

Semantische Referenzbildung zwischen heterogenen Informationsmodellen in Engineering und Betrieb von Produktionssystemen

M. Stolze, Institut für Automation und Kommunikation e.V., Magdeburg;
Prof. Dr.-Ing. **M. Barth**, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT);
Prof. Dr.-Ing. **C. Diedrich**, Otto von Guericke Universität, Magdeburg

Kurzfassung

Die Entwicklung von unterstützenden Systemen für das Instandhaltungspersonal von Produktionssystemen (PS), kurz Instandhaltungsassistenzsysteme (IAS), soll Aktivitäten der Mitarbeiter effizienter und sicherer gestalten. Neben Live-Daten aus den PS werden die notwendigen Informationen für die IAS zu großen Teilen aus der überwiegend dokumentenbasierten technischen Dokumentation (TD) eines PS abgeleitet. Damit einher geht ein erheblicher manueller Aufwand zur Extraktion der für eine Instandhaltungstätigkeit notwendigen Informationen, sowohl bei der Entwicklung eines IAS als auch bei der Aufgabenplanung des Instandhaltungspersonals ohne IAS. Mit dem Ansatz des Model Based Systems Engineering (MBSE) eröffnen sich Möglichkeiten hin zu einer modellbasierten TD. Dieser Beitrag beschreibt ein Konzept, wie Modelle aus dem MBSE für ein neuartiges IAS genutzt werden können. Zunächst wird ein von den Autoren entwickeltes Strukturmodell vorgestellt, das die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Artefakten einer TD und den Aufgaben in der Instandhaltung abbildet. Im weiteren Beitragsteil wird die Modellierung der Zusammenhänge in einer Kombination aus Systems Modelling Language (SysML), Asset Administration Shell (AAS) und dem Intelligent Information Request and Delivery Standard (iiRDS) beschrieben.

Abstract

The development of maintenance assistance systems (MAS) for the maintenance personnel of production systems (PS) is intended to make employees' activities more efficient and safer. In addition to live data from the PS, the information required for the IAS is largely derived from the predominantly document-based technical documentation (TD) of a PS. This involves considerable manual effort to extract the information required for a maintenance activity, both

in the development of an IAS and in the task planning of maintenance personnel without an IAS. The Model Based Systems Engineering (MBSE) approach opens up possibilities for model-based TD. This article describes a concept of how models from MBSE can be used for a new type of IAS. First, a structural model developed by the authors is presented, which depicts the relationships between the various artifacts of a TD and the tasks in maintenance. The rest of the article describes the modeling of the relationships in a combination of Systems Modelling Language (SysML), Asset Administration Shell (AAS) and the Intelligent Information Request and Delivery Standard (iiRDS).

1. Einleitung und Motivation

Aufgrund der steigenden Komplexität von Produktionssystemen (PS), sowohl in ihrer Bauweise als auch in ihrer Prozessautomatisierung und Digitalisierung [1], ist ein höheres Maß an Fachwissen für deren Bedienung und Instandhaltung erforderlich. Der zunehmende Fachkräftemangel stellt hierbei eine Hürde dar, die mit der Entwicklung von Assistenzsystemen für den Produktionsalltag abgebaut werden soll.

Für die Entwicklung und Nutzung derartiger Instandhaltungsassistenzsysteme (IAS) bedarf es neben dynamischen Daten, beispielsweise im Kontext des Predictive Maintenance [1], insbesondere statischer Daten, wie solche aus der technischen Dokumentation (TD) eines PS. Diese TD ist heute noch überwiegend papier- bzw. dokumentenbasiert und somit nur mit beträchtlichem Aufwand in ein rechnergestütztes IAS integrierbar. Nach aktuellem Stand werden die notwendigen Informationen für eine Instandhaltungsaufgabe überwiegend manuell durch das Instandhaltungspersonal extrahiert [2], d. h. in den Plänen und Anweisungen nachgelesen. Erste vereinzelte Beispiele für die Nutzung der TD in einem IAS sind in [3] bis [5] beschrieben. Die Modellierung von Informationen für ein IAS variiert in diesen Arbeiten, von der manuellen Extrahierung der für das Instandhaltungspersonal notwendigen Informationen aus einer dokumentenbasierten TD [4] bis hin zur Generierung dynamischer Informationen aus einer modellbasierten TD [5] unter Hinzunahme von Live-Daten eines PS. Die jeweiligen Arbeiten konzentrieren sich hierbei auf die Nutzung einzelner Artefakte einer TD. Es existiert jedoch noch kein generischer Modellierungsansatz von Wirkzusammenhängen zwischen den Artefakten einer TD.

Zur Gewährleistung der Datenintegrität über den gesamten Lebenszyklus eines PS ist eine Vision nach [6] der Übergang von einer dokumentenbasierten in eine modellbasierte TD notwendig. Für die Umsetzung dieser Vision hat sich die Methode des Model Based Systems Engineering (MBSE) etabliert [6]. Weiterhin tragen standardisierte Ontologien wie der Intelligent Information Request and Delivery Standard (iiRDS) [2] sowie Informationsmodelle

in Form der Asset Administration Shell (AAS) [7] dazu bei, Informationen aus einer TD interoperabel, maschineninterpretierbar und semantisch zu beschreiben. Die für ein IAS notwendigen Artefakte, die im Zuge eines MBSE entstehen, hängen eng mit den Artefakten aus dem anschließenden operativen Betrieb zusammen, sodass die Modellierungsmethoden des MBSE um die Anforderungen, Modelle und Referenzen des operativen Betriebs erweitert werden müssen. Beispielsweise benötigt ein Instandhalter beim Tausch eines Elektromotors neben der Kenntnis über den Arbeitsablauf auch Informationen über dessen elektrische Verschaltung, welche in Stromlaufplänen dokumentiert sind, sowie über die grundlegenden Sicherheitsvorkehrungen aus der Betriebsanleitung.

