

Ganzheitliches Metadatenmodell für die Verifikation und Validierung in der Entwicklung komplexer technischer Systeme

Holistic metadata model for verification and validation in engineering complex technical systems

Iris Gräßler, Marcel Ebel*

¹ Heinz Nixdorf Institute, Paderborn University, Chair for Product Creation

* Korrespondierender Autor:

Marcel Ebel
Heinz Nixdorf Institute, Paderborn University
Fuerstenallee 11
33102 Paderborn, Germany
☎ +49 5251 60 6263
✉ marcel.ebel@hni.upb.de

Abstract

The increasing complexity of technical systems requires early, structured verification and validation (V&V). Existing metadata models only map parts of the engineering process and do not enable a continuous chain of effects from requirements to test results. The aim of this publication is to develop a holistic V&V metadata model for the consistent, transparent and machine-processable description and linking of relevant engineering artifacts. In a five-stage research approach, essential model components are derived from literature and are integrated into a holistic model. Initial applications as part of a European research project show the potential of the model for a well-founded effect chain analysis and decision-supporting V&V processes.

Keywords

verification, metadata model, Systems Engineering

1. Einleitung

Die steigende Anzahl an Systemelementen ist eine Ursache für eine zunehmende Systemkomplexität in der Entwicklung technischer Systeme [1]. Um komplexitätsbedingte Fehlentwicklungen zu vermeiden, ist eine frühzeitige und systematische Eigenschaftsabsicherung erforderlich. Im Systems Engineering erfolgt diese Absicherung durch Verifikation und Validierung (V&V) der Erfüllung von Anforderungen, die zu Beginn des Entwicklungsprozesses erhoben werden. Bereits in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses müssen V&V-Ingenieure und weitere Beteiligte eine strukturierte V&V-Planung berücksichtigen, um Risiken zu minimieren und abgesicherte Entwicklungsentscheidungen zu treffen. Die frühe Verfügbarkeit von Funktionsnachweisen unterstützt darüber hinaus den Wissensaufbau im Projektteam [2]. Für eine effiziente und nachvollziehbare Entwicklung ist eine durchgängige Wirkkette zwischen Entwicklungsartefakten – wie Anforderungen, Systemelementen und Testergebnissen – essenziell [3]. Metadatenmodelle können hierbei helfen, die in Entwicklungsartefakten enthaltenen Informationen semantisch zu beschreiben, zu verknüpfen und maschinenverarbeitbar zu strukturieren. Zwar existieren bereits zahlreiche disziplinspezifische Metadatenmodelle wie z.B. das Produktdatenmodell [4], jedoch fehlt ein ganzheitliches, integratives Modell, welches eine vollständige Wirkkette in V&V-Prozessen unterstützt.

1.1. Forschungsproblem und Forschungsziel

Etablierte Modelle wie das Core Product Model [4], Metadatenmodelle im Requirements Engineering (vgl. [5]) oder im Bereich V&V (vgl. [6]) existieren, bilden diese nur Teilbereiche der Entwicklung ab. Eine umfassende und disziplinübergreifende Verknüpfung zwischen Anforderungen, Systemarchitektur und Testergebnissen ist bislang nicht sichergestellt. Auch in der Systems Modelling Language (SysML) v2 wird die Modellierung von Testergebnissen nicht hinreichend betrachtet [7]. Daraus ergibt sich die zentrale Forschungsfrage:

Was sind essenzielle Bestandteile eines Metadatenmodells, um vollständige Wirkketten von Anforderungen bis hin zu Ergebnissen von durchgeführten Testfällen zu gewährleisten?

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Metadatenmodells, das V&V-relevante Informationen entlang des Entwicklungsprozesses komplexer technischer Systeme konsistent strukturiert. Durch die Anwendung des Modells werden V&V-relevante Informationen transparent, strukturiert, maschinenverarbeitbar dokumentiert und verknüpft. Das Modell soll somit durchgängige Informationsketten ermöglichen, um die Grundlage für eine systematische Eigenschaftsabsicherung darzustellen. Mit Hilfe einer durchgängigen Informationskette durch den V&V-Prozess, wird der Ingenieur befähigt dedizierte Wirkkettenanalysen durchgeführter Testfälle umzusetzen und Ergebnisse auf die zugrundeliegenden Anforderungen zu untersuchen.

1.2. Wissenschaftliches Vorgehen

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein fünfstufiges wissenschaftliches Vorgehen verfolgt. Im ersten Schritt wird zunächst eine systematische Literaturanalyse in den gängigen Datenbanken Scopus und Web of Science durchgeführt, um existierende disziplinspezifische Metadatenmodelle zu identifizieren (1). Darauf aufbauend erfolgt eine detaillierte Untersuchung relevanter Arbeiten, um die gefundenen Metadatenmodelle zu analysieren (2). Aus diesen Erkenntnissen werden die essenziellen Bestandteile für ein ganzheitliches Metadatenmodell für Verifikation und Validierung abgeleitet (3). Die als essenziell identifizierten Elemente werden anschließend in einem ganzheitlichen V&V-Metadatenmodell gemäß des Vorgehens zur Entwicklung von Ontologien nach JONES et al. (vgl. [8]) zusammengeführt (4). Abschließend wird das Modell in einem von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsprojekt validiert (5).

