

Integration verschiedener Informationstechnologien in der Verwaltungsschale am Beispiel von AAS und AutomationML

Arndt Lüder* (Universität Magdeburg, Austrian Center for Digital Production Wien), Jan Blume (Fraunhofer IOSB), Miriam Schleipen (EKS Intec), Matthias Freund (Festo SE & Co. KG), David Hoffmann, Pooja Gupta (Universität Magdeburg)

*Otto-v.-Guericke Universität /FMB/IAF/PSA
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Deutschland
arndt.lueder@ovgu.de

1 Einleitung

Die zunehmende Digitalisierung von Produktionssystemen nimmt unter dem Schlagwort Industrie 4.0 eine zunehmende Dynamik an. Es entstehen dabei eine wachsende Anzahl von Demonstratoren, Technologiestudien, Anwendungsempfehlungen und betrachteten Anwendungsfällen [KW2022], die in der Mehrheit hin zu standardisierten Lösungen zur Informationsbereitstellung, -übertragung, und -nutzung weiterentwickelt werden sollen [VEP2019].

Die dabei entstehende Vielfalt von Entwicklungen wird jedoch zunehmend zum Problem. In teilweise parallel-laufenden Anstrengungen werden dieselben oder stark überlappende Anwendungsfälle betrachtet, konkurrierende Informationsmodelle geschaffen, verschiedene Technologien für denselben Anwendungsfall propagiert und sich teilweise widersprechende Standards angestrebt [Hoppe2023]. Dies ist vor dem Hintergrund der verschiedenen Standards, die zu berücksichtigen und ggf. geeignet zu kombinieren sind [DIN2023], zwar richtig, jedoch kann und wird dieses unkoordinierte Vorgehen für Endanwendende, die in die Standardisierungsaktivitäten nicht involviert sind und denen eventuell der tiefere Einblick fehlt, zunehmend zum Problem. Diese stellen sich also vermehrt die Frage, welche Investitionen die richtigen sind und welche Entwicklungsrichtungen für sie den nachhaltigsten Nutzeffekt erbringen können. Dies führt derzeit leider sehr häufig zum Aufschieben von Investitionsentscheidungen, was einen negativen Einfluss auf die Dynamik der Entwicklung der Industrie 4.0 hat [JEK2019].

Erste Arbeiten zur Harmonisierung der verschiedenen Technologien und Standards werden bereits seit einigen Jahren verfolgt und haben bereits erste Ergebnisse erbracht [HS2014]. Um diesem Problem jedoch nachhaltig entgegenzutreten, wird in einem gemeinsamen Diskussionspapier von VDMA, IDTA, OPC Foundation und AutomationML e.V sowie einigen größeren Unternehmen eine Integrationsstruktur für verschiedene Datenaustauschtechnologien vorgeschlagen [DMH2023]. Das Diskussionspapier beschreibt dabei eine Vorgehensweise, mit welcher die 3 Technologien AutomationML, OPC-UA, und AAS interoperabel verwendet werden können, um sich gegenseitig zu ergänzen und damit die jeweiligen Stärken bestmöglich auszunutzen. Um diese zum Leben zu erwecken sind jedoch einige Designentscheidungen zu treffen, die einen erheblichen Einfluss auf die Nutzbarkeit der Integration in der praktischen Anwendung besitzen.

Der AutomationML e.V. hat nun mit Blick auf die Datenaustauschtechnologien AAS und AutomationML einen ersten Vorschlag vorgelegt. Dieser betrachtet vorrangig die Integration von Engineering-Daten in eine AAS-basierte Industrie 4.0 Verwaltungsschale ohne jedoch eine Anwendung der entwickelten Ideen auch auf Verwaltungsschalen allgemein zu verhindern. Im Rahmen

dieses Beitrages soll diese Integrationsmethode vorgestellt und deren Auswirkungen an einem Implementierungsbeispiel diskutiert werden.

2 Grundlagen

Im Rahmen der Industrie 4.0 wird mit dem Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 [DIN2016] ein Framework spezifiziert, indem mit der Industrie 4.0 Komponente intelligente und mit self* Eigenschaften ausgestattete Funktionseinheiten kooperativ flexible Produktionssysteme realisiert werden. Diese Industrie 4.0 Komponenten bestehen aus zwei Grundelementen, dem eigentlichen cyber-physischen System, das eine Funktionalität im Produktionssystem bereitstellt und als Asset bezeichnet wird, sowie der Industrie 4.0 Verwaltungsschale, die als digitales Abbild und digitaler Zugang zur Komponente anzusehen ist [WEG2017]. Diese Struktur wird sowohl international diskutiert [MAP2018] als auch in ersten Prototypen realisiert [BCB2021, JBM2023].

Aufgabe der Industrie 4.0 Verwaltungsschale ist es, das von ihr beschriebene Asset und alle über dieses zum aktuellen Zeitpunkt bekannten Informationen für Nutzer gemäß den Ideen der IEC 62890 verfügbar zu machen [IEC2017]. Dazu stellt das Asset eine Informationsstruktur bereit [PI2022], die in Grundzügen in Bild 1 dargestellt ist. Neben einer Informationsmenge zur Identifikation des Assets werden mit den sogenannten Teilmodellen (Engl.: Submodels) Informationen bereitgestellt, die jeweils für verschiedene Anwendungsfälle entlang des Lebenszyklus des Assets dienen. Dabei werden in [PI2020] noch keine spezifischen Teilmodelle festgelegt. Dies erfolgt derzeit im Rahmen der IDTA (Industrial Digital Twin Association), die sich eine koordinierte Erstellung der Teilmodelle auf die Fahnen geschrieben hat (siehe <https://industrialdigitaltwin.org/content-hub/teilmodelle>).

