

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Gestaltung und Planung von merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystemen für die autonome Produktion

Lucas Kiefer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr. Michael Henke

Die Dissertation wurde am 18.06.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 24.08.2020 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, den Leitern des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb). Bei Herrn Prof. Reinhart bedanke ich mich für die Betreuung der Arbeit sowie die Diskussionen zur ihrer Weiterentwicklung. Herrn Prof. Zäh danke ich sehr für die Übernahme der Rolle des Mentors. Darüber hinaus möchte ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser für die Übernahme des Prüfungsvorsitz und bei Herrn Prof. Dr. Michael Henke bedanken, welcher sich der Thematik als Zweiprüfer angenommen hat.

Darüber hinaus bedanke ich mich recht herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen. Neben der fachlichen Unterstützung hat insbesondere die kollegiale und kreative Atmosphäre dazu beigetragen, dass mir die Arbeit am Institut immer Freude bereitet hat. Insbesondere möchte ich mich bei Dr.-Ing. Georg Götz, Peter Simon, Christian Gebbe, Dr.-Ing. Christoph Richter und Prof. Dr.-Ing. Peter Stich bedanken.

Einen herzlichen Dank auch an alle Service-Center. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Michael Hammerstädt, der die Implementierung des Agentensystems in unserer Infrastruktur ermöglicht hat, sowie Kurt Hartmann, der als Werkstattmeister eine große Stütze bei der Erstellung der Demonstratoren und Versuchsaufbauten war. Ein besonderer Dank gilt außerdem allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Freundin und meiner Familie, die mich immer gestärkt haben, und allen Freunden, welche mich bei der Verbesserung der Arbeit unterstützt haben.

In der vorliegenden schriftlichen Ausarbeitung wurde stets der männliche Terminus verwendet. Dies ist keinesfalls despektierlich zu interpretieren und dient ausschließlich der Verbesserung des Leseflusses.

Augsburg, im Januar 2020

Lucas Kiefer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		i
Abkürzungsverzeichnis		vii
Verzeichnis der Formelzeichen		ix
1 Einleitung		1
1.1 Ausgangssituation.....		1
1.2 Problemstellung		3
1.3 Zielsetzung und Betrachtungsbereich.....		4
1.4 Wissenschaftliche Konzeption und Aufbau		6
2 Grundlagen von Selbststeuerungssystemen		7
2.1 Produktionssteuerung		7
2.1.1 Begriffsdefinition und Abgrenzung zur Produktionsplanung ...		7
2.1.2 Selbststeuerung und Selbststeuerungssysteme		11
2.1.3 Objekte.....		13
2.2 Identifikation in Selbststeuerungssystemen.....		14
2.2.1 Begriffsdefinition.....		14
2.2.2 Indirekte Identifikationsverfahren		14
2.2.3 Direkte Identifikationsverfahren.....		15
2.3 Lokalisierung in Selbststeuerungssystemen		18
2.3.1 Begriffsdefinition.....		18
2.3.2 Lokalisierungsverfahren		18
2.4 Kommunikation in Selbststeuerungssystemen		19

2.4.1	Begriffsdefinition	19
2.4.2	Steuerungsarchitekturen in der Produktion	19
3	Stand der Wissenschaft und Technik	23
3.1	Selbststeuerungssysteme in der Produktion	23
3.1.1	Autonomie in Produktionssystemen.....	23
3.1.2	Systemansätze zur Selbststeuerung der Produktion	25
3.1.3	Analyse und Fazit	28
3.2	Direkte Identifikation anhand von Merkmalen und Sensorsystemen	29
3.2.1	Objektmerkmale	29
3.2.2	Sensorsysteme	30
3.2.3	Auswahl und Integration von Sensorsystemen	34
3.2.4	Analyse und Fazit	37
3.3	Indoorlokalisierung mittels aktiver und passiver Technologien	38
3.3.1	Lokalisierungstechnologien.....	38
3.3.2	Analyse und Fazit	39
3.4	Kommunikation auf Basis von Agentensystemen in der Produktion	40
3.4.1	Referenzmodelle von Agentensystemen	40
3.4.2	Frameworks	42
3.4.3	Agentensysteme und Objektagenten	43
3.4.4	Entwicklung von Agentensystemen	44
3.4.5	Analyse und Fazit	47
3.5	Übergreifendes Fazit und Handlungsbedarf.....	48

4	Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems	49
4.1	Randbedingungen und Anforderungen an das System.....	49
4.1.1	Randbedingungen	49
4.1.2	Anforderungen	50
4.2	Komponenten und Struktur	51
4.2.1	Identifikation in einem MASS	52
4.2.2	Lokalisierung in einem MASS	55
4.2.3	Kommunikation in einem MASS	59
4.2.4	Struktur des Agentensystems eines MASS	64
4.3	Rollen und Aufgaben der Agenten	65
4.3.1	Objektagent.....	65
4.3.2	Fertigungsagent.....	66
4.3.3	Transportagent	68
4.3.4	Lageragent	68
4.3.5	Visualisierungsagent.....	68
4.3.6	Bereichsagent und Verwaltungsagent	69
4.4	Analyse des Ansatzes und methodischer Handlungsbedarf	69
5	Methodik zur Planung und Konfiguration von MASS	71
5.1	Randbedingungen und Anforderungen an die Methodik	73
5.2	Übersicht der Methodik	77
5.3	Methode zur Eignungsprüfung von Selbststeuerungssystemen	80
5.3.1	Methodeneinsatz klären	80
5.3.2	Methode auswählen	81
5.3.3	Methode generieren	82

5.4	Methode zur Definition identifizierbarer Merkmale	92
5.4.1	Methodeneinsatz klären.....	92
5.4.2	Methode auswählen	93
5.4.3	Methode anpassen und generieren	94
5.5	Methode zur Integration direkter Identifikationsverfahren in Handhabungsprozesse	104
5.5.1	Methodeneinsatz klären.....	104
5.5.2	Methode auswählen	105
5.5.3	Methode anpassen und generieren	105
5.6	Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme	114
5.6.1	Methodeneinsatz klären.....	114
5.6.2	Methode auswählen	115
5.6.3	Methode anpassen und generieren	117
5.7	Zusammenfassung der Methodik	131
6	 Umsetzung, Anwendung und Bewertung	133
6.1	Softwaretechnische Umsetzung der Werkzeuge	133
6.1.1	Werkzeug zur Merkmalsanalyse und Sensorauswahl	133
6.1.2	Kombiniertes Werkzeug zur Rollendefinition und Codegenerierung.....	135
6.1.3	Simulations- und Evaluationstool	137
6.2	Anwendung am Beispiel des Projekts RoboFill4.0.....	138
6.2.1	Eignungsprüfung	139
6.2.2	Merkmalsdefinition	141
6.2.3	Integrationsprozess	143

6.2.4	Planung und Konfiguration eines Agentensystems	146
6.3	Weiterführende Umsetzung	152
6.3.1	Merkmalsanalyse	152
6.3.2	Integration von Sensoren in Handhabungsgeräte	153
6.4	Bewertung	156
6.4.1	Bewertung der Methodik	156
6.4.2	Technische und wirtschaftliche Bewertung des Systems	159
7	Schlussbetrachtung.....	165
7.1	Zusammenfassung und Fazit	165
7.2	Ausblick	167
8	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten und eigener Veröffentlichungen	169
8.1	Studienarbeiten	169
8.2	Eigene Veröffentlichungen.....	170
9	Literaturverzeichnis	171
10	Anhang.....	208
10.1	Weiterführende Informationen zum Stand der Wissenschaft und Technik	208
10.2	Weiterführende Informationen zum Ansatz eines MASS	213
10.3	Weiterführende Informationen zur Methodik und ihrer Entwicklung	225
10.3.1	Anwendung des Münchner Methodenmodells	225
10.3.2	Einsatz des strukturellen Komplexitätsmanagements	227
10.3.3	Ergänzende Tabellen zur Entwicklung der Methodik	229

10.3.4 Ergänzende Grundlagen zu verwendeten Modellen und methodischen Hilfsmitteln im Rahmen der Methodik	235
10.3.5 Werkzeuge und Hilfsmittel der Fabrikplanung	242
10.3.6 Angewendete methodische Grundprinzipien und Vorgehensweisen.....	244
10.4 Weiterführende Informationen zum Anwendungsbeispiel RoboFill4.0	246

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ACL	Agent Communication Language dt. Agentenkommunikationssprache
AID	Agentenidentifikationsnummer
AM	Anforderung an die Methodik
AS	Anforderung an das System
AMS	Agentenmanagementsystem
BVS	Bildverarbeitungssystem
CAD	Computer-Aided Design
DF	Directory Facilitator
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
ERP	Enterprise Resource Planning
Et al.	Et alii, dt.und andere
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GPS	Global Positioning System
HHG	Handhabungsgerät
HHS	Handhabungssystem
HLC	High Level Control
ID	Identifikationsnummer bzw. Identifikator

Abkürzungsverzeichnis

IDSS	Identifikatorbasiertes Selbststeuerungssystem
LLC	Low Level Control
MAS	Merkmals- und agentenbasierte Selbststeuerung
MASS	Merkmals- und agentenbasiertes Selbststeuerungssystem
MDM	Multiple Domain Matrix
MES	Manufacturing Execution System
MMM	Münchener Methodenmodell
nD	N-dimensional
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RFID	Radio Frequency Identification dt. Radiofrequenz-Identifikation
RGB	Rot-Grün-Blau (Wert)
RM	Randbedingung für die Methodik
RS	Randbedingung für das System
SAM	Spezifische Anforderung an eine Methode
SFB	Sonderforschungsbereich
SOA	Serviceorientierte Architektur
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TCP	Tool Center Point dt. Ursprung des Werkzeugkoordinatensystems
UML	Unified Modelling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

Verzeichnis der Formelzeichen

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	<i>Grad</i>	<i>Winkelvariable</i>
β	<i>Grad</i>	<i>Winkelvariable</i>
γ	<i>Grad</i>	<i>Winkelvariable</i>

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$pp_{b,i}$	-	<i>Anzahl herstellbarer Teile durch Betriebsmittel i</i>
$pb_{o,j}$	-	<i>Anzahl potenzieller Betriebsmittel für Objekt j</i>
b_i	-	<i>Betriebsmittel i</i>
o_j	-	<i>Objekt j</i>
t	-	<i>Laufvariable für die Anzahl der Perioden</i>
i	-	<i>Kalkulationszinsfuß für Kapitalwertmethode, wird auch als Laufvariable verwendet</i>
s	-	<i>Steuersatz für Kapitalwertmethode</i>
f	<i>m</i>	<i>Brennweite</i>
g	<i>m</i>	<i>Gegenstandsweite</i>
b	<i>m</i>	<i>Bildweite</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
AfA_t	€	<i>Abschreibungen in Periode t</i>
AS_i	-	<i>Aktivsumme eines Elements i</i>
A_t	€	<i>Ausgehende Zahlungsströme in Periode t</i>
E_t	€	<i>Eingehende Zahlungsströme in Periode t</i>
EW	-	<i>Eintrittswahrscheinlichkeit</i>
F	-	<i>Theoretische Flexibilität</i>
I_0	€	<i>Investitionssumme in Periode 0</i>
KW	€	<i>Kapitalwert</i>
PS_i	-	<i>Passivsumme eines Elements i</i>
T	<i>Jahre (a)</i>	<i>Betrachtungszeitraum</i>

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Globalisierung, die Zunahme an bedarfsorientiertem Kaufverhalten, neue Gesetze (z. B. Verpackungsgesetz 2019) sowie die steigende Innovationsdynamik führen zu einer ansteigenden externen Komplexität und zu einer notwendigen Leistungssteigerung von industriellen Prozessen. Im Fokus dieser Leistungssteigerung steht als primärer Ort der Leistungserfüllung die Produktion (NYHUIS & WIENDAHL 2012). Zu den Komplexitätstreibern in produzierenden Unternehmen zählen individuellere und komplexere Produkte (REINHART & ZÄH 2003, GÜNTNER & HOMPEL 2010, WILDEMANN 2016). Diese führen zu einer erhöhten Anzahl an Einzelteilen, welche stärker voneinander abhängig sind und somit die interne Komplexität zunehmend erhöhen (LINDEMANN ET AL. 2006, LINDEMANN ET AL. 2009) (vgl. Abbildung 1-1).

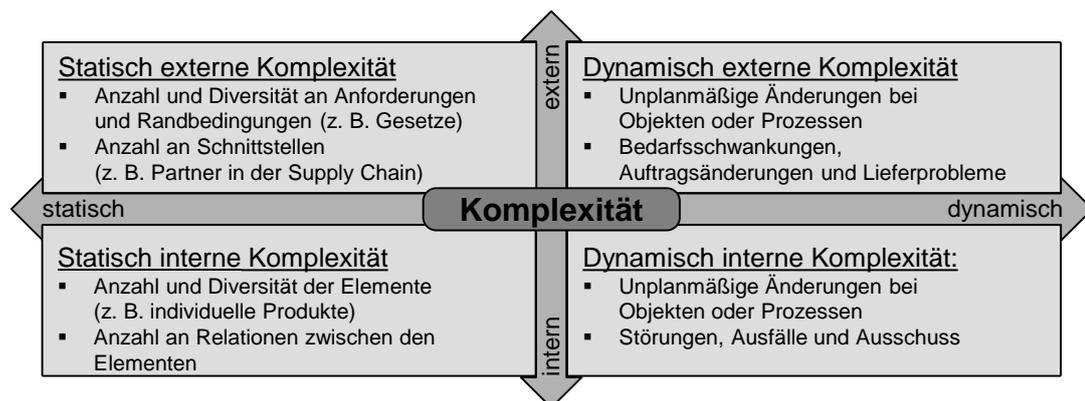


Abbildung 1-1: Dimensionen der Komplexität (SCHOLZ-REITER ET AL. 2006)

Verstärkt wird die produktgetriebene Komplexität durch den Trend zu kundeninnovierten Produkten, bei denen der Kunde aktiv in den Entstehungsprozess eingreift (REINHART ET AL. 2014, ATUG ET AL. 2016). Dieser hohe Grad der Individualisierung erfordert individuelle Produktionsprozesse, welche den einzelnen Produkten und Bauteilen zugeordnet werden müssen. Neben der, aus dem Produkt stammenden, statisch internen Komplexität wirken weitere Faktoren (z. B. kurzfristige Auftragsänderungen) negativ auf die Planungssicherheit in der Produktion ein. Die resultierende Systemkomplexität spiegelt sich vorrangig in dem Verhalten des Systems wider (LINDEMANN ET AL. 2009). Bezugnehmend auf produzierende Unternehmen können Produktionsabläufe durch die Komplexität negativ beeinflusst werden (NYHUIS ET AL. 2016). In erster Linie äußert sich dieser

1 Einleitung

Einfluss in vielen Umplanungen, welche kurzfristig umgesetzt werden müssen. Dies führt zu einem Wunsch nach einer höheren Reaktionsfähigkeit, welche mit 60 % den größten Treiber für eine Dezentralisierung in 170 befragten Unternehmen darstellt (SEITZ & NYHUIS 2015). Darüber hinaus sehen zwei Drittel ihre Produktionsplanung und -steuerung (PPS) als nicht zukunftsfähig an und nennen mit über 50 % eine gestiegene Komplexität als Ursache (SEITZ & NYHUIS 2015).

Viele kurzfristige Änderungen erschweren eine konventionelle Planung deutlich. Die Bündelung aller Informationen an einer zentralen Entscheidungsstelle und die anschließende Übermittlung der Entscheidung über mehrere Informationsebenen hinweg ist für diese komplexen Zusammenhänge zu starr (WEIGELT 1994, GRONAU & THEUER 2016). Stattdessen sollen Entscheidungen direkt vor Ort getroffen werden, um der steigenden Komplexität mit einer verteilten Problemlösung in der Produktionssteuerung zu begegnen (SCHUH ET AL. 2007, REINHART 2017, HENKE & KUHN 2017). Zu diesem Zweck eignen sich heterarchische Systeme, in welchen sich die Produkte selbst steuern (BAUERNHANSL ET AL. 2014, WILLEKE ET AL. 2017). Durch eine eigens initiierte Kommunikation und Abstimmung von Produkten und Betriebsmitteln in Abhängigkeit von ihrer aktuellen Produktionssituation sollen die Systemelemente lokale Optima finden und auf diese Weise die Wirtschaftlichkeit der Produktion verbessern (BAUERNHANSL ET AL. 2014). Diese autonomen Produktionssteuerungen werden als Selbststeuerungssysteme bezeichnet und stellen eine Alternative zur konventionellen PPS dar.