2. Grundlagen

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit dem Stand der Technik, der für die Entwicklung eines ganzheitlichen V&V-Metadatenmodells erforderlich ist. Zu Beginn werden thematische Grundlagen aus dem Bereich V&V und Metadatenmodelle aufgeführt, bevor die systematische Literaturanalyse beschrieben wird.

2.1. Verifikation und Validierung im Systems Engineering

Die VDI/VDE 2206:2021 beschreibt die Verifikation als Prozess, bei dem der aktuelle Entwicklungsstand in Bezug auf die Systemanforderungen überprüft wird [9]. Verifikation ist entscheidend für die Freigabe zur Integration von Teilsystemen in höhere Systemebenen [9]. Die VDI 2221:2019 umfasst alle ständigen Analyseaktivitäten im Entwicklungsprozess, um Ergebnisse mit Anforderungen zu vergleichen [10]. Verifikation prüft, ob die Umsetzung den Systemanforderungen entspricht, während Validierung analysiert, ob das Produkt den beabsichtigten Gebrauch und die Bedürfnisse der Stakeholder erfüllt [9, 10]. WALDEN et al. [11] und ISO 15288 [12] definieren Verifikation als objektiven Nachweis, dass ein System die spezifizierten Anforderungen erfüllt. Typische Maßnahmen sind Inspektionen, Simulationen und Tests [1]. Validierung überprüft hingegen das System hinsichtlich des definierten Nutzens oder Kundenerfordernisses, auch über explizit spezifizierte Anforderungen hinaus [9]. Der V&V-Prozess enthält Testfälle und -szenarien, der im V-Modell der VDI/VDE 2206:2021 an sechs Kontrollpunkten mit Fragen zum erfolgreichen Abschluss unterstützt wird [9].

2.2. Metadatenmodelle

Metadaten bieten eine Architektur oder einen Rahmen, der die Daten des Benutzers innerhalb einer Datenumgebung beschreibt [13]. Das Metadatenmodell wird hierfür als abstraktes Modell definiert, welches andere Instanzen von Modellen darstellt [14]. Die Elemente in den Metadatenstandards für Forschungsdaten enthalten beispielsweise wesentliche Informationen, die für die Beschreibung von Datensätzen auf benötigt werden [15]. Metadaten ermöglichen eine standardisierte, interoperable Beschreibung von Datensätzen. Metadatenmodelle sind essenziell für das Informationsmanagement, da sie die Konsistenz, Nachvollziehbarkeit und Wiederverwendung von Daten verbessern.

3. Stand der Technik

In der Produktplanung und gegebenenfalls früh im Entwicklungsprozess werden Anforderungen aus Kundenbedürfnissen abgeleitet [16]. Das bildet den Ausgangspunkt für ein fundiertes Requirements Engineering. In der modellbasierten Entwicklung werden Ansätze wie RFLPV² nach GRÄßLER et al. zugrundegelegt [17]. Der Ansatz verbindet die essenziellen Entwicklungsartefakte Anforderungen (R), Funktionen (F), logische Elemente (L), physische Elemente (P) sowie V&V [17]. Der Ansatz bietet einen geeigneten Ausgangspunkt für die Verknüpfung von Anforderungen, den entwickelten Systemelementen sowie V&V-Artefakten wie Testfällen und Testszenarien. Für das vorliegende Problem wird die Ausgangslage wie folgt beschrieben: Für das Entwicklungsprojekt sind z.B. aus einem Lastenheft Anforderungen an das zu entwickelnde System erhoben worden. Diese Anforderungen sind formalisiert und modelliert. Dafür eignen sich in der modellbasierten Entwicklung z.B. die SysML. Testszenarien stellen hierbei die Kombination verschiedener Testfälle unter gleichen Umgebungsparameter dar [18].

3.1. Systematische Literaturanalyse

Um relevante Metadatenmodelle zu identifizieren, wird im ersten Schritt eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei liegt der Fokus auf den für das Model-Based Systems Engineering (MBSE) relevanten Disziplinen, wie z.B. Software Engineering oder Systems Engineering. Für die systematische Literaturanalyse wird ein geeigneter Suchstring generiert. Der Suchstring besteht hierbei aus drei Grundkomponenten, die in der Recherche, die als Scoping Review durchgeführt wird, zur Beantwortung der oben aufgeführten Forschungsfrage aufgeführt wurde: Metadatenmodell, V&V und Engineering. Für die drei Komponenten werden jeweils geeignete Suchvektoren aufgestellt und durch bool'sche Operatoren zu einem Suchstring verknüpft. Im Anschluss daran wird der Suchstring noch durch den Suchvektor („review“) erweitert, um zu gewährleisten, dass relevante Literaturreviews identifiziert werden, welche sich mit verwandten Arbeiten beschäftigen. Der Suchstring kann dann zur Suche nach relevanter Literatur in den Datenbanken Scopus sowie Web of Science genutzt werden. Durch dieses Vorgehen wurde der folgende Suchstring aufgestellt: (*"ontology" OR "metadata model" OR "metadata modeling" OR "metadata modelling" OR "metadata framework"*) AND (*"test scenario" OR "test case*" OR "test result*" OR "test execution" OR "testing"*) AND (*"Engineering"*) AND (*"review"*). Mit Hilfe des hier angegebenen Suchstrings werden die gefundenen Literaturergebnisse im nächsten Schritt analysiert und nach dem PRISMA (basierend auf [19]) Vorgehen dokumentiert (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Dokumentation der Literaturanalyse nach PRISMA (basierend auf [19])