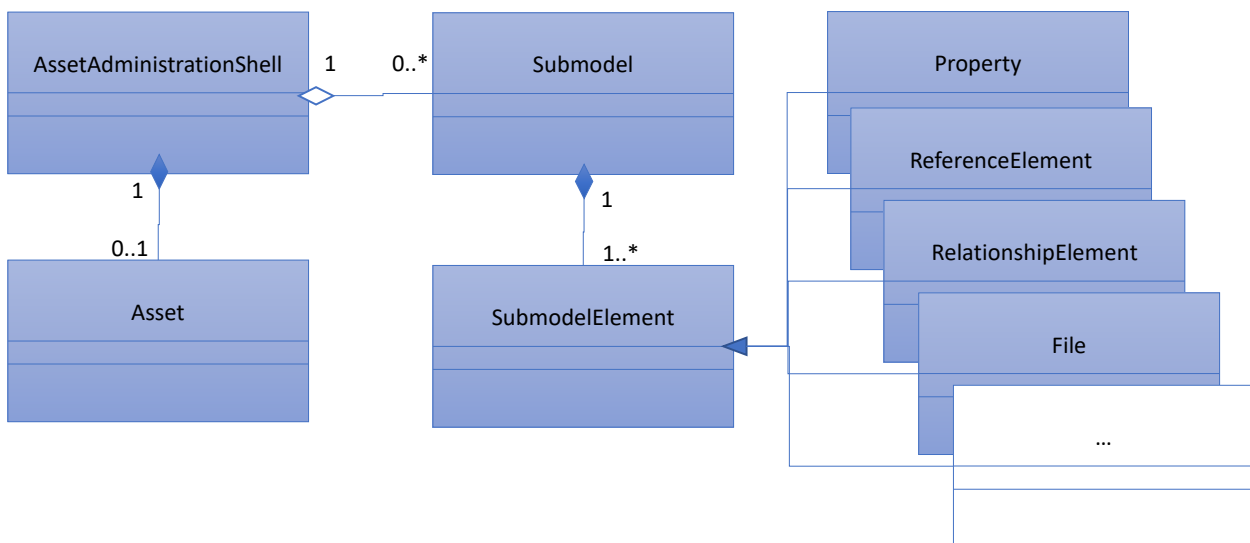


Bild 1: Informationsstruktur der Verwaltungsschale (in Anlehnung an [PI2022])

Zur technischen Realisierung einer Verwaltungsschale werden in [PI2022] neben dem AASX Format auch Formate wie AutomationML und OPC UA Knotenmodelle vorgeschlagen. Dies löst jedoch nicht die oben genannte Problematik der fehlenden Harmonisierung.

In diesem Dokument soll der Fokus auf AASX als Basis zur Umsetzung einer lebenszyklusübergreifenden Verwaltungsschale liegen. Eine Abbildung aller im Lebenszyklus relevanter Informationen, würde jedoch zu einer Neumodellierung von bekannten und bereits betrachteten Informationsmengen in einem weiteren Datenformat führen. Dies muss vermieden werden. In [DMH2023] wird vorgeschlagen, dass für Informationsmengen zu einem Asset eher eine quellen- und senkenorientierte Auswahl der Implementierungstechnologien zu verwenden ist. Dabei wird

vorgeschlagen, Informationsmengen, mit starkem Bezug zur Laufzeitphase eines Assets über OPC UA Knotenmodelle, Informationsmengen mit starkem Bezug zur Entwurfsphase eines Assets über AutomationML, und Informationsmengen, die einen organisation- bzw. lebenszyklusübergreifenden Bezug besitzen, über AAS abzubilden. Zur Integration soll dann, wie in Bild 2 gezeigt, zwischen Teilmodelle und Detailmodellen unterschieden werden. Für Entwurfs- und Laufzeitdaten sollen die Detailmodelle alle relevanten Daten enthalten und in den entsprechenden Technologien (AutomationML und OPC UA) verfügbar sein. Diese werden dann über Teilmodelle, in denen nur der lebenszyklusübergreifende Anteil dieser Informationen direkt publiziert wird, referenziert werden. Im AutomationML e.V. wird derzeit (in Kooperation mit dem DIAMOND Projekt¹) an der Realisierung der entsprechenden Teilmodell-Vorlagen (Submodel Templates) als Blaupause für die Integration gearbeitet, die dann in der IDTA standardisiert werden sollen.