In den folgenden Abschnitten wird ein Konzept vorgestellt, das mit Hilfe der für das MBSE entwickelten Modellierungssprache Systems Modelling Language (SysML), der AAS sowie dem iiRDS das MBSE um den operativen Aspekt erweitert. In Abschnitt 2 werden hierzu zunächst aktuelle Herausforderungen sowie die daraus resultierenden Forschungsfragen auf dem Weg zu einer modellbasierten TD vorgestellt. Daraufhin erfolgt in Abschnitt 3 ein Einblick in den Stand von Wissenschaft und Technik, der für das in Abschnitt 4 beschriebene Konzept als Grundlage dient. Ein Anwendungsbeispiel veranschaulicht die Integration des Konzepts. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick für künftige Arbeiten ab.

2. Problemstellung und abgeleitete Anforderungen

Der Übergang von einer dokumentenbasierten hin zu einer modellbasierten TD bringt mehrere Herausforderungen und Anforderungen mit sich, die von den Autoren in [8] ausführlich analysiert werden. Die für das Konzept wesentlichen Herausforderungen werden, mitsamt den daraus abgeleiteten Anforderungen (Anf.) nachfolgend aufgeführt.

- Engineering-Prozesse und deren Resultate werden nach wie vor dokumentenbasiert ([6], [9]) gehandhabt. Artefakte der TD resultieren aus unterschiedlichen Datenquellen und liegen in verschiedenen Formaten vor [8], sodass sie heute weder maschinenlesbar noch effektiv wiederverwendbar sind. Weiterhin divergiert nach der Inbetriebnahme eines PS dessen TD mit der Zeit immer stärker von dem As-Build-Zustand [10]. Aus dieser Herausforderung lässt sich ableiten, dass die Artefakte modellbasiert (Anf. 1.1) vorliegen, mit Semantik annotierbar (Anf. 1.2) und flexibel über den Lebenszyklus einer Maschine aktualisierbar sein müssen (Anf. 1.3).
- Während der Planung oder Ausführung von Instandhaltungsaufgaben müssen heutzutage Zusammenhänge bzw. Beziehungen zwischen separierten Artefakten einer TD manuell identifiziert werden [2], [8]. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Beziehungen zwischen Informationen einzelner Artefakte formalisiert (Anf. 2.1) und mit

Semantik annotiert (Anf. 2.2) werden müssen. Zudem müssen die für die jeweilige Instandhaltungsaufgabe relevanten Informationen automatisiert gefunden und extrahiert werden können (Anf. 2.3).

- Für die Erstellung einer modellbasierten TD existieren mehrere Modellierungssprachen und domänenspezifische Engineering-Tools [6]. Dies erfordert die Berücksichtigung der Heterogenität existierender Modellierungssprachen (Anf. 3.1) und eine technologieunabhängige Interpretation der modellierten Informationen (Anf. 3.2).

Aus der in Abschnitt 1 dargelegten Motivation sowie den in diesem Abschnitt genannten Herausforderungen und deren Anforderungen leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

- Welche Anpassungen und/oder Erweiterungen sind notwendig, um ein MBSE-Systemmodell für ein IAS anwenden zu können?
- Wie können Informationen für die Instandhaltung, basierend auf dem MBSE-Systemmodell, in Artefakten modelliert werden und welche Beziehungen existieren zwischen diesen neuen Informationen und den bereits modellierten Engineering-Artefakten des Systemmodells?
- Wie können die übergreifenden Beziehungen zwischen Artefakten modelliert und semantisch annotiert werden, um nur diejenigen Informationen für ein IAS zu extrahieren, welche für eine spezielle Instandhaltungsaufgabe notwendig sind?

Auf Basis der abgeleiteten Forschungsfragen und Anforderungen werden zunächst in Abschnitt 3 bestehende Arbeiten analysiert.

3. Stand der Wissenschaft und Technik und abgeleitete Konzeptbestandteile

Mit der Idee von digitalen Zwillingen hat der modellbasierte Ansatz in der Datenmodellierung immer mehr Raum eingenommen. MBSE und etablierte Modellierungssprachen wie SysML [11] und die AAS [7] unterstützen den für die vorliegende Arbeit notwendigen Wandel hin zu einer modellbasierten TD. Weiterhin ermöglicht die Nutzung von Ontologien, wie dem iiRDS [12], die semantische Interpretation und somit die Filterung von Daten einer TD. In den folgenden Unterabschnitten wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich der genannten Methoden und Technologien mit Fokus auf die TD gegeben.

3.1 Methoden in der Entwicklung von Produktionssystemen

Die Entwicklung eines PS unterliegt einem Lebenszyklus, wie er z. B. in der DIN ISO 15226 [13] definiert ist. Die Erstellung und Strukturierung der sowohl dokumenten- als auch modellbasierten Artefakte der TD über den Lebenszyklus eines PS wird durch verschiedene Methoden und Technologien unterstützt. Eine verbreitete Methode ist das generische V-

Modell, das in [14] auf die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme spezialisiert wird. Die zu durchlaufenden Stufen des V-Modells beginnen mit der Anforderungsanalyse, gefolgt von dem Design der Systemarchitektur und dessen Implementierung. Danach findet die Integration der Systemelemente und deren Verifikation statt. Die Validierung und Übergabe der in den Phasen erstellten Artefakte bilden den Projektabschluss [14], [15]. Modelle, wie das Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung, der Modellraum des Konstruierens oder das sogenannte Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) [16] beschreiben das Vorgehen im Engineering bezogen auf die Produktentwicklung. Alle genannten Methoden und Modelle basieren auf der Idee, ein System- oder Produktmodell in diskrete Level bzw. Räume zu strukturieren. Jedoch beschränken sich alle, wie auch das MBSE, weitestgehend auf das Engineering bzw. die Entwicklung. Es ist aber zu beachten, dass nach der Inbetriebnahme die TD eines PS häufig und umfassend genutzt, aktualisiert und/oder angereichert wird [10]. Somit muss der Rahmen der genannten Modelle und Methoden um den operativen Betrieb eines PS erweitert werden.

