieunternehmen vertrieben werden [17]. Die in der Praxis etablierteste Modellierungssprache für die Systementwicklung ist die Systems Modeling Language (SysML), die auf dem Metamodell und den Metaklassen der Unified Modeling Language (UML) basiert.

Der SysML-Standard umfasst verschiedene Diagrammtypen, die in Strukturdiagramme, Verhaltensdiagramme und ein zusätzliches Anforderungsdiagramm (REQ) unterteilt sind. Strukturelle Diagramme umfassen Blockdefinitions- (BDD), interne Block- (IBD), Parameter- (PAR) und Paketdiagramme (PKG). Zu den Verhaltensdiagrammen gehören Anwendungsfall- (UC), Aktivitäts- (ACT), Sequenz- (SD) und Zustandsmaschinendiagramme (STM). Zusätzlich kann das Metamodell der SysML durch Profile erweitert werden, die es erlauben, Metaklassen aus bestehenden Metamodellen zu erweitern, um sie für einen neuen Zweck anzupassen. Im UML-Profilendiagramm können Stereotypen zur Erweiterung der UML-Metaklassen erstellt werden, um eine neue Notation zu schaffen und spezifische Eigenschaften und Einschränkungen zu unterscheiden. Zusätzlich können Stereotypen definiert werden, die Eigenschaften und Metadaten über das Modellelement erfassen [15].

3 Wissenschaftliches Vorgehen

Die Forschungsfrage aus Abschnitt 1 wird mithilfe eines vierschritten Vorgehens beantwortet: Beginnend mit einer systematischen Literaturrecherche werden praxisrelevante SE-Prozesse und MBSE-Modellierungsansätze identifiziert (Schritt 1). Hierzu werden die Wissenplattformen Google Scholar, Science Direct und Design Society verwendet. Insgesamt konnten 16 praxisrelevante Ansätze identifiziert werden. Im nächsten Schritt (Schritt 2) werden Kriterien zur bedarfsgerechten Entwicklung von Systemmodellen ermittelt. Anschließend werden die existierenden Kontrollfragen der VDI 2206:2021 hinsichtlich ihrer Implikationen und Übertragbarkeit auf den Modellierungsfortschritt spezifiziert. Im letzten Schritt (Schritt 4), der Validierung, werden die abgeleiteten Kontrollfragen für die Entwicklung eines industriellen Fallbeispiels – einem Batteriesystem - genutzt, um die Vollständigkeit und Anwendbarkeit der Kontrollfragen zu validieren.

4 Erweiterung der Kontrollfragen

Die Erweiterung der Kontrollfragen basiert auf einer systematischen Literaturrecherche nach Machi und McEvoy

[18]. Hierzu werden Systems Engineering Prozesse und MBSE Modellierungsmethoden in den Literaturdatenbanken von Google Scholar, Library der Design Society und Science Direct identifiziert. Die Literaturdatenbanken werden mithilfe von Such-Strings und Schlüsselwörtern (beispielsweise „Model-Based Systems Engineering“ AND „Processes“) durchsucht. Insgesamt wurde 26 Ansätze identifiziert und durch Anwendung von KO-Kriterien auf 16 Ansätze reduziert. Ein Beispiel für KO-Kriterien ist die interdisziplinäre Anwendbarkeit des Ansatzes für mechatronische Systeme.

Die enthaltenen Elemente der Ansätze werden gegenübergestellt und analysiert. Durch die Gegenüberstellungen werden inhaltliche Überschneidungen der einzelnen Schritte innerhalb der SE-Prozesse und MBSE-Methoden identifiziert, aus denen Kriterien zur bedarfsgerechten Entwicklung von Systemmodellen in der Breite und Tiefe abgeleitet werden können.