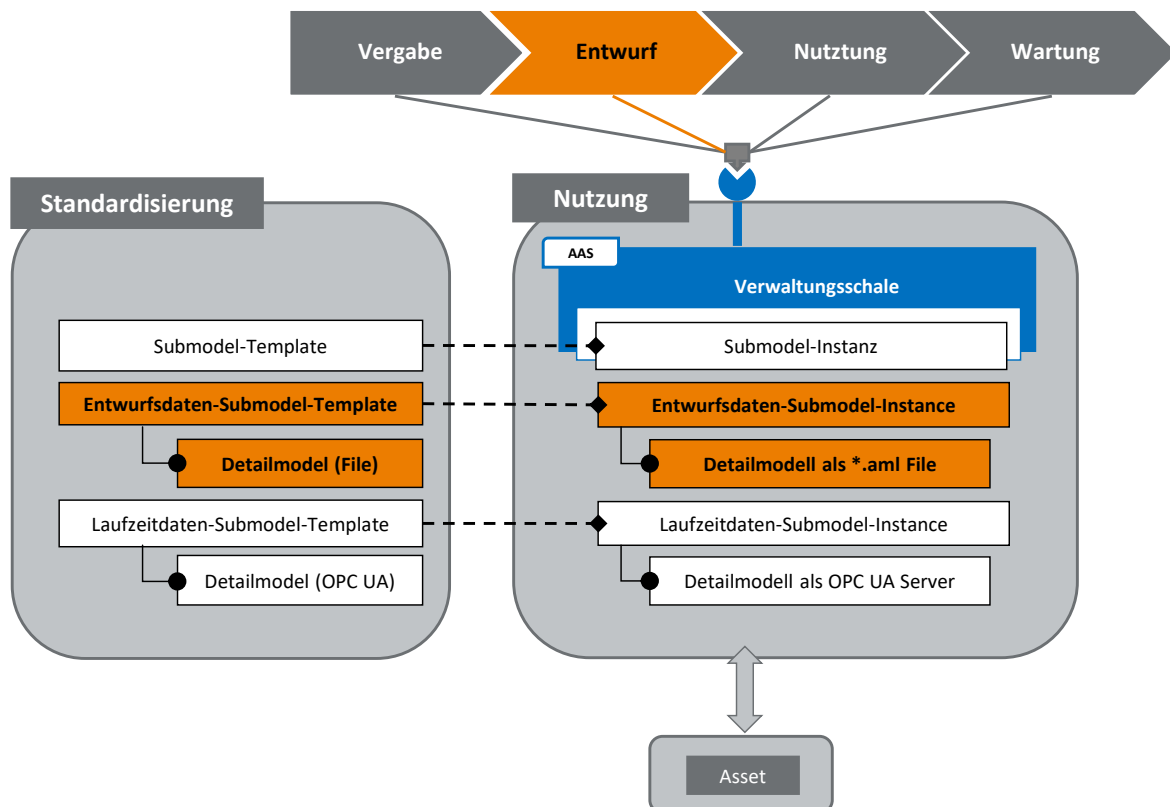


Bild 2: Integrationsstruktur der Verwaltungsschale (in Anlehnung an [DMH2023])

Das AutomationML Datenaustauschformat wird vom AutomationML e.V. als offene und kostenfreie, herstellernerneutrale und XML-basierte Datenaustauschtechnologie für den Informationsaustausch entlang der Entwurfsnetzwerke für Produktionssysteme entwickelt. Es ermöglicht die Abbildung von Objekthierarchien als sogenannte *InstanceHierarchy*, in deren Rahmen für Objekte als (ggf. von *SystemUnitClasses* abgeleiteten) *InternalElements* abgebildet werden. Diese *InternalElements* können Semantiken als *RoleClass*, Eigenschaften als *Attribute* und Beziehungen zu anderen Objekten als Kombination aus (von *InterfaceClasses* abgeleiteten) *ExternalInterfaces* und *InternalLinks* besitzen [Drath2022].

Für die Abbildung von Entwurfsdaten für spezifische Anwendungsfälle im Entwurf von Produktionssystemen stellt AutomationML anwendungsfallspezifische *Role-* und

¹ diamond-project.de

InterfaceClassLibraries bereit, die in den verschiedenen Teilen des AutomationML Standards beschrieben werden [LSD2017].

Wie in [LBB2020, BRL2021, LMB2022] beschrieben wird, kann AutomationML als Datenaustauschformat für Entwurfsnetzwerke in einfacher Form verwendet werden. Dabei wird eine, als Common Concepts benannte und an die Teilmodell-Struktur der Verwaltungsschale angelehnte Modellierungsmethode verwendet. Bild 3 zeigt dabei beispielhaft die sich ergebende Datenstruktur für zwei durch ein Kabel verbundene Automatisierungsgeräte. Für jedes Objekt des zu modellierenden Produktionssystems entsteht ein *InternalElement*, das jeweils anwendungsfallsspezifische *InternalElements* mit den anwendungsfallsspezifischen Semantiken, Attributen und Relationen enthält.