3.2 Systems Modelling Language

Für die Umsetzung der MBSE-Methode wurde die Modellierungssprache SysML [11] entwickelt. Deren Spezifikation erlaubt die Erweiterung der spezifizierten Basiselemente um zusätzliche semantische Definitionen. Daher existieren bereits mehrere domänenspezifische Bibliotheken wie z. B. die in [17] vorgestellte Bibliothek SysML4Mechtronics, welche die interdisziplinäre Modellierung mechatronischer Systeme zwischen den Domänen Software, Elektrik/Elekrotechnik und Mechanik erlaubt. Weiterhin ist in [9] eine Bibliothek für die Modellierung von Ergebnissen einer Risikoanalyse beschrieben. In [18] wird eine Methode entwickelt, die das bisherige produktorientierte MBSE um ein produktionsorientiertes MBSE erweitert. Hierbei werden die Prozesse eines PS in Verbindung mit dem darin hergestellten Produkt modelliert. Mit den hier dargestellten Möglichkeiten, SysML domänenspezifisch zu erweitern und mit Semantik zu spezialisieren können die in Abschnitt 2 formulierten Anforderungen 1.1, 1.2 und 2.1 erfüllt werden.

3.3 Asset Administration Shell

Derzeitig werden unterschiedliche Modellierungssprachen unabhängig voneinander in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen eines PS genutzt, da sie bedarfsorientiert für die jeweilige Domäne entwickelt wurden. So werden beispielsweise SysML und die Automation Markup Language (AML [19]) überwiegend im Engineering eines PS genutzt, während OPC Unified Architecture (OPC UA [20]) initial für den operativen Betrieb entwickelt wurde. Zur

Beherrschung der Heterogenität an Modellierungssprachen entstand das Konzept der AAS [7], welche auf Basis eines Meta-Modells und der Idee von Teilmodellen domänenübergreifende Informationen unter einem Dach vereinen soll. Aufgrund der bestehenden Heterogenität haben die Organisationen von OPC UA, AAS und AML in einem gemeinsamen Diskussionspapier [21] einen Vorschlag für die Vereinigung der drei genannten Modellierungssprachen erarbeitet. Hierdurch wird Anf. 3.1 bereits teilweise erfüllt. Offen bleibt die Integration des MBSE mitsamt der Modellierungsmöglichkeiten von SysML. Diese notwendige Verknüpfung von SysML-Modellen mit der AAS muss im neuen Konzept (Abschnitt 4) berücksichtigt werden.

3.4 Intelligent Information Request and Delivery Standard

Aktuelle Methoden zur Erstellung und Nutzung von Informationen in TD zeigen noch Handlungsbedarf, der durch den in [2] vorgestellten iiRDS Standard genutzt werden soll. Dieser Standard ermöglicht die semantische Annotation von heterogenen Artefakten einer TD, um so den Wandel von einer dokumentenbasierten zu einer modellbasierten TD zu schaffen. Hierfür werden sowohl bestehende Dokumente, wie z. B. PDF-Dateien, als auch Datenfragmente in einem sogenannten iiRDS Package gespeichert und gleichzeitig mit semantisch annotierten Metadaten angereichert. [2]

Durch die semantische Anreicherung der Informationen wird die Erstellung verschiedener Sichten auf bzw. die Filterung von Datenbeständen unterstützt. Weiterhin ermöglicht die Bereitstellung solcher sogenannten intelligenten Informationen einen „[...] individuellen, benutzerorientierten und kontextbasierten Weg [...]“ [2], für eine „[...] interaktive und adaptive Mensch-Maschine oder Maschine-Maschine Kommunikation [...]“ [2].

Zusammen mit dem zuletzt veröffentlichten Teilmodell „Intelligent Information for Use“ [22] der AAS, wird damit ein konzeptioneller Weg für die Harmonisierung von iiRDS, AAS und SysML eröffnet. Die Kombination der drei zuvor genannten Technologien soll eine flexible und zudem modellbasierte TD über den Lebenszyklus eines PS ermöglichen (Anf.1.3 aus Abschnitt 2). Zusätzlich kann mit der Integration von iiRDS in SysML die semantische Erweiterung von SysML-Beziehungstypen (Anf. 2.2) umgesetzt werden.

Im folgenden Abschnitt 4 werden die in diesem Abschnitt analysierten offenen Handlungsstränge in ein Konzept für die modellbasierte TD überführt.

4. Konzeptentwicklung

4.1 Das Strukturmodell der technischen Dokumentation

Ein Vergleich der vorgestellten Methoden und Modelle aus Abschnitt 3.1 zeigt bestehende Gemeinsamkeiten, wie beispielsweise die Strukturierung der Informationen aus dem Engineering in vier Hauträume bzw. -schichten. Jedoch trägt, wie beschrieben, neben dem Engineering auch der operative Betrieb Artefakte für die TD eines PS bei. Obwohl die Informationen, die für den operativen Betrieb notwendig sind, sich größtenteils auf die Artefakte des Engineerings stützen, gehen die genannten Methoden nicht über die Phase der Systemintegration hinaus. In der industriellen Praxis bestehende Zusammenhänge zwischen Arbeitsplänen einer Instandhaltungstätigkeit und beispielsweise technischen Zeichnungen eines PS, werden nicht berücksichtigt. Aufgrund dessen schlagen die Autoren die Modellierung dieser Zusammenhänge zwischen den Artefakten des operativen Betriebs und dem Engineering vor, infolgedessen ein erweitertes Strukturmodell der TD (SMTD) entworfen wurde, welche in Abbildung 1 dargestellt ist.

