

# Abschlussbericht

fortiss GmbH

Dokument-Version	1.0
Datum	27.03.2026
Berichtszeitraum	01.10.2022 – 30.09.2025
Verbreitungsgrad	Öffentlich
Projekt	BaSys4Transfer
Förderkennzeichen	16IS22089F
Laufzeit	1.10.2022 – 30.09.2025

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

## **Autoren**

Andreas Bayha, fortiss GmbH

Tarik Terzimehić, fortiss GmbH

Sebastian Bergemann, fortiss GmbH

<b>INHALTAUTOREN.....</b>	<b>2</b>
<b>INHALT .....</b>	<b>3</b>
<b>1 EINGEHENDE DARSTELLUNG DER ARBEITEN UND ERGEBNISSE .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....</b>	<b>4</b>
1.1.1 AP 1.1: Engineering-Sprachen .....	4
1.1.2 AP 1.2: Modellierungsumgebung .....	4
1.1.3 AP 1.3: Grafische Sprachen .....	7
1.1.4 AP 1.4: Engineering- und Prüfumgebung .....	8
1.1.5 AP 2.2: Konzeption von Netzwerk- und Sicherheitskonzepten .....	10
1.1.6 AP 3.1: Best-Practices für die Umsetzung von Anwendungsfällen.....	11
1.1.7 AP 3.2: Konformität .....	12
1.1.8 AP 3.3: Schulungskonzepte und Trainingsumgebung .....	16
<b>1.2 Andere wesentliche Ereignisse .....</b>	<b>17</b>
<b>2 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES .....</b>	<b>17</b>
<b>3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT .</b>	<b>17</b>
<b>4 NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>19</b>
<b>5 FORTSCHRITT AUF DEM VORHABENSGBIET BEI ANDEREN STELLEN.</b>	<b>20</b>
<b>6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN .....</b>	<b>20</b>
<b>REFERENZEN .....</b>	<b>23</b>

# 1 Eingehende Darstellung der Arbeiten und Ergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Arbeiten und Ergebnisse des Projektzeitraums aufgeführt und erläutert.

## 1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Um die Anwendbarkeit der Ergebnisse aus den Vorgängerprojekten zu verbessern, trägt die fortiss GmbH mit praxisorientierten Vorgehensmodellen und Werkzeugunterstützung für das Engineering von neuartigen flexiblen Anlagenarchitekturen zum Projekt bei: Um das Engineering mit BaSys zu vereinfachen und für größerem Maßstab anwendbar zu machen, bringt das am Projekt beteiligte Kompetenzfeld *Model-based Systems Engineering* ausgereifte Konzepte und Umsetzungen von Prüf- und Explorationsverfahren für Architekturen in das Projekt ein und macht diese für die Industrieautomatisierung mit BaSys nutzbar.

Im Folgenden werden die Aktivitäten und Ergebnisse der fortiss GmbH hierfür dargelegt. Dabei werden nur solche Arbeitspakete aufgeführt, an denen die fortiss GmbH beteiligt war.

### 1.1.1 AP 1.1: Engineering-Sprachen

Die Arbeiten im Arbeitspaket 1.1 wurden von der zentralen Forschungsfrage geleitet, wie Hochsprachen, die über mächtige Sprachkonstrukte zur Strukturierung und Komplexitätsbewältigung verfügen, effektiv für die Programmierung von – teils echtzeitfähigen – Abläufen in Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) genutzt werden können. Zur Beantwortung dieser Frage trug fortiss im ersten Schritt dazu bei, das Potenzial domänenspezifischer Engineering-Sprachen durch den Einsatz der Norm IEC 61499 und der Entwicklungsumgebung Eclipse 4diac zu evaluieren.

Dieser Ansatz demonstrierte, wie Automatisierungssysteme durch verteilte Applikationen komplexere Abläufe modular kapseln können. Hierbei flossen insbesondere auch Erfahrungen aus der Implementierung des BaSys 4.2-Demonstrators in das Projekt ein und lieferten Erkenntnisse über die Anwendbarkeit der Norm in realen Szenarien.

Anschließend unterstützte fortiss die Projektpartner dabei, die so gewonnenen Erkenntnisse bei der Adaption von Python für Steuerungsaufgaben einfließen zu lassen.

### 1.1.2 AP 1.2: Modellierungsumgebung

Die Arbeiten in Arbeitspaket 1.2 adressierten die Diskrepanz zwischen klassischen Automatisierungsmodellen, die starr auf Fertigungsprozesse fokussiert sind, und den dynamischen Anforderungen der Industrie 4.0. Die zentrale Forschungsfrage lautete daher: Wie lassen sich etablierte Modellierungssprachen aus dem Systems Engineering (SE) so adaptieren, dass sie Kommunikation, Interaktion und Wandelbarkeit moderner Fertigungsumgebungen abbilden können?

Als Ausgangspunkt um die Eignung von SE-Werkzeugen zu untersuchen, diente u.A. Auto-FOCUS3, ein Open-Source-Werkzeug zur Modellierung komplexer Systeme. Ergänzend dazu

brachte fortiss zudem Erfahrungen zum Engineering mit SysML aus dem SpesML-Projekt mit ein.

Um die so identifizierten Lücken zu den Anforderungen für Industrie 4.0 zu schließen, wurden neue domänenspezifische Modellsichten (*Viewpoints*) konzipiert, die über die klassische Automatisierung hinausgehen. Hierzu zählen:

- Der **SPS-Plattform-Viewpoint** (technische Infrastruktur),
- Der **Topologie-Viewpoint** (räumliche und logische Anordnung im Shop-Floor),
- Der **Produkt-(Rezept)-Viewpoint** (Prozessbeschreibung).

Diese konzeptionellen Arbeiten wurden anschließend technisch umgesetzt: Unter Nutzung des Eclipse Modeling Frameworks (EMF) wurden spezifische Editoren für diese Modelle für das Open-Source-Werkzeugs AutoFOCUS3 implementiert (siehe Abbildungen 1–3). Die Nutzung von EMF gewährleistet dabei eine konsistente, strukturierte und vor allem erweiterbare Modellierung der Architekturen und ermöglicht die Prüfung der Modelle auf Konformität und Konsistenz mit anderen Teilmodellen in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Schließlich konnte der Modellierungsansatz für den SPS-Plattform-Viewpoint in die Standardisierungsaktivitäten der IDTA als Teilmodellspezifikation "*Computing Platform Resources*" eingebracht werden.

