

Schlussbericht – Teil III: Erfolgskontrollbericht

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse sind nachfolgend nach Arbeitspaketen untergliedert stichpunktartig aufgeführt.

B1: Referenzarchitekturmodell

- Es wurden umfassende Literaturstudien zu gängigen und bestehenden Standards durchgeführt. (SysML, AutomationML, FMI, Verwaltungsschale (AAS))
- Entwicklung einer Referenzarchitektur für Verhaltensmodelle. Diese basiert auf dem FMI-Standard. Verhaltensmodelle nach dem FMI-Standard können als Teil in der Verwaltungsschale (AAS) referenziert werden. Dadurch ist volle Kompatibilität zum allgemeinen Referenzarchitekturmodell im Projekt gewährleistet.
- Es wurde eine Gap-Analyse des FMI-Standards hinsichtlich fehlender Komponenten und Schnittstellen durchgeführt. Eine identifizierte Lücke, nämlich die fehlende Schnittstelle zu einem Bedienfeld (ControlPanel) konnte mittels einer MQTT basierten Kommunikation geschlossen werden. Weitere aus unserer Sicht fehlende Schnittstellen, z.B. zu 3D Geometrieinformationen, zu Materialflusselementen der Simulation oder auch zum Feldbus können teilweise noch durch das AAS-Submodell Simulation geschlossen werden.
- Erfolgreiche Erprobung von Testkomponenten nach der Referenzarchitektur in diversen markt gängigen Simulationstools, als auch in quelloffenen Lösungen (Virtuos3, Matlab, Dymola, FMPy, FMI4CPP und einige mehr)
- Entwicklung eines SDK zur programmatischen Erzeugung von FMUs. Hierbei wurde eine zusätzliche Abstraktionsebene eingezogen, um den in nativem C formulierten Standard in C++ ausprogrammieren zu können. Für die virtuelle Inbetriebnahme ist es besonders wichtig, dass das zeitliche Verhalten von Komponentenmodellen deterministisch ist. Daher wurde das SDK angepasst, so dass es die spezifischen Bedürfnisse der Echtzeitumgebung TwinCat3 erfüllt.
- Entwicklung eines Generators zur Erzeugung von Verhaltensmodellen nach der Referenzarchitektur. Ein-, Ausgänge, sowie Parameter können angelegt werden und die gesamte FMU-Architektur inklusive Infrastruktur wird generiert.
- Aufbau einer flexiblen, offenen Simulationsumgebung, basierend auf der Unity Engine. Diese wurde kompatibel zur Referenzarchitektur ausgelegt. Weiterhin wurde sie mit dem Ziel entwickelt, dass es in ihr besonders einfach sein soll, im weiteren Projektverlauf Inhalte automatisiert zu generieren. Hierfür wurde schon ein flexibel generierbares Wegpunkte-System entwickelt, mit dessen Hilfe ganze Logistikstraßen aus strukturierten Eingangsparametern in der Simulation erzeugt werden könnten
- Praktische Verprobung des in der ersten Projekthälfte erarbeiteten FMU SDKs und die Erweiterung auf den neuen FMI-Standard 3.0(Co-Simulation)
- Erweiterung der Unity-Simulationsumgebung um den Support für FMI-Standard 3.0.
- Einarbeitung der neu enthaltenen Datentypen (FMI3.0 - 15 Typen, FMI2.0 - 3 Typen).
- Unterstützung von Arrays und Strukturen in den Datentypen.
- Validieren der FMUs die mit dem HEITEC SDK im Standard 3.0 erstellt wurden. (z.B. zusammen mit Konsortialpartner Trumpf in Siemens SIMIT)
- Konzeptuelle Mitarbeit als Industriepartner zur Integration von Verhaltensmodellen in das Tool des Konsortialpartners ISG Virtuos über das Submodell Simulation der Verwaltungsschale.

B2: Produktions-OT

- Konzept für standortübergreifender Wertschöpfung wurde erstellt. Bibliothek der Verhaltensmodelle darf nicht statisch sein. Aufbau analog zur Codeverwaltung in gängigen Softwareentwicklungspraktiken angedacht. Untersuchung und Abwägung verschiedener Codeverwaltungstechniken und -tools, um eine geeignete Variante für die Bibliothek von Verhaltensmodelle für das digitale Engineering zu finden.
- Flexible Lösung wurde mit MS DevOps gefunden und in Proof-of-Concept Instanzen für den praktischen Einsatz mit Komponenten nach der Referenzarchitektur gefunden.

