

**Forschungsbericht
Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme**

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

Philipp Marks

**Softwaregestütztes
Assistenzkonzept zur
Modernisierung von
Automatisierungssystemen**

Band 2/2020

Universität Stuttgart

Softwaregestütztes Assistenzkonzept zur Modernisierung von Automatisierungssystemen

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Philipp Marks
aus Göppingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Tag der mündlichen Prüfung: 14.07.2020

Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme
der Universität Stuttgart

2020

IAS-Forschungsberichte

Band 2/2020

Philipp Marks

**Softwaregestütztes Assistenzkonzept zur
Modernisierung von Automatisierungssystemen**

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 978-3-8440-7575-5

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 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich für die Betreuung dieser wissenschaftlichen Arbeit, die zahlreichen konstruktiven und wertvollen Anregungen und Diskussionen in den letzten Jahren sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay danke ich für die lehrreiche und angenehme Zusammenarbeit im DFG-Projekt FlexA, das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Meinem Projektpartner im DFG-Projekt, Herrn Xuan Luu Hoang, danke ich herzlich für die gute Zusammenarbeit, die exklusive Stadtführung in Hamburg sowie nette Treffen in Stuttgart.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für die gegenseitige Unterstützung und die freundschaftliche Atmosphäre am und auch außerhalb des IAS. Besonders danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. Nasser Jazdi, der jederzeit ein offenes Ohr hatte und die Arbeit mit zahlreichen hilfreichen Anmerkungen unterstützt hat. Timo Müller danke ich für zahlreiche Diskussionen über meine Arbeit sowie die gründliche und kritische Durchsicht des Manuskripts.

Weiterhin möchte ich mich auch bei den zahlreichen Studierenden bedanken, die im Rahmen Ihrer Abschlussarbeit einen wesentlichen Beitrag zur technischen Umsetzung des Konzepts geleistet haben.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Janina, meiner Familie, meinen Schwiegereltern und meinen Freunden für die Unterstützung, den Rückhalt und die Motivation.

Stuttgart, im Juli 2020

Philipp Marks

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Begriffsverzeichnis	viii
Zusammenfassung.....	x
Abstract.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Modernisierung von Automatisierungssystemen	2
1.3 Zielsetzung.....	3
1.4 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Modernisierungsprozess von Automatisierungssystemen: Grundlagen und Stand der Technik.....	6
2.1 Ablauf des Modernisierungsprozesses	7
2.1.1 Spezifische Eigenschaften von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung.....	8
2.1.2 Referenzprozess	10
2.1.3 Schwachstellen des Modernisierungsprozesses.....	12
2.2 Bestehende Ansätze zur Unterstützung des Modernisierungsprozesses	14
2.2.1 Ansätze zur Erkennung von Abweichungen zwischen Ist- und Sollzustand (Phase „Identification“)	14
2.2.2 Ansätze zur Generierung von Handlungsoptionen und zur Auswirkungsanalyse (Phase „Preparation“)	15
2.2.3 Ansätze zum Vergleich von Handlungsoptionen und zur Entscheidungsunterstützung (Phase „Decision“).....	19
2.3 Forschungslücke und Ableitung von Anforderungen.....	23
3 Assistenzsysteme im Engineering: Grundlagen und Stand der Technik.....	26
3.1 Allgemeine Aspekte von Assistenzsystemen	26
3.1.1 Definition von Assistenzsystemen.....	26
3.1.2 Automatisierungsgrad von Assistenzsystemen.....	27
3.1.3 Ablauf des Assistenzprozesses	28
3.1.4 Aufbau von wissensbasierten Systemen	29
3.2 Stand der Technik: Assistenzsysteme im Engineering.....	31
3.3 Grundlagen agentenbasierter Assistenzsysteme	34
3.3.1 Software-Agenten und Agentensysteme.....	35
3.3.2 Eigenschaften von Software-Agenten	35
3.3.3 Eignung von Agenten zur Realisierung von Assistenzsystemen.....	36

3.4	Stand der Technik: Agentenbasierte Assistenzsysteme.....	38
4	Grobkonzept zur Strukturierung eines assistierten Modernisierungsprozesses	41
4.1	Phasen des assistierten Modernisierungsprozesses	41
4.2	Unterstützbarkeit der Phasen durch ein Assistenzsystem.....	47
5	Konzept des agentenbasierten Assistenzsystems.....	54
5.1	Informationsquellen des Assistenzsystems.....	54
5.1.1	Modell des Automatisierungssystems	54
5.1.2	Produktionsanfrage	59
5.1.3	Domänenspezifisches Wissen.....	60
5.1.4	Erfahrungswissen.....	60
5.2	Methodischer Ablauf der Phasen des Modernisierungsplanungsprozesses.....	62
5.2.1	Phase 0: Erfassung des Ist-Zustands und Modellierung des Automatisierungssystems	62
5.2.2	Phase 1: Überprüfung des Modernisierungsbedarfs	63
5.2.3	Phase 2: Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten	65
5.2.4	Phase 3: Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten	66
5.2.5	Phase 4: Entscheidung	71
5.2.6	Phase 6: Bewertung der Entscheidung.....	72
5.3	Architektur des Agentensystems	73
5.3.1	Architekturentscheidungen	73
5.3.2	Agentenrollen und Agententypen	75
5.3.3	Funktionales Verhalten des Agentensystems	78
5.3.4	Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit der Architektur.....	82
6	Realisierung des Assistenzkonzepts.....	83
6.1	Realisierung des agentenbasierten Assistenzsystems	83
6.1.1	Übersicht.....	83
6.1.2	Realisierung des Informationsmodells.....	85
6.1.3	Eingabe der Produktionsanfrage.....	89
6.1.4	Generierung und Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten	90
6.1.5	Darstellung von Modernisierungsmöglichkeiten.....	92
6.1.6	Vorschlagsfunktion des Assistenzsystems.....	94
6.2	Realisierung der Simulation eines SPS-gesteuerten modularen Produktionssystems.....	95
6.2.1	Übersicht.....	95
6.2.2	Simulation in Unity.....	96
6.2.3	Simulation der SPS-Steuerung.....	97
7	Evaluierung mithilfe von Modernisierungsszenarien.....	98
7.1	Methodik der Evaluierung.....	98
7.2	Fallstudie 1: Handhabungs- und Bohrautomat	99
7.2.1	Beschreibung des Automaten	99
7.2.2	Modernisierungsszenarien	100
7.2.3	Modellierung des Automaten.....	101
7.2.4	Ergebnisse.....	103
7.2.5	Diskussion.....	106
7.3	Fallstudie 2: Simulation eines modularen Produktionssystems.....	108

7.3.1	Beschreibung des modularen Produktionssystems	109
7.3.2	Modernisierungsszenarien	109
7.3.3	Modellierung des modularen Produktionssystems	111
7.3.4	Ergebnisse	111
7.3.5	Diskussion	113
7.4	Evaluierung anhand der Anforderungen	114
8	Zusammenfassung und Ausblick	117
8.1	Zusammenfassung	117
8.2	Ausblick	119
	Literaturverzeichnis	123
	Anhang A: XML-Schema des Modells des Automatisierungssystems	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2.1:	Darstellung des PPR-Konzepts nach [ScDr09]	9
Abbildung 2.2:	Engineering Change Referenzprozess nach [WCBL15]	11
Abbildung 2.3:	Qualitative Darstellung von Parameterabhängigkeiten als MDM (links) und als Baumdiagramm (rechts) nach [HMWF17] und [HFMW17].....	18
Abbildung 2.4:	Visualisierung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nach [VDI5201].....	23
Abbildung 3.1:	Automatisierungsgrade in Anlehnung an [ShVe78].....	27
Abbildung 3.2:	Vergleich der Klassifikationen zum Ablauf der Entscheidungsfindung.	28
Abbildung 3.3:	Aufbau von wissensbasierten Systemen.....	30
Abbildung 3.4:	Eigenschaften von Software-Agenten [Wagn08]	36
Abbildung 4.1:	Phasen des assistierten Modernisierungsprozesses.....	41
Abbildung 4.2:	Grobablauf der Phase 0 des Modernisierungsprozesses	42
Abbildung 4.3:	Grobablauf der Phase 1 des Modernisierungsprozesses	43
Abbildung 4.4:	Grobablauf der Phase 2 des Modernisierungsprozesses.....	44
Abbildung 4.5:	Grobablauf der Phase 3 des Modernisierungsprozesses	45
Abbildung 4.6:	Grobablauf der Phase 4 des Modernisierungsprozesses	46
Abbildung 4.7:	Grobablauf der Phase 5 des Modernisierungsprozesses	46
Abbildung 4.8:	Grobablauf der Phase 6 des Modernisierungsprozesses	47
Abbildung 5.1:	Bestandteile des Modells des Automatisierungssystems.....	55
Abbildung 5.2:	Formalisierte Prozessbeschreibung des Prozessschritts "Bohren"	59
Abbildung 5.3:	Beispielhafte Fälle der Wissensbasis für mechanische Änderungen sowie für Softwareänderungen	61
Abbildung 5.4:	Aktivitätsdiagramm für die Überprüfung des Modernisierungsbedarfs	63
Abbildung 5.5:	Modifizierte Produktionsanfrage mit Modernisierungsbedarf	65
Abbildung 5.6:	Aktivitätsdiagramm für die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten.....	66
Abbildung 5.7:	Aktivitätsdiagramm für die Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten ..	67
Abbildung 5.8:	Aktivitätsdiagramm für die Software-Aufwandsabschätzung	70
Abbildung 5.9:	Aktivitätsdiagramm für die Bereitstellung der Entscheidungsgrundlage.....	72
Abbildung 5.10:	Agententypen und die von ihnen vertretenen Rollen.....	76
Abbildung 5.11:	Agentenarchitektur des Assistenzsystems	78
Abbildung 5.12:	Sequenzdiagramm der Agentenkommunikation.....	80
Abbildung 5.13:	Zusammenfassung des Assistenzkonzepts zur Modernisierung automatisierter Systeme unter Einbeziehung der Informationsquellen, des methodischen Ablaufs und der Architektur des Agentensystems.....	81
Abbildung 6.1:	Aufbau des Assistenzsystems und verwendete Austauschformate der Bestandteile des Informationsmodells	84
Abbildung 6.2:	Flussdiagramm des Assistenzsystems	84
Abbildung 6.3:	Verwaltung einer Ressource im PPR Model Manager	86
Abbildung 6.4:	Verwaltung von Topologieinformationen im PPR Model Manager	86
Abbildung 6.5:	Auszug aus den Vorbedingungen für die Prozesse Drehen und Bohren	88
Abbildung 6.6:	Klassenstruktur des Modells des Automatisierungssystems	89
Abbildung 6.7:	Eingabe einer Produktionsanfrage in Form der Formalisierten Prozessbeschreibung.....	90
Abbildung 6.8:	Abfrage der Einschätzung von Hardwareänderungsaufwänden beim Benutzer	91
Abbildung 6.9:	Ergebnis der Anwendung von Softwaremetriken auf einen SPS-Funktionsbaustein	92
Abbildung 6.10:	Ergebnisdarstellung einer Modernisierungsmöglichkeit	93

Abbildung 6.11: Vergleichsdarstellung zweier Modernisierungsmöglichkeiten	93
Abbildung 6.12: Assistenzvorschläge bei Verwaltung des Anlagenmodells (links) und bei Eingabe der Produktionsanfrage (rechts).....	94
Abbildung 6.13: Simulation des modularen Produktionssystems	95
Abbildung 6.14: Aufbau der Simulation des modularen Produktionssystems	95
Abbildung 6.15: Veränderung von Parametern zur Laufzeit der Simulation	96
Abbildung 6.16: Debuggen des simulierten Steuerungsprogramms in TIA Portal	97
Abbildung 7.1: Vorgehen der Evaluierung	98
Abbildung 7.2: Handhabungs- und Bohrautomat am IAS (links) und dessen CAD-Modell (rechts)	99
Abbildung 7.3: Topologie des Handhabungs- und Bohrautomaten.....	100
Abbildung 7.4: Modernisierungsmöglichkeiten für die Station "Schwenkarm"	105
Abbildung 7.5: Kombinatorische Komplexität der generierten Modernisierungsmöglichkeiten für Szenario 13	106
Abbildung 7.6: Qualitative und vereinfachte Darstellung des Aufwands für die Modernisierungsplanung nach verwendeter Werkzeugunterstützung	108
Abbildung 7.7: Modulares Produktionssystem (links) und Draufsicht des CAD-Modells (rechts)	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Identifizierte Schwachstellen der Prozessaktivitäten nach [WCBL15] des Modernisierungsprozesses	12
Tabelle 2.2:	Übersicht Software-Metriken	20
Tabelle 3.1:	Eigenschaften von Agenten und Herausforderungen von Engineering-Assistenzsystemen	37
Tabelle 4.1:	Schwachstellen aus Kap. 2.1.3 sowie Einschätzung der Abmilderung durch assistierten Modernisierungsplanungsprozess	52
Tabelle 5.1:	Entwicklungsdisziplinen eines mechatronischen Systems sowie Anknüpfungspunkte für die Erstellung eines vereinfachten Modells.....	55
Tabelle 5.2:	Ausgewählte PPR-Parameter für das Beispiel "Bohrstation"	56
Tabelle 5.3:	Multiple Domain Matrix mit Abhängigkeiten zwischen Prozess- und Ressourcenparametern	57
Tabelle 5.4:	Erweiterung der MDM um die Fähigkeitsbeschreibung des Prozesses.....	58
Tabelle 5.5:	(Vor-)Bedingungen für den Prozess Bohren	58
Tabelle 5.6:	Übersicht der Agentenrollen	75
Tabelle 5.7:	Anzahl der instanziierten Agenten je Agententyp	77
Tabelle 6.1:	Multiple Domain Matrix mit Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern der Bohrstation	88
Tabelle 7.1:	Modernisierungsszenarien des Handhabungs- und Bohrautomaten	101
Tabelle 7.2:	Aufwand zur Erstellung des Modells des Handhabungs- und Bohrautomaten	103
Tabelle 7.3:	Anzahl der Vorschläge pro Station für die untersuchten Modernisierungsszenarien des Handhabungs- und Bohrautomaten	104
Tabelle 7.4:	Modernisierungsszenarien des modularen Produktionssystems.....	110
Tabelle 7.5:	Aufwand zur Erstellung und Verfeinerung des Modells des modularen Produktionssystems	111
Tabelle 7.6:	Anzahl der Vorschläge für Modernisierungsszenarien des modularen Produktionssystems	112

Abkürzungsverzeichnis

CAD	C omputer A ided D esign
CAE	C omputer A ided E ngineering
CAEX	C omputer A ided E ngineering E xchange
CI	C omputational I ntelligence
COCOMO	C onstructive C ost M odel
DFG	D eutsche F orschungsgemeinschaft
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung
DSM	D esign S tructure M atrix
ECM	E ngineering C hange M anagement
FEM	F inite- E lemente- M ethode
FIPA	F oundation for I ntelligent P hysical A gents
IAS	I nstitut für A utomatisierungstechnik und S oftwaresysteme
IEC	I nternational E lectrotechnical C ommission
ISO	I nternational O rganization for S tandardization
JADE	J ava A gent D evelopment F ramework
JSON	J avaScript O bject N otation
MDM	M ultiple D omain M atrix
MPS	M odulares P roduktionssystem
OODA	O bserve O rient D ecide A ct
PLM	P roduct- L ifecycle- M anagement
POE	P rogrammorganisationseinheit
PPR	P rodukt- P rozess- R essource
SPS	S peicherprogrammierbare S teuerung
UML	U nified M odeling L anguage
VDI	V erein D eutscher I ngenieur e
WS	W erkstück
XML	E xtensible M arkup L anguage

Begriffsverzeichnis

Agent: „Ein Agent ist eine abgrenzbare (Hardware- oder/und Software-) Einheit mit definierten Zielen [...] Ein Agent ist darauf ausgelegt, diese Ziele durch selbstständiges Verhalten zu erreichen und interagiert dabei mit seiner Umgebung und anderen Agenten“ [VDI2653]

Agentensystem: „Ein System aus mehreren Agenten wird als Agentensystem bezeichnet. Im Englischen wird der Begriff „multi-agent system“ verwendet.“ [Raus15]

Assistenzsystem: Assistenzsysteme bezeichnen ein „technisches Hilfsmittel, das einen Nutzer direkt oder indirekt bei der Ausführung einer Handlung unterstützt“ [DIN91280]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Assistenzsystem für ein Softwarewerkzeug verwendet, das den Planungingenieur bei der Modernisierung von Automatisierungssystemen unterstützt.

Automatisierungssystem: Technisches System, das einen technischen Prozess automatisiert, ggf. mit Hilfe von Bedienpersonal, durchführt. Im Rahmen dieser Arbeit werden Automatisierungssysteme in der diskreten Fertigung allgemein als Automatisierungssystem bezeichnet.

Engineering: Engineering bezeichnet die systematische Anwendung von Wissen zur Konzeption, Erschaffung und Verbesserung von Anlagenautomatisierungssystemen [VDI3695] und beinhaltet in der Literatur meist die Planungsphase neuer Automatisierungssysteme. Der Begriff kann jedoch auch für spätere Lebenszyklusphasen verwendet werden und schließt somit die Modernisierungsplanung ein.

Fallbasiertes Schließen: Fallbasiertes Schließen bezeichnet ein maschinelles Lernverfahren, das auf der Basis von Analogie funktioniert. Mithilfe einer Fallbasis mit bereits gelösten Fällen kann ein ähnlicher Fall ermittelt werden und dessen Lösung für einen neuen Fall wiederverwendet und adaptiert werden.

Funktionale Einheit: Funktional zusammengehörige, meist durch örtliche Nähe geprägte Elemente des Automatisierungssystems, die im Zusammenspiel mit einer örtlich beliebig angeordneten Steuerung, eine Funktion des technischen Prozesses des Automatisierungssystems realisieren.

Modernisierung: Die Modernisierung von Automatisierungssystemen kann Änderungen an der Mechanik, der Elektronik und der Steuerungssoftware umfassen [MHFW18]. Im Rahmen dieser Arbeit werden Teilmodernisierungen des Automatisierungssystems nach der Klassifikation von [Figa10] betrachtet, die sich durch Änderungen in abgegrenzten Teilen des Automatisierungssystems und der weitestgehenden Beibehaltung sonstiger Systemstrukturen auszeichnen. Als Auslöser einer Modernisierung im Rahmen dieser

Arbeit werden Änderungen am zu fertigenden Produkt betrachtet, welche eine Anforderungsänderung an den technischen Prozess des Automatisierungssystems bedeuten.

Modernisierungsmöglichkeit: Eine Modernisierungsmöglichkeit stellt im Rahmen dieser Arbeit eine Handlungsoption in Form einer Software- und/oder Hardwareänderung dar, die potenziell dazu geeignet ist, das Automatisierungssystem an geänderte Produktanforderungen anzupassen.

PPR Model Manager: Im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Softwarewerkzeug zur Erstellung und Bearbeitung des Modells des Automatisierungssystems, das vom Assistenzsystem zur Unterstützung der Modernisierung verwendet wird.

Prinziplösung: Eine Prinziplösung „ist eine durch Eigenschaften charakterisierte und semantisch eindeutig definierte, abstrakte Lösung(svariante). [...] Die Prinziplösung stellt keine konkrete technische Umsetzung dar, kann jedoch auch als Verkörperung einer Gruppe, als Sammelbegriff oder Klasse, mehrerer konkreter technischer Umsetzungen interpretiert werden.“ [Ried17]

Produkt-Prozess-Ressource-Prinzip: Das Produkt-Prozess-Ressource-Prinzip beschreibt die grundlegenden Wirkzusammenhänge der drei enthaltenen Elemente in einem Automatisierungssystem. Das Produkt wird von einem technischen Prozess verändert. Zur Durchführung des technischen Prozesses werden technischen Ressourcen verwendet, die mithilfe des technischen Prozesses eine Veränderung des Produkts vornehmen. [ScDr09]

Speicherprogrammierbare Steuerung: „Eine SPS ist ein digital arbeitendes, elektronisches System, entworfen für die Verwendung in einer industriellen Umgebung. Es verwendet einen programmierbaren Speicher zur internen Speicherung von anwenderorientierten Anweisungen, um besondere Funktionen wie Logik, Ablauf, Zeit, Zählen und Arithmetik auszuführen und durch digitale oder analoge Eingänge und Ausgänge verschiedene Typen von Maschinen oder Prozessen zu steuern.“ [EN61131-1]

Teilflexibilität: Aufgrund der Mannigfaltigkeit von Automatisierungssystemen sowie der vielen zu beachtenden Aspekte kann die Flexibilität dieser Systeme nicht mit einer einzigen Kennzahl erfasst beziehungsweise beschrieben werden. Daher wird Flexibilität in Teilflexibilitäten unterteilt, die jeweils einen Aspekt der Flexibilität betrachten, beispielsweise Materialflussflexibilität oder Produktmixflexibilität. [WWBF14]

Wissensbasierte Systeme: Bei wissensbasierten Systemen handelt es sich um intelligente Informationssysteme, in denen Wissen mit Verfahren der Wissensrepräsentation und Wissensmodellierung abgebildet und nutzbar gemacht wird [BeKe03]. Das Wissen des Systems ist dabei in Problemlösungswissen und spezifisches Fachwissen unterteilt. [RFSE11]

Zusammenfassung

Die Modernisierung von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung ist ein aufwendiger, individuell durchgeführter und damit fehleranfälliger Prozess, der vom Erfahrungswissen der beteiligten Planer abhängt. Dabei sind bei der Modernisierungsplanung verschiedene Herausforderungen zu berücksichtigen, insbesondere fehlende oder veraltete Dokumentation des Systems, interdisziplinäre Abhängigkeiten sowie die enge Verzahnung des Produkts mit dem fertigenden Automatisierungssystem.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass der Modernisierungsplanungsprozess in der Praxis bislang nicht systematisch durchgeführt wird und dass hierfür kein durchgängiges Modellierungs- und Unterstützungskonzept existiert. Weiterhin sind bestehende Unterstützungskonzepte einzelner Teilaspekte meist nur aufwendig anwendbar, da keine Werkzeugunterstützung für die jeweilige Methodik existiert.

Die vorliegende Arbeit präsentiert daher zunächst ein Konzept zur Strukturierung des Modernisierungsprozesses in sieben Phasen. Für jede der Phasen wird beschrieben, ob und inwieweit ein Assistenzsystem den Planungsingenieur in seiner Tätigkeit unterstützen kann. Anschließend beschreibt die Arbeit das Konzept eines agentenbasierten Assistenzsystems, das den zuvor präsentierten systematischen Ablauf in Form eines Softwarewerkzeugs implementiert. Die Architektur des Assistenzsystems besteht aus unterschiedlichen Typen von Software-Agenten, die als Stellvertreter realer Komponenten und als Domänenexperten den Modernisierungsprozess durchführen. Das Informationsmodell des Assistenzsystems beruht auf dem Produkt-Prozess-Ressource-Prinzip und wird von den Software-Agenten verwendet, um den Modernisierungsbedarf einer Produktionsanfrage zu überprüfen sowie um Modernisierungsmöglichkeiten zu generieren und zu bewerten.

Mithilfe des realisierten Assistenzsystems, das neben der Modernisierungsplanung auch die Modellierung des Automatisierungssystems unterstützt, konnte das softwaregestützte Assistenzkonzept in zwei Fallstudien erfolgreich evaluiert und die Übertragbarkeit des Konzepts gezeigt werden. Sowohl für den untersuchten Handhabungs- und Bohrautomaten als auch für das modulare Produktionssystem generiert das Assistenzsystem korrekte und nachvollziehbare Modernisierungsmöglichkeiten, wobei der Zeitaufwand für die Modellierung des Systems vergleichsweise gering gehalten werden konnte.

Abstract

The modernization of industrial automation systems in the discrete manufacturing domain is a complex, individually executed and thus error-prone process, which depends on the experience of the planners involved. In modernization planning, various challenges have to be taken into account, in particular missing or obsolete documentation of the system, interdisciplinary dependencies as well as close interdependencies of the product and the industrial automation system.

In this work it is shown that the modernization planning process is not carried out systematically in industrial practice and that no consistent modeling and support concepts for this process exist. Furthermore, existing support concepts of sub-aspects are usually only applicable in a time-consuming way, since no tool support for the respective methodology exists.

This work therefore presents a concept for structuring the modernization process in seven phases. For each of the phases it is described whether and to what extent an assistance system can support the planning engineer in his work. Subsequently, this thesis describes the concept of an agent-based assistance system that implements the previously presented systematic process in the form of a software tool. The architecture of the assistance system consists of different types of software agents who perform the modernization process in their role as representatives of real components and as domain experts. The information model of the assistance system is based on the product-process-resource principle and is used to check the need for modernization of a given production request as well as to generate and evaluate modernization options.

With the help of the implemented assistance system, which supports not only the modernization planning but also the modeling of the industrial automation system, the software-assisted assistance concept was successfully evaluated in two case studies. Through the case studies, the transferability of the concept was demonstrated. The assistance system generates correct and comprehensible modernization options for the examined handling and drilling machine as well as for the examined modular production system, whereby the time required for modeling the system could be kept comparatively low.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Aufgrund der hohen Investitionskosten für automatisierte Maschinen und Anlagen in der diskreten Fertigung werden diese Automatisierungssysteme im Regelfall für eine Lebensdauer von einigen Jahren bis hin zu einigen Jahrzehnten ausgelegt und geplant [VoFa18, BWS+12]. Allerdings sind zum Zeitpunkt der Planung oftmals die Anforderungen an das Automatisierungssystem noch nicht vollständig bekannt, welche sich aus der Produktion des gewünschten initialen Produktes ergeben. So werden üblicherweise während und nach der Inbetriebnahme des Automatisierungssystems noch Anpassungen durchgeführt, um das gewünschte Produkt fertigen zu können [AJSW18b]. Dabei ist das Automatisierungssystem üblicherweise für ein statisches Produktionsumfeld ausgelegt, d.h. für eine zuvor festgelegte Produktvariante oder ein festgelegtes Produktportfolio, welches in frühen Phasen des Engineerings in Form der Anforderungen definiert wird [HFMW17].

In der Realität ist das Umfeld des Automatisierungssystems jedoch deutlich dynamischer als der Kontext für den es ursprünglich ausgelegt wurde. Änderungen am Produkt können beispielsweise durch Weiterentwicklung des Produkts, durch Einführung neuer Produktvarianten, technologische Neuerungen, geänderte Anforderungen an Qualität oder Sicherheit (z.B. durch Gesetze oder Normen) verursacht werden [Ladi18, VFST15, EIA112, MWHF17, BeSä09]. Diese Änderungen am Produkt bedingen im Regelfall Änderungen der Mechanik, der Elektrik und/oder der Software des zur Fertigung verwendeten Automatisierungssystems [VDF+14]. Diese Änderungen zielen darauf ab, das Automatisierungssystem in seiner Betriebsphase an die geänderten Anforderungen des Produkt- bzw. Produktionsumfelds anzupassen. Im Folgenden werden Änderungen dieser Art als Modernisierung bezeichnet.

Um die Zahl der Modernisierungsmaßnahmen aufgrund geänderter Anforderungen durch das dynamische Umfeld gering zu halten, wird seit den 1980er Jahren die Integration von Flexibilität in Automatisierungssysteme in der Produktion erforscht. Verschiedene Paradigmen über Flexible Produktionssysteme [BDR+84], Rekonfigurierbare Produktionssysteme [KHJ+99] hin zu den aktuell vielfach diskutierten Cyber-Physischen Produktionssystemen [Card19], zielen darauf ab, die Zahl der erforderlichen Modernisierungsmaßnahmen durch eine gesteigerte Flexibilität zu reduzieren. Allerdings befasst sich die Wissenschaft dabei hauptsächlich mit der flexiblen Gestaltung neuer Maschinen bzw. Anlagen und berücksichtigt die bereits vorhandenen Automatisierungssysteme in diesen Ansätzen nicht [LHFL14]. Auch zahlreiche Bestrebungen der letzten Jahre, das Engineering von Automatisierungssystemen zu erleichtern (z.B. in [DiJu19] genannte Ansätze), erfassen bestehende Automatisierungssysteme und deren Besonderheiten meist nicht. Im folgenden Teilkapitel werden diese Besonderheiten und der

Modernisierungsprozess von Automatisierungssystemen daher näher betrachtet und die identifizierte Forschungslücke aufgezeigt.

1.2 Modernisierung von Automatisierungssystemen

Automatisierungssysteme in der diskreten Fertigung werden aufgrund ihrer speziellen Anforderungen häufig als Einmalsystem oder in geringer Stückzahl für einen genau spezifizierten Verwendungszweck ausgelegt [BFK+10]. Während der mehrere Jahre oder Jahrzehnte umfassenden Betriebszeit sind daher in unregelmäßigen Abständen Modernisierungsmaßnahmen erforderlich, um das Automatisierungssystem an die sich wandelnden Anforderungen des Produktionsumfelds anzupassen [VFST15]. Im Gegensatz zur Neuplanung von Anlagenautomatisierungssystemen, bei denen das System bildlich gesprochen auf der grünen Wiese geplant wird (oft als Greenfield Engineering bezeichnet), weist die Modernisierungsplanung wesentliche Unterschiede auf.

Da bei der Modernisierung von Automatisierungssystemen das bestehende System den Ausgangspunkt aller Betrachtungen bildet, muss in der Planung des Modernisierungsprozesses zunächst eine Aufnahme des Anlagen-Ist-Zustandes erfolgen. Diese wird in der Praxis durch fehlende, veraltete oder widersprüchliche Dokumentation erschwert [Stru14]. Die Informationen zum Automatisierungssystem werden dabei üblicherweise von einem mit der Planung betrauten, erfahrenen Ingenieur aus heterogenen Datenquellen der unterschiedlichen Gewerke aggregiert. Die unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Planungsdaten wurden oftmals mit gewerkspezifischen oder teilweise sehr rudimentären Softwarewerkzeugen (z.B. Microsoft Office) erstellt, was insbesondere die Betrachtung von Schnittstellen zwischen den Gewerken erschwert [Stru14]. Die Aufnahme des Ist-Zustands erfolgt dabei bislang überwiegend manuell, eine Unterstützung durch entsprechende Softwarelösungen ist meist nicht verfügbar.

Erschwerend kommt hinzu, dass während der Betriebszeit des Automatisierungssystems häufig Änderungen bzw. Modernisierungsmaßnahmen am System durchgeführt werden, die allerdings nicht dokumentiert werden [ASW17]. So ergibt sich über die Jahre ein „Delta“ zwischen dem dokumentierten Stand des Automatisierungssystems und dem tatsächlichen Ist-Zustand [BMKW18]. Die Erkennung dieser Abweichungen ist aufwendig und erfordert Erfahrung. Nicht erkannte bzw. bei der weiteren Modernisierungsplanung nicht berücksichtigte Abweichungen können dazu führen, dass die erdachte Lösung zur Modernisierung nicht funktioniert und diese Lösung erneut adaptiert werden muss. Da anders als bei der Neuplanung von Automatisierungssystemen Änderungen während des Betriebs oder in vergleichsweise kurzen, geplanten Stillstandszeiten vorgenommen werden müssen, hat eine Fehlplanung der Modernisierungsmaßnahme oft teure ungeplante Stillstandszeiten des Automatisierungssystems zur Folge [Stru14].

Im Anschluss an die Aufnahme des Ist-Zustandes müssen vom Ingenieur verschiedene Möglichkeiten zur Modernisierung erdacht und untersucht werden. Dieses Vorgehen folgt bislang in der industriellen Praxis keinem strukturierten Ablauf und ist dabei stark vom Erfahrungswissen des Ingenieurs mit ähnlichen Problemstellungen oder seiner Transferfähigkeit früherer Lösungen auf die aktuelle Problemstellung abhängig [FLR10, FGNI00]. Aufgrund der Begrenzung der für die Planung zur Verfügung stehenden Zeit, wird vom Planungsingenieur nur eine begrenzte Anzahl an Modernisierungsmöglichkeiten untersucht [BGYW16] und im Hinblick auf Nutzen und Kosten bewertet. Dabei spielen, insbesondere auch zum Ende des Lebenszyklus eines Automatisierungssystems, auch Rentabilitätsbetrachtungen einer Modernisierung im Vergleich zum Kauf eines neuen Automatisierungssystems eine Rolle.

1.3 Zielsetzung

Ausgehend von den identifizierten Schwachstellen des Modernisierungsprozesses von Automatisierungssystemen besteht die Zielsetzung dieser Arbeit darin, den Planungsprozess durch ein Assistenzkonzept zu unterstützen und durch ein Softwarewerkzeug in Form eines Assistenzsystems zu automatisieren, soweit dies möglich ist. Die soll unter Beachtung der folgenden Punkte erreicht werden.

- Das Assistenzsystem soll dem Planungsingenieur in allen Planungsschritten Hilfestellung anbieten und den abschließenden Entscheidungsfindungsprozess unterstützen. Durch eine Systematisierung der Modernisierungsplanung soll die Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit von Modernisierungsentscheidungen erhöht werden.
- Das Softwarewerkzeug soll neben der Unterstützung der Erfassung des Ist-Zustandes des Automatisierungssystems auch die Überprüfung der Erfüllbarkeit von Produktionsanfragen, die automatische Ermittlung von Modernisierungsmöglichkeiten sowie deren (teil-) automatisierte Bewertung im Hinblick auf Kosten und Nutzen sowie eine Aggregation der ermittelten Daten zu einer Entscheidungsgrundlage unterstützen.
- Die Integration von Erfahrungswissen des Planungsingenieurs soll im Assistenzsystem berücksichtigt werden, wodurch dieses Wissen für die Planung zukünftiger Modernisierungsmaßnahmen in nicht personengebundener Form zur Verfügung steht.
- Durch das Assistenzsystem soll der Aufwand für die Durchführung des Modernisierungsplanungsprozesses gesenkt werden, wobei gleichzeitig mehr potenzielle Lösungsmöglichkeiten automatisch generiert und untersucht werden sollen. Einzelne Tätigkeiten des Modernisierungsprozesses sollen durch geeignet konzipierte Assistenzfunktionen gezielt unterstützt werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Um diese Zielsetzung zu erreichen, ist die weitere Arbeit wie in Abbildung 1.1 dargestellt gegliedert.

In **Kapitel 2** wird der Ablauf des Modernisierungsprozesses von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung betrachtet und Charakteristiken und Schwachstellen des aktuellen Modernisierungsprozesses identifiziert. Mithilfe der Untersuchung bestehender Ansätze aus der Literatur zur Unterstützung des Planungsprozesses wird die Forschungslücke herausgearbeitet und Anforderungen an das Assistenzkonzept abgeleitet.

Kapitel 3 betrachtet den Stand der Technik im Bereich von Software-Assistenzsystemen im Engineering und geht dabei insbesondere auf agentenbasierte Assistenzsysteme und deren Eignung für Engineering-Assistenzsysteme ein. Dabei werden grundlegende Aspekte von Assistenzsystemen erläutert und eine Verbindung zum Anwendungsfeld der Modernisierungsplanung hergestellt.

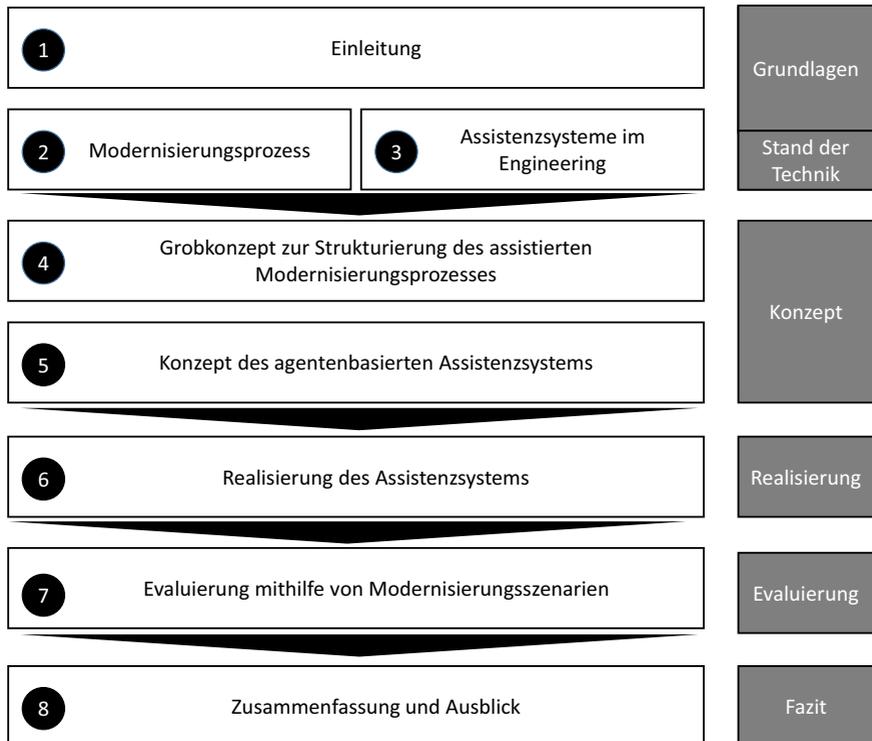


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

Darauf aufbauend beschreibt **Kapitel 4** ein Grobkonzept zur Strukturierung des assistierten Modernisierungsprozesses in sieben grundlegenden Phasen. Dabei wird für jede Phase die Unterstützbarkeit durch ein Assistenzsystem untersucht und diskutiert.

Im Anschluss an diese theoretischen Betrachtungen wird in **Kapitel 5** das Konzept eines agentenbasierten Assistenzsystems vorgestellt, das die einzelnen Phasen der Modernisierung unterstützt. Dabei wird neben dem verwendeten Informationsmodell und dem methodischen Ablauf des Planungsprozesses auch die Architektur des Agentensystems beschrieben, welche durch ihren Aufbau eine problemorientierte Beschreibung des Planungsprozesses darstellt.

In **Kapitel 6** wird die beispielhafte Realisierung des Assistenzsystems mithilfe des Frameworks JADE beschrieben. Ferner wird auf die Realisierung der Simulation eines SPS-gesteuerten modularen Produktionssystems eingegangen, mit deren Hilfe mechanische und softwaretechnische Modernisierungsmaßnahmen des Produktionssystems und deren Auswirkungen simuliert werden können.

Mithilfe eines Handhabungs- und Bohrautomaten sowie der im vorigen Kapitel beschriebenen Simulation wird das softwaregestützte Assistenzkonzept in **Kapitel 7** mithilfe von Modernisierungsszenarien evaluiert. Dabei wird für verschiedene Modernisierungsszenarien untersucht, welche Modernisierungsmöglichkeiten vom Assistenzsystem ermittelt wurden und ob diese anwendbar sind. Zudem wird der Erfüllungsgrad der Anforderungen an das Assistenzkonzept diskutiert.

Abschließend fasst **Kapitel 8** die Ergebnisse der Arbeit zusammen und diskutiert kritisch die Grenzen der Unterstützung bei der Planung des Modernisierungsprozesses von Automatisierungssystemen. Ebenso enthalten ist ein Ausblick auf weiterführende Forschungstätigkeiten.

2 Modernisierungsprozess von Automatisierungssystemen: Grundlagen und Stand der Technik

Das Umfeld von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung wird zunehmend dynamischer [WEN+07]. Diese Dynamik wird beispielsweise in Form von modifizierten Produkten, zusätzlichen Produktvarianten oder geänderten rechtlichen Rahmenbedingungen sichtbar [Ladi18]. Dabei ist zeitgleich zu beobachten, dass der Innovationszyklus des vom Automatisierungssystem gefertigten Produktes deutlich kürzer ist als der Lebenszyklus des Automatisierungssystems [AJSW18b]. Da das Vorhalten von entsprechend großer Flexibilität, um sämtliche Änderungen bereits bei der Planung des Automatisierungssystems zu berücksichtigen, weder technisch möglich ist noch wirtschaftlich sinnvoll wäre, werden im Lebenszyklus des Automatisierungssystems, in zuvor nicht planbaren zeitlichen Abständen, Modernisierungsmaßnahmen notwendig [Ladi18]. Diese können Änderungen an der Mechanik, der Elektronik und der Steuerungssoftware umfassen [MHFW18]. Da es sich bei Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung um mechatronische Systeme handelt, sind Änderungen am Automatisierungssystem oft interdisziplinär und es müssen bei Änderungen in einer Disziplin die entsprechenden Auswirkungen auf die anderen Disziplinen berücksichtigt werden. Modernisierungszyklen der Disziplinen können dabei auch unterschiedlich lang sein, wobei Änderungen der Software aufgrund der leichteren Änderbarkeit und des zunehmenden Softwareanteils innerhalb des Automatisierungssystems üblicherweise häufiger durchgeführt werden [ZJW19, VFST15]. Modernisierungsprojekte von Automatisierungssystemen können nach [Figa10] in drei grundsätzliche Typen eingeteilt werden: (1) Migrationen, (2) Komplettmodernisierungen und (3) Teilmodernisierungen.

Bei Migrationsprojekten besteht das Ziel darin, Komponenten oder Komponentengruppen des Systems gegen eine neuere Version auszutauschen, beispielsweise wenn für eine Komponente keine Ersatzteile mehr verfügbar sind oder eine neue Version der Steuerungsplattform verfügbar ist. Üblicherweise wird bei Migrationsprojekten die Funktionalität des Automatisierungssystems beibehalten und versucht, die neuen Komponenten entsprechend in das System zu integrieren. Die Herausforderung liegt dabei darin, dass die Schnittstellen zwischen alten und neuen Komponenten miteinander harmonisieren müssen. Migrationsprojekte werden von industriellen Lösungsanbietern oft unter dem Begriff „Retrofit“ beworben.

Komplettmodernisierungen beinhalten ebenfalls oft die Modernisierung einzelner Komponenten oder der Steuerung, haben aber üblicherweise zusätzlich auch funktionale Änderungen des Automatisierungssystems zum Ziel. Hierzu ist üblicherweise eine Anpassung der Mechanik des Systems, sowie der Einbau zusätzlicher Sensoren und Aktoren und deren Verkabelung sowie die Integration ins Steuerungsprogramm notwendig. Das indirekte Ziel von

Komplettmodernisierungsprojekten besteht häufig darin, die künftige Wartbarkeit des Systems zu steigern.

Der in der Praxis am häufigsten auftretende Modernisierungstyp sind Teilmodernisierungen, bei denen ein abgegrenzter Teil des Automatisierungssystems mithilfe von Software- und Hardwareänderungen modernisiert wird. Analog zur Migration müssen bei der Teilmodernisierung die Schnittstellen zu den im System bestehenden und unveränderten Komponenten berücksichtigt werden, was eine Auswirkungsanalyse der geplanten Änderungen notwendig macht.

Aufgrund ihrer Häufigkeit werden im Rahmen dieser Arbeit im Folgenden insbesondere Teilmodernisierungsprojekte betrachtet, die sich aus konkreten Änderungen am Fertigungsprozess des Produktes ergeben. Bei Komplettmodernisierungen spielt die Auswirkungsanalyse von Änderungen eine kleinere Rolle als bei Teilmodernisierungen und Migrationen, da nahezu alle Systembestandteile modernisiert werden, was in homogener Form und ohne Betrachtung bestehender Schnittstellen erfolgen kann. Somit sind die Herausforderungen bei der Komplettmodernisierung denen des Engineerings von Neuanlagen ähnlicher. Oftmals erfolgt bei Komplettmodernisierungen auch eine (Neu-)Planung mit dem Stand der Technik entsprechenden Engineering-Werkzeugen, was bei Teilmodernisierungen nicht der Fall ist. Migrationsprojekte können als vereinfachter Spezialfall der Teilmodernisierung angesehen werden, wobei sich die zugrundeliegende Motivation deutlich voneinander unterscheidet und bei der Migration keine Änderung der Funktionalität angestrebt wird.

Anders als bei der Planung neuer Automatisierungssysteme, gibt es für Modernisierungsprojekte deutlich weniger methodische und softwaretechnische Unterstützung [FLR10] und auch der Ablauf des Modernisierungsprozesses weist deutliche Unterschiede auf. Im Folgenden wird daher ein typischer Ablauf eines Modernisierungsprozesses und dessen Herausforderungen beschrieben.

2.1 Ablauf des Modernisierungsprozesses

Aufgrund von fehlenden Standardsoftwarelösungen und Methodiken zur Planung und Unterstützung des Modernisierungsprozesses, erfolgt der Modernisierungsprozess von automatisierten Systemen in der diskreten Fertigung oft stark erfahrungsgestrieben und ist damit vom Kenntnisstand und der Erfahrung des durchführenden Ingenieurs oder Ingenieur-Teams abhängig [FLR10]. Dabei können in der industriellen Praxis sowohl zwischen verschiedenen Unternehmen als auch zwischen verschiedenen Planungsingenieuren bzw. Abteilungen Unterschiede im Ablauf identifiziert werden [WCBL15]. Im Bereich der Modernisierung von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung ist die Betrachtung des Modernisierungsprozesses noch nicht weit verbreitet, allerdings können Ansätze und Prozesse aus dem Engineering Change Management adaptiert werden [Koch17].

2.1.1 Spezifische Eigenschaften von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung

Um den Ablauf des Modernisierungsprozesses und dessen Herausforderungen besser zu verstehen, müssen zunächst die spezifischen Eigenschaften von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung näher betrachtet werden.

Im Folgenden werden daher vier spezifische Eigenschaften und deren Implikationen auf den Modernisierungsprozess beschrieben.

Eigenschaft 1: Bei Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung handelt es sich meist um Unikate.

Bei der ursprünglichen Entwicklung des Automatisierungssystems wurden kundenspezifische Anforderungen berücksichtigt, um das gewünschte Produkt oder das gewünschte Produktportfolio produzieren zu können. Selbst wenn wiederverwendbare Universallösungen zum Einsatz kommen, so werden diese doch von Systemintegratoren zu einem an den jeweiligen Verwendungszweck angepassten Gesamtsystem zusammengefügt, was das Automatisierungssystem zu einem Unikat macht [FVF+15]. Daraus ergibt sich für die Modernisierung die Herausforderung, dass nicht auf Erfahrungswissen der Modernisierung von identischen Automatisierungssystemen zurückgegriffen werden kann und somit jeder Modernisierungsprozess individuell geplant und durchgeführt werden muss [HFMW16]. Dennoch kann ein Transfer von Erfahrungswissen bei ähnlichen Systemen oder ähnlichen Problemstellungen erfolgen, sofern die spezifischen Randbedingungen und Schnittstellen des jeweiligen Systems berücksichtigt werden.

Eigenschaft 2: Automatisierungssysteme in der diskreten Fertigung haben einen langen Lebenszyklus.

Je nach Einsatzzweck und Anschaffungskosten sind Automatisierungssysteme in der diskreten Fertigung auf einen Lebenszyklus von mehreren Jahren bis hin zu mehreren Jahrzehnten ausgelegt. Dabei werden, wie bereits zuvor beschrieben, aufgrund von geänderten Anforderungen im Laufe des Lebenszyklus mehrfach Modernisierungsmaßnahmen oder Maßnahmen zur Prozessoptimierung erforderlich. In der gängigen Praxis werden diese Veränderungen am Automatisierungssystem häufig nicht dokumentiert, sodass bei bestehenden Maschinen und Anlagen im Regelfall keine aktuelle Dokumentation vorhanden ist [Stru14]. Häufig ist auch ein Mix an dokumentierten und nicht dokumentierten Änderungen anzutreffen, was es für den Planungsingenieur erschwert, die Korrektheit und Vollständigkeit der vorhandenen Dokumente einzuschätzen. Dies führt dazu, dass stets eine Aufnahme des Anlagen-Ist-Zustands vor Ort erfolgen muss. Dabei erfolgt üblicherweise, sofern vorhanden, ein Abgleich mit der vorhandenen Dokumentation.

Eigenschaft 3: Bei der Planung von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung sind unterschiedliche Disziplinen beteiligt.

Bei Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung handelt es sich um mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206 definiert Mechatronik als „ein interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf den klassischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Ein typisches mechatronisches System nimmt Signale auf, verarbeitet sie und gibt Signale aus, die es z.B. in Kräfte und Bewegungen umsetzt“ [VDI2206]. Diese Interdisziplinarität sorgt für Abstimmungsbedarf zwischen den beteiligten Disziplinen, sowohl bei der Neuplanung als auch bei der Modernisierung von mechatronischen Systemen. Dabei muss die Planung der Disziplinen oft sequenziell erfolgen, wobei die Mechanik im Regelfall zuerst und die Steuerungssoftware zuletzt geplant und realisiert wird. Beim Übergang von der Grob- in die Feinplanung müssen bei Änderungen in einer Disziplin oft bereits erzielte Ergebnisse in den anderen Disziplinen verworfen oder angepasst werden, was zu gesteigerten Aufwänden führt [Stru14]. Schnittstellen zwischen den Disziplinen und auch zwischen den einzelnen Bestandteilen des Automatisierungssystems spielen bei der (Teil-)Modernisierung eine entscheidende Rolle, da die Schnittstellen der veränderten Systemelemente mit denen des nichtmodernisierten Teils kompatibel bleiben müssen.

Eigenschaft 4: Die Abhängigkeiten von Produkt, Prozess und Ressource müssen beachtet werden.

Bei Automatisierungssystemen in der Produktion ist ein Zusammenspiel von drei grundsätzlichen Typen von Systemelementen zu beobachten: Produkte, Prozesse und Ressourcen (PPR). Das Produkt wird in einer beliebigen Anzahl von (Prozess-)Schritten durch technische Prozesse vom Ausgangsprodukt über Zwischenprodukte bis hin zum Endprodukt gefertigt. Die technischen Prozesse werden dabei von technischen Ressourcen ausgeführt, die mithilfe des technischen Prozesses eine Veränderung des Produkts vornehmen. Das PPR-Prinzip ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht.

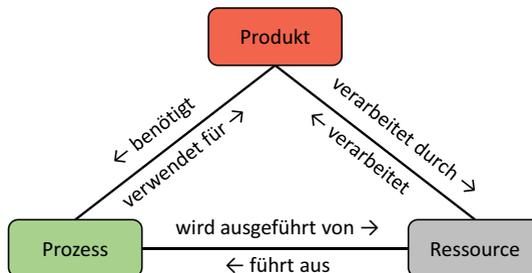


Abbildung 2.1: Darstellung des PPR-Konzepts nach [ScDr09]

In der Literatur werden verschiedene Informationsmodelle basierend auf dem PPR-Prinzip vorgeschlagen. Der bekannteste Vertreter ist die Formalisierte Prozessbeschreibung nach [VDI3682], die zudem noch „Energie“ und „Information“ als Elemente beinhaltet. Jedem der drei grundlegenden PPR-Systemelemente können Parameter zugewiesen werden, die über einen Namen und einen Wert bzw. Wertebereich charakterisiert werden. Zwischen den Parametern können Abhängigkeiten und Restriktionen bestehen, beispielsweise ist der Produktparameter *WerkstückHöhe* durch den Ressourcenparameter *LichteHöheBohrstation* limitiert, da ein zu hohes Werkstück unter dem Bohrer keinen Platz findet. Die Betrachtung der Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern spielt insbesondere bei der Modernisierung eine wichtige Rolle, da ungewollte Auswirkungen einer Modernisierungsmaßnahme so im Vorfeld erkannt und verhindert werden können.