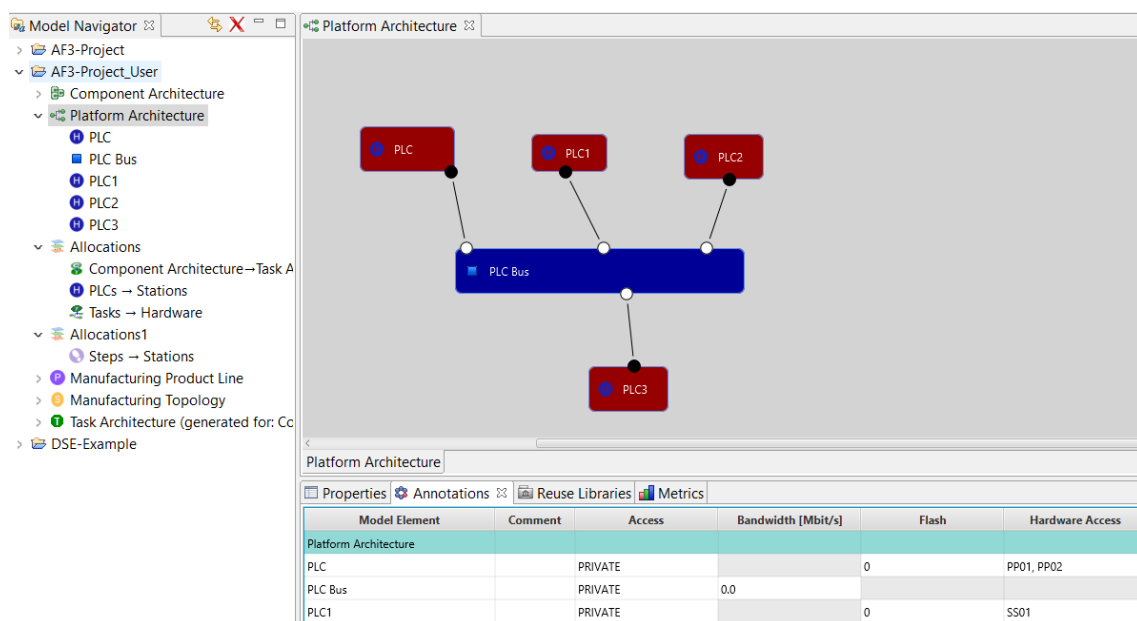


Abbildung 1 Editor für die Modellierung von SPS-Plattform

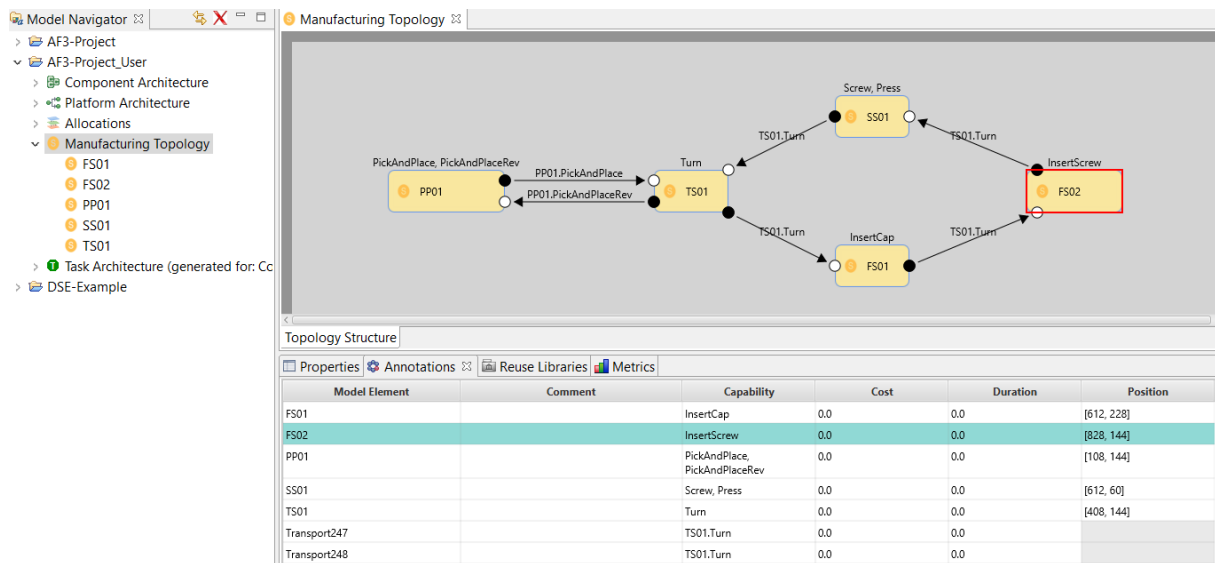


Abbildung 2 Editor für die Modellierung von Anlagentopologien

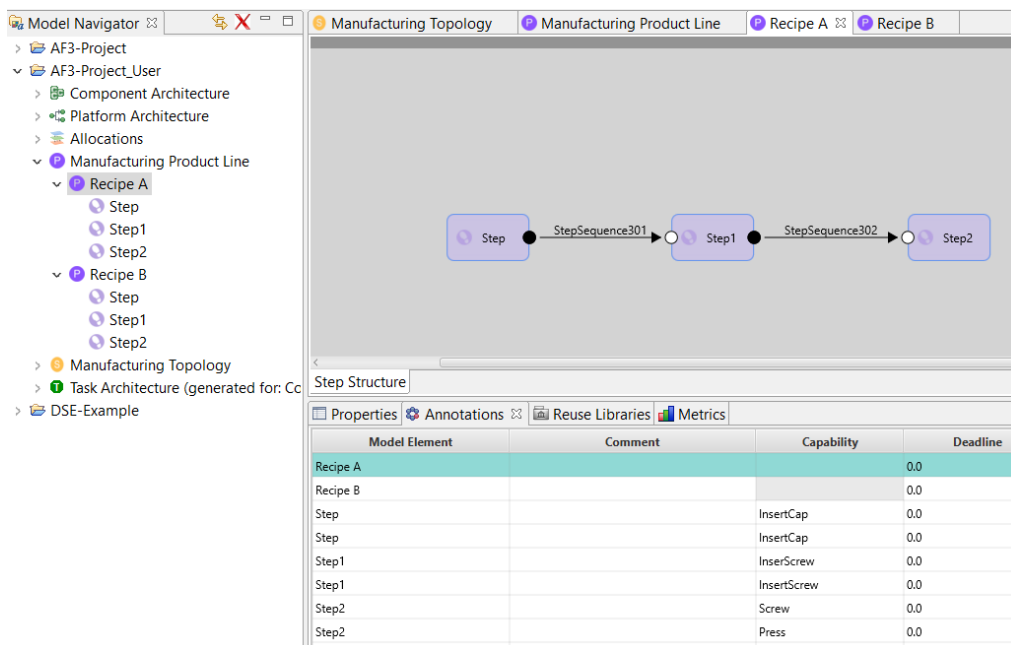


Abbildung 3 Editor für die Modellierung von Produkt-Rezepten

Ein weiterer wesentlicher Aspekt zur Unterstützung der Wandelbarkeit durch Modelle ist die Abstraktion von Fähigkeiten (*Capabilities*) der Automatisierungskomponenten darin. Im Rahmen der Fähigkeiten-Gruppe wurde in enger Kooperation mit den Partnern Festo und Lenze sowie der RWTH und dem IESE daher in diesem Arbeitspaket zudem ein Ansatz für fähig-

keitsbasiertes Engineering vorangetrieben. Die so erzielten Ergebnisse wurden in Publikationen veröffentlicht und durch die Partner in die Standardisierung bei der Plattform Industrie 4.0 eingebracht.

Abgerundet wurden die Arbeiten durch die Schaffung der Grundlagen zur Bewertung von Systemarchitekturen. Es wurden Metriken erarbeitet, um Anforderungen in Architekturmodelle messbar zu machen und die Qualität architektureller Designentscheidungen zu bewerten. Die Ergebnisse wurde in der Publikation "*Landscape of Architectural Design Decisions in Industry 4.0*" systematisiert hierbei die komplexen Entscheidungswege und bietet Architekten eine Orientierungshilfe bei modell-basierten Engineering von Anlagenarchitekturen. Diese Forschungsarbeiten haben zudem identifiziert und katalogisiert, welche Konflikte zwischen Architekturentscheidungen entstehen können. Zur Abwägung in solchen Fällen wurden sog. *Mitigation Constraints* definiert und als Grundlage für die Arbeiten an der Architektursynthese in AP1.4 formalisiert. Diese Ergebnisse wurden in der Publikation „*Mitigating Conflicts in Architectural Design Decisions for Evolving Manufacturing Systems: Evaluation and Recommendations for Practitioners*“ veröffentlicht.

## Ergebnisse

- Industrie 4.0 Modelle (Viewpoints), die in AutoFOCUS3<sup>1</sup> Modellierungsumgebung implementiert wurden
- Spezifikation des "Computing Platform Resources"-Teilmodells bei IDTA
- Diskussionspapier "Information Model for Capabilities, Skills & Services" der Plattform I4.0 [15]
- Publikation "Ontology-Based Capability Description of MTP Modules using AAS" auf VDI-Kongress AUTOMATION 2024 [7]
- Publikation „Landscape of Architectural Design Decisions in Industry 4.0“ auf Konferenz ETFA 2023 [2]
- Publikation “Mitigating Conflicts in Architectural Design Decisions for Evolving Manufacturing Systems: Evaluation and Recommendations for Practitioners” auf Konferenz ETFA 2024 [4]

### 1.1.3 AP 1.3: Grafische Sprachen

In diesem Arbeitspaket hat fortiss zur Orchestrierung auf den unteren Ebenen der Anlagenhierarchie beigetragen - d.h. zur Orchestrierung auf der Ebene von Modulen und Stationen. Da hier oftmals Echtzeitgarantien für komplexe Produktionsaufgaben erfüllt werden müssen,

---

<sup>1</sup> [www.af3.fortiss.org](http://www.af3.fortiss.org)

galt es die Brücke zwischen der Ebene atomarer Produktionsdienste (wie bsw. das Öffnen und Schließen eines Greifers) und der Ebene der durch BPMN orchestrierbaren höherwertigen Dienste (wie bspw. Werkstück zwischen zwei Bändern versetzen) zu schließen. Hierzu wurde ein Mechanismus zur automatischen Komposition von atomaren zu höherwertigen Diensten erarbeitet. Hierbei wird für eine gegebene Orchestrierungssequenz atomarer Dienste automatisch grafische IEC 61499 Modelle generiert, die die Orchestrierung in Echtzeit ausführen kann. Ab dieser Granularitätsebene wird es dann möglich, mittels BPMN die Orchestrierung der nicht echtzeitkritische Orchestrierung auf höherer Ebene durchzuführen.

Auf Seiten der BaSyx-Infrastruktur hat sich gezeigt, dass insbesondere auch für die Orchestrierungs-Dienste in komplexen Anlagenhierarchien ein vereinfachter Zugriff auf verteilte Systemkomponenten ermöglicht werden muss. Aus diesem Grund hat fortiss gemeinsam mit der Registry-Arbeitsgruppe ein Konzept für hierarchisch verteilte Verwaltungsschalenregistries erarbeitet und publiziert.