Der Einsatz von Selbststeuerungssystemen ist an drei Voraussetzungen gebunden: Identifikation, Lokalisierung und Kommunikation (WINDT & HÜLSMANN 2007, SCHULDT 2012, VEIGT ET AL. 2015). Während in den Bereichen Lokalisierung und vor allem Kommunikation der Systemelemente die bestehenden Ansätze stetig weiterentwickelt werden, wird die Identifikation auf industrielle Standards reduziert. Folglich werden in den bestehenden Selbststeuerungssystemen durchweg Identifikator(ID)-basierte Systeme (z. B. Barcode oder RFID) eingesetzt. Alternative Identifikationsverfahren werden bislang nicht übergreifend betrachtet.

1.2 Problemstellung

ID-basierte Identifikationssysteme unterliegen prozessbedingten Einschränkungen und sind für große Teile des Herstellungsprozesses nicht geeignet (WIGGER ET AL. 2018). Vor allem in einem frühen Stadium der Bearbeitung können IDs nicht an Objekten angebracht werden. Die folgende Weiterverarbeitung (z. B. spanende Bearbeitung, Lackierung, etc.) würde die ID umgehend zerstören bzw. ein Auslesen des Datenträgers unmöglich machen (SCHLICK ET AL. 2014). Folglich wird durch aufwendige und kostspielige Verfahren versucht, die ID im Inneren des Bauteils zu integrieren (PILLE 2010) oder diese Systeme werden im frühen Produktionsstadium nicht eingesetzt. Unabhängig von der Art der Integration oder Anbringung einer ID an einem Objekt entstehen mengenabhängige Kosten, welche den potenziellen Einsparungen durch eine dezentrale Steuerung gegenüberstehen (CLASEN 2007, FINKENZELLER 2015). Der ID-Typ und die benötigten Lesegeräte stellen die größten Kostenpositionen und die wichtigsten Entscheidungsgrößen für den Einsatz von Identifikationssystemen dar (IRRENHAUSER 2014).

Unabhängig von der Auswahl des ID-Systems besteht die Problematik der fehlenden Abdeckung der gesamten Prozesskette. Mehrere Ansätze versuchen diese Problematik durch den Einsatz von Werkstückträgern zu umgehen. Diese können beliebig mit einer ID versehen und durch ein Update des Datensatzes wiederverwendet werden. Der Einsatz von Werkstückträgern ist für die zunehmende Fertigung individueller Güter bzw. von Kleinserien nur wirtschaftlich, wenn diese auf die Objekte angepasst sind und für die Bearbeitung nicht entfernt werden müssen (HESSE 2013). Dies ist vor allem im frühen Stadium der Bearbeitung (Trennen, Umformen, etc.) lediglich mit einem hohen Aufwand realisierbar. Aufgrund der resultierenden zusätzlichen Kosten werden Werkstückträger maßgeblich für Logistikprozesse und zur Kommissionierung von Objekten für die Montage verwendet (HESSE 2013).

Zusammenfassend stellen die mengenabhängigen Kosten und die fehlende vollständige Abdeckung der Prozesskette die zentralen Hemmnisse für den Einsatz von Identifikatoren dar. Ein alternativer Ansatz ist die direkte bzw. merkmalsbasierte Identifikation. In diesen Identifikationsansätzen wird statt einem beigelegten oder angebrachten Datenträger ein Objekt anhand seiner Merkmale identifiziert (KRÄMER 2002). Eine ID-basierte oder auch indirekte Identifikation kommt bspw. einer Passkontrolle gleich. Das Pendant zur Identifizierung einer Person auf direktem Weg ist der Scan des Fingerabdrucks.

1.3 Zielsetzung und Betrachtungsbereich

Wird eine kostengünstige Selbststeuerung durchgängig und übergreifend eingesetzt, verkürzt sich die Amortisationszeit der benötigten Systemkomponenten und die Wirtschaftlichkeit der Produktion wird trotz einer steigenden Komplexität langfristig gesichert. Diese Durchgängigkeit zu ermöglichen, stellt das übergeordnete Ziel der folgenden Untersuchungen und Ausführungen dar. Um dieses zu erreichen, gilt es, alternative Identifikationsverfahren zu analysieren, welche die Bearbeitungsprozesse nicht durch zusätzliche Hilfsteile negativ beeinflussen bzw. in welchen zusätzliche Hilfsteile durch die Bearbeitungsprozesse nicht beschädigt werden. Hierbei gilt es, zudem unterschiedliche Fertigungstypologien zu untersuchen, um die Grenzen der Anwendungsbereiche derartiger Systeme zu definieren. Im Fokus stehen folglich direkte Identifikationsverfahren, die auf ihre Integrationsfähigkeit in ein produktionstechnisches Umfeld als auch in die Prozesse einer Selbststeuerung überprüft werden. Zu diesem Zweck soll eine Methodik erarbeitet werden, welche die Entwicklung eines initialen Systemansatzes vorausgehen muss, um konkrete Anforderungen zu sammeln.

Im Hinblick auf den Einsatz in einer Produktion ist ein ableitbares Teilziel die szenariospezifische Definition von Merkmalen, die als identifizierbar deklariert werden können. Diesen Merkmalen stehen verschiedene Identifikationssysteme gegenüber, die im Bereich direkter Verfahren mit Sensorsystemen gleichzusetzen sind. Diese erfassen die Merkmale, z. B. physikalische Größen der Objekte, und liefern die Basis für eine Soll-Ist-Vergleich-basierte Identifikation. Im Anschluss gilt es, diese Systeme in die Produktion, ihre Prozesse und die dort beteiligten Betriebsmittel zu integrieren. Für die Integration in das produktionstechnische Umfeld soll der Dreiklang aus Produkt, Prozess und Ressource (STANEV ET AL. 2009) vollständig berücksichtigt werden, um Zielkonflikte zu vermeiden. Gleiches gilt für die Integration in ein Selbststeuerungssystem, welches ebenfalls eigene Prozesse und Systemelemente besitzt. Besonders zu fokussieren sind die drei fundamentalen Bausteine und Voraussetzungen von Selbststeuerungssystemen (Identifikation, Lokalisierung und Kommunikation). Diese weisen untereinander eine hohe Abhängigkeit auf, sodass ein weiteres Teilziel darin besteht, die Auswirkungen auf die Lokalisierung sowie die Kommunikationsweise durch eine veränderte Identifikation zu erfassen und, falls notwendig, alternative Lösungsansätze zu entwickeln.

Um die auf der Zielsetzung basierenden, zentralen wissenschaftlichen Fragestellungen zu fokussieren, wird der Betrachtungsbereich der Arbeit in zwei

1.3 Zielsetzung und Betrachtungsbereich

Dimensionen (Struktur und Zeit) eingegrenzt. Der Kern der wissenschaftlichen Untersuchungen ist die Identifikation der Objekte auf der Ebene der einzelnen Arbeitsstationen. Sofern die Identifikation zwischen den Arbeitsstationen stattfindet, gilt es, die einzelnen Produktionsbereiche bzw. Logistikbereiche ebenfalls zu betrachten. Aus Sicht des Selbststeuerungssystems, welches von allen Ebenen bis hin zur Generalstruktur beeinflusst wird, folgt die Notwendigkeit, die ersten vier Ebenen der allgemeinen Produktionsstruktur (WIENDAHL 2005) zu untersuchen. Demzufolge liegen Produktionsstandorte wie auch übergeordnete Netzwerke außerhalb des Betrachtungsbereichs (vgl. Abbildung 1-2). Die zeitliche Dimension wird im Hinblick auf den Fabriklebenszyklus auf die Planungsphase fokussiert. Auf diese Weise können potenzielle Merkmale ohne Einschränkungen abgeleitet werden. Die Menge dieser Merkmale gilt es in einer späteren Anwendung entsprechend szenariospezifisch zu untersuchen. Aus dieser Einschränkung folgt schließlich ein weiteres Teilziel, das erarbeitete Erfahrungswissen in der Planungsphase von Fabriken nutzbar zu machen.

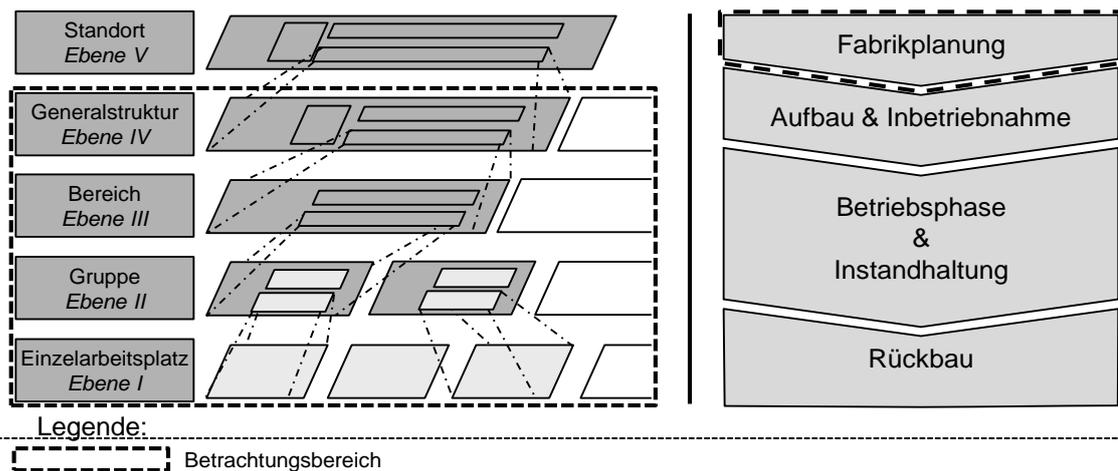


Abbildung 1-2: Strukturelle (links) und zeitliche (rechts) Betrachtungsbereiche in Anlehnung an (WIENDAHL 2005)

Aus den gewählten Betrachtungsbereichen ist abzuleiten, dass im Rahmen dieser Arbeit nicht die Konzeptionierung und Gestaltung eines Selbststeuerungssystems für einen bestimmten Anwendungsfall fokussiert wird. Stattdessen wird initial ein Referenzsystem konzeptioniert und gestaltet, welches die Anforderungen hinsichtlich Identifikation, Lokalisierung und Kommunikation erfüllt, um basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen eine Entwicklungsmethodik abzuleiten. Mithilfe dieser Methodik soll eine szenariospezifische Planung und Konfiguration von Selbststeuerungssystemen auf Basis direkter Identifikationsverfahren in einer frühen Planungsphase ermöglicht werden. Der Erreichung dieses Ziels ist die

1 Einleitung

folgende wissenschaftliche Konzeption und eine systematische Vorgehensweise zugrunde gelegt, welche sich im Aufbau der Arbeit widerspiegeln.

1.4 Wissenschaftliche Konzeption und Aufbau

Das angestrebte Grundkonzept für ein alternatives Selbststeuerungssystem führt in seiner Ausarbeitung zu einer im produktionstechnischen Umfeld anzusiedelnden Methodik, welche nach ULRICH & HILL (1976) den anwendungs- und handlungsorientierten Realwissenschaften zuzuordnen ist. Dieser Wissenschaftsbereich zeichnet sich dadurch aus, dass eine vorliegende Problemstellung mit dem bis dato zur Verfügung stehenden Wissen nicht gelöst werden kann. Folglich gilt es, dieses fehlende Wissen zu definieren, zu erarbeiten und anschließend in eine Methodik zu integrieren. Diese baut auf dem Stand der Wissenschaft und Technik auf und wird durch die Erkenntnisse aus der Konzeptionierung und Gestaltung eines merkmalsbasierten Selbststeuerungssystems ergänzt. Diese Ableitung und Integration von Erfahrungswissen spiegelt sich im Aufbau der Arbeit (vgl. Abbildung 1-3) wider. Die Aufarbeitung des bestehenden Wissens ist in die allgemeine Selbststeuerung sowie deren Voraussetzungen, Identifikation, Lokalisierung und Kommunikation gegliedert. Um die bestehenden Ansätze mit dem erworbenen Erfahrungswissen zu kombinieren, orientiert sich das Vorgehen zur Entwicklung der Methodik an dem Münchner Methodenmodell (MMM), in welchem bestehende Methoden analysiert und im Hinblick auf die vorliegende Problemstellung adaptiert bzw. erweitert werden (LINDEMANN 2009). Die Anwendung der erarbeiteten Methodik stellt den abschließenden Schritt des MMM dar und wird nach der Beschreibung der einzelnen Methoden adressiert. Diese exemplarische Anwendung als auch die entstehende Umsetzung des konzipierten Steuerungssystems bilden die Basis für die Bewertung der Ergebnisse sowie die im Ausblick beschriebenen potenziellen zukünftigen Forschungsfelder.

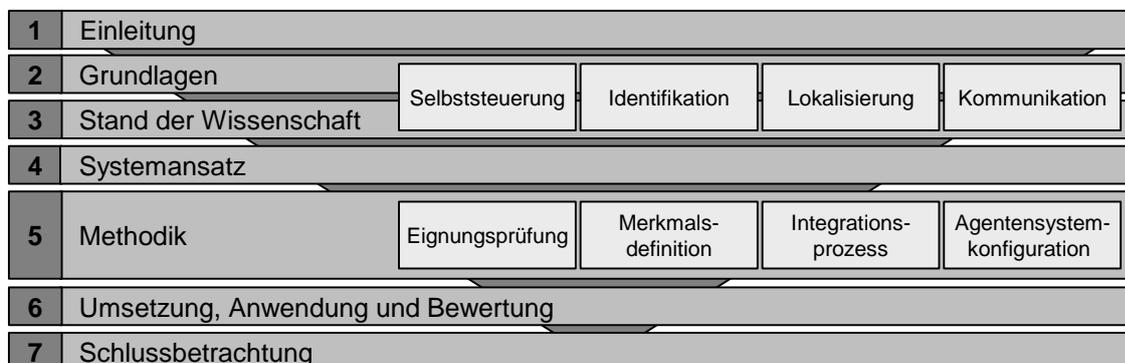


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen von Selbststeuerungssystemen

Um den Ansatz einer merkmalsbasierten Selbststeuerung in vollen Umfängen zu erfassen, werden nachfolgend erforderliche Grundlagen der relevanten Bereiche eingeführt. Dies erfolgt im thematischen Umfeld einer autonomen Produktion, für die ein Selbststeuerungssystem einen integralen Bestandteil darstellt (GRONAU 2018). Eine autonome Produktion adressiert zudem weitere Themenbereiche wie z. B. eine autonome Energieversorgung (PFEIFER & SCHMITT 2006), welche im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Nach einer Einordnung der Produktions- und Selbststeuerung wird der Begriff Objekt erklärt. Weitere Grundlagen sind den drei fundamentalen Voraussetzungen von Selbststeuerungssystemen zugeordnet (Identifikation, Lokalisierung und Kommunikation).

2.1 Produktionssteuerung

Um den Begriff der Selbststeuerung einzuführen, werden die grundlegenden Aufgaben und Funktionen einer Fertigungssteuerung erläutert. Zu diesem Zweck werden die Begriffe Produktionsplanung und -steuerung voneinander abgegrenzt, da diese oft gemeinsam verwendet werden. Anschließend werden Selbststeuerungssysteme sowie deren Voraussetzungen und Randbedingungen beschrieben.