Analyseschritte	Datenbank	Treffer
Suchstring	Scopus	47
Suchstring	Web of Science	21
Summe der Ergebnisse		68
Summe der Ergebnisse ohne Dubletten		58
Ergebnisse nach Titel-Screening		14
Ergebnisse nach Abstrakt-Screening		6
Volltext-Analyse		6
Summe relevanter Literaturergebnisse		6
weitere identifizierte Ergebnisse		8

Nach erfolgter Literaturanalyse werden im Folgenden die Erkenntnisse der relevanten Literaturergebnisse vorgestellt. TEBES et al. [20–23] beschreiben die zentrale Rolle, welche Ontologien und Metadaten im Software Engineering spielen. Sie thematisieren dabei insbesondere den Bereich der Qualitätssicherung durch Softwaretests, da sie eine klare und einheitliche Definition von Begriffen, Eigenschaften, Beziehungen und Axiomen bieten. In der Literaturanalyse wurden geeignete Test-Ontologien identifiziert, um eine konzeptionelle Grundlage für verschiedene Teststrategien zu schaffen. TEBES et al. analysieren zwölf relevante Studien, wobei festgestellt wurde, dass bisherige Arbeiten teilweise konzeptionelle und implementierte Ontologien zusammenführen. Trotz der gefundenen Ontologien zeigen sich weiterhin Heterogenität, Mehrdeutigkeit und Unvollständigkeit bei den Konzepten von Testaktivitäten, Artefakten und Methoden, und es konnte festgestellt werden, dass keine der existierenden Ontologien eine Verknüpfung mit funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen herstellt. DADKHAH et al. [24] beschreiben Software-Tests als eine wissensintensive Aktivität zur Qualitätssicherung, die durch den Einsatz von Semantic-Web-Technologien, wie Ontologien, verbessert werden kann. Dabei untersuchen DADKBAH et al. [24] anhand einer systematischen Literaturanalyse von 52 Studien, wie solche Technologien zur Unterstützung von Softwaretestprozessen genutzt werden. Die Ergebnisse zeigen Vorteile

sowohl für die Praxis als auch die Forschung, indem sie zentrale Testaktivitäten identifizieren, die von Semantic-Web-Technologien profitieren. Zudem werden Potenziale, Herausforderungen und zukünftige Forschungsansätze beim Einsatz dieser Techniken im Software-Testing diskutiert. [24]

4. Entwicklung eines ganzheitlichen Metadatenmodells

Auf Grundlage der zuvor vorgestellten Literatur werden zunächst essenzielle V&V-Elemente aus existierenden Ontologien und Definitionen extrahiert. Mit diesen Elementen wird dann ein ganzheitliches V&V-Metadatenmodell entwickelt, welches mit bestehenden Modellen aus der Engineering-Domäne verknüpft werden kann. Das ganzheitliche V&V-Metadatenmodell basiert auf einer Betrachtung der Prozess-Ebene der Produktentwicklung (siehe vergleiche V-Modell der VDI/VDE 2206:2021 [9]). Die nachstehende Abbildung 2 zeigt das Konzept zur Zusammenführung disziplinspezifischer Metadatenmodelle zu einem ganzheitlichen, integrierten V&V-Metadatenmodell sowie die Einordnung der Entwicklungsartefakte auf das V-Modell der VDI/VDE 2206:2021.