### Ergebnisse:

- Software-Prototyp für Service-Komposition, Orchestrierung und -Deployment mit IEC 61499 SPS-Programmiersprachen
- Publikation „Composing Services with SMT-Based Deployment Optimization and Service Merging Heuristic“ auf Konferenz ETFA 2023 [1]
- Publikation „Hierarchisch verteilte Verwaltungsschalen-Registries: Nutzung der Verwaltungsschale in verteilten Umgebungen“ auf Konferenz Automation 2024 [6]

#### 1.1.4 AP 1.4: Engineering- und Prüfumgebung

Die grundlegende Transformation von Industrie 3.0 zu Industrie 4.0 wird maßgeblich durch digitale und/oder Smarte Komponenten getrieben, deren Integration eine revolutionäre Änderung der Systemarchitekturen erfordert. Die zentrale Forschungsfrage dieses Arbeitspakets adressierte daher die praktische Umsetzbarkeit: Welche Fähigkeiten muss eine Engineeringumgebung besitzen, um Unternehmen – und insbesondere KMU – bei der Konzeption und Entwicklung solcher Anlagenarchitekturen zu unterstützen, und wie können sie durch Automatisierung unterstützt werden?

Ausgangspunkt war die Erkenntnis, dass die manuelle Konfiguration von Verwaltungsschalen, Teilmodellen und Infrastrukturkomponenten derzeit tiefgehendes IT- und Domänenwissen erfordert, was eine signifikante Nutzungshürde für Industrie 4.0 mit Technologien wie die BaSyx-Middleware darstellt. Ziel war es daher, diese Hürden durch intelligente Werkzeuge und standardisierte Modelle zu senken.

Um die Komplexität der Entwurfsentscheidungen handhabbar zu machen, wurde ein Ansatz zur automatisierten Architekturexploration entwickelt. In Zusammenarbeit mit den Partnern wurden zunächst relevante Szenarien für die Architekturbewertung spezifiziert. Davon ausgehend entwickelte fortiss ein Verfahren für die multidimensionale Architektursynthese aufbauend auf den Architektur-Viewpoints, -Metriken und den Mitigation Constraints des Arbeitspakets 1.2. Hierbei werden die folgenden Architekturentscheidungen unterstützt:

1. **Deployment:** Wo wird welche Softwarekomponente ausgeführt?

2. **Produktionsplanung:** Wie können Produktionsprozesse zeitlich auf einer Anlage durchgeführt werden?
3. **Topologie:** Wo im Shop-Floor kann welcher Produktionsschritt durchgeführt werden?

Das Verfahren wurde zunächst als Proof-of-Concept in einem Prototyp (PyArchSynch) umgesetzt, um die Machbarkeit zu demonstrieren. Diese Umsetzung des Verfahrens ist in Abbildung 4 dargestellt und wurde abschließend im Open-Source-Modellierungswerkzeugs Auto-FOCUS3 als Baustein für eine Engineering- und Prüfumgebung integriert.

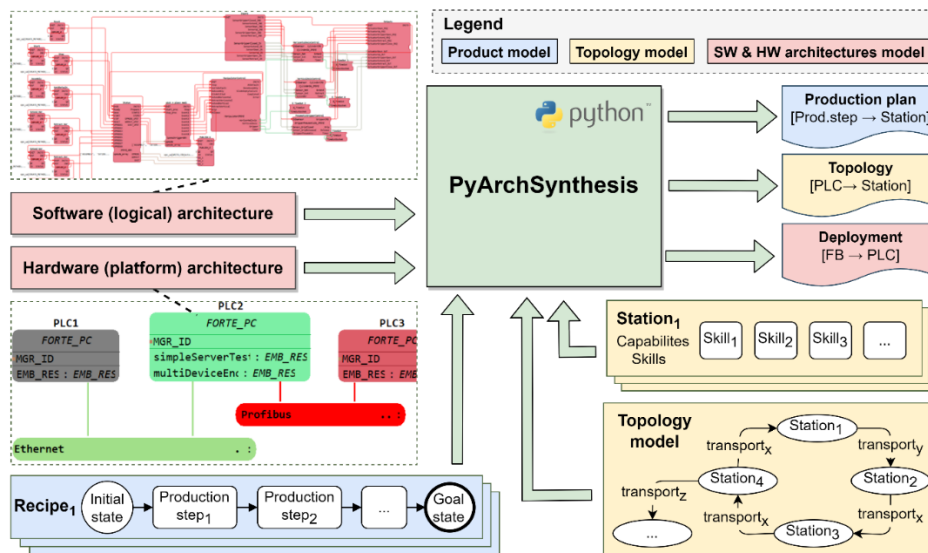


Abbildung 4 Prototyp für die mehrdimensionale Architektursynthese

Die Validierung dieses Ansatzes erfolgte am BaSys 4.2 Demonstrator, wodurch die Praxistauglichkeit der synthetisierten Architekturen nachgewiesen werden konnte. Diese Ergebnisse wurden als Artikel „Multi-Dimensional Design Space Exploration for Evolving Manufacturing Systems“ im renommierten Journal IEEE TII veröffentlicht.

Um die Best-Practices aus AP3.1 für das Engineering nutzbar zu machen, wurden die dort gesammelten Use-Cases aus der Industrie analysiert und die dazu minimal benötigten Datenpunkte für die Anwendung von I4.0-Teilmodellen extrahiert. Um Redundanzen zu vermeiden und die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurde eine kategorisierte Datensammlung mit einem Identifier-System erstellt. Dies ermöglicht nun ein schnelles Filtern der Anforderungen für spezifische Anwendungsfälle. Ein zentrales Ergebnis ist die Aufstellung eines minimalen Datenmodells (Kerndatenmodell, siehe Abbildung 5). Dieses Modell dient als Referenz, um abzugleichen, welche Teilmodelle und Properties für welche Use-Cases zwingend erforderlich sind und wo bestehende Templates angepasst werden müssen.

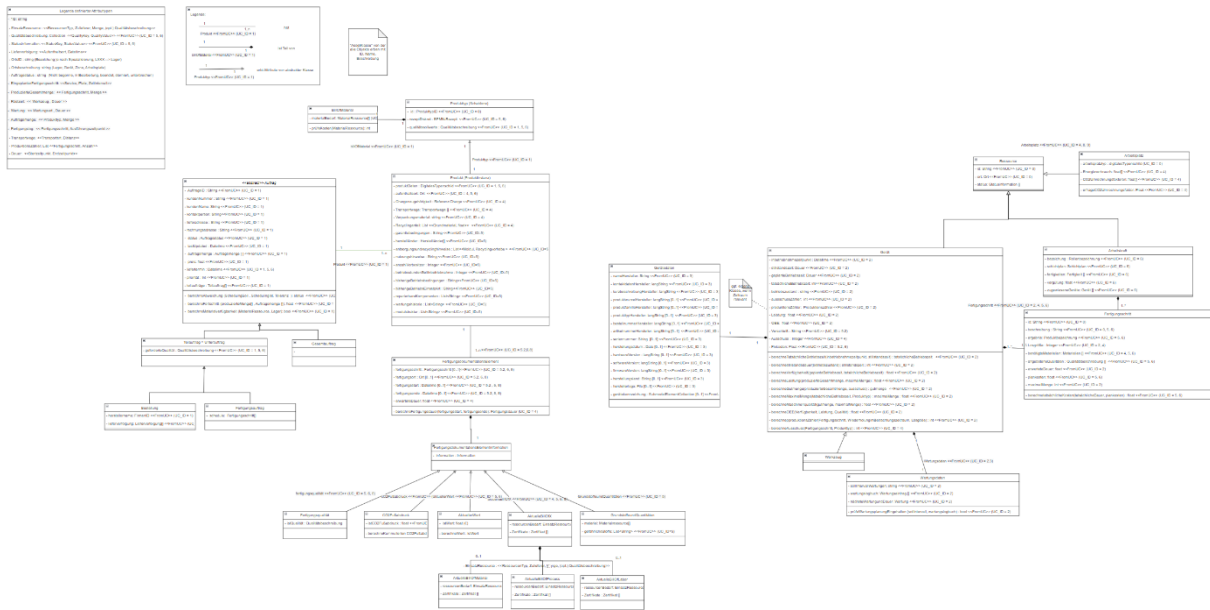


Abbildung 5 Aufgestelltes minimales Datenmodell für die I4.0 Use Cases

**Ergebnisse:**

- Spezifikation der Szenarien (Anwendungsfällen) für die Engineering- und Prüfumgebung
- Durchstichhafte Implementierung der multidimensionale Architekturexploration als Proof-of-Concept
- Plug-ins für Architekturoptimierung in AutoFOCUS<sup>31</sup> Open-Source-Werkzeug als Teil der Engineering- und Prüfumgebung
- Journal-Artikel „Multi-Dimensional Design Space Exploration for Evolving Manufacturing Systems“ in IEEE TII [5]
- Dissertation “Multi-Dimensional Design Space Exploration: Interplay of Architectural Design Decisions in Evolving Manufacturing Systems” [13]
- Datensammlung aller minimal benötigten Daten aus Teilmodellen für neun gebräuchliche I4.0 Use Cases
- Aufbereitetes UML-Datenmodell, dass alle Daten aus der vorherigen Datensammlung beinhaltet

**1.1.5 AP 2.2: Konzeption von Netzwerk- und Sicherheitskonzepten (wurde gemeinsam mit AP2.3 innerhalb der Security-Arbeitsgruppe bearbeitet)**

Die zunehmende Vernetzung der Fertigung offenbart in der Praxis häufig einen fundamentalen Zielkonflikt: Etablierte, starre IT-Sicherheitskonzepte stehen einer dynamisch aufgebauten Ende-zu-Ende-Kommunikation, wie sie die Industrie 4.0 fordert, oft entgegen. Die zentrale Forschungsfrage des Arbeitspakets 2.2 lautete daher: Wie können Sicherheitskonzepte entwickelt werden, die direkt in die BaSyx-Middleware integriert sind und sich dennoch nahtlos mit bestehenden Sicherheitsarchitekturen in Unternehmen harmonisieren lassen?