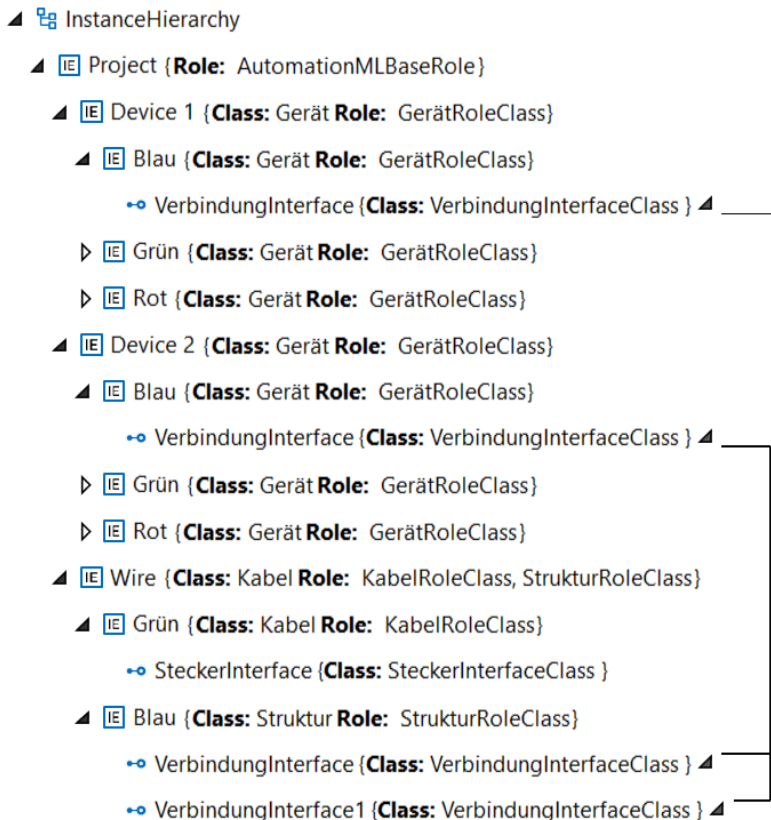


Bild 3: Common Concept basierte AutomationML Modellstruktur für Entwurfsnetzwerke (in Anlehnung an [LMB2022])

3 Integrationsmethode

Ziel der hier vorgestellten Integrationsmethode für AutomationML Projekte in AAS ist die transparente Integration von Entwurfsdaten, welche in einem oder mehreren AutomationML-Projekten enthaltenen sind, in einem Teilmodell einer Verwaltungsschale. Dazu werden derzeit (wie in Bild 4 gezeigt) drei Integrationsbausteine definiert, die gemeinsam verwendet werden können.