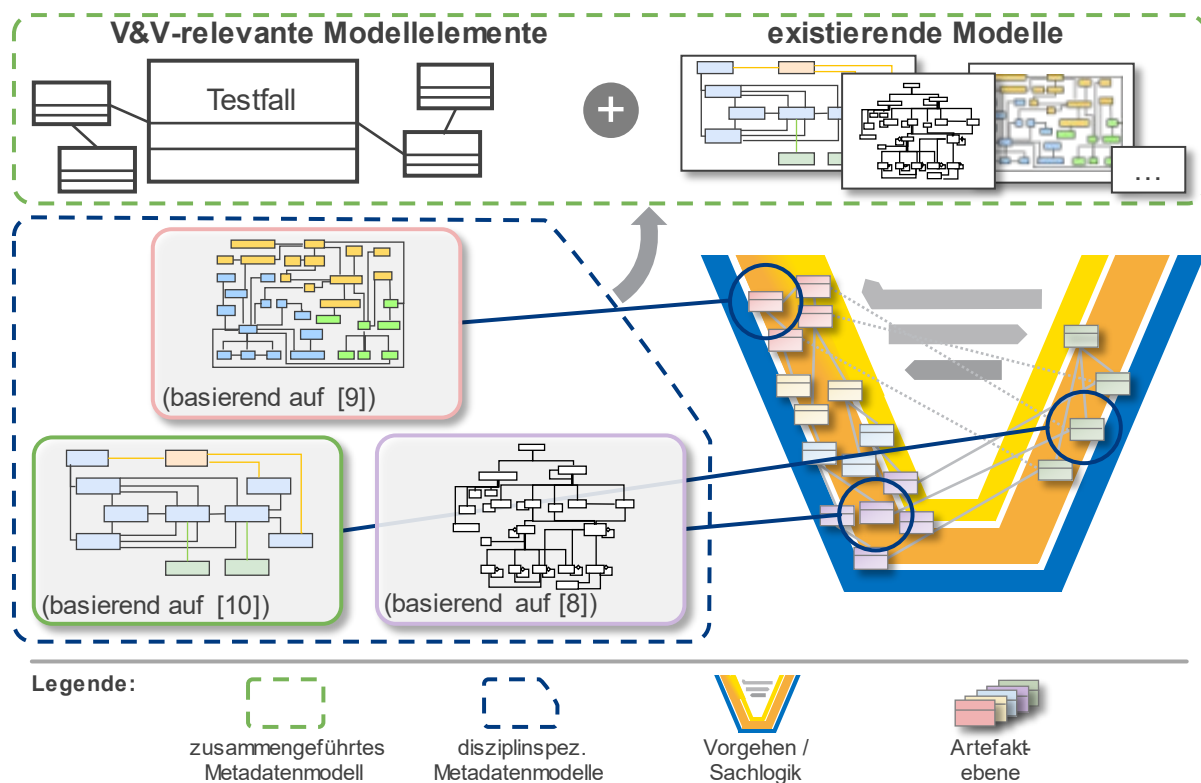


Abbildung 1: Konzept zur Zusammenführung disziplinspezifischer Metadatenmodelle zu einem ganzheitlichen, integrierten V&V-Metadatenmodell

Im Verlauf des Entwicklungsprozesses werden verschiedene Entwicklungsartefakte wie Anforderungen, physische Systemelemente und Testfälle generiert, die als Grundlage der Verifikation und Validierung dienen. Entwicklungsartefakte werden durch disziplinspezifische Metadatenmodelle semantisch beschrieben. Die relevanten Bestandteile der Metadatenmodelle werden in einem ganzheitlichen V&V-Metadatenmodell zusammengeführt. Das ganzheitliche Metadatenmodell bereitet auf der Ebene des Entwicklungsprozesses die Voraussetzung für eine toolgestützte Wirkkettenanalyse zwischen Anforderungen, Systemelementen, Tests und Testergebnissen. Auf Grundlage der systematischen Literaturanalyse sind die essenziellen V&V-Elemente im Entwicklungsprozess identifiziert worden. Vor allem im Bereich Software Engineering existiert eine breite Wissensgrundlage zum Thema Verifikation und Validierung. Als Ergebnis der identifizierten Ansätze sind die essenziellen

V&V-Artefakte nachfolgend in Tabelle 2 aufgeführt. Neben der Auflistung des jeweiligen V&V-Elements sind jeweils eine Beschreibung und dazugehörige Quellenangaben ergänzt.

Tabelle 2: Übersicht von in der Literatur identifizierten essenziellen V&V-Elemente

V&V-Element	Beschreibung	Quelle
Testfall	Vorgehen, welches dazu dient, eine Eigenschaft eines Testobjekts zu verifizieren, die als Anforderung spezifiziert ist	[18, 25, 26]
Testszenario	Kombination aus zwei oder mehr Testfällen, die die Ausführung mehrerer Testfälle unter den gleichen Umgebungsbedingungen gewährleistet	[18, 27]
Testobjekt	System oder Softwareelement, das Gegenstand der Prüfung ist	[2, 18, 26]
Prüfverfahren/-methode	detaillierte Anweisungen für die Einrichtung, Durchführung und Auswertung der Ergebnisse für einen bestimmten Testfall	[18, 26, 28]
erwartetes Ergebnis	erwartetes Ergebnis einer eines durchgeführten Testfalls, welches aus der zugrundeliegenden Anforderung abgeleitet ist	[25, 26, 29, 30]
tatsächliches Ergebnis	tatsächliches Ergebnis des durchgeführten Tests	[25, 26, 29]
Testaktivität	beschreibt die definierte Abfolge von Aktivitäten in der Testfalldurchführung	[18, 29–31]
Input Parameter	die in der Testfallbeschreibung enthaltenen Eingabeparameter enthalten Eingabewerte, für die der Testfall durchgeführt werden soll	[18, 29–31]
Systemebene	gibt an, ob sich der Testfall auf das Gesamtsystem, ein Teilsystem oder Systemkomponenten bezieht.	[1, 18]
Umgebungsparameter	Parameter außerhalb der Systemgrenzen des Testobjekts	[18, 30, 32]
Voraussetzung	beschreibt den erforderlichen Zustand der Testumgebung und alle besonderen Einschränkungen, die mit der Ausführung des Testfalls verbunden sind	[25, 29, 33]
Auslöser	Ein Testfall kann durch eine bestimmte Aktion oder Ereignis, den sogenannten Trigger, ausgelöst werden.	[25]
Nachbedingung	eine Bedingung, die nach einer erfolgreichen Eigenschaftsabsicherung garantiert erfüllt ist	[25, 29]
Prüfstand / Testumgebung	Hardware- und Softwarekonfiguration, die für die Durchführung des Testfalls erforderlich ist	[2, 25]
Testdaten	Ausgewählte Daten, um die Eingabeanforderungen für die Ausführung eines oder mehrerer Testfälle zu erfüllen, die im Testplan, im Testfall definiert sind	[29, 34, 35]
Anforderung	die zugrundeliegende Anforderung, dessen Erfüllung durch die Durchführung des Testfalls überprüft werden soll	[18, 30]