Basierend auf Erfahrungen aus vorangegangenen Anwendungsprojekten wurde der Ansatz verfolgt, Sicherheit nicht als externen Riegel, sondern als integrale Eigenschaft der BaSyx-Komponenten zu designen. Die Aufgaben von fortiss konzentrierten sich dabei auf die Ausarbeitung und Validierung von Konzepten, die später in AP 2.3 implementiert wurden. Ein wesentlicher Beitrag bestand in der Ausarbeitung des Authentifizierungskonzepts. Hierbei wurde definiert, wie sich Komponenten und Nutzer innerhalb der BaSyx-Infrastruktur verlässlich ausweisen können, um eine vertrauenswürdige Kommunikationsbasis zu schaffen. Um die Granularität der Zugriffe auf sensible Daten (wie AAS-Repositories und Teilmodelle) zu steuern, wurden zwei komplementäre Ansätze verfolgt und ausgearbeitet:

1. **Role-Based Access Control (RBAC):** Die Beiträge zu einer rollenbasierten Zugriffssteuerung umfassten die Diskussion der Anforderungen sowie detaillierte Reviews der Konzepte und Implementierungen. Ziel war es, Standard-Zugriffsmuster effizient abzubilden und administrativ beherrschbar zu machen.
2. **Attribute-Based Access Control (ABAC):** Da statische Rollen in hochdynamischen I4.0-Umgebungen oft an Grenzen stoßen, beteiligte sich fortiss zudem an der Strukturierung einer attributbasierten Zugriffssteuerung.

Dieser Ansatz ermöglicht es, Zugriffsentscheidungen dynamisch anhand von Kontextinformationen (Attributen) zu treffen – ein entscheidender Schritt für flexible Fertigungsnetze.

Durch die kontinuierliche Mitarbeit in Diskussionen und die Durchführung von Reviews zu den vorgestellten Sicherheitsmechanismen wurde sichergestellt, dass die entwickelten Lösungen (insbesondere für die BaSyx-Infrastruktur) robust sind und sich in die heterogenen Sicherheitslandschaften der Industrie integrieren lassen.

### **Ergebnisse:**

- Übersicht über die aktuelle Kommunikation und Datenströme innerhalb von BaSyx
- Dokumentation der RBAC-Anwendungsfälle
- Beitrag zu Ansatz und zur Erweiterung der BaSyx Middleware (V2) um RBAC und ABAC

#### **1.1.6 AP 3.1: Best-Practices für die Umsetzung von Anwendungsfällen**

Die erfolgreiche Einführung von Industrie 4.0 scheitert in der Praxis oft nicht an einem Mangel an Technologien, sondern an der enormen Komplexität ihrer Integration. Die zentrale Forschungsfrage dieses Arbeitspakets lautete daher: Welche „Lessons Learned“ können aus bisherigen BaSys-Projekten konserviert werden und welche Best Practices ermöglichen insbesondere KMU eine einfache Umsetzung ihrer Anwendungsfälle?

Um den Wissenstransfer von der Forschung in die Industrie zu verstetigen, war ein erster wesentlicher Schritt die Schaffung einer methodischen Grundlage zur Informationserfassung. Hierzu wurde ein standardisierter „Steckbrief“ (Template) entwickelt. Dieser ermöglicht es, Best-Practice-Beispiele strukturiert aufzunehmen und die Nutzung von Eclipse BaSyx konsistent zu dokumentieren. Diese Steckbriefe dienen nicht nur der reinen Dokumentation, sondern bilden auch die Grundlage für die in AP1.4 entwickelten Engineering- und Prüfumgebungen, indem sie reale Anforderungen und bewährte Lösungswege systematisch zugänglich machen.

Schließlich wurde gemeinsam mit AP2.1 ein Verfahren entwickelt, das Daten aus pdf-Datenblättern mittel generativer KI (große Sprachmodelle, LLMs) in VWS-Teilmodelle übertragen kann und diese zugleich semantisch annotieren kann. Die Entwicklung und Implementierung dieses Verfahrens fand federführend beim Partner SMS Group statt, während fortiss vor allem bei der wissenschaftlichen Evaluation unterstützen konnte. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einer Publikation beim VDI-Kongress AUTOMATION 2025 veröffentlicht.

### Ergebnisse:

- Template ("Steckbrief") zur Erfassung von Best-Practices und zur Erfassung der Anwendungsfälle
- Aufstellung von Anwendungsfällen wie Daten in der Verwaltungsschale genutzt werden
- Sammlung (Tabelle) aller bisher genutzter Daten und Dienste basierend auf den vorherigen Use Cases als Grundlage für das Datenmodell in AP1.4
- Publikation *Extraktion von technischen Daten mit LLMs – Extraction of Technical Data Using LLMs – Experience Report and Evaluation Based on Asset Administration Shells* [14] bei AUTOMATION 2025

#### 1.1.7 AP 3.2: Konformität

Die Realisierung von Industrie 4.0 scheitert oft an der mangelnden Interoperabilität zwischen Geräten, Herstellern und Daten. Im Zentrum von Arbeitspaket 3.2 stand daher die Forschungsfrage, wie die Datenqualität und Konsistenz digitaler Zwillinge für die herstellerübergreifende Zusammenarbeit überprüft werden kann, und wie diese in handhabbare Konformitätsklassen unterteilt werden können.

Um Konformität bewertbar zu machen, wurde zunächst ein umfassendes Klassifizierungsschema für Konformitäts- und Konsistenzbeziehungen entwickelt. Dieses Schema (siehe Abbildung 5) erlaubt es, die komplexen Abhängigkeiten innerhalb und zwischen Teilmodellen und anderen Datenquellen systematisch zu ordnen. Die Grundannahme für das Schema ist, dass es für Konformität, und zum Teil auch für Konsistenz, immer eine Quelle und ein Ziel gibt. Die Quelle ist das Artefakt, das den Soll-Zustand beschreibt und das Ziel ist das Artefakt, das den Ist-Zustand darstellt, welches "konform" zu dem Soll-Zustand, also der Quelle sein soll. Als Artefaktklassen wurden zusammengefasst: "Conventions" (Standards, Protokolle, Templates, etc.), "Infrastructure" (Server, Netzwerke, etc.), "Physical Asset" (der physikalische Zwilling, z.B. Produktionsmaschine), "Digital Twin Artifact" (der digitale Zwilling, z.B. dessen Teilmodelle), und "External Artifact" (zusätzliche Daten wie Tabellen, Simulationsmodelle, etc.). Je nach Quelle-Ziel-Paar können unterschiedliche Kriterien für die Konformität eine Rolle spielen, z.B. die Komposition der Daten, das Verhalten, oder die reine Syntax. Darauf aufbauend wurde ein Katalog spezifischer Konformitätsklassen für BaSys-Verwaltungsschalen und Engineering-Modelle erstellt und dokumentiert.

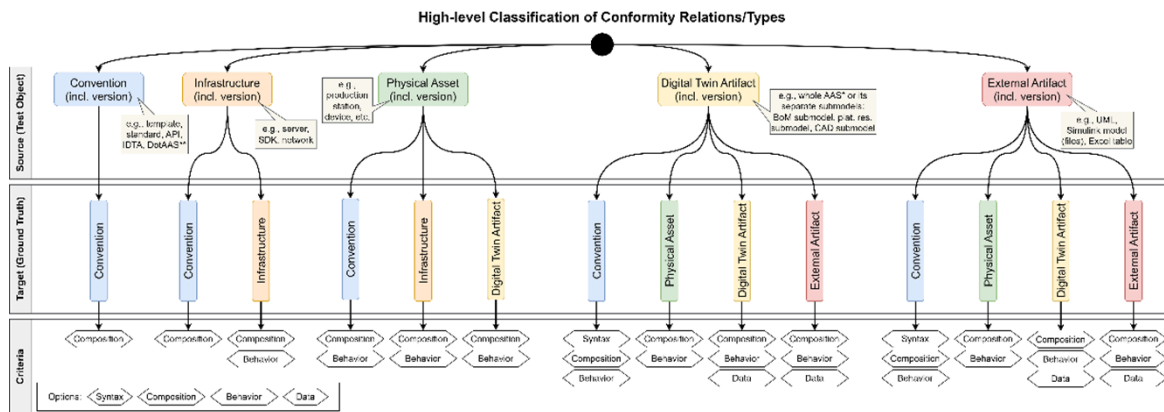


Abbildung 6 Überblick über das Klassifizierungsschema von Konformitätstypen

Das zentrale technische Ergebnis dieses Arbeitspakets ist das Konzept und die prototypische Realisierung eines zentralen Konsistenz- und Konformitätscheckers (siehe Abbildung 6). Dieser fungiert als unabhängige Komponente, die über dedizierte Adapter mit verschiedenen Modellierungswerkzeugen (insbesondere der BaSyx-Middleware und AutoFOCUS3) kommuniziert. Die innovativen Merkmale dieser regelbasierten Prüfung sind:

- Middleman-Adapter-Konzept:** Tools senden Überprüfungsanfragen an einen zentralen Checker, z.B. wenn sich bei ihnen ein Modell geändert hat und eine neue Inkonsistenz mit anderen Modellen daher möglich ist. Diese Anfragen geschehen pro Tool über einen eigenen Adapter. Die Adapter vermitteln dabei zwischen der tool-spezifischen Logik und Modellstruktur und dem zentralen Checker, so dass die Überprüfung auch zwischen heterogenen Modellen und Tools stattfinden kann. Der zentrale Checker ist mit einer REST-API ausgestattet, über die die Adapter einfach und verschlüsselt mit dem Checker kommunizieren können. Dadurch sind die Adapter auch unabhängig in ihrer Programmiersprache. Der zentrale Checker ist in Java programmiert, während wir schon diverse Adapter in Java, Python und C++ aufgestellt haben, je nachdem, was sich besser für das jeweilige Modellierungstool anbietet. Soll ein neues Modellierungstool mit seinen Modellen in die Konsistenzprüfungsumgebung aufgenommen werden, muss nur ein neuer Adapter dafür geschrieben werden. Dies ist kein großer Aufwand, denn man kann einfach Templates von den bisherigen Adaptern übernehmen und nur den Teil austauschen, der dafür zuständig ist, die vom Checker angefragten Modelldaten über das jeweilige Tool auszulesen und in ein einheitliches Datenformat zu transformieren, womit der Checker arbeiten kann. Durch dieses Konzept ist eine einfache Erweiterbarkeit sichergestellt und auch dass Modelldaten nicht zentral abgespeichert werden müssen, sondern weiterhin bei ihren bestehenden Tools verbleiben können.
- Regel-Engine:** Der zentrale Checker ermittelt auf Basis benutzerdefinierbarer Regeln, welche Daten benötigt werden, fragt diese über die Adapter an und evaluiert basierend darauf die Konsistenz. Die Regeln sind dabei mit einem Type-Scope versehen, so dass der Checker bei Eingang einer Überprüfungsanfrage für bestimmte Modellelemente nur die Regeln auswählen muss, die überhaupt etwas mit den geänderten bzw. zu überprüfenden Elementen zu tun haben könnten. Basierend auf einem Linkmodell, das alle wichtigen Verlinkungen zwischen den unterschiedlichen Modellen und Artefakten

enthält, kann der Checker dann erkennen von welchem Tool und Modell er welche spezifischen Informationen braucht, um die gefilterten Regeln evaluieren zu können. Dieses minimal benötigte Datenset wird von den jeweiligen Tool-Adaptoren angefragt. Die Adapter können aufgrund von Verfügbarkeit oder Vertraulichkeit diese Anfragen auch ablehnen oder nur zum Teil beantworten. Aus diesem Grund kann der Checker die Anfrage und Evaluation einer Regel auch unabhängig von allen anderen Regeln ausführen, damit eine blockierte Regel nicht die gesamte Überprüfung verhindert. Nach Erhalt der Daten wird ein Evaluator, aktuell basierend auf OCL, ausgeführt, der für jede Regel und minimalen Datensatz ein Boolean-Ergebnis zurückgibt; ob die Regel für die aktuellen Daten erfüllt ist oder nicht, was gleichbedeutend ist mit dem Status, ob die Modelle nach dieser einen Regeln nach konsistent sind oder nicht. Aus der Summe aller Ergebnisse wird ein Feedback erstellt, das an den Adapter von der Überprüfungsanfrage zurückgeschickt wird. Das Feedback, wie vorher auch schon die Regeln und die Datenanfrage bei den Adaptern, wird dabei basierend auf Zugriffsrechte gefiltert (ABAC – attribute-based access control). Zusammen mit dem Anfordern von nur minimalen Datensets und einer durchgehenden Verschlüsselung der ausgetauschten Daten bietet die so realisierte Konformitäts- und Konsistenzüberprüfung auch schon einen hohen Vertraulichkeitsstandard in Bezug auf die Modelldaten.

- **Integration:** Der Konsistenzchecker ist mit dem BaSyx-SDK und dem Semantic Matching Service integriert (siehe Abbildung 7). Der Semantic Matching Service wurde auch im Rahmen vom Arbeitspaket 3.2 vom Partner RWTH aufgebaut und mit Hilfe von fortiss in die Konsistenzüberprüfung integriert. Er hilft dabei Vorschläge zu machen, welche Modellelemente verknüpft sein könnten, damit dann der Konsistenzchecker die Konsistenzregeln genau auf deren Instanzdaten evaluieren kann.

Die hohe wissenschaftliche Relevanz der entwickelten Konzepte wurde durch Publikationen auf internationalen Fachkonferenzen untermauert, darunter die MODELS-C 2023, die MODELS-C 2024 und die SAM 2025.

Über die Theorie hinaus wurde die Praxistauglichkeit durch Tests mit Industriepartnern (vor allem Festo) sichergestellt. Dabei wurden Konsistenzprüfungen in BaSyx-Teilmodellen und OPC-UA Informationsmodellen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Kooperation wurden der Öffentlichkeit im Rahmen der BaSys Roadshow präsentiert, wo gemeinsam mit Festo und Rexroth ein funktionsfähiger Demonstrator des Checkers die automatisierte Prüfung von Konformitätsbeziehungen vorgestellt wurden.

### Ergebnisse:

- Dokumentation der vereinbarten Klassifizierung von Konformität und Konsistenz, welche Terminologie, den Klassifizierungsbaum und die Beschreibung der einzelnen Konformitätsklassen beinhaltet.
- Implementierungskonzept und Schnittstellendefinition eines Konsistenzcheckers, der auch für Konformitätschecks benutzt werden kann.
- Prototypische Implementierung eines Konsistenz- und Konformitätschecker mit Anbindung an die BaSyx, OPCUA und an das Modellierungswerkzeug AutoFOCUS3<sup>1</sup>

- Publikation „Towards Confidentiality in Multi-Model Inconsistency Detection for Systems Engineering“ bei MODELS-C 2023 [3]
- Publikation „Modular Consistency Checking Between Heterogeneous Models Without Direct Data Exchange Between Collaborators“ bei MODELS-C 2024 [8]
- Publikation “Mind the Leak: Formalizing Confidentiality Preservation Assessment of Multi-Model Consistency Checking Systems” bei SAM 2025 [10]
- Ablage der Dokumentation sowie Verlinkung zum Code-Repository des Konsistenzcheckers durch einen Wiki-Beitrag im allgemeinen BaSysx-Wiki: [https://wiki.basysx.org/en/latest/content/concepts/conformity\\_and\\_consistency](https://wiki.basysx.org/en/latest/content/concepts/conformity_and_consistency)
- Präsentation und Demonstration des Konsistenzcheckers auf der BaSys Roadshow an einem BaSys-OPC-UA-Fallbeispiel gemeinsam mit Festo

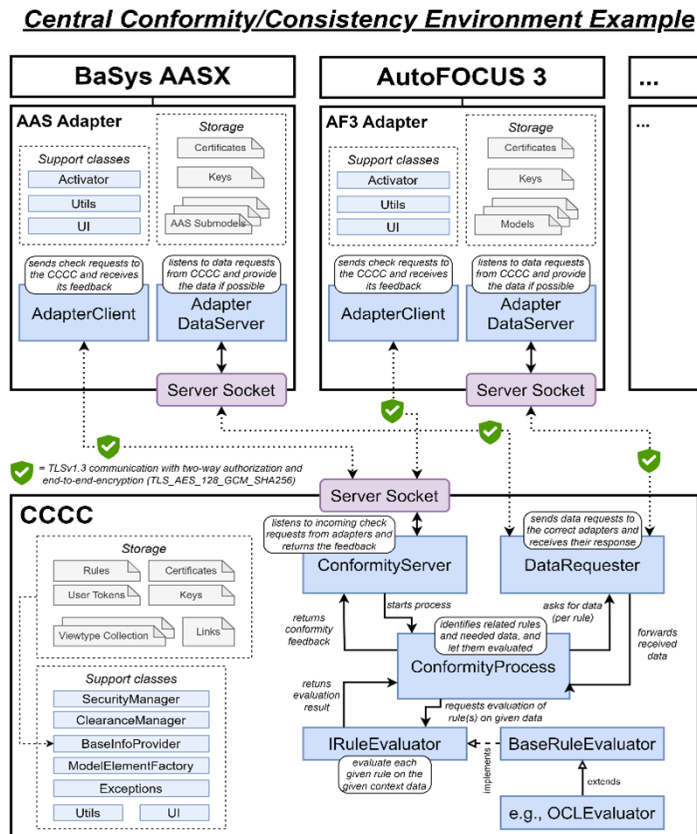


Abbildung 7 Überblick über das Implementierungskonzept des Konformitäts-/Konsistenzchecker