Das SMTD besteht aus den fünf Hauträumen: Anforderungs-, Lokations-, Lösungs-, Safety/Security- und Objektraum. Bis auf den Anforderungs- und Lösungsraum, die aus dem Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung und dem MKM (s. Abschnitt 3.1) abgeleitet wurden, werden alle Räume im SMTD durch die Autoren eingeführt und im Folgenden erläutert. Zu Beginn der Entwicklung eines PS werden Anforderungen zusammengetragen, die in geeigneten Artefakten dokumentiert und im Anforderungsraum strukturell zusammengefasst werden. Parallel dazu kann bereits die Lokationsstruktur, in der das PS und seine einzelnen Baugruppen und Komponenten verortet sind, modelliert werden.

Der Lokationsraum hat dabei Wechselbeziehungen:

- zum Anforderungsraum, um Anforderungen an Orte in einem PS zu referenzieren,
- zum Lösungsraum, um das entwickelte System mit seinen Subsystemen zu den späteren Einbauorten zu referenzieren,
- zum Safety/Security-Raum, um mögliche Risiken oder Gefährdungen einem bestimmten Ort zuzuordnen sowie zum
- Objektraum, um einzelne Objekte bestimmten Einbauorten zuzuordnen.

Der Safety/Security-Raum umfasst alle Artefakte, die durch domänenspezifische Risikoanalysen erstellt werden. Diese Informationen haben wiederum Wechselbeziehungen zum Anforderungs-, Lösungsraum sowie zu einzelnen Objekten im Objektraum. Beispiele mit erläuternden Informationen zu den Raumdefinitionen werden in Abschnitt 4 graphisch dargestellt.

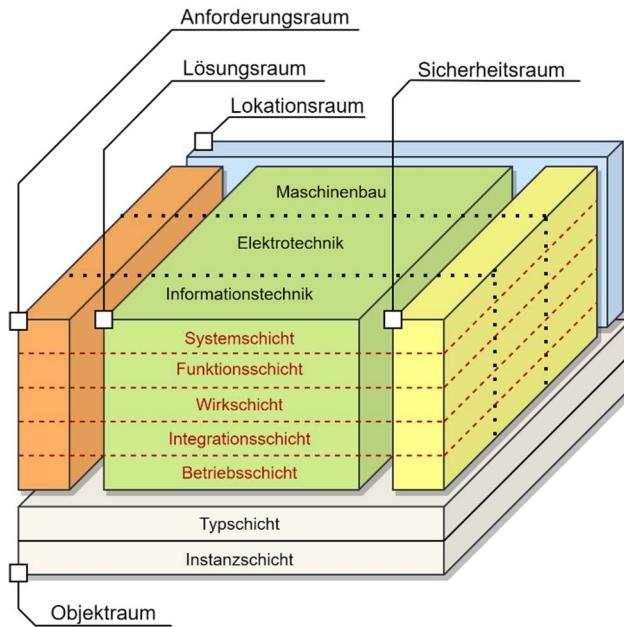


Abbildung 1: Strukturmodell der technischen Dokumentation (SMTD)

Die drei Räume – der Anforderungs-, Lösungs- und Safety/Security-Raum – werden in fünf Schichten unterteilt: System-, Funktions-, Wirk-, Integrations- und Betriebsschicht. Die oberen vier Schichten sind dabei bereits aus den in Abschnitt 3.1 genannten Modellen bekannt. Die Betriebsschicht wurde von den Autoren hinzugefügt. Sie gruppiert Artefakte wie z. B. Arbeitsablaufpläne in der Instandhaltung und dem operativen Betrieb. Diese Schicht zeigt Wirkzusammenhänge zu oberliegenden Schichten und den umliegenden Räumen auf, die anhand eines Beispiels im folgenden Abschnitt verdeutlicht werden.

Der Raum, auf dem alle anderen Räume aufbauen, ist der Objektraum. Dieser teilt sich in eine Instanz- und Typschicht auf und integriert damit das Konzept der AAS, auf das hier nicht näher eingegangen wird. Mit diesem Ansatz soll die für den IAS-Ansatz notwendige objektorientierte Modellierung erreicht werden, die eine Verlinkung von Objekt-Instanzen und -Typen zu anderen Räumen ermöglicht. Der beschriebene Aufbau des SMTD soll die strukturierte Speicherung der Artefakte unterstützen.

4.2 Integration von Zusammenhängen zwischen Artefakten im SMTD

Für die Beschreibung der Integration des SMTD wird eine sogenannte Tauchanlage als Anwendungsbeispiel herangezogen. Diese besteht aus zwei Tauchzellen, die wiederum jeweils eine Taucheinheit beinhalten. Eine Taucheinheit besteht aus einem Tank mit einer Hubsäule. Der Deckel des Tanks wird durch einen Hubsäulenmotor bewegt. Die Stromversorgung des Motors ist durch eine elektrische Sicherung geschützt, die in einem externen Hauptschalschrank eingebaut ist.