Durch die Identifizierung der essenziellen V&V-Elemente ist der erste Schritt zur positiven Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt. Im nächsten Schritt werden die Elemente gemäß JONES et al. [8] instanziiert und in ein ganzheitliches V&V-Metadatenmodell überführt, wodurch die Forschungsfrage beantwortet werden kann. Durch die Instanziierung können die Metadaten strukturiert verwaltet werden (siehe Abbildung 2). Dies dient vor allem vorbereitend für eine Adaption einer V&V-Datenbank und für eine mögliche Automatisierung des V&V-Prozesses.

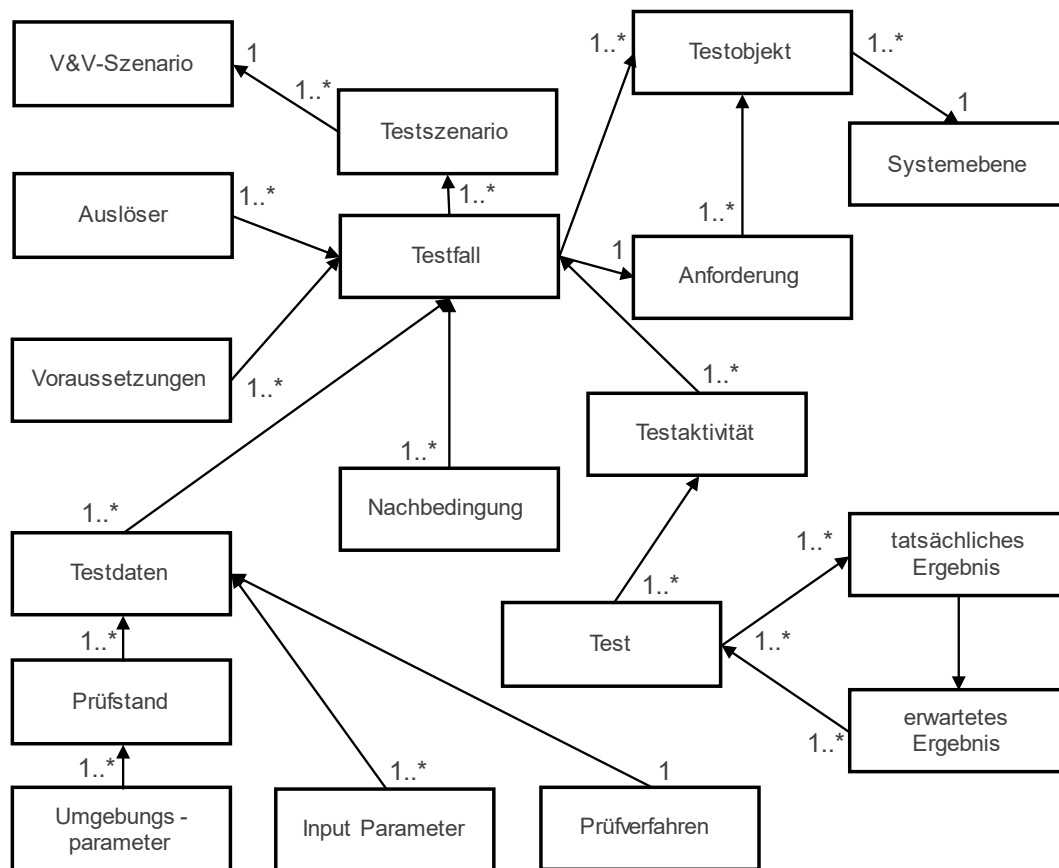


Abbildung 2: instanziiertes V&V-Metadatenmodell

5. Anwendung und Diskussion der Ergebnisse

Das entwickelte Metadatenmodell wurde im europäischen Forschungsprojekt CREXDATA für die Entwicklung einer Datenplattform im Management kritischer Situationen angewendet. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt den erforderlichen Informationsfluss, der von Anforderungen ausgeht. In Pfeil 1 der untenstehenden Abbildung 3 werden die Informationen des durchgeführten Testfalls auf die Anforderung zum Zweck der Verifikation zurückgeführt. Der Pfeil 3 führt die Informationen des Ergebnisses eines Testfalls auf die Kundenbedürfnisse der Stakeholder des Systems mit dem Ziel der Validierung zurück. Das Testobjekt können hierbei Teilsysteme im Verlauf des Entwicklungsprozesses sein. Sofern die Teilsysteme auf dem rechten Schenkel des