IAS-Forschungsberichte

Forschungsbericht
Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich

Behrang Ashtari Talkhestani

Methodik zur Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings automatisierter Systeme

Band 1/2020

Universität Stuttgart

Methodik zur Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings automatisierter Systeme

Von der Graduate School of Excellence
advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Behrang Ashtari Talkhestani
aus Borojerd (Iran)

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Tag der Einreichung:	03.03.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	30.07.2020

Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme
der Universität Stuttgart

2020

IAS-Forschungsberichte

Band 1/2020

Behrang Ashtari Talkhestani

Methodik zur Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings automatisierter Systeme

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7572-4
ISSN 1610-4781

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) und einem Unternehmen der Automatisierungstechnik.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich, für die Übernahme des Hauptberichts, die vielen konstruktiven Diskussionen und wertvollen Hinweise und Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herr Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Ein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel für die Mitarbeit im Thesis-Committee und die fachlichen Anregungen.

Ohne die Unterstützung des Unternehmens wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Daher möchte ich mich in Besonderem Maße bei Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Schlögl bedanken, welcher mich mit der Aufgabenstellung betraute, stets förderte und mir sämtliche Türen öffnete um das Thema voranzubringen. Allen anderen, die in diesem Umfeld mit mir zusammenarbeiteten und wertvolle Diskussionspartner darstellten, gilt ebenfalls ein herzliches Dankeschön.

Zudem gilt mein Dank dem wissenschaftlichen Umfeld der GSaME, welche mir viele Blicke über den Tellerrand hinaus ermöglichte und mir ein „zweites Zuhause“ bot. Stellvertretend für alle Wegbegleiter möchte ich mich hier bei Herrn Hans-Friedrich Jacobi bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Nasser Jazdi für seine fortwährende und bedingungslose Unterstützung während der Arbeit, für die gemeinsamen Veröffentlichungen sowie die weisen Ratschlägen, die diese Promotion erst möglich gemacht haben. Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank allen Kolleginnen und Kollegen am IAS für die gute Zusammenarbeit und die vielen guten und konstruktiven Diskussionen. Ein ebenfalls gebührender Dank gilt den Studierenden, die im Rahmen ihrer Master-, Studien-, Forschungs-und Bachelorarbeiten einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Schließlich bin ich meiner Familie, insbesondere meiner Frau Samira Maleki-Pilevar, von Herzen dankbar für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr geduldiges Verständnis. Ihre Liebe und Zuversicht gaben mir die notwendige Kraft, die vorliegende Arbeit fertig zu stellen.

Stuttgart, im August 2020

Behrang Ashtari Talkhestani

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... **iii**

Tabellenverzeichnis ... **v**

Abkürzungsverzeichnis ... **vi**

Begriffsverzeichnis ... **viii**

Zusammenfassung ... **x**

Abstract ... **xi**

1 Einleitung ... **1**
1.1 Mehrwerte des Digitalen Zwillings während des gesamten Lebenszyklus ... 1
1.2 Herausforderungen bei der Breitstellung des Digitalen Zwillings ... 3
1.3 Forschungsanforderungen ... 4
1.4 Zielsetzung der Arbeit ... 5
1.5 Abgrenzung zu ähnlichen Themenstellungen ... 6
1.6 Aufbau der Arbeit ... 7

2 Grundlagen automatisierter Systeme ... **10**
2.1 Grundstruktur automatisierter Systeme ... 10
2.1.1 SPS-gesteuerte automatisierte Systeme ... 12
2.1.2 Entwicklungsvorgehen bei automatisierter Systeme ... 12
2.2 Domänenübergreifende Zusammenarbeit während des Engineering-Prozesses automatisierter Systeme ... 15
2.3 Ansätze zur Modelldurchgängigkeit und Verknüpfung von Tools ... 18
2.3.1 Proprietäre Punkt-zu-Punkt-Schnittstellen zwischen Tools ... 18
2.3.2 Standardisierte neutrale Austauschformate ... 19
2.3.3 Strukturierte Daten ... 21
2.3.4 Semantische Technologien zur Modellierung der Daten ... 21
2.4 Zusammenfassung ... 22