2.1.1 Begriffsdefinition und Abgrenzung zur Produktionsplanung

Die PPS ist ein elementarer Baustein jeder Produktion (SCHUH ET AL. 2007). Sie plant die zu fertigenden Mengen, die richtige Reihenfolge zur Durchführung von Produktionsschritten und wie diese Schritte durchzuführen sind. Das Ziel der PPS ist es, die Logistikleistung zu erhöhen und gleichzeitig die Logistikkosten zu minimieren, um auf diese Weise wettbewerbsfähige Produkte fertigen und anbieten zu können. Durch die aktuelle Entwicklung zu kundenindividuelleren Produkten gewinnt die Logistikleistung, welche die Zielgrößen Lieferzeit und -treue adressiert, zunehmend an Bedeutung (BAUERNHANSL ET AL. 2014). Die zur Erreichung dieser Ziele notwendige Aufgabenverteilung zwischen Planung und Steuerung ist den einzelnen Begriffsdefinitionen zu entnehmen (VDI 1992):

Produktionsplanung: „Systematisches Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele.“

2 Grundlagen von Selbststeuerungssystemen

Produktionssteuerung: „Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen.“

Die Produktionssteuerung ist demnach verantwortlich für die Art und Weise, wann welcher Produktionsprozess durchgeführt wird. Folglich fallen die eingangs beschriebenen, aus der Komplexität resultierenden kurzfristigen und unplanmäßigen Änderungen unter das Aufgabenspektrum der Produktionssteuerung. Diese wirkt direkt auf die „Ist-Stellgrößen“, Zugang, Abgang und Reihenfolge, ein (vgl. Abbildung 2-1) und besitzt somit maßgeblichen Einfluss auf das Erreichen aller logistischen Zielgrößen: Liefertreue, Lieferzeit, Kapitalbindungs- und Prozesskosten (WIENDAHL 2014). Aufgrund der größeren Relevanz der Produktionssteuerung für die der Arbeit zugrunde liegende Zielsetzung wird im Folgenden von detaillierten Ausführungen zur Produktionsplanung abgesehen. Für diese Ausführungen wird an dieser Stelle auf SCHUH & STICH (2012A), CLAUD ET AL. (2015) und LÖDDING (2016) verwiesen.

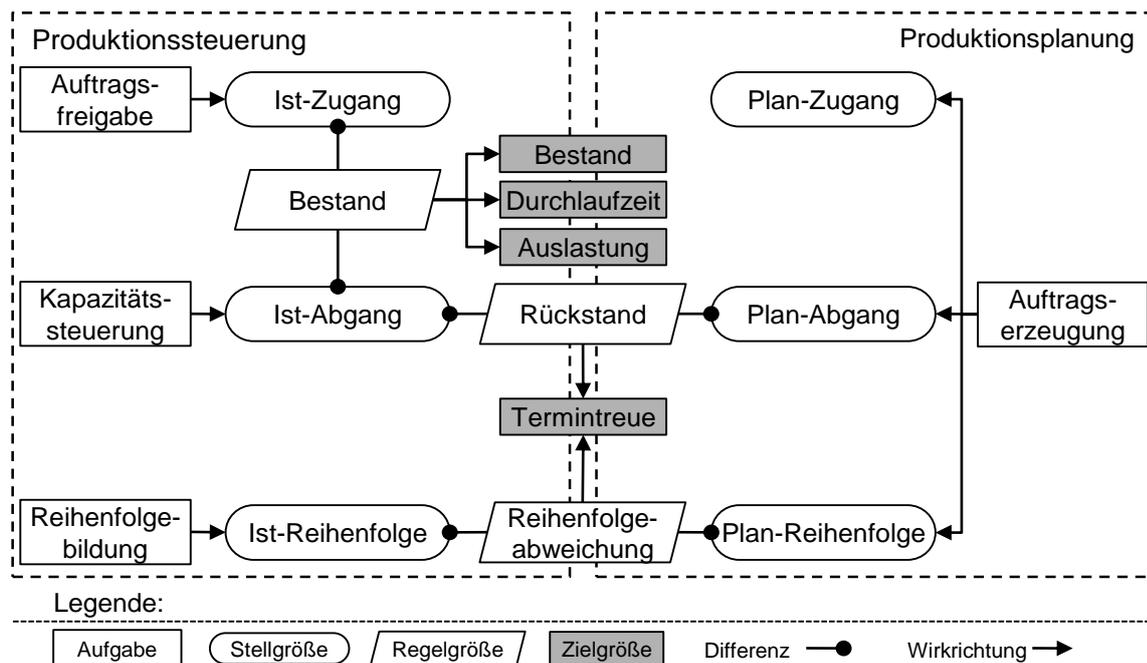


Abbildung 2-1: Modell zur Fertigungssteuerung in Anlehnung an OSTGATHE (2012) und LÖDDING (2016)

Zu den Aufgaben der Produktionssteuerung, welche die Stellgrößen festlegt, zählen die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung. Die Gestaltung und Umsetzung dieser Aufgaben ist durch die einzelnen Regelgrößen miteinander verbunden und voneinander abhängig (LÖDDING 2016).

Der Zeitpunkt, zu dem ein oder mehrere Produkte, gekapselt in einem Auftrag, in die Produktion eingelastet werden und die sich daraus ergebende Reihenfolge werden in der Auftragsfreigabe festgelegt. Aus dieser Freigabe resultiert der Ist-Zugang, welcher je nach Bestand und Plan-Zugang aus der Auftragserzeugung zu beeinflussen ist (LÖDDING 2016). Die Kapazitäten einer Fabrik sind begrenzt. Je nach produktabhängiger Konfiguration einer Anlage (Rüszustand) kann die Kapazität der einzelnen Arbeitssysteme und somit der gesamten Produktion variieren (GÖTZ 2018). Neben der Arbeitszeitplanung der Mitarbeiter zur Beeinflussung der Kapazität muss in der Kapazitätssteuerung folglich auch die festgelegte Reihenfolgebildung berücksichtigt werden (WIENDAHL 2014, LÖDDING 2016). Vor allem im Hinblick auf sinkende Losgrößen besitzt die Reihenfolgebildung eine große Bedeutung in der Produktionssteuerung (GÜNTNER & HOMPEL 2010). In erster Linie wird durch die Reihenfolge die Termintreue beeinflusst (LÖDDING 2016). Darüber hinaus können durch eine optimierte Reihenfolgebildung die Rüstzeiten verkürzt und die Produktivität erhöht werden.

Die aufgeführten Aufgaben der Produktionssteuerung können im Detail durch unterschiedliche Verfahren oder durch Anwendung verschiedener Regeln umgesetzt werden (ENGELHARDT 2015). Diese Ausprägungen der Produktionssteuerung sind vorrangig von der vorliegenden Produktionsstruktur vorbestimmt (HAUSBERG 2017). Folglich werden die folgenden Arten der Produktionssteuerung maßgeblich über deren Struktur beschrieben und anschließend der Einfluss auf die unterschiedlich ausgeprägten Aufgaben und Funktionen erläutert.

In Zeiten der Digitalisierung werden die unterschiedlichen Arten der PPS durch ihre Steuerungsarchitektur voneinander unterschieden. Die Steuerungsarchitektur eines Produktionssystems beschreibt die Systemstruktur, Art und Anzahl von entscheidungsfähigen Systemelementen sowie deren Beziehung untereinander und den Ablauf sowie die Art der Entscheidungsfindung (SCHREIBER 2013). In einer zentralen Steuerung werden die verfügbaren Daten (vgl. Abschnitt 2.1.1) an einer Stelle gesammelt und dort unter Berücksichtigung möglichst aller Kriterien Entscheidungen über die nächsten Prozessschritte, z. B. Zuordnung eines Produkts zu einer Ressource, getroffen (vgl. Abbildung 2-2 links). Dezentrale Steuerungen können hierarchisch oder heterarchisch geprägt sein. Diese beiden Ausprägungen zählen zu zentralen Begriffen im Bereich der Steuerungsarchitekturen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Hierarchie in Anlehnung an WÖHE & DÖRING (2013) definiert. Sie beschreibt die Über- und Unterordnung von Organisationseinheiten. Die Heterarchie ist im englischen Sprachgebrauch deutlich häufiger zu finden und bildet das Antonym zur Hierarchie. Folglich sind in heterarchischen Systemen die

2 Grundlagen von Selbststeuerungssystemen

einzelnen Elemente nicht über- bzw. unter- sondern gleichgestellt (vgl. Abbildung 2-2, rechts).

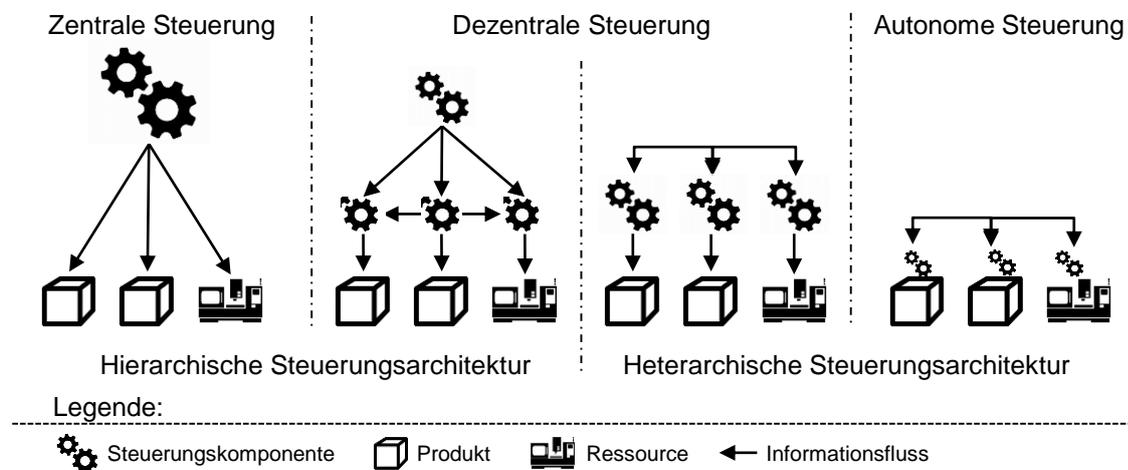


Abbildung 2-2: Systemstrukturen (SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007)

In dezentral hierarchischen Systemen (vgl. Abbildung 2-2, zweite von links) werden die Entscheidungsprozesse unterteilt, d. h. simple Entscheidungen werden dezentral getroffen und bereiten dadurch komplexere Entscheidungen der zentralen Stelle besser vor. In einer autonomen Steuerung werden die Steuerungskomponenten direkt in das Produkt bzw. die Ressource integriert (vgl. Abbildung 2-2, rechts). Eine autonome Steuerung stellt einen Bestandteil einer autonomen Produktion dar. Die autonome Steuerung fokussiert die informationstechnischen Abläufe und die Betriebsmittel zur Akquisition der benötigten Informationen. Im Rahmen dieser Arbeit werden dezentral heterarchische und autonome Steuerungen synonym zum Begriff der Selbststeuerung verwendet.

Mit zunehmender Komplexität in der Fertigung und wachsenden Anforderungen des Marktes nimmt die Eignung von dezentralen Systemen zu (WEIGELT 1994, GRONAU & THEUER 2016, GRONAU 2018). Die Ausprägung der benötigten Steuerungskomponenten von Produkten und Ressourcen in Selbststeuerungssystemen kann sich erheblich voneinander unterscheiden. In Ressourcen (z. B. Bearbeitungszentren) kann die Maschinensteuerung entsprechend erweitert werden. Auf diese Weise werden Kommunikationsschnittstellen implementiert und Programme zur Entscheidungsfindung hinterlegt. Produkte oder einzelne Werkstücke verfügen in der Regel über keine eigene oder erweiterbare Steuerung. Folglich muss auf einem Produkt bzw. einem Bauteil zusätzlich eine Steuerungskomponente integriert werden, um ein intelligentes und kommunikationsfähiges Objekt zu generieren (MCFARLANE ET AL. 2003).

2.1.2 Selbststeuerung und Selbststeuerungssysteme

„Selbststeuerung beschreibt Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nichtdeterministischen Systemen die Fähigkeit und Möglichkeit zum autonomen Treffen von Entscheidungen besitzen. Ziel des Einsatzes von Selbststeuerung ist eine höhere Robustheit und positive Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte, flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität.“
(PHILIPP ET AL. 2007)

Die Elemente, die ein Produktionssystem dazu befähigen, sich selbst zu steuern, werden in Summe als Selbststeuerungssystem bezeichnet. Eine scharfe Trennung dieser beiden Systeme ist nicht möglich, da sie ineinander integriert werden, um eine Selbststeuerung zu erreichen. Hierbei werden ggf. statt zusätzlicher Elemente zusätzliche Funktionen in bestehende Elemente integriert, sodass diese nach der Systemtheorie beiden Systemen zuzuordnen sind.

Eine Selbststeuerung eignet sich vorrangig für komplexe Produktionssysteme, da mit steigender Systemkomplexität die Vorhersagbarkeit (Determinismus) interner Prozesse sinkt und eine konventionelle Planung erschwert wird (LINDEMANN ET AL. 2009). In einem Selbststeuerungssystem entscheidet ein Objekt situativ selbst, welche Ressource in der aktuellen Situation am geeignetsten ist. Hierbei können unterschiedlichste Kriterien einbezogen werden. Je nach Situation werden die Kriterien für jede Ressource individuell ausgewählt bzw. gewichtet. So kann eine Ressource besonders auf ihren Verschleiß achten, während eine andere einen hohen Durchsatz anstrebt, sodass die Ziele der einzelnen Elemente unabhängig voneinander auswählbar bzw. anpassbar sind (WINDT ET AL. 2007, SCHOLZ-REITER ET AL. 2014). Diese Individualität der Zielverfolgung kann mit einem zentralen Steuerungssystem nur bedingt abgedeckt werden und bildet einen entscheidenden Vorteil einer Selbststeuerung. Ein weiterer Vorteil ist die schnelle Reaktionsfähigkeit und Anpassbarkeit. Wird in einer Ressource eine Störung detektiert, meldet sich diese selbstständig als aktiver Produktionsteilnehmer ab und fordert einen Service zur Behebung der Störung an. Bis die Störung behoben ist, werden alle Objekte, sofern möglich, für die weitere Bearbeitung zu anderen Ressourcen gefördert. Diese Fähigkeit bietet viele Möglichkeiten, Nebenprozesse (z. B. Wartungen) mit geringeren Reibungsverlusten durchzuführen.

Voraussetzung zur Nutzung der Potenziale ist ein Mindestgrad an Vernetzung und Flexibilität im Produktionssystem, sodass Produkte und Ressourcen verschiedene Entscheidungsalternativen für den nächsten Bearbeitungsschritt besitzen. In einer

2 Grundlagen von Selbststeuerungssystemen

starrten Verkettung von unflexiblen Maschinen wird eine Selbststeuerung keinen Mehrwert bieten, da in diesem Fall kaum unterschiedliche Entscheidungswege vorliegen, mit welchen auf unplanmäßige Veränderungen reagiert werden kann. Die zentralen Randbedingungen für den Einsatz eines Selbststeuerungssystems beziehen sich einerseits auf das reale Produktionssystem und andererseits auf dessen Steuerungsarchitektur (vgl. Tabelle 2-1). Liegt ein deterministisches, planbares System vor, stellt die Selbststeuerung eine aufwendige Übererfüllung der Anforderungen dar.

Tabelle 2-1: Anforderungen zur Implementierung eines Selbststeuerungssystems in Anlehnung an WINDT ET AL. (2007)

Produktionssystem	Steuerungsarchitektur
Viele Produktionsalternativen	Heterarchische Organisationstruktur
Nicht deterministisches Verhalten	Fähigkeit der Elemente zur Koordination
Flexible Ressourcen / Verfahren	Kenntnis der Elemente über eigene Fähigkeiten
Identifizierbare Elemente	Regelbasierte bzw. selbstlernende Algorithmen

Darüber hinaus ist die Implementierung eines Selbststeuerungssystems an drei zentrale technische Voraussetzungen gekoppelt, welche neben der beschriebenen grundsätzlichen Eignung eines Produktionssystems erfüllt sein müssen (WINDT ET AL. 2007, WINDT & HÜLSMANN 2007, SCHULDT 2012):

- *Identifikation*,
- *Lokalisierung* und
- *Kommunikationsfähigkeit* aller Systemelemente

Den initialen Schritt stellt die Identifikation dar. Eine Ressource muss wissen, welches Objekt ihr vorliegt, um die Bearbeitungsparameter entsprechend anpassen zu können. Wird ein Bauteil falsch identifiziert, kann dies zu einer Nichteinhaltung des Liefertermins, mangelnder Qualität oder im schlimmsten Fall zu Schäden am Produkt oder der Maschine führen (HARJES & SCHOLZ-REITER 2014B). Um ein Produkt überhaupt bearbeiten zu können, muss zudem dessen Position bekannt sein. Denn zur Optimierung der Produktionsabläufe ist die Entfernung zwischen Objekt und Maschine ebenfalls eine entscheidende Größe. Wenn die einzelnen Objekte und Betriebsmittel nicht miteinander kommunizieren können, ist eine Selbststeuerung nicht möglich, da an jeder Entscheidung über den weiteren Produktionsablauf mindestens zwei Elemente beteiligt sein müssen (WINDT & HÜLSMANN 2007).