Diese vier spezifischen Eigenschaften haben teilweise Einfluss auf den Modernisierungsprozess im Gesamten beziehungsweise auf einzelne Phasen des Modernisierungsprozesses. Die grundlegenden Phasen werden im Folgenden anhand eines Referenzprozesses näher beleuchtet.

2.1.2 Referenzprozess

Trotz der fehlenden Systematik im Modernisierungsprozess und Unterschieden beim Ablauf zwischen verschiedenen Unternehmen, die sich insbesondere in Details unterscheiden [PiMa98], konnte im Rahmen einer Untersuchung des „Engineering Change“-Prozesses von sieben Unternehmen ein Referenzprozess für den Bereich Engineering Change Management (ECM) identifiziert werden [WCBL15]. Ältere Veröffentlichungen (z.B. [Dale82], [MHB92], [JCE05]) in diesem Bereich schlagen teils andere Aufteilungen der einzelnen Phasen vor, insbesondere auf einer höheren Abstraktionsebene ist das Vorgehen allerdings identisch. Eine Übersicht von 46 Änderungsprozessen aus unterschiedlichen Domänen (Engineering Change Management, Fabrikplanung - kontinuierlich und diskret, Manufacturing Change Management) und drei untersuchten Unternehmen findet sich in der Dissertation von [Koch17]. Der dort identifizierte Konsens deckt sich überwiegend mit den Ergebnissen in [WCBL15], weshalb diese im Folgenden näher betrachtet werden.

Ausgehend von einem initialen Engineering Change Management Prozess wurden in der in [WCBL15] beschriebenen Untersuchung mit den beteiligten Unternehmen Gemeinsamkeiten und Abweichungen diskutiert, um schlussendlich zum Referenzprozess zu gelangen. Dieser ist in Abbildung 2.2 dargestellt und gliedert sich in fünf Phasen sowie elf Prozessaktivitäten, die im Folgenden beschrieben werden.

In der ersten Phase („Identification“) besteht das Ziel darin, den Bedarf einer Änderung des Systems zu identifizieren und die Abweichung des aktuellen Systems vom Ziel-Zustand zu bestimmen. Hierzu ist sowohl eine Analyse des Ist-Zustands als auch des Soll-Zustands und die anschließende Gegenüberstellung notwendig.

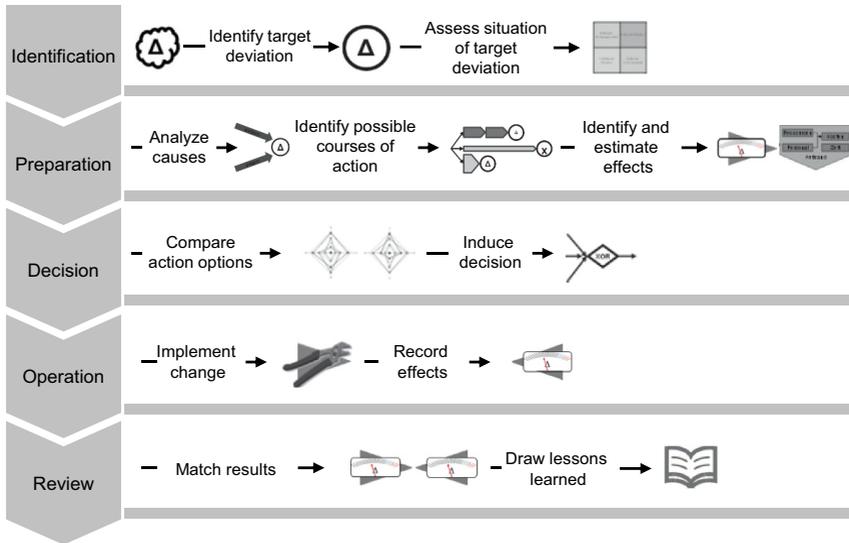


Abbildung 2.2: Engineering Change Referenzprozess nach [WCBL15]

In der zweiten Phase („Preparation“) schließt sich die Planung der Änderungen an, wobei Gründe für die Abweichung vom Soll-Zustand analysiert und darauf aufbauend mögliche Handlungsoptionen identifiziert werden. Aufgrund der begrenzten Zeit des Planungingenieurs wird dabei allerdings oft nur eine geringe Zahl an Alternativen betrachtet. Anschließend werden Auswirkungen der Handlungsoption und Aufwände bestimmt.

Im Anschluss an die Planung wird in der dritten Phase („Decision“) eine Entscheidung für eine Handlungsoption getroffen. Hierfür müssen zunächst die zuvor ermittelten Handlungsoptionen nach geeigneten Kriterien bewertet und verglichen werden. Anschließend kann die favorisierte Handlungsoption ausgewählt werden.

Die Änderungen der gewählten Option werden in der vierten Phase („Operation“) implementiert. Im Rahmen der Studie erfolgte die Implementierung in der Praxis meist nach dem „Just do it“-Prinzip. Ebenfalls Bestandteil dieser Phase ist das Festhalten von Auswirkungen des Umbaus und von Aufwänden, was allerdings in den befragten Unternehmen oft nicht systematisch oder gar nicht durchgeführt wurde.

In der abschließenden „Review“-Phase wird anhand der zuvor erfassten Informationen festgestellt, ob die Ziele erreicht wurden und sich zuvor getroffene Annahmen erfüllt haben. Im Idealfall werden diese Ergebnisse in Form von „Lessons Learned“ für die Zukunft festgehalten und stehen damit für künftige Projekte zur Verfügung. Allerdings, und das gilt auch für die vorhergehenden, dem Controlling zuzuordnenden, Tätigkeiten, wurde dieser Prozessschritt nur von einem kleinen Anteil der untersuchten Unternehmen wirklich durchgeführt.

Dieser Referenzprozess aus dem Engineering Change Management folgt dem grundsätzlichen Ablauf eines Entscheidungsprozesses. Er kann daher auf andere Bereiche übertragen werden und ist insbesondere auch für die Modernisierung von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung anwendbar.

2.1.3 Schwachstellen des Modernisierungsprozesses

Die fünf Phasen des Referenzprozesses nach [WCBL15] und die darin enthaltenen Prozessaktivitäten weisen beim heutigen, manuell durchgeführten Modernisierungsprozess einige Schwachstellen auf, die in Tabelle 2.1 zusammengefasst beschrieben werden.

Tabelle 2.1: Identifizierte Schwachstellen der Prozessaktivitäten nach [WCBL15] des Modernisierungsprozesses

Phase	Prozessaktivität	Identifizierte Schwachstellen
Identification	Identify target deviation	Bei Veränderung von Anforderungen muss zunächst erkannt werden, ob überhaupt eine Änderung des Automatisierungssystems notwendig ist. Diese Aktivität erfolgt manuell und basiert üblicherweise auf einer schnellen Einschätzung des Planungsingenieurs [FGNI00]. Nicht vorhandene, veraltete oder unvollständige Dokumentation des Systems erschweren den Prozess [Stru14, Wrig97, Ladi18].
	Situation der Zielabweichung einschätzen	Diese Aktivität muss ebenfalls manuell durchgeführt werden. Dabei ist erneut die unvollständige Dokumentation als Erschwernis zu sehen, ebenso existiert weder von den Anforderungen an das zu fertigende Produkt noch von dem Aufbau und den Fähigkeiten des Automatisierungssystems ein formales Modell.
Preparation	Analyze causes	Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern und Abhängigkeiten zwischen den beteiligten Disziplinen müssen bei der Analyse berücksichtigt werden. Oftmals sind diese Abhängigkeiten nicht direkt erkennbar. Dies erfordert Erfahrung mit dem Automatisierungssystem sowie tiefes Verständnis des Gesamtsystems. Die Vielzahl der Abhängigkeiten macht die Analyse komplex und fehleranfällig [VFST15].
	Identify possible courses of action	Aus Zeit- und Kostengründen wird meist nur eine oder eine begrenzte Anzahl an Handlungsoptionen manuell geplant. Die untersuchten Handlungsoptionen sind dabei stark vom Wissen des Ingenieurs beeinflusst. Durch diese Fokussierung auf eine geringe Anzahl an Handlungsoptionen kann es vorkommen, dass eine besser geeignete Option nicht berücksichtigt wird [WCBL15, JECC11].

Phase	Prozessaktivität	Identifizierte Schwachstellen
	Identify and estimate effects	Auch bei der Auswirkungsanalyse der Modernisierung und bei der Kostenschätzung sind die Ressourcen zur manuellen Durchführung sowie das zur Verfügung stehende Fachwissen begrenzt [FGNI00]. Durch fehlendes interdisziplinäres Fachwissen können disziplinübergreifende Abhängigkeiten übersehen werden [Ladi18], was zu einer späteren Anpassung der Lösung führen kann.
Decision	Compare action options	Beim Vergleich der Handlungsoptionen wird üblicherweise eine Kosten-/Nutzenbetrachtung durchgeführt. Die Kriterien dieser Betrachtung und deren Darstellung können allerdings frei variiert werden, was zu nicht objektiven und dadurch nicht reproduzierbaren Ergebnissen führen kann.
	Induce decisions	In dieser Aktivität ist oft der Effekt zu beobachten, dass eine Entscheidung bereits im Vorfeld gefallen ist und die Wahl der Kriterien bzw. die Art der Darstellung so erfolgt, dass die bereits getroffene Entscheidung davon unterstützt wird.
Operation	Implement change	Bei der Umsetzung der gewählten Handlungsoption müssen die einzelnen Disziplinen oft sequenziell arbeiten und dennoch die Stillstandszeiten minimieren. Sofern im Vorfeld Abhängigkeiten nicht beachtet wurden, muss die erarbeitete Lösung angepasst werden. Die Herausforderungen sind denen in der Inbetriebnahmephase des Systems ähnlich.
	Record effects	In der Praxis wird diese Aktivität oftmals nicht durchgeführt, was dazu führt, dass das Wissen über erwünschte und unerwünschte Auswirkungen der Modernisierungsmaßnahme verloren geht [Wrig97, WCBL15].
Review	Match results	Die Durchführung dieser Aktivität erfolgt aufgrund des Fehlens einer formalen Anforderungsbeschreibung und der erzielten Effekte manuell und wird in der Praxis nur selten durchgeführt [JECC11].
	Draw lessons learned	Diese Aktivität wird in der Praxis ebenfalls oft nicht durchgeführt [WCBL15]. Sofern sie durchgeführt wird, wird das erzielte Wissen in der Regel nicht in strukturierter Form abgelegt, was die Wiederverwendung erschwert. Darüber hinaus geht personengebundenes Wissen beim Ausscheiden des Mitarbeiters verloren.

Insgesamt ist der Modernisierungsprozess durch einen hohen Grad an manuell durchzuführenden Aktivitäten, sequenziellen Abläufen, geringer Betrachtung von Alternativen und der mangelnden Wiederverwendung von Wissen geprägt. Durch die manuelle Durchführung kommt es

insbesondere dann zu Problemen, wenn die mit der Planung betraute Person zeitgleich in mehrere Modernisierungsprojekte eingebunden ist. Die Autoren Terwiesch und Loch [TeLo99] berichten hierzu von einer mentalen Set-up-Zeit bei einem gedanklichen Wechsel zwischen einzelnen Projekten. Im Folgenden werden daher Ansätze aus der Literatur betrachtet, die Unterstützung in den einzelnen Phasen und Aktivitäten des Modernisierungsprozesses bieten sollen.

2.2 Bestehende Ansätze zur Unterstützung des Modernisierungsprozesses

Um den zuvor identifizierten Schwachstellen im Modernisierungsprozess zu begegnen, wurden unterschiedliche Ansätze zur Unterstützung der einzelnen Phasen in der Literatur vorgeschlagen. In diesem Kapitel werden insbesondere Ansätze zur Unterstützung des Modernisierungsprozesses betrachtet, die sich mit der eigentlichen Planung bis hin zur Entscheidungsunterstützung befassen und damit die ersten beiden und teilweise auch die dritte Phase des Referenzprozesses abdecken.

2.2.1 Ansätze zur Erkennung von Abweichungen zwischen Ist- und Sollzustand (Phase „Identification“)

Um im ersten Schritt des Planungsprozesses überhaupt eine Aussage treffen zu können, ob eine Modernisierung des Automatisierungssystems notwendig ist, müssen Soll- und Ist-Zustand des Systems erfasst und gegenübergestellt werden. Dabei müssen sowohl die Anforderungen an das Produkt bzw. an die zur Fertigung des Produktes notwendigen Prozessschritte bekannt sein, als auch die Fähigkeiten des produzierenden Automatisierungssystems. In der Literatur werden verschiedene modellbasierte Verfahren vorgeschlagen, um diese Schritte zu unterstützen und um eine Zuordnung zwischen Anforderungen und Fähigkeiten zu ermöglichen.

Zur Modellierung der Eigenschaften und Fähigkeiten von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung werden häufig skillbasierte Ansätze, welche die Fähigkeiten des Systems beschreiben und mittels Merkmalleisten charakterisieren, verwendet. Zur Beschreibung der Fähigkeiten eines Automatisierungssystems können Ontologien wie die von [Lanz10] präsentierte Core Ontology zum Einsatz kommen. Auf dieser Ontologie aufbauend, entwickelte Järvenpää in [Järv12] einen Ansatz, um Produktanforderungen mit den Fähigkeiten der Ressourcen gegenüberzustellen.

Im Projekt EUPASS (Evolvable Ultra-Precision Assembly Systems) wurde eine weitere skillbasierte Ontologie entwickelt, um die Zuordnung von Prozessen zu Ressourcen zu beschreiben. Prozesse werden dabei als komplexe Fähigkeiten (complex skills) angesehen, die sich aus mehreren einfachen Fähigkeiten (basic skills) zusammensetzen lassen. Nach [Järv12] ist allerdings nicht veröffentlicht, ob die Fähigkeiten der Skills mithilfe von Attributen näher

beschrieben werden und somit eine automatische Ableitung konkreter Fähigkeiten und deren Zuordnung zu Produktparametern möglich ist.

Die Verbindung zwischen Ressourcen, Skills, Prozessen und Produkthanforderungen wird im Ansatz [BaRe17] adressiert. Die Produkthanforderungen liegen dabei in Form einer Liste der zur Fertigung des Produkts benötigten Prozesse („bill of processes“) vor. Diese Liste wird durch Vergleich mit der Liste der vorhandenen technischen Prozesse abgeglichen und so festgestellt, ob die Produkthanforderungen erfüllt werden können.

Die zuvor genannten Ansätze basieren allesamt auf einer Sichtweise, in der die vom Automatisierungssystem angebotenen (Fertigungs-)Prozesse eine zentrale Rolle spielen und damit auch die Modellierung die Prozesse in den Mittelpunkt stellt. Dies hat nach [MHFW18] eine hohe Modellierungskomplexität zur Folge, da die Ansätze alle möglichen Abfolgen von Prozessen modellieren müssen. Zudem ist die Zuordnung von Produkthanforderungen auf Ressourcen- und Prozesseigenschaften nicht intuitiv und beschränkt sich oftmals nur auf die „bill of processes“. Bei diesen Modellierungsansätzen erfordert die Modellierung der Produkthanforderungen gleichzeitig ein tiefes Prozessverständnis, um Abhängigkeiten entsprechend modellieren zu können.

Um diese Einschränkungen aufzuheben, wurde von Hoang et al. [HHF18] eine produktorientierte Beschreibung von Ressourcenfähigkeiten entwickelt. Der Ansatz folgt dabei dem Produkt-, Prozess-, Ressourcenprinzip (PPR) und basiert auf der Formalisierten Prozessbeschreibung nach [VDI3682]. Der Ansatz beschreibt Abhängigkeiten zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen über Beziehungen zwischen PPR-Parametern. Die Parameter besitzen dabei jeweils einen Gesamtwertebereich, der sich als Schnittmenge aus vier Wertebereichen ergibt: (1) komponentenbasierter Wertebereich, (2) strukturell bedingter Wertebereich, (3) prozessspezifischer Wertebereich und (4) softwarebasierter Wertebereich. Durch die Modellierung der Abhängigkeiten wird somit ein Vergleich zwischen Soll-Zustand (gegeben über die Produkthanforderungen) und dem Ist-Zustand (Eigenschaften der Prozesse und Ressourcen) ermöglicht.

2.2.2 Ansätze zur Generierung von Handlungsoptionen und zur Auswirkungsanalyse (Phase „Preparation“)

Aufgrund der zeitlichen Beschränkungen bei der manuellen Erzeugung von Handlungsoptionen und deren Auswirkungsanalyse liegt der Fokus der Wissenschaft in diesem Bereich auf der Automatisierung dieser Tätigkeit mittels geeigneter Methoden. Dies erlaubt die Generierung einer größeren Anzahl an Handlungsoptionen und deren anschließende Untersuchung. Bei der Untersuchung von Handlungsoptionen ist insbesondere die Auswirkungsanalyse der vorgeschlagenen Änderungen von Bedeutung. Auswirkungen einer Änderung können dabei auch disziplinübergreifend auftreten und je nach Art der Änderung lokal auf eine Funktionsgruppe

beschränkt sein oder das komplette Automatisierungssystem betreffen. Insbesondere bei Änderungen am zu fertigenden Produkt kann dies Auswirkungen auf das gesamte Automatisierungssystem haben, während die Auswirkungen von Änderungen an einzelnen Prozessen oft lokal beschränkt sind.

Ansätze zur Generierung von Handlungsoptionen und zur Wirkungsanalyse finden sich vornehmlich in den Bereichen des Engineering Change Management sowie der Produktgestaltung. Eine Untermenge der Ansätze aus diesen Bereichen beschäftigt sich auch mit den Implikationen der Produktänderungen auf das fertigende Automatisierungssystem und kann damit als unterstützendes Konzept für die Planung des Modernisierungsprozesses angesehen werden.

Ein probates Mittel zur Abbildung von Abhängigkeiten zwischen Elementen eines Systems ist die Design Structure Matrix (DSM). Diese wird von zahlreichen Ansätzen in der Literatur verwendet. In [CSE04] wird ein DSM-basierter Ansatz präsentiert, der die Auswirkungen von Änderungen an Komponenten in komplexen Produkten abschätzt. Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten des Produkts werden mithilfe einer Ausbreitungswahrscheinlichkeit und einem Auswirkungswert in zwei separaten Matrizen modelliert. Mithilfe dieser Matrizen kann für jede Komponentenänderung ein Risikowert für die Änderungen berechnet werden. Mithilfe des berechneten Risikowertes kann das Ausmaß der Auswirkungen abgeschätzt werden. Im Ansatz von Karl und Reinhart [KaRe15] werden sieben verschiedene Kategorien von Abhängigkeiten zwischen Komponenten in sieben separaten DSMs modelliert. Die Matrizen enthalten als Wert jeweils den geschätzten Aufwand zur Änderung bzw. Auflösung der Abhängigkeit. Mithilfe der so modellierten Daten können die Auswirkungen einer Komponentenänderung auf das Gesamtsystem analysiert werden.

Aufgrund des interdisziplinären Charakters von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung ist die Verwendung einer DSM allerdings nicht ausreichend, um Abhängigkeiten zwischen verschiedenartigen Elementen abzubilden. Daher wird die Design Structure Matrix oft zu einer sogenannten Multiple Domain Matrix (MDM) erweitert, um Abhängigkeiten zwischen Elementen verschiedener Domänen abzubilden. Die in der MDM verwendeten Domänen sind dabei von Ansatz zu Ansatz verschieden.

Der Ansatz von [FGOT11] modelliert Abhängigkeiten zwischen drei Domänen (Funktional, Physikalisch, Fluss) mithilfe einer MDM, wobei Flüsse als Materialflüsse, Signalflüsse und Energieflüsse auftreten können. Die MDM enthält lediglich Binärwerte, um die Existenz einer Abhängigkeit anzuzeigen und erlaubt so eine Wirkungsanalyse von Änderungen in den drei Domänen. [KCC12] präsentieren eine Wirkungsanalysemethode basierend auf dem „House of Quality“-Konzept [HaCl88]. In der MDM werden Abhängigkeiten zwischen Produktanforderungen, Änderungsoptionen und Produktkomponenten modelliert. Die Zusammenhänge werden als Ausbreitungswahrscheinlichkeiten angegeben. Durch Auswertung

der Abhängigkeiten können Änderungsoptionen für die Anpassung spezifischer Produktanforderungen gegenübergestellt und verglichen werden. Sowohl die bisher präsentierten DSM-basierten als auch die MDM-basierten Ansätze erlauben zwar die Auswirkungsanalyse mithilfe der hinterlegten Abhängigkeitsinformationen, nicht jedoch die Generierung von Handlungsoptionen bzw. Umbaumöglichkeiten. Hierfür ist die Betrachtung auf Komponentenebene nicht ausreichend, stattdessen ist eine Betrachtung des Systems auf Parameterebene erforderlich.

Die Betrachtung auf Parameterebene umfasst dabei im Regelfall ebenfalls Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Elementtypen. Ein entsprechender Ansatz auf Parameterebene wird in [OlSt04] beschrieben. Abhängigkeiten zwischen Produktparametern werden durch Constraints und kausale Zusammenhänge qualitativ in drei Stufen beschrieben. Darüber hinaus verwendet der Ansatz eine Klassifizierung der Produktparameter in vom Produktentwickler änderbare und nicht veränderbare Parameter. Letztere können nur indirekt durch kausale Einflüsse geändert werden. In ihrer Arbeit beschreiben die Autoren, wie die so modellierten Daten zum Generieren von Änderungsoptionen genutzt wurden, um festgelegte Redesign-Ziele im Produkt zu erreichen. Basierend auf dieser Arbeit, präsentierten Yang und Duan ein Konzept, das Abhängigkeiten zwischen den Produktparametern in physikalische Abhängigkeiten („physical links“) und entworfene Abhängigkeiten („design links“) einteilt [YaDu12]. Wie bereits in [OlSt04] können die vom Designer entworfenen Abhängigkeiten geändert werden, die physikalischen Abhängigkeiten jedoch nicht. Die Abhängigkeiten werden in diesem Ansatz aufwendig als algebraische Funktionen modelliert. Mithilfe der Funktionen können Auswirkungen einer Änderung analysiert werden. Der Ansatz von Ahmad et al. [AWC13] verwendet vier Schichten, um verschiedene Systemelemente und deren Abhängigkeiten zu beschreiben. In der obersten Ebene befinden sich die Anforderungen der gewünschten Änderung. Diese werden in den folgenden Ebenen in eine detaillierte Sicht überführt, in der Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern analysiert werden. Basierend auf dieser Analyse können mögliche Änderungsoptionen generiert werden. Reddi und Moon [ReMo09] beschreiben ebenfalls Abhängigkeiten zwischen Komponenten und einzelnen Parametern. Um Abhängigkeiten grafisch darzustellen, werden von den zuvor genannten Ansätzen neben Multiple Domain Matrizen auch Abhängigkeitsnetze oder Baumstrukturen verwendet. Um den hohen Modellierungsaufwand der vorgestellten Ansätze zur Generierung und Auswirkungsanalyse von Änderungsoptionen zu verringern, verwendet der Ansatz von Hoang et al. [HFMW17] eine rein qualitative Darstellung von Abhängigkeiten zwischen Parametern. Der Ansatz berücksichtigt dabei nach dem PPR-Prinzip drei Parametertypen: Produktparameter (rot), Prozessparameter (grün) und Ressourcenparameter (grau).

	Process_Parameter_1	Process_Parameter_2	Process_Parameter_3	Resource_Parameter_1	Resource_Parameter_2	Resource_Parameter_3	Resource_Parameter_4	Product_Parameter_1	Product_Parameter_2	Product_Parameter_3
Process_Parameter_1				0						▲
Process_Parameter_2				+					▼	
Process_Parameter_2					+				▼	
Process_Parameter_3										●
Resource_Parameter_1	0	+			▲+					
Resource_Parameter_1	0	+				▼+				
Resource_Parameter_2		+	+			▼-				
Resource_Parameter_2		+	+					▲-		
Resource_Parameter_3	-	-							●+	
Resource_Parameter_4			-		▼-			<10	/	/

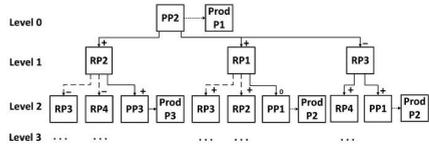


Abbildung 2.3: Qualitative Darstellung von Parameterabhängigkeiten als MDM (links) und als Baumdiagramm (rechts) nach [HMWF17] und [HFMW17]

Abhängigkeiten zwischen den Parametern werden dabei entweder als Korrelation (positiv, negativ oder unbestimmt) oder als Constraint (größer als, kleiner als, gleich) modelliert, was den Modellierungsaufwand gegenüber einer exakten algebraischen Bestimmung reduziert. Durch die Verwendung des PPR-Prinzips, werden Abhängigkeiten des fertigenden Automatisierungssystems (mit seinen Prozess- und Ressourcenparametern) zum Produkt (gekennzeichnet durch seine Produktparameter) abgebildet. Ausgehend von der Änderung eines oder mehrerer Produktparameter kann qualitativ analysiert werden, welche Prozess- und Ressourcenparameter geändert werden müssen, um das Produkt entsprechend zu fertigen. Die Darstellung von Änderungsoptionen sowie von Parameterabhängigkeiten dieser Option erfolgt mithilfe eines Baumdiagramms, in dem Auswirkungen einer Parameteränderung qualitativ entlang der Kanten eingetragen werden (vgl. Abbildung 2.3).

Bereits im Jahre 2003 wurde von [MSZL03] ein Ansatz in der Engineering Change-Community präsentiert, der die Auswirkungsanalyse von Anforderungsänderungen auf Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten erlaubt. Die Zusammenhänge der Datenelemente werden in Form von Constraints und Abhängigkeiten im System hinterlegt. Der Ansatz beschreibt darüber hinaus bereits eine Vielzahl von Effekten und Besonderheiten, die bei entsprechenden Projekten auftreten, beispielsweise Lernkurveneffekte, sequenzielle Ausführung von Änderungen oder die Verwendung historischer Daten aus früheren Projekten. Mithilfe des Ansatzes soll dem Benutzer Entscheidungsunterstützung angeboten werden.

In [FKV14] wird ein Ansatz vorgestellt, der eine Änderungsanalyse und Kompatibilitätsprüfung geänderter Komponenten mithilfe der Kombination eines SysML-Anlagenmodells und einer Ontologie ermöglicht. Mithilfe des vorgeschlagenen Metamodells, das als SysML4Mechanics [KeVo13] veröffentlicht wurde, können interdisziplinäre Abhängigkeiten modelliert werden. Eine Generierung von Änderungsoptionen ist allerdings nicht Bestandteil des vorgeschlagenen Ansatzes. Des Weiteren existieren SysML-basierte Ansätze, die eine Auswirkungsanalyse von geänderten Anforderungen auf den Entwurf von automatisierten Systemen ermöglichen [NSA+16].

2.2.3 Ansätze zum Vergleich von Handlungsoptionen und zur Entscheidungsunterstützung (Phase „Decision“)

Um Handlungsoptionen vergleichen zu können, müssen zunächst geeignete Kriterien für den Vergleich festgelegt werden. Üblicherweise erfolgt der Vergleich von Optionen und die anschließende Entscheidungsfindung auf Basis einer Kosten-/Nutzenanalyse. Während sich die Kosten einer Modernisierungsmaßnahme aus den Kosten für die Anpassung von Mechanik, Elektrik und Software und den Kosten eventueller Stillstandszeiten zusammensetzen und damit im Vorfeld abgeschätzt werden können, bietet die Bestimmung des Nutzens einer Modernisierungsmaßnahme Freiheitsgrade. In der Literatur finden sich daher verschiedene Ansätze, um den durch eine Modernisierung erzielbaren Nutzen zu beziffern. In den folgenden Unterkapiteln ist der Stand der Wissenschaft bezüglich der einzelnen Vergleichskriterien dargestellt.

2.2.3.1 Kostenschätzung für Softwareänderungen

Die Aufwandsabschätzung bei Softwareprojekten ist bereits seit den 1980er-Jahren Gegenstand der Forschung. Die entwickelten Ansätze lassen sich dabei grob in drei Kategorien einteilen:

1. Modellbasierte (parametrische) Verfahren
2. Analogiebasierte Verfahren
3. Expertenschätzung

Oftmals findet bei Ansätzen aus den drei Kategorien auch das Prinzip der Dekomposition Anwendung, um die abzuschätzende Gesamtaufgabe in besser abschätzbare Teilaufgaben zu untergliedern [BuEb11]. Auf Basis der Addition der Abschätzung der Teilaufgaben kann anschließend der Gesamtaufwand ermittelt werden.

Modellbasierte Verfahren versuchen den Umfang oder die Komplexität einer zu entwickelnden Software anhand von empirisch ermittelten Daten zu bestimmen und schließen im zweiten Schritt auf den erforderlichen Aufwand. Von Boehm wurde 1981 das COCOMO (Constructive Cost Model)-Verfahren [Boeh81] entwickelt, um den Aufwand für die Erstellung einer Software auf Basis der Schätzung der benötigten Codezeilen (Lines of Code) zu bestimmen. Dabei fließen Kostentreiberfaktoren in Form von Auf- und Abschlägen in die Schätzung mit ein. Mit der Weiterentwicklung zu COCOMO II [BCH+95] wurde erstmals auch der Aufwand für die Änderung bestehender Programme vom Schätzverfahren berücksichtigt, ebenso wie Besonderheiten objektorientierter Programmiersprachen. Trotz der Weiterentwicklung ist die Genauigkeit von COCOMO-Schätzungen beschränkt, da sie sehr stark von der Abschätzung der Codezeilen abhängt. Zur Bestimmung des Umfangs eines Softwareprojekts aufgrund der funktionalen Anforderungen kann das ursprünglich zur Produktivitätsmessung entwickelte Function-Point-Verfahren [IEC20926] verwendet werden. Es gehört zur Gruppe der Functional Size Measurement-Verfahren und dekomponiert das Projekt zunächst in Elementarprozesse und

identifiziert Transaktionen auf den verarbeiteten Daten. Diese werden nach ihrer Komplexität mit „Function Points“ bewertet. Die Summe der Function Points ergibt den funktionalen Umfang des Gesamtprojekts, der anschließend beispielsweise mithilfe des COCOMO-Verfahrens in Zeitaufwände umgerechnet werden kann.

Analogiebasierte Verfahren bestimmen den Aufwand eines Softwareprojekts basierend auf der Analogie zu Aufwänden bereits durchgeführter Projekte. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Bestimmung der Analogiekriterien. In der Literatur ist eine Vielzahl von Ansätzen zu finden, die in [IAA15] systematisch untersucht wurden. Technologien, die innerhalb von analogiebasierten Ansätzen verwendet wurden, sind beispielsweise Künstliche Neuronale Netze, Fallbasiertes Schließen, Fuzzy-Logik, Genetische Algorithmen oder statistische Methoden.

Eng verknüpft mit analogiebasierten Verfahren ist die Expertenschätzung, allerdings stellt die Analogie hier nur einen Teil des Abschätzungsvorgehens dar. Der menschliche Experte ist im Gegensatz zu (teil-)automatisiert ausführbaren, auf Analogie basierenden Verfahren zusätzlich in der Lage auch weiche (Umgebungs-)Faktoren zu berücksichtigen oder durch Diskussion in der Gruppe zu einem Konsens in der Schätzung zu kommen.

Neben den zuvor beschriebenen Verfahren gibt es noch weitere Ansätze aus dem Bereich der Softwaretechnik, die im Kontext der Aufwandsabschätzung eine Rolle spielen. Nach ISO 25010 ist Wartbarkeit ein Qualitätsmerkmal von Software, das den Aufwand zur Änderung direkt beeinflusst. Zur Messung von Aspekten der Wartbarkeit, wie beispielsweise Modularität, Analysierbarkeit oder Änderbarkeit, werden in der Softwaretechnik Metriken eingesetzt. Einige Vertreter dieser Metriken sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2: Übersicht Software-Metriken

Metrik	Messung von	Quelle(n)
Lines of Code	Umfang	-
Zyklomatische Komplexität	Komplexität des Programmablaufs	[McCa76]
Halstead	Schwierigkeit (das Programm zu verstehen), Aufwand, Volumen (Umfang)	[Hals77]
Strukturmetriken	<ul style="list-style-type: none"> • Fan-In / Fan-Out: Aufrufkomplexität von Komponenten • Innere Komplexität • Datenkomplexität • Strukturkomplexität 	[HeSe90] [CaG190]
Tree Impurity	Maß, inwieweit der Aufrufgraph eines Programms von einer idealen hierarchischen Aufrufstruktur entfernt ist	[YoFr07]
Wartbarkeitsindex	Wartbarkeit als Kombination verschiedener Kenngrößen, bspw. Halstead-Volumen, Zyklomatischer Komplexität, Lines of Code und dem prozentualen Anteil an Kommentaren	[OmHa92] [Müll97]

Die üblicherweise aus der klassischen Softwaretechnik stammenden Metriken wurden durch zusätzliche Festlegungen und Anpassungen für die Anwendung auf SPS-Programmiersprachen erweitert. So haben Younis und Frey Metriken für Programme in Anweisungsliste definiert [YoFr07]. Sie konzentrieren sich dabei auf die Metriken Lines of Code (bzw. nichtkommentierende Codezeilen), Halstead-Metriken für jeden Funktionsblock, Zyklomatische Komplexität und Tree Impurity. Die Metriken lieferten aussagekräftige Werte bei Anwendung auf zwei Beispielprogramme. Lucas und Tilbury entwickelten eine Metrik für Steuerungsprogramme in Kontaktplan sowie für steuerungstechnisch interpretierte Petrinetze [LuTi05]. Die entwickelte Metrik misst die Komplexität eines Programms mithilfe der Anzahl an verwendeten Programmelementen, deren Kopplung sowie der Datenzugänglichkeit. Ebenfalls für Programme in Kontaktplan geeignet sind die Metriken aus [Ghar06]. Sie messen Einfachheit, Rekonfigurierbarkeit, Zuverlässigkeit, Flexibilität des Programms. [EDL07] präsentiert einen Satz von Komplexitätsmetriken für Steuerungsprogramme in Ablaufsprache. Die gemessenen Aspekte sind: Modularität, versteckte Abhängigkeiten, Dokumentation, redundante Informationen, Ausdruckskomplexität, Anzahl interner Variablen, strukturelle Komplexität.

2.2.3.2 Kostenschätzung für Hardwareänderungen

Die Kosten für Änderungen der Hardware lassen sich in Kosten für die Anpassung der Mechanik sowie die Kosten der damit verbundenen Stillstandszeiten bzw. Produktionsausfälle aufteilen. Dieser Aufteilung folgt auch der Ansatz von [ZRL+11], der zwischen strukturellen und ökonomischen Kennzahlen unterscheidet. Die strukturellen Kennzahlen messen die Anzahl der Änderungen bzw. die Anzahl der geänderten Verbindungen von Komponenten. Eine ähnliche Aufteilung verwendet der Ansatz von Karl und Reinhart [KaRe15], in dem vier strukturelle Kennzahlen unterschieden werden: (1) Anzahl der Änderungen, (2) Anzahl an Abhängigkeiten, (3) Anzahl der betroffenen Komponenten, (4) Anteil der betroffenen Komponenten. Darüber hinaus enthält der Ansatz eine Berücksichtigung des ökonomischen Nutzens einer Änderung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. Da der Aufwand von Hardwareänderungen und somit auch die mit der Änderung verbundenen Kosten mit der Änderbarkeit des Systems verknüpft sind, steht diese im Fokus der Arbeit von Zhang et al. [ZXD+17]. Dort wird die Anpassbarkeit von Systemschnittstellen aus funktionaler, struktureller, fertigungstechnischer und operativer Perspektive beschrieben. Die letzteren beiden bestimmen sich hauptsächlich durch den Aufwand für Demontage und Montage der betroffenen Schnittstellen. Mithilfe des Ansatzes konnten die Kosten für Hardwareänderungen durch reine Betrachtung der Systemschnittstellen abgeschätzt werden. Aus dem Bereich der Demontage stammt der Ansatz von Das et al. [DYN00]. Dort wird ein Disassembly Effort Index definiert, der den Aufwand des Demontageprozesses mit sieben Faktoren erfasst. Die Erfassung erfolgt mithilfe von Scorekarten, auf denen die Faktoren mittels einer Skala bewertet werden können. Dies stellt nach [HaCh16] ein effizientes Mittel zur Erfassung von Demontageaufwänden dar.

2.2.3.3 Nutzenschätzung durch Flexibilitätsbewertung

Neben der rein monetären Bewertung einer Handlungsoption wird im Bereich von Produktionssystemen oft die durch die Umsetzung einer Handlungsoption gewonnene Flexibilität oder die Verbesserung der Wandlungsfähigkeit als Maß für deren Nutzen verwendet. Dabei hat sich die Forschung in den vergangenen Jahrzehnten verstärkt auf die Messung von Flexibilität fokussiert, in den letzten Jahren ist allerdings eine verstärkte Betrachtung des Begriffes Wandlungsfähigkeit zu beobachten [MYW18].

[BHB09] klassifiziert Ansätze zur Flexibilitätsbestimmung anhand von Merkmalen. Die Mehrzahl der Ansätze basiert dabei auf (a) Indikatoren, (b) potenziellen Entscheidungen oder (c) ökonomischen Zielkriterien. Darüber hinaus identifizierten die Autoren (über)kapazitätsorientierte Ansätze sowie aus anderen Domänen übertragene Ansätze, beispielsweise die Messung von Entropie oder die Bewertung von Optionsscheinen.

Die Flexibilität von Produktionssystemen wird aufgrund der Vieldimensionalität des Begriffs oft mithilfe von sogenannten Teilflexibilitäten beschrieben. Diese Teilflexibilitäten fokussieren sich jeweils auf die Messung eines Teilaspekts der Flexibilität, welcher zur Gesamtflexibilität des Systems beiträgt. Beispiele für Teilflexibilitäten sind die Materialflussflexibilität, die Produktmixflexibilität oder die Mengenflexibilität. Dabei können Teilflexibilitäten auch hierarchische Beziehungen zueinander haben, beispielsweise in der weit verbreiteten Klassifikation von Sethi und Sethi [SeSe90], welche die Verwendung und Messung von elf Teilflexibilitäten vorschlägt. In diesem Ansatz werden ausgehend von Basisflexibilitäten, sogenannte Systemflexibilitäten abgeleitet, die in einer weiteren Ebene zu aggregierten Flexibilitäten zusammengefasst werden können. Eine Übersicht über verschiedene Klassifikationen von Teilflexibilitäten ist in [WWBF14] zu finden.

Von verschiedenen Autoren wurden im Lauf der letzten drei Jahrzehnte unterschiedliche Ansätze zur Messung der Teilflexibilitäten vorgeschlagen, beispielsweise von [BrMa89], [KoNa92], [Das96], [BuMa08], [WWL08]. Diese Ansätze messen dabei vornehmlich Teilflexibilitäten des Gesamtsystems. Die Betrachtung erfolgt nicht bis auf die Ebene der Veränderung von einzelnen Prozessparametern hinab und kann somit bei entsprechender Flexibilisierung von einzelnen Prozessparametern nicht angewendet werden.

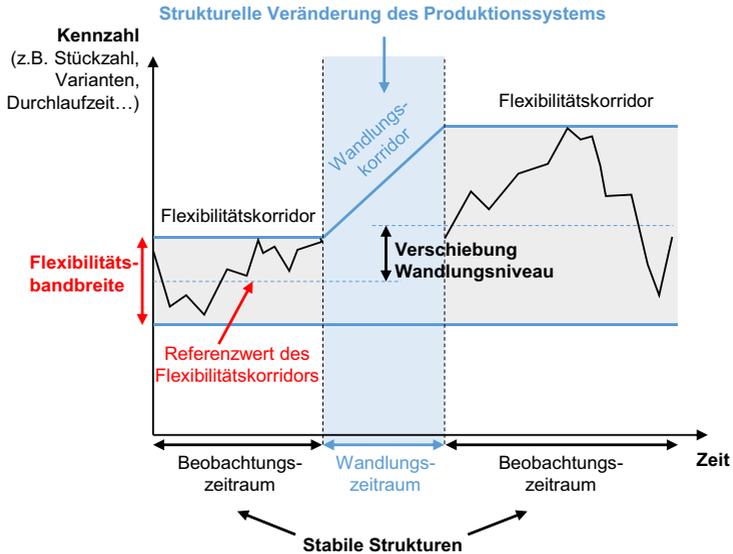


Abbildung 2.4: Visualisierung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nach [VDI5201]

Um dies zu ermöglichen, kann die in der Richtlinie [VDI5201] vorgeschlagene Darstellungsform (Abbildung 2.4) verwendet werden. In dieser Darstellungsform kann der Wert eines beliebigen Indikators innerhalb eines definierten Korridors variiert werden. Die Bandbreite des Flexibilitätskorridors spiegelt somit die Flexibilität hinsichtlich des betrachteten Indikators wider. Ist die Bandbreite des Flexibilitätskorridors nicht ausreichend, kann dieser durch strukturelle Anpassungen (Umbauten) am System verschoben und zeitgleich verbreitert oder verschmälert werden. Diese strukturellen Anpassungen benötigen im Gegensatz zur Variierung des Indikators innerhalb des Flexibilitätskorridors eine gewisse Zeit, um die Änderungen durchzuführen. Grafisch betrachtet kann damit über die Auswertung der Steigung der Flexibilitätskorridor Grenzen im Wandlungszeitraum die Wandlungsfähigkeit des Systems bestimmt werden. Je weniger Zeit die Anpassung benötigt und/oder je stärker der Korridor verschoben oder verbreitert wird, desto einfacher ist eine Änderung vorzunehmen, was nach [VDI5201] einer hohen Wandlungsfähigkeit entspricht. Je nach Anwendungsfall kann die absolute oder die relative Veränderung der Flexibilitätsbandbreite als Maß für die gewonnene Flexibilität angesehen werden.

2.3 Forschungslücke und Ableitung von Anforderungen

Die Untersuchung bestehender Ansätze zur Unterstützung der Planung des Modernisierungsprozesses im vorigen Kapitel 2.2 hat gezeigt, dass für zahlreiche Tätigkeiten des Planungsprozesses unterstützende Konzepte vorhanden sind. Teilweise entstammen diese aus

anderen Domänen wie dem Produktdesign und lassen sich durch entsprechende Anpassungen auch für die Planung des Modernisierungsprozesses von automatisierten Systemen verwenden. Die Untersuchung des Stands der Technik zeigt aber gleichzeitig auch, dass die vorhandenen Konzepte stets nur Teilaspekte des Planungsprozesses adressieren und dementsprechend nicht zur umfassenden und durchgängigen Unterstützung des Planers verwendet werden können. Darüber hinaus ist die Anwendung vieler Konzepte sehr aufwendig und muss manuell durchgeführt werden, was deren Anwendbarkeit in der Praxis erschwert. Die identifizierte Forschungslücke kann dementsprechend in zwei Aspekte eingeteilt werden:

- Mangel an durchgängigem, systematischen Modellierungs- und Unterstützungskonzept für die Planung des Modernisierungsprozesses von Automatisierungssystemen
- Fehlende Unterstützung des Planers in Form eines „Engineering-Assistenzsystems“, das die Anwendung des Modellierungs- und Unterstützungskonzepts durch ein Softwarewerkzeug erleichtert

Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Aspekte adressiert, der Fokus liegt dabei jedoch überwiegend auf dem zweiten Aspekt. Im Bereich des durchgängigen Modellierungs- und Unterstützungskonzepts konnte teilweise auf die gemeinsam mit Herrn Xuan Luu Hoang (Helmut-Schmidt-Universität Hamburg) im DFG-Projekt „Flexibilisierung von Handhabungs- und Montageautomaten mithilfe von Agentensystemen“ entwickelten und in [MHFW18] näher beschriebenen Konzepte zurückgegriffen werden. Sofern zum Verständnis erforderlich, finden sich in dieser Arbeit entsprechend knappe Beschreibungen der verwendeten Konzepte.

Aufgrund der identifizierten Forschungslücke lässt sich die folgende Forschungsfrage formulieren:

Wie lässt sich ein Assistenzsystem in Form eines Softwarewerkzeugs entwickeln, das den Planer bei der Modernisierung von automatisierten Systemen in der diskreten Fertigung in allen wesentlichen Planungsschritten unterstützt?

Darüber hinaus stellt sich die Frage, wo die Grenzen der Unterstützung liegen und welche Schritte des Planungsprozesses unterstützt werden können. Neben der Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere mechatronische Systeme ist weiterhin interessant, welche Aufwandsreduktion bzw. Aufwandsverschiebung sich bei Verwendung des Assistenzsystems ergibt. Bei modell- bzw. wissensbasierten Systemen ist der initiale Aufwand zur Erstellung des Modells bzw. der Wissensbasis ein entscheidender Faktor für deren Anwendbarkeit und Akzeptanz in der Praxis [JECC11].

Um die Forschungsfrage beantworten und ein entsprechendes Assistenzsystem entwickeln zu können, müssen Randbedingungen beachtet werden, die sich aus dem beschriebenen Umfeld automatisierter Systeme in der diskreten Fertigung sowie den Eigenheiten des

Modernisierungsprozesses ergeben. Diese Randbedingungen sind im Folgenden in Form von Anforderungen aufgelistet.

Anforderung A1: Unterstützung aller Planungsschritte

Das Assistenzsystem soll alle durchzuführenden Planungsschritte unterstützen, beginnend bei der Erfassung des Ist- sowie des Soll-Zustands, der Erkennung der Notwendigkeit der Modernisierung, der Generierung von Handlungsoptionen sowie deren Bewertung.

Anforderung A2: Möglichkeit der Integration von Erfahrungswissen

Da Erfahrungswissen in der heutigen Praxis bei der Ermittlung und Aufwandsabschätzung von Modernisierungsmaßnahmen eine entscheidende Rolle spielt, soll das Assistenzsystem eine Möglichkeit bieten, Erfahrungswissen zu integrieren.

Anforderung A3: Das Anlagenmodell muss mit überschaubarem Aufwand erstellbar sein, zudem müssen unvollständige oder fehlende Informationen berücksichtigt werden können

Da bei bestehenden Anlagen oftmals keine (aktuellen) Planungsdokumente vorliegen, muss das Assistenzsystem mit fehlenden oder unvollständigen Informationen umgehen können. Gleichzeitig muss der zur Modellierung erforderliche Aufwand geringer sein als bei einer kompletten Neuerstellung der Dokumentation in digitaler Form.

Anforderung A4: Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Disziplinen sowie zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen

Das Assistenzsystem soll sowohl Abhängigkeiten zwischen den Disziplinen Mechanik, Software und Elektrik berücksichtigen, als auch Abhängigkeiten zwischen Produktparametern, Prozessparametern und Ressourcenparametern, damit eine Übertragbarkeit des Ansatzes auf mechatronische Systeme gegeben ist, die geometrisch bestimmte feste Körper bearbeiten.

Anforderung A5: Unterstützung bei der Entscheidungsfindung durch (teil-)automatisierte Bestimmung geeigneter Kenngrößen

Die Kosten-/Nutzenanalyse von Handlungsoptionen soll durch die Auswahl geeigneter Kennzahlen und deren (teil-)automatisierte Bestimmung und Visualisierung unterstützt werden.

Im folgenden Kapitel werden grundlegende Aspekte von Assistenzsystemen im Engineering beschrieben und der Stand der Technik aufgezeigt. Dabei wird auch die Verbindung des in diesem Kapitel beschriebenen Modernisierungsprozesses zu Engineering-Assistenzsystemen beleuchtet.

3 Assistenzsysteme im Engineering: Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Aspekte von Assistenzsystemen erläutert (Kapitel 3.1) und anschließend der Stand der Technik dargestellt (Kapitel 3.2). Da für die Modernisierungsplanung noch keine geeigneten Assistenzsysteme als Softwarewerkzeug zur Verfügung stehen, wie das vorherige Kapitel 2 gezeigt hat, wird der Stand der Technik zunächst etwas weiter gefasst untersucht und für den Bereich des Engineerings im Allgemeinen beschrieben. Das folgende Kapitel 3.3 zeigt auf, dass Software-Agenten aufgrund ihrer Eigenschaften für die Umsetzung von Assistenzsystemen im Engineering gut geeignet sind, was durch die Gegenüberstellung der Herausforderungen entsprechender Assistenzsysteme mit den Eigenschaften von Agenten belegt wird. In Kapitel 3.4 wird daher der Stand der Technik agentenbasiert realisierter Assistenzsysteme im Engineering dargestellt.

3.1 Allgemeine Aspekte von Assistenzsystemen

3.1.1 Definition von Assistenzsystemen

Assistenzsysteme bezeichnen nach DIN SPEC 91280 ein „technisches Hilfsmittel, das einen Nutzer direkt oder indirekt bei der Ausführung einer Handlung unterstützt“ [DIN91280]. Nach dieser sehr allgemeinen Definition, die aus dem Bereich des Ambient Assisted Living stammt, reicht die Spanne an Assistenzsystemen vom Schraubenzieher über Tabellenkalkulationsprogramme am Computer bis hin zu Transportmitteln wie Zügen oder Flugzeugen. Von Forschern der Universität Rostock wurde eine etwas präzisere Definition von Assistenzsystemen geprägt: „Assistenzsysteme dienen dem Nutzer zur Unterstützung in bestimmten Situationen oder bei bestimmten Handlungen. Die Voraussetzung dafür ist eine Analyse der gegenwärtigen Situation und gegebenenfalls darauf aufbauend eine Vorhersage der zukünftigen Situation. Die Interaktion sollte sich dem natürlichen Handlungsablauf des Menschen anpassen und die Ausgabe sollte komprimiert sein, um den Nutzer nicht zu überlasten.“ [DBIS]. Diese Definition zeigt neben der bereits in der allgemeineren Definition nach DIN SPEC 91280 enthaltenen Unterstützung die Aspekte der (1) Kontextsensitivität sowie die (2) Interaktion mit dem Nutzer. Darüber hinaus enthält die Definition einen wichtigen Hinweis zur Ausgestaltung der Assistenz. Eine Anpassung an den natürlichen Handlungsablauf und die Vermeidung von Überforderung des Nutzers ist für die Akzeptanz des Assistenzsystems entscheidend. Vom Nutzer nicht nachvollziehbare Entscheidungen schmälern hingegen das Vertrauen in das Assistenzsystem [SLD13]. Wandke definiert in [Wand05] neben der Unterstützung des Nutzers zwei Kriterien, die erfüllt sein müssen, um ein technisches Hilfsmittel als Assistenzsystem zu klassifizieren: (1) Interaktion zwischen Mensch und Maschine, wobei die Aufteilung auf die einzelnen Akteure

verschiedene Ausprägungen besitzen kann und (2) Ermöglichung des Zugriffs auf das technische System. Dies ist nur möglich, wenn eine Zugriffsfunktion existiert, sie dem Benutzer bekannt ist und sie zudem keine zu hohen Anforderungen an die sensorischen, kognitiven oder motorischen Fähigkeiten des Nutzers stellt.