3 Stand der Wissenschaft und Technik ... **23**
3.1 Digitaler Zwilling ... 23
3.1.1 Digitaler Zwilling im cyber-physischen Produktionssystem ... 25
3.1.2 Architektur des Digitalen Zwillings ... 26
3.2 Ansätze zur Integration der domänenübergreifenden Modelle ... 30
3.2.1 AutomationML-basierte Ansätze ... 31
3.2.2 SysML-basierte Ansätze ... 33
3.2.3 Ontologie-basierte Ansätze ... 35
3.2.4 Toolset-basierte Ansätze ... 36
3.3 Ansätze zur Synchronisierung der Modelle eines automatisierten Systems ... 37
3.3.1 3D-Laserscan-basierte Ansätze ... 37

3.3.2 Netzwerkscan-basierte Ansätze ... 39
3.3.3 Kommunikationsnetzwerkscan-basierte Ansätze ... 40
3.3.4 Änderungsdokumentationsanalyse-basierte Ansätze ... 41
3.4 Ansätze zur Modellgenerierung aus einem bestehenden automatisierten System ... 42
3.4.1 Generierung eins 3D-CAD-Modells ... 42
3.4.2 Generierung von Systemtopologien ... 45
3.4.3 Generierung eines Simulationsmodells ... 45
3.5 Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen für die Konzeption ... 46

4 Lösungsansatz zur domänenübergreifenden Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings ... 51
4.1 Grundlegende Konzeptentscheidungen und Ansatz ... 51
4.1.1 Ankerpunkte innerhalb des Digitalen Zwillings ... 53
4.1.2 Voraussetzungen zur Synchronisierung der Ankerpunkte ... 57
4.2 Ankerpunktmethode zur Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings ... 61
4.2.1 Gesamtprozessablauf der Ankerpunktmethode ... 62
4.2.2 Phase 1: Änderungsdetektion ... 65
4.2.3 Phase 2: Domänenübergreifenden Abhängigkeitsdetektion ... 70
4.2.4 Phase 3: Modellanpassung ... 77

5 Realisierung der Ankerpunktmethode mithilfe eines Assistenzsystems ... 87
5.1 Gesamtüberblick über Softwarekomponenten des Assistenzsystems ... 87
5.2 Komponente „Grafische Benutzeroberfläche“ ... 89
5.3 Komponente „Wrapper“ ... 90
5.4 Komponente „Metamodell der SPS-Steuerungssoftware“ ... 92
5.5 Komponente „Ankerpunktmodellierung und Analyse“ ... 94
5.6 Komponente „Change-Request-Modell-Generierung“ ... 97

6 Evaluierung ... 101
6.1 Szenario 1: Modulares Produktionssystems ... 101
6.1.1 Digitaler Zwilling des modularen Produktionssystems ... 104
6.1.2 Bewertung der Evaluierungsergebnisse ... 106
6.2 Szenario 2: Intelligentes Lager in der flexiblen Produktionsanlage ... 108
6.2.1 Digitaler Zwilling des intelligenten Lagers ... 110
6.2.2 Bewertung der Evaluierungsergebnisse ... 112
6.3 Erfüllung der Forschungsanforderungen und Zielsetzung der Arbeit ... 115

7 Schlussbetrachtung ... 117
7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Bewertung ... 117
7.2 Ausblick ... 118