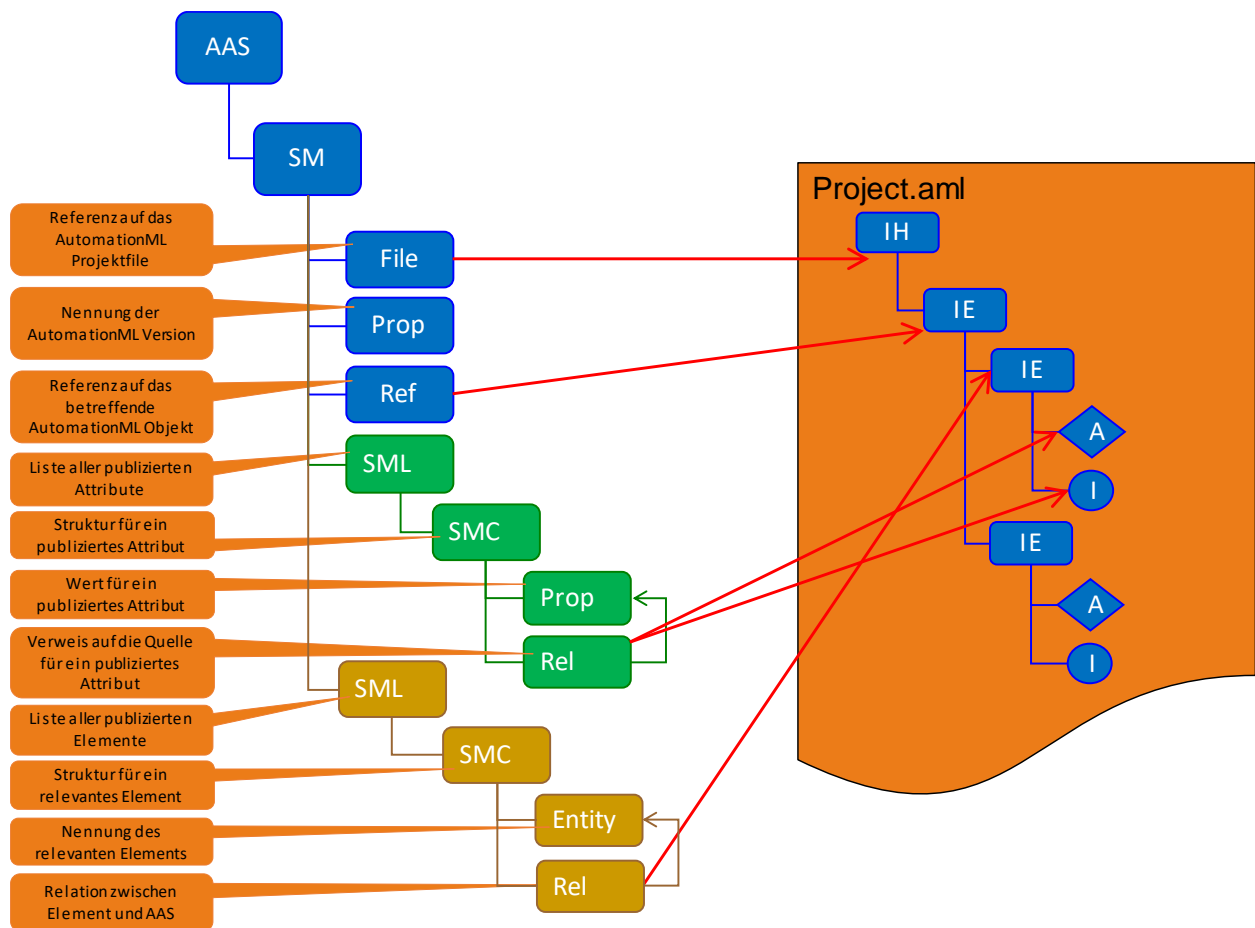


Bild 4: Generelle Integrationsstruktur

Der erste Integrationsbaustein (blauer Anteil in Bild 4) ermöglicht die Integration von AutomationML-Dateien sowie das einfache Referenzieren von Inhalten dieser Dateien aus einem Teilmodell heraus. Damit wird die einfache Weitergabe der Entwurfsdaten über eine Verwaltungsschale adressiert. Dazu soll dieses Teilmodell zwei verpflichtende und ein optionales Teilmodell-Element (Engl.: Submodel Element) enthalten. Das erste verpflichtende Submodelelement ist ein Datei-Element (Engl.: File Element). Es soll als *AutomationMLData* benannt sein, eine Referenz auf das AutomationML Projektfile sowie als *SemanticID* einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/FileReference` enthalten. Das zweite verpflichtende Teilmodell-Element ist ein als *AutomationMLVersion* benanntes Property Element, das die im AutomationML Projekt verwendete AutomationML Version angibt und als *SemanticID* einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/VersionNumber` enthält. Auf Basis dieser Property können Parser entscheiden, ob sie die AutomationML Daten verarbeiten können. Das optionale Element wird durch ein Referenzelement gebildet. Dieses soll als *AutomationMLElementReference* benannt sein, als *SemanticID* einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/ElementReference` enthalten und der Benennung des relevanten Einstiegspunktes zur Nutzung des AutomationML Files dienen, falls dies nicht die Wurzel der *InstanceHierarchy* ist.

Der zweite Integrationsbaustein (grüner Anteil in Bild 4) ermöglicht das Publizieren von einzelnen Attributwerten aus einem AutomationML Projekt in einem Teilmodell zwecks lebenszyklusübergreifender Weitergabe. Dazu muss ein Teilmodell ein verpflichtendes Teilmodell-Element vom Typ *SubmodelElementList* enthalten. Dieses soll *AutomationMLAttributesList* heißen und als *SemanticID* einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/AttributeList` enthalten. Inhalt dieser Liste sollen Teilmodell-

Elemente vom Typ `SubmodelElementCollection` sein. Jedes dieser Elemente dient zum Publizieren eines Attributes und soll als `SemanticID` einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/AttributeContainer` enthalten. Jedes dieser attributbezogenen Elemente besteht dann aus zwei `SubmodelElements`. Das erste Teilmodell-Element ist vom Typ `Property`, trägt den Namen des zu repräsentierenden Attributes und enthält dessen Wert und hat als `SemanticID` einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/AutomationMLAttribute`. Das zweite Teilmodell-Element ist vom Typ `RelationshipElement`, trägt den Namen `RelationBetweenPropertyAndAttribute`, hat als `SemanticID` einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/ElementReference` und enthält eine `ExternalReference` auf das AutomationML Attribute über eine `FragmentReference` sowie eine `ModelReference` auf das `PropertyElement`.

Der dritte Integrationsbaustein (gelber Anteil in Bild 4) ermöglicht das Identifizieren relevanter Teilstrukturen bzw. Elemente in einem AutomationML Projekt aus einem Teilmodell heraus. Dazu muss dieses Teilmodell ein verpflichtendes Teilmodell-Element vom Typ `SubmodelElementList` enthalten. Dieses soll `AutomationMLElementList` heißen und als `SemanticID` einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/ElementList` enthalten. Inhalt dieser Liste sollen Teilmodell-Elemente vom Typ `SubmodelElementCollection` sein. Diese enthalten als `SemanticID` den String `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/ElementContainer`. Jede `SubmodelElementCollection` besteht dann aus einem `Entity` Element und einem `RelationshipElement`. Das Entity Element soll das entsprechende AutomationML Element abbilden, den Namen des betreffenden AutomationML Elementes tragen und als `SemanticID` einen String der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/ElementReference` enthalten. Das `Relation` Element dient der Verlinkung des Entity Elementes und des AutomationML Elementes, trägt den Namen `RelationBetweenElementAndAAS`, enthält eine `SemanticID` der Form `https://www.automationml.org/AutomationML_AAS_SemanticIDs/General/AASRelation` und verweist über eine `ExternalReference` vom Typ `FragmentReference` auf das betreffende AutomationML Element sowie über eine `ModelReference` auf das Entity Element.