V-Modells weiter integriert sind, handelt es sich um das Gesamtsystem [36]. Das Gesamtsystem kann hier durch verschiedene Testszenarien verifiziert und validiert werden. Bei der Validierung durch die Durchführung von Testfällen und Testszenarien ist jeweils die Partizipation von Stakeholdern erforderlich [27]. Der Pfeil 2 beschreibt die Rückführung der Informationen aus dem ausgewerteten Testszenario auf die Systemanforderung, wohingegen der Pfeil 4 in der Abbildung 1 die Informationsrückführung auf die Kundenbedürfnisse darstellt. Um jedoch die durchgeführten V&V-Aktivitäten analysieren zu können, ist es unabdingbar, die Ergebnisse aus Testfällen und Testszenarien wieder auf die Anforderungen rückzuführen und den Vergleich zwischen tatsächlichen und erwarteten Ergebnissen eines Tests zu ziehen. Es ist erforderlich, dass die Entwicklung ausgehend von den zugrundeliegenden Anforderungen zunächst die Testfälle ableitet und konkretisiert, bevor eine Lösungsalternative erarbeitet wird, um somit eine frühzeitige Absicherung der Eigenschaften zu gewährleisten. Hierfür müssen die essenziellen Elemente identifiziert werden, die für die oben beschriebene Informationsrückführung erforderlich sind. Durch die Planung der Eigenschaftsabsicherung werden Testfälle und Testszenarien konkretisiert.

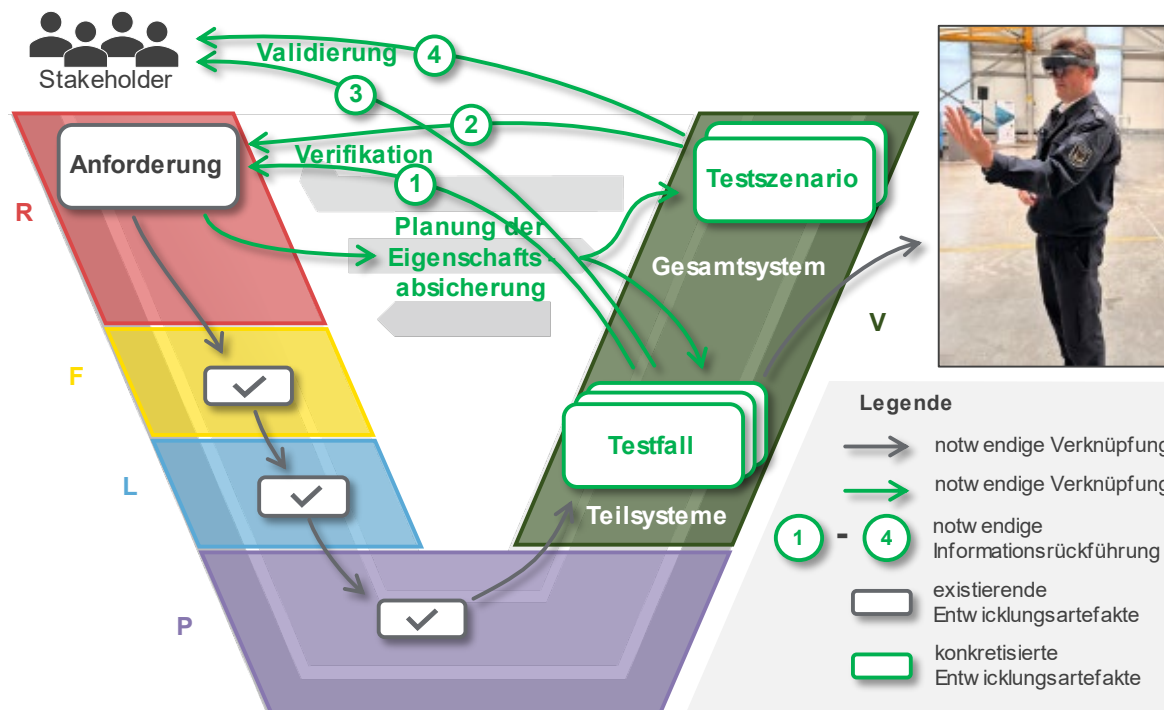


Abbildung 3: Relevanz der Informationsrückführung in der modellbasierten Entwicklung (aufbauend auf [17])