Tabelle 1 illustriert die identifizierten Ansätze. Mithilfe einer dreistufigen Aufteilung („erfüllt“, „teilweise erfüllt“, „nicht erfüllt“) wird verdeutlicht, welche Ansätze die Kontrollpunkte des V-Modells inhaltlich adressieren. Das Ergebnis der Gegenüberstellung verdeutlicht, dass die Kontrollpunkte „K2: Spezifikation“ und „K3: Architektur“ von allen MBSE-Methoden adressiert werden. Im Vergleich dazu werden die Kontrollpunkte in den Systems Engineering Prozessen nach INCOSE inhaltlich beschrieben, ohne das Vorgehen bei der modellbasierten Systementwicklung zu spezifizieren.

Tabelle 1 Literaturrecherche

Abkürzung	Implikationen für Kontrollpunkte					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Harmony SE [19]	○	●	●	●	●	○
OOSEM [16]	◐	●	●	●	●	○
SYSMOD [20]	◐	●	●	●	●	○
Arcadia [21]	○	●	●	◐	◐	○
JPL State Analysis [22]	○	●	●	◐	◐	◐
Object-Process Methodology (OPM) [23]	○	●	●	●	●	○
CONSENS [24]	○	●	●	●	●	○
RUP SE [25]	◐	●	●	●	●	○
Zoph [26]	◐	◐	◐	◐	◐	◐
ISE & PROOA [27]	○	●	●	◐	◐	○
Pattern-based Systems Engineering (PBSE) [28]	○	●	●	◐	◐	○
ISO IEC 15288 [29]	●	●	◐	◐	◐	●
INCOSE Handbook [9]	●	●	◐	◐	◐	●
Munich agile MBSE Concept (MAGIC) [30]	◐	●	●	◐	◐	◐

● = Erfüllt, ◐ = Teilweise erfüllt, ○ = Nicht erfüllt

Auf Basis der Gegenüberstellung wurden Kontrollfragen aus den Ansätzen abgeleitet, die einen Kontrollpunkt vollständig oder teilweise adressieren. Textuelle Beschreibungen wurden zu Kontrollfragen transformiert und in den folgenden Tabellen festgehalten.

Tabelle 2 Zusätzliche Kontrollfragen für Kontrollpunkt 1

Kontrollpunkt 1: Geschäftsmodell
<input type="checkbox"/> Wurde ein Vorgehen zur Etablierung von Traceability im Systemmodell festgelegt?
<input type="checkbox"/> Wurden alle relevanten existierenden Informationen (Anwendungsszenarien, Konfigurations-Management, Baselines, Änderungshistorie...) bereitgestellt?
<input type="checkbox"/> Sind alle Umweltfaktoren, Akteure und Systeme im Systemkontext spezifiziert worden?

Tabelle 3 Zusätzliche Kontrollfragen für Kontrollpunkt 2

Kontrollpunkt 2: Spezifikation
<input type="checkbox"/> Wurden die Stakeholder-Anforderungen als Use Cases abgebildet?
<input type="checkbox"/> Wurden die Systemanforderungen kategorisiert und modelliert?
<input type="checkbox"/> Wurden alle Abhängigkeiten zwischen Anforderungen und weiteren Modellelementen modelliert?
<input type="checkbox"/> Sind alle Prüfungen zur Verifikation der Anforderung modelliert und terminiert worden?

Tabelle 4 Zusätzliche Kontrollfragen für Kontrollpunkt 3

Kontrollpunkte 4: Architektur
<input type="checkbox"/> Wurde die Architektur des Systemmodells modellbasiert abgebildet?
<input type="checkbox"/> Wurde das Verhalten des Systems modelliert?
<input type="checkbox"/> Wurde die logische und physische Architektur des Systems vollständig abgebildet?
<input type="checkbox"/> Sind alle Abhängigkeiten zwischen den Modellelementen auf architektonischer Ebene modelliert worden?