Im erläuternden Beispiel tritt während des Produktionsprozesses eine Störung am Hubsäulenmotor des Tankdeckels auf. Der Instandhalter muss die Fehlerursache feststellen und diese anschließend beheben. Zur Unterstützung soll ihm das IAS dienen, das die notwendigen Informationen zur Fehlersuche und -behebung bereitstellt.

Da es sich vor allem um Arbeitsabläufe in der Instandhaltung handelt, richtet sich der Fokus des entwickelten Konzepts auf die Modellierung der entsprechend relevanten Artefakte, sodass eine adäquate Modellierung bestehender Artefakte aus dem Engineering als gegeben vorausgesetzt und nicht näher erläutert wird. Zudem werden in diesem Beitrag aus Platzgründen lediglich repräsentative Ausschnitte von Artefakten gezeigt, um das Prinzip des entwickelten Konzepts zu erläutern.

Das Konzept definiert SysML als zentralen Punkt für die Modellierung von Artefakten einer TD, da es die meisten der in Abschnitt 2 genannten Anforderungen erfüllt. Die AAS wird genutzt, um zusätzliche Informationen zu speichern, die nicht in SysML modelliert werden können, wie z. B. CAD- und Simulationsmodelle. Die dritte Technologie, iiRDS, wird für die spezifischere semantische Definition von allgemeinen SysML Elementen genutzt. Durch die Möglichkeit, SysML zu erweitern, soll eine Harmonisierung der drei Technologien analysiert werden. Im Folgenden wird mit Hilfe des bereits eingeführten Anwendungsbeispiels die Integration des Konzepts gezeigt. Die SysML-Diagramme enthalten in der Kopfzeile neben den Diagrammtiteln die Zuordnung zu den jeweiligen Räumen und Schichten des SMTD in eckigen Klammern. Abbildung 2 zeigt die Systemstruktur der Tauchanlage und deren Wechselbeziehungen zum Lokationsraum (Abbildung 2a) sowie der jeweiligen Funktionsschicht (Abbildung 2b). Die erste neu definierte SysML-Erweiterung betrifft die semantische Annotation der SysML-Diagramme selbst. Beispielsweise enthält jedes Block Definition Diagramm (bdd) in Abbildung 2 einen zusätzlichen Block mit Metadaten, die das Diagramm semantisch mit Klassen aus dem iiRDS anreichern. Dazu gehört die Klasse „documentType“ und „informationSubject“. Am Beispiel erklärt, ist der Dokumententyp der Systemstruktur ein „TechnicalDrawingDiagram“ gruppiert in der Rubrik „TechnicalOverview“. Vom iiRDS werden Werte für die Klassen vordefiniert. Sind die benötigten Werte nicht vorhanden, wird das Attribut entweder leer gelassen oder neue Werte müssen definiert werden. In den gezeigten Beispielen werden die Werte leer gelassen (s. Abbildung 2a „informationSubject“). Abbildung 2 zeigt zudem die Wechselbeziehungen zwischen den Artefakten der unterschiedlichen Räume bzw. Schichten. Beispielsweise ist die Sicherung aus der Systemstruktur dem Ort „Hauptschaltschrank“ in der Lokationsstruktur zugeordnet. Dasselbe gilt für die Beziehung zwischen der System- und Funktionsschicht, wo die Funktion „DeckelBewegen“ der Hubsäule zugeordnet ist. Durch die breite Anwendbarkeit von SysML

sind definierte Beziehungen wie „allocate“ zu allgemein gehalten um damit bestimmte Informationen für ein IAS filtern zu können. Aufgrund dessen spezifiziert das hier vorgestellte Konzept neue Beziehungen basierend auf dem iiRDS. Am Beispiel von Abbildung 2b bedeutet dies, dass die „allocate“ Beziehung zwischen der Funktion „DeckelBewegen“ und seiner zugeordneten Komponente durch die „iiRDS:relates-to-component“ Beziehung ersetzt wird. Diese neu eingeführte Beziehung wird für jedes Element genutzt, das zu einer Komponente zugehörige Informationen beschreibt.

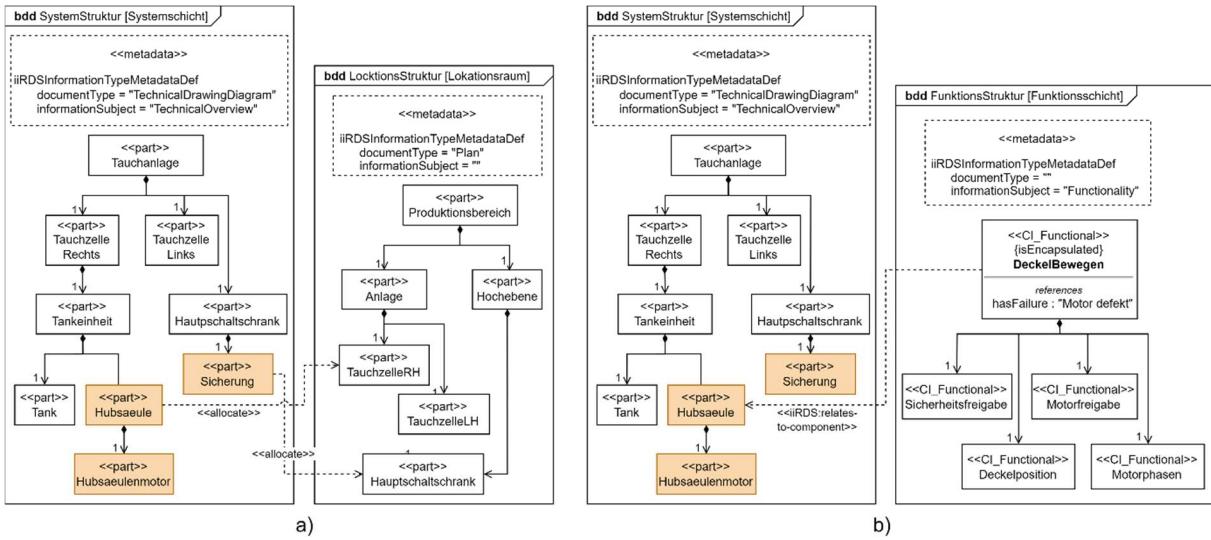


Abbildung 2: a) Wirkzusammenhänge zwischen Systemschicht und Lokationsraum, b) Wirkzusammenhänge zwischen System- und Funktionsschicht