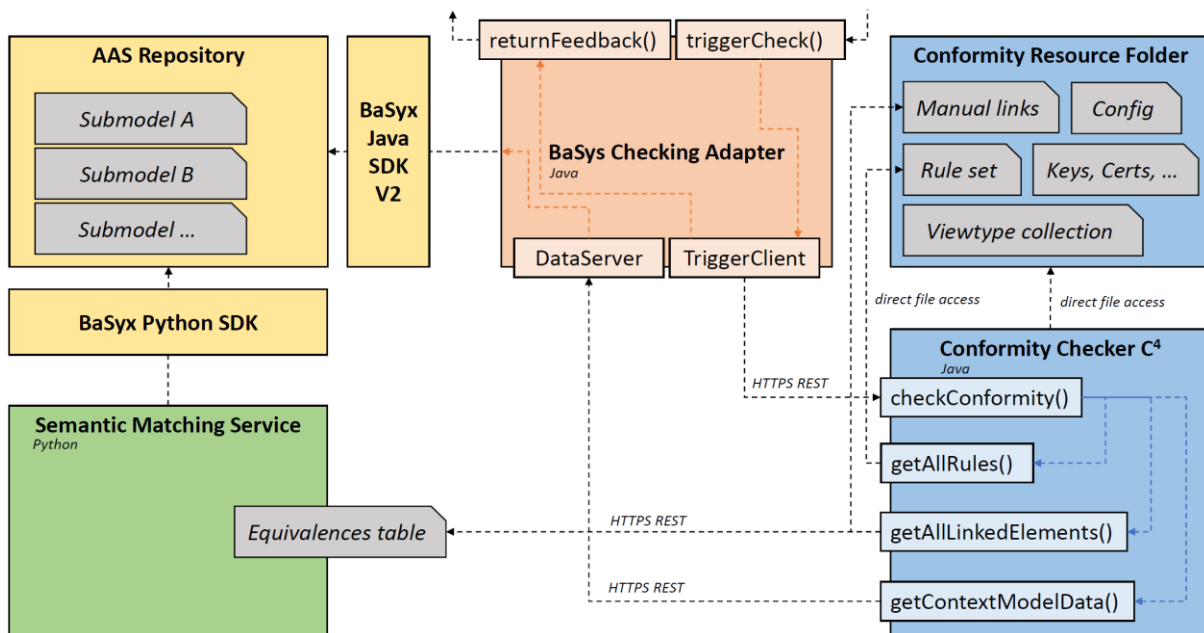


Abbildung 8 High-level Überblick über den Konformitätschecker in Zusammenarbeit mit der BaSys Middleware und dem Semantic Matching Service

### 1.1.8 AP 3.3: Schulungskonzepte und Trainingsumgebung

Die Einführung von Industrie 4.0-Technologien wie Eclipse BaSys stellt Unternehmen nicht nur vor technische, sondern auch vor enorme personelle Herausforderungen. Die zentrale Forschungsfrage dieses Arbeitspakets untersuchte daher, wie die komplexen Konzepte der vernetzten Produktion im Sinne eines lebenslangen Lernens so vermittelt werden können, dass auch Beschäftigte mit geringen IT-Vorkenntnissen diese verstehen und produktiv nutzen können.

Um passende Bildungsangebote zu entwickeln, wurde zunächst eine Analyse der Zielgruppen durchgeführt. Durch die Erfassung und Beschreibung spezifischer Personas wurde ein Überblick über die potentiellen Schulungsteilnehmer erfasst – vom Fabrikplaner bis zum IT-Administrator.

Aufbauend darauf, wurde unter Federführung der HTW Berlin eine breit angelegte Umfrage zur Ermittlung der Trainingsbedarfe durchgeführt, mit einem besonderen Fokus auf kleine und mittelständische Unternehmen (KMU).

Ein besonderer Schwerpunkt der fortiss GmbH lag auf der Weiterbildung von Entscheidungsträgern, da die Einführung von I4.0-Infrastrukturen immer auch strategische Weichenstellungen erfordert. Daher wurden grundlegende Prinzipien für technische Trainingsangebote erarbeitet, die speziell auf Entscheider zugeschnitten sind. Das didaktische Konzept basiert dabei auf einer zweistufigen Vermittlung:

- Theoretische Grundlagen: Vermittlung der wesentlichen Prinzipien
- Intuitive Hands-on-Anteile: Durch vereinfachte, aber repräsentative praktische Übungen wird ein intuitives Verständnis für die technologischen Möglichkeiten gefördert, ohne die Teilnehmer mit Implementierungsdetails zu überfordern.

Entsprechend dieses Konzepts wurden spezifische Lernmaterialien für den Einsatz der Architekturbewertung und -exploration aus AP1 erstellt. Hierzu gehören umfassende Trainingsfolien für die Nutzung des AutoFOCUS3-basierten Toolings. Diese Materialien führen Anwender schrittweise in die multidimensionale Architektursynthese und das Architekturengineering ein, das in den entsprechenden Arbeitspaketen AP1.2, AP1.3 und AP1.4 entwickelt wurde.

Die im Projekt entwickelten Trainingskonzepte und die Ergebnisse der Bedarfsanalysen wurden systematisch dokumentiert und in drei wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

### **Ergebnisse:**

- Grundlegendes Trainingskonzept für das Zielpublikum Entscheider
- Trainingsfolien für die Architekturbewertung und -exploration aus AP1 entsprechend dieses Konzepts
- Publikation „Der Schlüssel zur erfolgreichen Digitalisierung – Entwicklung und Nutzen Digitaler Zwillinge in der Industrie 4.0“ in Industry 4.0 Science [9]
- Publikation „Bridging the Qualification Gap for the Asset Administration Shell: A Modular and Role-Based Learning Framework“ auf Konferenz ETFA 2025 [11]
- Publikation „Adaptive Learning Paths for Industry 4.0 Competencies: Didactic Framework with Role- and Maturity-Based Differentiation Using the Asset Administration Shell“ auf Konferenz IN4LP 2025 [12]

## **1.2 Andere wesentliche Ereignisse**

Im Berichtszeitraum traten keine anderen wesentlichen Ereignisse ein.

## **2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Das bewilligte Projektbudget wurde mit Bewilligungsbescheid vom 19.03.2024 erhöht, um die Konsistenzprüfung aus AP3.2 zusätzlich um einen modularen Erweiterungsmechanismus ergänzen zu können.

Die entstanden Kosten entsprechen ansonsten im Wesentlichen der Projektplanung aus dem Förderantrag. Wichtigster Posten waren die Personalkosten zur Umsetzung der in diesem Bericht beschriebenen Personalkosten.

## **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Arbeiten waren aus mehreren Gründen essenziell. Die Entwicklungen im Bereich Industrie 4.0, insbesondere im Kontext von Verwaltungsschalen, fähigkeiten-basiertem Engineering und der mehrdimensionalen Architektorexploration, erforderten eine Verbesserung der Einsatzmöglichkeiten und eine Senkung der Einstiegshürden in der industriellen Praxis. Während Standardisierungsbemühungen im Bereich Verwaltungsschalen fortschritten, gab es wenige öffentlich verfügbare Umsetzungen, die

eine breite Anwendbarkeit dieser Konzepte in der Praxis gewährleisten. Ohne eine transparente und frei zugängliche Implementierung bestand das Risiko, dass sich proprietäre, nicht interoperable Lösungen durchsetzen, die langfristig zu einer Fragmentierung der Industrieautomatisierung geführt hätten.

Ein zusätzlicher Beitrag dieses Projekts war die praxisnahe Evaluation und Weiterentwicklung von Architektur- und Modellierungsansätzen sowie Werkzeugunterstützung, unter anderem durch die Arbeit mit AutoFOCUS 3 und die Entwicklung von Industrie-4.0-relevanten Viewpoints. Durch die Implementierung von SMT-Mitigation-Constraints und multidimensionalen Optimierungsansätzen konnten neue Wege zur effizienten Gestaltung von Produktions- und Softwarearchitekturen aufgezeigt werden. Diese Arbeiten führten nicht nur zu mehreren wissenschaftlichen Publikationen, sondern auch zu praxisnahen Prototypen, die in der industriellen Umsetzung weiterverwendet werden können.

Die Evaluierung von Fähigkeiten-basierten Beschreibungsmodellen hat dazu beigetragen, dass die entwickelten Methoden nicht nur theoretisch fundiert, sondern auch für die industrielle Anwendung optimiert wurden. Hierbei spielte die enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern wie Lenze, Festo und RWTH eine entscheidende Rolle. Die Erkenntnisse dieser Zusammenarbeit wurden in Diskussionen der Plattform Industrie 4.0 sowie in Fachpublikationen eingebracht und beeinflussten so direkt den Standardisierungsprozess.