3.1.2 Automatisierungsgrad von Assistenzsystemen

Da Assistenzsysteme eine Interaktion zwischen Benutzer (Mensch) und Maschine (Computer) aufweisen, stellt sich bei der Ausgestaltung der Assistenz unweigerlich die Frage nach der Arbeitsteilung zwischen beiden Akteuren. Diese kann verschiedene Ausprägungen annehmen, welche in der Literatur als Automatisierungsgrad (engl.: level of automation) bezeichnet werden. Bereits im Jahr 1978 erarbeiteten Sheridan und Verplank ein zehnstufiges Modell des Automatisierungsgrades [ShVe78], welches auch heute noch häufig zur Klassifikation des Automatisierungsgrades eingesetzt wird. Die Stufen sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

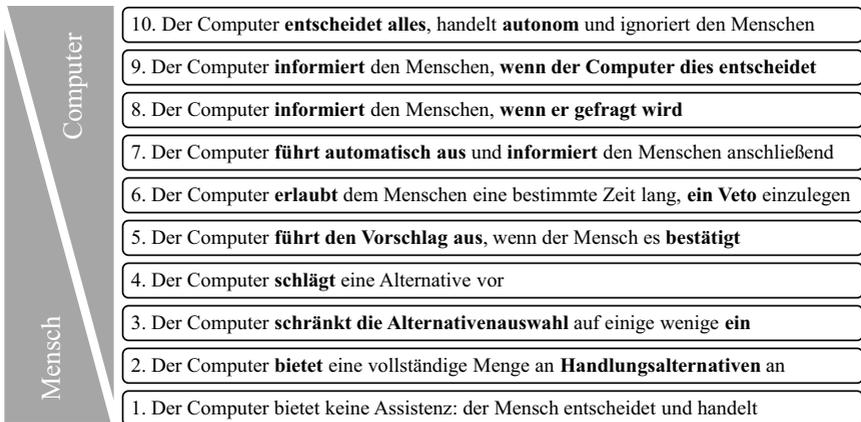


Abbildung 3.1: Automatisierungsgrade in Anlehnung an [ShVe78]

Eine ähnliche Klassifikation wurde in [NtPa88] für ferngesteuerte Systeme entwickelt. Der Automatisierungsgrad wird dort ebenfalls in 10 Stufen eingeteilt, diese sind: (1) Manual Control, (2) Action Support, (3) Batch Processing, (4) Shared Control, (5) Decision Support, (6) Blended Decision Making, (7) Rigid System, (8) Automated Decision Making, (9) Supervisory Control, (10) Full Automation.

Mit dem Aufkommen dieser Klassifikationen sowie der Implementierung erster computergestützter Assistenzsysteme, wurden Studien durchgeführt, um beispielsweise die Auswirkungen des Automatisierungsgrades auf Leistungsfähigkeit, Situationsbewusstsein und Arbeitsbelastung des Menschen zu untersuchen [KOE99].

3.1.3 Ablauf des Assistenzprozesses

Interaktive Assistenzsysteme werden meist in Szenarien eingesetzt, in denen eine Entscheidung getroffen und diese gegebenenfalls anschließend ausgeführt und überwacht werden muss. Dementsprechend sind auch die Phasen des Assistenzprozesses eng mit dem Prozess der Entscheidungsfindung gekoppelt. Die Aufteilung des Entscheidungsprozesses in einzelne Phasen bietet darüber hinaus die Möglichkeit, den Automatisierungsgrad für die einzelnen Phasen individuell festzulegen und an den jeweiligen Einsatzzweck des Assistenzsystems anzupassen. So können die Stärken von Mensch und Computer gezielt genutzt und der Assistenzprozess gegenüber dem Nutzer transparent gestaltet werden.

Der Ablauf des Entscheidungsprozesses folgt dabei oft dem aus dem militärischen Bereich stammenden OODA-Loop. Auslöser dieser Entscheidungsschleife ist ein Ereignis, das zuerst beobachtet wird (**O**bserve). Anschließend wird die Beobachtung eingeordnet und interpretiert (**O**rient) und eine Entscheidung getroffen (**D**ecide). Die Entscheidung wird im Anschluss umgesetzt (**A**ct). Diese Schleife wird aufgrund einer veränderten Gesamtsituation iterativ neu durchlaufen [Boyd96]. In [Wand05] wurde diese Entscheidungsschleife um eine vorgelagerte Phase „Motivation“ sowie eine nachgelagerte Phase „Evaluation“ ergänzt. Die Phase „Motivation“ erlaubt die Definition eines Motivierungslevels, eines Ziels sowie eines Aktivierungslevels. Erst wenn das Aktivierungslevel erreicht ist, startet die Schleife. Dies ist insbesondere für automatisiert initiierte Assistenzprozesse relevant. Bei manuell gestarteten Assistenzprozessen ist diese Phase ebenfalls vorhanden, wird aber komplett vom Nutzer durchgeführt. Die Art der Aktivierung ist somit ein weiteres Merkmal von Assistenzsystemen. In der Phase „Evaluation“ wird die Umsetzung der Entscheidung bewertet. Nach [BCK+09] kann ein Assistenzsystem bei der Entscheidungsunterstützung in folgenden Schritten assistieren:

1. Erzeugen und Aufbereiten (inkl. Filtern) von Informationen
2. Erzeugen von Alternativen (Transformation von Daten in Entscheidungsalternativen)
3. Bewerten von Alternativen (Bewertungskriterien durch den Menschen festgelegt)
4. Auswählen von Alternativen (Entscheidung)
5. Überwachen der Entscheidungsausführung (Einhaltung Zielkriterien)
6. Kontrollieren der Entscheidungsausführung

In Abbildung 3.2 ist ein Vergleich der Klassifikationen von [Wand05] und [BCK+09] dargestellt.

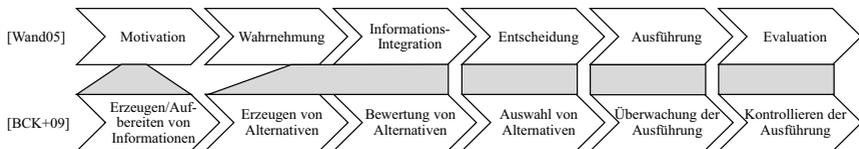


Abbildung 3.2: Vergleich der Klassifikationen zum Ablauf der Entscheidungsfindung.

Überlappungen in den einzelnen Phasen der beiden Klassifikationen sind in grau dargestellt. Abweichungen sind insbesondere in den ersten Phasen zu sehen, da bei Blutner et al. [BCK+09] von einer manuellen Aktivierung ausgegangen wird und somit ein großer Teil der Motivation entfällt. Die Erzeugung und Bewertung von Alternativen von [BCK+09] ist hauptsächlich in der Informations-Integrationsphase von [Wand05] zu verorten, allerdings besteht darüber hinaus eine kleine Schnittmenge mit der Phase der Wahrnehmung.

3.1.4 Aufbau von wissensbasierten Systemen

Die im Kontext dieser Arbeit betrachteten Assistenzsysteme lassen sich von ihrem Fokus her der Klasse der wissensbasierten Systeme zuordnen. Bei wissensbasierten Systemen handelt es sich um intelligente Informationssysteme, in denen Wissen mit Verfahren der Wissensrepräsentation und Wissensmodellierung abgebildet und nutzbar gemacht wird [BeKe03]. Das Wissen besteht dabei aus einer Kombination aus Faktenwissen (z.B. strukturierte Daten, Anlagenmodelle etc.) und Regelwissen (z.B. Wenn-dann-Regeln, Algorithmen).

Der Begriff des wissensbasierten Systems wird oft als Oberbegriff für verschiedene Ausprägungen von intelligenten Informationssystemen verwendet. Dazu gehören Expertensysteme, Entscheidungsunterstützungssysteme (Decision Support Systems), regelbasierte Systeme sowie Software-Agenten [BeKe03].

Wissensbasierte Systeme bestehen dabei mindestens aus den folgenden drei Kernkomponenten: Wissensbasis, Inferenzkomponente und Benutzerschnittstelle, deren Verantwortlichkeit im Folgenden beschrieben ist.

- **Wissensbasis:** Das aus Fakten und Regeln bestehende Wissen wird in der Wissensbasis abgelegt. Es kann zwischen generischem und spezifischem Wissen unterschieden werden. Generisches Wissen ist für die betrachtete Domäne allgemeingültig verwendbar, spezifisches Wissen nur für das jeweils betrachtete Problem [BeKe03].
- **Inferenzkomponente:** Die problemunabhängige Inferenzkomponente verarbeitet das in der Wissensbasis abgelegte Wissen und leitet daraus über Schlussfolgerung (Induktion, Deduktion oder Abduktion) neue Fakten oder Regeln ab [BeKe03].
- **Benutzerschnittstelle:** Die Benutzerschnittstelle stellt die Kommunikationsschnittstelle zwischen Benutzer und wissensbasiertem System bereit. Neben der regulären Interaktion des Benutzers mit dem System kann der Benutzer optional auch das Wissen des Systems modifizieren.

Der grundsätzliche Aufbau von wissensbasierten Systemen ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

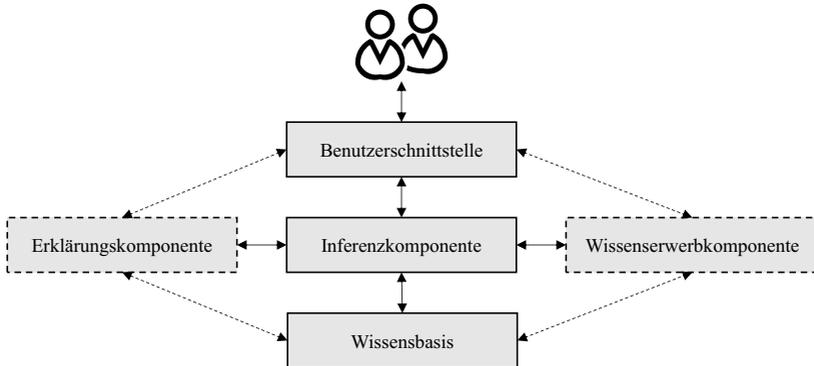


Abbildung 3.3: Aufbau von wissensbasierten Systemen

Durch ihren Aufbau sind wissensbasierte Systeme einfacher als traditionelle Softwaresysteme modifizier- bzw. erweiterbar, da die einzelnen (Verarbeitungs-)Komponenten und Wissensbestandteile voneinander getrennt sind und somit unabhängig voneinander modifiziert werden können [Kurb89]. Die klare Trennung von Wissen und seiner Verarbeitung wird in der Praxis allerdings oft aufgeweicht, wie über mehrere Jahrzehnte hinweg festgestellt werden konnte (vgl. [ThSc89] und [RFSE11]). Bei starker Verwobenheit der beiden Komponenten steigt entsprechend der Wartungsaufwand des Softwaresystems, da Änderungen, wie bei traditionellen Softwaresystemen, lediglich in Form von programmiertechnischen Modifikationen eingebracht werden können. Durch die Vermischung beider Komponenten ist auch die Übertragbarkeit der Inferenzkomponente nicht mehr gegeben.

Insbesondere in den 1980er und 1990er Jahren wurden Expertensysteme als spezielle Ausprägung der wissensbasierten Systeme entwickelt, die ursprünglich das Ziel hatten, den menschlichen Experten in einer wissensbasierten Tätigkeit zu ersetzen. Diese Expertensysteme müssen hierzu neben dem reinen Problemlösen durch Schlussfolgern noch weitere Fähigkeiten besitzen. Neben den drei genannten Kernkomponenten besitzen Expertensysteme oft noch die in Abbildung 3.3 gestrichelt dargestellten Komponenten zur Erklärung der Lösung (Nachvollziehbarkeit) sowie zum Wissenserwerb (manuelle oder automatische Erweiterung der Wissensbasis). Nach diesen Prinzipien entwickelte Expertensysteme waren meist auf ein stark begrenztes Anwendungsfeld beschränkt und konnten im praktischen Einsatz nur teilweise Erfolge erzielen, sodass mit der Zeit der Anspruch der Ersetzung des Menschen aufgeweicht wurde [RFSE11]. Dem Menschen stehen über die in der Wissensbasis vorhandenen Fakten und Regeln hinaus zusätzliche Kontextinformationen zur Verfügung, die sein Handeln und seine Entscheidung mit beeinflussen und in vielen Fällen auch entscheidend sein können. Nach [BHS07] können wissensbasierte Systeme ihre Stärken in denjenigen Anwendungsfeldern ausspielen, in denen der Mensch mit der Komplexität der Problemstellung überfordert ist. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit im

weiteren Verlauf Assistenzsysteme und nicht Expertensysteme betrachtet. Diese haben das Ziel den Benutzer in seiner Tätigkeit zu unterstützen und nicht, ihn vollständig zu ersetzen.

Um diese Unterstützung erreichen zu können, hat das in der Wissensbasis gespeicherte Wissen eine entscheidende Bedeutung, was bereits im Jahr 1977 von Edward Feigenbaum, der als einer der geistigen Väter von wissensbasierten Systemen bekannt ist, beschrieben wurde: „[...] die Problemlösungsfähigkeiten eines intelligenten wissensbasierten Systems sind primär eine Konsequenz der Wissensbasis und nur sekundär eine Konsequenz der Verarbeitung [...] der angewandten Schlussfolgerungsmethode. Wissensbasierte Systeme müssen über ein reichhaltiges Wissen verfügen, auch wenn ihre Methodik kümmerlich ist.“ [Feig77].

Die Art der Modellierung der Wissensbasis kann dabei auf vielfältige Art und Weise erfolgen [TrEp18], z.B. explizit über physikalische oder mathematische Zusammenhänge, Regeln, Struktur- oder Sequenzmodelle etc. oder im Fall von simulationsbasierten Assistenzsystemen datengetrieben. Nicht nur die Modellierungsart, sondern auch das konkrete Modellierungsverfahren bieten dabei zahlreiche Freiheitsgrade. Obwohl die Wissensbasis bei wissensbasierten Assistenzsystemen eine entscheidende Rolle einnimmt, wird in der Literatur der Fokus oft auf die Methode der Wissensverarbeitung gelegt [Schm08].

Alternative Ansätze zu wissensbasierten Systemen werden im Bereich der Computational Intelligence (CI), einem Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz, erforscht. CI basiert auf den drei Fachgebieten Fuzzylogik, künstliche neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen und strebt an, die Mechanismen naturnaher, approximativer Methoden zu verwenden, um aus unvollständigem, unpräzisen und unsicherem Wissen eine Unterstützung bei (beispielsweise ingenieurtechnischen) Problemstellungen zu erzielen [KBB+16]. Die Ermittlung ungefährer, unvollständiger bzw. unwahrer Lösungen wird in Kauf genommen, sofern die Lösung der analytisch nicht eindeutig lösbaren Problemstellung in einem akzeptablen Zeitrahmen ermittelt werden kann [KBB+16]. Die bisherigen Erfolge von CI beschränken sich allerdings auf Anwendungen klar abgegrenzter und sehr spezifischer Problemstellungen, die beispielsweise in [HHM18] beschrieben werden. Die Anwendung von CI zur Realisierung von Assistenzsystemen im Engineering ist mit Problemen verbunden, da die in der Zielsetzung der Arbeit geforderte Nachvollziehbarkeit (vgl. Kapitel 1.3) der heuristisch ermittelten Lösungen nicht gegeben ist. Als Assistenzsysteme im Engineering werden CI-Ansätze im Gegensatz zu wissensbasierten Systemen bislang nicht eingesetzt, wie die Betrachtung des Stands der Technik im folgenden Kapitel zeigt.

3.2 Stand der Technik: Assistenzsysteme im Engineering

In diesem Unterkapitel wird der Stand der Technik von Assistenzsystemen im Engineering beschrieben, wobei der Begriff Assistenzsystem hier ein Softwarewerkzeug bezeichnet. Da die meisten Ansätze nicht die Modernisierung (teilweise auch als Reengineering bezeichnet)

behandeln, sondern das Engineering eines neuen Automatisierungssystems, wird der Fokus in diesem Unterkapitel etwas weiter gefasst.

Beim Engineering neuer Automatisierungssysteme werden bereits seit vielen Jahren CAE-Systeme (Computer Aided Engineering) eingesetzt. Neben der rechnergestützten Konstruktion mittels CAD-Tools (Computer Aided Design), werden in mechatronischen Projekten unter anderem Tools zur Schaltungsentwicklung und -simulation, zur Simulation des Fertigungsablaufs oder von Kinematiken verwendet. Diese einzelnen CAE-Anwendungen sind meist abgeschlossene Systeme, die jeweils nur in einer definierten Engineering-Phase und von Ingenieuren einer bestimmten Disziplin verwendet werden [WeDr10]. Sofern der Austausch von Planungsdaten zwischen verschiedenen Anwendungen möglich ist, wird hierzu üblicherweise das neutrale, auf XML basierende, Format CAEX (Computer Aided Engineering Exchange) verwendet. Dieses findet beispielsweise auch in AutomationML Einsatz [AutoML]. Allerdings lassen sich Informationen aus den oftmals proprietären Anwendungen nur begrenzt an andere Anwendungen weitergeben und von diesen nutzen. An den Schnittstellen zwischen Anwendungen entstehen dabei typischerweise Informationsverluste, die insbesondere dann zum Tragen kommen, wenn sich aufgrund einer Änderung in einem nachgelagerten Engineering-Tool Änderungen im Entwurf eines früheren Tools ergeben [KABL02] oder implizites Wissen zur Modelltransformation benötigt wird [FWF18]. Da die Konsistenz der Modelle nicht sichergestellt ist, werden durch eine Änderung in einem Modell oft zahlreiche Anpassungen anderer Modelle notwendig [AJSW18b].

Um die Verwendung von Planungsdaten über den kompletten Engineering-Zeitraum oder sogar den kompletten Lebenszyklus des Automatisierungssystems zu ermöglichen, kommen daher bei Neuprojekten vermehrt PLM-Plattformen (Product-Lifecycle-Management) zum Einsatz, die alle Daten des Systems an einer meist zentralen Stelle bündeln. Zu diesen Daten gehören sämtliche Planungsdaten bzw. Modelle der einzelnen Engineering-Tools, die mithilfe des PLM-Systems integriert werden. Wie auch beim klassischen Ansatz stellt die Synchronisierung von Änderungen in den einzelnen Modellen eine Herausforderung dar, die derzeit in Wissenschaft und Industrie untersucht wird [AJSW18a].

Neben der grundsätzlichen Unterstützung durch die zuvor beschriebenen digitalen Planungsanwendungen, die im weitesten Sinne ebenfalls als Assistenzsystem angesehen werden können, finden sich in der Literatur zahlreiche Beispiele von (wissensbasierten) Assistenzsystemen im Engineering.

Ein Anwendungsfeld für Assistenzsysteme im Engineering in den 1990er-Jahren war die Grobplanung von Fabriklayouts [KLH92] sowie von Intralogistiksystemen [Fang96]. Beide Grobplanungstätigkeiten erfordern die Berücksichtigung von bekannten Rahmenbedingungen und die Durchführung von klar definierten Schritten, die bei manueller Durchführung zu einem hohen Zeitaufwand führen. Die Automatisierung mithilfe eines wissensbasierten

Assistenzsystems erlaubt die schnelle Durchführung der Tätigkeit und zeitgleich die Untersuchung von Alternativen sowie die Berechnung von Kennzahlen zur Kosten-/Nutzenbestimmung.

Ein Assistenzsystem zur Planung und Optimierung des strukturellen Designs von Tankschiffen wurde in [CuWa13] vorgestellt. Neben dem Wissen von Entwurfsexperten wurden Entwurfsregeln und frühere, gelungene Designvorschläge in der Wissensbasis des Systems gespeichert. Mithilfe der automatisierten Anwendung des hinterlegten Wissens konnten erfolgreich Designvorschläge für Schiffe ermittelt werden, die den an sie gestellten Anforderungen entsprechen. Darüber hinaus wurden vom Assistenzsystem automatisiert FEM- und Monte Carlo-Simulationen durchgeführt, was den Engineeringaufwand zusätzlich senken konnte.

Durch die Modularisierung von Komponenten oder Funktionsgruppen in heutigen Automatisierungssystemen können diese in ähnlichen Problemstellungen wiederverwendet werden. Dies macht sich das von Obst et al. entwickelte Assistenzsystem [ODU13] zunutze und ermöglicht die Auswahl und Auslegung von Modulen für die Neuplanung von Chemieanlagen mithilfe des Einsatzes von fallbasiertem Schließen. Das fallbasierte Schließen funktioniert dabei auf Basis der Ähnlichkeit der Anforderungen an ein Modul, beispielsweise das Vorhandensein einer Eigenschaft. Durch Nutzung bereits umgesetzter Lösungen und durch Kenntnis von deren Aufwänden, kann das Engineering nach Aussage der Autoren beschleunigt und die Aufwandsabschätzung verbessert werden.

Modellgestützte Ansätze zur Unterstützung der Modernisierung wurden von Marcos und Estevez [MaEs08] und Truchat et al. [TKVL11] entwickelt. Dabei werden im Fall von [MaEs08] drei Sichten auf das Automatisierungssystem definiert und Beziehungen zwischen den Sichten mithilfe einer XML-basierten Beschreibungssprache beschrieben. Allerdings beinhaltet der Ansatz keine Integration in ein Assistenzsystem, sondern stellt lediglich ein domänenübergreifendes Modell bereit, auf dem ein Assistenzsystem aufgesetzt werden könnte. In [TKVL11] wird ein UML-Profil zur modellgetriebenen Anlagenmodernisierung beschrieben, das im EU-Projekt MOMOCS (MOdel driven MOdernisation of Complex Systems) entwickelt und evaluiert wurde. Die Assistenz beschränkt sich allerdings auf die Anwendung der Modellierungsmethode.

Die Dissertation von Runde [Rund11] beschreibt ein wissensbasiertes Assistenzsystem, das die Tätigkeit des Requirements Engineering bei der Raumautomatisierung eines Gebäudes und die teilautomatisierte Auswahl von Funktionen für die Gewerke Heizung/Klima/Lüftung unterstützt. Mithilfe von Technologien des Semantic Web und einem systematischen Vorgehen unterstützt das entwickelte Assistenzsystem den Planer beim Aufnehmen und Überprüfen der Anforderungen eines Gebäudeautomatisierungsprojekts, was das Engineering dieser Systeme vereinfachen und Missverständnisse und Kommunikationsschwierigkeiten reduzieren konnte.

In der Dissertation von Strube [Stru14] wird ein Assistenzsystem beschrieben, das im Rahmen einer modellgestützten Modernisierungsplanung verfahrenstechnischer Anlagen eine Unterstützung in der Angebotsphase bereitstellt. Dabei unterstützt das Assistenzsystem sowohl in der Konsistenzprüfung der geplanten Automatisierungslösung, als auch bei der Aufstellung des Mengengerüsts. Dies hilft dabei, die nicht wertschöpfenden Tätigkeiten bei der Angebotserstellung zu reduzieren, was nach [Fay05] ein zentraler Ansatzpunkt ist, um den Engineering-Aufwand zur Erstellung einer Automatisierungslösung zu senken.

Bei der Auswahl technischer Ressourcen und Prinziplösungen im Engineering verfahrenstechnischer Anlagen unterstützt das in [Ried17] beschriebene Assistenzsystem den Planer. Die Assistenz wird realisiert durch die Verknüpfung und Auswertung multidimensionaler, heterogener, vernetzter Merkmalsräume. Dabei beschreibt Riedel neben dem Assistenzsystem zur Auswahlunterstützung von technischen Ressourcen und Prinziplösungen auch einen Wissenseditor zur Pflege des zugrundeliegenden Wissens. Die Pflege des Wissens wird von vielen anderen Autoren nicht adressiert, was in der Praxis oft dazu führt, dass das im System hinterlegte Wissen mit der Zeit veraltet, da Wartung und Pflege zu aufwendig bzw. wissensintensiv sind.

Wie die vorliegende Auflistung von Assistenzsystemen im Engineering zeigt, können zahlreiche Tätigkeiten des Engineering-Prozesses von Softwarewerkzeugen bzw. Assistenzsystemen unterstützt werden, wobei der Fokus meist auf der Unterstützung der Planung neuer Automatisierungssysteme liegt. Insbesondere bei heutigen CAE-Werkzeugen und darauf aufbauenden PLM-Werkzeugen würde die Verwendung zur Modernisierungsplanung voraussetzen, dass ein detailliertes Modell des Automatisierungssystems bereits existiert oder zu Beginn aufwendig erstellt werden muss, was in Widerspruch zu Anforderung A3 („Das Anlagenmodell muss mit überschaubarem Aufwand erstellbar sein, zudem müssen unvollständige oder fehlende Informationen berücksichtigt werden können“) steht. Die Assistenz der weiteren betrachteten Assistenzsysteme erfolgt üblicherweise durch Kombination der Vorgabe einer systematischen Vorgehensweise mit einem wissensbasierten Ansatz. Der wissensbasierte Ansatz enthält dabei meist ein problemspezifisches Modell (des zu entwickelnden Systems, der Anforderungen etc.) und domänenspezifisches Expertenwissen (in Form von Regeln oder Algorithmen), wodurch die Assistenz realisiert wird. Die Assistenzfunktionen sorgen dabei in den gezeigten Beispielen insbesondere für Entlastung in sich wiederholenden Routinetätigkeiten [RFSE11].

3.3 Grundlagen agentenbasierter Assistenzsysteme

Wissensbasierte Systeme lassen sich nach [BeKe03] ebenfalls mithilfe von Software-Agenten umsetzen. In diesem Kapitel werden daher zunächst die Grundlagen agentenbasierter Assistenzsysteme vorgestellt und anschließend dargelegt, warum sich Software-Agenten aufgrund ihrer Eigenschaften für die Umsetzung von Assistenzsystemen im Engineering eignen.

3.3.1 Software-Agenten und Agentensysteme

Bei Software-Agenten (im Folgenden auch lediglich als „Agenten“ bezeichnet) handelt es sich um ein Paradigma, das seit den 1990er in verschiedenen Disziplinen intensiv erforscht wird. In der Automatisierungstechnik in Deutschland werden die Forschungsbestrebungen im Bereich der Agenten teilweise im Fachausschuss 5.15 der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik gebündelt, der auch mit der Erarbeitung und Aktualisierung der VDI-Richtlinienreihe [VDI2653] betraut ist.

Agentensysteme bestehen aus einem Zusammenschluss mehrerer (Software-)Agenten, die im Verbund ein ihnen übertragenes Problem lösen. In der Literatur existiert keine allseits anerkannte Definition von Agenten [Wool02], jedoch lässt sich zwischen zahlreichen Autoren eine Übereinstimmung bei den kennzeichnenden Eigenschaften eines Agenten feststellen. Neben der zielorientierten Vorgehensweise, wird häufig Autonomie sowie die Reaktion auf äußere Einflüsse genannt. Bei der Ausgestaltung des Autonomiegrades gibt es zahlreiche Abstufungen, beispielsweise definiert [CBF03] fünf Autonomieklassen für Agenten. Eine umfassende Beschreibung der Eigenschaften von Agenten befindet sich in Kapitel 3.3.2. Eine Definition von Agenten wird in der bereits erwähnten VDI-Richtlinie geliefert: „Ein Agent ist eine abgrenzbare (Hardware- oder/und Software-) Einheit mit definierten Zielen [...] Ein Agent ist darauf ausgelegt, diese Ziele durch selbstständiges Verhalten zu erreichen und interagiert dabei mit seiner Umgebung und anderen Agenten“ [VDI2653].

Die agentenorientierte Softwareentwicklung (engl. Agent-Oriented Software Engineering) beschreibt Vorgehensweisen zur ingenieurmäßigen Entwicklung von Agentensystemen (engl. Multi Agent Systems). Dabei bedient sich die agentenorientierte Softwareentwicklung der Techniken und Methoden der klassischen Softwaretechnik und verwendet und adaptiert diese, um Software herzustellen, die dem Agentenparadigma folgt [WeJa06]. Zur Unterstützung der agentenorientierten Softwareentwicklung wurden in der Vergangenheit bereits Modellierungsansätze agentenorientierter Systeme (z.B. Agent UML [BMO01]), Vorgehensmodelle zur Entwicklung (z.B. Gaia [WJK00], MaSE [WoDe01], PASSI [CoPo02]) sowie unterstützende Tools (z.B. Laufzeitumgebungen, Entwicklungswerkzeuge) entwickelt.

3.3.2 Eigenschaften von Software-Agenten

Die Definition von Agenten und auch das Verhalten ergibt sich überwiegend aus deren Eigenschaften. Aus diesem Grund werden im Folgenden die möglichen Eigenschaften von Agenten aufgrund von aus der Literatur bekannten Klassifikationen in [WGU03, Jenn01, Wagn08] zusammengefasst:

- **Kapselung:** Ein Agent kapselt seinen Zustand und sein Verhalten in einer Einheit. Sowohl Zustand als auch Verhalten sind nach außen verborgen.

- **Zielorientierung:** Das Verhalten eines Agenten orientiert sich an seinen Zielen, deren Erreichung der Agent anstrebt. Der Weg zur Erreichung der Ziele ist dabei nicht detailliert vorgeben, sondern kann vom Agenten im Lauf seiner Aktionen festgelegt werden.
- **Autonomie:** Ein Agent besitzt die Kontrolle über seinen Zustand und sein Verhalten und handelt somit selbständig (autonom) bei der Erfüllung der übertragenen Aufgaben. Ein Agent trifft eigene Entscheidungen bezüglich der von ihm durchgeführten Aktionen. Der Autonomiegrad von Agenten wird von [CBF03] in fünf Autonomieklassen eingeteilt.
- **Aktivität:** Ein Agent arbeitet aktiv an der Erledigung übertragener Aufgaben. Dabei kann sein Verhalten sowohl reaktiv (z.B. Reaktionen auf die Umwelt) als auch proaktiv (z.B. vorausschauendes Handeln) sein. Die Ausprägung der Aktivität eines Agenten kann dabei sowohl rein reaktiv oder rein proaktiv sein, als auch ein breites Spektrum abdecken und vom Agenten situationsbezogen angepasst werden.
- **Interaktion:** Agenten können miteinander interagieren, um die ihnen übertragene Aufgabe zu lösen, bzw. um ihre individuellen Ziele zu erreichen oder um zu verhandeln. Die Interaktion zwischen Agenten kann dabei auch auf hoher Abstraktionsebene erfolgen.
- **Persistenz:** Ein Agent besitzt die Fähigkeit, seinen inneren Zustand während seines Lebenszyklus beizubehalten.



Abbildung 3.4: Eigenschaften von Software-Agenten [Wagn08]

Die Eigenschaften von Agenten sind in Abbildung 3.4 zusammenfassend dargestellt. Im folgenden Unterkapitel wird die Eignung von Agenten für die Realisierung von Assistenzsystemen anhand von deren Eigenschaften näher betrachtet.

3.3.3 Eignung von Agenten zur Realisierung von Assistenzsystemen

Die Entwicklung wissensbasierter Systeme erfordert neben der klaren Trennung von Systemwissen und Verarbeitungslogik auch die Integration zahlreicher unterschiedlicher Wissensarten. Wissen kann dabei sowohl deklarativ, steuernd als auch prozedural vorliegen, implizit oder explizit, allgemein oder spezifisch, vollständig oder unvollständig, kollektiv oder an

ein Individuum gebunden [Ried17]. Agenten eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften für Problemstellungen dieser Art. Die Kapselungseigenschaft von Agenten entspricht dem verteilten Wissen, das in verschiedenen Entitäten gekapselt ist. Die Zielorientierung und Autonomie kann dazu genutzt werden, um Informationen bzw. Wissen zu akquirieren oder unvollständiges Wissen zu ergänzen, wie das in [Pech14] umgesetzte Konzept zeigt.

Die Interaktionsfähigkeit von Agenten kann nicht nur zur Kooperation und zur Verhandlung mit anderen Agenten verwendet werden, sondern auch zur zielgerichteten Abfrage fehlender Informationen beim Nutzer. Aufgrund des autonomen, persistenten und proaktiven Verhaltens können Agenten bei entsprechender Auslegung auch mit unvollständigen Informationen umgehen, indem sie aus der Erfahrung heraus Annahmen treffen und diese untersuchen.

Insbesondere bei Assistenzsystemen im Engineering stellt die Untersuchung und Bewertung von alternativen Lösungsmöglichkeiten ein Kernelement dar. Dies wird durch proaktives, zielorientiertes und interaktives Verhalten von Agenten unterstützt. Da bei der Modernisierung Ingenieure verschiedener Disziplinen zusammenarbeiten, müssen interdisziplinäre Abhängigkeiten bei der Alternativenbetrachtung berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise durch Interaktion und Kollaboration verschiedener Agenten, welche die jeweiligen Disziplinen vertreten, nah an der menschlichen Verhaltensweise umgesetzt werden. Diese Nähe zur menschlichen Verhaltensweise ist, wie bereits zuvor erwähnt, ein wichtiges Akzeptanzkriterium für wissensbasierte Systeme, da von diesen Systemen erzeugte Vorschläge oder Lösungen für den Menschen besser nachvollziehbar sind [SLD13].

Tabelle 3.1: Eigenschaften von Agenten und Herausforderungen von Engineering-Assistenzsystemen (Legende: ● Eigenschaft voll genutzt, ⊙ Eigenschaft teilweise genutzt)

	Verteilung von Wissen/ untersch. Wissensarten	Zusammenwirken verschiedener Disziplinen	Untersuchung von Alternativen	Umgang mit unvollständigen Informationen	Wiederverwendung von Wissen
Kapselung	●	●			●
Zielorientierung			●	●	
Autonomie				⊙	
Aktivität			●	⊙	
Interaktion		●	●	●	
Persistenz				⊙	●

Weiterhin spielt die Wiederverwendung von Wissen und die Integration von neuem Wissen bei wissensbasierten Assistenzsystemen eine wichtige Rolle, da so ein lernfähiges System entsteht,

das sich iterativ verbessert. Dies wird durch die Eigenschaft der Persistenz und Kapselung von Zustand und Verhalten unterstützt. In Tabelle 3.1 ist zusammengefasst dargestellt, wie die Eigenschaften von Agenten bei der Realisierung eines agentenbasierten Engineering-Assistenzsystems vorteilhaft genutzt werden können.

3.4 Stand der Technik: Agentenbasierte Assistenzsysteme

Neben den bereits in Kapitel 3.2 genannten Assistenzsystemen im Engineering, finden sich in Wissenschaft und Technik zahlreiche Beispiele, in denen wissensbasierte Assistenzsysteme agentenbasiert umgesetzt wurden. Wie im vorigen Unterkapitel 3.3 gezeigt, eignen sich Agenten aufgrund ihrer Eigenschaften für die Realisierung von Assistenzsystemen und insbesondere für das Engineering respektive den Teilaspekt der Modernisierung. Aus diesem Grund wird für diese spezielle Klasse an Assistenzsystemen der Stand der Technik separat dargestellt. Wie bereits in Kapitel 3.2 dargestellt, existieren im Feld der Modernisierungsplanung kaum Assistenzsysteme, sodass der Fokus des Kapitels erneut auf die Unterstützung im Engineering gelegt wird.

Ein Assistenzsystem, das beim komponentenbasierten Engineering von Automatisierungssystemen unterstützt, wurde in der Dissertation von Wagner [Wagn08] beschrieben. Basierend auf hinterlegtem, allgemeingültigen Engineering-Wissen und bekannten, spezifischen Abhängigkeiten zwischen Komponenten arbeitet das Agentensystem im Hintergrund und agiert parallel zu den Eingaben des Benutzers in einem CAx-Tool. Die Agenten erkennen dabei die durch Benutzereingaben entstehenden Zusammenhänge zwischen Komponenten, analysieren diese und ermitteln geeignete Anpassungen, sofern erforderlich. Diese Anpassungen werden an den Benutzer kommuniziert und nach Bestätigung durch den Benutzer von den Softwareagenten selbständig umgesetzt.

Ebenfalls zur Unterstützung des Engineerings mechatronischer Systeme kann das von Seemüller et al. in [SCV13] beschriebene Assistenzsystem verwendet werden. Im Gegensatz zum Ansatz von [Wagn08] beobachtet und reagiert das Agentensystem nicht ausschließlich die Eingaben des Benutzers, sondern besitzt ergänzend ein Modell der einzelnen Aktivitäten während des Engineeringsprozesses. Mithilfe dieses Prozessmodells führt das Assistenzsystem den Benutzer proaktiv durch den Engineeringprozess.

Monticolo et al. präsentieren in [MMDH14] ein agentenbasiertes Assistenzsystem, um Projektwissen während der Durchführung von Engineering-Projekten aufzubauen. Das Assistenzsystem adressiert darüber hinaus die Wiederverwendung des aufgebauten Wissens in künftigen Projekten und versucht, den Zugang zum jeweils in der aktuellen Situation benötigten Wissen zu erleichtern. Hierzu verwendet das Assistenzsystem KATRAS ein Organisationsmodell, ein Projektmodell sowie eine Domänenontologie, auf die drei verschiedene Agententypen zugreifen, um die Unterstützung beim Wissensmanagement zu realisieren.

Ein weiterer Ansatz, der die Wiederverwendung von Wissen zum Ziel hat, wurde von Li und Chen vorgestellt [LiCh09]. Um den Entwurfszyklus neuer Systeme zu verkürzen, werden mithilfe eines Agentensystems und der Anwendung von fallbasiertem Schließen bereits bekannte Prinzipzlösungen automatisiert ermittelt, ggf. vom Benutzer angepasst und in der Fallbasis für die künftige Wiederverwendung gespeichert.

Rauscher beschreibt in [Raus15] ein Agentensystem, das die Konsistenzprüfung mechatronischer Modelle durchführt. Hierzu hebt das Agentensystem die heterogenen Modelle aus den unterschiedlichen Engineering-Disziplinen auf eine modellübergreifende Abstraktionsebene und führt auf dieser Ebene eine Konsistenzprüfung durch. Zur Unterstützung der Auflösung identifizierter Inkonsistenzen stellt das Assistenzsystem dem Benutzer Informationen bereit. Das Wissen des Systems ist in lokales (modellspezifisches) und globales Wissen aufgeteilt und in Ontologien abgebildet. Basierend auf dem in den Ontologien modellierten Wissen führen die Agenten ihre Konsistenzprüfung durch und stellen dem Benutzer Informationen bereit.

Das Assistenzsystem von [Beye19] unterstützt beim Engineering sowie beim Reengineering von Automatisierungssystemen. Mithilfe von allgemeingültigem, domänenspezifischem sowie projektspezifischem Wissen wird eine automatisierte Grobplanung des Automatisierungssystems durchgeführt. Das System wird Top-Down in verschiedene Bereiche zerlegt, die wiederum verschiedene Funktionen beinhalten können. Zur Realisierung einer Funktion wählt das Agentensystem eine geeignete Komponente aus und dimensioniert deren Eigenschaften. Bei der Planung berücksichtigen die Agenten Schnittstellen zwischen Komponenten, Funktionen und Bereichen. Die Modernisierung aufgrund geänderter Anforderungen oder aufgrund von geändertem Wissen wird vom System allerdings nur für Automatisierungssysteme unterstützt, die bereits initial mit dem Assistenzsystem geplant wurden. Die Anwendbarkeit des Ansatzes auf verschiedene Domänen wurde gezeigt. Aufbauend auf dem Konzept dieser Arbeit wurde das Assistenzsystem in [NMWW18] um eine integrierte Layoutplanung für Intralogistiksysteme erweitert. Die Agenten des Assistenzsystems minimieren hierzu heuristisch die Zielfunktion für die jeweils von ihnen vertretene Layoutkonstellation und optimieren dadurch das Layout des Intralogistiksystems.

Beim Engineering von Automatisierungssystemen werden oftmals Simulationen verwendet, um das System bzw. einzelne Teilaspekte geeignet auszulegen. Die Durchführung der Simulationen mit unterschiedlichen Lösungsansätzen ist dabei zeitaufwendig und vom Erfahrungswissen des Ingenieurs abhängig. In [VGW19] wird ein Assistenzsystem vorgestellt, das Simulationen basierend auf strukturiertem Wissen parallel und dezentral koordiniert durchführt. Softwareagenten zerlegen die Problemstellung in geeignete Teilprobleme und fügen deren simulierte Teillösungen kooperativ zu einer Gesamtlösung zusammen und unterstützen den Ingenieur dadurch in seiner Tätigkeit. Durch Einbindung von fallbasiertem Schließen konnte die Performance der Simulationsdurchführung weiter gesteigert werden.

Wie die zuvor genannten Beispiele von agentenbasierten Assistenzsystemen zeigen, eignen sich Agenten, um dem Benutzer kontextsensitiv Unterstützung anzubieten. Diese Unterstützung kann durch Bereitstellung adäquater Informationen erfolgen und/oder durch Ausführung von bestimmten Handlungsschritten. Beides entlastet den Benutzer in seiner Tätigkeit und trägt so dazu bei, dass dieser seine Zeit und seine Fähigkeiten für andere wertschöpfende Tätigkeiten nutzen kann. Auch wenn Assistenzsysteme nicht zwangsläufig agentenbasiert umgesetzt werden müssen, so zeigen die vorliegenden Beispiele dennoch, dass die Entwicklung von wissensbasierten Systemen mithilfe von Agenten vereinfacht wird. Dies ist insbesondere bei der Trennung von allgemeinem und spezifischem Wissen in den einzelnen Agententypen bzw. Wissensquellen ersichtlich [MMV+18].

4 Grobkonzept zur Strukturierung eines assistierten Modernisierungsprozesses

Die im vorigen Kapitel 3 beschriebenen (wissensbasierten) Assistenzsysteme unterstützen den Benutzer bei der von ihm durchzuführenden Tätigkeit. Dabei begleiten sie den natürlichen Arbeitsablauf entweder im Hintergrund und bieten kontextsensitiv Unterstützung an oder sie geben alternativ einen Ablauf vor, der sich am natürlichen Arbeitsablauf des Menschen orientiert. Diese Orientierung am natürlichen Arbeitsablauf sorgt dafür, dass die vom System ermittelten Vorschläge und Entscheidungen für den Benutzer einfach nachvollziehbar sind. Der Ablauf einer Modernisierung und deren Planung folgt dabei typischerweise dem in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Referenzprozess. Es liegt daher nahe, diesen Referenzprozess als Grundlage für den assistierten Modernisierungsprozess zu verwenden.

Im folgenden Unterkapitel wird das Konzept zur Strukturierung des assistierten Modernisierungsprozesses in sieben grundlegenden Phasen beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 4.2 für jede Phase die Unterstützbarkeit durch ein Assistenzsystem diskutiert. In Kapitel 5 wird näher auf den Ablauf der einzelnen Phasen eingegangen.

4.1 Phasen des assistierten Modernisierungsprozesses

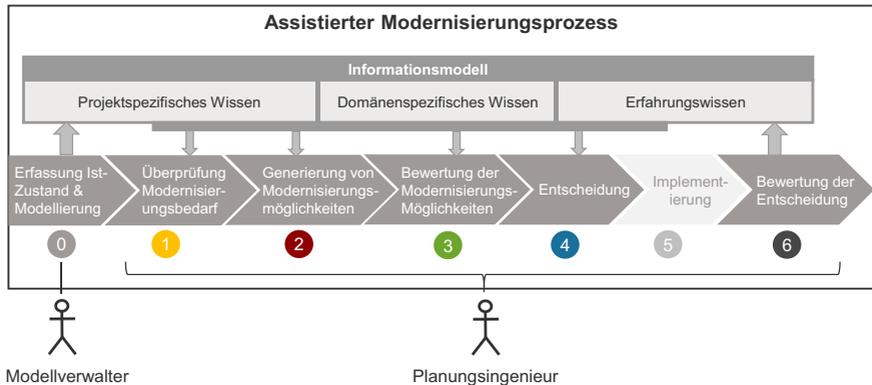


Abbildung 4.1: Phasen des assistierten Modernisierungsprozesses

Das Konzept zur Strukturierung des assistierten Modernisierungsprozesses sieht sieben Phasen vor, die in Abbildung 4.1 dargestellt sind. Die Auswahl der Phasen ergibt sich dabei aus dem in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Referenzprozess, der mit den 6 Phasen der Entscheidungsfindung nach [BCK+09] überlagert wurde. Die Phase 0 muss nur durchlaufen werden, sofern noch kein Modell des Automatisierungssystems existiert und wurde daher als Grundlage für einen

assistierten Modernisierungsprozess ergänzt. Die übrigen Phasen 1-6 werden in jedem Modernisierungsprozess durchgeführt.

Phase 0: Erfassung des Ist-Zustands und Modellierung des Automatisierungssystems

Sofern zu Beginn des Prozesses noch kein geeignetes Modell des zu modernisierenden Automatisierungssystems existiert, ist eine vorgelagerte Phase notwendig, um den Planungsprozess überhaupt durch ein Assistenzsystem unterstützen zu können. Da das Assistenzsystem neben dem problemunabhängigen Wissen über den Modernisierungsprozess auch problemspezifisches Wissen über das zu modernisierende System benötigt, muss dieses zunächst analysiert und in geeigneter Form modelliert werden (vgl. Abbildung 4.2).

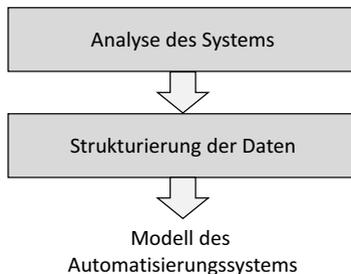


Abbildung 4.2: Grobablauf der Phase 0 des Modernisierungsprozesses

Aufgrund der oftmals fehlenden oder veralteten Planungsdokumente zum System, beschrieben in Anforderung A3 („Das Anlagenmodell muss mit überschaubarem Aufwand erstellbar sein, zudem müssen unvollständige oder fehlende Informationen berücksichtigt werden können“), stellt dieser Schritt eine wichtige Grundlage für die spätere Funktionsweise des Assistenzsystems dar, denn die Qualität der von einem Assistenzsystem getroffenen Entscheidungen hängt maßgeblich von dem zugrundeliegenden Modell ab. Aus Anforderung A4 („Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Disziplinen sowie zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen“) folgt, dass aufgrund des mechatronischen Charakters des Systems Zusammenhänge zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen sowie Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Disziplinen enthalten sein müssen. Die Modellierung des Automatisierungssystems ist in Kapitel 5.1.1 näher beschrieben.

Phase 1: Überprüfung des Modernisierungsbedarfs

Um zu ermitteln, ob eine Modernisierung notwendig ist, muss zunächst eine Überprüfung des Modernisierungsbedarfs erfolgen. Diese Überprüfung basiert auf der Datengrundlage des in Phase 0 erstellten Modells des Automatisierungssystems und der Gegenüberstellung mit einer Produktionsanfrage, in der die Eigenschaften des zu fertigenden Produktes und die hierfür

notwendigen Prozessschritte (engl. „bill of processes“) enthalten sind. Abbildung 4.3 zeigt den Grob Ablauf der Phase 1.

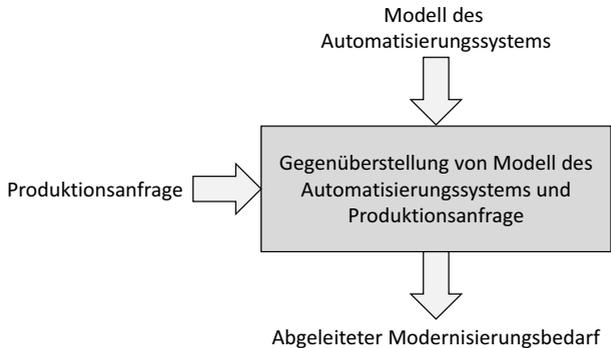


Abbildung 4.3: Grob Ablauf der Phase 1 des Modernisierungsprozesses

Der abgeleitete Modernisierungsbedarf basiert auf der Klassifikation nach [HFMW16] und umfasst folgende Fälle:

1. Menge der vom Automatisierungssystem angebotenen Prozesse reicht nicht aus
2. Parameterbereich der angebotenen Prozesse reicht nicht aus
3. Reihenfolge der Prozesse ist nicht realisierbar
4. Keine Modernisierung notwendig

Dabei werden neben der Bestimmung des Falls auch zusätzliche Informationen zur weiteren Eingrenzung des Modernisierungsbedarfs ermittelt, beispielsweise welcher Prozess nicht vorhanden ist oder welcher Prozessparameter aufgrund seines Wertebereichs nicht geeignet ist, die Produktionsanfrage zu erfüllen. Diese zusätzlichen Informationen können in nachfolgenden Schritten genutzt werden, um Modernisierungsmöglichkeiten zu bestimmen.

Die Wahl der Modellierung der Produktionsanfrage ist dabei nicht vollständig unabhängig von der Wahl der Modellierung des Automatisierungssystems, da ein automatischer Abgleich auf einen vorliegenden Modernisierungsbedarf möglich sein soll. Durch die Berücksichtigung von Produkten, Prozessen und Ressourcen und die Unterteilung des Systemmodells gemäß Anforderung A4, wird die Gegenüberstellung erleichtert, wie die genauere Betrachtung des Abgleichs in Kapitel 5.2.2 zeigt.

Phase 2: Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten

Sofern in der vorigen Phase nicht der Trivialfall 4 (Keine Modernisierung notwendig) ermittelt wurde, werden in der zweiten Phase ein oder mehrere Möglichkeiten generiert, um den abgeleiteten Modernisierungsbedarf zu befriedigen und damit die vom Planungsingenieur

gestellte Produktionsanfrage erfüllbar zu machen. Die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten nutzt dabei das vorhandene Modell des Automatisierungssystems und domänenspezifisches Wissen, wie Abbildung 4.4 zeigt.