Tabelle 5 Zusätzliche Kontrollfragen für Kontrollpunkt 4

Kontrollpunkt 4: Implementierung
<input type="checkbox"/> Wurden die Prüfungen zur Verifikation der Anforderungen durchgeführt und modellbasiert abgebildet?
<input type="checkbox"/> Wurden alle Schnittstellen des Systems bei der Implementierung berücksichtigt?
<input type="checkbox"/> Sind alle Regularien, Normen und Vorschriften bei der Implementierung berücksichtigt worden?
<input type="checkbox"/> Wurden alle technischen Änderungen an den Systemelementen analysiert und implementiert?

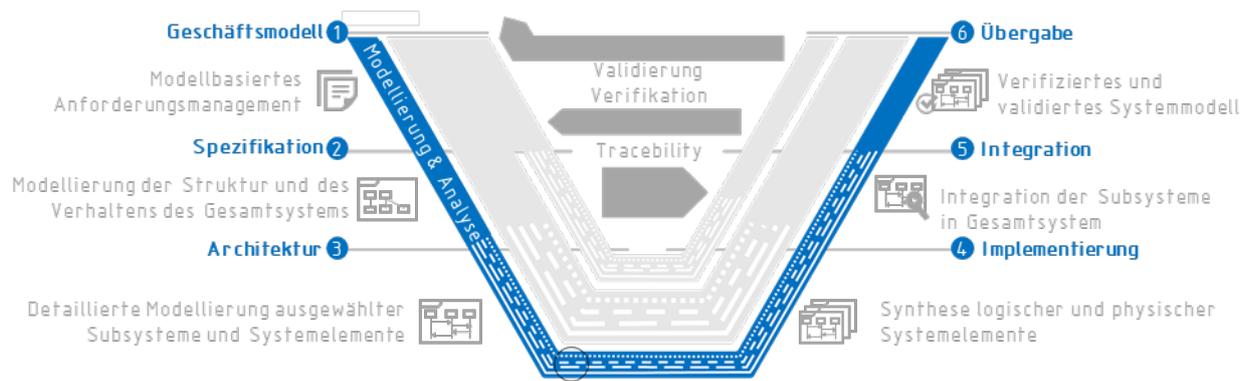


Bild 1: Kontrollpunkte der VDI 2206:2019 mit Fokus auf Modellierung und Analyse,

Tabelle 6 Zusätzliche Kontrollfragen für Kontrollpunkt 5

Kontrollpunkte 5: Integration
<input type="checkbox"/> Wurden alle Qualitätsanforderungen bei der Erstellung des Informationssystems berücksichtigt (Vollständigkeit, Konsistenz, Klarheit, Korrektheit)? <input type="checkbox"/> Können die Use Cases durch das entwickelte System zufriedenstellend realisiert werden? <input type="checkbox"/> Erfüllen die Performance Kennzahlen die nicht-funktionalen Anforderungen?

Tabelle 7 Zusätzliche Kontrollfragen für Kontrollpunkt 6

Kontrollpunkte 6: Übergabe
<input type="checkbox"/> Wurden die Inhalte des Systemmodells (Wirk-Zusammenhänge, Verifikationsplanung, ...) aufbereitet und gespeichert? <input type="checkbox"/> Sind weitere Daten zur Dokumentation der modellbasierten Systementwicklung übergeben worden?

5 Anwendung und Reflexion

Die Validierung wird anhand eines industriellen Fallbeispiels durchgeführt. Als Fallbeispiel wird aufgrund der Aktualität und Interdisziplinarität ein Batteriesystem eines elektrifizierten Kraftfahrzeugs gewählt. Dieses mechatronische System hat Schnittstellen zu weiteren Subsystemen, beispielsweise Systemen mit mechanischem Kern wie der Rekuperationsbremse oder Software-Systemen wie dem Head-Up Display. Kontrollparameter, die durch das Batteriemanagementsystem gemessen und verarbeitet werden, sind die Zellspannung, die Temperatur und der Batteriestrom. Durch die Überwachung der Parameter ist es möglich, den Ladezustand (SOC – State of Charge) und die Alterung der Batteriezellen (SOH – State of Health) zu berechnen. [31] Anhand der berechneten Informationen ist es möglich vorherzusagen, ob der Fahrer mit der zur Verfügung stehenden Energie sein geplantes Ziel erreicht.