Die Arbeiten im Bereich der Registry-Integration und Service-Komposition mit IEC 61499 trugen zur Verbesserung der Interoperabilität und Modularität von Automatisierungslösungen bei. Dies ist insbesondere für Unternehmen von Bedeutung, die flexible und erweiterbare Architekturen für ihre Produktionssysteme benötigen. Zudem wurde durch die Forschung zur Nutzung generativer KI für die Transformation von Engineering-Daten in VWS-Teilmodelle ein innovativer Ansatz zur effizienten Verarbeitung technischer Dokumentationen entwickelt, der das Potenzial hat, den Einsatz von Verwaltungsschale und Eclipse BaSys in der Praxis erheblich zu beschleunigen.

Neben diesen technologischen Fortschritten wurde auch ein besonderer Fokus auf Sicherheits- und Konsistenzprüfungen gelegt. Die Entwicklung von Konzepten für Zugriffskontrollen (RBAC/ABAC) in der BaSys-Middleware sowie die Erarbeitung von Konsistenzprüfmechanismen für Engineering-Umgebungen stellen wichtige Bausteine für die sichere und zuverlässige Nutzung von Verwaltungsschalen dar. Die Implementierung eines generischen Konsistenzcheckers sowie die Anbindung an bestehende VWS-Umgebungen waren hierbei entscheidende Schritte.

Schließlich wurde ein Trainings- und Schulungskonzept entwickelt, um Unternehmen, insbesondere KMUs, den Einstieg in Verwaltungsschalen und Industrie-4.0-Technologien zu erleichtern. Durch die Kombination aus theoretischer Wissensvermittlung und interaktiven Hands-on-Formaten wurde sichergestellt, dass auch technisch weniger versierte Entscheider ein fundiertes Verständnis dieser Technologien erhalten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die im Projekt durchgeführten Arbeiten wesentlich zur Weiterentwicklung und Verbreitung von Industrie-4.0-Technologien beigetragen haben. Die erarbeiteten Konzepte und Implementierungen haben nicht nur die Standardisierung und industrielle Anwendbarkeit vorangetrieben, sondern auch die wissenschaftliche Forschung in diesem Bereich nachhaltig beeinflusst.

## 4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Konzepte und Implementierungen stellen eine wertvolle Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar, sowohl im akademischen als auch im industriellen Umfeld. Die enge Zusammenarbeit mit industriellen Partnern sicherte die Relevanz der Ergebnisse für die Praxis, während die wissenschaftliche Aufarbeitung der Konzepte zur weiteren Verbreitung und Nutzung in der Forschung beiträgt.

Die Nutzung und Erweiterung des AutoFOCUS 3 Open-Source-Modellierungswerkzeugs unterstützen die Entwicklung standardisierter Modellierungsansätze für Industrie 4.0. Dies zeigt sich beispielsweise in der Spezifikation des "Computing Platform Resources"-Teilmodells innerhalb der IDTA sowie der Publikation *"Landscape of Architectural Design Decisions in Industry 4.0"*. Diese Arbeiten tragen zur Verbesserung der Modellierung und Evaluierung von Architekturen bei und erleichtern deren Anwendung in der industriellen Praxis. Die entwickelten Viewpoints für Industrie 4.0 in AutoFOCUS 3, darunter der SPS-Plattform Viewpoint, der Shop-Floor-Topologie Viewpoint und der Produkt-(Rezept-)Viewpoint, bieten eine einheitliche methodische Grundlage für die Modellierung von Produktionsprozessen.

Ein wesentlicher Beitrag zur praktischen Anwendbarkeit der Projektergebnisse liegt in der Automatisierung von Service-Kompositionen mit IEC 61499, die in der Publikation *"Composing Services with SMT-Based Deployment Optimization and Service Merging Heuristic"* vorgestellt wurde. Die entwickelten Methoden zur SMT-basierten Architektur- und Produktionsoptimierung wurden in einer weiteren Publikation für die ETFA'24-Konferenz aufgearbeitet und liefern neue Erkenntnisse für die industrielle Fertigungsplanung. Die Arbeiten zur multidimensionalen Architektursynthese und -optimierung, insbesondere unter Verwendung des AutoFOCUS3-Modellierungswerkzeugs, ermöglichen eine ganzheitliche Analyse von Architekturentscheidungen in der Industrieautomatisierung. Die Ergebnisse dieser Forschung wurden in einem Journal-Artikel für IEEE TII veröffentlicht und bilden die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Evaluierung und Exploration von Architekturen.

Die enge Zusammenarbeit mit Unternehmen wie Lenze, Festo und SMS wie bspw. zum Fähigkeiten-basierten Engineering stellen eine hohe Relevanz für die Praxis sicher, wodurch bspw. das "Information Model for Capabilities, Skills & Services" in die Plattform I4.0 eingebracht werden konnte. Durch diese enge Kooperation wurden zudem Fortschritte zur Anwendbarkeit in der industriellen Praxis erzielt. So stellt bspw. die KI-gestützte Transformation von Engineering-Daten aus PDF-Dokumenten in Teilmodelle unter Anwendung generativer KI (LLMs) auf, wie auch nur teilweise digitalisierte Daten in Verwaltungsschalen übernommen werden können.

Aus wirtschaftlicher Perspektive ermöglichen die entwickelten Open-Source-Implementierungen Unternehmen aller Größen den Zugang zu modernen, digitalen Zwillingen und passenden Engineering-Werkzeugen, ohne hohe Vorabinvestitionen. Dies wird durch Schulungsangebote und die Entwicklung eines Trainingskonzepts für Entscheider unterstützt, welches interaktive Hands-on-Inhalte zur intuitiven Vermittlung von Wissen enthält.

Nicht zuletzt trägt das Projekt zur Standardisierung bei: Die entwickelten Best-Practice-Beispiele, die Klassifikation von Konformitäts- und Konsistenzbeziehungen sowie das Konzept zur Konsistenzprüfung für die Engineering-Umgebung flossen in verschiedene Publikationen. Die erarbeiteten Methoden und Werkzeuge tragen somit nicht nur zur Forschung, sondern auch zur Weiterentwicklung industrieller Standards und Best Practices bei.

## 5 Fortschritt auf dem Vorhabensgebiet bei anderen Stellen

Das Ökosystem rund um die Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS) hat während der Projektlaufzeit eine starke Professionalisierung und Standardisierung erfahren. Während die AAS zu Projektbeginn oft noch als visionäres Konzept wahrgenommen wurde, hat sie sich mittlerweile als der de-facto Standard für den digitalen Zwilling in der industriellen Wertschöpfung etabliert. Zu dieser positiven Entwicklung haben auch Fortschritte über das BaSys4Transfer Projekt hinaus beigetragen. Dabei wurden viele dieser im Folgenden beschriebenen Fortschritte durch die Arbeit aller Projektpartner mit entsprechenden Gremien maßgeblich mitbestimmt (oft durch Personalunion zwischen den entsprechenden Gremien und BaSys4Transfer).

Ein Meilenstein der letzten drei Jahre war die Überführung der nationalen Vorarbeiten aus der Plattform Industrie 4.0 in die internationale Standardisierung. Mit der Normenreihe IEC 63278 ("Asset Administration Shell for industrial applications") wurde eine Basis geschaffen, die über Deutschland und Europa hinaus Akzeptanz findet. Dies hat die Investitionssicherheit für Unternehmen (insbesondere KMU) deutlich erhöht, da die AAS damit kein reines Forschungsthema mehr ist, sondern ein Industriestandard.

Des Weiteren hat sich die IDTA seit 2023 zum zentralen operativen Abstimmungspunkt für Inhalte der AAS entwickelt. Während die Plattform Industrie 4.0 weiterhin die strategische Ausrichtung vorgibt, hat die IDTA die technische Detailarbeit übernommen. Dadurch ist die Anzahl der standardisierten Teilmodell-Templates stark angestiegen. Es wurden spezifische Arbeitsgruppen für digitale Typenschilder, Carbon Footprints (PCFs), Handbücher und technische Daten (ECLASS) etabliert. Aus Sicht der fortiss GmbH umfasste dies bspw. die Mitarbeit an der Spezifikation des Teilmodells "Computing Platform Resources" und die Einbringung von Best-Practice-Beispielen aus dem Projekt.

Schließlich ist auch der Fortschritt bei Datenräumen zu nennen: Diese Entwicklungen wurde maßgeblich durch großangelegte Leuchtturmprojekte wie Catena-X (Automobilindustrie) und die breiter angelegte Initiative Manufacturing-X vorangetrieben. Hier wird die AAS als zentrale Technologie für den souveränen Datenaustausch in globalen Lieferketten genutzt. Der Fokus verschob sich von der isolierten Betrachtung einer Maschine hin zur Vernetzung ganzer Wertschöpfungsnetzwerke. Dies unterstreicht die Relevanz der in unserem Projekt untersuchten Security-Konzepte (AP2.2), Engineering-Methoden (AP1.2 und AP1.4) und Konformität/Konsistenz (AP3.2).