- Verproben der Standortübergreifenden Datenhaltung von Verhaltensmodellen über DevOps Repository.
- Abgleich offener Standards (z.B. Git) mit proprietären Lösungen (z.B. TwinStore). Proprietäre Lösung ist wesentlich besser geeignet für die heterogene Datenstruktur von vierdimensionalen Komponentenmodellen (3D CAD + Verhaltensmodell). Nachteil ist die Spezifikation auf ein Tool.
- Flexible Lösung wurde mit MS DevOps gefunden und in Proof-of-Concept Instanzen für den praktischen Einsatz mit Komponenten nach der Referenzarchitektur angewendet.

S1: Optimierung am digitalen Zwilling

- Vertriebliche Anforderungen wurden gesammelt und Konzept für einen Produktkonfigurator wurde erstellt.
- Für den Demonstrator wurde eine geeignete Maschine ausgewählt. Hier können einige verschiedene Varianten und Ausrichtungen gewählt werden.
- Als mögliche Datenbasis wurde AutomationML untersucht. Im Sinne der Kompatibilität zur Referenzarchitektur im Verbundprojekt wird zusammen mit Partnern (ISG, EPlan) die Verwendung der Verwaltungsschale als Datenbasis verprobt.
- Mangels Reife des Submodel Automation Engineering, welches erst zum Projektende begonnen wurde zu erstellen wurde ein schlankes proprietäres Datenformat für die Konzeptstudie verwendet.
- Ausgehend von der Demonstrator-Maschine wurden die Anforderungen für einen allgemeingültigen Vertriebskonfigurator zusammengetragen. Es wurde festgestellt, dass eine Generalisierung der Anforderungen für unterschiedliche Maschinentypen häufig gegenläufig zur Umsetzbarkeit ist. Diese hängt stark von der Modularität des Anlagenkonzeptes ab.
- Standardisierung und Modularisierung sind zwingende Voraussetzungen für effiziente Digitalisierung. Das wurde auch mit Konsortialpartnern wie z.B. ISG einvernehmlich diskutiert.
- Prototyp eines Produktkonfigurators erfolgreich umgesetzt. Abgrenzung von existenten und gängigen CPQ-Systemen bewertet. Diese entsteht durch die Durchgängigkeit im Digitalen Engineering, so dass aus dem Produktkonfigurator virtuelle Inbetriebnahmemodelle und nachgelagert Digitale Schatten der Anlagen generiert werden können.

S3: Virtualisierung und automatische Softwaregenerierung

S3.2 Automatisiertes Testen

- Analyse vorhandener Tests von Automatisierungssoftware und virtuellen Modellen. Ergebnis: Qualität und Ausformulierung von Tests hängt vom Bearbeiter ab. Durch Formalisierung der Tests konnte ein Set an einfachen Schlüsselworten erzeugt werden mit dem nahezu alle Testfälle beschrieben werden konnten.
- Aufbau einer Test-Suite, die bei der Testerstellung mit diesem Set an Schlüsselworten unterstützt. Die Anbindung der Suite an verschiedene Automatisierungssysteme zur Testdurchführung wurde umgesetzt. Automatisierte Regressionstests wurden erfolgreich im Proof-of-Concept verprobt.
- Weiterentwicklung der Test-Suite um weitere Steuerungsanbindungen und verproben dieser Anbindungen.
- Untersuchung der Möglichkeiten zur Echtzeitfähigen / Zyklusgenauen Testung. Hierfür wurde die VIBN-Software als „Middleware“ verwendet, um Zyklusgenau SPS-Signale aufzunehmen und zu setzen.
- Erfolgreicher Proof-of-Concept zur Zyklusgenauen Speicherung von SPS-Datenpunkten in eine SQL-Datenbank.
- Anwendung der Testautomatisierungsumgebung zum Testen des Demonstrators und am Demonstrator.
- So konnten komplexe Testfälle in vollautomatisierten Regresstests gezeigt werden die ohne die Verbindung mit einem digitalen Zwilling als virtuelles Inbetriebnahmmodell nicht möglich gewesen wären.
(beispielsweise die Maschinenreaktion auf Verlust von Materialflusselemente, die aber schon teilweise in der Anlage bearbeitet wurden)
- Testsuite ermöglicht es strukturierte Protokolle der abgeleiteten Tests zu generieren. Dies umfasst zum Beispiel die abgeleiteten Testfälle mit Einzelschritten und Ergebnissen.

S3.5 Demonstrator

- Es wurde eine Engineering Suite entwickelt (HeiVM Hub). Diese bildet die Zentrale für Digitale

Engineering Projekte. Aus dieser Suite heraus können über Eingaben und Konfiguratoren automatisch Softwareinhalte im Simulationsprojekt generiert werden.