Zur Entwicklung des Systems „Batteriemanagementsystem“ wird das Modellierungstool „Cameo Systems Modeler“, die Modellierungssprache „SysML“ und die Modellierungsmethode „SysMOD“ gewählt.

Kontrollpunkt 1: Zu Beginn der Modellierung werden existierende Informationen zusammengetragen, um die zu modellierenden Inhalte festzulegen. Für das Batteriesystem werden Dokumente aus den frühen Phasen der Entwicklung zusammengetragen: Ein Business Model Canvas, eine Marktanalyse mit identifizierten Stakeholder-Anforderungen und eine Analyse der umgebenden Systeme und Umweltfaktoren. Zusätzlich werden die Entwicklungartefakte festgelegt, die durch Abhängigkeiten miteinander verknüpft werden (*Traceability*). Das Vorgehen orientiert sich an der RFLP-Logik (Requirements, Functions, Logical Elements, Physical Elements) [32]. In einem Systemkontext-Diagramm (Anpassung eines Blockdefinitionsdiagramms) werden die Akteure (`<<actors>>`), Umweltfaktoren (`<<effect>>`) und umgebenden Systeme (`<<external systems>>`) modelliert, anhand derer das verfolgte Geschäftsmodell abgebildet wird. Abhängige umgebende Systeme des Batteriesystems sind das Batteriemanagementsystem, die Rekuperationsbremse und die Head-Unit des Fahrzeugbildschirms. Mithilfe einer Allokation (`<<allocation>>`) werden die Elemente miteinander verknüpft und alle Kontrollfragen berücksichtigt.

Kontrollpunkt 2: Die identifizierten Stakeholder-Anforderungen werden als Anwendungsfälle im Use-Case Diagramm abgebildet und mit der Zielsetzung des Geschäftsmodells abgeglichen. Ein exemplarischer Use Case ist das Laden des Batteriesystems über die Wallbox im Haus des Kunden. Anhand der Use-Cases werden funktionale und nicht-funktionale Anforderungen abgeleitet, die in Anforderungs-Diagramme übertragen werden. Für jedes Hauptmerkmal wird ein Anforderungsdiagramm erstellt, um die Informationen zu kategorisieren. Exemplarische Hauptmerkmale für die Kategorisierung der Anforderungen sind Geometrie, Energie, Signal und Security. Durch das Verbinden der Anforderungen mit anderen Modellelementen Durchgängigkeit im Systemmodell sichergestellt und die Kontrollfragen beantwortet.

Kontrollpunkt 3: Auf Basis der abgeleiteten funktionalen Anforderungen wird eine Funktionshierarchie erstellt. Die Funktionshierarchie wird mithilfe von SysML-Stereotypen erstellt, indem die Metaklasse (`<<block>>`) im Meta-Modell der Modellierungssprache angepasst wird. Anschließend wird eine Produktstruktur in einem Blockdefinitionsdiagramm modelliert, welche die logischen Elemente des

Systems darstellt. Die Entwicklung bewertet die Lösungsalternativen und wählt physische Elemente aus, die in einer hierarchischen Produktstruktur abgebildet werden. Hierarchisch untergeordnete Komponenten sind unter anderem das Gehäuseoberteil, die Zellblöcke, die Zellüberwachungseinheit, die Hochspannungs-Elektronik, die Hochspannungs-Anschlüsse, die Kühlmittleitung, das Gehäuseunterteil und die Unterbodenverkleidung. Die Struktur zur Beschreibung der Energie-, Stoff- und Informationsflüsse wird in einem internen Blockdiagramm (ibd) dargestellt. Das Verhalten des Systems wird auf Basis von Expertenwissen detailliert, indem Aktivitätsdiagramme die internen Abläufe modellbasiert abbilden. Durch die einzelnen Schritte der Modellierung werden die Kontrollfragen beantwortet.