## 6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die fortiss GmbH hat die folgenden Veröffentlichungen auf namhaften internationalen Konferenzen durchgeführt (Autoren von fortiss unterstrichen):

Datum	Titel/Bezeichnung	Autoren/ Präsentator/ Aussteller	Ort/Publikation
13.09.2023	Composing Services with SMT-Based Deployment Optimization and Service Merging Heuristic	<u>Tarik Terzimehic</u> , Ed-die Groh, Alois Zoitl	International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) 2023, Sinaia, Rumänien

13.09.2023	Landscape of Architectural Design Decisions in Industry 4.0	<u>Tarik Terzimehic</u> , Alois Zoitl	International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFAs) 2023, Sinaia, Rumänien
03.10.2023	Towards Confidentiality in Multi-Model Inconsistency Detection for Systems Engineering	<u>Sebastian Bergemann</u>	International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS Companion 2023), Västerås, Sweden
13.09.2024	Mitigating Conflicts in Architectural Design Decisions for Evolving Manufacturing Systems: Evaluation and Recommendations for Practitioners	<u>Tarik Terzimehic</u> , Alois Zoitl	IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFAs) 2024, Padova, Italien
01.08.2024	Multidimensional Design Space Exploration for Evolving Manufacturing Systems: Interplay of Deployment, Topology, and Production Planning Architectural Decisions	<u>Tarik Terzimehic</u> , Daniel Erler, Alois Zoitl	IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 20, no. 12, pp. 13786-13797, Dec. 2024
01.07.2024	Hierarchisch verteilte Verwaltungsschalen-Registries – Nutzung der Verwaltungsschale in verteilten Umgebungen	Thomas Kuhn , Frank Schnicke , Daniel Porta , Tobias Klausmann , Karl Tröger , Thomas Müller , Sebastian Heppner und <u>Tarik Terzimehic</u>	VDI-Kongress AUTOMATION 2024
02.07.2024	Ontology-Based Capability Description of MTP Modules using AAS	Christian Barth, Tobias Klausmann, <u>Andreas Bayha</u> , Matthias Freund, Kathrin Gerber	VDI-Kongress AUTOMATION 2024
31.10.2024	Modular Consistency Checking Between Heterogeneous Models Without Direct Data Exchange Between Collaborators	<u>S. Bergemann</u> und N. Benkendorf	International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS Companion '24)
19.07.2024	Der Schlüssel zur erfolgreichen Digitalisierung - Entwicklung und Nutzen Digitaler Zwillinge in der Industrie 4.0	<u>Andreas Bayha</u> , Sönke Knoch und Dirk Schöttke	Industry 4.0 Science, 2024, 40. Jg.,Nr. 4, S.42-49.
18.02.2025	Multi-Dimensional Design Space Exploration: Interplay	<u>Tarik Terzimehic</u>	Johannes Kepler University, Linz, Austria, Januar 2025

	of Architectural Design Decisions in Evolving Manufacturing Systems (Dissertation)		
01.07.2025	Extraktion von technischen Daten mit LLMs - Extraction of technical data using LLMs - Experience Report and Evaluation based on Asset Administration Shells.	Julian Vogel, Christian Barth, <u>Andreas Bayha</u> , Nico Braunisch, Igor Garmaev, Marko Ristin, Sten Grüner	VDI-Kongress AUTOMATION 2025
09.09.2025	Bridging the Qualification Gap for the Asset Administration Shell: A Modular and Role-Based Learning Framework	Daniel Büttner, Dirk Schöttke, Stephan Schäfer, Sönke Knoch, Daniel Porta, Tim Schwartz, Claudette Ocando Röhricht, Aaron Zielstorff und <u>Andreas Bayha</u>	30th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation 2025
06.10.2025	Mind the Leak: Formalizing Confidentiality Preservation Assessment of Multi-Model Consistency Checking Systems	<u>Sebastian Bergemann</u> , <u>Andreas Bayha</u> , Derui Zhu, Mohammad Sadeghi, Colin Atkinson und Alexander Pretschner	ACM/IEEE 28th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion 2025
23.10.2025	Adaptive Learning Paths for Industry 4.0 Competencies: Didactic Framework with Role- and Maturity-Based Differentiation Using the Asset Administration Shell	Daniel Büttner, Dirk Schöttke, Stephan Schäfer, Sönke Knoch, Daniel Porta, Tim Schwartz, Claudette Ocando Röhricht, Aaron Zielstorff und <u>Andreas Bayha</u>	6th IFAC/INSTICC International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics 2025

## Referenzen

- [1] Terzimehic, Tarik; Groh, Eddie; Zoitl, Alois: Composing Services with SMT-Based Deployment Optimization and Service Merging Heuristic. In: International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Sinaia 2023.
- [2] Terzimehic, Tarik; Zoitl, Alois: Landscape of Architectural Design Decisions in Industry 4.0. In: International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Sinaia 2023.
- [3] Bergemann, Sebastian: Towards Confidentiality in Multi-Model Inconsistency Detection for Systems Engineering. In: International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS Companion 2023). Västerås 2023.
- [4] Terzimehic, Tarik; Zoitl, Alois: Mitigating Conflicts in Architectural Design Decisions for Evolving Manufacturing Systems: Evaluation and Recommendations for Practitioners. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Padova 2024.
- [5] Terzimehic, Tarik; Erler, Daniel; Zoitl, Alois: Multidimensional Design Space Exploration for Evolving Manufacturing Systems: Interplay of Deployment, Topology, and Production Planning Architectural Decisions. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 20, Nr. 12, S. 13786–13797, 2024. DOI: 10.1109/TII.2024.3435373.
- [6] Kuhn, Thomas; Schnicke, Frank; Porta, Daniel; Klausmann, Tobias; Tröger, Karl; Müller, Thomas; Heppner, Sebastian; Terzimehić, Tarik: Hierarchisch verteilte Verwaltungsschalen-Registries – Nutzung der Verwaltungsschale in verteilten Umgebungen. In: Automation. 2024.
- [7] Barth, Christian; Klausmann, Tobias; Bayha, Andreas; Freund, Matthias; Gerber, Kathrin: Ontology-Based Capability Description of MTP Modules using AAS. In: Automation. 2024.
- [8] Bergemann, Sebastian; Benkendorf, Nina: Modular Consistency Checking Between Heterogeneous Models Without Direct Data Exchange Between Collaborators. In: International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS Companion '24). 2024.
- [9] Bayha, Andreas; Knoch, Sönke; Schöttke, Dirk: Der Schlüssel zur erfolgreichen Digitalisierung – Entwicklung und Nutzen Digitaler Zwillinge in der Industrie 4.0. In: Industry 4.0 Science, 40. Jg., Nr. 4, S. 42–49, 2024.
- [10] Bergemann, Sebastian; Bayha, Andreas; Zhu, Derui; Sadeghi, Mohammad; Atkinson, Colin; Pretschner, Alexander: Mind the Leak: Formalizing Confidentiality Preservation Assessment of Multi-Model Consistency Checking Systems. In: ACM/IEEE 28th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS Companion '25). 2025.
- [11] Büttner, Daniel; Schöttke, Dirk; Schäfer, Stephan; Knoch, Sönke; Porta, Daniel; Schwartz, Tim; Ocando Röhricht, Claudette; Zielstorff, Aaron; Bayha, Andreas: Bridging the Qualification Gap for the Asset Administration Shell: A Modular and Role-Based Learning Framework. In: 30th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2025.
- [12] Büttner, Daniel; Schöttke, Dirk; Schäfer, Stephan; Knoch, Sönke; Porta, Daniel; Schwartz, Tim; Ocando Röhricht, Claudette; Zielstorff, Aaron; Bayha, Andreas: Adaptive Learning Paths for Industry 4.0 Competencies: Didactic Framework with Role- and Maturity-Based Differentiation Using the Asset Administration Shell. In: 6th IFAC/INSTICC International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics (IN4PL). 2025.
- [13] Terzimehić, Tarik: Multi-Dimensional Design Space Exploration: Interplay of Architectural Design Decisions in Evolving Manufacturing Systems. Dissertation. Johannes Kepler University Linz, 2025.

- [14] Vogel, Julian; Barth, Christian; Bayha, Andreas; Braunisch, Nico; Garmaev, Igor; Ristin, Marko; Grüner, Sten: Extraktion von technischen Daten mit LLMs – Extraction of Technical Data Using LLMs – Experience Report and Evaluation Based on Asset Administration Shells. In: VDI-Kongress AUTOMATION. 2025.
- [15] C. Diedrich, A. Belyaev, J. Bock, S. Grimm, J. Hermann, T. Klausmann, A. Kcher, K. Meixner, J. Peschke, M. Schleipen, S. Schmitt, B. Schnebel, M. Volkmann, K. Watson, and M. Winter, "Information Model for Capabilities, Skills & Services," Nov. 2022.