- Dies umfasst einen generellen Projektgenerator. Außerdem die Erstellung von Konnektoren zu Co-Simulationen wie PLCSimAdvanced oder Roboter Suiten (Kuka Office Lite, ABB Robot Studio usw.).
- Die Suite ist modular aufgebaut und wurde im Projektverlauf weiter ausgebaut. Es wurde zum Beispiel die Kommunikation mittels S7 Kommunikation abgebildet oder die Generierung standardisierter Template Bausteine eingepflegt.
- Virtuelles Modell des Demonstrators wurde manuell erstellt.
- Modell konnte in drei Simulations-Plattformen realisiert werden, die allesamt dieselbe standardisierte Basis an Verhaltensmodellen verwenden. (Plattformen: ISG Virtuos, machineering iPhysics, HEITEC Unity Framework)
- Im standardisierten Verhaltensmodell wurde die Verwendung von FMUs erprobt, die mittels des FMU-Generators erzeugt wurden, der in der ersten Projekthälfte erstellt wurde.
- Eines der Modelle entstand auf Basis des ebenfalls in der ersten Projekthälfte geschaffenen Simulationsframeworks in Unity. Hier wurde außerdem der Support für Komponentenmodelle im FMI-Standard 3.0 erweitert.
- Es wurden Konzepte erstellt, wie solche virtuellen Modelle basierend auf vorhandenen Engineering Daten generiert werden können.
- Hierfür haben wir uns auch der Arbeitsgruppe „Submodel Automation Engineering“ des IDTA angeschlossen, die vom Konsortialpartner EPLAN geleitet wird und die auch mit anderen Partnerfirmen (HOMAG) mehr oder weniger aus dem SDM4FZI Projekt heraus entstand.
- Ausleitung einer Konfigurationsdatei aus dem in S1 entstandenen Produktkonfigurator. Diese wurde mangels Reife noch nicht in dem Submodel Automation Engineering realisiert. Ist jedoch durch eine einfache Struktur später jederzeit überführbar.
- Erfolgreicher Proof-of-Concept, wie aus der ausgeleiteten Konfigurationsdatei sowohl ein Digitaler Zwilling für die virtuelle Inbetriebnahme wie auch ein zur Konfiguration passendes Automatisierungsprogramm erstellt werden kann. In Zusammenarbeit mit EPLAN wurde außerdem gezeigt, dass auch eine angepasste Elektrokonstruktion ausgeleitet werden kann.
- Verbindung des virtuellen Modells mit IST-Daten der Anlage zur Fehleranalyse und Optimierung.
- In einer erfolgreichen Konzeptstudie wurde gezeigt das Anlagendaten über OPC UA ins virtuelle Modell eingespeist werden können.
- Untersuchungen über die Möglichkeiten Daten in höheren Auflösungen zu übermitteln, wurden angestellt.

S4: Datenbasierte Dienste

- Als zu betrachtendes HMI-System wurde das Control Panel des virtuellen Modells ausgewählt.
- Hier wurden die verschiedenen bestehenden Bedienkonzepte erfasst.
 - o Bedienung über Pop-Ups direkt im Modell.
 - o Bedienung über direkte Interaktion mit dem Modell.
 - o Bedienung über applikatives Control Panel abseits des Modells.
- Es wurde eine Befragung zur UI/UX Experience der Demonstrator Applikation unter Fachkollegen als auch Fach- und Firmenfremden Personen durchgeführt.
- So wurde untersucht, welche Bedienart effizient wahrgenommen wurde und wie der Benutzer intuitiv zur jeweiligen Bedienart geführt werden kann. Hervorhebungen bei Mouse-Over-Events erwiesen sich als ebenso hilfreich, wie halbtransparente Indikatoren / Sphären im Modell, welche eine Interaktionsmöglichkeit diskret, aber gut wahrnehmbar darstellen.
- Jegliche Interaktion direkt im Modell wurde intuitiver wahrgenommen als eine Einstellmöglichkeit über HMI-Panels.