Der Safety/Security-Raum modelliert relevante Modelle für das Risikomanagement, wie z. B. Fehlerbeschreibungen. Bezogen auf das Beispiel werden in diesem Beitrag lediglich die Safety-Aspekte betrachtet, jedoch gilt das gleiche auch für Security-Aspekte während einer Instandhaltungstätigkeit. Abbildung 3a zeigt ein Beispiel für die Beschreibung eines möglichen Fehlers des Hubsäulenmotors. Die hinzugefügten Metadaten kategorisieren das SysML-Artefakt als „TechnicalData“ unter der Rubrik „Functionality“. Die Wechselbeziehungen zeigen, dass der Fehler der Funktion „MotorBewegen“ zugeordnet und dass die Aktivität „tauscheHubsäulenmotor“ diesem Fehler zugeordnet ist. In diesem Fall gibt es noch keine definierte iiRDS Beziehung, die zur Spezialisierung verwendet werden kann, sodass in weiteren Arbeiten eine mögliche Erweiterung des iiRDS betrachtet werden muss.

Weitere Wechselbeziehungen im Beispiel treten zwischen dem Objektraum und seinen umliegenden Räumen auf. Das entwickelte Konzept sieht vor, sogenannte „encapsulated bdd's“ [11] zu nutzen, um mehr Informationen zu einem Objekt an einem zentralen Punkt zu referenzieren. Abbildung 3b zeigt die Umsetzung am Beispiel des Hubsäulenmotors. Das

Diagramm enthält alle referenzierten Elemente und integriert eine weitere Metadaten-Erweiterung, die das Referenzieren von VWS oder VWS-Elementen durch einen global eindeutigen Identifier ermöglicht.

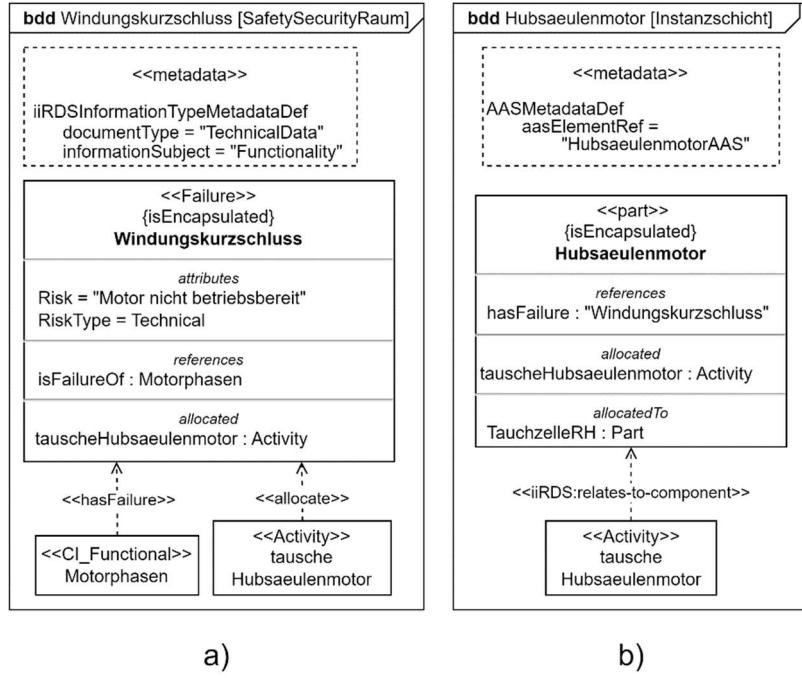


Abbildung 3: Wirkzusammenhänge zwischen Funktions-, Betriebsschicht und a) Safety/Security-Raum, b) Objektraum sowie nicht-SysML-Artefakten

Die letzten Artefakte, die einen wesentlichen Aspekt für ein IAS darstellen, sind die Aktivitätendiagramme in der Betriebsschicht des Lösungsraums. In diesen Diagrammen sind Sequenzen von Aktivitäten und Aktionen für eine Instandhaltungsaufgabe mit den von ihnen ausgehenden Gefahren für das Personal modelliert. Abbildung 4 zeigt hierzu beispielhaft die Hauptaktivität „tauscheHubsäulenmotor“ mit ihren verschachtelten Aktivitäten „LastfreiheitSicherstellen“ und „SpannungsfreiSchalten“.