Literaturverzeichnis ... 120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erhöhung der Verfügbarkeit eines automatisierten Systems durch Nutzung des Digitalen Zwillings 2
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit 8
Abbildung 3: Grundstruktur mechatronischer Systeme nach der VDI-Richtlinie 2206 [53] 11
Abbildung 4: Das V-Modell für mechatronische Entwicklungsvorgehen nach [53] 13
Abbildung 5: Engineering-Vorgehensmodell und dessen domänenübergreifende Aktivitäten nach [61] 14
Abbildung 6: Daten und Informationsaustauch während des Engineerings eines automatisierten Systems nach [46] 16
Abbildung 7: Tools während des funktionalen Engineerings in Anlehnung an [61] 17
Abbildung 8: Modellaustauch zwischen Tools über proprietäre Punkt-zu-Punkt-Schnittstellen im Vergleich zum Modellaustauch über zentrale Austauchformate 19
Abbildung 9: Grundstruktur von AutomationML nach [165] 20
Abbildung 10: Der Digitale Zwilling und seine Eigenschaften im cyber-physischen Produktionssystems nach [6] 26
Abbildung 11: Architektur des Digitalen Zwillings in Anlehnung an [6] 28
Abbildung 12: Integriertes Engineering mit der AML-Integrationsplattform, AutomationML Hub nach [139] 31
Abbildung 13: Semantischer Modellierungsansatzes mit System- und Charakteristik-Metamodell nach [107] 32
Abbildung 14: Integrierter fachübergreifende Engineering-Workflow nach [104] 34
Abbildung 15: Prozessablauf des CAD-Modellerkennungsprozesses nach [124] 38
Abbildung 16: Prozessüberwachungsmethode nach [29] 40
Abbildung 17: Methode zur Synchronisierung des elektrischen schematischen Modells des Systems nach [128] 41
Abbildung 18: Reverse-Engineering-Prozess nach [131] 44
Abbildung 19: Digitaler Zwilling eines automatisierten Systems und dessen Modelle innerhalb des Digitalen Zwillings 52
Abbildung 20: Granularität des Assets innerhalb der Betriebsmittel in einem automatisierten System in Anlehnung an [166] und [140] 54
Abbildung 21: Ankerpunkte einer mechatronischen Komponente innerhalb des Digitalen Zwillings eines automatisierten Systems 56
Abbildung 22: Kapselung von domänenübergreifenden wiederverwendbaren Modellen eines Assets innerhalb einer Komponentenbibliothek 58
Abbildung 23: Signalname eines Assets gemäß der Namenskonvention 60
Abbildung 24: Prozessschritte der Ankerpunktmethode 63
Abbildung 25: Änderungsdetektion anhand des Formalisierungsprozesses der SPS-Steuerungssoftware in der Ankerpunktmethode 68
Abbildung 26: Abstraktionsmodell der formalen Beschreibung der SPS-Steuerungssoftware 70
Abbildung 27: Vorgehen zur Erkennung des Klassifizierungslabels "Neue Funktionsgruppe wurde dem System hinzugefügt" im Entscheidungsbaum 76
Abbildung 28: Prozessablauf des Lösungsansatzes basierend auf dem Überschreiben der Modelle 79
Abbildung 29: Prozessablauf des Lösungsansatzes basierend auf der Basismodell-Versionierung 81
Abbildung 30: Prozessablauf des Lösungsansatzes basierend auf Versionierung des Gesamtsystemmodells 81

Abbildung 31: Referenzierung der Ankerpunkte des Gesamtsystemmodells auf das Basismodell nach Versionierungsregeln 82
Abbildung 32: Vereinfachte Darstellung des Prozessverlaufs des Engineering-Change-Managements 83
Abbildung 33: Prozessablauf der Modellanpassung in der Ankerpunktmethode basierend auf der Erstellung generischer Change-Request-Modelle 85
Abbildung 34: Gesamtübersicht über die Softwarekomponenten des Assistenzsystems 88
Abbildung 35: Grafische Benutzeroberfläche des Assistenzsystems 90
Abbildung 36: Metamodellierungsansatz zur Erstellung des Metamodells einer SPS-Steuerungssoftware 93
Abbildung 37: Java-Klassen der Komponente "Ankerpunktmodellierung und Analyse″..... 95
Abbildung 38: Java-Klassen der Komponente "Change-Request-Modell-Generierung″..... 99
Abbildung 39: Change-Request-Modell innerhalb von Teamcenter-PLM-Plattform 100
Abbildung 40: Modulares Produktionssystem und dessen Assets 102
Abbildung 41: Engineering-Tools und erstellter Digitaler Zwilling vom modularen Produktionssystem 105
Abbildung 42: Evaluierungsszenario anhand des modularen Produktionssystems 106
Abbildung 43: intelligentes Lager in der flexiblen Produktionsanlage..... 110
Abbildung 44: Evaluierungsszenario anhand des iLagers in der flexiblen Produktionsanlage . 111
Abbildung 45: Abfolge der Prozessschritte und die durchschnittliche Zeitdauer für die einzelnen Schritte der Rekonfiguration ohne und mit Verwendung des Digitalen Zwillings 113
Abbildung 46: Zeitdauer- und Prozessvergleich der beiden Rekonfigurationsprozesse mit und ohne synchronisierten Digitalen Zwilling mittels der Ankerpunktmethode.. 114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung und Bewertung der Forschungsansätze zur Integration domänenübergreifender Modelle des Digitalen Zwillings 47
Tabelle 2: Zusammenfassung und Bewertung der bestehenden Ansätze zur Synchronisierung von Modellen eines bestehenden automatisierten Systems 48
Tabelle 3: Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze zur Modellgenerierung aus einem bestehenden automatisierten System 49
Tabelle 4: Die Regeltabelle zur domänenübergreifenden Änderungsdetektion aus SPS-Steuerungssoftware 74
Tabelle 5: Bearbeitungsstationen sowie die Steuerungs- und Laststromversorgungs-Komponenten des MPS 103
Tabelle 6: Tools und erstellte Modelle innerhalb des digitalen Zwillings des MPS 104
Tabelle 7: Durchführung der Synchronisierung des Digitalen Zwillings mit dem Assistenzsystem 107
Tabelle 8: Bearbeitungsstationen sowie die Steuerungs- und Laststromversorgung-Komponenten des iLagers 109
Tabelle 9: Tools und die erstellte Modelle innerhalb des Digitalen Zwillings des iLagers 111
Tabelle 10: Quantitative und qualitative Bewertung der Evaluierungsergebnisse 115