Im Forschungsprojekt CREXDATA¹ wird eine generische Plattform für das Management kritischer Situationen in Echtzeit und die flexible Planung von Maßnahmen unter Verwendung von Extremdaten entwickelt. Es werden verschiedene Technologien aus dem Bereich Data Science und künstlicher Intelligenz erforscht. Die Technologien werden in eine Modellierungsumgebung für Datenabläufe integriert, um ein Demonstrationssystem zu schaffen. Das Demonstratorsystem wird im Anwendungsfall der Extremwetterereignisse evaluiert. Exemplarische Teilsysteme des Gesamtsystems sind Drohnen zur Erzeugung von 3D-Modellen der betroffenen Umgebung und Augmented Reality (vgl. [37, 38]). Hieraus ergeben sich eine Vielzahl von Testfällen und Testszenarien, die durch die im V&V-Metadatenmodell enthaltenen Elemente beschrieben werden können. Die Umsetzung zeigt ein erfolgreich aufgestelltes Metadatenmodell, jedoch ist die vollständige Umsetzung in einer Modellierungssprache ausstehend. Um das Metadatenmodell weiter in Richtung der Vollständigkeit zu entwickeln und zu verbessern, könnten Testergebnisse, Testdetails und Fehler während Tests expliziter einbezogen werden. Außerdem könnten Aspekte wie Versionierung, Status und Abweichungen wertvolle Erweiterungen für ein vollständiges V&V-Metadatenmodell sein.

Durch die Identifikation der erforderlichen V&V-Elemente und die Zusammenführung in einem ganzheitlichen V&V-Metadatenmodell wurde die zu Beginn abgeleitete Forschungsfrage erfolgreich beantwortet. Das instanziierte Metadatenmodell wurde für die erstmalige Nutzung in SysML umgesetzt, um Testfälle und Testszenarien in einem von der europäischen Kommission geförderten Forschungsprojekt zu modellieren. Hierdurch wird die Informationsrückführung von modellierten Testergebnissen aus durchgeführten Testfällen auf die zugrundeliegenden Anforderungen befähigt.

¹ <https://www.crexdata.eu>

6. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit ist ein ganzheitliches V&V-Metadatenmodell auf prozessualer Ebene entwickelt worden. Dafür sind durch eine systematische Literaturanalyse verschiedene Ontologie-Ansätze analysiert, um essenzielle V&V-Elemente im Produktentwicklungsprozess zu identifizieren. Die identifizierten V&V-Elemente sind dann in einem V&V-Metadatenmodell instanziiert worden, was zur positiven Beantwortung der zuvor aufgestellten Forschungsfrage führt. Durch Nutzung des Metadatenmodells im europäischen Forschungsprojekt CREXDATA konnte eine erste erfolgreiche Anwendung umgesetzt werden. Das Metadatenmodell bietet die Grundlage zur Modellierung von Ergebnissen durchgeführter Testfälle, was für die Informationsrückführung auf die zugrundeliegenden Anforderungen erforderlich ist. Mit Hilfe dieser Informationsrückführung können dann disziplinübergreifende Wirkketten vom Testergebnis bis zur Anforderung analysiert werden. Limitationen der vorliegenden Arbeit sind die fehlende vollständige Umsetzung in einer Modellierungssprache, wie Unified Modelling Language (UML) oder SysML. Diese Limitation stellt jedoch gleichzeitig auch das Potenzial zukünftiger Arbeit dar. Das in dieser Arbeit entwickelte ganzheitliche V&V-Metadatenmodell kann für zukünftige Forschungsarbeiten als grundlegende Voraussetzung zur Modellierung von Testergebnissen durchgeführter Testfälle dienen. Dazu ist es erforderlich, das Metadatenmodell durch eine Profilerweiterung in eine Modellierungssprache wie beispielsweise SysML zu überführen, ein Systemmodell zu modellieren und Testfälle durchzuführen, dessen Ergebnisse dann wiederum modelliert werden können. Mit Hilfe der Modellierung kann dann eine Wirkkette vom Testergebnis bis hin zu Anforderungen aufgestellt werden. Dies führt zu einer disziplinübergreifenden Unterstützung des datenbasierten Informationsflusses innerhalb des V&V-Prozesses zur Verifikation und Validierung.

Danksagung

The research leading to these results has received funding from the European Union's Horizon Europe Program under the CREXDATA Project, grant agreement n° 101092749.

Literaturverzeichnis

- [1] I. Gräßler and C. Oleff, *Systems engineering: Verstehen und industriell umsetzen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2022.
- [2] S. Matthiesen and P. Grauberger, *Konstruktionswissen für Ingenieure: Innovative Produkte zielgerichtet entwickeln*. Berlin: Springer Vieweg, 2024.
- [3] I. Graessler and M. Ebel, "Test-oriented Resilient Requirements Engineering (ToRRE): Extending Model-based Effect Chain Analysis to Verification Objectives," in *ICED Conference 2025: 25th International Conference on Engineering Design 2025*, Dallas, USA, 2025.
- [4] S. J. Fenves et al., "CPM2: A Core Model for Product Data," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 8, no. 1, 2008, doi: 10.1115/1.2830842.
- [5] G. Koutsopoulos et al., "Towards an Integrated Meta-Model for Requirements Engineering," in 2020, pp. 40–53. Accessed: Aug. 13 2020. [Online]. Available:
- [6] Gabriel Darbord et al., "A Unit Test Metamodel for Test Generation," in 2023. [Online].
- [7] Object Management Group, *SysML v2: Part 1 - Language Specification*. [Online].
- [8] D. Jones, T. Bench-Capon, and P. Visser, *Methodologies for ontology development*, 1998.
- [9] *VDI/VDE 2206: Development of mechatronic and cyber-physical systems*, VDI 2206:2021, VDI, Düsseldorf, 2021.
- [10] *VDI 2221: Design of technical products and systems: Part 1: Model of product design*, VDI 2221:2019, VDI, Düsseldorf, 2019.
- [11] D. Walden et al., *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*, 4th ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015.
- [12] *Systems and software engineering — System life cycle processes*, 15288:2008, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [13] B. Prothman, "Meta data," *IEEE Potentials*, vol. 19, no. 1, pp. 20–23, 2000, doi: 10.1109/45.825636.