2.1.3 Objekte

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter einem Objekt ein sicht- und fühlbarer Gegenstand verstanden. Eine detaillierte Definition des Begriffs wird in der DIN 4002 gegeben:

„Konzept für alle materiellen Gegenstände (Erzeugnis, Produkt, Ware, Sache, materielles Gut) und für alle nicht-materiellen Gegenstände (Dienstleistung, Beratung, geistiges Gut, Software), das durch Eigenschaften, d. h. durch all jene Merkmale charakterisiert wird, die dieses Konzept von einem anderen unterscheidet sowie zweifelsfrei und eindeutig beschreibt.“

Aus Sicht der Informationstechnik adressiert der Begriff Objekt eine Menge bzw. Klasse an Dingen, welche die gleichen Eigenschaften besitzen (BALZERT 1999). In Selbststeuerungssystemen werden die virtuelle Welt und die Realität stetig miteinander abgeglichen und die vorliegenden Informationen kombiniert. Entsprechend werden die beiden Ansätze im Rahmen dieser Arbeit zusammengeführt und der Begriff im Kontext der Selbststeuerung neu definiert:

Ein Objekt bezeichnet ein (Zwischen-)Erzeugnis eines Produktionssystems. Unabhängig, ob das Objekt real und oder virtuell vorliegt, besitzt ein Objekt eine bestimmte Menge an Merkmalen, welche seiner Charakterisierung dienen. Objekte einer Klasse zeichnen sich durch die identische Zusammensetzung ihrer Merkmale aus.

Aus dieser neuen Definition ist abzuleiten, dass die Begriffe Bauteil, Werkstück, Halbzeug und Produkt sowie deren Synonyme als auch die Begriffe aus der Informationstechnik wie bspw. eine Instanz mit dem Begriff des Objekts gleichzusetzen sind. Im Kontext einer Selbststeuerung wird häufig von intelligenten Objekten gesprochen. Diese zeichnen sich laut MCFARLANE ET AL. (2003) bspw. durch eine eindeutige ID und eine effiziente Kommunikationsmöglichkeit mit der Umwelt aus. Letzter Punkt wird erweitert, indem die Kommunikationssprache derart ausgewählt und implementiert sein muss, sodass alle eigenen Eigenschaften und Produktionsanforderungen übermittelt werden können (ZBIB ET AL. 2008, HERZOG & SCHILDHAUER 2009).

Die folgenden Abschnitte orientieren sich an den Voraussetzungen von Selbststeuerungssystemen, um eine Zuordnung der Grundlagen und dem darauf aufbauenden Stand der Wissenschaft und Technik zu den erarbeiteten Inhalten zu vereinfachen.

2.2 Identifikation in Selbststeuerungssystemen

Die Identifikation stellt die Grundvoraussetzung für ein Selbststeuerungssystem dar. In den folgenden Abschnitten wird der Begriff Identifikation definiert und zwei grundsätzliche Identifikationsstrategien beschrieben.

2.2.1 Begriffsdefinition

Die Identifikation eines Objekts beschreibt den Prozess, das Objekt innerhalb eines Geltungsbereichs mithilfe der erforderlichen Merkmale eindeutig und unverwechselbar zu erkennen, zu bezeichnen oder anzusprechen (DIN 6763). Dabei gilt es, zwei verschiedene Identifikationsstrategien zu unterscheiden (KRÄMER 2002): Die direkte Identifikation beschreibt eine Erkennung von Objektmerkmalen wie bspw. Form, Größe, Gewicht und Farbe (KRÄMER 2002, HOMPEL ET AL. 2008A). Das Auslesen eines dem Objekt beigefügten Datenträgers wird als indirekte Identifikation bezeichnet (KRÄMER 2002). Diese beiden grundsätzlichen Strategien werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Unabhängig von der Identifikationsstrategie gelten folgende Anforderungen an Identifikationstechnologien im produktionstechnischen Umfeld. Die Lesegeschwindigkeit darf die Produktionsabläufe nicht negativ beeinflussen. Zudem muss die Lesesicherheit unter den vorliegenden Bedingungen, z. B. Leseabständen, stets gewährleistet sein. Diese ist ein zentraler Parameter zur Sicherstellung der Kompatibilität der Identifikationstechnologie mit der gesamten Wertschöpfungskette. Darüber hinaus muss Sorge getragen werden, dass ausreichend Identifikationsmarken (z. B. Identifikationsnummern) gebildet werden können und die Kosteneffizienz des Systems sichergestellt ist (HOMPEL ET AL. 2008A).

2.2.2 Indirekte Identifikationsverfahren

Indirekte Identifikationsverfahren und die zu dieser Strategie zählenden Auto-ID-Technologien sind in der Produktionstechnik und vor allem im Bereich der situativen Produktionssteuerung weit verbreitet (BEHRENS ET AL. 2006, SCHOLZREITER ET AL. 2014, ENGELHARDT 2015). Zu den Vorteilen zählen die Rückverfolgbarkeit der Objekte durch eine langfristige Identifikationsmöglichkeit sowie, in Abhängigkeit der Ausprägung einer ID, die Möglichkeit, Objekte zu lokalisieren. Die Nachteile der indirekten Verfahren bestehen in den zusätzlichen Kosten für die Beschaffung der ID, der Anbringung selbiger und der fehlenden Abdeckung der gesamten Prozesskette (vgl. Abschnitt 1.2). Der ID-basierte

Selbststeuerungsprozess kann erst nach der notwendigen Anbringung einer ID starten. Der Zeitpunkt der Anbringung kann sich vor allem beim Einsatz von spanenden Fertigungsverfahren verzögern, da die ID andernfalls prozessbedingt wieder entfernt wird (SCHLICK ET AL. 2014, WIGGER ET AL. 2018). Folglich muss vorher ein anderes Steuerungssystem eingesetzt werden, sodass zusätzliche Schnittstellen notwendig sind (SCHOLZ-REITER ET AL. 2009B). Weiterhin muss der Anbringung stets eine direkte Identifikation vorausgehen, anderenfalls kann eine korrekte Markierung des Objekts nicht sichergestellt werden (FINKENZELLER 2015). Ausnahmen bilden IDs, welche direkt durch den initialen Fertigungsschritt des Urformens eingebracht werden. Diese zählen unabhängig von Ihrer Ausprägung (z. B. Fahrgestellnummer) zu den indirekten Verfahren, da sie im Gegensatz zu den sonstigen Objektmerkmalen nicht zur Funktion des Objektes beitragen. In den vergangenen Jahren haben sich vier unterschiedliche Auto-ID-Systeme durchgesetzt, welche alle einen bestimmten Anwendungsbereich adressieren. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren sind in Tabelle 2-2 dargestellt. Die größte Relevanz im Kontext der Selbststeuerung besitzen RFID-Systeme (Radio Frequency Identification). Anstelle kontaktbasierter (Chipkarte) oder optischer (Optical Character Recognition - OCR, Barcode) Verfahren werden in diesen Systemen elektromagnetische Wellen zur Übertragung der Daten genutzt, welche eine geringere Störanfälligkeit im Vergleich zu anderen IDs besitzen (FINKENZELLER 2015, ENGELHARDT 2015, HIPPENMEYER 2016).

Tabelle 2-2: Identifikationsverfahren in Anlehnung an FINKENZELLER (2015)

	Chipkarte	OCR	Barcode	RFID
Sichtkontakt	○	○	○	●
Datendichte und -veränderbarkeit	●	◐	◑	●
mechanisch, thermisch und chemisch	◐	◑	◑	●
Feuchtigkeit und Verschmutzung	◐	○	○	●
Richtung und Lage	◐	●	◑	●
elektromagnetische Störquellen	●	●	●	○
Pulzfähigkeit	○	○	○	◐

Füllgrad der Kreise gibt den Grad der Eignung an

2.2.3 Direkte Identifikationsverfahren

Direkte Identifikationsverfahren werden in Selbststeuerungssystemen bislang nicht eingesetzt. Die Verfahren sind vorrangig im Bereich der Qualitätssicherung und außerhalb des produktionstechnischen Umfelds anzutreffen (z. B. Fingerabdruck- und Irisscan) (HOMPEL ET AL. 2008A). Aus produktionstechnischer Sicht

2 Grundlagen von Selbststeuerungssystemen

bilden Mess- und Prüfverfahren jeglicher Art (z. B. optisch), welche normalerweise für Qualitätskontrollen eingesetzt werden, die Gruppe potenzieller direkter Identifikationsverfahren (KRÄMER 2002, HOMPEL ET AL. 2008A). Folglich ist ein Vorteil beim Abgleich von Objektmerkmalen zur Identifikation die einhergehende Qualitätskontrolle (JÜNEMANN & BEYER 2013). Darüber hinaus sind die Verfahren zu jedem Zeitpunkt einsetzbar, d. h. der Zeitpunkt, zu dem die Selbststeuerung beginnen kann, ist nicht davon abhängig, wann eine ID aufgebracht wird. Darüber hinaus entstehen keine mengenabhängigen Kosten durch IDs. Sofern keine individuellen Merkmale in die einzelnen Objekte eingebracht werden, können über den direkten Ansatz keine gleichen Objekte voneinander unterschieden werden. Dies stellt bspw. für die individuelle Betriebsdatenerfassung einen großen Nachteil dar. Für die Produktionssteuerung hingegen ist die Objektklasse, welche gefertigt werden soll, entscheidend und für den Selbststeuerungsprozess ausreichend. Hierzu ist die richtige Auswahl von Merkmalen und Sensoren essenziell (HOMPEL ET AL. 2008A, JÜNEMANN & BEYER 2013). Für den zentralen Begriff des Merkmals existieren zwei relevante Definitionen:

„Merkmale sind klassifizierte Eigenschaften eines Systems, die sich zunächst dadurch auszeichnen, dass sich ihre Ausprägung durch einen einfachen Wert ausdrücken lässt.“ (HEEG 2005)

„Ein Merkmal ist eine bestimmte Eigenschaft, die zum Beschreiben und Unterscheiden von Gegenständen einer Gegenstandsgruppe oder von Gegenstandsgruppen untereinander dient.“ (DIN 6763)

In beiden Definitionen wird sich auf die Eigenschaft eines Systems bzw. einer Gruppe berufen und auf eine Hierarchisierung der Begriffe hingedeutet. Dieser Aspekt wurde von EPPLE (2011) aufgegriffen und detailliert. Eigenschaften setzen sich nach EPPLE (2011) aus einem Merkmal und einem Zustand zusammen, d. h. eine Eigenschaft stellt somit eine zustandsabhängige Instanz eines Merkmals dar. Für grundlegende theoretische, sprich szenario- und zustandsunabhängige Untersuchungen werden demzufolge die Merkmale von Objekten verwendet. Im Betrieb werden stattdessen die Eigenschaften eines Objekts mithilfe von Sensoren erfasst, um dieses zu identifizieren.

Der Begriff des Sensors ist in der Automatisierungstechnik fest verankert und stellt als Schnittstelle zum Objekt ein Kernelement jeder technischen Lösung dar (HESSE & SCHNELL 2014). Im allgemeinen Sprachgebrauch wird in der Regel nur von einem Sensor gesprochen. Genau genommen handelt es sich in diesem Fall um ein Sensorsystem, welches aus einem Sensorelement und zusätzlichen Komponenten

wie einem Gehäuse, einer Signalvorbereitung etc. besteht. Eine Trennung dieser Begriffe ist in BERNSTEIN (2014) zu finden. Ein Sensorelement ist ein Messfühler, welcher eine physikalische Größe in ein elektrisches Signal umsetzt (HERING & SCHÖNFELDER 2018). Ein Sensorsystem hingegen umfasst das Sensorelement sowie ein anwendungsspezifisch angepasstes Gehäuse. Des Weiteren können sowohl elektrische als auch mechanische Komponenten enthalten sein, welche die Signale verarbeiten. Die elektrischen Komponenten, welche die Art des Signals festlegen, sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Zu den direkten Hauptaufgaben von Sensorsystemen zählt die dargestellte Umsetzung von Messgrößen in elektrische Signale und die dazu notwendige Nutzung physikalischer Effekte, Wirkprinzipien und Wandlungseffekte. Im weiteren Sinne befähigen Sensorsysteme eine Produktionsanlage zur Regelung und erhöhen auf diese Weise ihre Flexibilität (BERNSTEIN 2014, HESSE & SCHNELL 2014, GRAF 2018).

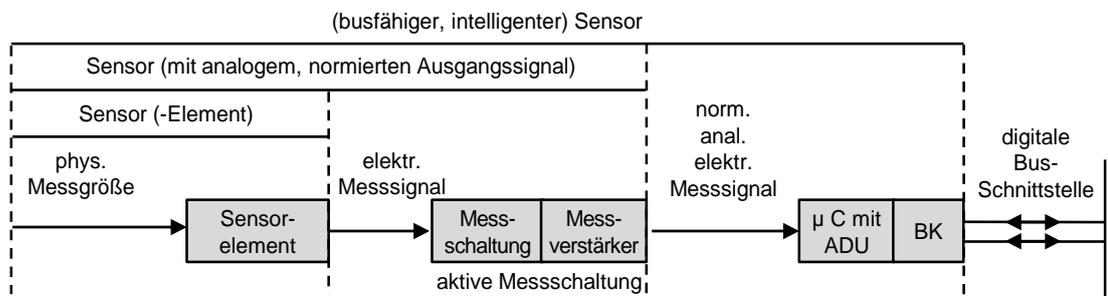


Abbildung 2-3: Aufbau eines Sensors (TRÄNKLER & FISCHERAUER 2014)

Um Sensorsysteme für bestimmte Messaufgaben bzw. Merkmale auszuwählen, werden Sensoren anhand unterschiedlicher Kriterien in Klassen eingeteilt (JÜNEMANN & BEYER 2013). Auf diese Weise wird bspw. über das Messprinzip entschieden, ob ein Sensor in der vorliegenden Umgebung störungsfrei einsetzbar ist (BERNSTEIN 2014). Eine Übersicht relevanter Einteilungskriterien ist in Tabelle 2-3 zusammenfassend dargestellt. Für die Objektidentifikation sind vorrangig die Erfassung, Dimension und Art der Messgröße entscheidend.

Tabelle 2-3: Einteilung von Sensoren in Anlehnung an JÜNEMANN & BEYER (2013), HESSE & SCHNELL (2014) und GRAF (2018)

Einteilungskriterium	Beispielhafte Klassen
Erfassung der Messgröße	Berührend, berührungslos
Dimension der Messgröße	1D, 2D, 3D
Art der Messgröße	Anwesenheit, Abstand, Winkel, Moment, Temperatur
Messprinzip	Taktil, optisch, elektrisch, magnetisch
Darstellung der Messgröße	Analog, digital, individueller Messbericht

2.3 Lokalisierung in Selbststeuerungssystemen

Im Folgenden werden der Begriff der Lokalisierung und verschiedene Verfahren näher erläutert. Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich die Lokalisierung auf die Objekte (z. B. Bauteile und Produkte), deren Positionsaktualisierung nach jeder Bewegung erforderlich ist (HESSE 2013, VDI 2860).

2.3.1 Begriffsdefinition

Lokalisierung beschreibt den Prozess, die Pose, Position und Orientierung, eines Objekts innerhalb eines Untersuchungsraums zu bestimmen (KÜPPER 2005). In Selbststeuerungssystemen ist der Untersuchungsraum die Produktionshalle (Indoorlokalisierung).

2.3.2 Lokalisierungsverfahren

Die aktive Lokalisierung erfordert ein Signal, welches von dem zu lokalisierenden Objekt ausgeht und empfangen werden kann. Mittels der Übertragungsdaten kann der Ursprung des Signals lokalisiert und die Position bestimmt werden (BRENA ET AL. 2017). Beispiele für eine passive Lokalisierung bilden optische Verfahren, in welchen Objekte anhand ihrer Geometrie erkannt werden. Über das Referenzkoordinatensystem einer Kamera werden Position und Orientierung eines Objekts bestimmt sowie das Objekt lokalisiert (HESSE & SCHNELL 2014). Das Objekt muss sich folglich im Messbereich eines Sensorsystems befinden. Eine signalbasierte, aktive Lokalisierung kann hingegen jederzeit durchgeführt werden. Eine Übersicht der wichtigsten Signale im Bereich der Indoorlokalisierung ist Tabelle 2-4 zu entnehmen. Auf die Unterschiede der Technologien wird im Kapitel „Stand der Wissenschaft und Technik“ eingegangen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Abgesehen von der lichtbasierten Lokalisierung verwenden alle anderen Verfahren einen Sender, welcher analog zu einer ID am Objekt zu befestigen ist (BRENA ET AL. 2017).