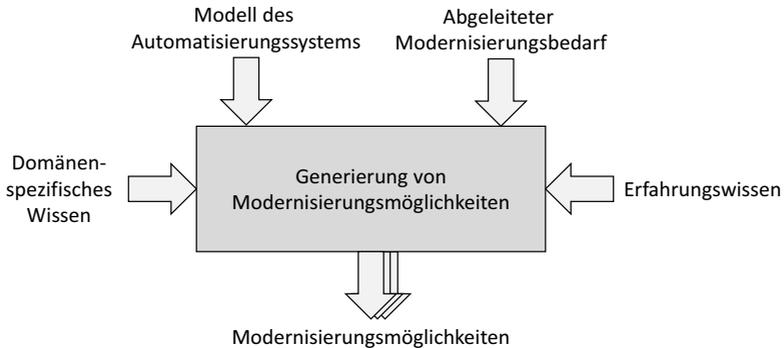


Abbildung 4.4: Grob Ablauf der Phase 2 des Modernisierungsprozesses

Dabei werden zunächst algorithmisch alle Ansatzpunkte für eine Befriedigung des Modernisierungsbedarfs ermittelt und als Modernisierungsmöglichkeit in Betracht gezogen. Bei der Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten wird darauf geachtet, dass Bestandteile des bisherigen Automatisierungssystems unverändert bleiben, sofern eine Änderung aufgrund des abgeleiteten Modernisierungsbedarfs nicht zwingend notwendig ist. Durch die damit verbundene Vermeidung einer kompletten Neuplanung der Anlage, bleibt der Lösungsraum endlich. Diese Vereinfachung ist durch die Kosten-/Nutzenbetrachtung (Anforderung A5) gerechtfertigt, da bei einer vollständigen Umplanung ein schlechteres Kosten-/Nutzenverhältnis zu erwarten ist (vgl. nachfolgende Phase 3).

Phase 3: Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten

Um die zuvor generierten Modernisierungsmöglichkeiten vergleichen zu können, erfolgt in Phase 3 eine Bewertung der Möglichkeiten (vgl. Abbildung 4.5). Hierbei wird zunächst über eine Auswirkungsanalyse ermittelt, wie sich eine Modernisierung auf andere Bestandteile des Automatisierungssystems auswirkt, beispielsweise ob bei Veränderung eines Ressourcenparameters oder bei Austausch einer Ressource andere Ressourcen ebenfalls betroffen sind oder ob die Veränderung eines Prozessparameters unerwünschte Auswirkungen auf einen Produktparameter besitzt. Hierzu wird das Modell des Automatisierungssystems verwendet, um anhand der dort modellierten Abhängigkeiten die Auswirkungen einer Modernisierungsmöglichkeit ermitteln zu können.

Im Anschluss an die Auswirkungsanalyse erfolgt die Bestimmung von Aufwänden für die Änderungen an Mechanik, Elektronik und Software sowie der durch die Modernisierung erzielten

Flexibilität. Hierzu werden beim Planungsingenieur Informationen abgefragt, sofern diese nicht bereits aus dem Modell des Automatisierungssystems hervorgehen. Die Bewertung der zuvor ermittelten Modernisierungsmöglichkeiten stellt in der nachfolgenden Phase die Basis dar, um die ermittelten Möglichkeiten miteinander zu vergleichen und dem Planungsingenieur eine Entscheidungsunterstützung anzubieten.

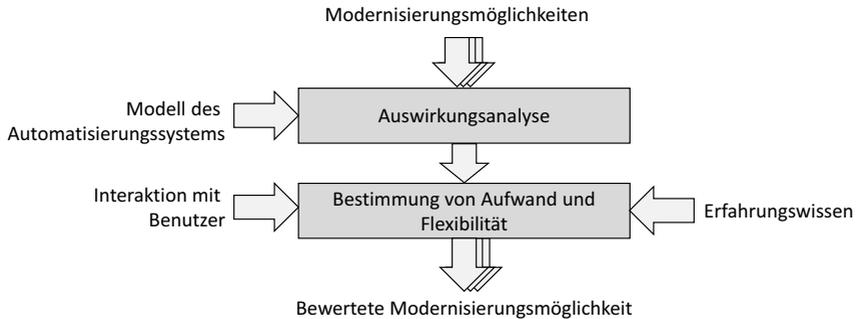


Abbildung 4.5: Grobablauf der Phase 3 des Modernisierungsprozesses

Phase 4: Entscheidung

Um dem Planungsingenieur die Entscheidung für eine der zuvor ermittelten Modernisierungsmöglichkeiten zu ermöglichen bzw. zu erleichtern, wird in der vierten Phase des Planungsprozesses die Entscheidungsgrundlage aggregiert und hierfür die in der Phase zuvor ermittelten Informationen verwendet. Neben der Anzeige von Kenngrößen zur Charakterisierung von Kosten (Aufwand) und Nutzen (Flexibilität) werden in dieser Phase auch die ermittelten Modernisierungsmöglichkeiten sowie die Ergebnisse der Auswirkungsanalyse für den Planungsingenieur verständlich dargestellt. Stehen mehrere Modernisierungsmöglichkeiten zur Verfügung, besteht darüber hinaus die Option, mehrere Möglichkeiten direkt miteinander zu vergleichen, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede bzw. Vorteile und Nachteile der jeweiligen Möglichkeiten zu erkennen. Der Ablauf dieser Phase ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

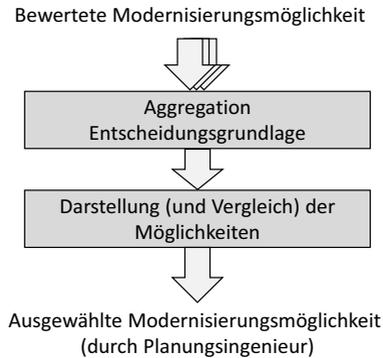


Abbildung 4.6: Grob Ablauf der Phase 4 des Modernisierungsprozesses

Am Ende dieser Phase trifft der Planungsingenieur die Entscheidung für eine der Möglichkeiten. Dabei spielen neben den aggregierten Informationen auch Kontextinformationen eine Rolle, die dem Assistenzsystem nicht bekannt sind.

Phase 5: Implementierung der Entscheidung

Die ausgewählte Modernisierungsmöglichkeit wird im Folgenden umgesetzt und kann dabei aus einer Kombination aus Veränderungen von Mechanik, Elektronik und Software bestehen. Das Ergebnis der Implementierung ist somit das modernisierte Automatisierungssystem.

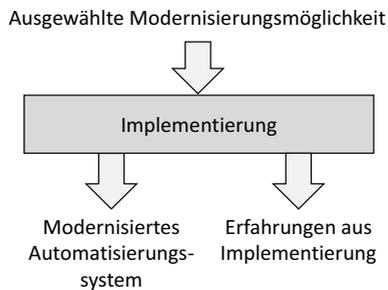


Abbildung 4.7: Grob Ablauf der Phase 5 des Modernisierungsprozesses

Die bei der Implementierung gesammelten Erfahrungen können erfasst werden, dazu gehören unter anderem tatsächlich aufgetretene Aufwände sowie Abweichungen von der geplanten Lösung (Abbildung 4.7).

Phase 6: Bewertung der Entscheidung

Mithilfe der in Phase 5 gesammelten Erfahrungen kann abschließend die getroffene Entscheidung bewertet werden. Dazu kann einerseits überprüft werden, ob das Ziel der Modernisierung, also

die Erfüllbarkeit der in Phase 1 gestellten Produktionsanfrage, erreicht wurde und andererseits, ob die tatsächlichen Aufwände den in Phase 3 geschätzten Aufwänden entsprechen. Bei Abweichungen können die Gründe hierfür ermittelt werden. Das Ergebnis dieser Phase liegt in der Form von Erfahrungswissen vor und kann für die nächste Modernisierungsplanung verwendet werden. Der abstrahierte Ablauf dieser Phase ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

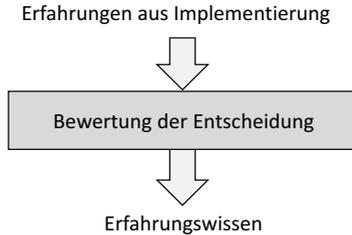


Abbildung 4.8: Grobablauf der Phase 6 des Modernisierungsprozesses

4.2 Unterstützbarkeit der Phasen durch ein Assistenzsystem

In diesem Unterkapitel wird auf den Aspekt der Unterstützbarkeit der zuvor beschriebenen Phasen durch ein Assistenzsystem eingegangen. Neben der Betrachtung, wie sich der Einfluss der in Kapitel 2.1.3 identifizierten Schwachstellen durch den Einsatz eines Assistenzsystems verändert, werden auch Grenzen des assistierten Planungsprozesses aufgezeigt.

Phase 0: Erfassung des Ist-Zustands und Modellierung des Automatisierungssystems

Die Erfassung des Ist-Zustands des Automatisierungssystems (Analyse des Systems) muss zunächst manuell durch den Menschen erfolgen. Dies kann unter anderem durch Inspektion von Datenblättern oder der technischen Dokumentation des Automatisierungssystems erfolgen, durch Befragen des Prozesspersonals, durch Analyse der Steuerungssoftware oder durch Beobachtung des Prozesses. Aufgrund der Vielzahl an Datenquellen, die das System meist aus unterschiedlichen, disziplinspezifischen Blickwinkeln betrachten, stellt die Erfassung des Ist-Zustands eine Herausforderung dar, die nur schwerlich direkt durch ein Assistenzsystem unterstützt werden kann. Üblicherweise erfolgt die Erfassung des Ist-Zustands ohne erkennbare Systematik.

Bei der Erstellung eines Modells kann das Assistenzsystem den Benutzer (Modellverwalter) durch Strukturierung der zuvor ermittelten Daten indirekt unterstützen, indem es die Modellierungsart und somit eine Systematik für die Datenerfassung vorgibt. Beispielsweise könnte der Benutzer zunächst nach einer Einteilung des Automatisierungssystems in einzelne Stationen gefragt werden, die jeweils ein oder mehrere Prozesse und dem Prozess zugeordnete Ressourcen enthalten, welche anschließend vom Benutzer genauer spezifiziert werden müssen. Durch diese

Vorgabe wird der Benutzer darin unterstützt, Stationen zu identifizieren und deren Prozesse und Ressourcen zu bestimmen und durch geeignete Parameter zu spezifizieren. Da viele Prozesse und Ressourcen in zahlreichen Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung Verwendung finden (z.B. Verschieben, Förderbänder, Vakuumbreifer etc.), können diese über eine Prozess-Bibliothek bzw. Ressourcen-Bibliothek zur Verfügung gestellt werden. Dies hat den Vorteil, dass bereits alle üblicherweise relevanten Parameter (z.B. Länge, Breite und Geschwindigkeit eines Förderbandes), sowie deren Abhängigkeiten untereinander, vorgegeben werden und vom Benutzer nur noch mit den entsprechenden Werten bzw. Wertebereichen befüllt werden müssen. Ergänzt werden kann diese Unterstützung durch die Bereitstellung von Modellierungsrichtlinien und beispielhafte Modellierungen für Prozesse oder Ressourcen.

Fazit zu Phase 0:

Auch wenn die Tätigkeiten in Phase 0 zu einem großen Teil manuell durchgeführt werden müssen, so besteht dennoch die Möglichkeit, durch Vorgabe und Erklärung einer Modellierungsart und durch Verwendung von Bibliotheken für Prozesse und Ressourcen den Aufwand zur Modellierung des Automatisierungssystems zu senken. Dadurch kann auch indirekt der Vorgang der Erfassung des Ist-Zustands systematisiert werden, sofern der Benutzer sich bei der Analyse des Automatisierungssystems an das vom Assistenzsystem vorgegebene Schema der Modellierung hält.

Phase 1: Überprüfung des Modernisierungsbedarfs

Die Überprüfung des Modernisierungsbedarfs erfordert vom Planungsingenieur im Fall des assistierten Planungsprozesses lediglich die Eingabe einer Produktionsanfrage, in der er das zu fertigende Produkt mit seinen Eigenschaften und die hierfür notwendigen Prozessschritte definiert. Da der Fertigungsablauf und die Eigenschaften des gewünschten Produkts bekannt sind, muss in dieser Phase lediglich eine Transformation dieser Informationen in eine strukturierte Form erfolgen. Hierbei kann das Assistenzsystem die Modellierungsart vorgeben, beispielsweise in Form einer formalisierten Prozessbeschreibung nach VDI-Richtlinie 3682 [VDI3682].

Die Ermittlung des Modernisierungsbedarfs kann anschließend vollautomatisch ablaufen. Die Korrektheit des ermittelten Ergebnisses ist abhängig von der Korrektheit und Vollständigkeit des in Schritt 0 erstellten Anlagenmodells. Auch die genauere Analyse bei erkanntem Modernisierungsbedarf kann automatisiert durch das Assistenzsystem erfolgen.

Fazit zu Phase 1:

Die in Kapitel 2.1.3 identifizierten Schwachstellen der ersten drei Prozessaktivitäten können durch einen assistierten Modernisierungsplanungsprozess abgeschwächt werden. Anstelle einer manuellen Überprüfung des Modernisierungsbedarfs muss vom Planungsingenieur lediglich eine Produktionsanfrage in formalisierter Form eingegeben werden, die weiteren Schritte können vollautomatisiert durchgeführt werden. Die Einschränkung liegt hier allerdings in der Güte der Modellierung des Automatisierungssystems.

Phase 2: Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten

Die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten kann automatisiert mithilfe der im Modell des Automatisierungssystems hinterlegten Informationen erfolgen. Hierbei kann zusätzlich auf Erfahrungswissen zurückgegriffen werden, beispielsweise indem Prinziplösungen für eine bestimmte Problemklasse angewendet werden. Durch die automatisierte Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten wird ermöglicht, eine in der Theorie nahezu unbegrenzte Anzahl an Handlungsoptionen zu erzeugen und im späteren Verlauf zu untersuchen. In der Praxis ist die Zahl der Modernisierungsmöglichkeiten allerdings durch physikalische Gegebenheiten stark begrenzt. Zeitliche Restriktionen, die bei der manuellen Durchführung als Schwachstelle identifiziert wurden (vgl. Kap 2.1.3) und dafür sorgen, dass nur eine oder eine kleine Anzahl an Handlungsoptionen vom Planer untersucht werden, spielen bei automatisierter Generierung der Modernisierungsmöglichkeiten kaum eine Rolle mehr. Ebenso wird die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten vom Wissen des Planungingenieurs unabhängig, da diese algorithmisch mithilfe von domänenspezifischem Wissen ermittelt werden.

Fazit zu Phase 2:

Eine automatisierte Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten ist modellbasiert durchführbar. Dadurch wird ermöglicht, dass eine größere Anzahl von Handlungsoptionen in die Betrachtung einbezogen wird und diese darüber hinaus unabhängig vom Wissen und den persönlichen Präferenzen des Planungingenieurs sind. Durch die Betrachtung einer größeren Menge an Handlungsoptionen, kann die Qualität des Ergebnisses potenziell verbessert werden. Insgesamt ist zu beachten, dass die Qualität der in Phase 2 ermittelten Modernisierungsmöglichkeiten mit der Qualität des Modells korreliert.

Phase 3: Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten

Bei der Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten wird zunächst eine Auswirkungsanalyse durchgeführt, um Abhängigkeiten einer Modernisierungsmöglichkeit zu identifizieren und Auswirkungen auf andere Systemelemente zu untersuchen. Anschließend erfolgt die Bestimmung des Kosten-/Nutzenverhältnisses über die Ermittlung von Aufwänden und erzielter Flexibilität.

Der erste Schritt der Auswirkungsanalyse kann erneut vollautomatisiert mithilfe des Modells des Automatisierungssystems erfolgen, ein menschlicher Eingriff ist nicht notwendig. Durch die Automatisierung dieses Schritts, spielen die in Kapitel 2.1.3 als Schwachstelle identifizierten Ressourcenbeschränkungen keine Rolle mehr. Zudem können, insbesondere bei komplexen Systemen, die Abhängigkeiten zwischen Elementen des Systems für den Menschen unüberschaubare Dimensionen annehmen, sodass die Fehlerwahrscheinlichkeit bei manueller Durchführung steigt. Da übersehene Abhängigkeiten zur Wahl einer nicht geeigneten Lösung führen können, die später angepasst oder verworfen werden muss, besteht in dieser Phase mit Hilfe der automatisierten Durchführung durch das Assistenzsystem die Möglichkeit, den

Planungsingenieur von der Durchführung eines komplexen und fehleranfälligen Prozesses zu entbinden.

Bei der Aufwands- und Flexibilitätsbetrachtung ist eine Teilautomatisierung des Ablaufs denkbar. Da nach Anforderung A3 mit unvollständigen Informationen umgegangen werden muss und zur Ermittlung von Aufwänden und Flexibilität Kontextinformationen eine Rolle spielen, die dem Planungsingenieur, nicht aber dem Assistenzsystem bekannt sind, erfolgt in diesem Schritt eine Abfrage fehlender Informationen beim Planungsingenieur. Sofern für das Assistenzsystem möglich, werden einzelne Aspekte automatisiert bewertet. Die als Schwachstelle identifizierte Nicht-Reproduzierbarkeit von Ergebnissen aufgrund subjektiver Auswahl von Kriterien, kann somit durch die feste Vorgabe von Kriterien durch das Assistenzsystem abgemildert werden.

Fazit zu Phase 3:

Insbesondere bei der fehleranfälligen Tätigkeit der Auswirkungsanalyse kann der Mensch durch eine Automatisierung vom Assistenzsystem unterstützt werden. Hierbei gilt erneut, dass die Qualität und Vollständigkeit des Modells des Automatisierungssystems entscheidend für die Qualität der Auswirkungsanalyse sind. Bei der Betrachtung von Kennzahlen für die Kosten-/Nutzenbetrachtung ist eine Teilautomatisierung möglich, die zu objektiveren Ergebnissen führen kann als eine manuelle Betrachtung. Da die Ermittlung der Modernisierungsmöglichkeiten ohne Zutun des Planungsingenieurs erfolgt, kann dieser die von ihm insgeheim präferierte Möglichkeit nicht durch gezielte Festlegung von Auswahlkriterien beeinflussen.

Phase 4: Entscheidung

Die Aggregation der Entscheidungsgrundlage mithilfe der in Phase 3 ermittelten Kennzahlen für Flexibilität und Aufwand der einzelnen Modernisierungsmöglichkeiten kann automatisch erfolgen. Das Assistenzsystem kann den Planungsingenieur durch eine grafische Darstellung und Erklärung der Ergebnisse bei der Auswahl unterstützen und darüber hinaus einen Vergleich mehrerer Modernisierungsmöglichkeiten anbieten und somit Gemeinsamkeiten und Unterschiede verschiedener Möglichkeiten hervorheben.

Der bereits in Phase 3 diskutierten Nicht-Reproduzierbarkeit von Entscheidungen aufgrund subjektiver Wahl von Kriterien kann so begegnet werden. Die abschließende Entscheidung für eine Modernisierungsmöglichkeit obliegt allerdings dem Planungsingenieur, da diesem über das Anlagenmodell hinausgehende Kontextinformationen zur Verfügung stehen (können).

Fazit zu Phase 4:

Das Assistenzsystem wirkt in dieser Phase als System zur Entscheidungsunterstützung, trifft die Entscheidung aber nicht selbst. Durch das Assistenzsystem soll der Einfluss von subjektiven Entscheidungen gesenkt und die Reproduzierbarkeit der Entscheidung erhöht werden.

Phase 5: Implementierung der Entscheidung

Die Implementierung der getroffenen Entscheidung erfolgt durch, oft sequenzielle, Veränderungen von Mechanik, Elektronik und der Software anhand der gewählten Modernisierungsmöglichkeit. Da die Implementierung der Entscheidung ein physischer Prozess ist, kann das Assistenzsystem als Softwarewerkzeug in dieser Tätigkeit nicht unterstützen.

Fazit zu Phase 5:

Da diese Tätigkeit nicht Teil des eigentlichen Planungsprozesses ist, sondern die physische Umsetzung der Entscheidung beinhaltet, kann keine Unterstützung durch das Assistenzsystem erfolgen. Der Planungsingenieur kann allerdings vom Assistenzsystem dazu aufgefordert werden, aufgetretene Aufwände systematisch zu erfassen sowie zu überprüfen, ob die tatsächlichen Auswirkungen der Modernisierung den erwarteten Auswirkungen entsprechen. Diese Daten werden in der abschließenden Phase 6 benötigt, jedoch werden sie bei manueller Durchführung des Modernisierungsprozesses oftmals nicht erfasst.

Phase 6: Bewertung der Entscheidung

Die bei der Implementierung der Entscheidung gesammelten Erfahrungen können vom Assistenzsystem gezielt beim Planungsingenieur abgefragt werden. Anschließend speichert das Assistenzsystem die Daten für eine zukünftige Verwendung ab, sodass sie als Erfahrungswissen für künftige Planungsprozesse zur Verfügung stehen. Der Vorteil gegenüber der manuellen Durchführung des Modernisierungsplanungsprozesses besteht darin, dass die Daten strukturiert erfasst werden und somit automatisiert wiederverwendet werden können.

Fazit zu Phase 6:

Da bei manueller Durchführung des Modernisierungsprozesses meist keine Bewertung der Entscheidung erfolgt, bietet die strukturierte Erfassung des gewonnenen Erfahrungswissens durch das Assistenzsystem die Möglichkeit, das Erfahrungswissen personenunabhängig und dauerhaft zu speichern und wiederzuverwenden.

In der folgenden Tabelle 4.1 sind die in Kapitel 2.1.3 identifizierten Schwachstellen erneut stichpunktartig aufgeführt und angegeben, welche der Schwachstellen durch einen assistierten Modernisierungsplanungsprozess beseitigt oder abgemildert werden können.

Tabelle 4.1: Schwachstellen aus Kap. 2.1.3 sowie Einschätzung der Abmilderung durch assistierten Modernisierungsplanungsprozess (Legende: ■ Schwachstelle beseitigt □ Schwachstelle abgemildert □ keine Auswirkung)

Prozessaktivität	Identifizierte Schwachstellen	Einschätzung	Erklärung
Identify target deviation	Manuelle Einschätzung des Modernisierungsbedarfs aufgrund schneller Einschätzung des Ingenieurs. Nicht vorhandene bzw. unvollständige Dokumentation des Systems	□	Analyse des Systems muss überwiegend manuell erfolgen, Assistenzsystem kann indirekt unterstützen (Systematisierung des Ablaufs, Bibliotheken)
Assess situation of target deviation	Manuelle Durchführung, da kein Modell von Anforderungen bzw. des Automatisierungssystems vorhanden ist	■	Automatisierter Abgleich von Produktionsanfrage mit Modell des Automatisierungssystems
Analyze causes	Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern und zwischen Disziplinen sind zahlreich, oft verdeckt und erfordern Erfahrung sowie tiefes Verständnis des komplexen Gesamtsystems	■	Automatische Analyse der Gründe des Modernisierungsbedarfs anhand des Modells
Identify possible courses of action	Planung einer begrenzten Anzahl an Handlungsoptionen aus Zeit- und Kostengründen, dadurch evtl. keine Untersuchung der besten Option. Auswahl der Optionen durch Ingenieur beeinflusst	■	Automatische und algorithmisch objektive Generierung einer großen Anzahl an Handlungsoptionen
Identify and estimate effects	Begrenzte Ressourcen zur Auswirkungsanalyse, menschliche Fehler aufgrund komplexer disziplinübergreifender Auswirkungen	■	Automatisierung der fehleranfälligen Auswirkungsanalyse mithilfe des Modells
Compare action options	Subjektive Auswahl von Entscheidungskriterien kann zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führen	□	Vorgabe von Entscheidungskriterien und teilautomatische Ermittlung der Werte für Kriterien
Induce decisions	Auswahl der Kriterien oft so, dass bereits im Vorfeld getroffene Entscheidung unterstützt wird	□	Vorgabe der Entscheidungskriterien, allerdings keine automatisierte Entscheidungsfindung

Prozessaktivität	Identifizierte Schwachstellen	Einschätzung	Erklärung
Implement change	Sequenzielle Implementierung der Entscheidung in unterschiedlichen Disziplinen	□	Keine Unterstützungsmöglichkeit des physischen Prozesses
Record effects	Oftmals nicht durchgeführt, Wissen über Auswirkungen der Modernisierungsmaßnahme geht verloren	▣	Sensibilisierung und Aufforderung des Ingenieurs zur Erfassung
Match results	Oftmals nicht durchgeführt, unsystematisch	▣	Abfrage spezifischer Informationen, allerdings kein Anspruch auf Vollständigkeit
Draw lessons learned	Oftmals nicht durchgeführt, Wissen wird nicht strukturiert abgelegt, was die Wiederverwendung erschwert. Personengebundenes Wissen kann verloren gehen	■	Speicherung der strukturierten Informationen ermöglicht Wiederverwendung des Wissens

Wie die Betrachtung der identifizierten Schwachstellen zeigt, bietet der Einsatz eines Assistenzsystems im Modernisierungsplanungsprozess die Möglichkeit, eine Vielzahl der Schwachstellen zu beseitigen oder sie zumindest abzumildern. Lediglich bei der physischen Implementierung der Modernisierung kann das Assistenzsystem naturgemäß nicht unterstützen.

Im nachfolgenden Kapitel 5 wird das Konzept für den hier beschriebenen Grob Ablauf verfeinert und verwendbare Methodiken und Informationsmodelle für jede Phase erläutert. Darüber hinaus wird gezeigt, wie die Software-Architektur eines solchen Assistenzsystems, das mithilfe von Software-Agenten umgesetzt wird, aussehen kann.

5 Konzept des agentenbasierten Assistenzsystems

In diesem Kapitel wird das Konzept des agentenbasierten Assistenzsystems vorgestellt. Das Konzept berücksichtigt dabei die in Kapitel 2.3 hergeleiteten Anforderungen und folgt dem in Kapitel 4 beschriebenen Grob Ablauf des Modernisierungsprozesses. Dabei erfolgt die Darstellung des Konzepts zunächst aus der modellierungstechnischen und ablaufmethodischen Perspektive, bevor der Fokus stärker auf die Architektur Aspekte des agentenbasierten Assistenzsystems gelegt wird.

Da das Assistenzsystem auf der Grundlage von verschiedenen Informationsquellen basiert, werden diese und insbesondere die verwendete Modellierungsweise der Anlageninformationen in Kapitel 5.1 vorgestellt. Kapitel 5.2 erläutert den methodischen Ablauf der einzelnen Phasen des Modernisierungsplanungsprozesses und zeigt, wie basierend auf den zuvor beschriebenen Informationen eine Unterstützung des Planungsprozesses stattfinden kann. Kapitel 5.3 überträgt die zuvor beschriebene Modellierung sowie den methodischen Ablauf auf Software-Agenten und präsentiert die Architektur eines Agentensystems, das den Planungsingenieur bei der Planung von Modernisierungsmöglichkeiten an Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung unterstützt.

5.1 Informationsquellen des Assistenzsystems

Die grundlegenden Informationsquellen des Assistenzsystems wurden bereits in Kapitel 4 eingeführt und werden in diesem Unterkapitel näher beschrieben. Neben projektspezifischem Wissen (z.B. das Modell des Automatisierungssystems), wird auch domänenspezifisches Wissen und Erfahrungswissen im System verwendet.

5.1.1 Modell des Automatisierungssystems

Das Modell des Automatisierungssystems muss die Anforderungen A3 („Das Anlagenmodell muss mit überschaubarem Aufwand erstellbar sein, zudem müssen unvollständige oder fehlende Informationen berücksichtigt werden“) und A4 („Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Disziplinen sowie zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen“) erfüllen.

Aufgrund von Anforderung A3 muss eine Modellierungsart gewählt werden, deren Modellierungsaufwand geringer ist als der für die Erstellung vollständig digitaler, dem Stand der Technik entsprechender CAE-Dokumente. In Kombination mit Anforderung A4, welche die Berücksichtigung von inter- und intradisziplinären Abhängigkeiten fordert, müssen die zu modellierenden Informationen sorgfältig im Hinblick auf Verfügbarkeit und Erstellungsaufwand ausgewählt werden.

In der folgenden Tabelle 5.1 sind die an der Entwicklung eines mechatronischen Systems beteiligten Disziplinen und deren festzulegende Informationen dargestellt. Daraus ergeben sich Anknüpfungspunkte für die Auswahl der aufwandsreduzierten Modellierungsart.

Tabelle 5.1: Entwicklungsdisziplinen eines mechatronischen Systems sowie Anknüpfungspunkte für die Erstellung eines vereinfachten Modells

Disziplin	Festzulegende Informationen	Anknüpfungspunkte für die (vereinfachte) Modellierung
Mechanik	Mechanischer Aufbau des Systems, Auslegung von Abmessungen und verwendeten Komponenten	Funktionale Unterteilung in Module, Modellierung der Topologie des Systems, Erfassung der Abmessungen von Komponenten
Elektrik/ Elektronik	Informations- und Signalflüsse, (typischerweise kabelgebunden) übertragen zwischen Aktoren und Sensoren sowie der Software-Steuerung	Verknüpfung von Sensoren und Aktoren mit der Steuerungssoftware über die Adresse des I/O-Anschlusses
Software	Architektur der Steuerungssoftware, dabei werden Ein- und Ausgangssignale in Softwarekomponenten verarbeitet. Softwarekomponenten können voneinander abhängig sein	Verknüpfung der angeschlossenen Aktoren und Sensoren über die Signalliste mit Softwarekomponenten. Das Steuerungsprogramm und seine Struktur können statisch analysiert werden

Die Bestandteile des Modells des Automatisierungssystems werden zusammenfassend in Abbildung 5.1 dargestellt.

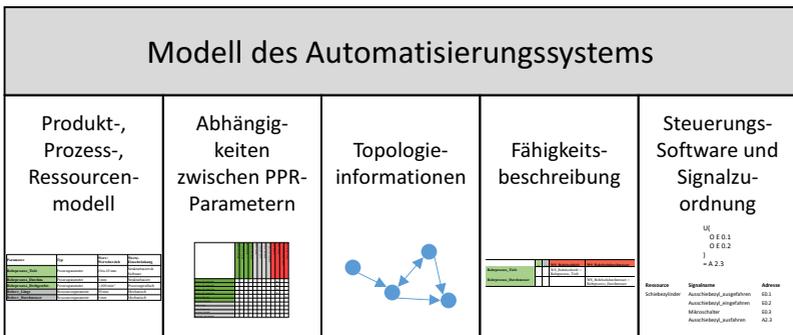


Abbildung 5.1: Bestandteile des Modells des Automatisierungssystems

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile des Modells erläutert und jeweils am vereinfachten Beispiel einer Bohrstation veranschaulicht.

5.1.1.1 Produkt-, Prozess-, Ressourcenmodell

Für die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen (PPR) sollte das Modell zunächst diese drei Elementtypen ebenfalls berücksichtigen. Im Informationsmodell der PPR-Elemente müssen die einzelnen Elemente sowie deren charakteristische Eigenschaften (z.B. Abmessungen, Leistungskennzahlen etc.) mit ihren jeweiligen Ausprägungen als PPR-Parameter erfasst werden. Die Ausprägung bzw. Wertebereiche der PPR-Parameter können dabei sowohl von der Mechanik oder der Software abhängen, als auch strukturbasierten oder prozessspezifischen Einschränkungen unterworfen sein.

Beispiel Bohrstation: Zur Beschreibung des in der Bohrstation vorhandenen Bohrers (technische Ressource), der den technischen Prozess „Bohren“ durchführt, können unter anderem die in Tabelle 5.2 dargestellten Parameter verwendet werden. Der Bezug zum bearbeiteten Produkt wird in Kapitel 5.1.1.4 beschrieben.

Tabelle 5.2: Ausgewählte PPR-Parameter für das Beispiel "Bohrstation"

Parameter	Typ	Wert / Wertebereich	Werte-Einschränkung
Bohrprozess_Tiefe	Prozessparameter	0 bis 45 mm	Strukturbasiert & Software
Bohrprozess_Durchmesser	Prozessparameter	6 mm	Strukturbasiert
Bohrprozess_Drehgeschwindigkeit	Prozessparameter	1.600 min ⁻¹	Prozessspezifisch
Bohrer_Länge	Ressourcenparameter	50 mm	Mechanisch
Bohrer_Durchmesser	Ressourcenparameter	6 mm	Mechanisch

5.1.1.2 Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern

Neben der Definition der PPR-Parameter des Systems müssen im Modell Abhängigkeiten zwischen den PPR-Parametern definiert werden, um später eine Auswirkungsanalyse von Änderungen eines bestimmten Parameters durchführen zu können. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, eignen sich Multiple Domain Matrizen zur grafischen Darstellung solcher Abhängigkeiten zwischen Elementen unterschiedlichen Typs und werden daher an dieser Stelle verwendet, in der in [HFMW17] beschriebenen qualitativen Ausprägung.

Beispiel Bohrstation: Der Ressourcenparameter *Bohrer_Länge* besitzt eine limitierende Abhängigkeit zum Prozessparameter *Bohrprozess_Tiefe*. Die Tiefe ist weiterhin durch die Steuerungssoftware eingeschränkt, die den Bohrer um maximal 45mm absenken kann. Der Ressourcenparameter *Bohrer_Durchmesser* entspricht dem Prozessparameter *Bohrprozess_Durchmesser*, allerdings besitzt er zeitgleich eine Abhängigkeit mit dem

Prozessparameter *Bohrprozess_Geschwindigkeit*. In der folgenden Tabelle 5.3 sind diese Abhängigkeiten qualitativ in Form einer Multiple Domain Matrix dargestellt. In Kapitel 6.1.2.2 wird näher auf die Modellierung der Abhängigkeiten sowie auf verschiedene Typen von Abhängigkeiten eingegangen.

Tabelle 5.3: Multiple Domain Matrix mit Abhängigkeiten zwischen Prozess- und Ressourcenparametern

Parameter	PP_Tiefe	PP_Durchm.	PP_Geschw.	RP_Länge	RP_Durchm.
Bohrprozess_Tiefe (PP_Tiefe)				x	
Bohrprozess_Durchmesser (PP_Durchm.)			x		x
Bohrprozess_Drehgeschwindigkeit (PP_Geschw.)		x			x
Bohrer_Länge (RP_Länge)	x				
Bohrer_Durchmesser (RP_Durchm.)		x	x		

5.1.1.3 Topologieinformationen

Für eine vereinfachte Modellierung des Aufbaus des Systems kann die Mechanik des Automatisierungssystems funktional in Module (im Folgenden „funktionale Einheit“ genannt) unterteilt werden. Diese funktionalen Einheiten sind durch Materialflussprozesse miteinander verbunden, welche von Materialflussressourcen (z.B. Förderbänder, Greifersysteme etc.) durchgeführt werden. Sowohl die Materialflussressourcen als auch der von diesen ausgeführte Materialflussprozess können analog durch PPR-Parameter und ihre Abhängigkeiten beschrieben werden.

Beispiel Bohrstation: Im Fall der betrachteten Anlage wird das Werkstück nach dem Bohrprozess von der Bohrstation mit einem Förderband zur funktionalen Einheit „Bohrlochprüfung“ transportiert. Das Förderband kann beispielsweise durch die Ressourcenparameter *Förderband_Länge* und *Förderband_Breite* beschrieben werden.

5.1.1.4 Fähigkeitsbeschreibung

Um Änderungen am Produkt durch Prozesse (sowohl Bearbeitungsprozesse als auch Materialflussprozesse) beschreiben zu können, muss eine Fähigkeitsbeschreibung vorliegen, die angibt, in welcher Art und Weise der Prozess Änderungen am Produkt vornimmt. Zudem kann

die Fähigkeit des Prozesses von bestimmten (Vor-)Bedingungen abhängen, die definiert werden können.

Beispiel Bohrstation: Der Bohrer besitzt mithilfe des durchgeführten Bohrprozesses die Fähigkeit ein Loch mit einer definierten Tiefe und einem definierten Durchmesser in das Werkstück (WS) einzubringen. Dies kann als Veränderung von Produktparametern durch den Prozess modelliert werden. Als Vorbedingung des Prozesses Bohren kann beispielsweise definiert werden, dass das Produkt in einer bestimmten Ausrichtung beim Bohrer ankommen muss, also beispielsweise zuvor um 90° gedreht wurde und dass das Werkstück noch kein Bohrloch besitzen darf. Zudem kann als Bedingung festgelegt werden, dass die Produktparameter *WS_Bohrlochtiefe* und *WS_Bohrlochdurchmesser* nach Durchführung des Prozesses Bohren einen größeren Wert annehmen müssen als zuvor. Eine Darstellung dieser Fähigkeitsbeschreibung und Vorbedingungen ist in Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.4: Erweiterung der MDM um die Fähigkeitsbeschreibung des Prozesses

	WS_Bohrlochtiefe	WS_Bohrlochdurchmesser
Bohrprozess_Tiefe			WS_Bohrlochtiefe = Bohrprozess_Tiefe	
Bohrprozess_Durchmesser				WS_Bohrlochdurchmesser = Bohrprozess_Durchmesser

Tabelle 5.5: (Vor-)Bedingungen für den Prozess Bohren (Legende: x: Wert des Parameters vor Durchführung des Prozesses; y: Wert des Parameters nach der Durchführung des Prozesses)

	WS_Bohrlochtiefe	WS_Bohrlochdurchmesser	WS_Ausrichtung
Bohren	$x = 0, y > x$	$x = 0, y > x$	$x = 90^\circ$

5.1.1.5 Steuerungssoftware und Signalzuordnung

Die Ein- und Ausgangssignale der Steuerung sind jeweils mit einer Ressource (Aktor oder Sensor) physikalisch verbunden. Die physikalischen Adressen der Anschlüsse an der Steuerung können daher jeweils einer bestimmten Ressource zugeordnet werden. Da die Modularität aus mechanischer Sicht im Regelfall nicht dem Aufbau der Steuerungssoftware entspricht [VoKe14], muss bei Änderungen von Ein- und Ausgangssignalen analysiert werden, welche Softwarekomponenten von Änderungen bestimmter Signale betroffen sind. Da die Steuerungssoftware ohnehin in maschinenlesbarer Form vorliegt, kann diese zur statischen Analyse des Steuerungsprogrammes verwendet werden und stellt damit ebenfalls einen Teil der vom Assistenzsystem genutzten Anlageninformationen dar.

Beispiel Bohrstation: Die Sensoren und Aktoren der Bohrstation sind an eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) angeschlossen. Hierfür werden die Signale A3.0 und A3.1 für das Absenken bzw. Anheben des Bohrers und A3.2 für das Rotieren des Bohrkopfs verwendet. Zudem signalisieren verschiedene Endschalter mit den Adressen E5.4 bis E5.7 den Stand der Absenkung des Bohrers. Über statische Code-Analyse des Steuerungsprogramms kann ermittelt werden, dass alle Signale des Bohrers im Funktionsbaustein FB31 („Bohrersteuerung“) verwendet werden, die Eingangssignale zudem noch in Funktion FC2 („Signal-Logging“).

5.1.2 Produktionsanfrage

Nachdem in Kapitel 5.1.1 das Modell des Automatisierungssystems und seiner Fähigkeiten beschrieben wurde, muss nun auch das mithilfe des Automatisierungssystems zu fertigende Produkt in Form einer Produktionsanfrage beschrieben werden. Um die automatisierte Überprüfbarkeit der Produktionsanfrage zu gewährleisten, muss eine Gegenüberstellung von Produktionsanfrage und Modell des Automatisierungssystems möglich sein. Durch Verwendung des PPR-Prinzips wird bereits implizit der Zusammenhang zwischen dem gewünschten Produkt und dem dafür notwendigen Prozess bzw. der notwendigen Prozesse berücksichtigt.

Eine Darstellungsform des PPR-Prinzips stellt die Formalisierte Prozessbeschreibung dar, die in der Richtlinie [VDI3682] beschrieben wird. Mithilfe der Formalisierten Prozessbeschreibung können Eingangs-, Zwischen- und Ausgangsprodukte anhand ihrer Eigenschaften (Produktparameter mit jeweiliger Wertausprägung) beschrieben werden. Zwischen dem Eingangs- und Ausgangsprodukt eines Prozessschritts liegt jeweils ein Prozess, dessen Anforderungen an die Prozessparameter sich aus der Differenz der Produktparameter von Eingangs- und Ausgangsprodukt ergeben [HHF18].

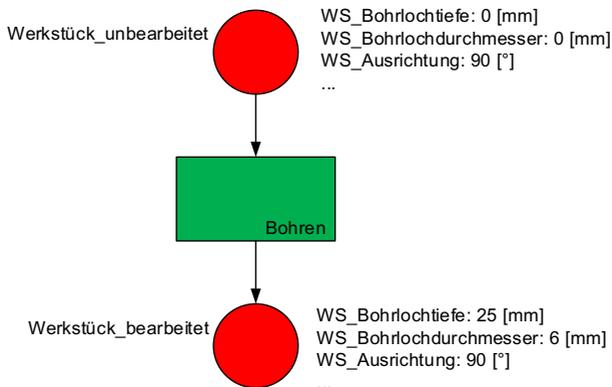


Abbildung 5.2: Formalisierte Prozessbeschreibung des Prozessschritts "Bohren"

Abbildung 5.2 greift erneut das zuvor behandelte Beispiel des Bohrens auf. Anhand der Differenz der Produktparameter ergibt sich, dass der Parameter *WS_Bohrlochtiefe* durch den Prozess „Bohren“ einen Wert von 25 mm annimmt, der Parameter *WS_Bohrlochdurchmesser* einen Wert von 6 mm. Der algorithmische Ablauf der Prüfung der Erfüllbarkeit dieser Produktionsanfrage wird in Kapitel 5.2.2 näher beschrieben.

5.1.3 Domänenspezifisches Wissen

Domänenspezifisches Wissen wird auf zweierlei Weise ins Assistenzsystem integriert:

- Modellierungstechnisch über das zur Erstellung des Anlagenmodells verwendete Metamodell (vgl. Kapitel 5.1.1), welches die Besonderheiten von mechatronischen Systemen in der diskreten Fertigung berücksichtigt
- Algorithmisch in Form von Abläufen und Regeln, die dem Vorgehen der menschlichen Domänenexperten entsprechen bzw. entsprechende Zusammenhänge bei der automatisierten Verarbeitung des Modells des Automatisierungssystems berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.2)

Das domänenspezifische Wissen bildet die Grundlage des Assistenzsystems. In Kapitel 5.3 wird später dargestellt, wie das domänenspezifische Wissen in die Architektur des Agentensystems einfließt.

5.1.4 Erfahrungswissen

Erfahrungswissen muss aufgrund seiner Relevanz nach Anforderung A2 „Möglichkeit der Integration von Erfahrungswissen“ im Assistenzsystem integrierbar sein. Erfahrungswissen in diesem Kontext kann wiederum in zwei Typen unterteilt werden:

- Projektspezifisches Erfahrungswissen, z.B. Wissen über tatsächlich aufgetretene Aufwände und den Erfolg einer Modernisierungsmaßnahme (Abgleich mit erwartetem Ergebnis)
- Domänenspezifisches Erfahrungswissen, z.B. Wissen über Prinziplösungen für eine bestimmte Klasse an Problemen

Die Integration beider Typen von Erfahrungswissen in das Assistenzsystem wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

5.1.4.1 Projektspezifisches Erfahrungswissen (Aufwandsabschätzung)

Aufwände entstehen bei Änderungen von Mechanik, Elektronik und der Software. Da die Kosten im Rahmen der Kosten-/Nutzenanalyse berücksichtigt werden müssen, werden die erwarteten Kosten im Vorfeld eines Projekts geschätzt. Die Schätzung basiert dabei häufig auf der expertenbasierten Analogiebetrachtung mit ähnlichen, bereits abgeschlossenen Projekten.

Dieses Vorgehen kann mithilfe der Methode des fallbasierten Schließens automatisiert angewendet werden. Bei diesem maschinellen Lernverfahren werden bereits gelöste Fälle in einer zentralen Fallbasis (Wissensbasis) gespeichert. Die in der Wissensbasis gespeicherten Fälle bestehen aus einer Problembeschreibung sowie der Lösung des Falls. Wird nun die Lösung für ein neues Problem gesucht, wird in der Wissensbasis nach ähnlichen Fällen gesucht. Deren Lösung kann wiederverwendet und ggf. angepasst werden. Nach Bekanntwerden der tatsächlichen Lösung wird diese dem Fall hinzugefügt und in der Wissensbasis abgelegt.

Bezogen auf die Problemstellung der Modernisierungsplanung müssen Kriterien für die Problembeschreibung festgelegt werden, um das Verfahren des fallbasierten Schließens anwenden zu können.

Bei Änderungen der Mechanik können Kenngrößen wie die Anzahl auszutauschender Komponenten, sowie deren Zugänglichkeit als Parameter zur Ähnlichkeitsbestimmung zweier Modernisierungsmöglichkeiten erfasst werden. Änderungen an der Elektronik sind im Regelfall mit Anpassungen der Steuerungssoftware verknüpft. Hier lässt sich neben der Anzahl der geänderten Ein-/Ausgangssignale der Steuerung auch die Verwendung der entsprechenden Signale innerhalb der Steuerungssoftware analysieren. Mithilfe von Verfahren der statischen Code-Analyse können Softwagemetriken automatisiert ermittelt werden, die beispielsweise die Komplexität oder den Umfang der betroffenen Softwarebestandteile beschreiben. Innerhalb des Informationsmodells des Assistenzsystems wird ein Fall also beispielsweise durch die in Abbildung 5.3 gezeigten Kenngrößen charakterisiert. Durch die fortwährende Pflege der Wissensbasis nimmt das Wissen des Systems über geschätzte und tatsächliche aufgetretene Aufwände zu, wodurch das Assistenzsystem lernfähig wird.

Mechanische Änderung: Bohrer tauschen		Softwareänderung: Flexible Bohrtiefe	
Entfernte Komponenten	2	Entfernte Eingangssignale	0
Hinzugefügte Komp.	2	Hinzugefügte Eingangssign.	3
Zugänglichkeit	einfach	Betroffene POE	FB31, FC2
Werkzeugeinsatz	Spezial- werkzeug	Metrik Zyklomatische Komplexität	13
...	...	Metrik Wartbarkeitsindex	52
Geschätzter Aufwand	1h
Tatsächlicher Aufwand	2h	Geschätzter Aufwand	5h
		Tatsächlicher Aufwand	5h

Abbildung 5.3: Beispielhafte Fälle der Wissensbasis für mechanische Änderungen sowie für Softwareänderungen

5.1.4.2 Domänenspezifisches Erfahrungswissen (Prinziplösungen)

Die Verwendung von Prinziplösungen ist bereits in unterschiedlichen Anwendungsfeldern verbreitet [RiFa14]. Dabei handelt es sich um eine durch ihre Eigenschaften eindeutig definierte abstrakte Lösung(smöglichkeit) für einen bestimmten Typ von Problemstellung. Prinziplösungen sind bei der Modernisierungsplanung stark von der jeweiligen Domäne geprägt und werden daher in dieser Arbeit dem domänenspezifischen Erfahrungswissen zugeordnet. Im Assistenzsystem werden Prinziplösungen ebenfalls hinterlegt, um diese bei der Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten berücksichtigen zu können. Prinziplösungen können beispielsweise die Verwendung eines Universalgreifers für die Handhabung unterschiedlich geformter Werkstücke sein oder die Verwendung eines Schrittmotor-Linearantriebs zur kontinuierlich einstellbaren Bewegung entlang einer Achse (z.B. zur Regelung der Bohrtiefe).

5.2 Methodischer Ablauf der Phasen des Modernisierungsplanungsprozesses

In diesem Unterkapitel wird der methodische Ablauf der einzelnen Phasen des Modernisierungsplanungsprozesses beschrieben und gezeigt, wie eine Unterstützung des Planungsprozesses basierend auf den in Kapitel 5.1 beschriebenen Informationsquellen erfolgt.

5.2.1 Phase 0: Erfassung des Ist-Zustands und Modellierung des Automatisierungssystems

Die optionale Phase 0 des Planungsprozesses muss durchlaufen werden, sofern noch kein Modell des Automatisierungssystems existiert. Das Ziel dieser Phase besteht daher im Aufbau des projektspezifischen Modells des Automatisierungssystems gemäß Kapitel 5.1.1.

Auch wenn die hierzu notwendige Datenerfassung manuell erfolgen muss, so kann das Assistenzsystem den Ablauf der Datenerfassung durch Vorschläge strukturieren. So können beispielsweise zunächst Topologieinformationen abgefragt werden, um das Automatisierungssystem in funktionale Einheiten (später auch Stationen genannt) zu unterteilen. Anschließend werden die Prozesse und die damit verknüpften technischen Ressourcen innerhalb der funktionalen Einheiten vom Benutzer erfragt und deren Eigenschaften in Form von Parametern festgelegt.

Weiterhin ist es durch Verwendung von Wiederverwendungskonzepten möglich, häufig auftretende Ressourcen und Prozesse und deren charakteristische Parameter sowie die Abhängigkeiten zwischen diesen Parametern in einer Bibliothek zur Verfügung zu stellen. Somit muss der Anwender nur noch die tatsächliche Ausprägung der Parameter ermitteln, wird aber hinsichtlich der Modellierungstiefe und der typischerweise modellierten Eigenschaften unterstützt. Selbstverständlich steht es dem Anwender frei, zusätzlich weitere Parameter in die

Modellierung einfließen zu lassen. Der Anwender kann somit zu weiten Teilen selbst über die gewünschte Granularität des Anlagenmodells entscheiden und somit den Aufwand zur Erstellung des Modells beeinflussen. In Kapitel 7.3.5 werden die Ergebnisse der Evaluierung hinsichtlich der Detailtiefe diskutiert.

Zusammenfassend lässt sich zu dieser Phase anmerken, dass der methodische Ablauf, um zum Modell des Automatisierungssystems zu gelangen, weitgehend freigestellt ist. Durch das Assistenzsystem werden allerdings Leitlinien vorgegeben, um eine strukturierte Modellerstellung zu gewährleisten, beispielsweise in Form von Vorschlägen.

5.2.2 Phase 1: Überprüfung des Modernisierungsbedarfs

Die Überprüfung des Modernisierungsbedarfs basiert auf dem in Phase 0 erstellten Modell des Automatisierungssystems, das einer vom Anwender eingegebenen Produktionsanfrage gegenübergestellt wird. Der Ablauf der Überprüfung ist in Abbildung 5.4 in Form eines Aktivitätsdiagramms dargestellt.