Für einzelne Aktivitäten benötigt der Instandhalter zusätzliche Informationen, die nicht immer in SysML modelliert werden können. Zum Beispiel sind Informationen über die elektrische Verdrahtung des Motors und der Einbauort der vorgeschalteten Sicherung für die Aktivität „Spannungsfrei schalten“ relevant. Diese Informationen werden mit Hilfe der Annotation von den durch das Konzept definierten Metadaten modelliert. So ist in der Hauptaktivität von Abbildung 4 die durch eine Annotation von Metadaten angereicherte Einzelaktivität „SpannungsfreiSchalten“ dargestellt. Im Beispiel wird der Stromlaufplan referenziert, der z. B. in AML ([23]) modelliert und in einer AAS gespeichert werden kann. Zudem ordnen die iiRDS Klassen das SysML-Diagramm semantisch ein, wie es bereits in den Beispielen zuvor erklärt

wurde. Dasselbe Verfahren wurde auf die Aktivität „LastfreiheitSicherstellen“ mit der Aktion „Gegengewicht sichern“ angewendet, wobei hier eine Explosionszeichnung der Hubsäule als Hilfestellung für den Instandhalter referenziert ist. Die Aktivitätendiagramme selbst werden ebenfalls mit den zuvor eingeführten Metadaten angereichert. Hierbei ermöglicht iiRDS die semantische Deklaration der Diagramme als „MaintenanceInstruction“ und „SafetyInstruction“, die wiederum die Möglichkeit zur Filterung von Aktivitätendiagrammen bilden. Die generelle „allocate“ Beziehung zwischen einer Aktivität und den ihr annotierten Metadaten wird mit Hilfe der „iiRDS:relates-to-action“ Beziehung spezialisiert.

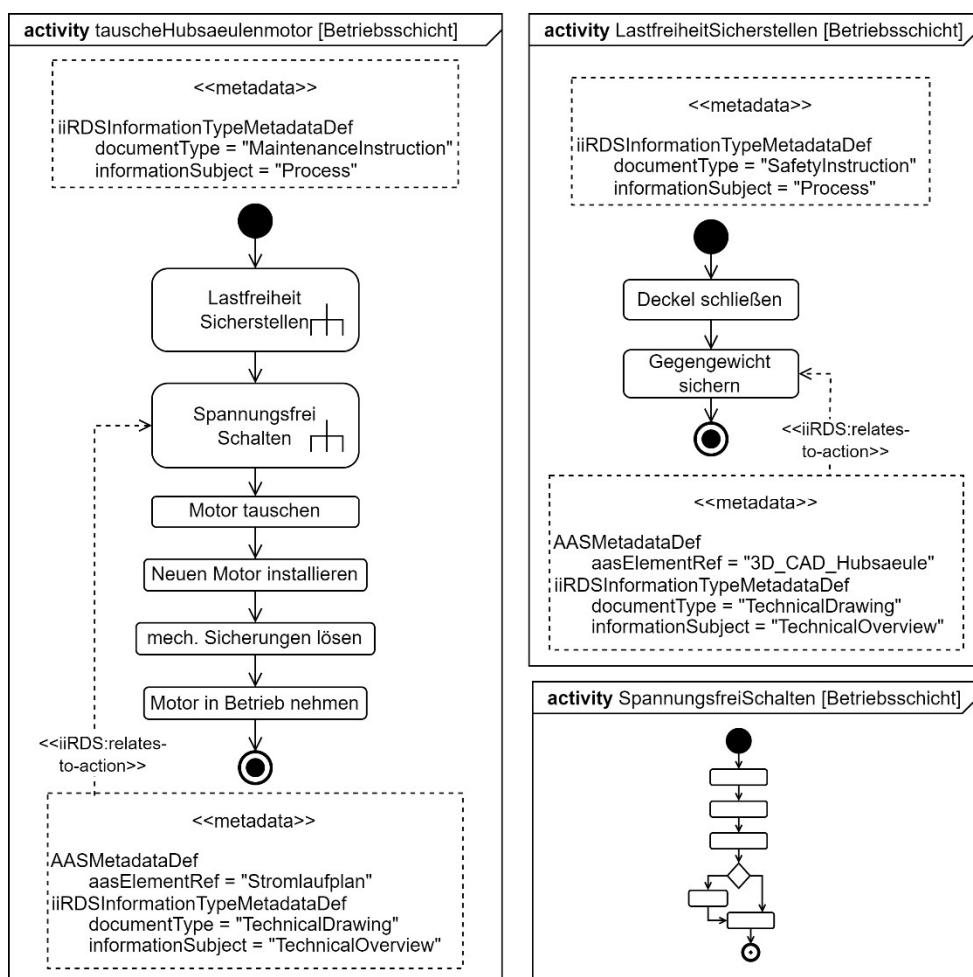


Abbildung 4: Wirkzusammenhänge zwischen der Betriebsschicht und nicht-SysML-Artefakten

Folgt man den gezeigten Diagrammen und nimmt als Einstiegspunkt an dem realen PS eine Motorstörung an, kann ein IAS mit den modellierten Informationen zuerst alle zu dem Motor in Beziehung stehenden Fehlermöglichkeiten anzeigen. Im Beispiel ist die Fehlerursache ein Wicklungskurzschluss im Motor. Mit der Fehlerbeschreibung aus dem Safety/Security-Raum kann die dazugehörige Aktivität gefunden werden, um die Ursache zu beheben. Parallel dazu verlinkt das Diagramm des Motors im Objektraum dessen Einbauort im Lokationsraum. Das

Aktivitätendiagramm für den Motortausch wird über das IAS dem Instandhalter angezeigt, wobei die zu einzelnen Aktivitäten verlinkten Metadaten durch das IAS interpretiert und dem Instandhalter bei der Ausführung der jeweiligen Aktivität zur Verfügung gestellt werden sollen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung von Produktionssystemen (PS) und -prozessen weiten sich auch im Bereich der technischen Dokumentation (TD) aus. Es existieren Bestrebungen, die heute noch überwiegend dokumentenbasierte TD in eine modellbasierte TD umzuwandeln, um einen Mehrwert aus den existierenden Informationen zu schaffen. In diesem Beitrag wurde ein Konzept für die Erstellung einer modellbasierten TD beschrieben, mit der die Wissensbasis für ein Assistenzsystem in der Instandhaltung (IAS) von PS geschaffen werden soll. Dazu wurde von den Autoren ein erweitertes Strukturmodell der TD entworfen, dass zur Strukturierung der einzelnen Artefakte einer TD dienen soll. Anhand eines Anwendungsfalls wurde die Integration des Modells mittels der Kombination der Modellierungssprachen SysML, AAS und iiRDS gezeigt. Die Autoren werden in fortführenden Arbeiten das Konzept in einem prototypischen IAS umsetzen sowie Methoden für die teilautomatisierte Erstellung der modellbasierten TD entwickeln.