Kontrollpunkt 4: Die ausgewählten logischen Elemente werden in der disziplinspezifischen Implementierung detailliert. Innerhalb der Disziplinen werden weitere Partialmodelle in etablierten Autorensystemen erstellt. Hierzu zählt die geometrische Konstruktion in CAD und die Abbildung des elektrischen Regelkreises in einem CAE Werkzeug. Parameter, die für die Verifikation von Anforderungen relevant sind, werden dem <<block>> als Eigenschaften zugeordnet. Innerhalb des Parameterdiagramms werden mathematische Formeln hinterlegt, um beispielsweise den Ladezustand (State of Charge) zu berechnen. Die Prüfplanung zur Verifikation der Anforderungen wird mithilfe von <<test cases>> modellbasiert abgebildet. Für die Anforderungen, die auf Ebene der Systemkomponenten verifiziert werden, wird die Verifikation im Systemmodell sichergestellt. Hierzu wird jeder Anforderung mindestens ein <<test case>> zugeordnet, welcher die tatsächlich durchgeführten Eigenschaftsprüfungen repräsentiert.

Kontrollpunkt 5:

Anschließend werden die Systemkomponenten zu Sub-Systemen integriert, beispielsweise werden die instanziierten Batteriezellen zu dem Batteriemodul zusammengefasst und integriert. Bei der Integration gilt es die Konsistenz der modellbasiert abgebildeten Schnittstellen zu prüfen. Auf der Ebene der Sub-Systeme werden weitere Anforderungen verifiziert. Das Vorgehen der Verifikation entspricht dem beschriebenen Vorgehen in Kontrollpunkt 4.

Kontrollpunkt 6: Nach der Integration wird die Übergabe des entwickelten Systems vorbereitet. Bei der Übergabe werden neben dem physischen System ebenfalls zusätzliche Entwicklungs-Dokumente übergeben. Hierzu werden PDFs des Systemmodells extrahiert, welche die modellbasierte Abbildung dokumentieren. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, nachträgliche Änderungsbedarfe für zukünftige Produktgenerationen anhand der modellbasierten Informationen zu analysieren und die Auswirkungen dieser technischen Änderungen zu bewerten.

Reflexion: Die Anwendung der Kontrollfragen hat gezeigt, dass die relevanten Schritte der modellbasierten Entwicklung behandelt werden. So gehen in die Fragen jedes Kontrollpunkts Elemente aus jeweils mindestens zwei Methoden ein (vgl. Tabelle 1). In Verbindung mit den existierenden Kontrollfragen und der Erweiterung auf Produktionssystementwicklung [33] werden alle Aspekte zur

Überprüfung des Entwicklungsfortschritts berücksichtigt. Dies ermöglicht die Überprüfung der Vollständigkeit sowie des Reifegrads der Modellierung. Abhängig von der Komplexität des zu entwickelnden Systems müssen die Fragen zusätzlich detailliert oder reduziert werden. Dies ist möglich, da die Kontrollpunkte methodenunabhängig sind und so durch spezifische detaillierende Fragen an die Bedarfe und Prozesse eines Unternehmens angepasst werden können. Diese Erweiterung erfolgt im Zuge des Tailoring des Systems Engineerings.

6 Zusammenfassung

Das vorliegende Papier beschreibt einen Kontrollmechanismus für den Fortschritt und Reifegrad der modellbasierten Entwicklung mechatronischer Systeme. Basierend auf einer systematischen Literaturrecherche werden relevante Prozesse des Systems Engineering und Methoden des Model-Based Systems Engineering identifiziert und analysiert. Anschließend werden Implikationen für die Entwicklung mechatronischer Systeme anhand des V-Modells der VDI 2206:2021 abgeleitet. Die Kontrollfragen des V-Modells werden auf Basis der identifizierten Implikationen um Aspekte der modellbasierten Systementwicklung ergänzt. Die Anwendbarkeit der erweiterten Kontrollfragen wird anhand des industriellen Fallbeispiels eines Batteriesystems demonstriert.