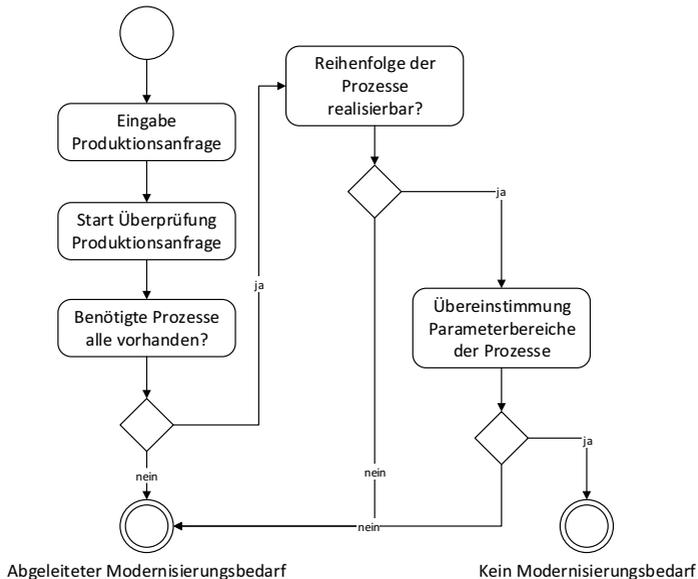


Abbildung 5.4: Aktivitätsdiagramm für die Überprüfung des Modernisierungsbedarfs

Nach Eingabe der Produktionsanfrage, in der der Anwender die (Zwischen-)Produkte sowie deren Eigenschaften und die zur Fertigung benötigten Prozessschritte definiert, kann die Überprüfung der Anfrage gestartet werden. Dabei wird zunächst anhand des Modells des Automatisierungssystems und der Fähigkeitsbeschreibung überprüft, ob die zur Fertigung des

Produkts benötigten Prozesse überhaupt im Automatisierungssystem vorhanden sind. Im Beispiel aus Kapitel 5.1 (vgl. Abbildung 5.2) würde also geprüft werden, ob ein Prozess vorhanden ist, der in der Lage ist, die Produktparameter *WS_Bohrlochtiefe* und *WS_Bohrlochdurchmesser* zu verändern. Dies kann mithilfe der Fähigkeitsbeschreibung abgeleitet werden, da der Prozess Bohren dies erfüllt. Zudem werden die Vorbedingungen des entsprechenden Prozesses bzw. der entsprechenden Prozesse überprüft. Für den Fall, dass das Automatisierungssystem die Fähigkeit, den benötigten Prozess durchzuführen, nicht besitzt, kann die Integration eines Prozesses mit der entsprechenden Fähigkeit als Modernisierungsbedarf abgeleitet werden.

War die Prüfung auf das Vorhandensein der benötigten Prozesse erfolgreich, wird mithilfe der Topologieinformationen geprüft, ob die Reihenfolge der Prozesssequenz realisierbar ist. Da Topologieinformationen als gerichteter Graph vorliegen, kann dies mit graphentheoretischen Verfahren überprüft werden. Falls die Prüfung zu einem negativen Ergebnis führt, können die nichtexistierenden Kanten im Topologie-Graph als Modernisierungsbedarf identifiziert werden.

Ist die Prozesssequenz hingegen realisierbar, wird im letzten Schritt dieser Phase geprüft, ob die Parameterbereiche der Prozesse mit den sich aus den in der Produktionsanfrage definierten Produktparametern ergebenden Anforderungen übereinstimmen. Dabei muss die Prüfung sowohl für Bearbeitungsprozesse als auch für Materialflussprozesse, die lediglich für die Handhabung des Werkstücks zwischen den Bearbeitungsprozesse zuständig sind, überprüft werden. Diese Überprüfung findet mithilfe der im PPR-Modell definierten Parameter und deren Wertebereichen statt.

Im zuvor betrachteten Beispiel der Bohrstation würde die Überprüfung der Parameterbereiche ergeben, dass die Prozessparameter die sich aus den Produktparameteränderungen ergebenden Anforderungen (vgl. Abbildung 5.2) erfüllen. Sowohl der Prozessparameter *Bohrprozess_Tiefe* als auch der Prozessparameter *Bohrprozess_Durchmesser* sind geeignet, um das gewünschte Produkt *Werkstück_bearbeitet* herzustellen. Im Falle dieser Produktionsanfrage würde das Ergebnis der Phase „Kein Modernisierungsbedarf“ lauten, das Produkt könnte also wie gewünscht produziert werden und der Ablauf des Assistenzsystems wäre an dieser Stelle abgeschlossen.

Daher wird für die Betrachtung der folgenden Phasen die Produktionsanfrage leicht modifiziert, um aufgrund des nun nicht mehr realisierbaren Parameters *WS_Bohrlochdurchmesser* (9 mm statt 6 mm) einen Modernisierungsbedarf zu erhalten, der in den folgenden Phasen näher untersucht werden muss. Die modifizierte Produktionsanfrage ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Aus Tabelle 5.2 ergibt sich, dass die Einschränkung des verletzten Prozessparameters *Bohrprozess_Durchmesser* „strukturbasiert“ ist. Diese Information kann in der folgenden Phase verwendet werden, um geeignete Modernisierungsmöglichkeiten für den identifizierten Modernisierungsbedarf zu generieren.

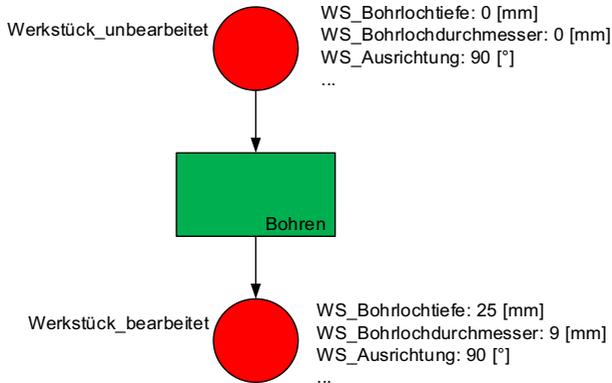


Abbildung 5.5: Modifizierte Produktionsanfrage mit Modernisierungsbedarf

5.2.3 Phase 2: Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten

Die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten basiert auf dem in Phase 1 identifizierten Modernisierungsbedarf. Hierbei kann es grundsätzlich auch mehrere Bedarfe geben, sofern diese unabhängig voneinander festgestellt werden konnten. Im Fall, dass ein Prozess mit der benötigten Fähigkeit nicht zur Verfügung steht, besteht die Modernisierungsmöglichkeit darin, einen Prozess mit der entsprechenden Fähigkeit in das Automatisierungssystem zu integrieren. Die Feinplanung dieser Tätigkeit kann vom Assistenzsystem mithilfe des vorliegenden Modells des Automatisierungssystems nicht unterstützt werden, da dieses für eine digitale Planung nicht detailliert genug ist.

Sind bestimmte Materialflüsse nicht möglich oder stimmen die Parameterbereiche der Prozessparameter nicht mit den sich aus der Produktionsanfrage ergebenden Anforderungen überein, bestehen zwei unterschiedliche Möglichkeiten, um Modernisierungsmöglichkeiten generieren zu können, wie Abbildung 5.6 zeigt:

- **Prüfung auf Vorhandensein einer Prinziplösung (Erfahrungswissen):** Sofern eine Prinziplösung für den abgeleiteten Modernisierungsbedarf existiert, kann diese als Modernisierungsmöglichkeit verwendet werden, beispielsweise ein flexibles Greifersystem zur Handhabung von Werkstücken frei im Raum anstelle eines starren Förderbandes.
- **Untersuchung der Beeinflussungsmöglichkeiten des betroffenen Parameters:** Aus den in der MDM modellierten Abhängigkeiten zwischen Prozessparametern und Ressourcenparametern kann darauf geschlossen werden, welche Möglichkeiten zur Veränderung des betroffenen Prozessparameters bestehen. Hierzu wird vom Assistenzsystem das maßgeblich von Herrn Hoang entwickelte und in [HFMW17] veröffentlichte Konzept genutzt, das an dieser Stelle nicht weiter vertieft wird.

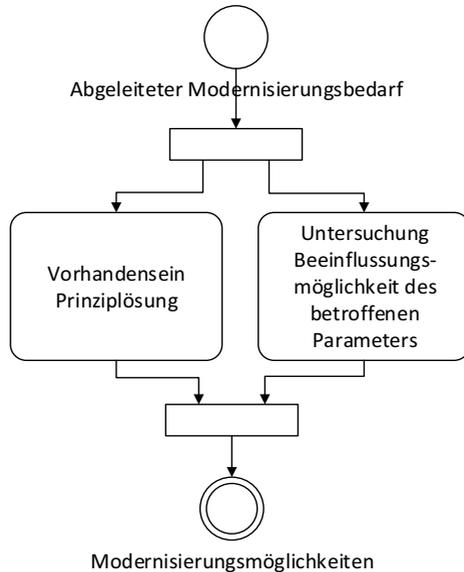


Abbildung 5.6: Aktivitätsdiagramm für die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten

Beide Aktivitäten können parallel zueinander durchgeführt werden und ergeben in Summe die potenziellen Modernisierungsmöglichkeiten, die automatisiert vom Assistenzsystem generiert werden können.

Beispiel Bohrstation: Um den Produktparameter *WS_Bohrlochtiefe* auf 9 mm zu erhöhen, muss der Prozessparameter *Bohrprozess_Durchmesser* vergrößert werden. Dieser besitzt einen positiv korrelierten Zusammenhang mit dem Ressourcenparameter *Bohrer_Durchmesser*, der daher zur Änderung des Prozessparameters vergrößert werden muss. An dieser Stelle ist lediglich eine quantitative Aussage über den Zusammenhang beider Parameter möglich. Eine Prinziplösung ist für diesen Fall nicht vorhanden. Denkbar wäre, „Fräsen“ als Prinziplösung für Bohrvorgänge mit großem Bohrlochdurchmesser im Assistenzsystem zu hinterlegen.

5.2.4 Phase 3: Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten

Die dritte Phase des Modernisierungsplanungsprozesses besteht aus zwei Schritten, die zur Bewertung der zuvor generierten Modernisierungsmöglichkeiten notwendig sind. Zunächst wird eine Auswirkungsanalyse der gefundenen Möglichkeiten durchgeführt, bevor durch Interaktion des Assistenzsystems mit dem Anwender eine Bewertung von Aufwänden und sich ergebender Flexibilität durchgeführt wird. Abbildung 5.7 zeigt den Ablauf dieser Phase.

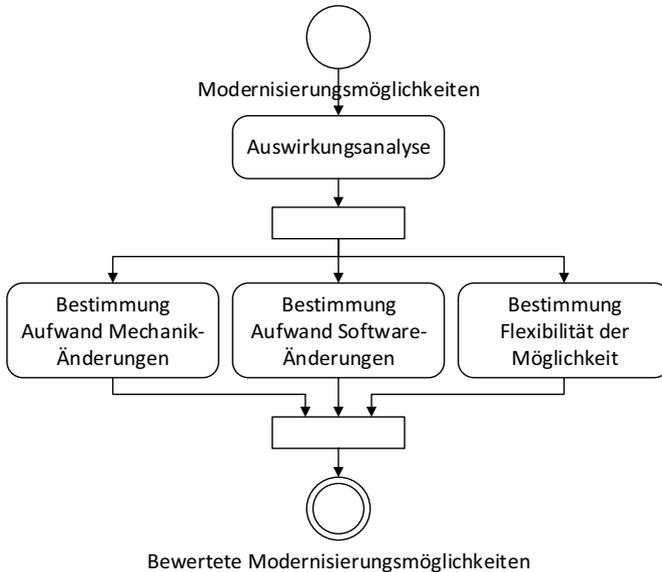


Abbildung 5.7: Aktivitätsdiagramm für die Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten

5.2.4.1 Auswirkungsanalyse

Aufgrund der in der Multiple Domain Matrix modellierten Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern kann nach dem in [HFMW17] beschriebenen Konzept vom Assistenzsystem eine Auswirkungsanalyse durchgeführt werden. Ausgehend von dem bzw. den in Phase 1 identifizierten zu ändernden Prozessparameter(n) und den in Phase 2 ermittelten Möglichkeiten dies über die Veränderung von Ressourcenparametern zu erreichen, kann die Fortpflanzung der Parameteränderung über die Betrachtung der Abhängigkeiten der jeweiligen PPR-Parameter erfolgen. Dabei können sich die Auswirkungen der Änderung eines Parameters grundsätzlich über mehrere Ebenen hinweg fortpflanzen. Es ist allerdings auch zu beachten, dass aufgrund der ausschließlich qualitativen Modellierung der Abhängigkeiten diese nicht immer zwangsläufig eintreffen müssen, sondern von nichtmodellierten Faktoren abhängen können. Jedoch kann das Assistenzsystem den Anwender auf potenzielle Zusammenhänge hinweisen und dieser kann anschließend anhand der ihm vorliegenden Informationen selbst entscheiden, ob die Abhängigkeit relevant ist und sich eine Änderung daher auf andere PPR-Parameter auswirkt. Das Ergebnis der Auswirkungsanalyse lässt sich in Form von Baumgraphen mit den zu ändernden Produktparametern als Wurzelemente darstellen. An dieser Stelle sei für weitere Informationen zum Algorithmus der Auswirkungsanalyse und zur Darstellungsform des Ergebnisses auf die Veröffentlichung [HFMW17] verwiesen. Die Umsetzung der Auswirkungsanalyse und die Darstellung des Ergebnisses im Assistenzsystem sind weiterhin in Kapitel 6.1 beschrieben.

5.2.4.2 Bestimmung des Aufwands von Mechanik-Änderungen

Der Aufwand mechanischer Änderungen bestimmt sich aus der Summe des Aufwands für das Entfernen und Hinzufügen aller zu ändernden Komponenten. Je nachdem, wie gut zugänglich die Komponente ist und wie einfach deren Modifikation ist, kann der Aufwand des Entfernens und Hinzufügens stark schwanken. Da im Modell des Automatisierungssystems hierüber keine Informationen enthalten sind, müssen diese Informationen vom Benutzer abgefragt werden. Das Assistenzsystem erfragt die fehlenden Informationen für jede zu verändernde Komponente vom Benutzer, angelehnt an das Konzept aus [DYN00]. Für verschiedene Kriterien (Zugänglichkeit, benötigtes Werkzeug, Kraftaufwand etc.) mit jeweils eigener Skala kann der Benutzer seine Einschätzung für die Änderung der jeweiligen Komponente abgeben.

Der Aufwand ist mithilfe der so erfassten Informationen nicht absolut ermittelbar, allerdings ergeben sich Kenngrößen für die einzelnen Kriterien und Komponenten, die zum Vergleich mehrerer Modernisierungsmöglichkeiten herangezogen werden können.

Denkbar ist es, die ermittelten Kenngrößen zur analogiebasierten Aufwandsabschätzung (vgl. Kapitel 5.2.4.3 zur Bestimmung des Aufwands von Software-Änderungen) zu verwenden, zum Beispiel unter Verwendung fallbasierten Schließens oder in Anlehnung an aus der Softwareaufwandsabschätzung bekannte Functional Size Measurement-Verfahren. Allerdings wurden diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht für die Abschätzung mechanischer Änderungen untersucht, sodass diese Interpretation der ermittelten Kenngrößen als Ausblick der Arbeit zu sehen ist.

5.2.4.3 Bestimmung des Aufwands von Software-Änderungen

Der Änderungsaufwand der Software ergibt sich aus den im Steuerungsprogramm durchzuführenden Änderungen. Diese können das Hinzufügen und Entfernen von im Programm verwendeten Ein- und Ausgangssignalen beinhalten, beispielsweise beim Anschließen oder Entfernen von Aktoren und Sensoren. Obligatorisch bei einer Software-Änderung ist jedoch die Anpassung des Steuerungsprogramms selbst, entweder um neue Ein- und Ausgangssignale auch innerhalb des Programms zu verwenden und/oder um das funktionale Verhalten des Programms anzupassen.

Um eine Änderung am Steuerungsprogramm vorzunehmen, muss der bestehende Programmcode zunächst analysiert und verstanden werden, um die Stellen zu lokalisieren, die einer Anpassung bedürfen. Dabei sind schlechte Dokumentation des Programms sowie die Verwendung schwer nachvollziehbarer Programmiersprachen (z.B. Anweisungsliste) in der Praxis eine häufig auftretende Schwierigkeit. Hinzu kommt, dass innerhalb des Programms zahlreiche Abhängigkeiten existieren können, wenn beispielsweise von mehreren Programmbestandteilen lesend und schreibend auf globale Variablen zugegriffen wird. Die unterschiedliche Sprachhöhe

der fünf in [IEC61131-3] definierten SPS-Programmiersprachen stellt eine zusätzliche Herausforderung für den Programmierer dar.

Im Gegensatz zu Hardware-Änderungen ergibt sich bei Software-Änderungen allerdings durch das Vorliegen des Steuerungsprogramms in digitaler Form ein Vorteil für die Aufwandsabschätzung durch das Assistenzsystem. Durch statische Analyse des Programmcodes kann dieser strukturell und inhaltlich analysiert werden, was Aufschluss über mögliche Änderungsaufwände geben kann. Das grundsätzliche Vorgehen bei der Analyse und der anschließenden Aufwandsabschätzung ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Dieser Ablauf wird für jede zuvor ermittelte Modernisierungsmöglichkeit durchlaufen.

Ausgehend von den zuvor identifizierten Modernisierungsmöglichkeiten wird für diese jeweils analysiert, welche Ressourcen potenziell von einer Softwareänderung betroffen sind. Diese Ressourcen können durch die Verletzung ihres Software-beschränkten Prozess- oder Ressourcenparameterwertebereichs (vgl. Kapitel 5.1.1.1) identifiziert werden. Anschließend kann mithilfe der Signalzuordnung im Modell des Automatisierungssystems (vgl. Kapitel 5.1.1.5) ermittelt werden, welche Ein- und Ausgangssignale mit der betroffenen Ressource verknüpft sind.

Parallel dazu kann das Steuerungsprogramm vom Assistenzsystem eingelesen und statisch analysiert werden. Die Analyse kann dabei sowohl das Gesamtprogramm als auch einzelne Programmbestandteile (bei Speicherprogrammierbaren Steuerungen auch Programmorganisationseinheiten - POE - genannt) betreffen. Anschließend können die (physikalischen) Adressen der ermittelten Ein- und Ausgangssignale über die Symboltabelle mit den programminternen Bezeichnern verknüpft werden und so die Zuordnung der Ressource zu allen POE, die Ein- und Ausgangssignale derselben verwenden, hergestellt werden. Für diese POE können anschließend, mithilfe der automatisierten Anwendung von Softwaremetriken, Vergleichsparameter für das fallbasierte Schließen gewonnen werden (vgl. Aufbau der Wissensbasis in Kapitel 5.1.4.1). Details zur Übertragung von aus der klassischen Softwaretechnik bekannten Metriken auf SPS-Programme können [Thie16] entnommen werden.

Über Anwendung des fallbasierten Schließens wird die Ähnlichkeit des vorliegenden Falls mit bereits abgeschlossenen Fällen mit bekannter Lösung ermittelt und das Ergebnis dem Benutzer angezeigt. Dieser kann die Ergebnisse des Vergleichs sowie die entstandenen Aufwände der Fälle einsehen und sich für die Übernahme einer Schätzung entscheiden. Dabei besteht die Möglichkeit, die Schätzung manuell durch den Benutzer anzupassen, sofern dieser aufgrund der vorliegenden Kontextinformationen Abweichungen in der Schätzung für wahrscheinlich hält. Als Ergebnis dieses Ablaufs erhält das Assistenzsystem die Aufwandsabschätzung der Softwareänderung als absoluten Wert.

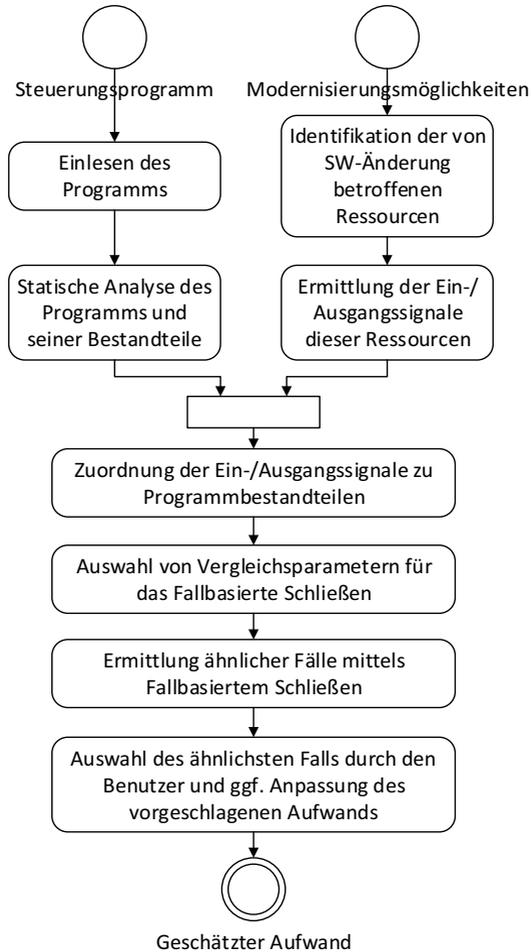


Abbildung 5.8: Aktivitätsdiagramm für die Software-Aufwandsabschätzung

5.2.4.4 Bestimmung der Flexibilität einer Änderungsmöglichkeit

Die Flexibilität von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung kann aufgrund der Vieldimensionalität des Begriffs nicht als einzelne Größe ermittelt werden, weshalb sich Klassifikationen von Teilflexibilitäten (z.B. [SeSe90]) sowie bestimmte Darstellungsformen (z.B. Richtlinie [VDI5201]) etabliert haben.

Es würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit übersteigen, eine allgemeingültige Metrik für alle relevanten Teilflexibilitäten sowie die zugehörige Darstellungsform zu entwickeln. Allerdings ist

es für den Entscheidungsprozess bei der Modernisierungsplanung von Bedeutung, Vergleichskriterien heranzuziehen, um den Nutzen einer Modernisierungsmöglichkeit abschätzen zu können.

Das Assistenzsystem übernimmt daher die Ermittlung von Vergleichskriterien, sowohl quantitativ als auch qualitativ. Eine quantitative Bestimmung ist beispielsweise dann möglich, wenn der Wertebereich eines Parameters verändert wird. Dabei lassen sich vom Assistenzsystem sowohl die absoluten Werte der Grenzen des Wertebereichs ermitteln, als auch die Breite des sich ergebenden Korridors vor und nach der Modernisierung. Durch diesen Vergleich kann die Auswirkung der Modernisierung auf einzelne PPR-Parameter bewertet werden. Eine qualitative Bestimmung ist beispielsweise bei der Verwendung von Prinziplösungen möglich, wo die grundsätzliche Flexibilität einer Prinziplösung bereits bei deren Hinterlegung in der Informationsbasis gespeichert werden kann.

5.2.5 Phase 4: Entscheidung

Im Anschluss an die Bewertung der generierten Modernisierungsmöglichkeiten werden diese Informationen vom Assistenzsystem aggregiert und dem Anwender des Assistenzsystems mit den hierzu ermittelten Details angezeigt. Neben dem grundsätzlich erkannten Modernisierungsbedarf gehört hierzu eine Beschreibung der Änderung, das Ergebnis der Auswirkungsanalyse auf andere Systemelemente sowie die in Kooperation mit dem Benutzer ermittelten Kenngrößen für Aufwand und Nutzen der jeweiligen Modernisierungsmöglichkeit. Diese Übersicht enthält somit detaillierte Informationen zur Modernisierungsmöglichkeit, die vom Anwender als Entscheidungsgrundlage genutzt werden können. Das Assistenzsystem bereitet Informationen dabei sowohl textuell als auch graphisch auf, soweit dies möglich ist.

Da zur Erfüllung der vom Anwender anfangs eingegebenen Produktionsanfrage mehrere Modernisierungsmöglichkeiten existieren können, erlaubt das Assistenzsystem neben der detaillierten Darstellung einer Möglichkeit zusätzlich den Vergleich zweier Modernisierungsmöglichkeiten. Hierbei werden die Vorschläge in sämtlichen Details gegenübergestellt, um dem Anwender die Erkennung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden zu erleichtern.

Die Entscheidung für eine der präsentierten Modernisierungsmöglichkeiten fällt der Anwender außerhalb des Assistenzsystems und kann hierzu weitere Kontextinformationen berücksichtigen, die in den unterschiedlichen Wissensquellen des Assistenzsystems nicht enthalten sind. Die Entscheidung für eine der Modernisierungsmöglichkeiten teilt der Anwender dem Assistenzsystem allerdings mit, damit dieses nach erfolgter Implementierung (Phase 5 – hier nicht weiter betrachtet) den Anwender nach der Bewertung der Entscheidung fragen kann. Der Ablauf von Phase 4 ist in der folgenden Abbildung 5.9 grafisch dargestellt.

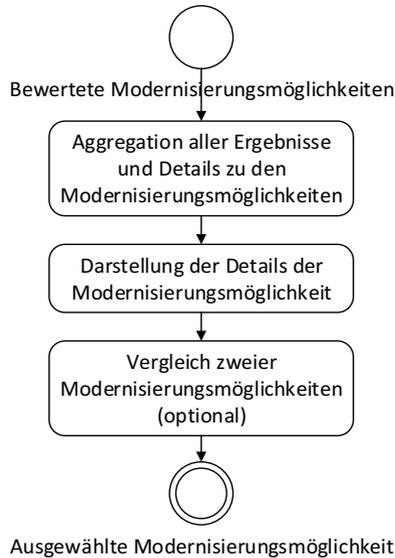


Abbildung 5.9: Aktivitätsdiagramm für die Bereitstellung der Entscheidungsgrundlage

5.2.6 Phase 6: Bewertung der Entscheidung

Die abschließende Phase des Modernisierungsplanungsprozesses folgt auf die an dieser Stelle nicht näher betrachtete Implementierung der Entscheidung (Phase 5), die sich mit der tatsächlichen Änderung des Automatisierungssystems befasst, welche vom Assistenzsystem allerdings nicht unterstützt werden kann (vgl. Kapitel 4).

Bei der Bewertung der Entscheidung steht die Verfügbarmachung des während der Planung entstandenen Wissens über tatsächlich aufgetretene Aufwände und den Erfolg der implementierten Modernisierungsmöglichkeit im Vordergrund. Der Anwender stellt dem Assistenzsystem nach Abschluss der Implementierung die erfassten Aufwände für Änderungen an der Mechanik und der Software getrennt zur Verfügung, darüber hinaus die Information, ob die Modernisierung in der geplanten Form erfolgreich war oder nicht. Über die Verwendung eines Freitextfelds besteht darüber hinaus die Möglichkeit, während der Durchführung der Modernisierung gewonnenes Wissen, personenunabhängig für künftige Modernisierungsvorhaben zur Verfügung zu stellen. Bezogen auf den Zyklus des fallbasierten Schließens sorgt diese Datenerfassung in Phase 6 dafür, dass die Wissensbasis und damit das Erfahrungswissen des Assistenzsystems stetig wächst.

Der in diesem Kapitel beschriebene methodische Ablauf kombiniert bestehende Ansätze zur Unterstützung der einzelnen Phasen des Modernisierungsprozesses und zeigt auf, wie eine durchgängige Unterstützung mithilfe des zuvor beschriebenen Informationsmodells erreicht werden kann. Im folgenden Kapitel 5.3 wird dargestellt, wie Informationsmodell und methodischer Ablauf in einem Agentensystem abgebildet werden können.

5.3 Architektur des Agentensystems

In diesem Unterkapitel wird beschrieben, wie das in Kapitel 5.1 vorgestellte Modellierungsverfahren sowie der methodische Ablauf zur Unterstützung der Planung von Modernisierungsmöglichkeiten architektonisch auf ein Agentensystem übertragen werden. Beim Entwurf der Architektur des Agentensystems wurden die Charakteristiken von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung berücksichtigt, was zunächst in Kapitel 5.3.1 in Form von Architekturentscheidungen diskutiert wird. Anschließend folgt in Kapitel 5.3.2 eine Beschreibung der Agententypen sowie der Rollen, welche diese Agenten in den unterschiedlichen Phasen des Modernisierungsplanungsprozesses einnehmen. Abschließend wird das funktionale Verhalten des Agentensystems anhand eines exemplarischen Sequenzdiagramms in Kapitel 5.3.3 dargestellt und die Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit der Architektur in Kapitel 5.3.4 diskutiert.

5.3.1 Architekturentscheidungen

In diesem Unterkapitel werden die bei der Architektur des agentenbasierten Assistenzsystems getroffenen Entwurfsentscheidungen aufgeführt und erläutert.

Integration des Vorgehens von Domänenexperten

Automatisierungssysteme in der diskreten Fertigung sind als mechatronische Systeme von Interdisziplinarität geprägt. Mechanik und Software sind im Zusammenspiel entscheidend dafür, dass das System die ihm zugeordnete Aufgabe erfüllt, Elektrik/Elektronik sorgen dabei insbesondere für die Verknüpfung der entwickelten Artefakte der beiden zuvor genannten Disziplinen. Neben Bearbeitungsprozessen, die eine Veränderung des Werkstücks bezwecken, besitzt ein Automatisierungssystem Hilfsprozesse, beispielsweise zur Bewerksstellung des Materialflusses.

Bei der Modernisierungsplanung wird das Vorgehen und Fachwissen verschiedener Domänen benötigt, beispielsweise bei der Untersuchung von Software- oder Mechanikänderungen, der Untersuchung von Auswirkungen einer Änderung auf andere Systemteile oder zur Nutzen- und Aufwandsabschätzung von Änderungen. Aus diesem Grund wurde Architekturentscheidung 1 wie folgt getroffen: Das Vorgehen der verschiedenen am Modernisierungsprozess beteiligten Domänenexperten wird von jeweils einem entsprechenden Agententyp vertreten.

Unterschiede in der Modularität von Software und mechanischem Aufbau

Weiterhin spiegeln sich die unterschiedlichen Disziplinen auch bei der Betrachtung der Modularität des Systems wider. Während der mechanische Aufbau des Automatisierungssystems meist durch die örtliche Nähe funktional zusammengehöriger Elemente geprägt ist, was im Folgenden als „funktionale Einheit“ bezeichnet wird, erfolgt die Steuerung des Automatisierungssystems im Regelfall durch eine zentrale Steuerung, die mehrere funktionale Einheiten steuert. Dabei entspricht der Aufbau der Steuerungssoftware in der Praxis meist nicht der Struktur der im System vorhandenen funktionalen Einheiten. Daher wird Architekturentscheidung 2 wie folgt getroffen: Jede funktionale Einheit wird durch einen Agenten vertreten und jeder Steuerungscontroller wird ebenfalls durch einen Agenten repräsentiert. Die Agenten der funktionalen Einheiten wissen, welcher Controller für sie zuständig ist. Über die bekannten Ein- und Ausgangssignale der funktionalen Einheiten kann eine entsprechende Zuordnung zum Controller und in das jeweilige Steuerungsprogramm hergestellt werden.

Berücksichtigung des Materialflusses

Auch der Materialfluss innerhalb des Automatisierungssystems wird durch funktionale Einheiten (Förderbänder, Greifer, Rundschaltschleife etc.) durchgeführt, welche im Assistenzsystem dezentral von einem entsprechenden Agenten vertreten werden. Die Topologieinformationen über den Materialfluss werden zur leichteren Überprüfbarkeit von Produktionsanfragen allerdings nicht dezentral in den Agenten der funktionalen Einheiten hinterlegt, sondern an zentraler Stelle verwaltet. Architekturentscheidung 3: Materialfluss-Topologieinformationen werden in einem zentralen Topologieagenten gespeichert, der somit das Wissen über alle im Automatisierungssystem möglichen Materialflussverbindungen besitzt.

Kommunikation mit dem Anwender

Über die Benutzerschnittstelle des Agentensystems nimmt der Anwender Eingaben im Assistenzsystem vor und erhält die vom Assistenzsystem ermittelten und aufbereiteten Ergebnisse angezeigt. Darüber hinaus besteht über die Benutzungsschnittstelle für das Assistenzsystem die Möglichkeit, dass es gezielt fehlende Informationen vom Anwender erfragt. In diesem Zusammenhang wurde Architekturentscheidung 4 getroffen: Sämtliche Kommunikation mit dem Anwender erfolgt über einen dedizierten Agenten. Dies bietet den Vorteil, dass die Agenten innerhalb des Agentensystems verteilt gestartet werden können und bei Bedarf den auf dem Rechner des Anwenders angesiedelten Agenten mit der Darstellung einer Oberfläche beauftragen können.

5.3.2 Agentenrollen und Agententypen

In diesem Kapitel werden die gemäß der Gaia-Methode [WJK00] identifizierten Agentenrollen zusammengefasst vorgestellt sowie gezeigt, wie diese Rollen gemäß der in Kapitel 5.3.1 getroffenen Architekturentscheidungen einem Agententypen zugewiesen wurden.

Die Übersicht der Agentenrollen kann Tabelle 5.6 entnommen werden. Dabei wird jeweils aufgezeigt, welche Informationen aus Kapitel 5.1 von der Rolle verwendet werden und in welcher Phase gemäß Kapitel 5.2 die Rolle aktiv ist.

Tabelle 5.6: Übersicht der Agentenrollen

Rollenname	Beschreibung	Verwendete Informationen	Phase
Plant Modeller	Ermöglicht dem Anwender die Erstellung des Modells des Automatisierungssystems, um dem Assistenzsystem alle benötigten Informationen bereit zu stellen	PPR-Modell, Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern, Topologieinformationen, Steuerungssoftware und Signalzuordnung	0
Agent Instantiator	Instanziert alle für den Start des Agentensystems notwendigen Agenten mit den entsprechenden Informationen	Alle in Phase 0 erzeugten Modellinformationen	0-1
Product Request Analyzer	Analysiert die Erfüllbarkeit der gegebenen Produktionsanfrage und identifiziert Modernisierungsbedarf	Produktionsanfrage, Abfrage der Anlageninformationen von den entsprechenden Rollen	1-2
Topology Representator	Repräsentiert die Materialfluss-Topologieinformationen und stellt diese anderen Rollen bereit	Topologieinformationen	1-2
Software Controller Representator	Repräsentiert einen Steuerungscontroller und die auf ihm laufende Steuerungssoftware	Steuerungssoftware und Signalzuordnung	1-3
Functional Entity Representator	Repräsentiert eine funktionale Einheit und stellt anderen Agenten entsprechende Informationen bereit	PPR-Modell, Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern, Fähigkeitsbeschreibung	1-3
Modernization Option Representator	Repräsentiert die Daten einer Modernisierungsmöglichkeit	Informationen zur Modernisierungsmöglichkeit, Prinziplösungen	2-4
Modernization Option Analyzer	Analysiert die Auswirkungen einer Modernisierungsmöglichkeit auf andere Systemelemente	Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern	3

Rollenname	Beschreibung	Verwendete Informationen	Phase
Flexibility Analyzer	Analysiert die Flexibilität einer Modernisierungsmöglichkeit	PPR-Modell und Daten der Modernisierungsmöglichkeit	3
Software Effort Analyzer	Analysiert die Aufwände einer Softwareänderung	Steuerungssoftware und Signalzuordnung, Erfahrungswissen zu Aufwänden	3
Hardware Effort Analyzer	Analysiert die Aufwände einer Hardwareänderung	Abfrage benötigter Informationen beim Benutzer	3
Information Requester	Fragt benötigte Informationen beim Anwender ab und gibt diese an die anfragende Rolle zurück	-	3
Result Visualizer	Zeigt dem Anwender das Ergebnis der Produktionsanfrage an und stellt ermittelte Modernisierungsmöglichkeiten dar	Informationen zur Modernisierungsmöglichkeit inklusive Bewertung von Aufwänden und Nutzen	4
Software Effort Evaluater	Ermöglicht dem Anwender das Nachtragen des tatsächlichen Aufwands	Erfahrungswissen zu Aufwänden	6

Gemäß den getroffenen Entwurfsentscheidungen und anhand inhaltlicher Nähe der Agentenrollen erfolgte die Zuweisung der Rollen zu den in Abbildung 5.10 dargestellten Agententypen. Dabei handelt es sich teilweise um 1-zu-1-Beziehungen zwischen Rolle und Agententyp, einige Agententypen nehmen allerdings im Laufe des Planungsprozesses unterschiedliche Rollen ein.

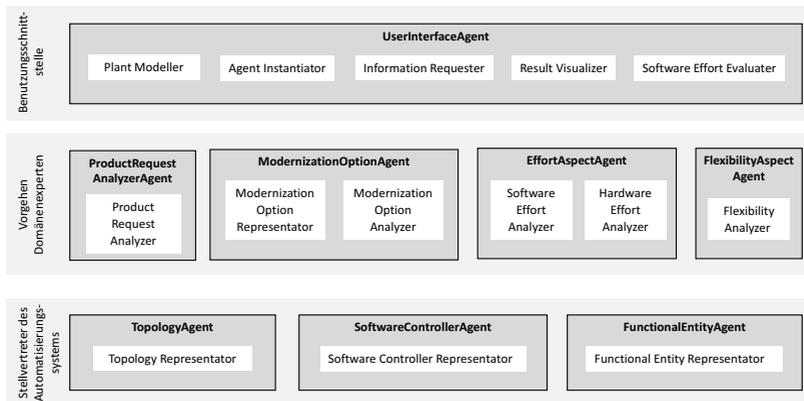


Abbildung 5.10: Agententypen und die von ihnen vertretenen Rollen

Die Agententypen lassen sich dabei wie in Abbildung 5.10 gezeigt in 3 Kategorien einteilen. Der *UserInterfaceAgent* nimmt als einziger Vertreter der Benutzungsschnittstelle vielfältige Aufgaben im System wahr und ist dabei in allen Phasen aktiv, die nicht vollautomatisiert ablaufen. Die Abbildung des Vorgehens der verschiedenen Domänenexperten bei der Planung des Modernisierungsprozesses in einem Agenten stellt die zweite Kategorie dar. Die darin eingeordneten Agenten unterstützen den Planungsprozess algorithmisch und durch die Kommunikation mit Agenten der dritten Kategorie, den Stellvertretern des Automatisierungssystems. Diese Stellvertreter repräsentieren jeweils ausgewählte Aspekte des Automatisierungssystems und stellen die Informationen des von Ihnen vertretenen Aspekts anderen Agenten zur Verfügung. Bei der Ausführung des Assistenzsystems werden Agenten eines Typs teilweise mehrfach instanziiert, die Zuordnung ist in Tabelle 5.7 dargestellt.

Tabelle 5.7: Anzahl der instanziierten Agenten je Agententyp

Agententyp	Anzahl	Bemerkung
UserInterfaceAgent	1	
ProductRequestAnalyzerAgent	1	
TopologyAgent	1	
SoftwareControllerAgent	$[1, \infty)$	Je ein Agent pro Steuerung
FunctionalEntityAgent	$[1, \infty)$	Je ein Agent pro funktionaler Einheit
ModernizationOptionAgent	$[0, \infty)$	Je ein Agent pro Modernisierungsmöglichkeit
EffortAspectAgent	1	
FlexibilityAspectAgent	1	

Während des Ablaufs des Agentensystems ergeben sich dabei die in Abbildung 5.11 gezeigten Kommunikationspfade zwischen den Agenten. Hierauf wird im folgenden Unterkapitel 5.3.3 noch detaillierter eingegangen.

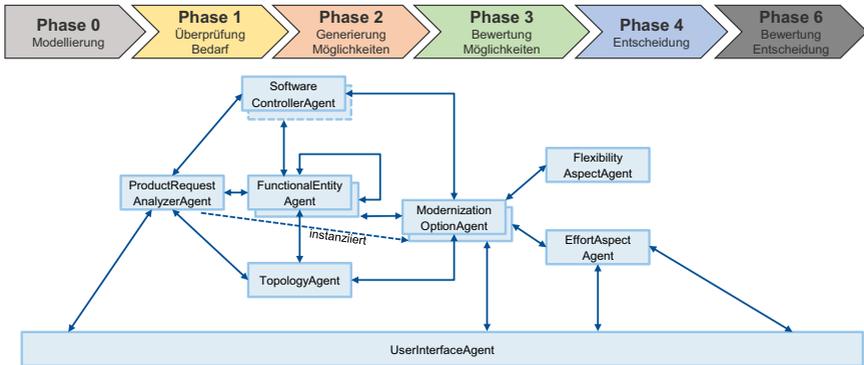


Abbildung 5.11: Agentenarchitektur des Assistenzsystems

5.3.3 Funktionales Verhalten des Agentensystems

In diesem Unterkapitel wird der Ablauf des vom Agentensystem unterstützten Planungsvorgangs dargestellt und die Kommunikationswege zwischen den Agenten aufgezeigt. Abbildung 5.12 visualisiert eine beispielhafte Kommunikationsabfolge zwischen den beteiligten Agenten, die im Folgenden detailliert beschrieben wird.

Zum Start des Agentensystems wird der *UserInterfaceAgent* initialisiert, der dem Anwender die Möglichkeit bietet, ein neues Anlagenmodell zu erstellen oder ein bestehendes Modell zu laden und dieses ggf. zu bearbeiten. Ist die Erstellung bzw. die Bearbeitung des Anlagenmodells abgeschlossen, instanziiert der *UserInterfaceAgent* sämtliche Agenten, die als Stellvertreter des Automatisierungssystems agieren (*TopologyAgent*, *SoftwareControllerAgent(en)* und *FunctionalEntityAgent(en)*) und übergibt ihnen die für sie relevanten Informationen aus dem Anlagenmodell. Weiterhin instanziiert er den *ProductRequestAnalyzerAgent*, der dem Anwender die Eingabe einer Produktionsanfrage ermöglicht.

Nach Eingabe der Produktionsanfrage durch den Benutzer kann dieser den Analysevorgang starten. Dabei wird zunächst vom *ProductRequestAnalyzerAgent* beim *TopologyAgent* angefragt, welche Prozesse innerhalb des Automatisierungssystems vorhanden sind und welche Fähigkeiten diese besitzen, um Produktparameter zu verändern. Mithilfe der erhaltenen Informationen zu Prozessen und deren Fähigkeitsbeschreibung prüft der *ProductRequestAnalyzerAgent*, ob alle benötigten Prozesse innerhalb des Automatisierungssystems vorhanden sind. Ist dies nicht der Fall, wird die Integration des fehlenden Prozesses als Modernisierungsbedarf identifiziert. Anschließend wird durch eine Anfrage des *ProductRequestAnalyzerAgenten* beim *TopologyAgent* überprüft, ob die geforderte Reihenfolge der Prozesse realisierbar ist. Auch bei dieser Überprüfung kann, bei negativem Ergebnis, ein Modernisierungsbedarf abgeleitet werden, welche Prozessfolge ermöglicht werden müsste, um die Produktionsanfrage erfüllen zu können. Zuletzt

wird vom *ProductRequestAnalyzerAgent* bei allen von der Produktionsanfrage benötigten *FunctionalEntityAgenten* angefragt, ob der jeweilige Prozess die Anforderungen der Produktionsanfrage erfüllt oder ob eine Verletzung von Parameterwertebereichen vorliegt.

Anschließend werden in Phase 2 vom *ProductRequestAnalyzerAgent* Modernisierungsmöglichkeiten erzeugt. Hierfür prüft dieser, ob für den erkannten Modernisierungsbedarf eine Prinziplösung vorhanden und im System hinterlegt ist. Parallel dazu wird geprüft, ob sich die nicht für die Fertigung des Produkts geeigneten Prozessparameter beeinflussen lassen und welchen Typ die Einschränkung dieses Parameters besitzt (mechanisch, strukturbasiert, software- oder prozessspezifisch). Dies geschieht durch Kommunikation mit den *FunctionalEntityAgenten*, welche die in der MDM gespeicherten Informationen über PPR-Parameterabhängigkeiten beinhalten. Mit diesen Informationen wird pro ermittelter Modernisierungsmöglichkeit ein *ModernizationOptionAgent* erzeugt.

Die *ModernizationOptionAgenten* führen anschließend die Auswirkungsanalyse der von ihnen vertretenen Modernisierungsmaßnahme durch, indem sie bei den *FunctionalEntityAgenten* die Abhängigkeiten der zu ändernden Parameter anfragen. Zur Bestimmung des Aufwands von Hardware- und Software-Änderungen ist die Mitwirkung des Benutzers teilweise erforderlich. Mit dieser Analyse wird der *EffortAspectAgent* von den *ModernizationOptionAgenten* beauftragt. Dieser interagiert mit dem *UserInterfaceAgenten*, um die Informationen gezielt abzufragen. Der *SoftwareControllerAgent* unterstützt dabei, indem er potenziell von der Modernisierung betroffene Programmbestandteile identifiziert (vgl. Kapitel 5.2.4.3). Zur Bewertung des Nutzens einer Modernisierungsmöglichkeit wird der *FlexibilityAspectAgent* vom *ModernizationOptionAgent* beauftragt. Dieser ermittelt den Flexibilitätszuwachs der Modernisierungsmöglichkeit. Alle aggregierten Kennzahlen zu Aufwänden und Nutzen werden von den *ModernizationOptionAgenten* aggregiert und nach Abschluss der Analyse an den *UserInterfaceAgenten* übermittelt.

Der *UserInterfaceAgent* aggregiert die Ergebnisse sämtlicher *ModernizationOptionAgenten* und stellt die Details der Modernisierungsmöglichkeiten in einer grafischen Benutzungsoberfläche dar. Neben den ermittelten Kennzahlen zu Aufwand und Nutzen sind dies insbesondere die Details zur Modernisierungsmöglichkeit selbst sowie die Ergebnisse der Auswirkungsanalyse. Darüber hinaus ermöglicht der *UserInterfaceAgent* den Vergleich zweier Möglichkeiten. Entschieden sich der Anwender für die Umsetzung einer Modernisierungsmöglichkeit, kann er dies dem *UserInterfaceAgenten* mitteilen. Damit ist der Planungsvorgang abgeschlossen und die Modernisierungsmöglichkeit kann im Automatisierungssystem implementiert werden. Nach Abschluss der Implementierung kann über den *UserInterfaceAgent* beim Start des Assistenzsystems der tatsächlich aufgetretene Aufwand für die Änderung nachgetragen werden. Dieser wird anschließend in der Wissensbasis zur Aufwandsabschätzung des Assistenzsystems gespeichert. Damit steht dieses Wissen bei künftigen Modernisierungsplanungen zur Verfügung.

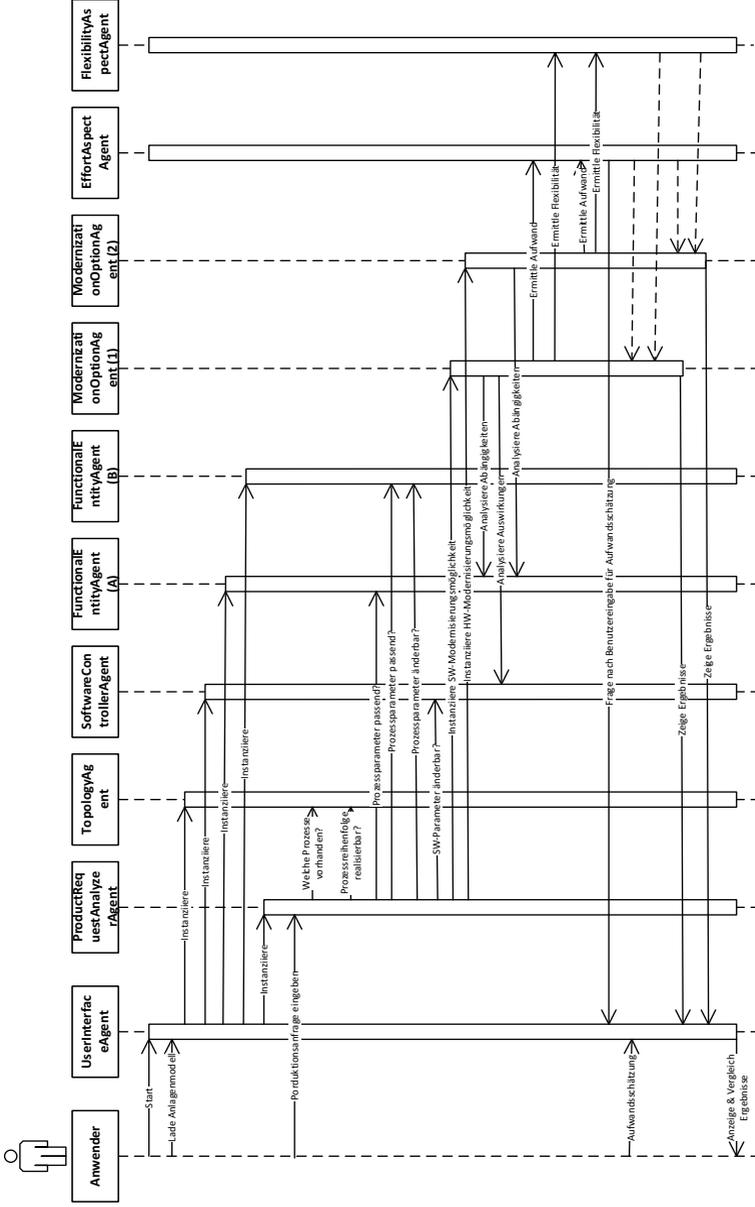


Abbildung 5.12: Sequenzdiagramm der Agentenkommunikation

Die folgende Abbildung 5.13 fasst das Assistenzkonzept zur Modernisierung von Automatisierungssystemen unter Einbeziehung der Informationsquellen, des methodischen Ablaufs und der Architektur des Agentensystems zusammen.

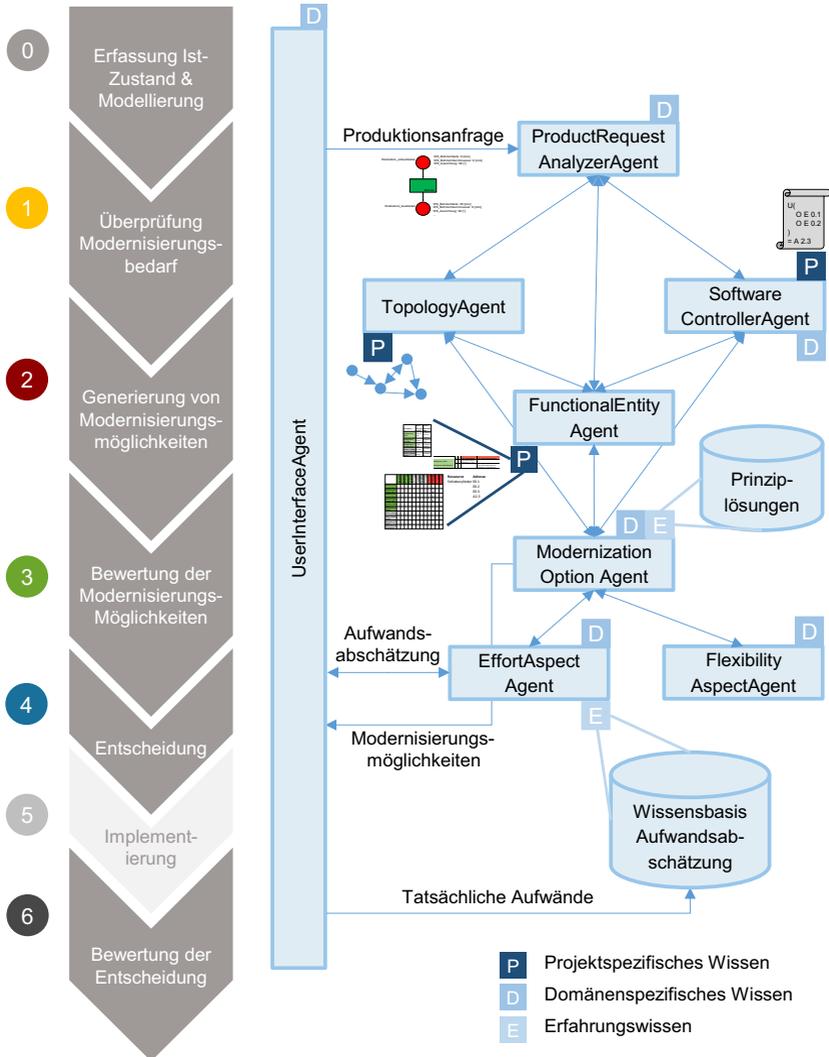


Abbildung 5.13: Zusammenfassung des Assistenzkonzepts zur Modernisierung automatisierter Systeme unter Einbeziehung der Informationsquellen, des methodischen Ablaufs und der Architektur des Agentensystems

5.3.4 Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit der Architektur

In diesem Unterkapitel wird die Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit der in Abbildung 5.11 bzw. Abbildung 5.13 gezeigten Architektur des Assistenzsystems diskutiert. Die Agententypen des Assistenzsystems können, wie bereits in Abbildung 5.10 dargestellt, den folgenden drei Kategorien zugeordnet werden: 1) Stellvertreter des Automatisierungssystems, 2) Domänenexperten und 3) Benutzungsschnittstelle. Diese Trennung kapselt das projektspezifische Wissen in den Agententypen, die als Stellvertreter des Automatisierungssystems agieren. Dadurch ist eine einfache Modifizierbarkeit des projektspezifischen Wissens möglich, zudem erleichtert die Kapselung die Erweiterung bzw. Veränderung der Struktur des Informationsmodells. Da die Kommunikation der Agenten über definierte Schnittstellen erfolgt, ist bei rein internen Anpassungen des Informationsmodells lediglich die Anpassung des betroffenen Agenten notwendig, damit dieser auf Nachrichten anderer Agenten wie zuvor reagieren kann. Bei größeren Eingriffen in das Informationsmodell, beispielsweise eine Ersetzung der qualitativen Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern in Form der Multiple Domain Matrix durch mathematisch exakt beschriebene Gleichungen, müssen neben den Stellvertretern des Automatisierungssystems auch noch diejenigen Agenten angepasst werden, die als Domänenexperten in Berührung mit den Abhängigkeiten kommen. Zudem ist die Anpassung der Agentenkommunikation erforderlich und sofern die Änderung Auswirkung auf die Benutzungsschnittstelle besitzt, eine Anpassung derselben.