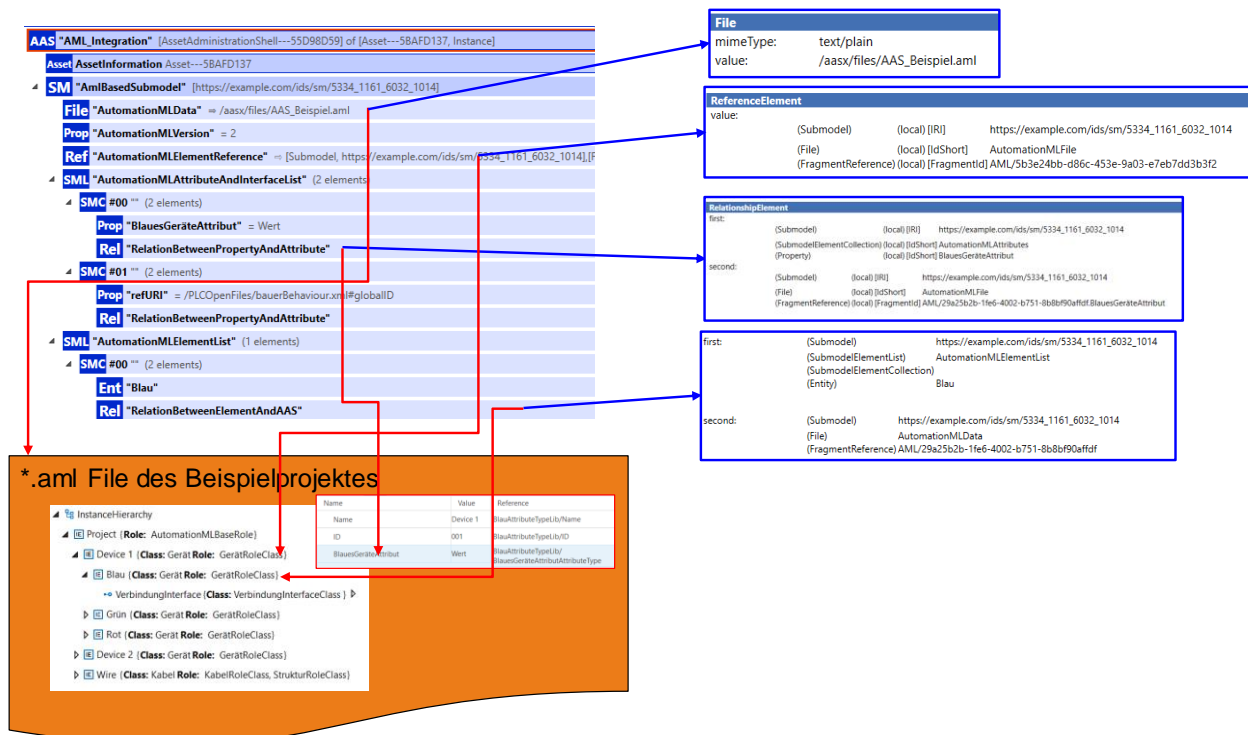


Bild 5: generisches Anwendungsbeispiel

Bild 5 zeigt ein Beispiel, in dem alle drei Integrationsbausteine auf das AutomationML Projektbeispiel aus Bild 3 angewendet werden.

In bestimmten Fällen können bestehende Teilmodelle bereits die im AutomationML Projekt enthaltenen Attribute und Elemente abbilden. Um hier Redundanzen zu vermeiden können diese in die oben beschriebene Modellierung eingebunden werden. Im Falle von Attributen entfällt dann das *Property* Element und es wird im *Relationship* Element auf das entsprechende *Property* Element des bestehenden Teilmodelles verwiesen. Im Falle eines AutomationML Elementes (das dann als Entity bereits in einem anderen Teilmodell benannt ist) wird analog verfahren und das *Entity* Element entfällt.

Ebenso ist es wichtig zu wissen, ob eine Änderung von Inhalten im AutomationML Projekt die Inhalte im Teilmodell ändern muss oder ob dies umgekehrt der Fall ist, wer also als Data-Owner zu sehen ist. Dies wird über die *Relationship* Elemente in den *SubmodelElementCollection* abgebildet. Die im *first* Teil des *Relation* Elementes genannte Seite ist für diesen Informationsinhalt zuständig. Die andere hat „nur“ Leseberechtigung.

4 Beispiel einer technischen Realisierung

Als Validierung der beschriebenen Methode wurde durch die Autoren der Otto-von-Guericke Universität die in Bild 6 dargestellt prototypische Realisierung für die Integration implementiert und getestet.

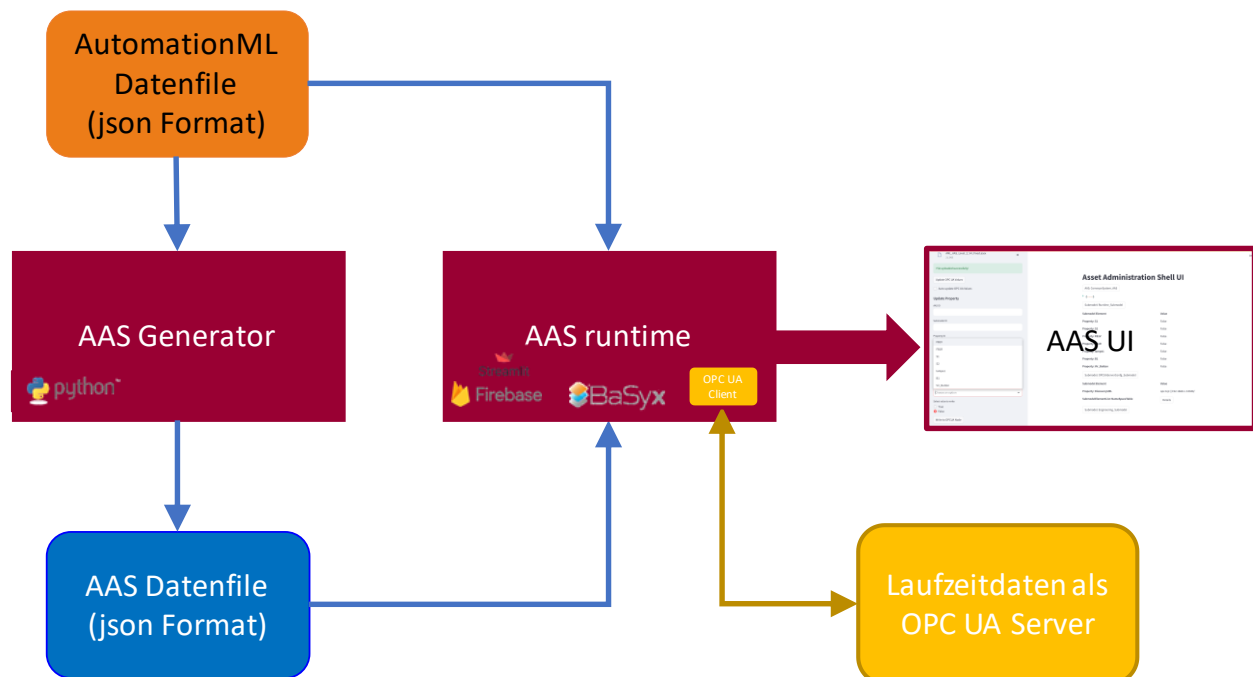


Bild 6: Prototypische Realisierung

Grundideen dieser Implementierung sind (a) eine Zweiteilung hinsichtlich Informationsmodellierung und Informationsnutzung, (b) eine klare Aufgabenverteilung entlang der 3 Technologien AutomationML, OPC-UA, und AAS entlang des Lebenszyklus von Produktionssystemen und (c) die Nutzung frei verfügbarer Implementierungstechnologien. Entsprechend entstanden zwei Softwaresysteme.