Tabelle 2-4: Signale zur Lokalisierung im Indoor-Bereich (BRENA ET AL. 2017)

Signal	Funktionsweise
Radio Frequency	Aktiv oder passiv über elektromagnetische Wellen
Magnetismus	Aktiv oder passiv über magnetische Wellen bzw. Felder
Schall	Aktiv oder passiv über Schallwellen
Licht	Passiv über Detektion geometrischer Größen

2.4 Kommunikation in Selbststeuerungssystemen

Nachfolgend werden der Begriff der Kommunikation in Selbststeuerungssystemen definiert und anschließend verschiedene Steuerungsarchitekturen beschrieben.

2.4.1 Begriffsdefinition

Die Kommunikation in Selbststeuerungssystemen bildet die Basis für autonome Verhandlungen der Systemelemente und substituiert das Aufgabengebiet des Informationsmanagements. Unabhängig von der Steuerungsarchitektur gilt es, Daten, verdichtet als Informationen, auszutauschen. Die Koordination der Informationsflüsse entspricht dem Informationsmanagement (JÜNEMANN & BEYER 2013, BLUNCK & WINDT 2013). In konventionellen Systemen wird diese Aufgabe auf das Enterprise Resource Planning (ERP), das Manufacturing Execution System (MES) und das bereits eingeführte PPS-System verteilt.

2.4.2 Steuerungsarchitekturen in der Produktion

Im Fokus dieser Arbeit stehen heterarchische Architekturen, die eine dezentrale Steuerung unterstützen. In diesen Architekturen sind die Planungs-, Steuerungs- und Prozessebenen nicht strikt getrennt (vgl. Abbildung 2-4, Nr. 2-4). Aus diesem Grund gilt es, das Informationsmanagement für diese Ansätze anzupassen. Daher wird für tiefgreifende Informationen zu den konventionellen hierarchischen Systemen auf KLEINERT & SONTOW (2010), HOPP & SPEARMAN (2011) und FUCHS (2013) verwiesen. Auf holarchische, serviceorientierte und agentenbasierte Architekturen wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

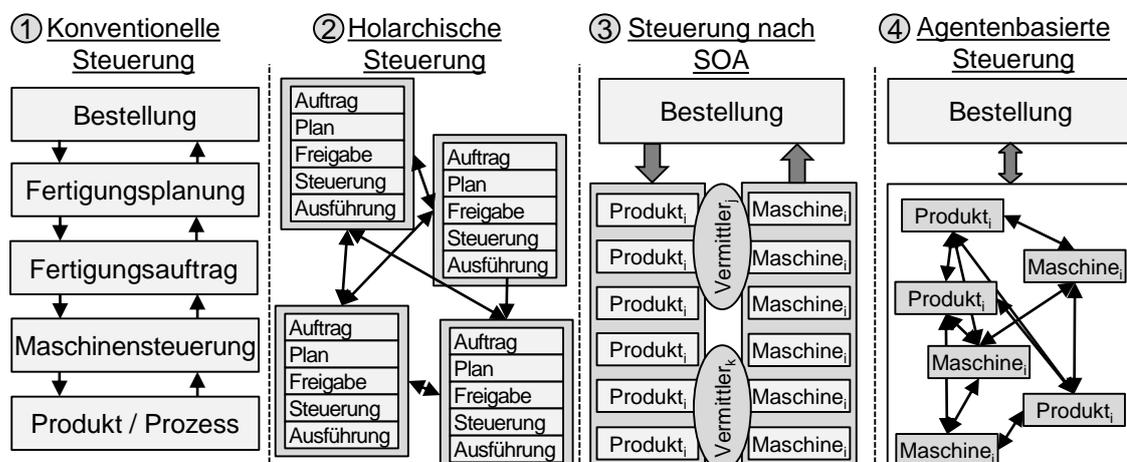


Abbildung 2-4: Übersicht ausgewählter Steuerungsarchitekturen (MCFARLANE ET AL. 2003)

2.4.2.1 Holarchische Steuerungsarchitektur

Aufbauend auf dem heterarchischen Systemansatz werden in holarchischen Fertigungssystemen Aufgaben der PPS auf die einzelnen Elemente des Produktionssystems verteilt (SUDA 1989, GOU ET AL. 1994). In verschiedenen holarchischen Ansätzen werden die Holone in die drei Gruppen Auftrags-, Produkt- und Betriebsmittelholone unterteilt (LAU 2010, BUSSMANN 1998). Diese Unterteilung findet sich in der PROSA-Referenz-Architektur wieder, in welcher diesen Gruppen Aufgaben (Arbeitsverteilung, Prozessplanung und Bearbeitung) und Schnittstellen (Produktions-, Prozess- und Produktionsdurchführungswissen) zugewiesen werden (VAN BRUSSEL ET AL. 1998). Die Auftragsverteilung wird in dem Ansatz durch Auftragsholone durchgeführt. Die benötigte Schnittstelle ähnelt einem Dienstvermittler, welcher in Serviceorientierten Architekturen zu finden ist.

2.4.2.2 Serviceorientierte Steuerungsarchitektur

Der Begriff Serviceorientierte Architektur (SOA) stellt keine konkrete Technologie oder Programmiersprache dar, sondern ein abstraktes Architekturmuster, welches technologieunabhängig einsetzbar ist. Zumeist wird SOA als Werkzeug für die Entwicklung verteilter Anwendungslandschaften verstanden. In einer SOA werden alle Teilnehmer als Software-Entitäten abgebildet, welche sowohl Dienste anfordern als auch anbieten können. Daraus ergeben sich drei unterschiedliche Rollen für einen Teilnehmer: Dienstanbieter, Dienstanbieter oder Dienstvermittler (MELZER 2007). Um Anbieter und Nutzer zu koppeln, müssen beide zunächst ihr Bedürfnis an einen Vermittler kommunizieren (vgl. Abbildung 2-4). Dieser ordnet die Nachfrage den Angeboten zu. Damit diese Zuordnung in komplexen Systemen mit einer Vielzahl von Teilnehmern realisierbar ist, stellt ein Dienst eine gekapselte fest definierte Leistung dar (RICHTER ET AL. 2005). Aufgrund der stetigen Nutzung eines Vermittlers für jede auszuführende Aktion steigt der Kommunikationsaufwand in einer SOA stark in Abhängigkeit der Systemgröße. Die Verwendung von standardisierten und von Maschinen lesbaren Kommunikationsprotokollen und Schnittstellen ist eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung. Um den Kommunikationsaufwand zu reduzieren, werden elementare Dienste in komplexeren Abläufen hierarchisiert. Auf diese Weise kann ein komplexerer Dienst angefragt werden, statt mehrere elementare Funktionen einzeln und ggf. nacheinander anzufordern (vgl. Abbildung 2-5).

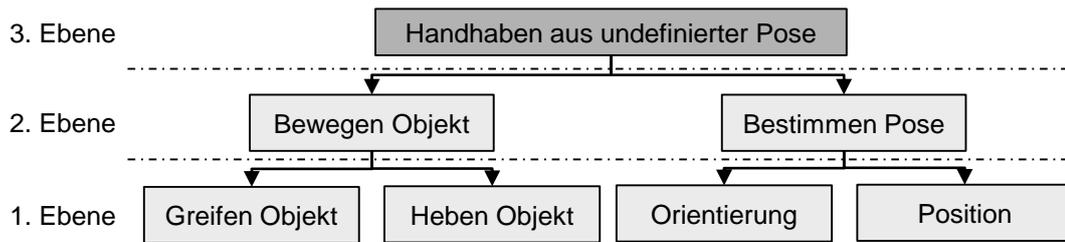


Abbildung 2-5: Hierarchisierung von Diensten

2.4.2.3 Agentenbasierte Steuerungsarchitektur

„Ein Agent ist eine abgrenzbare (Hardware- und/ oder Software-) Einheit mit definierten Zielen. Ein Agent ist bestrebt, diese Ziele durch selbständiges Verhalten zu erreichen und interagiert dabei mit seiner Umgebung und anderen Agenten. Agenten sind ein Modellierungskonzept zur Lösung von technischen Aufgabestellungen unabhängig von einer bestimmten Realisierungsform.“ (VDI 2653)

Eine Menge an Agenten, welche innerhalb einer definierten Systemgrenze miteinander agieren, wird als Agentensystem bezeichnet. Durch die direkte Interaktion und Kommunikation der Agenten, welche nicht zwingend einen Vermittler vorsieht, grenzen sich Agentensysteme deutlich von einer SOA ab. Der Unterschied zur holarchischen Steuerung besteht darin, dass in Agentensystemen von einer rein horizontalen Kommunikation gesprochen wird. Abhängig von der Art und Weise, wie die unterschiedlichen Rollen der Agenten definiert werden, kann über ein Agentensystem sowohl eine holarchische als auch eine serviceorientierte Architektur abgebildet werden (BUSSMANN ET AL. 2004, WEIß & JAKOB 2005).

Agenten zeichnen sich vorwiegend durch autonomes wie auch soziales Verhalten aus und können im Gegensatz zu Entitäten einer SOA reaktiv bzw. proaktiv handeln (WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995). WOOLDRIDGE & JENNINGS (1995) beschreiben vier zentrale Eigenschaften, welche durch WAGNER ET AL. (2003) um die Kapselung, Zielorientierung und Persistenz erweitert werden (vgl. Tabelle 2-5). Die Ausprägungen dieser Eigenschaften können sich erheblich voneinander unterscheiden. Die soziale Fähigkeit von Agenten, ihr Verhalten, wird maßgeblich durch den Aufbau des Gesamtsystems sowie durch die Rolle des Agenten definiert. Das Verhalten von Agenten kann sowohl kooperativ als auch egoistisch geprägt sein (WEIGELT 1994). Der Aufbau eines Agenten entscheidet zudem, wie die Reaktivität eines Agenten realisiert wird. Deliberative Agenten besitzen ein Modell der Umwelt als Wissensbasis, welche die Grundlage für ihr intelligentes Handeln

2 Grundlagen von Selbststeuerungssystemen

bildet. Reaktive Agenten hingegen beziehen ihre Intelligenz aus der Interaktion mit der Umwelt. Beispielsweise nehmen sie die Eingangsparameter für ihre Handlungen und Entscheidungen mittels Sensoren auf. Als hybride Agenten werden die Mischformen bezeichnet, welche ihr Umweltmodell durch die aktive Aufnahme von Informationen erweitern können (BRENNER ET AL. 1998, ZARNEKOW 1999).

Tabelle 2-5: Eigenschaften von Agenten nach WOOLDRIDGE & JENNINGS (1995) und WAGNER ET AL. (2003)

Eigenschaft	Erläuterung
Autonomie	Agenten arbeiten ohne den Eingriff von Menschen oder Anderem und haben eine Kontrolle über ihre Aktionen und ihren inneren Zustand.
soziale Fähigkeit	Agenten interagieren mit anderen Agenten.
Reaktivität	Agenten nehmen ihre Umgebung wahr und reagieren darauf in einer angemessenen Frist.
Proaktivität	Agenten reagieren nicht nur auf ihre Umwelt, sondern weisen auch zielorientiertes Verhalten auf, indem sie die Initiative übernehmen.
Kapselung	Zustand und Verhalten sind in einem Agenten zusammengefasst.
Zielorientierung	Agenten orientieren ihr Verhalten an bestimmten Zielen, die sie zu erreichen haben.
Persistenz	Agenten verfügen über einen fortlaufenden Kontrollfluss und können ihren inneren Zustand über ihren Lebenszyklus beibehalten.

Die Bedeutung agentenorientierter Ansätze zur Steuerung von Automatisierungssystemen hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen (GÜNTNER & HOMPEL 2010, GÖHNER 2013, BAUERNHANSL ET AL. 2014, VOGEL-HEUSER ET AL. 2015). Ausschlaggebend für diese Entwicklung ist, dass die agentenorientierte Software-Entwicklung im Vergleich zu anderen Ansätzen einen besseren Umgang mit der Komplexität von technischen Systemen ermöglicht (JENNINGS 2001, WEIß & JAKOB 2005). Zudem erfüllen agentenorientierte Steuerungen alle Anforderungen von cyber-physischen Produktionssystemen und besitzen eine hohe Migrationsfähigkeit in bestehende Systeme (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015). Ein weiterer Vorteil von Agentensystemen in der Produktion ist die implementierbare Plug-and-Participate-Fähigkeit in Betriebsmittel (LEPUSCHITZ ET AL. 2011, ROCHA ET AL. 2014). Aufgrund der Flexibilität und der zahlreichen Vorteile von Agentensystemen im Vergleich zu anderen dezentral, heterarchischen Steuerungskonzepten (SCHUH & STICH 2012B, OSTGATHE 2012, VOGEL-HEUSER ET AL. 2015, RAUE 2016) werden diese im folgenden Kapitel zum Stand der Wissenschaft und Technik verstärkt betrachtet.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Getrieben durch steigende Anforderungen an die Produktionstechnik (vgl. Abschnitt 1.1) sind unterschiedliche Ansätze für die Konzeptionierung, den Aufbau und den Betrieb von Selbststeuerungssystemen entstanden. Im Folgenden werden relevante Systemansätze sowie verschiedene Lösungen, Verfahren und Methoden in Bezug auf die Voraussetzungen von Selbststeuerungssystemen gruppiert und vorgestellt.

3.1 Selbststeuerungssysteme in der Produktion

Die Autonomie in Produktionssystemen und die daraus resultierende dezentrale Entscheidungsfindung wird von unterschiedlichen Experten im produktionstechnischen Umfeld empfohlen (WEIGELT 1994, FAVRE-BULLE 2004, SCHUH & STICH 2012B, NYHUIS ET AL. 2016). Der anzustrebende Grad an Autonomie ist abhängig von der Gesamtstruktur eines Produktionssystems und muss daher situationsspezifisch ermittelt werden (GRONAU & THEUER 2016). Wie der Autonomiegrad zu bestimmen ist und welche Kriterien auf die Entscheidung Einfluss nehmen, wird im ersten Abschnitt thematisiert. Anschließend werden verschiedene Selbststeuerungssysteme betrachtet und ein Fazit zu diesem Themenfeld gezogen.

3.1.1 Autonomie in Produktionssystemen

Der Autonomiegrad von Produktionssystemen ist eine zentrale Entscheidungsgröße für die Auswahl und Auslegung einer PPS und kann auf unterschiedliche Weise gemessen werden, z. B. anhand der Menge an autonom generierten Daten, Prozesszeiten und Prozessschritten (HÜLSMANN & WINDT 2007). Vorrangig wird die Anzahl der autonom kontrollierten und durchgeführten Prozesse zur Bestimmung des Autonomiegrades verwendet (GRONAU & THEUER 2016). Demzufolge müssen alle Prozesse individuell geprüft werden. Um aus dieser Analyse einen Rückschluss auf die möglichen Produktionsalternativen zu gewinnen, gilt es, vor- und nachgelagerte Prozesse sowie die Produktionsstruktur zu untersuchen. Weitere Einflussgrößen sind die Diversität der Prozesse unter Voraussetzung einer ausreichend flexiblen Anlagentechnik und die Störanfälligkeit der Prozesse. In Abbildung 3-1 ist links der Zusammenhang zwischen dem Grad an Autonomie und den Kosten dargestellt. Die rechte Abbildung verallgemeinert das Optimierungsproblem. Die dargestellte Nachfrage kann bspw. die

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Nachfrage eines einzelnen Objekts sein. Sofern die Randbedingungen für eine hierarchische Steuerung erfüllt sind (vgl. Abschnitt 2.1.2), steigt mit der Autonomie die Anzahl der Angebote für die weitere Bearbeitung. Dies reduziert die Wartezeit eines Objekts. Gleichzeitig stellen mit steigender Autonomie weitere Objekte Anfragen, sodass sich die Zeit pro Bestellung verkürzt. Durch die höhere Anzahl an Nachfragen verlängert sich die Zeit, bis ein Betriebsmittel eine Entscheidung fällt und die Wartezeit steigt wieder. Diese anwendungsspezifische Bestimmung des Autonomiegrades ist folglich ein sehr komplexer Entscheidungsprozess. Um Hürden in der folgenden Umsetzung abzubauen und die Wirtschaftlichkeit einer Implementierung sicherzustellen, gilt es diesen Entscheidungsprozess in jedem Fall durchzuführen (HENKE & KUHN 2017).