Eine Erweiterung der Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten ist durch die Integration zusätzlicher Aspektagenten möglich, beispielsweise zur Untersuchung von Auswirkungen auf den Durchsatz des Automatisierungssystems bei verschiedenen Modernisierungsmöglichkeiten. Hierzu ist zusätzlich eine Anpassung des Informationsmodells und/oder eine Anpassung der Benutzungsschnittstelle erforderlich, um auf die zur Untersuchung des Aspekts notwendigen Informationen zugreifen zu können.

Ein Austausch des methodischen Vorgehens in den einzelnen Phasen des Modernisierungsprozesses ist durch eine Änderung der in den Agenten der Kategorie Domänenexperten hinterlegten Algorithmen möglich. Sofern der geänderte Algorithmus mit dem identischen Informationsmodell des Automatisierungssystems arbeitet, ist keine darüberhinausgehende Anpassung der Agentenkommunikation notwendig.

Durch die Aufteilung der Agententypen in die drei zuvor genannten Kategorien kann die grundsätzliche Architektur und die dadurch erzielte Unterstützung eines typischen Entscheidungsprozesses auf ähnliche Planungsproblemstellungen bei Automatisierungssystemen übertragen werden, was als Ausblick dieser Arbeit untersucht werden könnte.

Im folgenden Kapitel 6 wird näher auf die Realisierung des Assistenzkonzepts eingegangen und die Umsetzung in Form eines agentenbasierten Assistenzsystems gezeigt.

6 Realisierung des Assistenzkonzepts

In diesem Kapitel wird die Realisierung des in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellten Assistenzkonzepts mithilfe der beschriebenen Agentenarchitektur in Form eines Assistenzsystems beschrieben. Hierzu wird in Kapitel 6.1 der Aufbau des Assistenzsystems und seiner Bestandteile beschrieben. Ergänzend zum Assistenzsystem wird in Kapitel 6.2 die Realisierung eines SPS-gesteuerten modularen Produktionssystems beschrieben, das zur Veranschaulichung von mechanischen und softwaretechnischen Modernisierungsmaßnahmen genutzt werden kann und zudem in Kapitel 7 im Rahmen einer Fallstudie zur Evaluierung des Assistenzsystems herangezogen wird.

6.1 Realisierung des agentenbasierten Assistenzsystems

Das agentenbasierte Assistenzsystem zur Modernisierungsplanung implementiert die im vorigen Kapitel beschriebene Agentenarchitektur und bildet damit den Ablauf des Assistenzkonzepts ab. Im Folgenden werden Details der Realisierung des Assistenzsystems beschrieben und ausgewählte Oberflächen des Assistenzsystems gezeigt.

6.1.1 Übersicht

Zur Realisierung des Assistenzsystems wurde das Java Agent Development Framework [JADE] verwendet, das als quelloffene Middleware die Implementierung von Software-Agenten in Java erleichtert und zudem FIPA-konforme Kommunikationsmechanismen bereitstellt. Durch die Verwendung von JADE konnten die in Kapitel 5.3.2 beschriebenen acht Agententypen und ihre Kommunikation untereinander in mehreren studentischen Arbeiten realisiert werden [Qu17, Tuul18a, Tuul18b, Yu18, Schw19]. Abbildung 6.1 zeigt den Aufbau des Assistenzsystems sowie die Umsetzung der verschiedenen Bestandteile des Modells des Automatisierungssystems.

Die Bestandteile des Modells des Automatisierungssystems werden dabei teilweise innerhalb des Assistenzsystems verwaltet, da keine geeigneten Softwarewerkzeuge zur Verfügung standen und eine Eigenentwicklung ohnehin notwendig wurde. Dies betrifft das Produkt-Prozess-Ressourcenmodell (vgl. Kapitel 5.1.1.1) sowie die Topologieinformationen (vgl. Kapitel 5.1.1.3). Beide werden durch den in das Assistenzsystem integrierten *PPR Model Manager* erstellt bzw. verwaltet. Zum Austausch dieser Informationen wird das XML-Format verwendet, das nach einem in dieser Arbeit entwickelten Schema aufgebaut ist (vgl. Anhang A). Aufgrund ihres matrizenhaften Aufbaus wird zur Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern (vgl. Kapitel 5.1.1.2) und zur Beschreibung der Fähigkeiten und Vorbedingungen von Prozessen (vgl. Kapitel 5.1.1.4) Microsoft Excel zur Informationsverwaltung verwendet. Die Integration ins Assistenzsystem erfolgt über einen zwischengeschalteten Parser, der die Daten in JSON-Objekte konvertiert. Um die Steuerungssoftware in das Assistenzsystem zu integrieren, wird diese mithilfe

des durch die PLCOpen-Organisation definierten XML-Formats eingelesen, das 2019 auch als IEC-Norm [IEC61131-10] standardisiert wurde. Für SPS-Programme von Siemens-Steuerungen besteht die Möglichkeit, durch TIA Portal Openness ins XML-Format exportierte Steuerungsprogramme einzulesen. Beide Datenformate werden über entsprechende Parser eingelesen, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden.

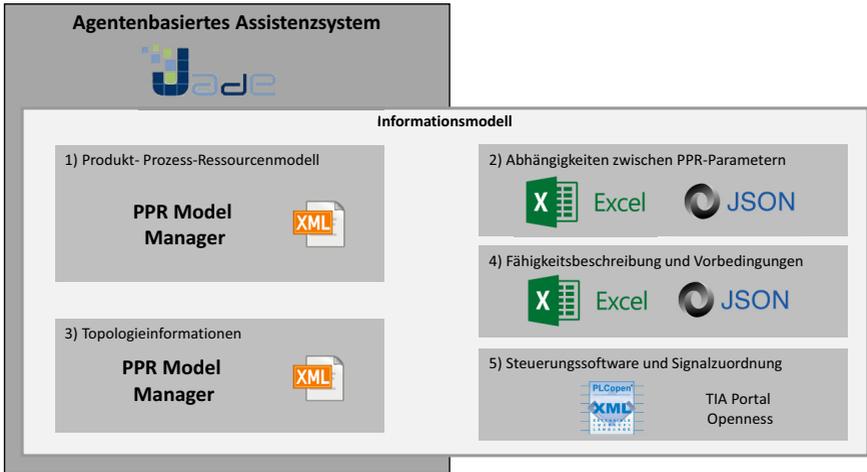


Abbildung 6.1: Aufbau des Assistenzsystems und verwendete Austauschformate der Bestandteile des Informationsmodells

Nähere Informationen zur Realisierung des Informationsmodells sowie zum Funktionsumfang des *PPR Model Managers* sind im folgenden Unterkapitel beschrieben. Der Ablauf des Assistenzsystems nach dem Start ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

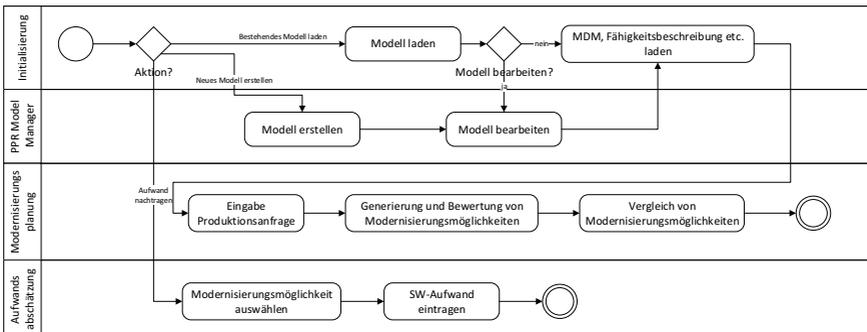


Abbildung 6.2: Flussdiagramm des Assistenzsystems

6.1.2 Realisierung des Informationsmodells

In diesem Unterkapitel wird die Verwaltung der unterschiedlichen Bestandteile des Informationsmodells sowie deren informationstechnische Abbildung innerhalb des Assistenzsystems beschrieben.

6.1.2.1 PPR Model Manager

Der *PPR Model Manager* wurde als eigenständige Software zur Modellierung von Automatisierungssystemen nach dem verwendeten PPR-Prinzip konzipiert, ist aber gleichzeitig vollständig in den Ablauf des Assistenzsystems zur Modernisierungsplanung integriert. Er enthält dabei folgende Funktionen:

- Erstellung eines hierarchischen Modells des Automatisierungssystems mit Stationen, die Bearbeitungs- und Materialflussprozesse enthalten können, welche jeweils von entsprechenden Ressourcen durchgeführt werden
- Verwaltung der Ressourcen- und Prozessparameter des Automatisierungssystems
- Verwaltung der Topologieinformationen des Systems in zwei unterschiedlichen Sichten
- Konsistenzprüfung des erstellten Modells mit den in Microsoft Excel modellierten Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern und Assistenz bei Behebung von Inkonsistenzen
- Unterstützung der Erstellung des Modells durch Bereitstellung einer Prozess- und Ressourcenbibliothek mit häufig verwendeten Elementen und deren Parametern

Im Folgenden wird auf die wichtigsten Funktionen des *PPR Model Managers* näher eingegangen.

Verwaltung der Ressourcen- und Prozessparameter

Nach der Erstellung der Stationen des Automatisierungssystems im *PPR Model Manager* können den Stationen Prozesse und Ressourcen hinzugefügt werden. Diese werden durch verschiedene Eigenschaften beschrieben, die im mittleren Bereich der in Abbildung 6.3 gezeigten Oberfläche verwaltet werden können. Bei Ressourcen ist dies beispielsweise der Name, ein eindeutiger Bezeichner (ID), sowie zugeordnete Ein- und Ausgangssignale der verknüpften Steuerung. Weiterhin können im rechten Bereich der Oberfläche die Parameter der Ressource bzw. des Prozesses verwaltet werden. Hierbei können neben diskreten Werten auch Wertebereiche für einen Parameter angegeben werden sowie der Typ der Einschränkung des Parameters (z.B. durch Software) festgelegt werden. Auch die Angabe mehrerer Wertebereiche mit unterschiedlichen Einschränkungen ist möglich. Die Schnittmenge der angegebenen Wertebereiche ergibt in diesem Fall den tatsächlich nutzbaren Wertebereich des entsprechenden Parameters.

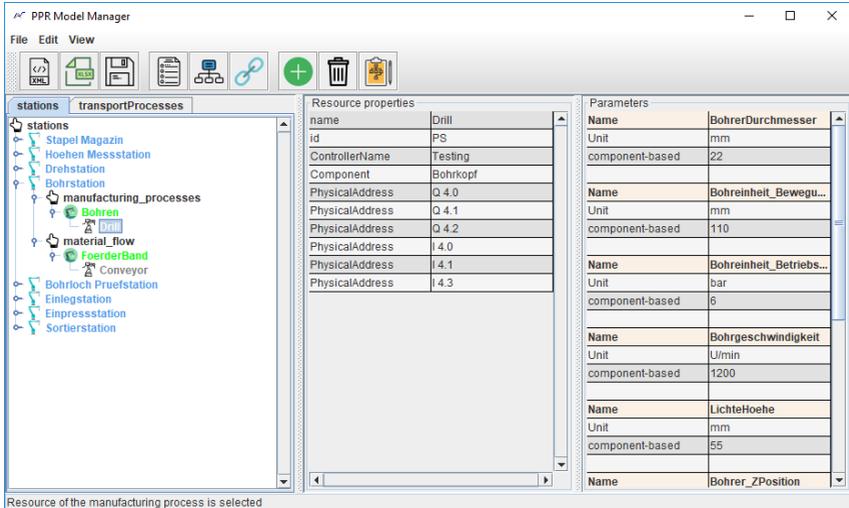


Abbildung 6.3: Verwaltung einer Ressource im PPR Model Manager

Verwaltung der Topologieinformationen des Systems

Um den Materialfluss innerhalb des Automatisierungssystems abzubilden, kann die Topologie durch einen Graphen mit gerichteten Kanten in der grafischen Benutzeroberfläche des *PPR Model Managers* modelliert werden. Dabei sorgen Transportprozesse mit den zugehörigen Transportressourcen für den Materialfluss zwischen verschiedenen Stationen oder zwischen verschiedenen Transportkomponenten, was in Abbildung 6.4 dargestellt ist.

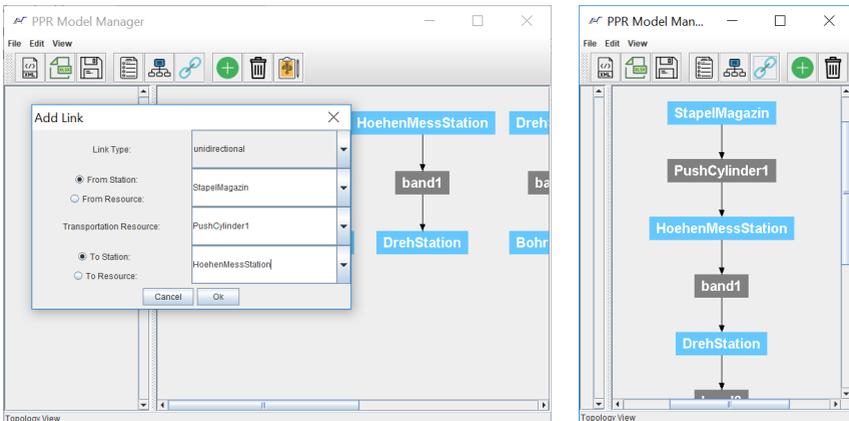


Abbildung 6.4: Verwaltung von Topologieinformationen im PPR Model Manager

Es können sowohl uni- als auch bidirektionale Materialflussverbindungen modelliert werden. Neben der Darstellung als zusammenhängender Materialflussgraph ist zudem eine Aufteilung der Topologie in einzelne Materialflussverbindungen und deren anschließende Bearbeitung möglich.

Konsistenzprüfung des erstellten Modells mit den Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern

Um insbesondere bei umfangreicheren Automatisierungssystemen die Überprüfung der Konsistenz von Stationen, Prozessen, Ressourcen und deren Parametern zu erleichtern, wurde eine entsprechende Überprüfung in den *PPR Model Manager* integriert. Diese liest die in Microsoft Excel erstellten Abhängigkeiten in Form von Multiple Domain Matrizen (vgl. Kapitel 6.1.2.2) ein und überprüft bidirektional, ob entsprechend benannte Stationen, Prozesse, Ressourcen und Parameter im jeweils anderen Modell ebenfalls existieren. Werden Inkonsistenzen entdeckt, werden diese dem Benutzer angezeigt. Sofern in der MDM Parameter erwähnt sind, die im Prozess- und Ressourcenmodell nicht vorhanden sind, können diese automatisiert angelegt werden. Der Benutzer muss anschließend nur noch den konkreten Wert bzw. Wertebereichs des Parameters im *PPR Model Manager* eingeben.

6.1.2.2 Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern

Die Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern erfolgt in Microsoft Excel und folgt dem von Hoang et al. in [HMWF17] beschriebenen Konzept mithilfe von Multiple Domain Matrizen. Es werden quantitative Zusammenhänge zwischen Prozess-, Ressourcen- und Produktparametern modelliert, was beispielhaft in Tabelle 6.1 für die Bohrstation gezeigt wird.

Als Abhängigkeiten können dabei gemäß [HMWF17] sowohl positive (+), negative (-) oder unqualifizierte (●) Korrelationen als auch Restriktionen für die Erhöhung (▲) bzw. Reduzierung (▼) eines Prozessparameters in Abhängigkeit des verknüpften Produktparameters verwendet werden. Das Gleichheitszeichen zwischen Prozess- und Produktparametern gibt an, dass beide Parameter in direktem Zusammenhang stehen, was bei der Überprüfung der Eignung von Prozesseigenschaften zur Fertigung eines Produkts benötigt wird.

Tabelle 6.1: Multiple Domain Matrix mit Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern der Bohrstation

BohrStation	ws_bearbeitbarerDurchmesser_Min	ws_bearbeitbarerDurchmesser_Max	ws_transportierbarerDurchmesser_Min	ws_transportierbarerDurchmesser_Max	ws_Hoeh_Min	ws_Hoeh_Max	ws_Hoeh_Min	ws_Hoeh_Max	ws_Bohrlochtiefe_Min	ws_Bohrlochtiefe_Max	ws_Bohrlochtiefe_Min	ws_Bohrlochtiefe_Max	ws_Bohrlochtiefe_Min	ws_Bohrlochtiefe_Max	ws_BohrlochDurchmesser	ws_Gewicht_Min	ws_Gewicht_Max	Bohrenheitl_Bewegungsstrecke	Bohrenheitl_Betriebsdruck	BohrerLaenge	Bohrer_ZPosition	Bohrgeschwindigkeit	Ablenkblech_Breite	Lichterhoehe	Bandleistung	Bandbreite	ProduktGewicht	ProduktBohrlochDurchmesser	ProduktBohrlochTiefe
ws_bearbeitbarerDurchmesser_Min																													
ws_bearbeitbarerDurchmesser_Max																													
ws_transportierbarerDurchmesser_Min																													
ws_transportierbarerDurchmesser_Max																													
ws_Hoeh_Min																													
ws_Hoeh_Max																													
ws_Hoeh_Min																													
ws_Hoeh_Max																													
ws_Bohrlochtiefe_Min																													
ws_Bohrlochtiefe_Max																													
ws_Bohrlochtiefe_Min																													
ws_Bohrlochtiefe_Max																													
ws_BohrlochDurchmesser																													
ws_Gewicht_Min																													
ws_Gewicht_Max																													
Bohrenheitl_Bewegungsstrecke																													
Bohrenheitl_Betriebsdruck																													
BohrerLaenge																													
Bohrer_ZPosition																													
Bohrgeschwindigkeit																													
Ablenkblech_Breite																													
Lichterhoehe																													
Bandleistung																													
Bandbreite																													

6.1.2.3 Beschreibung der Fähigkeiten und Vorbedingungen von Prozessen

Die Modellierung der Fähigkeiten von Prozessen sowie von deren Vorbedingungen erfolgt ebenfalls in Microsoft Excel in tabellarischer Form. Durch eine Umwandlung der Zusammenhänge in das JSON-Format können diese vom Assistenzsystem eingelesen werden.

```
[
  {
    "Process": "Drehen",
    "produktOrientierung": "x<=y;y>0"
  },
  {
    "Process": "Bohren",
    "produktBohrlochDurchmesser": "x<=y;x>=0;y>0",
    "produktBohrlochTiefe": "x<=y;x>=0;y>0"
  }
]
```

Abbildung 6.5: Auszug aus den Vorbedingungen für die Prozesse Drehen und Bohren

6.1.2.4 Informationstechnische Abbildung des Informationsmodells

Innerhalb des Assistenzsystems wird das zuvor beschriebene Informationsmodell durch die Instanziierung von Java-Objekten abgebildet. Die vereinfachte Klassenstruktur des Informationsmodells des Automatisierungssystems ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Jeder *FunctionalEntityAgent* vertritt dabei eine Station und erhält bei seiner Instanziierung eine Referenz

auf das entsprechende Stations-Objekt, wodurch er auf sämtliche Prozess-, Ressourcen und Parameterinformationen seiner Station zugreifen kann.

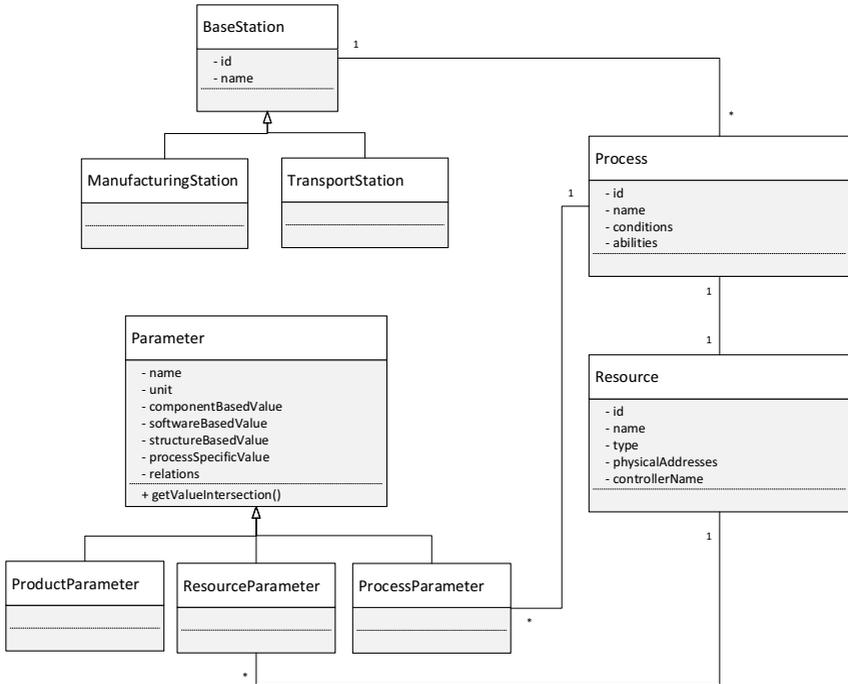


Abbildung 6.6: Klassenstruktur des Modells des Automatisierungssystems

Die Topologieinformationen werden dem *TopologyAgent* übergeben, der den Topologiegraphen als Attribut speichert. Der Pfad zum einzulesenden SPS-Programm wird dem bzw. den *SoftwareControllerAgent(en)* übergeben, die das Steuerungsprogramm mithilfe eines Parsers einlesen.

6.1.3 Eingabe der Produktionsanfrage

Die Eingabe von Produktionsanfragen erfolgt über eine graphische Oberfläche, mit der die Produktionsanfrage in Anlehnung an die Formalisierte Prozessbeschreibung nach VDI-Richtlinie 3682 eingegeben werden kann (Abbildung 6.7). Es müssen lediglich die Produktparameter aller Eingangs-, Zwischen- und Ausgangsprodukte und die Prozessnamen festgelegt werden.

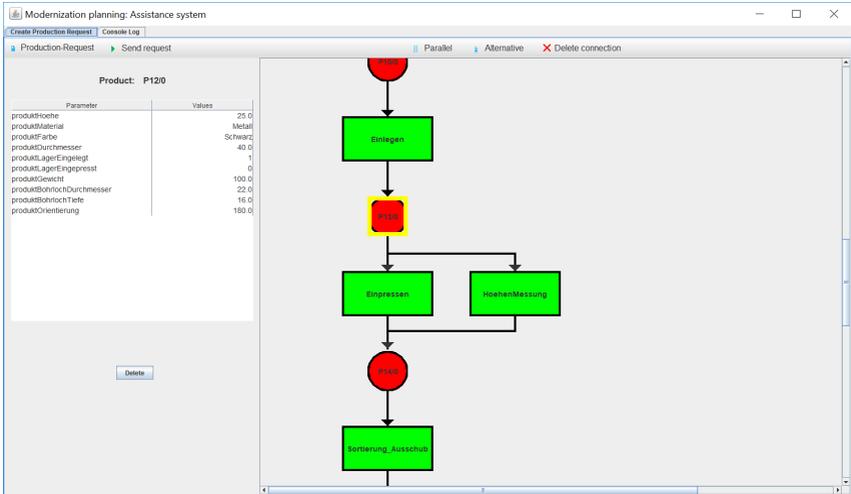


Abbildung 6.7: Eingabe einer Produktionsanfrage in Form der Formalisierten Prozessbeschreibung

Die Modellierung paralleler (beispielsweise in Abbildung 6.7 die Prozesse *Einpressen* und *Hoehenmessung*) sowie alternativer Prozesse ist gemäß der Notation der Formalisierten Prozessbeschreibung möglich. Darüber hinaus lassen sich Produktionsanfragen für die spätere Verwendung abspeichern und in das Assistenzsystem laden.

6.1.4 Generierung und Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten

Die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten erfolgt automatisch durch die in Kapitel 5.3.3 gezeigte Interaktion zwischen den Agenten. Die Auswirkungsanalyse implementiert dabei das maßgeblich von Herrn Hoang im Rahmen des gemeinsamen DFG-Projekts entwickelte und in [HFMW17] beschriebene Verfahren und erzeugt einen Abhängigkeitsgraphen der von einer Modernisierungsmöglichkeit betroffenen Parameter.

Die anschließende Bewertung von Aufwänden, die sich durch die Änderungen der Hardware des Systems ergeben, erfolgt durch den Benutzer, der anhand einer an [DYN00] angelehnten Skala in drei Kriterien eine Einschätzung der Zugänglichkeit der Komponente, der benötigten Werkzeuge sowie der schätzungsweise benötigten Kraft treffen muss (Abbildung 6.8).

Please estimate the effort to replace Bohrkopf, parameter: ws_Bohrlochtiefe_Max

Accessibility: Not Visible, Dual-axis, From below, Deep, XY-axis, Z-axis

Tool required: Improvised, Special, OEM, Mechanic, Air Gun, None

Force required: High-impact (>80 kg, >200 kg), Low-impact (35, 200), Leverage (24, 160), Orthogonal (15, 110), Torsional (7, 70), Axial (2, 60)

next

Abbildung 6.8: Abfrage der Einschätzung von Hardwareänderungsaufwänden beim Benutzer

Bei der Aufwandsabschätzung von softwareseitigen Modernisierungsmöglichkeiten wurde das Prinzip des fallbasierten Schließens implementiert. Dieses ermittelt aufgrund der Ähnlichkeit der aktuellen Problemstellung mit abgeschlossenen Fällen automatisiert potenzielle Lösungen für die aktuelle Problemstellung. Die Ermittlung der Ähnlichkeit zweier Fälle kann dabei durch verschiedene Kriterien erfolgen, die in [MaWe17] näher beschrieben wurden. Da im Modell des Automatisierungssystems nicht alle der in [MaWe17] beschriebenen Informationen vorliegen, wurden bei der prototypischen Integration des Aufwandsabschätzungskonzepts in das Assistenzsystem die Informationen herangezogen, die automatisch erfasst werden können. Hierzu gehören:

- Anzahl der Ein- und Ausgänge der von einer Änderung betroffenen Ressource
- Anzahl der Programmorganisationseinheiten, die diese Ein- und Ausgänge verwenden
- Komplexität und Änderbarkeit dieser Programmorganisationseinheiten, ermittelbar über statische Analyse des Steuerungsprogramms

Durch statische Code-Analyse können aus der klassischen Softwaretechnik bekannte Metriken angewendet werden. Diese mussten für die Anwendung auf SPS-Programme teilweise angepasst werden, um der Heterogenität der Sprachen nach [IEC61131-3] und insbesondere auch den Unterschieden grafischer und textueller Programmiersprachen Rechnung zu tragen. Nähere Informationen zur Anpassung der Software-Metriken auf SPS-Programme sind [Thie16] zu entnehmen.

Folgende Metriken wurden implementiert: Anzahl Operanden, Anzahl Operatoren, Lines of Code, Anteil kommentierter Programmzeilen, Halstead-Metriken, Zyklomatische Komplexität nach McCabe, Wartbarkeitsindex, Tree Impurity und Fan-Out. Abbildung 6.9 zeigt das Ergebnis der Auswertung von Softwaremetriken für SPS-Programme mithilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programms „SPS Analyzer“ [Thie16].

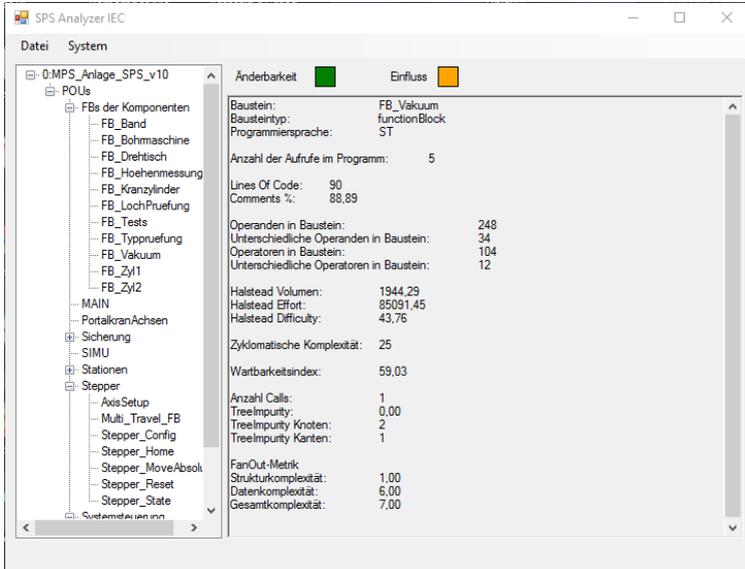


Abbildung 6.9: Ergebnis der Anwendung von Softwaremetriken auf einen SPS-Funktionsbaustein

6.1.5 Darstellung von Modernisierungsmöglichkeiten

Nach Abschluss der Generierung und Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten, werden deren Details dem Anwender des Assistenzsystems angezeigt. Sofern mindestens zwei Möglichkeiten generiert wurden, können diese miteinander verglichen werden. Beide Ansichten werden im Folgenden beschrieben.

6.1.5.1 Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisdarstellung einer Modernisierungsmöglichkeit (Abbildung 6.10) ist in vier Bereiche eingeteilt. Links oben werden verschiedene Kenngrößen zum Vorschlag angezeigt, beispielsweise die Zahl betroffener Prozessparameter, betroffener Softwaremodule oder der mithilfe des Benutzers ermittelte Aufwand für Hardwareänderungen in qualitativer Form. Rechts oben sind in Form eines Baumes die Abhängigkeiten von Parameteränderungen dargestellt. Werden mehrere Produktparameter von der Modernisierungsmöglichkeit adressiert, sind die Abhängigkeiten jeweils in einem eigenen Tab dargestellt. Die beiden unteren Bereiche der Ergebnisdarstellung geben detaillierte Informationen zu Hardwareänderungen (unten links) bzw. Softwareänderungen (unten rechts).

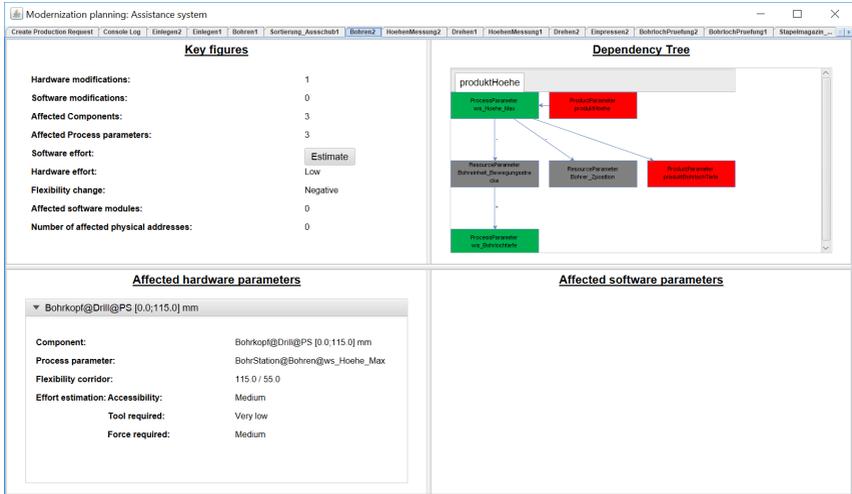


Abbildung 6.10: Ergebnisdarstellung einer Modernisierungsmöglichkeit

6.1.5.2 Vergleich von Möglichkeiten

Die verwendeten Elemente bei der Vergleichsdarstellung zweier Modernisierungsmöglichkeiten ähneln der Ergebnissansicht.

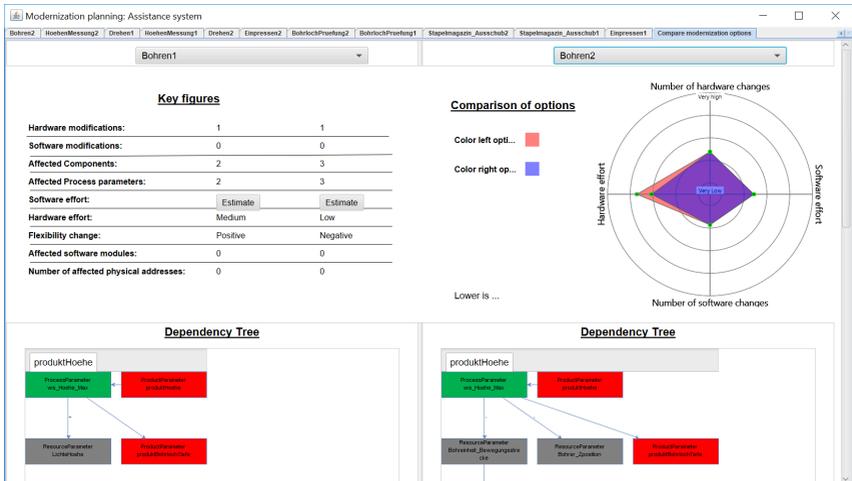


Abbildung 6.11: Vergleichsdarstellung zweier Modernisierungsmöglichkeiten

Die miteinander zu vergleichenden Möglichkeiten können vom Benutzer in zwei Dropdowns ausgewählt werden. Im Bereich oben links werden die Kenngrößen beider Möglichkeiten tabellarisch verglichen, während der Bereich rechts oben eine grafische Darstellung von Hardware- und Softwareaufwänden sowie der Zahl von Hardware- bzw. Softwareänderungen enthält. Darunter werden zweispaltig die Details der beiden Möglichkeiten gegenübergestellt. In vertikaler Anordnung sind die bereits aus der Ergebnisansicht bekannten Baumdarstellungen der Parameterabhängigkeiten sowie Details zu Hardware- und Softwareänderungen abgebildet (Abbildung 6.11, letztere auf Screenshot nicht erkennbar).

6.1.6 Vorschlagsfunktion des Assistenzsystems

Beim Start des Assistenzsystems kann der Benutzer auswählen, ob er die Vorschlagsfunktion des Systems aktivieren möchte oder nicht. Dies soll unterschiedlichen Erfahrungsleveln bei der Bedienung des Systems Rechnung tragen.

Aktiviert der Benutzer die Vorschläge, öffnet sich am oberen rechten Bildschirmrand ein zusätzliches Fenster (Abbildung 6.12), das eine Auswahl möglicher nächster Schritte in Form von Vorschlägen anzeigt, beispielsweise die Erstellung neuer Stationen oder Prozesse im *PPR Model Manager* oder die Auswahl eines Prozesses bei Eingabe der Produktionsanfrage.

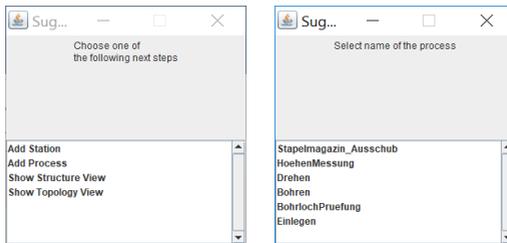


Abbildung 6.12: Assistenzvorschläge bei Verwaltung des Anlagenmodells (links) und bei Eingabe der Produktionsanfrage (rechts)

Das in diesem Kapitel vorgestellte Assistenzsystem stellt die softwaretechnische Realisierung des zuvor beschriebenen Assistenzkonzepts zur Modernisierung von Automatisierungssystemen dar und unterstützt den Benutzer durch verschiedene Assistenzfunktionen und grafische Benutzungsoberflächen bei dessen Anwendung. Zur Realisierung der unterschiedlichen Agententypen und deren Kommunikation wurde das Java Agent Development Framework (JADE) verwendet.

6.2 Realisierung der Simulation eines SPS-gesteuerten modularen Produktionssystems

Dieses Kapitel beschreibt die Realisierung der Simulation eines SPS-gesteuerten modularen Produktionssystems (MPS, vgl. Abbildung 6.13). Mithilfe der Simulation können hardware- und softwareseitige Modernisierungsmaßnahmen sowie deren Auswirkungen simuliert werden. Die Simulation wird zudem zur Evaluierung im Rahmen einer Fallstudie verwendet, um die vom Assistenzsystem generierten Modernisierungsmöglichkeiten zu überprüfen und diese mit geringem Aufwand in der Simulation umsetzen zu können.

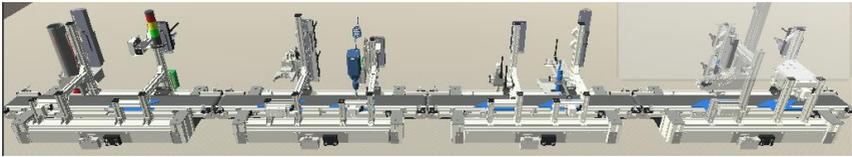


Abbildung 6.13: Simulation des modularen Produktionssystems

6.2.1 Übersicht

Die Simulation bildet den Aufbau und das Verhalten des am IAS verfügbaren MPS Transfersystems des Unternehmens Festo Didactic nach. Dieses besteht aus vier Förderbändern mit jeweils zwei Stationen. Die Stationen führen verschiedene Handhabungs- und Bearbeitungsprozesse durch. Da Änderungen am realen System mit hohem Zeitaufwand verbunden sind, wurde mithilfe der Simulation eine Möglichkeit geschaffen, Modernisierungsmaßnahmen mit geringerem Aufwand in der Simulation durchzuführen.

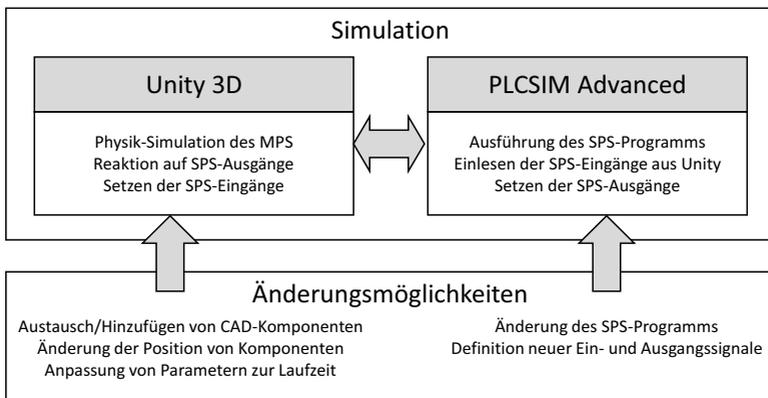


Abbildung 6.14: Aufbau der Simulation des modularen Produktionssystems

Abbildung 6.14 zeigt den Aufbau der Simulationsumgebung sowie die Änderungsmöglichkeiten für den Benutzer, um eine Modernisierung des MPS zu simulieren. Im Folgenden wird näher auf die beiden Hauptbestandteile zur Simulation der Physik sowie des SPS-Programms eingegangen.

6.2.2 Simulation in Unity

Zur Simulation der Physik wird Unity, eine 3D-Entwicklungs- und Laufzeitumgebung für Spiele, verwendet [Unity]. Dort können bereits existierende CAD-Modelle der einzelnen Bearbeitungsstationen integriert und deren Verhalten in Abhängigkeit der SPS-Ausgänge in Skripten definiert werden. Durch die Integration zusätzlicher oder geänderter Komponenten, lässt sich das simulierte Produktionssystem erweitern. Zudem ist es möglich, die Position von Komponenten in der Simulation zu ändern, um so Modernisierungsmöglichkeiten zu simulieren, die eine Änderung der Position von Komponenten beinhalten, beispielsweise durch Neupositionieren ganzer Baugruppen oder einzelner Lichtschranken. Über die Oberfläche der 3D-Simulation (Abbildung 6.15) ist es zudem möglich, zur Laufzeit der Simulation Parameter anzupassen und dadurch beispielsweise die physischen Abmessungen einer Komponente, deren Position oder die Eigenschaften eines Prozesses zu verändern und die sich ergebenden Auswirkungen auf den Produktionsablauf live zu betrachten.

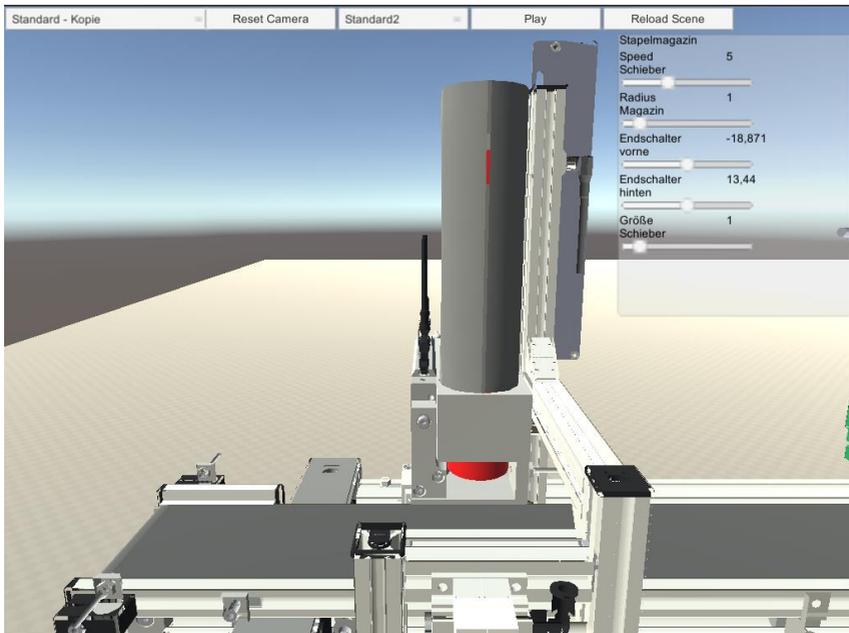


Abbildung 6.15: Veränderung von Parametern zur Laufzeit der Simulation

6.2.3 Simulation der SPS-Steuerung

Das SPS-Programm zur Steuerung der Simulation kann mit dem Programm TIA Portal der Siemens AG erstellt bzw. modifiziert werden und wird anschließend in PLCSIM Advanced geladen. Mithilfe von PLCSIM Advanced wird das SPS-Programm auf einem virtuellen Controller ausgeführt. Dabei verarbeitet das SPS-Programm die von Unity erzeugten Eingangssignale der SPS und berechnet die Ausgangssignale. Der Datenaustausch mit der Unity-Simulation findet dabei über zwei Textdateien statt, welche die Werte der Ein- und Ausgangssignale enthalten.

Über die Änderung des SPS-Programms in TIA Portal können Auswirkungen von Softwareänderungen auf den Produktionsablauf simuliert und getestet werden. Darüber hinaus besteht, wie bei einer realen Anlage, die Möglichkeit, sich in TIA Portal mit der Steuerung zu verbinden und den aktuellen Status einzelner Signale oder Schaltbedingungen grafisch anzeigen zu lassen (Abbildung 6.16).

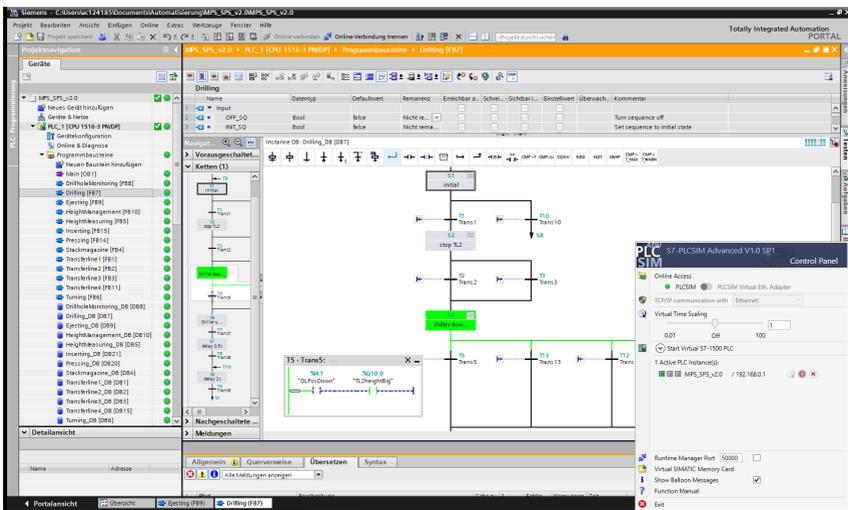


Abbildung 6.16: Debuggen des simulierten Steuerungsprogramms in TIA Portal

7 Evaluierung mithilfe von Modernisierungsszenarien

In diesem Kapitel wird die Evaluierung des softwaregestützten Assistenzkonzepts beschrieben. Hierzu wird zunächst die Methodik der Evaluierung in Unterkapitel 7.1 erläutert. Die folgenden Unterkapitel enthalten die Beschreibung und die Ergebnisse zweier Fallstudien, in denen das Assistenzkonzept auf einen Handhabungs- und Bohrautomaten (Kapitel 7.2) sowie auf das in Kapitel 6.2 beschriebene simulierte modulare Produktionssystem (Kapitel 7.3) angewendet wurde. Abschließend wird das Assistenzkonzept zur Modernisierungsplanung in Kapitel 7.4 anhand der gestellten Anforderungen evaluiert.

7.1 Methodik der Evaluierung

Die im Rahmen der beiden Fallstudien verwendete Methodik zur Evaluierung des Assistenzkonzepts folgt den in Abbildung 7.1 dargestellten fünf Schritten.

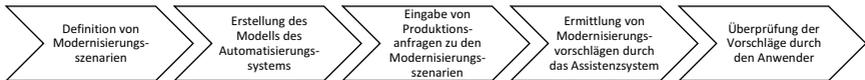


Abbildung 7.1: Vorgehen der Evaluierung

Im ersten Schritt werden für das betrachtete Automatisierungssystem verschiedene Modernisierungsszenarien erdacht. Grundlage ist dazu jeweils der momentane Prozessablauf des Systems vor einer Modernisierung. Ausgehend davon werden Veränderungen am Prozessablauf erdacht, die sich wie folgt manifestieren können:

- Globale Produktparameteränderung (z.B. geänderte Werkstückabmessungen/Gewicht)
- Prozessspezifische Produktparameteränderung (z.B. Bohrlochdurchmesser)
- Geänderte Prozesssequenz (z.B. mehrfaches Bohren, Vertauschung der Reihenfolge von Prozessen, zusätzlicher Bearbeitungsprozess erforderlich)

Anschließend muss im zweiten Schritt das Informationsmodell des Automatisierungssystems, gemäß der vom Assistenzsystem implementierten Modellierungsmethodik, erstellt werden. Nach der Analyse von Software und Hardware des Automatisierungssystems müssen die ermittelten Informationen im *PPR Model Manager* sowie in Microsoft Excel eingegeben werden, um das Modell des Automatisierungssystems aufzubauen.

Nach Abschluss dieser notwendigen, vorbereitenden Maßnahmen kann das Assistenzsystem eingesetzt werden, um das Assistenzkonzept mithilfe der vom Assistenzsystem geplanten Modernisierungsszenarien zu evaluieren. Hierzu erstellt der Anwender im dritten Schritt die zu

den jeweiligen Modernisierungsszenarien gehörigen Produktionsanfragen über die Oberfläche des Assistenzsystems. Optional können diese für die spätere Verwendung abgespeichert werden.

Nach dem Start der Überprüfung der Produktionsanfrage durch den Benutzer ermittelt das Assistenzsystem Modernisierungsmöglichkeiten für das Modernisierungsszenario und präsentiert diese dem Benutzer.

Dieser überprüft im fünften und letzten Schritt der Evaluierung die Korrektheit, Nachvollziehbarkeit und Anwendbarkeit der Vorschläge und dokumentiert diese. Die Schritte 3 bis 5 werden für jedes im ersten Schritt erdachte Modernisierungsszenario wiederholt.

Über diese Methodik zur Durchführung der Fallstudien hinaus, wird das Assistenzkonzept auch hinsichtlich der gestellten Anforderungen bewertet und Anwendungspotenziale aufgezeigt.

7.2 Fallstudie 1: Handhabungs- und Bohrautomat

7.2.1 Beschreibung des Automaten

Der Handhabungs- und Bohrautomat (Abbildung 7.2) am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme der Universität Stuttgart stammt vom Hersteller Festo Didactic und kann zur Vermittlung der Grundprinzipien der Handhabung und Bearbeitung von Werkstücken eingesetzt werden. Der Automat besteht aus pneumatisch und elektrisch betriebenen Aktoren sowie unterschiedlichen Sensoren.