Das erste Softwaresystem implementiert in Python die automatische Generierung einer Verwaltungsschale entsprechend der obigen Beschreibung auf Basis eines AutomationML Datenfiles, das

als json File verfügbar ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass im AutomationML Datenfile die Assets über eine AutomationML Struktur in Analogie zu [LBB2020] und [BRL2021] gestaltet sind und in deren Substrukturen die Teilmodelle über entsprechende Rollen aus [AML2019] und die in AAS abzubildenden Attribute über eine AAS Facette gekennzeichnet sind. Im Ergebnis erzeugt das erste Softwaresystem ein entsprechendes AAS Datenfile, das ebenfalls als json File gestaltet ist.

Das zweite Softwaresystem implementiert unter Nutzung des BaSyx Python SDK, Streamlit und Firebase eine AAS Laufzeitumgebung. Diese Laufzeitumgebung nutzt (a) explizit die Key Value Pair Struktur von json und die damit mögliche Integration beider Informationssätze in einer Firebase Datenbank, die zu einer Transparenz der Herkunft von Informationen führt, und (b) integriert sie OPC UA Clients zur Gewinnung von Laufzeitdaten auf Basis der Darstellung des Zugangsweges zu OPC UA Knoten in einem OPC UA Server gemäß [AML2017].

Mit den beiden Softwaresystemen ist es möglich aus Entwurfsdaten automatisch Verwaltungsschalen zu generieren, diese mit OPC UA basierten Laufzeitdaten zu verknüpfen und die dabei entstandene Verwaltungsschale als Server zur Nutzung zur Verfügung zu stellen.

5 Erste Anwendungsfälle

Im Rahmen des Diamond Projekts werden derzeit gemeinsam mit der Tool Chain Arbeitsgruppe das AutomationML e.V. erste Teilmodelle standardisiert. Diese gliedern sich in den Entwurfsprozess von Produktionssystemen ein und stellen dessen Ergebnisse für spätere Lebenszyklusphasen zur Verfügung. Als ein Anwendungsbeispiel kann hier die Nutzung von Entwurfsdaten zum Assetmanagement genannt werden.

Im Rahmen der Dissertationsschrift [Langosch2024] wurde ein Informationsmodell vorgeschlagen, das die für das Assetmanagement im Automobilbau relevanten Entwurfsinformationen abbildet. Diese entstammen den Entwurfsschritten des Basic Engineering, der mechanischen und elektrischen Konstruktion sowie der Steuerungsprogrammierung oder kommen über Gerätebeschreibungen vom Lieferanten entsprechender Komponenten.

Im Rahmen des Diamond Projektes werden derzeit gemeinsam mit der Tool Chain Arbeitsgruppe das AutomationML e.V. die dazu passenden AutomationML Informationsmodelle sowie die dazu gehörenden AAS Teilmodelle

- Planning data for operators and maintenance,
- Detailed structure of production systems,
- MCAD,
- ECAD,
- PLC programming, and
- Robot online programming and simulation

entwickelt um diese gemeinsam mit der IDTA zu standardisieren. Damit wird ein verlustfreier Übergang von Entwurfsdaten zum Assetmanagement ermöglicht.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird der aktuelle Stand der vom AutomationML e.V. entwickelten Integrationsmethode von AutomationML und AAS in einer Verwaltungsschale vorgestellt, die gemäß dem Diskussionspapier der Verbände [DMH2023] mit dem Ziel entsteht, den größten Nutzen aus den jeweils integrierten Technologien für die Industrie 4.0 zu ziehen. Er zeigt, dass eine solche Integration problemlos möglich und technisch umsetzbar ist. In den aktuellen Arbeiten das

AutomationML e.V. sowie des DIAMOND Projektes wird diese Integrationsmethode weiter verfeinert und auf die ersten AutomationML basierten Informationsmodelle angewendet. Dies bildet die Basis für die Umsetzung entsprechender Teilmodell-Vorlagen für die Integration bestimmter Informationsmodelle, die in der IDTA standardisiert werden (siehe industrialdigitaltwin.org/content-hub/teilmodelle).

Acknowledgement

Diese Arbeit entstand mit Unterstützung der Christian Doppler Forschungsgesellschaft, dem Österreichischen Bundesministerium für Digitalisierung und Finanzen und der National Foundation for Research, Technology and Development Österreichs. Das Kompetenzzentrum Center for Digital Production wird im Rahmen des COMET – Competence Centers for Excellent Technologies Programmes durch das BMVIT, BMDW, und das Österreichische Bundesland unter Management der FFG gefördert.