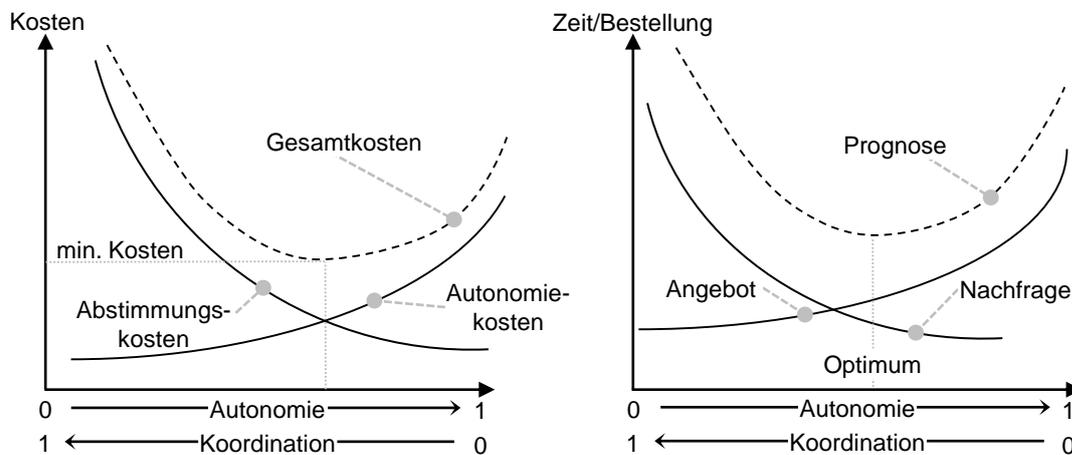


Abbildung 3-1: Auswirkungen zunehmender Autonomie nach FRESE (2005), links, und GRONAU & THEUER (2016), rechts

Um das qualitativ dargestellte Optimum in einem spezifischen Anwendungsfall zu bestimmen, geben GRONAU & THEUER (2016) einen vierstufigen Prozess vor. In der Vorbereitungsphase sollen Anforderungen an das System gestellt und Kerneigenschaften bestimmt werden. Diese Eigenschaften werden anschließend im Rahmen der Konfiguration eines Testsystems berücksichtigt. Zu diesem Testsystem gilt es, eine Simulation zu konfigurieren und abschließend verschiedene Szenarien zu simulieren. In dem Vorgehen werden keine bestehenden Simulationsmodelle verwendet (NEUMANN & WESTKÄMPER 2013, MÜLLER ET AL. 2016). Folglich ist in dem Vorgehen nach GRONAU & THEUER (2016) zunächst der Aufbau eines Testsystems notwendig. Dieses Vorgehen ist deckungsgleich mit anderen Ansätzen zur Bestimmung des Autonomiegrades (FREY ET AL. 2003, MAYER ET AL. 2010, CARDIN ET AL. 2017). Die Unterschiede bestehen in den zahlreichen Referenzsystemen, welche für eine Analyse zur Verfügung stehen. Ein

Referenzsystem ist in seinen Eigenschaften, seiner Systemkomplexität als auch seiner Dynamik vollständig beschrieben und kann aus diesem Grund für reproduzierbare Versuche und ein Benchmarking genutzt werden (SCHREIBER 2013). Im Anhang in Tabelle 10-1 ist eine Übersicht verschiedener Referenzsysteme, inkl. unterschiedlicher Kennzahlen, in Anlehnung an SCHREIBER (2013) dargestellt. Die Optimierung des Autonomiegrades mit diesen Referenzsystemen erfolgt über das Testen verschiedener Szenarien und Systemkonfigurationen sowie der anschließenden Auswertung klassischer Produktionskennzahlen. Mithilfe von parallelen Simulationen ist es zudem möglich, die Anpassung des Autonomiegrades während der Betriebsphase durchzuführen (NOVAS ET AL. 2012, BORANGIU ET AL. 2015). Diese Verfahren sind wiederum auf Kennzahlen aus der Produktion angewiesen, um die Aufgaben und Funktionen entsprechend auf ein oder eben mehrere Elemente zu verteilen. Alle identifizierten Verfahren zur Bestimmung des optimalen Autonomiegrades benötigen ein programmiertes (Test-)System und sind demzufolge für eine Anwendung in einer frühen Planungsphase ungeeignet.

3.1.2 Systemansätze zur Selbststeuerung der Produktion

Durch den Trend zu dezentralen Systemen sind zahlreiche Selbststeuerungssysteme in unterschiedlichen Industriezweigen entstanden. Viele Systeme bauen aufeinander auf, sodass sich ursprüngliche Ansätze in Bestandteilen neuerer Systeme wiederfinden. Um eine übersichtliche Zusammenfassung bestehender Systeme zu erhalten, sind in Tabelle 3-1 die aktuelleren Systeme aufgeführt. Informationen zu den ursprünglichen Systemen können GOU ET AL. (1994), WOOLDRIDGE & JENNINGS (1995), HOMPEL ET AL. (2008B) und SCHOLZ-REITER ET AL. (2009B) entnommen werden. Die Mehrzahl der Systeme ist in Journal- bzw. Konferenzbeiträgen sehr kurz beschrieben. Aus diesem Grund ist es nicht für jeden Systemansatz möglich, alle Lösungsausprägungen zu erfassen (vgl. „-“ in Tabelle 3-1). Die Tabelle beinhaltet zudem konzeptionelle Ansätze, welche bis dato noch nicht in die industrielle Praxis überführt wurden. Diese sind mit dem Zusatz „simulativ“ in der Spalte Anwendung gekennzeichnet und beziehen sich lediglich auf den Wissenschaftsbereich der Kommunikation. Diese Arbeiten fokussieren sich maßgeblich auf den Einsatz von Holonen zur Steuerung des Produktionssystems. Hierbei wird bspw. auf der ADACOR (ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems)-Struktur von LEITAO ET AL. (2005) aufgebaut, welche als Ausgangspunkt vieler dezentral heterarchischer Ansätze verwendet wird, z. B. BARBOSA ET AL. (2015).

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Tabelle 3-1: *Selbststeuerungssysteme in der Produktion*

Anwendung (Quelle)	Identifikation	Lokalisierung	Kommunikation
Montage Pkw-Rückleuchten (SCHOLZ-REITER ET AL. 2014)	RFID am Objekt	Reader RFID (Station) GPS	Agenten Simulation
Bearbeitung Netbooks (UHLMANN ET AL. 2013)	RFID am Objekt	Reader RFID (Station)	-
Montage (MÜLLER ET AL. 2016)	RFID am Objekt	Reader RFID (Station)	Agenten Simulation
Produktion - allgemein (MARSEU ET AL. 2016)	RFID am Modul	Reader RFID (Station)	-
Smart Key Finder (PIRVU ET AL. 2016)	RFID am Objekt	-	-
Logistik (LEWANDOWSKI ET AL. 2013)	RFID am Objekt	Reader RFID	Agenten
Logistik - Zeitungen (BÖHNLEIN ET AL. 2011)	-	-	Agenten
Produktion - allgemein (BORANGIU ET AL. 2015)	RFID am Objekt	Reader RFID (Transport, Gates)	Holone auf Basis von Agenten (JADE)
Produktion – simulativ (HERRERA ET AL. 2014)	-	-	Holone auf Basis von Agenten
Produktion - simulativ (BARBOSA ET AL. 2015)	-	-	Holone auf Basis von ADACOR
Supply Chain Management – simulativ (GÜLLER ET AL. 2015)	RFID am Objekt	-	Agenten Simulation
Produktion - allgemein (LAS MORENAS ET AL. 2014)	-	-	2 Agentensysteme
Elektronikfertigung (YILMAZ ET AL. 2012)	-	-	Agenten
Produktion - allgemein (GARCÍA ANSOLA ET AL. 2015)	RFID	-	2 Agentensysteme
Produktion (PARK & TRAN 2012)	RFID	-	Agenten

Im Bereich der Identifikationsverfahren stellt die Befestigung eines RFID-Transponders am Objekt den dominierenden Lösungsansatz dar. In einzelnen Fällen wird die ID am Werkstückträger angebracht, um die Identifikationskosten zu senken und eine Wiederverwendung der Tags zu fördern. Durch die Verwendung von Werkstückträgern müssen zusätzliche Operationen (Entnahme aus dem Werkstückträger und Einlegen in den Werkstückträger) an jeder Arbeitsstation durchgeführt werden. Um die flexibilitätsbezogenen Nachteile durch den Einsatz

der Werkstückträger zu reduzieren, wird der manuelle Arbeitsanteil in diesen Systemen erhöht (LOTTER & WIENDAHL 2012). Ob trotz des hohen manuellen Anteils eine wirtschaftliche Alternative vorliegt, muss für jede Applikation durch eine ganzheitliche Betrachtung überprüft werden.

Die Lokalisierung der Objekte erfolgt vorrangig über die bereits zur Identifikation eingesetzten RFID-Transponder. In diesen Systemen überwiegt die Lokalisierung an der Station, d. h. die Position wird an der Arbeitsstation erfasst. Ob die Position zwischen den Stationen bekannt ist, wird in den Systemen nicht näher erläutert. Weitere Lösungsansätze basieren auf der Verwendung von RFID-Gates, mit welchen die Position des Objekts zwar nicht genau bestimmt werden kann, allerdings zumindest der Bereich, in welchem sich ein Objekt befindet, detektiert wird.

Im Bereich der Kommunikation bilden Agentensysteme die am weitesten verbreitete Lösung (vgl. Tabelle 3-1). Hier wird zwischen Agenten, die direkt mit den Systemelementen verbunden sind (z. B. LEWANDOWSKI ET AL. 2013), und Agenten, welche den Systemelementen lediglich zugeordnet sind (SCHOLZ-REITER ET AL. 2014), unterschieden. Im zweiten Fall basiert die Produktionssteuerung auf einer Simulation, die mit einer kleinen Vorlaufzeit parallel zur Produktion läuft. Ein Beispiel für ein simulationsbasiertes System ist der im Rahmen des Forschungsprojekts SmartF-IT entstandene Demonstrator, welcher die Kopplung von Virtualität und Realität ermöglicht. Hierbei prognostiziert die parallel laufende Simulation potenzielle Prozessabfolgen und erhöht über eine Kopplung mit den realen Hardwarekomponenten die Adaptivität der Montagestation (MÜLLER ET AL. 2016). Simulative Ansätze (vgl. Tabelle 3-1) basieren auf der gleichen Funktionsweise. In diesen Ansätzen werden basierend auf Agentensystemen Holone programmiert, welche unterschiedliche Systemkomponenten darstellen und in ihrer Gesamtheit als Referenzsystem nutzbar sind. In diesen Referenzsystemen ist es möglich, unterschiedliche Grade der Autonomie umzusetzen. Beispielsweise wählen BORANGIU ET AL. (2015) einen Ansatz ähnlich dem von FRANKE ET AL. (2010), in dem unterschiedliche Layer in die Produktionssteuerung implementiert werden. Durch das Bilden von Stationsgruppen- und Verwaltungsagenten können Bereiche zusammengefasst werden, welche anteilig von einer zentralen Instanz gesteuert werden.

Keines der aufgeführten Systeme befand sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung im industriellen Einsatz. Es handelt sich durchweg um Demonstratoren bzw. simulative Ansätze. Eine weitere Gemeinsamkeit der Systeme besteht darin, dass Hilfsteile wie bspw. Schrauben, Muttern, etc. und Hilfsstoffe wie Öle, Fette, etc.

nicht als selbststeuernde Objekte betrachtet werden. Sie werden als Verbrauchsmaterial einer Ressource (z. B. Montagearbeitsplatz) angesehen.

3.1.3 Analyse und Fazit

Selbststeuerungssysteme befinden sich im Entwicklungsstadium und sind in der Industrie bisher nicht implementiert (MARTINS ET AL. 2018). Die Vielzahl der forschungsseitig implementierten Systeme spricht hingegen für deren stetig steigenden technologischen Reifegrad. Darüber hinaus belegen verschiedene Benchmarks die Vorteile von Selbststeuerungssystemen im Vergleich zu zentralen Steuerungssystemen (SCHOLZ-REITER ET AL. 2005, PANNEQUIN ET AL. 2009). Der Aufwand zur Bestimmung des individuell optimalen Autonomiegrades stellt Unternehmen jedoch vor eine große Herausforderung und erschwert eine Investitionsentscheidung (GRONAU & THEUER 2016). Um die individuellen Vorteile zu bestimmen, ist aktuell zunächst eine Simulation unter Verwendung von Referenzsystemen durchzuführen. Dieser Aufwand sollte reduziert und die Entscheidung für bzw. gegen eine autonome Steuerung in eine frühe Planungsphase verlagert werden, um späte Änderungen oder eine Übererfüllung zu vermeiden.

Als weiteres Hemmnis ist die fehlende Abdeckung der Prozesskette zu sehen. Die Testsysteme beziehen sich vorrangig auf die Bereiche Logistik und Montage, in welchen bereits fertige Bauteile oder ganze Produkte vorliegen, deren ID durch die Montage bzw. den Transport nicht beschädigt wird. Für die vorgelagerten Fertigungsprozesse, welche bis dato nicht betrachtet werden, sind die ID-basierten Ansätze aufgrund der potenziellen Beschädigung nicht einsetzbar. In einer industriellen Anwendung müsste ein Unternehmen folglich zwei Steuerungssysteme einsetzen, welche aufeinander abgestimmt werden müssen (GRUNDSTEIN ET AL. 2013A, GRUNDSTEIN ET AL. 2013B). Es entstehen oppositionell zu den Vorteilen der Selbststeuerung höhere Investitions- und Betriebskosten, welche die Wirtschaftlichkeit reduzieren.

3.2 Direkte Identifikation anhand von Merkmalen und Sensorsystemen

Die direkte Identifikation von Objekten erfordert eine Zuordnung von Merkmalen und Sensoren (HIPPENMEYER 2016). In diesem Kapitel werden verschiedene Merkmale von Objekten dargelegt, welche im produktionstechnischen Kontext von Relevanz sind und eine prinzipielle Eignung für die direkte Identifikation besitzen. Darauf aufbauend wird eine Übersicht von Sensorsystemen gegeben und deren Funktionsweise in Auszügen erläutert. Wie diese Sensorsysteme applikationsspezifisch auszuwählen sind, wird im letzten Abschnitt anhand verschiedener ausgewählter Methoden und Vorgehensweisen dargestellt.

3.2.1 Objektmerkmale

Nach DIN 4002 besitzen Merkmale unterschiedliche Attribute, welche das Merkmal konkretisieren und Rückschlüsse auf dessen potenzielle Verwendung für die Identifikation ermöglichen. Von besonderer Relevanz für die Identifikation ist eine Kategorisierung in abstrakte und nicht abstrakte Merkmale. Dieses Attribut beschreibt, ob ein Merkmal prinzipiell direkt messbar und demzufolge für eine direkte Identifikation geeignet ist. Ob eine Messung im Betrieb robust durchführbar ist, wird von der zustandsabhängigen Instanz des Merkmals und weiteren Faktoren wie bspw. dem Sensorumfeld bestimmt (BERNSTEIN 2014). Parallel zu der Norm DIN 4002 ist eine Merkmalsdatenbank entstanden, welche durch das Deutsche Institut für Normung (DIN) betreut und gepflegt wurde. Im finalen Stand der Merkmalsdatenbank sind mehr als 1700 Merkmale gesammelt, welche mit 43 Attributen beschrieben sind. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass sich nicht alle Merkmale auf Objekte beziehen. Bezüge zu Prozessen, Betriebsmitteln und Organisationseinheiten sind ebenfalls in der Datenbank enthalten und von der Betrachtung im Kontext der Objektidentifikation auszuschließen.