Abkürzungsverzeichnis

API	**A**pplication **P**rogramming **I**nterface
ARENA2036	**A**ctive **R**esearch **E**nvironment for the **N**ext Generation of **A**utomobiles **2036**
AutomationML	**A**utomation **M**arkup **L**anguage
BoM	**B**ill **o**f **M**aterial
BoP	**B**ill **o**f **P**rocess
CAD	**C**omputer-**A**ided **D**esign
CPS	**C**yber-**P**hysical **S**ystem
CPU	**C**entral **P**rocessing **U**nit
CRM	**C**hange **R**equest **M**odel
DI	**D**igital **I**nput
DIN	**D**eutsches **I**nstitut für **N**ormung
DO	**D**igitale **O**utput
DZ	**D**igitaler **Z**willing
E/A	**E**in-/**A**usgabe
ECAD	**E**lectronic and Electrical **C**omputer-**A**ided **D**esign
EMF	**E**clipse **M**odeling **F**ramework
FUP	**Fu**nktions**p**lan
GUI	**G**raphical **U**ser **I**nterface
IAS	**I**nstitut für **A**utomatisierungstechnik und **S**oftwaresysteme
ID	**Id**entifikator
iLager	**i**ntelligentes **Lager**
MPS	**M**odulares **P**roduktions**s**ystem
OPC UA	**Op**en **C**onnectivity **U**nified **A**rchitecture
OWL	**W**eb **O**ntology **L**anguage
PLM	**P**roduct-**L**ifecycle-**M**anagement
PROFIBUS	**Pro**cess **Fi**eld **Bus**
Profinet	**Pro**cess **Fi**eld **Net**work
RDF	**R**esource **D**escription **F**ramework

SOA	**S**ervice-**O**riented **A**rchitecture
SoP	**S**tart **o**f **P**roduction
SPS	**Sp**eicherprogrammierbare **S**teuerung
SQL	**S**tructured **Q**uery **L**anguage
STEP	**St**andard for the **E**xchange of **P**roduct model data
SysML	**Sys**tems **M**odeling **L**anguage
UML	**U**nified **M**odeling **L**anguage
VDI	**V**erein **D**eutscher **I**ngenieure
VPN	**V**irtual **P**rivate **N**etwork
W3C	**W**orld **W**ide **W**eb **C**onsortium
WLAN	**W**ireless **L**ocal **A**rea **N**etwork
XML	E**x**tensible **M**arkup **L**anguage
3D	**3**-**D**imensional
4GD	**4**th **G**eneration **D**esign

Begriffsverzeichnis

Aktor: Einheit zur Umsetzung von Stellinformation tragenden Signalen geringer Leistung in leistungsbehaftete Signale einer zur Prozessbeeinflussung notwendigen Energieform [1].

Ankerpunkt: Komponentenmodelle eines Assets auf der Ebene mechatronischer Komponenten im Gesamtsystemmodell eines automatisierten Systems innerhalb der Domäne Mechanik, Elektrik und Software.