7 Literatur

- [KW2022] H. Kagermann, W. Wahlster: Ten Years of Industrie 4.0, in: Sci, Volume 4, Issue 3, 2022, <https://doi.org/10.3390/sci4030026>.
- [VEP2019] N. Velasquez Villigran, E. Estevez, P. Pesado, J. de Juanes Marquez: Standardization: A Key Factor of Industry 4.0, in: 2019 Sixth International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG), 2019, P. 350–354. <https://doi.org/10.1109/ICEDEG.2019.8734339>
- [DIN2023] DIN: Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0 – Version 5, Januar 2023, <https://www.din.de/resource/blob/907746/be4b76ec37bc6b18b46dd15082865e92/nrm-industrie-4-0-version-5-2023-final-web-data.pdf>
- [JEK2019] R. Joppen, S. von Enzberg, A. Kühn, R. Dumitrescu: Investitionsentscheidungen vor dem Hintergrund der Digitalisierung am Beispiel Schaltschrankbau, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 114, no. 7-8, 2019, pp. 483-487. <https://doi.org/10.3139/104.112119>
- [Hoppe2023] S. Hoppe: Das Bindeglied schlechthin zwischen OT und IT, Automatisierung, Jahrgang 2023, Heft 5, S. 35-37, <http://www.austromatisierung.at/Ausgabe523/webpaper.html>.
- [HS2014] R. Henssen, M. Schleipen: Interoperability between OPC-UA and AutomationML. Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution, 8th International CIRP Conference on Digital Enterprise Technology, Procedia CIRP, Volume 25, 2014, Pages 297–304, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.042>.
- [DMH2023] R. Drath, C. Mosch, S. Hoppe, A. Faath, E. Barnstedt, B. Fiebiger, W. Schlögl: Diskussionspapier – Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML: Zielbild und Handlungsempfehlungen für industrielle Interoperabilität, <https://www.automationml.org/wpcontent/uploads/2023/04/Diskussionspapier-Zielbild-und-Handlungsempfehlungen-fuer-industrielle-Interoperabilitaet-5.3.pdf>.
- [PI2022] Plattform Industrie 4.0: Details of the Asset Administration Shell - Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0, https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf, Mai 2022.
- [DIN2016] DIN Spec 91345: Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI 4.0), Beuth publisher, April 2016,

https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:508042177081439:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1250,20,23819.

- [WGE 2017] Wagner C., Grothoff J., Epple U., Drath R., Malakuti S., Grüner S., Hoffmeister M., Zimmermann P.: The role of the Industry 4.0 Asset Administration Shell and the Digital Twin during the life cycle of a plant. In: Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA 2017), Limassol, Cyprus, 2017.
- [MAP2018] Ministry of Economy and Finances (France), Alliance Industrie du Futur (Italy), Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) and Plattform Industrie 4.0 (Germany): The Structure of the Administration Shell: TRILATERAL PERSPECTIVES from France, Italy and Germany, 2018, <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-trilaterale-coop.html>
- [BCB2021] S. Beden, Q. Cao and A. Beckmann, "Semantic Asset Administration Shells in Industry 4.0: A Survey," *2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, Victoria, BC, Canada, 2021, pp. 31-38, doi: 10.1109/ICPS49255.2021.9468266.
- [JBM2023] Jacoby M, Baumann M, Bischoff T, Mees H, Müller J, Stojanovic L, Volz F. Open-Source Implementations of the Reactive Asset Administration Shell: A Survey. *Sensors*. 2023; 23(11):5229. <https://doi.org/10.3390/s23115229>
- [IEC2017] International Electrotechnical Commission: IEC 62890 - Life-cycle management for systems and products used in industrial-process measurement, control and automation, Beuth publisher, April 2017.
- [Drath2022] Drath, R.: AutomationML: Das Lehrbuch für Studium und Praxis, Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2022. <https://doi.org/10.1515/9783110782998>.
- [LSD2017] A. Lüder, N. Schmidt, R. Drath: Standardized information exchange within production system engineering, In: Multi-disciplinary engineering for cyber-physical production systems: data models and software solutions for handling complex engineering projects - Cham: Springer-Verlag, S. 235-257, 2017
- [LBB2020] A. Lüder, L. Baumann, A. -K. Behnert, F. Rinker and S. Biffel, "Paving Pathways for Digitalization in Engineering: Common Concepts in Engineering Chains," *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, 2020, pp. 1401-1404, doi: 10.1109/ETFA46521.2020.9212009.
- [BRL2021] A. -K. Behnert, F. Rinker, A. Lüder and S. Biffel, "Migrating Engineering Tools Towards an AutomationML-Based Engineering Pipeline," *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Palma de Mallorca, Spain, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/INDIN45523.2021.9557517.
- [LMB2022] A. Lüder, K. Meixner, S. Biffel: Engineering Data Treasures, Their Collection and Use, IFAC-PapersOnLine, Volume 55, Issue 10, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.105.
- [AML2019] AutomationML e.V.: Application Recommendation - Asset Administration Shell (AAS) Representation Version 1.0.0, November 2019, https://www.automationml.org/wp-content/uploads/2022/04/Asset-Administration-Shell-Representation-V1_0_0.zip.
- [AML2017] AutomationML e.V.: Best Practice Recommendation – Data Variable, Version 1.0.0, May 2017, https://www.automationml.org/wp-content/uploads/2022/05/BPR_007E_BPR_DataVariable_V1.0.0.zip
- [Langosch2024] M. Langosch: Ideales Informationsmodell für die Übergabe digitaler Anlagenmodelle aus dem Engineering in den Fabrikbetrieb, Promotion, Otto-v.-Guericke Universität, Fakultät Maschinenbau, 2024, eingereicht.