6. Danksagung

Diese Arbeit wurde als Teil von dem Projekt „Digitaler Zwilling eines heterogenen Maschinenparks zur Komplettbearbeitung von Bauteilen und der Montage für eine effiziente, 3D-basierte Mitarbeiterassistenz“ unter dem Förderkennzeichen 13IK028G unterstützt, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz finanziert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] S. A. Afolalu, S. O. Nwankwo, und T. M. Azeez, „Evolution of Maintenance Processes in Industry 4.0 - A Review“, in 2024 SEB4SDG, Apr. 2024, S. 1–9. doi: 10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629886.
- [2] R. Robers und M. Fritz, „From Manuals to “Information on Demand” with iiRDS“, Whitepaper, Feb. 2022. Zugegriffen: 3. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iirds.org/fileadmin/downloads/documents/Whitepaper_2-2022_iiRDS.pdf
- [3] H. Dhiman und C. Röcker, „Worker Assistance in Smart Production Environments Using Pervasive Technologies“, in 2019 IEEE PerCom Workshops, März 2019, S. 95–100. doi: 10.1109/PERCOMW.2019.8730771.

- [4] R. Schlagowski, L. Merkel, und C. Meitinger, „Design of an assistant system for industrial maintenance tasks and implementation of a prototype using augmented reality“, in 2017 IEEE IEEM, Dez. 2017, S. 294–298. doi: 10.1109/IEEM.2017.8289899.
- [5] N. Koppaetzky und D. Nicklas, „Towards a model-based approach for context-aware assistance systems in offshore operations“, in 2013 IEEE PERCOM Workshops, März 2013, S. 55–60. doi: 10.1109/PerComW.2013.6529456.
- [6] INCOSE, „Systems Engineering Vision 2035 - Engineering Solutions for a Better World“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.incose.org/docs/default-source/se-vision/incose-se-vision-2035.pdf?sfvrsn=e32063c7_10
- [7] J. Fuchs, J. Schmidt, J. Franke, K. Rehman, M. Sauer, und S. Karnouskos, „I4.0-compliant integration of assets utilizing the Asset Administration Shell“, in 2019 24th IEEE ETFA, Sep. 2019, S. 1243–1247. doi: 10.1109/ETFA.2019.8869255.
- [8] M. Stolze, M. Barth, und C. Diedrich, „Semantische Verknüpfung von Informationsmodellen für Maschinen und Anlagen - Ein Systemmodell für die technische Dokumentation“, in 25. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, Juli 2024, S. 207–227.
- [9] S. G. Kunnen, D. Adamenko, R. Pluhnau, und A. Nagarajah, „An Approach to Integrate Risk Management in Cross-structure SysML-models“, Proceedings of the Design Society: ICED, 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.364.
- [10] A. Barthelmey, D. Störkle, B. Kuhlenkötter, und J. Deuse, „Cyber Physical Systems for Life Cycle Continuous Technical Documentation of Manufacturing Facilities“, Procedia CIRP, Bd. 17, S. 207–211, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.01.050.
- [11] OMG, „OMG Systems Modeling Language™ (SysML®) - Part 1: Language Specification Version 2.0 Beta 2“. Februar 2024.
- [12] iiRDS Consortium, „tekom iiRDS Standard“. Zugegriffen: 3. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iirds.org/materials/version-12>
- [13] DIN, „DIN ISO 15226:2017-03 - Technische Produktdokumentation - Lebenszyklusmodell und Zuordnung von Dokumenten“. 2017.
- [14] VDI/VDE 2206 - Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. 2021.
- [15] VDI 2221 Blatt 1 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. 2019.
- [16] J. Ponn und U. Lindemann, Konzeptentwicklung und Gestaltung Technischer Produkte. Springer Berlin Heidelberg, 2011.

- [17] K. E. T. Kernschmidt, „Interdisciplinary structural modeling of mechatronic production systems using SysML4Mechatronics“, Technische Universität München, 2019. Zugegriffen: 2. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/1453653>
- [18] C. Bremer, „Systematik zur Modellierung flexibler Produktionsanlagen im Model-Based Systems Engineering“, Universität Paderborn, 2020. Zugegriffen: 25. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/3436748>
- [19] R. Drath, AutomationML: The Industrial Cookbook. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2021. doi: doi:10.1515/9783110745979.
- [20] W. Mahnke, S.-H. Leitner, und M. Damm, OPC Unified Architecture. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-68899-0.
- [21] R. Drath u. a., „Diskussionspapier – Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML - Zielbild und Handlungsempfehlungen für industrielle Interoperabilität“, Diskussionspapier, Apr. 2023.
- [22] IDTA, „IDTA 02063-1-0 - Intelligent Information for Use“. März 2025. Zugegriffen: 3. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2025/03/IDTA-02063-1-0_Submodel_IntelligentInformationForUse.pdf
- [23] R. Gudder, D. Hoffmann, P. Hünecke, und A. Lüder, „Integrated Engineering Data Transformation: An AutomationML-Based Approach for Efficient Data Exchange“, in 2024 29th IEEE ETFA, Sep. 2024, S. 01–04. doi: 10.1109/ETFA61755.2024.10710965.