Architektur: Kombination von Elementen eines Modells aufbauend auf Prinzipien und Regeln zum Zweck seiner Konstruktion, Weiterentwicklung und Nutzung [2].

Asset: Gegenstand, der einen Wert für eine Organisation hat [3]. Ein Asset kann hierbei das gesamte automatisierte System oder eine Einheit aus vielen Sensoren und Aktoren bis hin zu einer Schraube im System sein.

Automatisiertes System: Technischen Einrichtungen, die für die Automatisierung des technischen Prozesses erforderlich sind [4].

Co-Simulation: Technik, die eine globale Simulation eines gekoppelten Systems über die Zusammensetzung von Simulatoren ermöglicht [5].

Cyber-physisches System: System, das reale (physische) Objekte und Prozesse verknüpft mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze [3].

Digitaler Zwilling: Virtuelles Abbild eines physischen Assets in einem cyber-physischen System, das in der Lage ist, seine statischen und dynamischen Eigenschaften zu reflektieren. Ein Digitaler Zwilling enthält und mappt domänenübergreifenden Modelle eines physischen Assets [6].

Domäne: Abgrenzbarer Anwendungsbereich, in dem typische Technologien mit vergleichbaren Methoden für gleiche Interessengruppen eingesetzt werden [7].

Engineering-Prozess: Reihe von Arbeitsschritten, die von einem Ingenieur zur Erstellung einer spezifischen Kundenlösung durchgeführt werden, von der Angebots-, Analyse-, Entwurf- und Implementierungsphase bis hin zur Inbetriebnahme und Übergabe der Anlage an den Kunden.

Inkonsistenz: Fehler oder Widersprüche in Modellen. Inkonsistenzen können innerhalb eines einzelnen Modells oder zwischen mehreren Modellen auftreten [8].

Komplexität: Im Bereich der Informationstechnologie durch die Vielzahl und Heterogenität der Elemente und deren Veränderungsdynamik in einem System charakterisiert [9].

Mechatronische Komponente: Ein Asset, welches aus mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Elementen besteht [10].

Metamodell: Beschreibt die Struktur eines Modells und beschreibt so den Modelltyp. Es definiert die verfügbaren Modellelemente und deren mögliche Verknüpfungen [8].

Modell: Schlüssige, ausreichend detaillierte Abstraktion von Aspekten in einem Anwendungsbereich [3].

Rekonfiguration: Umfasst die technische Sicht des Prozesses der Veränderung eines bereits entwickelten und operativ eingesetzten Systems, um es an neue Anforderungen anzupassen, Funktionalität zu erweitern, Fehler zu beseitigen oder die Qualitätseigenschaften zu verbessern [11]

Rekonfigurierbare Systeme: Systeme die so konzipiert sind, dass eine schnelle Strukturänderung möglich ist, um zugige Anpassung der Produktkapazitäten und Funktionalität gemäß geänderte Marktanforderungen durchzuführen [12].

Semantik: Beziehung zwischen Zeichen und ihrer Bedeutung. Zeichen können grafischer Natur (z. B. Verkehrszeichen) oder alphanumerische Einheiten (z. B. Wörter) sein, die Dinge benennen [13].

Sensor: Einheit zur Erfassung von physikalischen Prozessgrößen und deren Umwandlung in elektrische oder optische Messsignale mit dem Zweck der Verarbeitung dieser Messsignale durch einen Rechner [14].

Service orientierte Architektur: Paradigma für die Strukturierung und Nutzung verteilter Funktionalität, die von unterschiedlichen Besitzern verantwortet wird [15].

Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS): Ein Industrie-Computersteuerungssystem, das den Zustand von Sensoren mittels Eingangssignalen kontinuierlich überwacht und Entscheidungen basierend auf einer kundenspezifischen Steuerungssoftware zur Steuerung des Zustands von Aktoren trifft.

Synchronisierung: Systematisches Verfahren für die Erkennung der Systemänderungen und ihrer relevanten Einflüsse sowie die Aktualisierung der Modelle.

Zusammenfassung

Die von den Märkten ausgehenden Anforderungen bezüglich des ständigen Herausbringens von marktgerechten Innovationen zwingt Industrieunternehmen, einerseits zur zunehmenden Verwendung hochautomatisierter Produktionssysteme und andererseits diese während ihres Lebenszyklus oft rekonfigurieren zu müssen. Dies erfordert, dass flexible automatisierte Systeme zur Verfügung stehen, die bei Bedarf effizient rekonfiguriert werden können.