-
- [14] M. Brambilla, J. Cabot, and M. Wimmer, *Model-driven software engineering in practice: Second Edition*. San Rafael, California: Morgan & Claypool Publishers, 2017.
- [15] J. Qin and K. Li, *How portable are the metadata standards for scientific data? a proposal for a metadata infrastructure*, 2013. [Online].
- [16] K. Pohl, *Requirements engineering: Fundamentals, principles, and techniques*. New York: Springer, 2010.
- [17] I. Graessler, D. Wiechel, and C. Oleff, "Extended RFLP for complex technical systems," in *2022 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, Vienna, Austria, 2022, pp. 1–8.
- [18] I. Graessler, M. Ebel, and J. Pottebaum, "Model-based planning of test cases and test scenarios to support engineering of Cyber-Physical Systems," in *IEEE ISSE 2024: 10th IEEE International Symposium on Systems Engineering*, Perugia, Italy, 2024.
- [19] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *Systematic reviews*, vol. 10, no. 1, p. 89, 2021, doi: 10.1186/s13643-021-01626-4.
- [20] G. Tebes *et al.*, "A Systematic Review on Software Testing Ontologies," in *QUALITY OF INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY, QUATIC 2019*, 2019, pp. 144–160.
- [21] G. Tebes *et al.*, "Specifying and Analyzing a Software Testing Ontology at the Level," *Journal of Computer Science & Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 126–145, 2021, doi: 10.24215/16666038.21.e12.
- [22] G. Tebes *et al.*, "Specifying and Analyzing a Software Testing Ontology at the Top-Domain Ontological Level; [Especificando y Analizando una Ontología de Pruebas de Software en el Nivel Ontológico de Dominio Superior]," *Journal of Computer Science and Technology (Argentina)*, 2021.
- [23] G. Tebes *et al.*, "Testtdo: A top-domain software testing ontology," *23rd Iberoamerican Conference on Software Engineering, CIBSE 2020*, 2020.
- [24] M. Dadkhah, S. Araban, and S. Paydar, "A systematic literature review on semantic web enabled software testing," *Journal of Systems and Software*, vol. 162, 2020.
- [25] M. Strembeck and U. Zdun, *Scenario-based Component Testing Using Embedded Metadata*.
- [26] SEBoK Editorial Board, *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK): v2.6*. Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology, 2022.
- [27] J. Pottebaum, M. Ebel, and I. Graessler, "Uncovering Impact of Innovation: Continuous Stakeholder Engagement through Scenario-based Systems Engineering," in *ISCRAM: Information Systems for Crisis Response and Management Global Conference*, Münster, 2024.
- [28] Software and Systems Engineering Standards Committee of the IEEE Computer Society, *IEEE Std 1012-2016: IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation*. S.I.: IEEE, 2017.
- [29] ISO/IEC/IEEE 29119-3: *Software and systems engineering - Software testing - Part 3: Test documentation*, 29119-3, ISO International Organization for Standardization.
- [30] ISO/IEC/IEEE International Standard, "ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering - Vocabulary," *ISO/IEC/IEEE 24765:2010(E)*, pp. 1–418, 2010.
- [31] D. Richards, A. Stuart, and M. Hause, *Testing Solutions through SysML/UML*, 2009.
- [32] K. Juhnke, "Improving the quality of automotive test case specifications," Universität Ulm, 2021.
- [33] O. Alt, *Integration textueller Anforderungen und modell-basiertem Testen mit SysML*, 2008.
- [34] V. Knollmann, *UML-basierte Testfall-und Systemmodelle für die Eisenbahnleit-und Sicherheitstechnik*, 2007.
- [35] R. Jackson, "Testmanagement: Professionelles Testen," (in De;de), *Informatik Spektrum*, vol. 32, no. 1, pp. 37–41, 2009, doi: 10.1007/s00287-008-0300-y.
- [36] I. Graessler, "Competitive Engineering in the Age of Industry 4.0 and Beyond," in *Proceedings of the 12th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE)*, Las Palmas de Gran Canaria, 2018, pp. 213–232.
- [37] I. Safranoglou *et al.*, "Augmented Reality for Real-Time Decision-Making in Flood Emergencies," in *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct 2024*.
- [38] A. Stavroulakis *et al.*, "An Augmented Reality System Architecture for Flood Management," in *Proceedings of the 10th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 2024, pp. 211–218.