Die Ergebnisse des Papiers unterstützen Entwickler bei der modellbasierten Systementwicklung mit Hilfe des V-Modells der VDI2206:2021, indem der Status der modellbasierten Entwicklung anhand der Kontrollfragen an den einzelnen Kontrollpunkten reflektiert werden kann.

Die aus der modellbasierten Entwicklung resultierenden Systemmodelle können genutzt werden, um Auswirkungsanalysen für die Bewertung technischer Änderungen zu ermöglichen [34]. Mithilfe eines MBSE-Rollenmodells [35] wird die bedarfsgerechte Anwendung und prozessuale Einbettung in den Produktentstehungsprozess unterstützt.

7 Literatur

- [1] Gräßler, I.; Hentze, J.; Yang, X.: "Eleven Potentials for Mechatronic V-Model". In: Villmer, F.-J.; Padoanao, E. (Hrsg.) Production Engineering and Management, 2016, S. 257–268.
- [2] Graessler, I.; Hentze, J.: "The new V-Model of VDI 2206 and its validation". In: at - Automatisierungstechnik 68 (2020) 5, S. 312–324.
- [3] Delligatti, L.: "SysML distilled. A brief guide to the systems modeling language". Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2014.
- [4] Boehm, B. W.: "Guidelines for Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications". In: Samet, P. A. (Hrsg.) Euro IFIP 79, 1979, S. 711–719.
- [5] VDI: "VDI 2206 - Design methodology for mechatronic systems (2004) 2206". Beuth Verlag GmbH,
- [6] Gräßler, I.: "Competitive Engineering in the Age of Industry 4.0 and Beyond". In: Proceedings of TMCE. Las Palmas de Gran Canaria, 2018.