Im Kontext der cyber-physischen Systeme kann der Digitale Zwilling eines automatisierten Systems diese Herausforderung angehen, um Systeme einfach und schnell zu rekonfigurieren. So können Rekonfigurations-Szenarien in einer simulativen Umgebung realisiert und getestet werden. Die reale Wiederinbetriebnahme des Fertigungssystems benötigt daher weniger Zeit und ermöglicht eine höhere Systemverfügbarkeit.

Voraussetzung für den Einsatz des Digitalen Zwillings eines automatisierten Systems ist allerdings, dass ein ständig aktuelles Anlagenmodell der mechatronischen Bestandteile einer realen Anlage während der verschiedenen Phasen ihres Lebenszyklus existiert. Daraus leitet sich das Ziel dieser Forschung ab, eine Methodik zu erstellen, die eine domänenübergreifende Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings mit einem realen, automatisierten System ermöglicht. Damit wird ein Beitrag zur Steigerung der Effizienz des gesamten Engineering-Prozesses ab der Inbetriebnahme geleistet.

Die in der vorliegenden Arbeit konzipierte Methodik erlaubt es, die Abweichungen zwischen den Modellen und der Realität während des Betriebs zu ermitteln. Im Mittelpunkt steht dabei die entwickelte Ankerpunktmethode, die in einem Assistenzsystem mündet. Diese detektiert die Änderungen und deren domänenübergreifende Abhängigkeiten in der realen Welt mit Hilfe einer regelbasierten Analyse der aktuellen SPS-Steuerungssoftware eines automatisierten Systems. Die Ankerpunktmethode selbst beinhaltet eine automatisierte Modellanpassung unter Berücksichtigung der Nachvollziehbarkeit von Änderungen am Gesamtsystemmodell. Dadurch wird die Aufrechterhaltung der Konsistenz zwischen den domänenübergreifenden Modellen des Digitalen Zwillings gewährleistet. Diese Methode kommt innerhalb des Assistenzsystems auf der Grundlage der automatisierten Generierung von Change-Request-Modellen für die betroffenen Komponentenmodelle des Digitalen Zwillings zum Einsatz.

Die Validierung der Methodik (Ankerpunktmethode) erfolgt auf der Basis eines modularen Produktionssystems am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) und eines intelligenten Lagers in einer flexiblen Produktionsanlage auf dem Forschungscampus ARENA2036 und wird anhand der formulierten Forschungsanforderungen evaluiert.

Abstract

Nowadays, industry is increasingly faced with the challenge of delivering customer-specific products in ever shorter production times. Shortened product life cycles and increasing market demands require continuous improvement and reconfiguration of current manufacturing system. This requires flexible automated manufacturing systems that can be efficiently reconfigured as required.

In the context of Cyber-Physical Systems, a Digital Twin of a manufacturing system can address this challenge to reconfigure systems quickly and effortlessly by implementing and testing reconfiguration scenarios in a simulated environment. The real recommissioning of the automation system therefore requires less time and allows for higher system availability. However, a prerequisite for the usability of the Digital Twin of an automation system is the availability of an up-to-date plant model of the mechatronic components of the real plant during the different phases of its life cycle. Hence, the goal of the research is defined to create a systematic approach that enables a cross-domain synchronization of the models of the Digital Twin with a real automation system. This will contribute to increasing the efficiency of the engineering process of the system after commissioning.

The methodology proposed in this thesis enables the detection of deviations between the models and the reality of the system during operation. The main focus is the developed Anchor-Point-Method, which leads to an assistance system that detects the changes and their cross-domain dependencies in the real world by means of a rule-based analysis of the current PLC control software of an automated system. The Anchor-Point-Method itself includes an automated model adaptation considering the tracking of changes in the overall system model. This ensures that consistency is maintained between the digital twin's cross-domain models. This method is used within the assistance system based on the automated generation of change request models for the relevant component models of the Digital Twin.

The validation of the methodology (Anchor-Point-Method) is carried out on a modular production system at the Institute of Industrial Automation and Software Engineering (IAS) and an intelligent warehouse in a flexible production system on the research campus ARENA2036 and is evaluated according to the formulated research requirements