2. Fortschreibung des Verwertungsplans

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

Durchgängige Engineering Methoden:

Die erprobten Techniken zur Standardisierung und Generierung können nahtlos nach Projektende im hauseigenen Maschinenbau zur Anwendung gebracht werden. Die im Projekt geschaffenen Grundlagen werden nach Adaption für die Bedürfnisse des HEITEC Maschinenbaus zu einer Qualitäts- und Produktivitätssteigerung durch reduzierte Durchlaufzeiten führen. Hierbei helfen auch die standardisierten, unabhängigen Verhaltensmodelle, welche durch die, im Projekt erschaffene,

Referenzarchitektur realisiert werden können. Diese Komponenten werden Simulationstoolunabhängig über verschiedene Niederlassungen und Kundenbranchen hinweg zum Einsatz gebracht werden können. Durch die interne vielfache Verwendung bei reduziertem Aufwand für das Engineering, wird eine Produktivitäts- und Effizienzsteigerung im Digitalen Engineering firmenweit erreicht. Dies verschafft HEITEC einen Wettbewerbsvorteil zu anderen Digitalen Engineering Dienstleistern. Weiterhin ermöglicht es den Marktzugang zu Komponentenherstellern die Beratungsleistungen bei der Erstellung unabhängiger Simulationskomponenten benötigen.

Lebensdauer Digitalen Zwilling:

Durch die im Projekt erprobten Techniken zur Steigerung der Durchgängigkeit, gerade im Verbund mit der Technologie der Verwaltungsschale, lassen sich neue Geschäftsbereiche erschließen. Ein einmalig erstelltes oder teil-generiertes virtuelles Modell kann über verschiedene Lebensphasen einen Mehrwert liefern. Einstiegspunkt stellt der im Projekt entwickelte Produktkonfigurator dar, der im Vertriebsprozess einen erheblichen Mehrwert bietet. Dieser wird als Dienstleistung externen Kunden angeboten, weiterhin wird er für den eigenen Maschinenbau als Vertriebstool verwendet. Über die Wertschöpfung der VIBN-Phase hinaus, wird im Anschluss ein Digitaler Schatten angeboten werden können. Dieser verbindet das Simulationsmodell mit gesammelten IST-Daten der Anlage und kann dort zur Fehleranalyse und Optimierung eingesetzt werden. Auch hier kann die Lösung als Dienstleistung extern angeboten werden und zur Wertsteigerung im hauseigenen Maschinenbau genutzt werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Die Firma HEITEC ist beginnend zum 01.01.2025 im Förderprojekt LLM-SE (Large Language Model unterstütztes Systems Engineering) vertreten. Förderer ist das Bayrische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie / VDI VDE IT.

Die im SDM4FZI erlangten Erkenntnisse zu standardisierten Verhaltensmodellen, der automatischen Generierung von Digitalen Zwillingen und auch die automatisierte Testung der generierten Systeme können nahtlos in dieses Projekt eingebracht und vertieft werden.

3. Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

In dem überwiegenden Teil der Arbeiten wurden gangbare Lösungen für die bearbeiteten Problemstellungen gefunden. An manchen Stellen gingen die Lösungen nicht so weit wie man es sich zu Projektbeginn erhofft hatte, allerdings wurde stets ein guter Stand erreicht. So stellen zum Beispiel die standardisierten Verhaltensmodelle die in B1 erarbeitet wurde eine technisch funktionierende Lösung dar. Da das Submodell Simulation der Verwaltungsschale, als auch der FMI-Standard aber noch keine umfassende Marktverbreitung haben, sind viele Workflows noch umständlich in der praktischen Anwendung.

4. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Ausgabenplanung:

Der Hauptteil der geplanten Kosten, stellten Personalkosten dar. Diese wurden im Projektverlauf zunehmend teurer. In Summe betrachtet lagen die Personalkosten aber im beantragten Rahmen. Die Sachkosten bestanden Großteils aus Lizenzgebühren, welche für die Durchführung der Arbeiten notwendig waren. Auch hier wurden die jährlichen Kosten höher im Vergleich zum Projektantrag. Durch umsichtige Ressourcenplanung konnten die Lizenzkosten wie auch die Gesamtkosten allerdings im Rahmen gehalten werden.

Zeitplanung:

Im ersten Projektjahr gab es Probleme den Projektplan wie ursprünglich geplant umzusetzen. Dies lag an einer außergewöhnlichen Fluktuation in der umsetzenden Abteilung. In Abstimmung mit dem Projektträger und den Konsortialpartnern konnten aber Tätigkeiten verschoben werden und im Unternehmen wieder qualifiziertes Personal in dem umsetzenden Team aufgebaut werden. Durch eine Anpassung der TVB am 15.12.2022 konnte ein neuer umsetzbarer Plan erstellt werden. Die gemeinschaftliche kostenneutrale Projektverlängerung mit vielen Konsortialpartnern half zum Projektende alle noch geplanten Arbeiten mit einer effizienten Ressourcenplanung abschließen zu können.