Eine weitere Sammlung an Objektmerkmalen ist in Abbildung 3-2 dargestellt. HESSE (2013) unterscheidet im Kontext der Handhabung zwischen Verhaltenstypen, geometrischen Werkstückdaten, kennzeichnenden Formelementen, physikalischen Eigenschaften sowie dem Ruhe- und Bewegungsverhalten. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen Handhabung und Identifikation (VDI 2860) sind die dargestellten Werkstückmerkmale für die spätere Betrachtung von besonderer Relevanz.

Objektmerkmale					
Verhaltenstyp	Geometrische Werkstückdaten	Kennzeichnende Formelemente	Physikalische Eigenschaften	Ruheverhalten	Bewegungsverhalten
Wirrteil	Ausdehnungen	Bohrung	Werkstoff	Lagestabilität	Gleitfähigkeit
Flachteil	Seitenverhältnisse	Absatz, Bund	Schwerpunkt	Standicherheit	Rollfähigkeit
Zylinderteil	Abmessungen	Sicke, Wulst	Steifigkeit	Ordnungswahrscheinlichkeit	Richtungsstabilität
Blockteil	Symmetrien	Ausschnitt	Festigkeit	Unordnungsgrad	Schüttfähigkeit
Kegelteil	Größenklassen	Schlitz	Gewicht, Masse	Stapelfähigkeit	
Pyramidenteil	Auflageflächen	Nut, Einstich	Oberflächenbeschaffenheit	Hängefähigkeit	
Pilzteil	Innenkonturen	Fase	Temperatur	Bearbeitungslage	
Hohlteil		Haken	Bearbeitungszustand	Vorzugslage	
Formteil		Auslinkung			
Massivteil					
Kugelteil					
Langteil					

Abbildung 3-2: Objektmerkmale in Anlehnung an HESSE (2013)

Vorgehensweisen zur Definition bzw. Auswahl relevanter Objektmerkmale zur Identifikation im produktionstechnischen Umfeld wurden im Kapitel „Stand der Wissenschaft und Technik“ nicht identifiziert.

Die bisherigen Betrachtungen von Merkmalen zur Identifikation von Objekten konzentrieren sich auf bestimmte eindeutige Merkmalsausprägungen. Unter dem englischen Begriff „Physical Unclonable Functions“ (PUF) werden Merkmale verstanden, die analog zu einem Identifikator eine eindeutige Identifikation ermöglichen. Beispielsweise stellt die Maserung von Kunststoffspritzteilen ein eindeutiges Muster dar, welches über spezielle Kamerasysteme zu erkennen und dem menschlichen Fingerabdruck gleichzusetzen ist (WIGGER ET AL. 2018).

3.2.2 Sensorsysteme

Um die dargelegten Merkmale zu messen, sind entsprechende Sensoren notwendig. Von einer detaillierten Beschreibung spezifischer Sensorsysteme wird an dieser Stelle abgesehen, da die herstellerabhängigen Eigenheiten für eine theoretische Betrachtung und eine allgemeingültige Zuordnung von Merkmalen zu Sensoren nicht zweckmäßig sind. Stattdessen werden am Markt erhältliche Sensorklassen beleuchtet und für detaillierte Beschreibungen der aufgeführten Sensoren sowie weitere Systeme auf JÜNEMANN & BEYER (2013), HESSE & SCHNELL (2014), BERNSTEIN (2014), TRÄNKLER & FISCHERAUER (2014) und HERING & 'SCHÖNFELDER (2018) verwiesen. In Tabelle 3-2 ist eine Übersicht der folgend beschriebenen Sensorklassen inkl. ihrer Einsatzbereiche zusammengefasst. Der Einsatzbereich stellt das grundlegende Auswahlkriterium für eine bestimmte Applikation dar.

3.2 Direkte Identifikation anhand von Merkmalen und Sensorsystemen

Tabelle 3-2: Übersicht geeigneter Sensorklassen in Anlehnung an ADAM ET AL. (1997) und JÜNEMANN & BEYER (2013)

Sensorart	Einsatzbereich	Anwesenheit	Lagedetektion	Geometriedaten	Masse	Vollständigkeit	Identifizierung
Wägezelle		●	○	○	●	●	●
2D-Kamera		●	●	●	○	●	●
3D-Kamera		●	●	●	○	●	●
Zeilenscanner		●	●	●	○	●	●
Farbsensor		●	○	○	○	○	●
Induktiver Näherungssensor		●	●	●	○	○	●
Kapazitiver Näherungssensor		●	●	●	○	○	●
Ultraschallsensor		●	●	●	○	○	●
Lichttaster		●	●	●	○	○	●
Taktile Sensoren		●	●	●	●	○	●

Füllgrad der Kreise gibt den Grad der Eignung an

3.2.2.1 Wägezellen

In der Produktion wird die Erfassung von Gewichtskräften maßgeblich durch Wägezellen realisiert. Sie stellen eine Sonderform von Kraftsensoren dar, welche über unterschiedliche Funktionsprinzipien die Masse eines Objekts ermitteln (HESSE & SCHNELL 2014). Durch die Varianz der Funktionsprinzipien ist es möglich, Objekte von wenigen Gramm bis hin zu mehreren Tonnen zu erfassen (HERING & SCHÖNFELDER 2018). Häufig wird das Gewicht über einen Federkörper in Verbindung mit Dehnmessstreifen gemessen. Unter Nutzung der Verformung und des piezoresistiven Effekts wird über die Längenänderung auf die wirkende Kraft und somit auf das Gewicht zurückgeschlossen (NATER ET AL. 2008). Neben der Funktionsweise werden Wägezellen hinsichtlich ihres Einsatzgebiets kategorisiert. Für die vorliegende Arbeit sind sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Waagen von Relevanz. Kontinuierlichen Waagen können neben dem Wiegen von Schüttgütern auch für die Gewichtsbestimmung einzelner bewegter Objekte verwendet werden (NATER ET AL. 2008, WIPO-TEC 2018). Zu den diskontinuierlichen Wägezellen zählen Waagen aus Laboreinrichtungen oder Prüfständen. Diese Waagen sind ebenfalls in Prozesse integrierbar. Entscheidend dafür sind die Befestigung der Waage und das darauf

anzupassende Funktionsprinzip. In Kranwagen werden bspw. Zug- statt Druckfedern verwendet. Gleiches gilt für den in Abbildung 3-3 dargestellten Aufbau einer in ein Robotersystem integrierten Waage, welche das Wiegen von Objekten während der Handhabung ermöglicht.

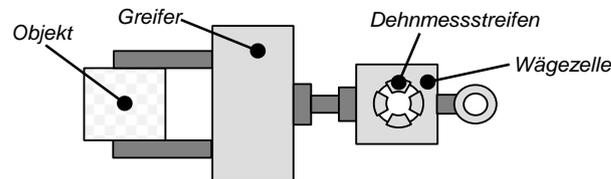


Abbildung 3-3: Integriertes Wägesystem (HESSE & SCHNELL 2014)

3.2.2.2 Optische Sensoren

Der Einsatz der optischen Messverfahren und der Lasermesstechnik bietet viele Vorteile, erfordert jedoch eine intensive Schulung, um die Vorteile uneingeschränkt nutzen zu können (KEFERSTEIN & MARXER 2015). Die Komplexität dieser Systeme unterscheidet bildgebende und bildauswertende Verfahren. Ein verfahrensunabhängiges Systemmodell der bildverarbeitenden Systeme, welches i. d. R. aus einem Bildsensor mit Objektiv, einer Beleuchtung und einer Rechereinheit besteht, ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Diese exemplarische Darstellung zeigt eine Beleuchtung durch Auflicht. Informationen zu weiteren Beleuchtungsarten, z. B. Durchlicht oder Hell- und Dunkelfeld, können ERHARDT (2008) entnommen werden.

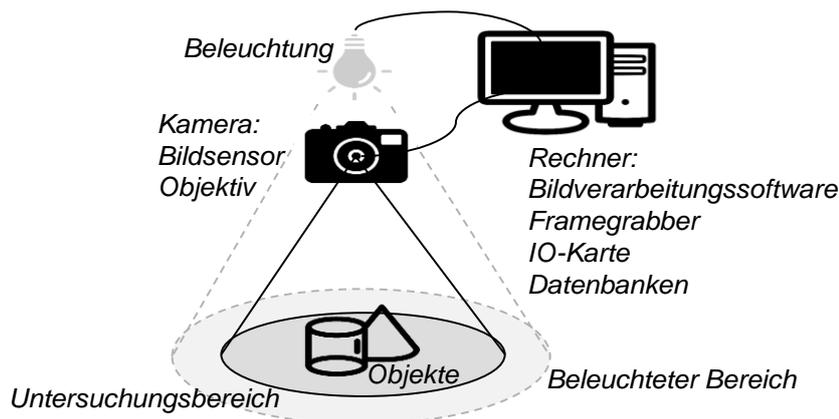


Abbildung 3-4: Industrielles Bildverarbeitungssystem

Szenenabbildende Sensoren sammeln Informationen zum gesamten Betrachtungsbereich und extrahieren die relevanten Merkmale für eine Analyse. Daher sind optische Sensoren vielseitig einsetzbar und können je nach Kameratyp neben

3.2 Direkte Identifikation anhand von Merkmalen und Sensorsystemen

Formen und Oberflächenbeschaffenheiten auch Farbausprägungen bestimmen. Es wird zwischen 2D- und 3D-Verfahren unterschieden (HESSE & SCHNELL 2014).

Der 2D-Bildverarbeitung liegt eine kontrastbasierte Verarbeitung von Informationen zugrunde. Diese Verarbeitung ist wiederum in das Flächen-Scan-Verfahren, in welchem mehrere 2D-Bilder in unterschiedlichen Auflösungen angefertigt und zusammengesetzt werden, und das Zeilen-Scan-Verfahren zu unterteilen. Beim Zeilen-Scan wird ein Objekt Zeile für Zeile fotografiert und die einzelnen Bilder werden für die Auswertung zusammengesetzt (SÜBE & RODNER 2014).

Um die Form eines Objekts zu erfassen, werden 3D-Verfahren eingesetzt, welche mehr Informationen aufnehmen. Vergleichbar mit einem Buch werden bei 3D-Verfahren alle Seiten bzw. Ebenen aufgenommen, während 2D-Verfahren lediglich eine Ebene aufzeichnen. Für die Bildverarbeitung ergeben sich dadurch deutlich mehr Auswertemöglichkeiten. Die im produktionstechnischen Umfeld relevantesten 3D-Verfahren sowie deren Vor- und Nachteile sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens sind vor allem die Auflösungen in Objektrichtung (Tiefenauflösung) und seitlich zur Objektrichtung (laterale Auflösung) entscheidend (GROTE 2016). Für die Aufnahme des Farbspektrums ist ein Farbsensor notwendig, welcher Farbmaßzahlen (z. B. den RGB-Farbraum) erfasst und diese mit einer Farbtabelle vergleicht (WEGO & GESKE 2010).

Tabelle 3-3: Vor- und Nachteile von 3D-Bildgebungsverfahren (HESSE & SCHNELL 2014, GROTE 2016)

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Lasertriangulation und Lichtschnittverfahren	+ Kosten + Angebot an Sensoren + Genauigkeit in Relation zur Entfernung	- Entfernungabhängige Tiefenauflösung - Reflexionsgrad bestimmt Bildqualität - Ruhende Objekte nötig - Softwareaufwand
Stereoaufnahme	+ Hardwareaufwand + Kosten + Farbinformationen	- Messbereich - Softwareaufwand - Entfernungabhängige Tiefenauflösung
Streifenlichtprojektion	+ Genauigkeit + Tiefenauflösung + Laterale Auflösung	- Ruhende Objekte nötig - Messbereich - Vielseitige Randbedingungen
Time-of-Flight Laufzeitverfahren	+ Geschwindigkeit + Baugröße + Robustheit + Kosten	- Grundrauschen - Laterale Auflösung - Tiefenauflösung - Junges Forschungsfeld

3.2.2.3 Näherungsschalter und taktile Sensoren

Näherungsschalter werden in der Produktion zur Kontrolle von Füllstands- und Stapelhöhen sowie der Anwesenheit von Objekten eingesetzt (HERING & SCHÖNFELDER 2018). Diese Sensortypen geben ein einfaches binäres Signal aus. Durch den Einsatz mehrerer dieser Sensoren, in einer bestimmten Anordnung, können sie zudem zur Objekterkennung eingesetzt werden (GRAF 2018). Um das binäre Signal robust und zuverlässig auszuwerten, muss die Art des Näherungsschalters richtig bestimmt werden. Diese richtet sich maßgeblich nach dem zu erfassenden Material und dem Messabstand (vgl. Tabelle 3-4).

Taktile Sensoren sind auf eine mechanische Berührung des Messobjekts angewiesen. Wird ein Objekt an mehreren Stellen berührt, kann die Geometrie bestimmt werden (HERING & SCHÖNFELDER 2018). Taktile Sensoren sind darüber hinaus zur Kraftmessung während der Handhabung einsetzbar, indem sie auf der Wirkfläche eines Greifers platziert werden (ZUG ET AL. 2017). Hierbei gilt es, potenzielle Verformungen der Wirkfläche zu berücksichtigen (MÜLLER ET AL. 2017).

Tabelle 3-4: Übersicht Näherungsschalter (HERING & SCHÖNFELDER 2018)

	Induktiv	Kapazitiv	Ultraschall	Optoelektronisch
Definition	Erzeugung elektromagnetisches Feld	Erzeugung elektrisches Feld	Senden von Ultraschallwellen	Erfassung reflektierter Strahlung
Hauptkomponente	Spule	Kondensator	Ultraschall-Wandler	Halbleiter
Erfassungsmaterial	Metalle	Alle	Alle	Alle
Messabstand	8-20 mm	1-15 mm	30-3500 mm	bis zu 7000 mm

3.2.3 Auswahl und Integration von Sensorsystemen

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Verfahren zur Auswahl von geeigneten Sensoren bzw. Sensorsystemen erläutert. Um die Sensoren in der Produktion nutzbar zu machen, müssen sie nach ihrer Auswahl in eine bestimmte Applikation integriert werden. Die Randbedingungen dieser Integration werden in den verschiedenen Auswahlverfahren bereits mit einbezogen. Genaue Anleitungen zur Integration bilden die Ausnahmen und sind lediglich für bestimmte Applikationen vorhanden. Im Folgenden wird auf zwei allgemeine Verfahren zur Sensorauswahl und auf ein Verfahren zur Sensorintegration näher eingegangen.

3.2 Direkte Identifikation anhand von Merkmalen und Sensorsystemen

Das Auswahlverfahren nach BERNSTEIN (2014) basiert auf einer Checkliste, die fünf Themenbereiche adressiert: Sensorumfeld, Funktionsanforderungen, operationelle Anforderungen, Schnittstellen und Sicherheitsanforderungen. Mit dieser Checkliste wird eine genaue Spezifikation erstellt und anschließend mit einer Sensordatenbank abgeglichen (vgl. Abbildung 3-5). Hierbei handelt es sich um einen einfachen Anforderungs-Fähigkeiten-Abgleich, dessen Ergebnis von einer anzulegenden Sensordatenbank abhängig ist. Die Kombination von Sensoren zur Erfassung einer Messgröße oder die Betrachtung mehrerer Messgrößen sind nicht Bestandteil der Vorgehensweise nach BERNSTEIN (2014).