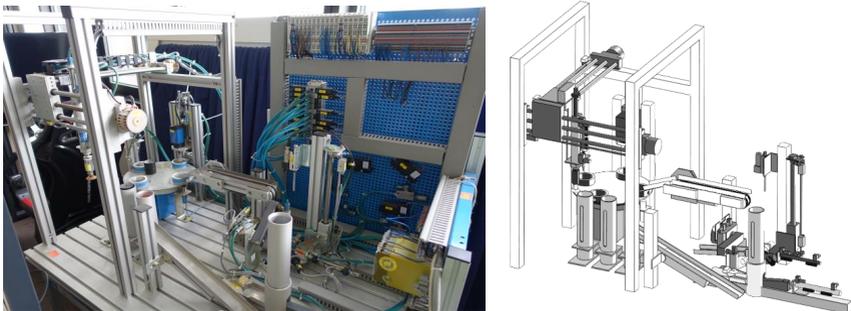


Abbildung 7.2: Handhabungs- und Bohrautomat am IAS (links) und dessen CAD-Modell (rechts)

Der SPS-gesteuerte Automat lässt sich in verschiedene Stationen einteilen, die jeweils ein oder mehrere Handhabungs-, Prüf- oder Bearbeitungsprozesse durchführen. Nach Vereinzelung der Werkstücke mithilfe eines Schiebers aus einem Stapelmagazin werden die Werkstücke von einem Vakuumgreifer zu einer Prüfstation umgesetzt. Diese prüft induktiv das Material des Werkstücks, sowie dessen Farbe über einen optischen Sensor. Ausschussteile können an dieser Stelle mithilfe

eines Schiebers auf eine Rutsche aussortiert werden. Gutteile werden entlang einer vertikalen Achse nach oben transportiert, wo eine Höhenmessung erfolgt. Anschließend werden die Werkstücke auf ein Förderband geschoben. Dieses transportiert die Werkstücke zur ersten Position eines Rundschalttisches mit insgesamt vier Positionen. In der zweiten Position des Rundschalttisches wird ein Loch in das Werkstück gebohrt, in der dritten Position wird das Bohrloch geprüft. In der vierten Position wird das Werkstück vom Sauggreifer eines Portalkrans aufgenommen und zu einem von drei Stapelmagazinen oder zu einer Rutsche für Ausschussteile transportiert. Die Topologie des Automaten ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

Unterschiedliche Typen von zylinderförmigen Werkstücken können vom Automaten gehandhabt werden. Diese unterscheiden sich im Material (Metall, Kunststoff), in der Farbe (rot, schwarz, silber), in der Höhe (22, 25 und 28mm) sowie in Abhängigkeit von Material und Höhe in ihrem Gewicht (38-93 Gramm). Der Durchmesser aller Werkstücke beträgt 40 mm.

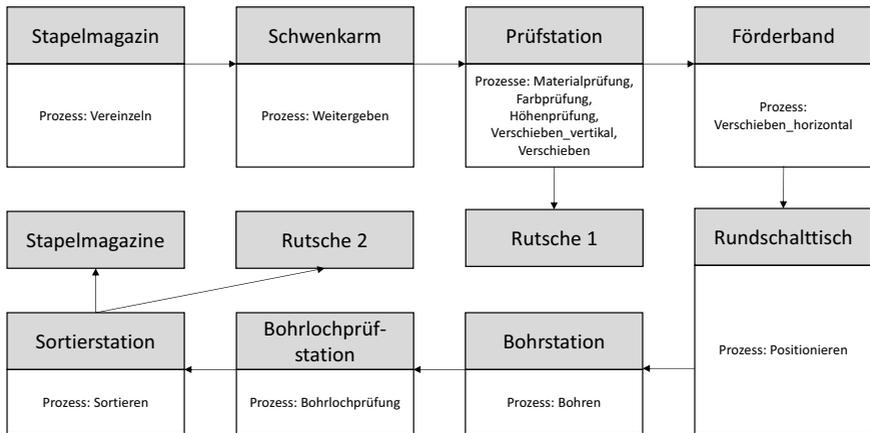


Abbildung 7.3: Topologie des Handhabungs- und Bohrautomaten

7.2.2 Modernisierungsszenarien

Für den Automaten sind verschiedene Modernisierungsszenarien denkbar, die sich in der Veränderung der Produkteigenschaften bzw. der benötigten Prozessreihenfolge ausdrücken lassen. Insgesamt wurden 21 Modernisierungsszenarien für den Automaten definiert. Diese sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Zusätzlich wurde für jedes Szenario das erwartete Ergebnis definiert, d.h. ob und an welcher Stelle eine Modernisierung notwendig ist oder nicht.

Tabelle 7.1: Modernisierungsszenarien des Handhabungs- und Bohrautomaten

#	Typ	Betroffene Parameter	Beschreibung
1	Globale Produktparameter- änderung	Produkt_Gewicht	Gewicht: 50 g
2			Gewicht: 500 g
3			Gewicht: 2.000 g
4			Gewicht: 6.000 g
5		Produkt_Hoehe	Höhe: 10 mm
6			Höhe: 20 mm
7			Höhe: 30 mm
8			Höhe: 50 mm
9			Höhe: 55 mm
10		Produkt_Durchmesser	Durchmesser: 25 mm
11			Durchmesser: 35 mm
12			Durchmesser: 50 mm
13			Produkt_Hoehe, Produkt_Gewicht
14	Prozessspezifische Produktparameter- änderung	Produkt_Bohrloch- durchmesser	Durchmesser: 2mm
15			Durchmesser: 6 mm
16		Produkt_Bohrlochtiefe	Tiefe: 3 mm
17			Tiefe: 25 mm
18			Änderung der Farbe von rot zu schwarz durch den Prozess Bohren
19			Änderung des Durchmessers von 40 auf 35mm durch den Prozess Bohren
20	Geänderte Prozesssequenz	Vertauschung der Reihenfolge von Sortieren und Bohren	
21		Prozessfolge Stapelmagazin → Schwenkarm → Prüfstation → Rutsche I	

7.2.3 Modellierung des Automaten

Die Modellierung des Handhabungs- und Bohrautomaten erfolgte in insgesamt neun Schritten, die im Folgenden beschrieben werden. Für jeden der Schritte wurde der Aufwand erfasst, um abschätzen zu können, ob die Anforderung A3 („Anforderung A3: Das Anlagenmodell muss mit überschaubarem Aufwand erstellbar sein, zudem müssen unvollständige oder fehlende Informationen berücksichtigt werden können“) erfüllt ist. Die Modellierung des Automaten erfolgte ohne Zuhilfenahme der im *PPR Model Manager* enthaltenen Ressourcen- und Prozessbibliothek, weshalb der Ablauf der Modellierung in dieser Fallstudie überwiegend in die

Analyse des Hard- und Softwareaufbaus des Automaten (Schritte 1-3 sowie 5-6) und die Überführung der Analyseergebnisse in das vom Assistenzsystem vorgegebene Format (Schritte 4 und 7-9) getrennt ist.

Schritt 1 - Identifikation der Prozesse und Ressourcen: Zunächst wurden die Prozesse des Automaten und die prozessdurchführenden Ressourcen identifiziert. Der Automat beinhaltet sieben Handhabungsprozesse, vier Prüfprozesse und einen Bearbeitungsprozess, die den in Abbildung 7.3 gezeigten acht Stationen zugeordnet werden können. Auch die Analyse der Materialflussverbindungen erfolgte in diesem Schritt.

Schritt 2 - Identifikation relevanter Produktparameter: Aufbauend auf dem zuvor gewonnenen Prozessverständnis und der Betrachtung der unterschiedlichen Werkstücke des Automaten wurden im zweiten Schritt die relevanten Produktparameter identifiziert. Diese sind: *Produkt_Farbe*, *Produkt_Material*, *Produkt_Gewicht*, *Produkt_Durchmesser*, *Produkt_Hoehe*, *Produkt_Bohrlochdurchmesser* und *Produkt_Bohrlochtiefe*.

Schritt 3 - Identifikation der Ressourcen- und Prozessparameter: Anschließend erfolgte eine Analyse der Ressourcen- und Prozessparameter des Automaten sowie von deren Werten bzw. Wertebereichen. Geometrische Abmessungen der Ressourcenparameter wurden dabei mit Maßband bzw. Messschieber bestimmt, Prozessparameter bzw. deren Wertebereiche über die Betrachtung der entsprechend verknüpften Ressourcenparameter. In Einzelfällen (z.B. beim maximal verschiebbaren Gewicht eines Schiebezylinders) war eine Ermittlung der exakten Prozessparameter nicht bzw. nur aufwendig experimentell möglich, in diesen Fällen wurde ein Schätzwert verwendet. Insgesamt wurden 71 Ressourcen- und 51 Prozessparameter identifiziert.

Schritt 4 - Erstellung des MDM-Grundgerüsts: Mithilfe der in den Schritten 2 und 3 ermittelten PPR-Parameter wurde das Grundgerüst der Multiple Domain Matrizen erstellt. Für jede der acht Stationen wurde eine MDM in Microsoft Excel erstellt.

Schritt 5 - Analyse der Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern: Anschließend erfolgte die Analyse der Abhängigkeiten zwischen Produkt-, Prozess- und Ressourcenparametern durch Betrachtung des Automaten. Die ermittelten Abhängigkeiten wurden dabei zunächst handschriftlich in das zuvor erstellte MDM-Grundgerüst eingetragen und teilweise mit ergänzenden Kommentaren und Verfeinerungen versehen.

Schritt 6 - Analyse der SPS-Signale: Die Ein- und Ausgangssignale der SPS wurden innerhalb des Steuerungsprogramms analysiert und den einzelnen Ressourcen zugewiesen. Beim Handhabungs- und Bohrautomat waren die Signalnamen bereits sprechend benannt, was die Zuordnung vereinfachte. Insgesamt verwendet das SPS-Programm 31 Eingänge und 21 Ausgänge.

Schritt 7 - Eintragung der Abhängigkeiten in die MDM: Mit diesem Schritt begann die Überführung der zuvor ermittelten Analyseergebnisse in das Assistenzsystem. Die handschriftlich

festgehaltenen Notizen wurden in die MDM überführt. Dabei wurden voneinander unabhängige Abhängigkeiten eines Parameters auf mehrere MDM-Zeilen aufgeteilt. Zudem wurden unterschiedliche Abhängigkeiten bzw. Restriktionen des oberen bzw. unteren Rands des Wertebereichs separat modelliert, sofern dies erforderlich war. Insgesamt 296 Einträge von Abhängigkeiten finden sich in den erstellten MDMs. Die Dimensionen der acht Multiple Domain Matrizen reichen von 13x17 bis 41x38.

Schritt 8 - Eingabe der Daten in den PPR Model Manager: Der anfangs ermittelte stationsweise Aufbau des Automaten mit seinen Prozessen und Ressourcen sowie die Topologie wurden anschließend im *PPR Model Manager* eingegeben. Das Anlegen der Prozess- und Ressourcenparameter erfolgte nahezu vollständig automatisiert durch die eingebaute Konsistenzprüfung der MDM. Lediglich die Zuweisung eines Parameters zu einer bestimmten Ressource bzw. zu einem bestimmten Prozess innerhalb einer Station sowie die Angabe der Einheit und des Wertes bzw. Wertebereiches eines Parameters waren noch notwendig.

Schritt 9 - Erstellung der Fähigkeitsbeschreibung und Vorbedingungen: Abschließend erfolgt in Microsoft Excel die Definition der Fähigkeitsbeschreibung und Vorbedingungen der Prozesse. Im vorliegenden Fall nimmt nur der Prozess „Bohren“ Änderungen am Produkt vor.

Der Aufwand der einzelnen Schritte ist Tabelle 7.2 zu entnehmen.

Tabelle 7.2: Aufwand zur Erstellung des Modells des Handhabungs- und Bohrautomaten

Schritt	Tätigkeit	Aufwand
1	Identifikation der Prozesse und Ressourcen	0,25 Stunden
2	Identifikation relevanter Produktparameter	0,25 Stunden
3	Identifikation der Ressourcen- und Prozessparameter	1,5 Stunden
4	Erstellung des MDM-Grundgerüsts	1,5 Stunden
5	Analyse der Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern	1,75 Stunden
6	Analyse der SPS-Signale	1 Stunde
7	Eintragung der Abhängigkeiten in die MDM	2 Stunden
8	Eingabe der Daten in den PPR Model Manager	1,75 Stunden
9	Erstellung der Fähigkeitsbeschreibung und Vorbedingungen	0,5 Stunden
	Gesamt	10,5 Stunden

7.2.4 Ergebnisse

Jedes der 21 Modernisierungsszenarien wurde mithilfe des Assistenzsystems überprüft. Die Zahl der generierten Modernisierungsmöglichkeiten je Station ist für die untersuchten Szenarien in Tabelle 7.3 dargestellt. Zur erfolgreichen Umsetzung des Modernisierungsszenarios müssen alle

Stationen, für die Vorschläge generiert wurden, angepasst werden. Dabei ist zu beachten, dass mehrere Modernisierungsmöglichkeiten für eine Station vom Benutzer als Alternativen für diese Station betrachtet werden können. In Szenario 13, also der gleichzeitigen Änderung von Produkthöhe und Gewicht, enthalten die Vorschläge Modernisierungsmöglichkeiten für beide betroffenen Produktparameter (*Produkt_Hoeh*e und *Produkt_Gewicht*).

Tabelle 7.3: Anzahl der Vorschläge pro Station für die untersuchten Modernisierungsszenarien des Handhabungs- und Bohrautomaten

#	Szenario	#Stapelmagazin	#Schwenkarm	#Prüfstation	#Förderband	#Rundschaltrisch	#Bohrstation	#Bohrlochprüfstation	#Sortierstation	#Vorschläge gesamt	Kein Änderungsbedarf
0	Standardablauf									0	ja
1	Gewicht 50									0	ja
2	Gewicht 500		2						1	3	nein
3	Gewicht 2000		2	1					1	4	nein
4	Gewicht 6000	1	2	1	1	1			1	7	nein
5	Höhe 10	1	2	1				1	1	6	nein
6	Höhe 20									0	ja
7	Höhe 30	1								1	nein
8	Höhe 50	1						1	1	3	nein
9	Höhe 55	1	2	1			2	1	1	8	nein
10	Durchmesser 25		1	2					1	4	nein
11	Durchmesser 35									0	ja
12	Durchmesser 50	1	1	3	1	1			1	8	nein
13	Höhe 65 & Gewicht 400	1	4	1		1	2	1	1	11	nein
14	Bohrlochdurchmesser 2						1	1		2	nein
15	Bohrlochdurchmesser 6						1			1	nein
16	Bohrlochtiefe 3							3		3	nein
17	Bohrlochtiefe 25									0	ja
18	Farbänderung						1			1	nein
19	Durchmesseränderung						1			1	nein
20	Reihenfolge Sortieren Bohren								1	1	nein
21	Aussortieren									0	ja

Das Assistenzsystem wurde auf einem Notebook mit Intel i5-8350U CPU und 16 GB RAM ausgeführt. Die Ausführungsdauer des Programms zur Generierung der Modernisierungsmöglichkeiten betrug in den untersuchten Szenarien zwischen dem Absenden der Produktionsanfrage und der Anzeige der Ergebnisse zwischen 5 und 30 Sekunden, ohne die dazwischen notwendigen Benutzereingaben zur Aufwandsabschätzung. Die Zeitdauer zur Ausführung nimmt mit steigender Anzahl an Modernisierungsmöglichkeiten annähernd linear zu.

Experimente mit der Erhöhung der Anzahl an Stationen zeigten keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Ausführungsdauer und der Zahl der Stationen bzw. Prozesse, hier war weiterhin die Zahl der ermittelten Modernisierungsmöglichkeiten entscheidend.

Beispielhaft werden im Folgenden die Ergebnisse des Modernisierungsszenarios 2 beschrieben. Durch die Erhöhung des Werkstückgewichts auf 500 Gramm wurden vom Assistenzsystem Probleme mit den beiden mit einem Sauggreifer arbeitenden Handhabungsprozessen festgestellt. Für den Schwenkarm wurden zwei Modernisierungsmöglichkeiten ermittelt, deren Abhängigkeitsgraphen der Parameter in Abbildung 7.4 dargestellt sind. Für die Station Sortieren wurde eine Modernisierungsmöglichkeit ermittelt.

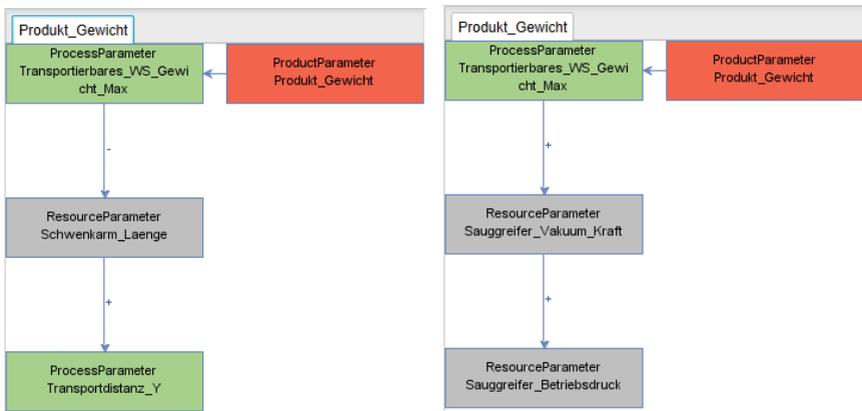


Abbildung 7.4: Modernisierungsmöglichkeiten für die Station "Schwenkarm"

Da der Vakuumbreifer des Schwenkarms das Werkstück zunächst ansaugt und der Arm anschließend pneumatisch angetrieben auf einer Kreisbahn bewegt wird, können die Gewichtslimitationen beider Aktionen hier entscheidend sein, was durch die beiden Vorschläge repräsentiert wird. Der erste Vorschlag zielt durch Verringerung der Schwenkarmlänge auf eine Reduzierung des notwendigen Drehmoments für die Kreisbewegung, während der zweite Vorschlag durch eine Erhöhung des Betriebsdrucks das Vakuum verstärken und somit das schwerere Werkstück transportieren möchte. Da im Modell des Automatisierungssystems nicht hinterlegt war, welche Limitation für das gewünschte Gewicht von 500 Gramm tatsächlich relevant ist, muss dies durch den Anwender des Assistenzsystems auf Plausibilität überprüft werden. Im vorliegenden Fall bestand die Limitation tatsächlich im Unterdruck des Vakuums und nicht im Drehmoment der Kreisbewegung. Diese Erkenntnis könnte vom Benutzer nachträglich in das Modell des Automatisierungssystems eingebracht werden, beispielsweise durch die Definition eines strukturbasierten und eines prozessspezifischen Wertebereichs für den Prozessparameter *Transportierbares_WS_Gewicht_Max*.

7.2.5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und Erfahrungen der Fallstudie diskutiert.

Korrektheit, Nachvollziehbarkeit und Anwendbarkeit der Vorschläge

Die vom Assistenzsystem generierten Modernisierungsmöglichkeiten wurden im Rahmen einer Zweierdiskussion allesamt subjektiv als korrekt und nachvollziehbar eingeschätzt. In den Fällen, in denen pro Prozess lediglich eine Handlungsoption vorgeschlagen wurde, wurde die Entscheidung für den Benutzer sehr stark vereinfacht. In den Fällen, in denen es je Prozess mehrere Handlungsoptionen gibt, musste eine manuelle Abwägung der Optionen erfolgen (siehe auch Kapitel 7.2.4). Die kombinatorische Komplexität der generierten Modernisierungsmöglichkeiten von Szenario 13 ist beispielhaft in Abbildung 7.5 dargestellt. Ab der Ebene der Produktparameter werden über die Beeinflussung von Prozessparametern durch Änderung geeigneter Ressourcenparameter die einzelnen Modernisierungsmöglichkeiten ermittelt, was in den jeweiligen Abhängigkeitsgraphen einer Modernisierungsmöglichkeit dargestellt ist (vgl. beispielsweise Abbildung 7.4).

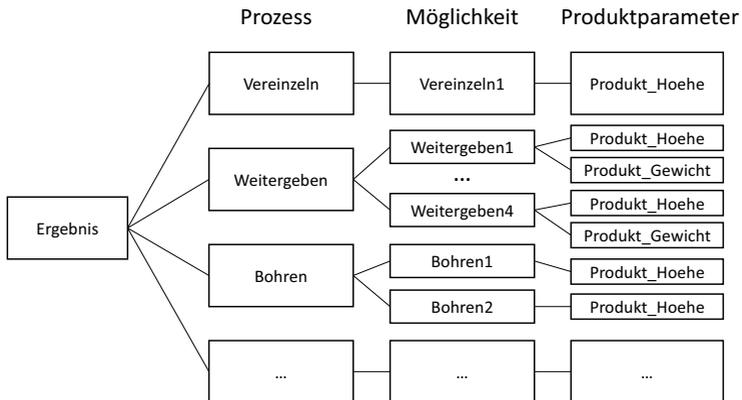


Abbildung 7.5: Kombinatorische Komplexität der generierten Modernisierungsmöglichkeiten für Szenario 13

In der Diskussion wurde die Unterstützung durch das Assistenzsystem und insbesondere der Abhängigkeitsbaum als positiv bewertet, um die Auswirkungen verschiedener Modernisierungsmöglichkeiten auf andere Systemparameter zu überblicken. Beispielsweise kann zur Veränderung der Bohrlochtiefe die Bohrstation vertikal anders positioniert, die Bohrerlänge geändert oder die Position der Endschalter für die Vertikalbewegung verändert werden. Für die Interpretation der Vorschläge auf Parameterbasis ist allerdings zumindest Grundwissen über den Handhabungs- und Bohrautomaten notwendig, um die Vorschläge korrekt interpretieren zu können.

Die Anwendbarkeit der Vorschläge wurde in der Diskussion ebenfalls positiv eingestuft, allerdings ist das bereits angesprochene Grundwissen über das System und manuelle Transferleistung erforderlich, um aus dem Ergebnis des Assistenzsystems schlussendlich zu einem implementierbaren Modernisierungsansatz zu gelangen. Bei den Vorschlägen 18-20 (Farbänderung, Durchmesseränderung und Vertauschung von Bohren und Sortieren) beschränken sich die Vorschläge des Assistenzsystems darauf, das Nichtvorhandensein eines Prozesses zur Änderung der Farbe bzw. des Durchmessers festzustellen bzw. die nichtvorhandene Materialflussverbindung von Sortieren zu Bohren zu identifizieren. Die tatsächlich im System durchzuführende Änderung, beispielsweise das Integrieren einer Station zum Lackieren oder Fräsen oder die Umprogrammierung von Sortierstation und Rundschalttisch, um den Materialfluss bidirektional zu bewerkstelligen, müssen vom Benutzer aufgrund der Meldung des Assistenzsystems selbst konzipiert werden.

Aufwand zur Modellerstellung

Der Aufwand zur Modellerstellung lässt sich aufschlüsseln in 4,75 Stunden, die zur Analyse des Automaten benötigt wurden sowie 5,75 Stunden, um die Analyseergebnisse formal festzuhalten und in die vom Assistenzsystem benötigte Form zu überführen. Eine Dokumentation des Automaten bzw. digitale Modelle mit Ausnahme des SPS-Programms waren nicht vorhanden, sodass alle Analysetätigkeiten manuell ausgeführt werden mussten. Bei der Aufwandsbetrachtung ist zu berücksichtigen, dass bereits Erfahrung mit der Modellierungsmethodik vorhanden war. Dementsprechend bestand auch kaum Bedarf, das erstellte Modell zu korrigieren bzw. zu verfeinern, sodass das Modell mit lediglich einer Korrekturschleife erstellt werden konnte.

Gegenüber der digitalen Neuplanung des Automaten mithilfe aktueller Software lässt sich auch beim Gesamtaufwand von 10,5 Stunden ein kaum zu bestreitender Zeitvorteil feststellen (vgl. Kapitel 7.4 - Anforderung A3). Gegenüber nicht-modellgestützter Modernisierungsplanung fällt insbesondere der Zeitaufwand für die Formalisierung der Analyse ins Gewicht, der der Zeitdauer für die manuelle Planung gegenübergestellt werden muss. Allerdings müssen bei mehrfach durchgeführter manueller Planung gegebenenfalls die Analyseschritte wiederholt werden, da die Ergebnisse nicht bzw. nicht formalisiert festgehalten werden. Ein qualitativer Vergleich der Aufwände für die Modernisierungsplanung mit einem neu erstellten digitalen Modell mit der manuellen Modernisierungsplanung ohne Werkzeugunterstützung und der Planung mit dem vorliegenden Assistenzsystem ist in Abbildung 7.6 dargestellt.

Der Aufwand zur Abbildung der Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern in Form einer Multiple Domain Matrix steigt überproportional an, je mehr Parameter innerhalb einer Station berücksichtigt werden, da bei großen Matrizen die Übersichtlichkeit sinkt und die Eingabe somit fehleranfälliger wird. Dabei sind bei der Modellierung auch voneinander unabhängige Abhängigkeiten eines Parameters in Form zusätzlicher Zeilen in der MDM zu berücksichtigen, was ebenfalls eine Fehlerquelle darstellt. Der Füllgrad der Matrizen ist im Allgemeinen recht

gering (im Durchschnitt: 7,1 %). Ob sich bei komplexen Systemen andere Darstellungsformen der Abhängigkeiten als einfacher pflegbar erweisen, könnte in künftigen Arbeiten untersucht werden.

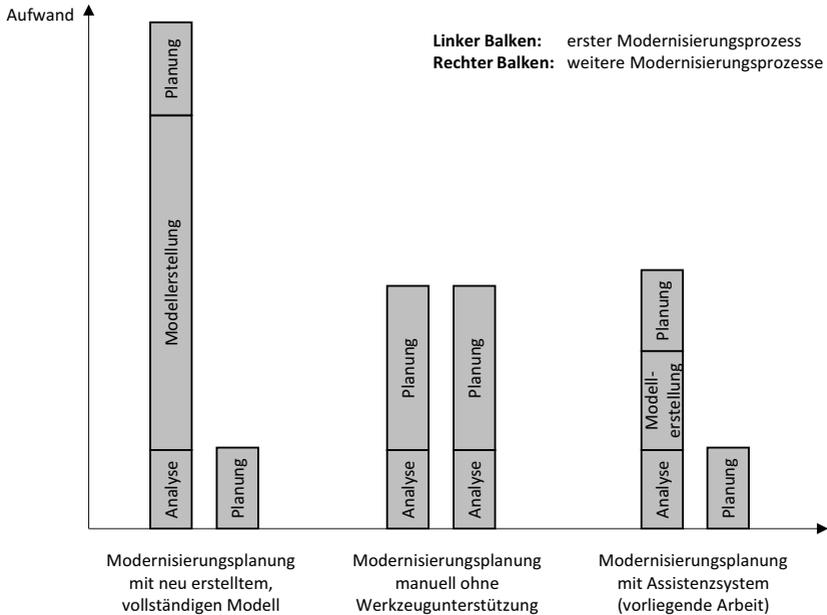


Abbildung 7.6: Qualitative und vereinfachte Darstellung des Aufwands für die Modernisierungsplanung nach verwendeter Werkzeugunterstützung

Zusammenfassend lässt sich aus der ersten Fallstudie ableiten, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Assistenzkonzept und dessen Realisierung in Form eines Software-Assistenzsystems geeignet sind, den Modernisierungsprozess des untersuchten Handhabungs- und Bohrautomaten zu unterstützen. Eine weiterführende Diskussion der Ergebnisse dieser Fallstudie ist in Kapitel 7.4 enthalten.

7.3 Fallstudie 2: Simulation eines modularen Produktionssystems

Um die Übertragbarkeit des Assistenzkonzepts zu zeigen, wurde das Assistenzsystem darüber hinaus mithilfe der Simulation eines modularen Produktionssystems evaluiert. Die Realisierung der Simulation wurde bereits in Kapitel 6.2 beschrieben.

7.3.1 Beschreibung des modularen Produktionssystems

Das simulierte modulare Produktionssystem besteht aus vier Förderbändern mit jeweils zwei Modulen aus dem MPS Transfersystem-Programm von Festo Didactic. Das Vorbild der Simulation ist in Abbildung 7.7 dargestellt. In der Simulation sind die Förderbänder zur besseren Übersicht linear hintereinander aufgereiht anstatt in der offenen Kreisstruktur. Die Steuerung des modularen Produktionssystems erfolgt durch eine SPS.

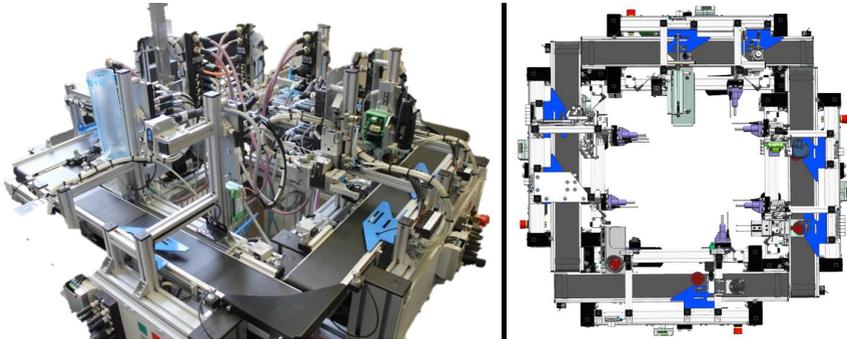


Abbildung 7.7: Modulares Produktionssystem (links) und Draufsicht des CAD-Modells (rechts)

Das System besteht aus den folgenden acht Modulen: (1) Stapelmagazin, (2) Höhenmessung, (3) Wenden, (4) Bohren, (5) Bohrlochprüfung, (6) Einlegen, (7) Einpressen und (8) Ausschieben. Das MPS verarbeitet zylinderförmige Werkstücke mit 25mm Höhe, bohrt diese und presst ein zuvor eingelegtes Einsetzteil (Kugellager) in das Werkstück ein. Darüber hinaus ändert das Modul Wenden die Orientierung des Werkstücks um 180 Grad. Somit sind im Vergleich zum zuvor betrachteten Handhabungs- und Bohrautomaten zusätzliche Prozesse (Orientieren und Fügen) vorhanden, um das Assistenzkonzept zu evaluieren und die Übertragbarkeit zu zeigen.

7.3.2 Modernisierungsszenarien

Für das modulare Produktionssystem wurden insgesamt 26 Modernisierungsszenarien definiert, die in Tabelle 7.4 dargestellt sind. Teilweise wurden die Szenarien so gewählt, dass gezielt die Grenzen des Assistenzkonzepts ausgelotet und getestet werden (z.B. Szenarien 17-22), beispielsweise indem physikalisch nicht mögliche Zustandsänderungen gefordert wurden. In Szenario 18 wurde die realisierbare Bohrtiefe durch eine (ansonsten nicht vorhandene) softwareseitige Einschränkung des Prozessparameters Bohrtiefe auf einen Wertebereich von 16-17 mm limitiert, was die geforderte Bohrtiefe des Produkts von 12 mm ohne Änderung der Software nicht realisierbar macht.

Tabelle 7.4: Modernisierungsszenarien des modularen Produktionssystems

#	Typ	Betroffene Parameter	Beschreibung	
1	Globale Produktparameter- änderung	Werkstückgewicht	Gewicht: 600 g	
2			Gewicht: 6.000 g	
3			Gewicht: 51.000 g	
4		Werkstückhöhe	Höhe: 10 mm	
5			Höhe: 29 mm	
6			Höhe: 35 mm	
7			Höhe: 54 mm	
8			Höhe: 60 mm	
9			Höhe: 115 mm	
10		Werkstückdurchmesser	Durchmesser: 20 mm	
11			Durchmesser: 60 mm	
12			Durchmesser: 75 mm	
13	Prozessspezifische Produktparameter- änderung	Bohrlochdurchmesser	Durchmesser: 20mm	
14			Durchmesser: 25 mm	
15			Durchmesser: 47 mm	
16		Bohrlochtiefe	Tiefe: 12 mm	
17			Tiefe: 30 mm	
18			Tiefe: 12 mm (SW-Einschränkung)	
19		Prozessspezifische Produktparameter- änderung	Verwendung des Prozesses Einpressen ohne Veränderung an Produktparametern	
20			Verwendung des Prozesses Drehen ohne Veränderung der Produktorientierung (0° statt 180°)	
21			Verwendung des Prozesses Drehen mit Änderung der Produktorientierung auf 270°	
22	Änderung des Materials von Metall auf Kunststoff und zurück durch Prozesse Bohrlochprüfung und Einpressen			
23	Geänderte Prozesssequenz	Weglassen des Prozesses Einlegen		
24		Prozessfolge Bohren → Drehen → Bohrlochprüfung		
25		Prozessfolge Einlegen → Bohren		
26		Prozessfolge Einlegen → Einpressen → Drehen		

7.3.3 Modellierung des modularen Produktionssystems

Die Modellierung des MPS erfolgte im Rahmen einer studentischen Arbeit, die durchführende Person besaß dabei keinerlei Vorkenntnisse der verwendeten Modellierungsmethodik. Im Rahmen der Modellierung wurde zusätzlich eine Prozess- und Ressourcenbibliothek für die im MPS enthaltenen Prozesse angelegt.

Tabelle 7.5: Aufwand zur Erstellung und Verfeinerung des Modells des modularen Produktionssystems

Schritt	Tätigkeit	Aufwand
1	Einarbeitung in das modulare Produktionssystem	2 Stunden
2	Identifikation der benötigten Parameter	4 Stunden
3	Ausmessen der Anlage	2 Stunden
4	Erstellung und Überarbeitung der MDM	12 Stunden
5	Analyse der SPS-Signale & Fähigkeitsbeschreibung	2 Stunden
6	Eingabe der Daten in den PPR Model Manager	4 Stunden
	Gesamt	26 Stunden

Die Zeitaufwände für die einzelnen Tätigkeiten bei der Modellerstellung sind in Tabelle 7.5 dargestellt. Aufgrund fehlender Vorkenntnisse mit der Modellierungsmethodik musste das Anlagenmodell und die in der MDM definierten Abhängigkeiten mehrfach iterativ korrigiert und verfeinert werden. Der Ablauf der Modellierung wurde nicht vorgegeben und unterscheidet sich in einzelnen Schritten vom Ablauf der Modellierung in der ersten Fallstudie.

7.3.4 Ergebnisse

Die Evaluierung des Assistenzkonzepts am modularen Produktionssystem wurde mit dem Standardablauf der Produktion sowie den 26 zuvor beschriebenen Modernisierungsszenarien durchgeführt. Die Ergebnisse der Überprüfung der Produktionsanfragen zu den Modernisierungsszenarien sind in Tabelle 7.6 dargestellt. Im Gegensatz zur ersten Fallstudie waren bei den betrachteten Modernisierungsszenarien zwei der ermittelten Ergebnisse nicht korrekt, was anschließend diskutiert wird.

Tabelle 7.6: Anzahl der Vorschläge für Modernisierungsszenarien des modularen Produktionssystems

#	Szenario	Anzahl Vorschläge	Betroffene Stationen / Ergebnis	Ergebnis korrekt
1	Gewicht_600	1	Wenden	ja
2	Gewicht_6000	3	Stapelmagazin, Wenden, Ausschieben	ja
3	Gewicht_51000	8	Stapelmagazin, Wenden, Ausschieben, Förderbänder	ja
4	Höhe_10	2	Bohrlochprüfung	ja
5	Höhe_29	2	Stapelmagazin	ja
6	Höhe_35	4	Stapelmagazin, Wenden	ja
7	Höhe_54	9	Stapelmagazin, Bohrlochprüfung, Einlegen, Einpressen, Ausschieben	ja
8	Höhe_60	11	Alle Stationen	ja
9	Höhe_115	14	Alle Stationen	ja
10	Durchmesser_20	2	Wenden, Bohren	ja
11	Durchmesser_60	8	Alle Stationen	ja
12	Durchmesser_75	14	Alle Stationen und Förderbänder	ja
13	BohrlochDurchmesser_20	1	Bohren	ja
14	BohrlochDurchmesser_25	1	Bohren	ja
15	BohrlochDurchmesser_3	2	Bohren, Bohrlochprüfung	ja
16	BohrlochTiefe_12	0	produzierbar	ja
17	BohrlochTiefe_30	0	produzierbar	nein
18	BohrlochTiefe_12_SW	1	SW-Änderung Bohren	ja
19	Einpressen	1	Einpressen nicht geeignet, um Lager nicht einzupressen	ja
20	Orientierung_0	1	Wenden	ja
21	Orientierung_270	0	Produkt als produzierbar erkannt	nein
22	Materialänderung	1	Bohrlochprüfung und Einpressen können Material nicht ändern	ja
23	Ohne_Einlegen	1	Einpressen funktioniert nicht ohne eingelegtes Lager	ja
24	Bohren_Wenden_Prüfen	1	Fehlende Materialflussverbindung von Bohren zu Wenden	ja
25	Einlegen_Bohren	1	Fehlende Materialflussverbindung von Einlegen zu Bohren	ja
26	Einlegen_Einpressen_Wenden	1	Fehlende Materialflussverbindung von Einpressen zu Wenden	ja

7.3.5 Diskussion

Die Ergebnisse der zweiten Fallstudie hinsichtlich Nachvollziehbarkeit und Anwendbarkeit der Vorschläge sowie dem benötigten Aufwand zur Modellerstellung decken sich überwiegend mit den Ergebnissen der ersten Fallstudie des Handhabungs- und Bohrautomaten. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel lediglich ergänzende Aspekte diskutiert, die im Rahmen der zweiten Fallstudie identifiziert wurden.

Übertragbarkeit des Ansatzes

Wie das Beispiel des modularen Produktionssystems gezeigt hat, lässt sich das Assistenzsystem durch Erstellung eines entsprechenden Modells des Automatisierungssystems auch auf andere Automatisierungssysteme anwenden, ohne das Assistenzsystem selbst anpassen zu müssen. Durch Verwendung einer allgemeingültigen Struktur des Informationsmodells eignet sich dies auch für die Modernisierungsplanung anderer Automatisierungssysteme in der diskreten Fertigung.

Anwendbarkeit ohne Vorkenntnisse der Modellierungsmethodik

Die Evaluierung anhand des modularen Produktionssystems hat darüber hinaus gezeigt, dass die Anwendung der Modellierungsmethodik ohne Vorkenntnisse nicht trivial ist und insbesondere die Auswahl einer geeigneten Granularität der Parameter und der Zusammenhänge zwischen diesen Parametern ungeübte Anwender vor Herausforderungen stellt. Der Einsatz von konkreten Modellierungsbeispielen zur Schulung wurde an dieser Stelle als hilfreich angemerkt. Es hat sich gezeigt, dass die Granularität des Modells direkten Einfluss auf die Verständlichkeit der Vorschläge besitzt. Als positiv zu bewerten ist hier, dass das Modell schrittweise verfeinert und detailliert werden kann, was den Aufwand zur initialen Erstellung des Modells minimiert.

Korrektheit der Vorschläge und Diskussion von Limitationen

In 24 der untersuchten 26 Szenarien wurden vom Assistenzsystem korrekte Vorschläge ermittelt, zudem ermittelte das Assistenzsystem in mehreren Fällen Abhängigkeiten, die der Anwender bei der initialen Definition der Modernisierungsszenarien nicht bedacht hatte und generierte hierfür entsprechende Modernisierungsmöglichkeiten. Somit lässt sich bereits anhand dieses von Umfang und Komplexität her überschaubaren Beispiels zeigen, dass durch den Einsatz des Assistenzsystems, zeit- und kostenintensive Fehler bei der Modernisierungsplanung vermieden werden können. Die beiden Szenarien, in denen das Assistenzsystem kein korrektes Ergebnis lieferte, werden nun diskutiert:

- Szenario 17 – Bohrlochtiefe 30 mm: Dieses Szenario wurde vom Assistenzsystem als durchführbar bewertet, allerdings beträgt die Höhe der Werkstücke lediglich 25 mm. Diese Restriktion zwischen zwei Produktparametern kann in der MDM nicht modelliert werden und wird daher nicht berücksichtigt. Da der Produktparameter Bohrlochtiefe von der Oberkante

des Werkstücks gemessen wird (und damit von der Höhe des Werkstücks abhängig ist), der vom Bohrer realisierbare Prozessparameterwertebereich allerdings von zahlreichen Parametern (Länge des Bohrers, Position des Bohrers, Vertikalbewegung des Bohrers etc.) abhängt, ist dies bei rein qualitativer Modellierung nicht abbildbar. Entsprechende Plausibilitätsprüfungen müssen somit weiterhin vom Anwender durchgeführt werden.

- Szenario 21 – Drehung des Werkstücks um 270°: Auch dieses Szenario wurde vom Assistenzsystem als durchführbar bewertet. In der Fähigkeitsbeschreibung des Prozesses Wenden war nicht explizit hinterlegt, dass der Prozess Wenden die Orientierung des Werkstücks exakt um 180° verändert. Eine entsprechende Anpassung der Fähigkeitsbeschreibung ist möglich und führt bei Wiederholung des Szenarios zu einem korrekten Ergebnis.

Die Ergebnisse der beiden Fallstudien werden zusammengefasst in Kapitel 7.4 anhand der an das Konzept gestellten Anforderungen diskutiert.

7.4 Evaluierung anhand der Anforderungen

Ergänzend zu den beiden Fallstudien wird das Assistenzkonzept und dessen Umsetzung in Form eines Assistenzsystems anhand der gestellten Anforderungen evaluiert. Hierbei fließen ebenfalls die im Rahmen der beiden zuvor beschriebenen Fallstudien gewonnenen Erkenntnisse ein.

Anforderung A1: Unterstützung aller Planungsschritte

Das Assistenzsystem unterstützt den Planungsingenieur bereits bei der Modellierung des Automatisierungssystems durch Bereitstellung des *PPR Model Managers* und die hierin integrierten Assistenzfunktionen, beispielsweise durch die Bereitstellung einer wiederverwendbaren Prozess- und Ressourcenbibliothek sowie der automatischen Konsistenzprüfung von PPR-Parametern und deren Abhängigkeiten. Mithilfe des in dieser Phase aufgebauten Informationsmodells ermittelt das Assistenzsystem anschließend automatisiert Abweichungen zum Soll-Zustand (Produktionsanfrage) sowie entsprechende Handlungsoptionen und zeigt diese inklusive einer Bewertung dem Benutzer an. Der Ablauf des Assistenzsystems ist dabei an die Struktur von Entscheidungsprozessen angelehnt und umfasst somit alle typischen Planungsschritte. Die Anforderung A1 ist somit erfüllt.

Anforderung A2: Möglichkeit der Integration von Erfahrungswissen

Das Assistenzsystem bietet durch den Einsatz von fallbasiertem Schließen zur Aufwandsabschätzung und der Hinterlegung von Prinziplösungen die Möglichkeit Erfahrungswissen in das Assistenzsystem einzubringen. Zudem kann Erfahrungswissen in Form der Prozess- und Ressourcenbibliothek integriert werden, um Wissen über typische Prozesse und Ressourcen sowie deren Parameter und Abhängigkeiten künftigen Anwendern zur Verfügung zu

stellen. Durch die formalisierte Erfassung des Anlagenmodells geht das Ergebnis der Analyse des Ist-Zustands des Automatisierungssystems darüber hinaus nicht mehr verloren (projektspezifisches Wissen). Somit ist auch Anforderung A2 erfüllt.

Anforderung A3: Das Anlagenmodell muss mit überschaubarem Aufwand erstellbar sein, zudem müssen unvollständige oder fehlende Informationen berücksichtigt werden können

Wie die beiden Fallstudien gezeigt haben, nimmt die Erstellung des Anlagenmodells zwar einige Stunden Zeit in Anspruch, doch liegt dieser Aufwand deutlich unter dem einer digitalen Neuplanung des Systems. Für das in der zweiten Fallstudie behandelte modulare Produktionssystem existieren Vergleichswerte für den Aufbau eines vollständigen digitalen Modells (Digitaler Zwilling) des Systems. Für die Erstellung der Modelle in den Siemens-Tools Teamcenter (Gesamtmodell), NX (CAD), Line Designer (CAD), Automation Designer (Schaltplan und Softwaremodell), TIA-Portal und PLCSIM Advanced (Softwaremodell) benötigte ein anfangs ungeschulter Student ca. sechs Monate in zwei studentischen Arbeiten. Diese Zeit umfasst zudem 21 Tage Schulung für die verwendeten Softwarewerkzeuge [Gher18a, Gher18b].

Wie insbesondere die zweite Fallstudie des modularen Produktionssystems gezeigt hat, ist es jederzeit möglich, das Modell iterativ zu verfeinern. Damit können gezielt die Prozesse und Ressourcen des Systems in der Modellierung verfeinert werden, die bereits bei grober Modellierung als potenziell modernisierungswürdig erkannt wurden. Zur Aufwandsreduktion bei der Erstellung des Modells des Automatisierungssystems tragen auch die im *PPR Model Manager* integrierten Assistenzfunktionen bei. Der Umgang mit fehlenden Informationen ist bei der Aufwandsabschätzung zu beobachten, bei der das Assistenzsystem den Benutzer nach nicht bekannten Informationen fragt.

Anforderung A4: Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Disziplinen sowie zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen

Um der mechatronischen Natur von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung Rechnung zu tragen, berücksichtigt das Informationsmodell sowohl die Software, die Mechanik als auch die Verknüpfung beider Disziplinen in Form von elektrischen Ein- und Ausgangssignalen. Durch Verwendung des PPR-Konzepts sowie der Eingabe der Produktionsanfrage in Anlehnung an die Formalisierte Prozessbeschreibung nach VDI-Richtlinie 3682 und der Modellierung von Parameterabhängigkeiten in Form einer MDM wird das Automatisierungssystem in Produkte, Prozesse und Ressourcen aufgeteilt. Somit wird ein für mechatronische Systeme allgemeingültiges Informationsmodell verwendet, das für die Modernisierungsplanung erwiesenermaßen geeignet ist. Durch die parametrische Beschreibung von Produkten, Prozessen und Ressourcen lässt sich das Konzept auf alle Handhabungsprozesse und Fertigungsverfahren geometrisch bestimmter fester Körper nach [DIN8580] anwenden, die sich über ihre Parameter beschreiben lassen. Damit ist auch Anforderung A4 vollständig erfüllt.

Anforderung A5: Unterstützung bei der Entscheidungsfindung durch (teil-)automatisierte Bestimmung geeigneter Kenngrößen

Durch Interaktion mit dem Benutzer werden Aufwände von Modernisierungsmöglichkeiten teilautomatisiert ermittelt, zudem ermittelt das Assistenzsystem Kenngrößen wie die Anzahl betroffener Komponenten oder die Zahl betroffener Steuerungssignale. Über die grafische Benutzungsoberfläche werden diese Details der Kosten-/Nutzenanalyse dem Anwender angezeigt und ein Vergleich ermöglicht. Somit bietet das Assistenzsystem Unterstützung bei der Entscheidungsfindung, die Entscheidung selbst muss aber weiterhin vom Planer getroffen werden. Zur vollständig automatisierten Entscheidungsfindung wäre unter anderem eine umfassendere und automatisierte Bewertung des Nutzens einer Modernisierungsmöglichkeit notwendig. Hierzu wird ein umfangreicheres Informationsmodell benötigt, was aufgrund des höheren Modellierungsaufwands jedoch im Widerspruch zu Anforderung A3 steht. Eine weitergehende Untersuchung von Möglichkeiten zur automatisierten Bewertung von Modernisierungsmöglichkeiten kann als Ausblick dieser Arbeit gesehen werden.

Insgesamt lässt sich aus den beiden Fallstudien sowie der Evaluierung anhand der gestellten Anforderungen schlussfolgern, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Assistenzkonzept anwendbar ist und die Modernisierung von Automatisierungssystemen unterstützen kann. Die Realisierung des Assistenzkonzepts in Form eines Software-Assistenzsystems erleichtert die Anwendung des Konzepts und trägt dadurch zur Anwendbarkeit bei.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die Modernisierung von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung ist momentan ein aufwendiger, meist unsystematisch durchgeführter und damit fehleranfälliger Prozess, der vom Erfahrungswissen der beteiligten Planer abhängt. Dabei sind bei der Modernisierungsplanung verschiedene Herausforderungen zu berücksichtigen, darunter fehlende oder veraltete Dokumentation des Systems, interdisziplinäre Abhängigkeiten sowie die enge Verzahnung des Produkts mit dem fertigenden Automatisierungssystem.

Über eine Betrachtung des Stands von Wissenschaft und Technik wurde gezeigt, dass der Modernisierungsplanungsprozess in der Praxis bislang nicht systematisch durchgeführt wird und dass hierfür kein durchgängiges Modellierungs- und Unterstützungskonzept existiert. Weiterhin ist die Anwendung bestehender Unterstützungskonzepte für einzelne Teilschritte der Planung oft mit Schwierigkeiten und großen Aufwänden verbunden, da keine geeignete Werkzeugunterstützung durch Softwarelösungen vorhanden ist. Zusammengefasst wurde der Bedarf eines Engineering-Assistenzsystems aufgezeigt, das den Modernisierungsplanungsprozess durch ein systematisches Vorgehen und durchgängiges Modellierungskonzept unterstützt, damit den Zeitaufwand der Planung senkt und gleichzeitig die Zahl der betrachteten Handlungsoptionen erhöht.

In dieser Arbeit wurde daher zunächst ein Konzept zur Strukturierung des assistierten Modernisierungsprozesses präsentiert, das sich an die Grundstruktur eines allgemeinen Entscheidungsprozesses anlehnt und damit dem menschlichen Vorgehen folgt. Nach der Erfassung des Ist-Zustands des Systems und dessen Modellierung, wird der Modernisierungsbedarf durch einen Vergleich von Ist- und Soll-Zustand ermittelt. Ausgehend von dem hierbei identifizierten Modernisierungsbedarf werden anschließend verschiedene Modernisierungsmöglichkeiten generiert und bewertet. Diese werden anschließend aggregiert und dem Anwender als Entscheidungsgrundlage bereitgestellt. Im Anschluss an die vom Planer getroffene Entscheidung wird diese implementiert und die dabei gesammelten Erfahrungen in einer Feedbackschleife in das System zurückgeführt, wo sie somit für künftige Planungen zur Verfügung stehen.

In der Verfeinerung des Konzepts wurde ein agentenbasiertes Assistenzsystem zur Modernisierungsplanung vorgestellt, welches den zuvor beschriebenen systematischen Ablauf implementiert und den Anwender durch den Prozess führt. Ein wesentlicher Teil des Assistenzsystems besteht aus dem Informationsmodell des Automatisierungssystems, welches das System mit geringem Aufwand modellieren und dennoch eine Unterstützung der Modernisierungsplanung erlauben soll. Das Modellierungskonzept unterteilt das

Automatisierungssystem in Produkte, Prozesse und Ressourcen und spezifiziert diese durch ihre Eigenschaften (Ist-Zustand). Der Soll-Zustand wird in Form einer Produktionsanfrage in das Assistenzsystem eingegeben, die ebenfalls dem PPR-Prinzip in Anlehnung an die VDI-Richtlinie „Formalisierte Prozessbeschreibungen“ [VDI3682] folgt. Weiterhin berücksichtigt das Assistenzsystem Erfahrungswissen wie Prinziplösungen oder die Wiederverwendung von bekannten Änderungsaufwänden aus früheren Projekten mithilfe des fallbasierten Schließens. Der methodische Ablauf des Assistenzsystems wird dabei von Software-Agenten ausgeführt, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften zur Konzipierung und Realisierung des vorgestellten Assistenzsystems eignen. Die Architektur des Assistenzsystems sieht dabei Agententypen vor, die (1) als Benutzungsschnittstelle dienen, (2) die Struktur des Automatisierungssystems und (3) das Vorgehen der beteiligten Domänenexperten abbilden. Die Architektur des Assistenzsystems bietet durch die Wahl der verwendeten Agententypen Flexibilität hinsichtlich der Anpassbarkeit des methodischen Vorgehens einzelner Phasen als auch eine Erweiterbarkeit um zusätzliche Informationsquellen oder (teil-)automatisiert aggregierte Entscheidungskriterien.