- [7] Gräßler, I.; Hentze, J.; Bruckmann, T.: "V-Models for Interdisciplinary Systems Engineering". In: Design Society (Hrsg.) Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference, 2018, S. 747–756. DOI: 10.21278/idc.2018.0333.
- [8] Bender, K.: "Embedded Systems. Qualitätsorientierte Entwicklung". Springer, Berlin, 2005.
- [9] Walden, D. D.; Roedler, G. J.; Forsberg, K.; Hamelin, R. D.; Shortell, T. M.: "Systems engineering handbook. A guide for system life cycle processes and activities". Wiley, New Jersey, 2015.
- [10] U.S. Department of Transportation: "Systems Engineering Guidebook for Intelligent Transportation Systems. Version 3.0 (2009)". U.S. Department of Transportation,
- [11] Eigner, M.; Dickopf, T.; Apostolov, H.: "The Evolution of the V-Model: From VDI 2206 to a System Engineering Based Approach for Developing Cybernetic Systems". In: Ríos, J.; Bernard, A.; Bouras, A.; Foufou, S. (Hrsg.) Product lifecycle management and the industry of the future. Cham, 2017, S. 382–393. DOI: 10.1007/978-3-319-72905-3_34.
- [12] Gräßler, I.: "Umsetzungsorientierte Synthese mechatronischer Referenzmodelle". In: Konferenzband der VDI Mechatronik, 2015, S. 167–172. DOI: 10.31224/osf.io/xspbm.
- [13] International Council on Systems Engineering (INCOSE): "INCOSE Systems Engineering Vision 2020, 2007.
- [14] Estefan, J. A.: "Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies, 2008.
- [15].omg: "OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™) (2012)". URL: <http://www.omg.org/spec/SysML/1.3/>.
- [16] Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R.: "A practical guide to SysML. The systems modeling language". Elsevier; Morgan Kaufmann, Amsterdam, Waltham, Mass., 2015.
- [17] Rashid, M.; Anwar, M. W.; Khan, A. M.: "Toward the tools selection in model based system engineering for embedded systems—A systematic literature review". In: Journal of Systems and Software 106 (2015), S. 150–163.
- [18] Machi, L. A.; McEvoy, B. T.: "The literature review. Six steps to success". Corwin, Thousand Oaks, Calif., 2012.
- [19] Hoffmann, H.-P.: "Systems Engineering Best Practices with the Rational Solution for Systems and Software Engineering. Deskbook Release 4.1, 2013.
- [20] Weikiens, T.: "Systems Engineering mit SysML/UML. Modellierung, Analyse, Design". dpunkt, Heidelberg, 2014.
- [21] Roques, P.: "MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool". HAL archives, 2016.
- [22] Kordon, M.; Wall, S.; Stone, H.; Blume, W.; Skipper, J.; Ingham, M.; Neelon, J.; Chase, J.; Baalke, R.; Hanks, D.; Salcedo, J.; Solish, B.; Postma, M.; Machuzak, R.: "Model-Based Engineering Design Pilots at JPL". In: Kordon, M.; Wall, S.; Stone, H.; Blume, W.; Skipper, J.; Ingham, M.; Neelon, J.; Chase, J.; Baalke, R.; Hanks, D.; Salcedo, J.; Solish, B.; Postma, M. (Hrsg.) 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007, S. 1–20. DOI: 10.1109/AERO.2007.353021.
- [23] Dori, D.; Reinhartz-Berger, I.: "An OPM-Based Metamodel of System Development Process". In: Goos, G.; Hartmanis, J.; van Leeuwen, J.; Song, I.-Y.; Liddle, S. W.; Ling, T.-W.; Scheuermann, P. (Hrsg.) Conceptual Modeling - ER 2003. Berlin, Heidelberg, 2003, S. 105–117. DOI: 10.1007/978-3-540-39648-2_11.
- [24] Gausemeier, J.; Gaukster, T.; Tschirner, C.: "Systems Engineering Management Based on a Discipline-Spanning System Model". In: Procedia Computer Science 16 (2013), S. 303–312.
- [25] Kruchten, P.: "The rational unified process. An introduction". Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2007.
- [26] Negele, H.; Fricke, E.; Igenbergs, E.: "ZOPH - A Systemic Approach to the Modeling of Product Development Systems". In: INCOSE International Symposium 7 (1997) 1, S. 266–273.
- [27] Fernandez, J. L.; Hernandez, C.: "Practical model-based systems engineering". Artech House, Boston, London, 2019.
- [28] Schindel, B.; Peterson, T.: "Pattern Based Systems Engineering—Leveraging Model Based Systems Engineering for Cyber-Physical Systems". In: 14th ia ground vehicle systems engineering and technology symposium. Ichigan.
- [29] ISO/IEC/IEEE: "System- und Software-Engineering - System-Lebenszyklus-Prozesse (2015) ISO/IEC/IEEE 15288:2015-05,
- [30] Salehi, V.; Wang, S.: "Munich Agile MBSE Concept (MAGIC)". In: 2220-4342 1 (2019) 1, S. 3701–3710.
- [31] Korthauer, R. (Hrsg.): "Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [32] Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R.: "Interdisziplinäre Produktentwicklung. Modellbasiertes Systems Engineering". URL: <https://www.plmportal.org/de/forschung-detail/interdisziplinaere-produktentwicklung-modellbasiertes-systems-engineering.html>. Abrufdatum 12.03.2018.
- [33] Gräßler, I.; Wiechel, D.; Roesmann, D.; Thiele, H.: "V-model based development of cyber-physical systems and cyber-physical production systems". In: Procedia CIRP 100 (2021), S. 253–258.
- [34] Gräßler, I.; Wiechel, D.: "Systematische Bewertung von Auswirkungenanalysen des Engineering Change Managements". In: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X (DFX2021), 2021. DOI: 10.35199/dfx2021.12.
- [35] Gräßler, I.; Wiechel, D.; Pottebaum, J.: "Role model of model-based systems engineering application". In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1097 (2021) 1, S. 12003.