Die Realisierung des Assistenzsystems besteht zum einen aus dem *PPR Model Manager*, der die Erstellung und Verwaltung des Anlagenmodells ermöglicht und hierfür entsprechende Assistenz anbietet und zum anderen aus der eigentlichen Logik zur Modernisierungsplanung, die mithilfe des konzipierten Informationsmodells und den interagierenden Softwareagenten realisiert wurde. Bei der Realisierung wurde das Informationsmodell des Automatisierungssystems vollständig in externe Dateien ausgelagert, wodurch das Assistenzsystem auch ohne Anpassung der eigentlichen Programm- und Agentenlogik auf andere Automatisierungssysteme anwendbar ist. Durch Verwendung des PPR-Prinzips zur Modellierung des Automatisierungssystems und zur Erstellung der Produktionsanfragen wurde ein auf andere mechatronische Systeme übertragbares Modellierungskonzept eingesetzt, wodurch die Übertragbarkeit des Ansatzes auf eine Vielzahl von Automatisierungssystemen gegeben ist. Bei der Realisierung des Assistenzsystems wurden verschiedene Assistenzfunktionen implementiert, die die Anwendung des Assistenzkonzepts erleichtern:

- Bereitstellung einer Prozess- und Ressourcenbibliothek mit wiederverwendbaren Elementen
- Konsistenzprüfung des Modells des Automatisierungssystems
- Bereitstellung einer grafischen Benutzungsoberfläche zur Eingabe von Produktionsanfragen in Anlehnung an die Formalisierte Prozessbeschreibung gemäß [VDI3682]
- Bereitstellung einer grafischen Benutzungsoberfläche zum Vergleich von automatisiert generierten Modernisierungsmöglichkeiten
- Integration einer Vorschlagsfunktion, die dem Benutzer mögliche nächste Schritte anzeigt

Die Evaluierung des softwaregestützten Assistenzkonzepts erfolgte anhand des realisierten Assistenzsystems, das in zwei Fallstudien mit 21 bzw. 26 Modernisierungsszenarien an zwei unterschiedlichen Automatisierungssystemen konfrontiert wurde. Dabei wurde sowohl für den untersuchten Handhabungs- und Bohrautomaten als auch für das modulare Produktionssystem

untersucht, welche Aufwände zur Modellierung des Systems notwendig sind und ob das Assistenzsystem korrekte, nachvollziehbare und anwendbare Vorschläge liefert. Die Aufwände lagen mit 10,5 Stunden bzw. 26 Stunden deutlich unterhalb der Aufwände einer digitalen Planung der beiden Automatisierungssysteme mit heutigen Engineering-Tools und sind, wie die Evaluierung gezeigt hat, von der Erfahrung mit der verwendeten Modellierungsmethodik abhängig. Als Ergebnis der Evaluierung kann festgehalten werden, dass die Korrektheit der Vorschläge gegeben ist, sofern das vom Anwender erstellte Modell korrekt ist. Nachvollziehbarkeit und Anwendbarkeit der vom Assistenzsystem ermittelten Vorschläge hängen von der Granularität des Modells ab. Da die Vorschläge auf Parameterebene präsentiert werden, ist im Regelfall eine gedankliche Transferleistung notwendig, um das Ergebnis zu interpretieren. Beispielsweise kann ein Modernisierungsvorschlag des Assistenzsystems die Erhöhung des Betriebsdrucks einer Ressource sein. Wenn in den Abhängigkeiten der PPR-Parameter bereits qualitativ modelliert wurde, dass der Betriebsdruck von einem Druckminderer beeinflusst wird und ursprünglich von einem Kompressor erzeugt wurde, dann enthält die Modernisierungsmöglichkeit bereits diese beiden Informationen und kann somit einen konkreten Ansatzpunkt zur Modernisierung liefern, der anderenfalls erst vom Planer ermittelt werden müsste. Die Granularität des Modells kann bei Bedarf stetig verfeinert werden, wie insbesondere in der zweiten Fallstudie gezeigt wurde. Dort wurden verfeinerte Zusammenhänge teils erst später in das Modell eingegeben, um die Generierung von Modernisierungsmöglichkeiten zu präzisieren. Dies hilft dabei, den initialen Aufwand zur Modellerstellung zu reduzieren und speziell die Bereiche innerhalb des Automatisierungssystems näher zu betrachten, die potenziell von einer Modernisierung betroffen sind.

Insgesamt wurde durch die vorliegende Arbeit ein Beitrag zur Effizienzsteigerung bei der Modernisierungsplanung von Automatisierungssystemen in der diskreten Fertigung erreicht. Durch die (Teil-)Automatisierung und Systematisierung des Planungsprozesses kann die Reproduzierbarkeit und Fehlerfreiheit der Planung gesteigert werden, gleichzeitig können mehr Alternativen untersucht werden, was potenziell die Lösungsqualität steigert, da der Lösungsraum umfassender betrachtet wird. Weiterhin bieten das Informationsmodell und die präsentierte Architektur des Agentensystems durch ihre Übertragbarkeit das Potenzial, auch für verwandte Problemstellungen eingesetzt werden zu können, was im folgenden Kapitel näher diskutiert wird. Im Bereich der Entwurfsmuster für Agentensysteme erfolgte bereits eine Analyse des Ansatzes und eine Klassifikation der verwendeten Agententypen [MMV+18].

8.2 Ausblick

Im Verlauf dieser Arbeit sowie insbesondere bei der Evaluierung des Konzepts wurden einige Punkte identifiziert, die Anknüpfungspunkte für künftige Forschungsvorhaben bieten können.

- **Teilautomatisierte Erstellung des Anlagenmodells:** Um den Aufwand zur Modellierung des Automatisierungssystems zu reduzieren, existiert bereits eine Prozess- und Ressourcenbibliothek, in der häufig vorkommende Systemelemente und ihre Abhängigkeiten hinterlegt werden können. Dennoch ist der in den beiden Fallstudien erfasste zusätzliche Zeitaufwand zur Modellierung des Systems ein mögliches Hindernis bei der Übertragung des Assistenzkonzepts in die industrielle Anwendung. Zur Reduzierung dieses Zeitaufwands können Verfahren zur automatisierten bzw. teilautomatisierten Erstellung des Anlagenmodells erforscht werden. Beispiele hierfür sind die Auswertung von Planungsdokumenten [Arro17] oder die Erkennung von Objekten mittels 3D-Laserscan. Im Bereich des 3D-Laserscans gibt es Bestrebungen, aus den Punktwolken einen digitalen Zwilling des Systems zu erzeugen, der ebenfalls für die Modernisierungsplanung genutzt werden könnte [MUS18, LVJ17, ENH+15].
- **Erweiterung der Bewertung und Visualisierung der Flexibilität einer Modernisierungsmöglichkeit:** Aufgrund der Vielschichtigkeit des Begriffs der Flexibilität von Produktionssystemen wurde die Bewertung der Flexibilität einer Modernisierungsmöglichkeit in dieser Arbeit vereinfacht als Vergrößerung der Breite des Flexibilitätskorridors eines Prozessparameters gemäß Richtlinie [VDI5201] interpretiert. In der Literatur existieren darüber hinaus zahlreiche Ansätze zur Messung von einzelnen Teilflexibilitäten. Es könnte daher untersucht werden, wie sich diese in das Assistenzsystem einbinden lassen und welche zusätzlichen Informationen im Informationsmodell bereitgestellt oder vom Benutzer abgefragt werden müssen, um diese Flexibilitätsmetriken zu integrieren. Der Aufbau des Agentensystems erlaubt die modulare Integration zusätzlicher Flexibilitätsmetriken innerhalb des *FlexibilityAspectAgenten*. Darüber hinaus besteht implementierungstechnisches Potenzial bei der Visualisierung und beim Vergleich der ermittelten Flexibilitätsmaße.
- **Evaluierung der Aufwandsabschätzung mittels fallbasiertem Schließen und Untersuchung der Übertragbarkeit auf Hardwareänderungen:** Aufgrund der erforderlichen Datengrundlage über einen längeren Zeitraum zur Evaluierung der Aufwandsabschätzung von softwarebasierten Modernisierungsmöglichkeiten, wurde das Aufwandsabschätzungskonzept Rahmen dieser Arbeit lediglich im Rahmen von praktischen Labortübungen mit insgesamt 16 Gruppen mit jeweils vier Studierenden evaluiert. Die Studierenden mussten in der Gruppe jeweils vier Aufgaben bearbeiten, welche die Erstellung bzw. Änderung eines SPS-Programmes zum Ziel hatten. Parallel dazu wendeten sie das in [MaWe2017] präsentierte Aufwandsabschätzungskonzept an. Die Ergebnisse [Zhan18] deuten auf eine Anwendbarkeit des Aufwandsabschätzungsverfahrens hin, der Fehler der Schätzung liegt dabei mit ca. 20% im Rahmen anderer Literaturquellen [MoJo03]. Eine Evaluierung des Aufwandsabschätzungskonzepts in industriellen SPS-Projekten über einen längeren Zeitraum könnte interessante Ergebnisse liefern, da die Kombination aus der

Anwendung von Softwaremetriken zur Aufwandsabschätzung von SPS-Änderungen mittels fallbasiertem Schließen bislang nicht untersucht wurde. Auch die Übertragbarkeit des auf fallbasiertem Schließen beruhenden Ansatzes auf Hardwareänderungen könnte künftig untersucht und in das Assistenzsystem integriert werden.

- **Untersuchung des Transferpotenzials des Assistenzsystems:** Sowohl das im Assistenzsystem verwendete Informationsmodell des Automatisierungssystems als auch die Architektur des Assistenzsystems selbst sind durch den gewählten Aufbau überwiegend generisch konzipiert und bieten dadurch das Potenzial auch für andere Planungs-Problemstellungen im Bereich mechatronischer Systeme eingesetzt zu werden. Auch der an den allgemeinen Entscheidungsprozess angelehnte Ablauf innerhalb des Assistenzsystems unterstützt dessen Übertragbarkeit. Dieser grundlegende Ablauf des Assistenzprozesses kann voraussichtlich mit geringfügigen, anwendungsfallspezifischen Anpassungen auch für andere Problemstellungen verwendet werden. Das Informationsmodell des Automatisierungssystems ist durch die Verwendung des PPR-Prinzips allgemein für mechatronische Systeme in der Fertigung geeignet und kann bei Bedarf anwendungsfallabhängig um Energie- und Informationsflüsse ergänzt werden, die ebenfalls Bestandteil der formalisierten Prozessbeschreibung nach [VDI3682] sind. Zudem ist es möglich, bisher qualitativ modellierte Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern durch, aufwendiger zu ermittelnde, quantitative Zusammenhänge zu ersetzen. Neben einer Anpassung des Informationsmodells ist hierfür auch eine Anpassung der Algorithmen innerhalb der verwendeten Agententypen notwendig, welche mit diesen Informationen arbeiten. Als Ausblick hinsichtlich des Informationsmodells ist darüber hinaus die Verwendung eines etablierten Austauschformats, beispielsweise AutomationML, zu nennen. Die Architektur des Agentensystems und insbesondere die Aufteilung der Agententypen in Stellvertreter des Automatisierungssystems, Domänenexperten und eine Benutzungsschnittstelle ist als Blaupause ebenfalls auf andere Problemstellungen übertragbar, wenn ein Planungsprozess durch ein Assistenzsystem unterstützt werden soll. Implementierungstechnische Anpassungen der Algorithmen der Agenten sind hierbei insbesondere in der Benutzungsschnittstelle und den damit direkt kommunizierenden Agententypen (z.B. *ProductRequestAnalyzerAgent*) zu erwarten. Ein Beispiel für eine Planungs-Problemstellung, für die das Assistenzsystem eingesetzt werden könnte, wird in [HoFa19] beschrieben. Dort werden Teile der innerhalb des Assistenzsystems implementierten Methodik dazu verwendet, um neben der Generierung von Anpassungsmöglichkeiten einer Hochspannungsprüfmaschine auch mögliche Kombinationen an geeigneten Stationen für eine Hochspannungsprüfung zu finden.
- **Untersuchung der Darstellungsform von PPR-Parameterabhängigkeiten:** Im Rahmen dieser Arbeit wurde das in [HMWF17] präsentierte Konzept zur Modellierung von Abhängigkeiten zwischen PPR-Parametern in Form einer MDM verwendet. Bei der Evaluierung in den beiden Fallstudien hat sich gezeigt, dass diese Darstellungsform bei

zunehmender Größe der Matrizen unübersichtlich werden kann. Beim Ausfüllen der Matrizen am Computer kann man vom Ein- und Ausblenden von Zeilen und Spalten Gebrauch machen, da sich die Einträge in der Matrix meist auf bestimmte Bereiche konzentrieren, da die Abhängigkeiten zwischen den Elementen meist lokal begrenzt sind. Bei einer Analyse der Abhängigkeiten auf Papier, die in der Praxis noch weit verbreitet ist [FWF18], beispielsweise an der Maschine selbst, besteht diese Möglichkeit der selektiven Anzeige von Zeilen und Spalten nicht, sodass die Matrixdarstellung schnell unübersichtlich wird. Weiterhin ist die Aufteilung voneinander unabhängiger Parameterabhängigkeiten in mehreren Zeilen der MDM beim Arbeiten auf Papier problematisch. In diesem Rahmen könnten andere Darstellungsformen erforscht werden, die sich ggf. auch ineinander überführen lassen.

Literaturverzeichnis

- [AJSW18a] B. Ashtari Talkhestani, N. Jazdi, W. Schloegl, M. Weyrich: *Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points*. In: Proc. CIRP, 72, 2018, S. 159-164.
- [AJSW18b] B. Ashtari Talkhestani, N. Jazdi, W. Schloegl, M. Weyrich: *A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method*. Procedia CIRP, 67, 2018, S. 13-17.
- [Arro17] E. Arroyo Esquivel: *Capturing and Exploiting Plant Topology and Process Information as a Basis to Support Engineering and Operational Activities in Process Plants*. Dissertation, Hamburg, 2017.
- [ASW17] B. Ashtari Talkhestani, W. Schlögl, M. Weyrich: *Synchronisierung von digitalen Modellen: Anwendung einer Ankerpunktmethode für Fertigungszellen*. atp, 59(07-08), S. 62 ff., 2017.
- [AutoML] *AutomationML*
<https://www.automationml.org/>
- [AWC13] N. Ahmad, D. C. Wynn, P. J. Clarkson: *Change impact on a product and its redesign process: a tool for knowledge capture and reuse*. In: Research in Engineering Design, 24(3), 2013, S. 219-244.
- [BaRe17] J. Backhaus, G. Reinhart: *Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems*. In: Journal of Intelligent Manufacturing, 28(8), 2017, S. 1787-1800.
- [BCH+95] B. Boehm, B. Clark, E. Horowitz, C. Westland, R. Madachy, R. Selby: *Cost models for future software life cycle processes: COCOMO 2.0*. In: Annals of software engineering, 1(1), 1995, S. 57-94.
- [BCK+09] D. Blutner, S. Cramer, S. Krause, T. Mönks, L. Nagel, A. Reinholz, M. Witthaut: *Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung*. In Große Netze der Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, S. 241-270.
- [BDR+84] J. Browne, D. Dubois, K. Rathmill, S. P. Sethi, K. E. Stecke: *Classification of flexible manufacturing systems*. The FMS magazine, 2(2), 1984, S.114-117.
- [BeKe03] C. Beierle, G. Kern-Isberner: *Methoden wissensbasierter Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2003.
- [BeSä09] M. Bellgran, E. K. Säften: *Production development: design and operation of production systems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [Beye19] T. F. Beyer: *Agentenbasiertes Engineering und Reengineering von automatisierten Systemen in der Grobplanung*. Dissertation IAS, Universität Stuttgart, 2019. IAS-Forschungsberichte, Bd. 3/2019.

- [BFK+10] R. Birkhofer, G. Feldmeier, J. Kalhoff, C. Kleedörfer, M. Leidner, R. Mildener, M. Mühlhause, J. Niemann, R. Schrieber, J. Wickinger, M. Winzenick, M. Wollschläger: *Life-Cycle-Management für Produkte und Systeme der Automation – Ein Leitfaden des Arbeitskreises Systemaspekte im ZVEI Fachverband Automation*, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., 2010.
- [BGYW16] T. Beyer, P. Göhner, R. Yousefifar, K. H. Wehking: *Agent-based dimensioning to support the planning of Intra-Logistics systems*. In 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2016, S. 1-4.
- [BHB09] K. Bellmann, F. Himpel, and A. Böhm: *Messung von Flexibilität in der Produktion*. In: Strategisches und operatives Produktionsmanagement, Gabler. 2009, S. 221-240.
- [BHS07] I. Boersch, J. Heinsohn, R. Socher: *Wissensverarbeitung. Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure*. Elsevier Spektrum Akad. Verl., München, 2007.
- [BMKW18] F. Biesinger, D. Meike, B. Kraß, M. Weyrich: *A Case Study for a Digital Twin of Body-in-White Production Systems: General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory*. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2018, S. 19-26.
- [BMO01] B. Bauer, J. P. Müller, J. Odell: *Agent UML: A formalism for specifying multiagent software systems*. In: International journal of software engineering and knowledge engineering, 11(03), 2001, S. 207-230.
- [Boeh81] B. W. Boehm: *Software engineering economics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, London, 1981.
- [Boyd96] J. R. Boyd: The essence of winning and losing. Unpublished lecture notes, 12(23), 1996, S. 123-125.
- [BrMa89] P. H. Brill, M. Mandelbaum: *On measures of flexibility in manufacturing systems*. The International Journal of Production Research, 27(5), 1989, S. 747-756.
- [BuEb11] L. Buglione, C. Ebert: *Estimation tools and techniques*. In: IEEE software, 28(3), 2011, S. 91-94.
- [BuMa08] J. A. Buzacott, M. Mandelbaum: *Flexibility in manufacturing and services: achievements, insights and challenges*. In: Flexible Services and Manufacturing Journal, 20(1-2), 2008, S. 13-58.
- [BWS+12] R. Birkhofer, M. Wollschlaeger, R. Schrieper, M. Winzenick, J. Kalhoff, C. Kleedörfer, M. Mühlhause, J. Niemann: *Life-cycle-management for automation products and systems. A guideline by the system aspects working group of the ZVEI Automation Division*. ZVEI Automation Division, Frankfurt, 2012.
- [CaGl90] D. Card, R. Glass: *Measuring Software Design Quality*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.

- [Card19] O. Cardin: *Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework*. In: *Computers in Industry*, 104, 2019, S. 11-21.
- [CBF03] C. Carabelea, O. Boissier, A. Florea: *Autonomy in multi-agent systems: A classification attempt*. In *International Workshop on Computational Autonomy*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2003, S. 103-113.
- [CoPo02] M. Cossentino, C. Potts: *A case tool supported methodology for the design of multi-agent systems*. In: *Proceedings of the 2002 International Conference on Software Engineering Research and Practice (SERP'02)*, Las Vegas, CSREA Press, 2002.
- [CSE04] P. J. Clarkson, C. Simons, C. Eckert: *Predicting change propagation in complex design*. In: *Journal of mechanical design*, 126(5), 2004, S. 788-797.
- [CuWa13] J. J. Cui, D. Y. Wang: *Application of knowledge-based engineering in ship structural design and optimization*. In: *Ocean Engineering*, 72, 2013, S. 124-139.
- [Dale82] B. G. Dale: *The management of engineering change procedure*. In: *Engineering management international*, 1(3), 1982, S. 201-208.
- [Das96] S. K. Das: *The measurement of flexibility in manufacturing systems*. In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 8(1), 1996, S. 67-93.
- [DBIS] *Universität Rostock - Lehrstuhl für Datenbank- und Informationssysteme*
<https://dbis.informatik.uni-rostock.de/forschung/schwerpunkte/assistentensysteme/>
- [DiJu19] C. Diedrich, U. Jumar: *Entwurf komplexer Automatisierungssysteme*. at-*Automatisierungstechnik*, 67(3), 2019, S. 169-171.
- [DIN8580] DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Deutsches Institut für Normung, 2003.
- [DIN91280] DIN SPEC 91280: *Technikunterstütztes Leben (AAL) - Klassifikation von Dienstleistungen für Technikunterstütztes Leben im Bereich der Wohnung und des direkten Wohnumfelds*. Deutsches Institut für Normung, 2012.
- [DYN00] S. K. Das, P. Yedlarajiah, R. Narendra: *An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost*. In: *International Journal of Production Research*, 38(3), 2000, S. 657-673.
- [EDL07] S. Engell, A. Dandachi, S. Lohmann: *Impact of complexity on logic controller design*. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(6), 2007, S. 121-126.
- [EIA112] H. A. ElMaraghy, T. AlGeddawy: *Co-evolution of products and manufacturing capabilities and application in auto-parts assembly*. In: *Flexible services and manufacturing journal*, 24(2), 2012, S. 142-170.

- [EN61131-1] DIN EN 61131-1: Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Informationen (IEC 61131-1:2003); Deutsche Fassung EN 61131-1:2003, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2004.
- [ENH+15] G. Erdős, T. Nakano, G. Horváth, Y. Nonaka, J. Váncza: *Recognition of complex engineering objects from large-scale point clouds*. CIRP Annals, 64(1), 2015, S. 165-168.
- [Fang96] D. Fang: *Entwicklung eines wissensbasierten Assistenzsystems für die Planung von Lagersystemen*. Verlag Praxiswissen, 1996.
- [Fay05] A. Fay: *Engineering in vernetzten, offenen, durchgängigen Systemen (Engineering in Linked and Open Systems)*. In: at-Automatisierungstechnik, 53(4-5/2005), 2005, S. 205-210.
- [Feig77] E. A. Feigenbaum: *The art of artificial intelligence. 1. Themes and case studies of knowledge engineering (No. STAN-CS-77-621)*. Stanford University CA Dept of Computer Science, 1977.
- [FGNI00] E. Fricke, B. Gebhard, H. Negele, E. Igenbergs: *Coping with changes: causes, findings, and strategies*. Systems Engineering, 3(4), 2000, S. 169-179.
- [FGOT11] G. Fei, J. Gao, O. Owodunni, X. Tang: *A method for engineering design change analysis using system modelling and knowledge management techniques*. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 24(6), 2011, S. 535-551.
- [Figa10] H. Figalist: *Funktionale Anlagenbeschreibung in der Modernisierungsplanung & Sicht von Metals Technologies*. Vortrag im Rahmen des VDE Arbeitskreises: Durchgängiges Engineering von Anlagen, Nürnberg, 2010.
- [FKV14] S. Feldmann, K. Kernschmidt, B. Vogel-Heuser: *Combining a SysML-based modeling approach and semantic technologies for analyzing change influences in manufacturing plant models*. Procedia Cirp, 17, 2014, S. 451-456.
- [FLR10] P. Ferreira, N. Lohse, S. Ratchev: *Multi-agent architecture for reconfiguration of precision modular assembly systems*. In International Precision Assembly Seminar. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 247-254.
- [FVF+15] A. Fay, B. Vogel-Heuser T. Frank, K. Eckert, T. Hadlich, C. Diedrich: *Enhancing a model-based engineering approach for distributed manufacturing automation systems with characteristics and design patterns*. In: Journal of Systems and Software, 101, 2015, S. 221-235.
- [FWF18] A. Fay, M. E. Witte, H. Figalist: *Modellbasierte Verfahren in der Automation von Produktionsanlagen*. at-Automatisierungstechnik, 66(5), 2018, S. 357-359.
- [Ghar06] W. Gharieb: *Software quality in ladder programming*. In 2006 International Conference on Computer Engineering and Systems. IEEE, 2006, S. 150-154.

- [Gher18a] M. Ghermezi: *Delta-Vergleich von Modellen des Digitalen Zwillings für Produktionsanlagen*. Forschungsarbeit Nr. 2946, IAS, Universität Stuttgart, 2018.
- [Gher18b] M. Ghermezi: *Entwurf und Realisierung eines Digitalen Zwillings einer automatisierten Fertigungszelle auf Basis einer Integrationsplattform*. Masterarbeit Nr. 3004, IAS, Universität Stuttgart, 2018.
- [HaCh16] S. Harivardhini, A. Chakrabarti: *A new model for estimating End-of-Life disassembly effort during early stages of product design*. In: *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(5), 2016, S. 1585-1598.
- [HaCl88] J. R. Hauser, D. Clausing: *The house of quality*, 1988.
- [Hal77] M. H. Halstead: *Elements of software science*. Elsevier computer science library, vol 2. Elsevier, New York, Oxford [etc.], 1977.
- [HeSe90] S. Henry, C. Selig: *Predicting source-code complexity at the design stage*. *IEEE Software*, 7(2), 1990, S. 36-44.
- [HFMW16] X. L. Hoang, A. Fay, P. Marks, M. Weyrich: *Systematization approach for the adaptation of manufacturing machines*. In: 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2016.
- [HFMW17] X. L. Hoang, A. Fay, P. Marks, M. Weyrich: *Generation and impact analysis of adaptation options for automated manufacturing machines*. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2017.
- [HHF18] X. L. Hoang, C. Hildebrandt, A. Fay, A: *Product-oriented description of manufacturing resource skills*. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 2018, S. 90-95.
- [HHM18] F. Hoffmann, F. Hüllermeier, R. Mikut (Hrsg): *Proceedings. 28. Workshop Computational Intelligence*, Dortmund, 29. - 30. November 2018, KIT Scientific Publishing, 2018.
- [HMWF17] X. L. Hoang, P. Marks, M. Weyrich, A. Fay: *Modeling of interdependencies between products, processes and resources to support the evolution of mechatronic systems*. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 2017, S. 4348-4353.
- [HoFa19] X. L. Hoang, A. Fay: *A Capability Model for the Adaptation of Manufacturing Systems*. In: 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2019, S. 1053-1060.
- [IAA15] A. Idri, F. Azzahra Amazal, A. Abran: *Analogy-based software development effort estimation: A systematic mapping and review*. In: *Information and Software Technology*, 58, 2015, S. 206-230.
- [IEC20926] ISO/IEC 20926: *Software and systems engineering — Software measurement — IFPUG functional size measurement method*. International Electrotechnical Commission, 2009.

- [IEC61131-10] IEC 61131-10: *Programmable controllers - Part 10: PLC open XML exchange format*. International Electrotechnical Commission, 2019.
- [IEC61131-3] IEC 61131-3: *Programmable controllers - Part 3: Programming languages*. International Electrotechnical Commission, 2013.
- [JADE] *JADE (Java Agent DEvelopment Framework)*
<https://jade.tilab.com/>
- [Järv12] E. Järvenpää. *Capability-based adaptation of production systems in a changing environment*. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication; 1082, 2012.
- [JCE05] T. Jarratt, J. Clarkson, C. Eckert: *Engineering change*. In: Design process improvement. Springer, London, 2005, S. 262-285.
- [JECC11] T. A. W. Jarratt, C. M. Eckert, N. H. Caldwell, P. J. Clarkson: *Engineering change: an overview and perspective on the literature*. In: Research in engineering design, 22(2), 2011, S. 103-124.
- [Jenn01] Jennings, N. R.: *An agent-based approach for building complex software systems*. Communications of the ACM, 44 (4), 2001, S. 35-41.
- [KaRe15] F. Karl, G. Reinhart: *Reconfigurations on manufacturing resources: identification of needs and planning*. In: Production Engineering, 9(3), 2015, S. 393-404.
- [KCC12] E. C. Koh, N. H. Caldwell, P. J. Clarkson: *A method to assess the effects of engineering change propagation*. In: Research in Engineering Design, 23(4), 2012, S. 329-351.
- [KeVo13] K. Kernschmidt, B. Vogel-Heuser: *An interdisciplinary SysML based modeling approach for analyzing change influences in production plants to support the engineering*. In 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2013, S. 1113-1118.
- [KHJ+99] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, H. Van Brussel: *Reconfigurable manufacturing systems*. CIRP annals, 48(2), 1999, S. 527-540.
- [KLH92] M. Kloth, I. Land, J. Herrmann: *Ein wissenschaftliches Assistenzsystem für die Fabriklayoutplanung*. In: Information als Produktionsfaktor (pp. 657-666). Springer, Berlin, Heidelberg, 1992.
- [Koch17] J. Koch: *Manufacturing Change Management – a Process-Based Approach for the Management of Manufacturing Changes* (Doctoral dissertation, Technische Universität München), 2017.
- [Ladi18] J. Ladiges: *Automatisierte Bestimmung von Eigenschaften industrieller Produktionssysteme unter Einfluss evolutionärer Änderungen*. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2018.
- [LKP+05] A. Lüder, A. Klostermeyer, J. Peschke, A. Bratoukhine, T. Sauter: *Distributed automation: PABADIS versus HMS*. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, 1(1), 2005, S. 31-38.

- [KABL02] R. A. Klein, F. Anhäuser, M. Burmeister, J. Lamers: *Planungswerkzeuge aus Sicht eines Inhouse-Planers*. In: atp – Automatisierungstechnische Praxis, Heft 1, 2002, S. 46 - 50.
- [KBB+16] R. Kruse, C. Borgelt, C. Braune, S. Mostaghim, M. Steinbrecher: *Computational intelligence: a methodological introduction*. Springer, 2016.
- [KOE99] D. B. Kaber, E. Omal, M. Endsley: *Level of automation effects on telerobot performance and human operator situation awareness and subjective workload*. In: Automation technology and human performance: Current research and trends, 1999, S. 165-170.
- [KoNa92] V. P. Kochikar, T. T. Narendran: *A framework for assessing the flexibility of manufacturing systems*. In: The International Journal Of Production Research, 30(12), 1992, S. 2873-2895.
- [Kurb89] K. Kurbel: *Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen. Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme*. Springer, Berlin, 1989.
- [Lanz10] M. Lanz: *Logical and semantic foundations of knowledge representation for assembly and manufacturing processes*. Tampere University of Technology. Publication 903, 2010.
- [LHFL14] J. Ladiges, C. Haubeck, A. Fay, W. Lamersdorf: *Evolution management of production facilities by semi-automated requirement verification*. at-Automatisierungstechnik, 62(11), 2014, S. 781-793.
- [LiCh09] F. Li, N. Chen: *An intelligent assistant design system based on CBR and MAS*. In 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. IEEE, 2009, S. 1335-1339.
- [LuTi05] M. R. Lucas, D. M. Tilbury: *Methods of measuring the size and complexity of PLC programs in different logic control design methodologies*. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26(5-6), 2005, S. 436-447.
- [LVJ17] E. Lindskog, J. Vallhagen, B. Johansson: *Production system redesign using realistic visualisation*. In: International Journal of Production Research, 55(3), 2017, S. 858-869.
- [MaEs08] M. Marcos, E. Estevez: *Model-driven design of industrial control systems*. In 2008 IEEE International Conference on Computer-Aided Control Systems. IEEE, 2008, S. 1253-1258.
- [MaWe17] P. Marks, M. Weyrich: *Assistenzsystem zur Aufwandsabschätzung der Software-Evolution von automatisierten Produktionssystemen*. In: Automation 2017 27.-28.06.2017 Baden-Baden, 2017.
- [McCa76] T. J. McCabe: *A complexity measure*. In: IEEE Transactions on software Engineering, (4), 1976, S. 308-320.
- [MHB92] R. Maull, D. Hughes, J. Bennett: *The role of the bill-of-materials as a CAD/CAPM interface and the key importance of engineering change control*. Computing & Control Engineering Journal, 3(2), 1992, S. 63-70.

- [MHFW18] P. Marks, X. L. Hoang, M. Weyrich, A. Fay: *A systematic approach for supporting the adaptation process of discrete manufacturing machines*. In: Research in Engineering Design, 29(4). 2018, S. 621-641.
- [MMDH14] D. Monticolo, S. Mihaita, H. Darwich, V. Hilaire: *An agent-based system to build project memories during engineering projects*. In: Knowledge-Based Systems, 68, 2014, S. 88-102.
- [MMV+18] P. Marks, T. Müller, D. Vögeli, T. Jung, N. Jazdi, M. Weyrich: *Agent Design Patterns for Assistance Systems in Various Domains - a Survey*. In: 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2018, S. 168-173.
- [MoJo03] K. Molokken, M. Jorgensen: *A review of software surveys on software effort estimation*. In 2003 International Symposium on Empirical Software Engineering, 2003. ISESE 2003. Proceedings. IEEE, 2003, S. 223-230.
- [MSZL03] S. Ma, B. Song, W. Lu, C. F. Zhu: *A knowledge-supported system for engineering change impact analysis*. In ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2003, S. 439-447.
- [Müll97] B. Müller: *Reengineering: Eine Einführung*, Stuttgart: Vieweg+Teubner Verlag, 1997.
- [MUS18] J. Meidow, T. Usländer, K. Schulz: *Obtaining as-built models of manufacturing plants from point clouds*. at-Automatisierungstechnik, 66(5), 2018, S. 397-405.
- [MWHF17] P. Marks, M. Weyrich, X. L. Hoang, A. Fay: *Agent-based adaptation of automated manufacturing machines*. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2017.
- [MYW18] P. Marks, Q. Yu, M. Weyrich: *Survey on flexibility and changeability indicators of automated manufacturing systems*. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2018, S. 516-523.
- [NSA+16] S. Nejati, M. Sabetzadeh, C. Arora, L. C. Briand, F. Mandoux: *Automated change impact analysis between SysML models of requirements and design*. In Proceedings of the 2016 24th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering. ACM, 2016, S. 242-253.
- [NtPa88] C. A. Ntuen, E. H. Park: *Human factor issues in teleoperated systems*. In: Proceedings of the First International Conference on Ergonomics of Hybrid Automated Systems I. Elsevier Science Publishers BV, 1988, S. 203-210.
- [NMWW18] R. Noortwyck, T. Müller, K. H. Wehking, M. Weyrich: *Dezentrale assistierte Planung: Integrierte Layout-und Systemplanung von Intralogistiksystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Software*. In: Logistics Journal: Proceedings, 2018(01), 2018.

- [ODU13] M. Obst, F. Doherr, L. Urbas: *Wissensbasiertes Assistenzsystem für modulares Engineering*. In: at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik, 61(2), 2013, S. 103-108.
- [OISt04] G. A. Ollinger, T. F. Stahovich: *RedesignIT—a model-based tool for managing design changes*. In: Journal of Mechanical Design, 126(2), 2004, S. 208-216.
- [OmHa92] P. Oman, J. Hagemeyer: *Metrics for assessing a software system's maintainability*. In Proceedings Conference on Software Maintenance 1992. IEEE, 1992, S. 337-344.
- [Pech14] S. Pech: *Agentenbasierte Informationsgewinnung für automatisierte Systeme*. Dissertation IAS, Universität Stuttgart, 2014. IAS-Forschungsberichte, Bd. 1/2014.
- [PiMa98] P. Pikosz, J. Malmqvist: *A comparative study of engineering change management in three Swedish engineering companies*. In Proceedings of the DETC98 ASME design engineering technical conference, 1998, S. 78-85.
- [Qu17] L. Qu: *Agentenbasiertes Assistenzsystem zur Flexibilisierung von automatisierten Produktionsanlagen*. Masterarbeit Nr. 2885, IAS, Universität Stuttgart, 2016.
- [Raus15] M. Rauscher: *Agentenbasierte Konsistenzprüfung heterogener Modelle in der Automatisierungstechnik*. Dissertation IAS, Universität Stuttgart, 2015. IAS-Forschungsberichte, Bd. 2/2015.
- [ReMo09] K. Reddi, Y. Moon: *A framework for managing engineering change propagation*. In: International Journal of Innovation and Learning 6(5), 2009, S. 461–476.
- [RFSE11] S. Runde, A. Fay, S. Schmitz, U. Epple: *Wissensbasierte Systeme im Engineering der Automatisierungstechnik*. In: at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik, 59(1), 2011, S. 42-49.
- [Ried17] M. Riedel: *Ein Beitrag zur wissensbasierten Unterstützung bei der Auswahl technischer Ressourcen: Repräsentation und Auswertung von Prinziplösungen auf Basis multidimensionaler, heterogener, vernetzter Merkmalsräume*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 470: Rechnerunterstützte Verfahren, VDI Verlag, 2017.
- [RiFa14] M. Riedel, A. Fay: *Wissensbasierte Auswahl von Prinziplösungen – Geeignete Messverfahren automatisch finden*. atp – Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 56 (11), 2014, S. 52–63.
- [Rund11] S. Runde: *Wissensbasierte Engineeringunterstützung in der Automatisierungstechnik am Beispiel der Gebäudeautomation*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 434: Rechnerunterstützte Verfahren, VDI Verlag, 2011.

- [ScDr09] M. Schleipen, R. Drath: *Three-view-concept for modeling process or manufacturing plants with AutomationML*. In 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. IEEE, 2009, S. 1-4.
- [Schm08] T. Schmidberger: *Wissensbasierte Auswertung von Anlagen-Planungsdaten für die Unterstützung des Prozessleittechnik-Ingenieurs – Anwendung einer rollenbasierten Mustersuche*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 415: Rechnergestützte Verfahren, VDI Verlag, 2008.
- [Schw19] M. Schwaderer: *Erweiterung eines agentenbasierten Assistenzsystems zur Modernisierungsplanung*. Studienarbeit Nr. 3057, IAS, Universität Stuttgart, 2019.
- [SCV13] H. Seemüller, M. Chami, H. Voos: *Agentenbasierte Koordination und Überwachung des Designs mechatronischer Systeme*. In Agentensysteme in der Automatisierungstechnik (pp. 255-273). Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [SeSe90] A. K. Sethi, S. P. Sethi: *Flexibility in manufacturing: a survey*. In: International journal of flexible manufacturing systems, 2(4), 1990, S. 289-328.
- [ShVe78] T. B. Sheridan, W. L. Verplank: *Human and computer control of undersea teleoperators*. Massachusetts Inst of Tech Cambridge Man-Machine Systems Lab, 1978.
- [SLD13] R. Shibl, M. Lawley, J. Debuse: *Factors influencing decision support system acceptance*. Decision Support Systems, 54(2), 2013, S. 953-961.
- [Stru14] M. Strube: *Modellgestützte Modernisierungsplanung industrieller Automatisierungslösungen*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 459: Rechnerunterstützte Verfahren, VDI Verlag, 2014.
- [TeLo99] C. Terwiesch, C. H. Loch: *Managing the process of engineering change orders: the case of the climate control system in automobile development*. In: Journal of Product Innovation Management, 16(2), 1999, S. 160-172.
- [Thie16] A. Thiehove: *Konzeption eines qualitativen Aufwandsabschätzungsverfahrens für Änderungen an SPS-Programmen*. Forschungsarbeit Nr. 2802, IAS, Universität Stuttgart, 2016.
- [ThSc89] N. H. C. Thuy, P. Schnupp: *Wissensverarbeitung und Expertensysteme*. Handbuch der Informatik. 6, Muenchen u.a.: Oldenbourg, 1989.
- [TKVL11] S. Truchat, A. Kohlein, J. Vollmar, U. Lowen: *Model Driven Plant Modernization: A Vision of Model Based Industrial Engineering*. In 2011 International Conference on Management and Service Science. IEEE, 2011, S. 1-4.
- [TrEp18] C. von Trotha, U. Epple: *Assistenzsysteme in der Prozessindustrie: Ein Versuch der Klassifikation*. In: 19. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik 2018, Baden-Baden, 2018, S. 529-542.

- [Tuul18a] S. Tuul: *Erweiterung eines agentenbasierten Assistenzsystems zur Flexibilisierung von automatisierten Produktionsanlagen*. Forschungsarbeit Nr. 2951, IAS, Universität Stuttgart, 2018.
- [Tuul18b] S. Tuul: *Untersuchung und Implementierung von Assistenzfunktionen in ein Assistenzsystem zur Modernisierungsplanung*. Masterarbeit Nr. 3005, IAS, Universität Stuttgart, 2018.
- [Unity] *Unity*
<https://unity3d.com/>
- [VDF+14] B. Vogel-Heuser, C. Diedrich, A. Fay, S. Jeschke, S. Kowalewski, M. Wollschlaeger, P. Göhner: *Challenges for software engineering in automation*. In: *Journal of Software Engineering and Applications*, 7(05), 2014, S. 440-451.
- [VDI2206] VDI 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Verein Deutscher Ingenieure, 2004.
- [VDI2653] VDI 2653: *Agentensysteme in der Automatisierungstechnik*. Verein Deutscher Ingenieure, 2018.
- [VDI3682] VDI/VDE 3682 Blatt 1: *Formalisierte Prozessbeschreibungen - Konzept und grafische Darstellung*. Verein Deutscher Ingenieure, 2015.
- [VDI3695] VDI/VDE 3695 Blatt 1: *Engineering von Anlagen - Evaluieren und optimieren des Engineerings - Grundlagen und Vorgehensweise*. Verein Deutscher Ingenieure, 2010.
- [VDI5201] VDI 5201: *Wandlungsfähigkeit - Beschreibung und Messung der Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen - Beispiel Medizintechnik*. Verein Deutscher Ingenieure, 2017.
- [VGW19] D. Vögeli, P. Göhner, M. Weyrich: *Flexibles Framework zur Parallelisierung von simulationsbasierten Entwicklungsaufgaben in der Automatisierungstechnik*. *at-Automatisierungstechnik*, 67(3), 2019, S. 218-231.
- [VoKe14] B. Vogel-Heuser, K. Kernschmidt: *Modellbasiertes disziplinübergreifendes Management von IT-Zyklen in Innovationsprozessen*. In: *Innovationsprozesse zyklensorientiert managen: Verzahnte Entwicklung von Produkt-Service Systemen*. Springer, 2014, S. 30-44.
- [VoFa18] B. Vogel-Heuser, A. Fay: *Methods to support the evolution of Cyber Physical Production Systems*. In: *at-Automatisierungstechnik*, 66(10), 2018, S. 781-783.
- [VFST15] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schaefer, M. Tichy: *Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions*. In: *Journal of Systems and Software*, 110, 2015, S. 54-84.
- [Wagn08] T. Wagner: *Agentenunterstütztes Engineering von Automatisierungsanlagen*. Dissertation IAS, Universität Stuttgart, 2008. IAS-Forschungsberichte, Bd. 1/2008.

- [Wand05] H. Wandke: *Assistance in human-machine interaction: a conceptual framework and a proposal for a taxonomy*. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(2), 2005, S. 129-155.
- [WCBL15] M. Wickel, N. Chucholowski, F. Behncke, U. Lindemann: *Comparison of seven company-specific engineering change processes*. In *Modelling and Management of Engineering Processes* (pp. 125-136). Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [WeDr10] D. Weidemann, R. Drath: *Übersicht von Softwarewerkzeugen in Engineering*. In: R. Drath (Hrsg.): *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*. Springer Verlag Heidelberg, 2010, S. 5.
- [WeJa06] G. Weiß, R. Jakob: *Agentenorientierte Softwareentwicklung: Methoden und Tools*. Springer-Verlag, 2006.
- [WEN+07] H. P. Wiendahl, H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H. H. Wiendahl, N. Duffie, M. Brieke: *Changeable manufacturing-classification, design and operation*. In: *CIRP annals*, 56(2), 2007, S. 783-809.
- [WGU03] T. Wagner, P. Göhner, P. de A. Urbano: *Softwareagenten – Einführung und Überblick über eine alternative Art der Softwareentwicklung. Teil I: Agentenorientierte Softwareentwicklung*. In: *atp – Automatisierungstechnische Praxis* 45 (2003), H. 10, S. 48-57.
- [WJK00] M. Wooldridge, N. R. Jennings, D. Kinny: *The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design*. *Autonomous Agents and multi-agent systems*, 3(3), 2000, S. 285-312.
- [WoDe01] M. F. Wood, S. A. DeLoach: *An overview of the multiagent systems engineering methodology*. In *International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000, S. 207-221.
- [Wool02] M. Wooldridge: *Intelligent Agents: The Key Concepts*. In *Proceedings of the 9th ECCAI-ACAI/EASSS 2001, AEMAS 2001, HoloMAS 2001 on Multi-Agent-Systems and Applications*. Springer-Verlag, 2002, S. 3-43.
- [Wrig97] I. C. Wright: *A review of research into engineering change management: implications for product design*. *Design Studies*, 18(1), 1997, S. 33-42.
- [WWBF14] M. Weyrich, I. Wior, D. Bchennati, A. Fay: *Flexibilisierung von Automatisierungssystemen*. *Systematisierung der Flexibilitätsanforderungen von Industrie*, 4, 2014, S. 106-111.
- [WWL08] M. I. M. Wahab, D. Wu, C. G. Lee: *A generic approach to measuring the machine flexibility of manufacturing systems*. In: *European Journal of Operational Research*, 186(1), 2008, S. 137-149.
- [YaDu12] F. Yang, G. J. Duan: *Developing a parameter linkage-based method for searching change propagation paths*. In: *Research in Engineering Design*, 23(4), 2012, S. 353-372.

- [YoFr07] M. B. Younis, G. Frey, G: *Software quality measures to determine the diagnosability of PLC applications*. In 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007), IEEE, 2007, S. 368-375.
- [Yu18] Q. Yu: *Entwurf und Realisierung einer Oberfläche zur Verwaltung eines Anlagenmodells*. Masterarbeit Nr. 3008, IAS, Universität Stuttgart, 2018.
- [Zhan18] K. Zhang: *Entwicklung von Änderungsszenarien an SPS-Programmen zur Evaluierung eines Assistenzsystems zur Aufwandsabschätzung*. Masterarbeit Nr. 2968, IAS, Universität Stuttgart, 2018.
- [ZJW19] A. Zeller, N. Jazdi, M. Weyrich: *Functional verification of distributed automation systems*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, S. 1-14.
- [ZRL+11] M. F. Zäh, G. Reinhart, U. Lindemann, F. Karl, W. Biedermann: *DSM-based evaluation of assembly manufacturing resources*. In DSM 2011: Proceedings of the 13th International DSM Conference, 2011.
- [ZXD+17] J. Zhang, G. Xue, H. Du, A. Garg, Q. Peng, P. Gu: *Enhancing interface adaptability of open architecture products*. In: Research in Engineering Design, 28(4), 2017, S. 545-560.

Anhang A: XML-Schema des Modells des Automatisierungssystems

In diesem Anhang wird die Struktur des vom PPR Model Manager verwalteten Teils des Informationsmodells des Automatisierungssystems beschrieben (vgl. Abbildung 6.1 und Kapitel 6.1.2.1). Das nachfolgende XML-Schema definiert den Aufbau der XML-Datei, welche die Informationen des Produkt-Prozess-Ressourcenmodells und die Topologieinformationen enthält.

```
<?xml version="1.0"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
attributeFormDefault="unqualified" elementFormDefault="qualified">
  <xs:element name="component-based" type="xs:string" />
  <xs:element name="software-based" type="xs:string" />
  <xs:element name="process-specific" type="xs:string" />
  <xs:element name="structure-based" type="xs:string" />
  <xs:element name="parameter-space">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="component-based" minOccurs="0" maxOccurs="1" />
        <xs:element ref="software-based" minOccurs="0" maxOccurs="1" />
        <xs:element ref="process-specific" minOccurs="0" maxOccurs="1" />
        <xs:element ref="structure-based" minOccurs="0" maxOccurs="1" />
      </xs:sequence>
      <xs:attribute type="xs:string" name="unit" use="required" />
      <xs:attribute type="xs:string" name="name" use="required" />
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="physical_address" type="xs:string" />
  <xs:element name="Station_IO">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="physical_address" maxOccurs="unbounded"
minOccurs="1" />
      </xs:sequence>
      <xs:attribute type="xs:string" name="controller_name" />
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="parameter-spaces">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="parameter-space" maxOccurs="unbounded"
minOccurs="0" />
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="resource">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="Station_IO" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
        <xs:element ref="parameter-spaces" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
      </xs:sequence>
      <xs:attribute type="xs:string" name="name" use="required" />
      <xs:attribute type="xs:string" name="id" use="required" />
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>
```

```

<xs:element name="max_number_input" type="xs:nonNegativeInteger" />
<xs:element name="max_number_output" type="xs:nonNegativeInteger" />
<xs:element name="process">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="parameter-spaces" maxOccurs="1"
        minOccurs="1" />
      <xs:element ref="resource" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
      <xs:element ref="max_number_input" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
      <xs:element ref="max_number_output" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
    </xs:sequence>
    <xs:attribute type="xs:string" name="name" use="required" />
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="manufacturing_processes">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="process" maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" />
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="material_flow">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="process" maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" />
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="station">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="manufacturing_processes" maxOccurs="1"
        minOccurs="1" />
      <xs:element ref="material_flow" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="id" use="required" type="xs:ID"/>
    <xs:attribute type="xs:string" name="name" use="required" />
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="transportProcesses">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="process" maxOccurs="unbounded" minOccurs="1" />
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="stations">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="station" maxOccurs="unbounded" minOccurs="1" />
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="from">
<xs:complexType>
  <xs:sequence>
    <xs:any minOccurs="1" maxOccurs="unbounded" processContents='skip' />
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="between">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>

```

```

    <xs:any minOccurs='1' maxOccurs='unbounded' processContents='skip' />
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="to">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:any minOccurs='1' maxOccurs='unbounded' processContents='skip' />
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="link">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="from" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
      <xs:element ref="to" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
    </xs:sequence>
    <xs:attribute type="xs:boolean" name="bidirectional" use="required" />
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="links">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="link" maxOccurs="unbounded" minOccurs="0" />
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="controller_name">
  <xs:complexType>
    <xs:simpleContent>
      <xs:extension base="xs:string">
        <xs:attribute type="xs:string" name="id"/>
      </xs:extension>
    </xs:simpleContent>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="components">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="stations" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
      <xs:element ref="transportProcesses" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
      <xs:element ref="links" maxOccurs="1" minOccurs="1" />
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
  <xs:unique name="unique-id">
    <xs:selector xpath="stations/*/*/*resource | transportProcesses/*/*resource
| stations/*"/>
    <xs:field xpath="@id" />
  </xs:unique>
</xs:element>
</xs:schema>

```

Lebenslauf

Persönliche Daten

24.06.1989 geboren in Göppingen

Schulbildung

1995 – 1999 Ursenwangschule (Grundschule), Ursenwang

1999 – 2008 Freihof-Gymnasium, Göppingen, Abschluss Abitur

Zivildienst

2008 – 2009 Christophsbad Göppingen, Elektrowerkstatt

Studium

2009 – 2014 Studium der Elektro- und Informationstechnik an der Universität Stuttgart
Schwerpunkt: Automatisierungs- und Energietechnik

14.10.2014 Abschluss als Master of Science

Berufstätigkeit

seit November 2007 Einzelunternehmer im Bereich Webentwicklung

Januar 2015 - März 2020 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme der Universität Stuttgart

seit März 2017 Geschäftsführer der KTsolutions GmbH

seit Mai 2020 Software Development Engineer Infrastructure & Automation bei der Vector Informatik GmbH