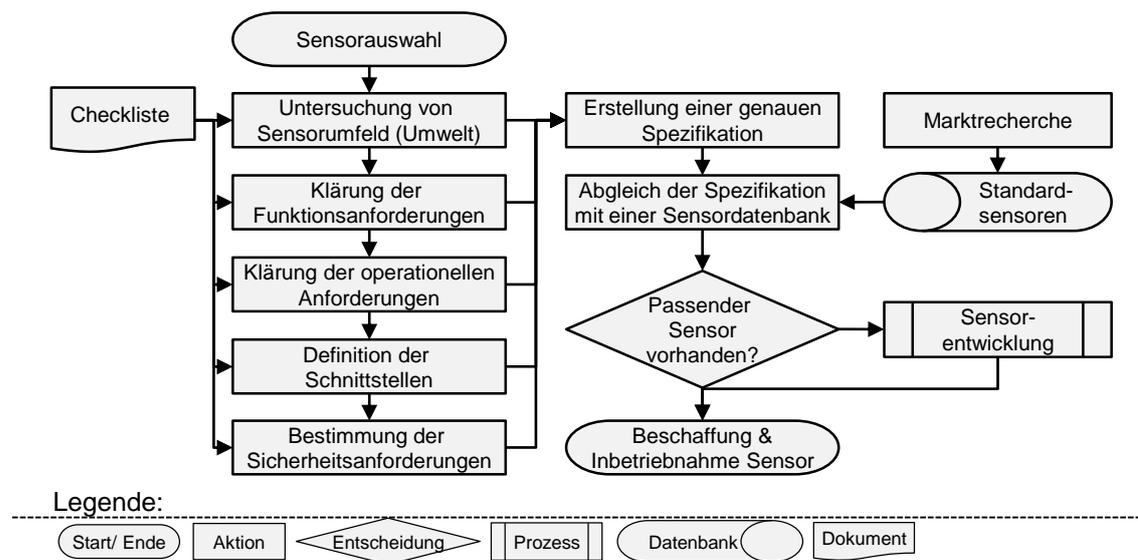


Abbildung 3-5: Vorgehen zur Sensorauswahl (BERNSTEIN 2014)

Ein leitfragenbasiertes Vorgehen zur Sensorauswahl ist in VDMA (2018) geschildert. In dem Verfahren wird zunächst der Nutzen definiert, welcher durch den Sensoreinsatz erzielt werden soll. Im Anschluss wird schrittweise auf unterschiedliche Anforderungen an das Sensorsystem eingegangen (vgl. Abbildung 3-6). Zu den Anforderungen zählen Messgröße, Bauraum und Schnittstellen, Umgebungsbedingungen, Eigenschaften der Messsignale, Fehlerfolgen sowie die Stückzahl der benötigten Systeme. Um in den einzelnen Schritten den Anwender zu unterstützen, werden Listen mit Alternativen zur Verfügung gestellt, die bspw. unterschiedliche Sensortypen näher beschreiben. Darüber hinaus sind in diesen Listen weitere Fragestellungen angedeutet, welche den Anwender Schritt für Schritt zur Lösung führen. Beispielsweise wird zwischen einer Integration des Sensors in das Produktgehäuse und einem zusätzlichen Gehäuse unterschieden (VDMA 2018). Die Vorgehensweise ähnelt stark dem Verfahren nach BERNSTEIN (2014), abgesehen von der höheren Bedeutung von Fehlerfolgen. Beispielsweise

3 Stand der Wissenschaft und Technik

werden in der sechsten Leitfrage der Sensortyp, dessen mechanische Integration und die Verfahren zur Informationsgenerierung analysiert. Dies kommt einer vollumfänglichen Systemanalyse gleich und kann bspw. über eine Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse durchgeführt werden. Das Vorgehen fokussiert folglich die Auswahl eines Sensors für eine bestimmte Messgröße im Hinblick auf seine Einsatzfähigkeit.

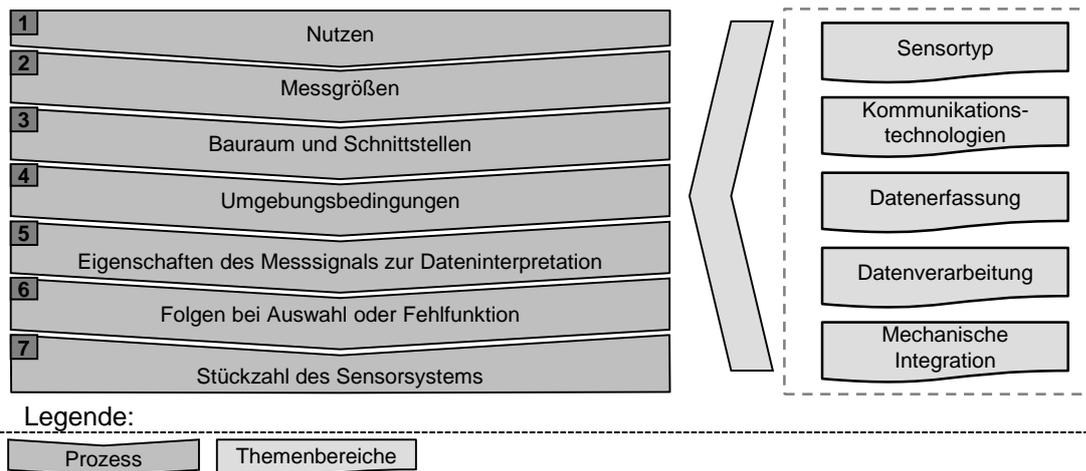


Abbildung 3-6: Leitfragenbasiertes Vorgehen zur Sensorauswahl (VDMA 2018)

Ein Vorgehen zur Auswahl und Integration von Sensoren wird in GRAF (2018) geschildert. Diese Entwicklungsmethodik fokussiert die Integration von Sensoren in den Handhabungsprozess von Faserverbundbauteilen. Die Methode ist in vier Bausteine unterteilt, welche sich an den vier Ebenen des Münchner Produktkonkretisierungsmodells orientieren (Anforderungs-, Funktions-, Wirk- und Bauebene). Durch die Handhabung textiler Halbzeuge und den Einsatz eines Sauggreifers sind in dieser Methode klare Randbedingungen gesetzt. Das Vorgehen zur Integration von Sensoren ist jedoch auf andere Anwendungsfälle übertragbar (GRAF 2018). Entscheidend für die Integration sind Prozessschritte, welche der Funktions- und der Bauebene zuzuordnen sind. Im zweiten Baustein der Methode wird der Prozess unter Verwendung eines relationsorientierten Funktionsmodells auf konfigurationsspezifische schädliche Funktionen untersucht (vgl. Abbildung 3-7). Auf diese Weise können bereits in einem frühen Entwicklungsstadium potenzielle Schwachstellen einer Konfiguration identifiziert werden, sodass ungeeignete Wirkprinzipien, die mit der Konfiguration verbunden sind, in die weitere Lösungsfindung nicht mit einbezogen werden (GRAF 2018). Mit dieser Vorauswahl werden anschließend Gesamtkonzepte abgeleitet, welche in der Bauebene erneut auf ihre Integrationsfähigkeit untersucht werden.

3.2 Direkte Identifikation anhand von Merkmalen und Sensorsystemen

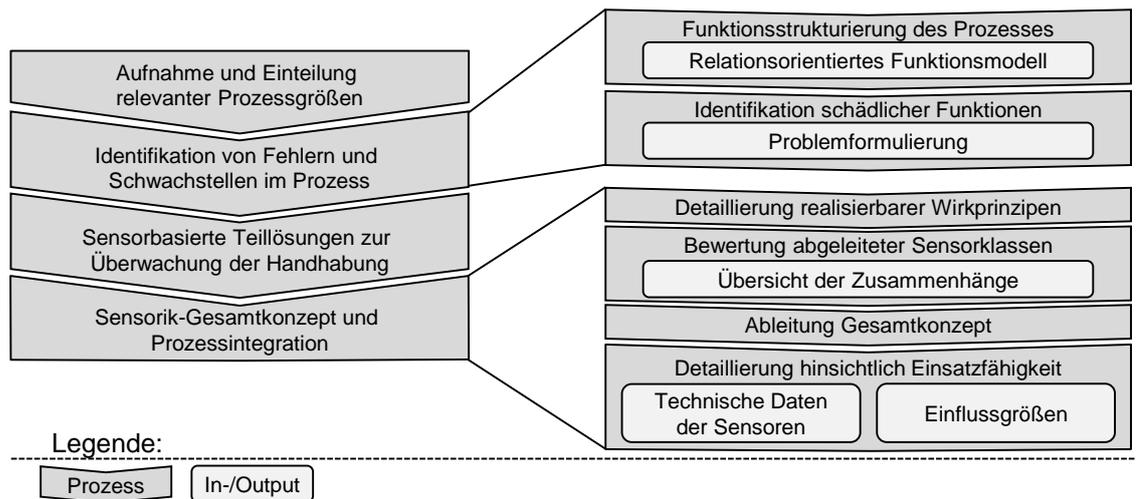


Abbildung 3-7: Auszug der Methode zur Erarbeitung eines qualitätskonformen Handhabungsvorgangs (GRAF 2018)

Die Methode nach GRAF (2018) stellt ein Verfahren dar, in welchem mehrere Sensoren und mehrere Messgrößen betrachtet werden, um durch eine Sensor-kombination die Qualität eines Prozesses zu erhöhen. Die Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung der Sensoren und des Prozesses unterscheiden diese Methode grundlegend von den anderen Vorgehensweisen.

3.2.4 Analyse und Fazit

Aus der Analyse des Themenbereichs Identifikation geht hervor, dass bereits umfangreiche Beschreibungen von Merkmalen existieren. Diese Menge an Merkmalen wurde bisweilen nicht auf ihre Einsatzfähigkeit zur Identifikation von Objekten analysiert. Darüber hinaus existieren unterschiedliche Zuordnungen, welche Sensoren zur Messung verschiedener Merkmale geeignet sind. Im Bereich der Identifikation wird für einen Großteil der Sensoren auf eine Fallunterscheidung hinsichtlich ihrer Eignung verwiesen. Folglich muss für eine Entscheidung, welcher Sensor ein Objekt identifizieren kann, die komplette Applikation betrachtet werden. Um eine applikationsspezifische Zuordnung von Merkmal bzw. Messgröße und Sensorsystem vorzunehmen, stehen unterschiedliche Vorgehensweisen zur Verfügung. Diese betrachten maßgeblich eine bestimmte Messgröße und nicht die Kombination von Merkmalen und Sensoren zur Erfüllung einer Aufgabe. Eine Ausnahme stellt die Methode nach GRAF (2018) dar, welche durch ihren eingegrenzten Anwendungsbereich jedoch nicht die Identifikation berücksichtigt.

3.3 Indoorlokalisierung mittels aktiver und passiver Technologien

Die Positionsbestimmung der Systemelemente stellt die zweite Voraussetzung eines Selbststeuerungssystems dar. Bestehende Lokalisierungsverfahren sind in aktive und passive Technologien zu unterteilen. Diese werden im folgenden Abschnitt erläutert und im Rahmen der Analyse des Themenbereichs auf ihre Einsetzbarkeit in einem merkmalsbasierten Selbststeuerungssystem diskutiert.

3.3.1 Lokalisierungstechnologien

In BRENA ET AL. (2017) findet sich eine Beschreibung und Bewertung verschiedener aktiver und passiver Lokalisierungstechnologien (vgl. Tabelle 3-5). Der maßgebliche Unterschied besteht in der Genauigkeit der verschiedenen Verfahren und der Limitation der aktiven Verfahren auf ein Gebäude bzw. einen bestimmten Raum. Diese Limitation aktiver Verfahren ist auf die benötigte Signalcodierung zurückzuführen, welche auf dem Sender-Empfänger-Prinzip beruht (BRENA ET AL. 2017). Die Bewertung der Kosten unterscheidet Kosten aus Investitions- bzw. Anwendersicht (vgl. Tabelle 3-5). Im Fall der Selbststeuerung sind dies dieselben Parteien, sodass günstige Kosten aus Anwendersicht nur in Kombination mit günstigen Investitionskosten als Vorteil ausgelegt werden können. Unter den aktiven Technologien gilt dies nur für Bluetooth. Die passiven Technologien werden von BRENA ET AL. (2017) durchweg als gesamtheitlich günstige Technologien beschrieben. Die benötigte Genauigkeit der Lokalisierung in einem Selbststeuerungssystem ist nicht eindeutig definiert. Sie ist abhängig von der Größe und der Menge der Bauteile, welche in einem bestimmten Bereich verarbeitet werden. Ausgehend von Handarbeitsplätzen und der durchschnittlichen Reichweite von Werkern sollte die minimale Genauigkeit zwischen 625 und 815 mm liegen (SCHLICK ET AL. 2010). Weitere Anforderungen an die Genauigkeit stellen nachfolgende Prozesse und die involvierten Betriebsmittel. Für die Produktion ist die Robustheit der Technologie von besonderer Wichtigkeit. Vor allem die passiven Technologien unterliegen Schwankungen, welche einen Einsatz in einem Selbststeuerungssystem ausschließen. Die Nutzung aktiver Technologien ist hingegen an die Anbringung eines Empfängers, welcher analog zu einer ID zu sehen ist, an das Objekt gebunden. Aus diesem Grund sind sämtliche Nachteile der indirekten Identifikation auf aktive Lokalisierungstechnologien zu übertragen. Folglich stehen diese Technologien im Widerspruch zur angestrebten Zielsetzung und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

3.3 Indoorlokalisierung mittels aktiver und passiver Technologien

Tabelle 3-5: Indoorlokalisierungstechnologien (BRENA ET AL. 2017)

	Verfahren	Genauigkeit	Vorteile	Nachteile
Aktiv	Infrarot	57 cm-2,3 m	+ Kosten (Anwender)	- Sonnenlicht
	VLC	10 cm	+ Kosten (Anwender)	- Kosten (Infrastruktur)
	Ultraschall	1 cm-2 m	+ Genauigkeit	- Kosten - Störungen
	Bluetooth	30 cm-Meter	+ Kosten	- Signal Mapping
	ZigBee	25 cm	+ Wiederverwendung	- Spezial Equipment
	RFID	1-5 m	+ Kosten (Anwender)	- Genauigkeit
Passiv	Ultrabreitband	15 cm	+ Genauigkeit	- Kosten
	Magnetisch	2 m	+ Kosten + Infrastruktur	- Mapping erforderlich
	Trägheitskraft	2 m	+ Kosten	- Akkumulierung von Fehlern
	Umgebungsschall	Meter	+ Kosten	- Genauigkeit
	Umgebungslicht	10 cm-Meter	+ Kosten	- Schwankungen Genauigkeit
	Bildverarbeitung	1 cm-1 m	+ Kosten	- Umgebungslicht

VLC: Visible Light Communication (sichtbares Licht)

ZigBee: Eigenbegriff für einen Funkstandard

3.3.2 Analyse und Fazit

Eine Analyse des Stands der Technik im Bereich der Lokalisierung zeigt, dass lediglich optische Verfahren (vgl. Bildverarbeitung, Tabelle 3-5) eine eingeschränkte Eignung besitzen. Nachteilig sind in diesem Ansatz jedoch die hohen Investitionskosten zur Abdeckung aller Produktionsbereiche, um Objekte lokalisieren zu können. Folglich stehen für die Lokalisierung der Systemelemente in einem merkmalsbasierten Selbststeuerungssystem keine adaptierbaren Ansätze zur Verfügung. Im Hinblick auf stationäre Betriebsmittel ist es möglich, deren Positionen als statisch anzusehen, sodass diese initial manuell erfassbar sind. Für die Lokalisierung der Objekte muss hingegen ein neuer Ansatz entwickelt werden, um die Zielsetzung dieser Arbeit zu erreichen.

3.4 Kommunikation auf Basis von Agentensystemen in der Produktion

Der Einsatz von Software in der Produktion ist zumeist an verschiedene Standards gekoppelt. Die relevanteste Standardisierungsinstanz im Bereich der Agentensysteme ist die Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) (VDI 2653). Im folgenden Abschnitt wird neben diesem Standard ein Architekturmodell für Agenten in der Produktionstechnik erörtert. Darauf aufbauend werden bestehende Frameworks beschrieben und eine Analyse bestehender Objektagenten, welchen in einem Selbststeuerungssystem eine besondere Bedeutung zukommt, dargelegt. Darüber hinaus werden relevante agentenorientierte Entwicklungsmethoden beschrieben, welche ggf. für die angestrebte Methodik adaptierbar sind.

3.4.1 Referenzmodelle von Agentensystemen

Die FIPA greift die sog. BDI-Agentenarchitektur (Beliefs, Desires und Intentions) auf und bestärkt diese. Die Architektur bezieht sich auf die Struktur der Daten in einem Agenten (VDI 2653). Die eigenen und umgebungsbezogenen Informationen über den aktuellen Zustand werden Beliefs genannt. Unter Desires befinden sich die Daten zu den Hauptzielen eines Agenten, nach welchen er sein Verhalten ausrichtet. Die Intentions beschreiben hierarchisch organisierte Pläne, die zum Erreichen der Ziele ausgeführt werden. Agenten mit dieser inneren Struktur werden in das Agent-Management-Referenzmodell eingebettet (vgl. Abbildung 3-8). Dieses bildet einen Rahmen, in welchem FIPA-konforme Agenten miteinander und plattformübergreifend agieren (FIPA 2004, WEIß & JAKOB 2005).

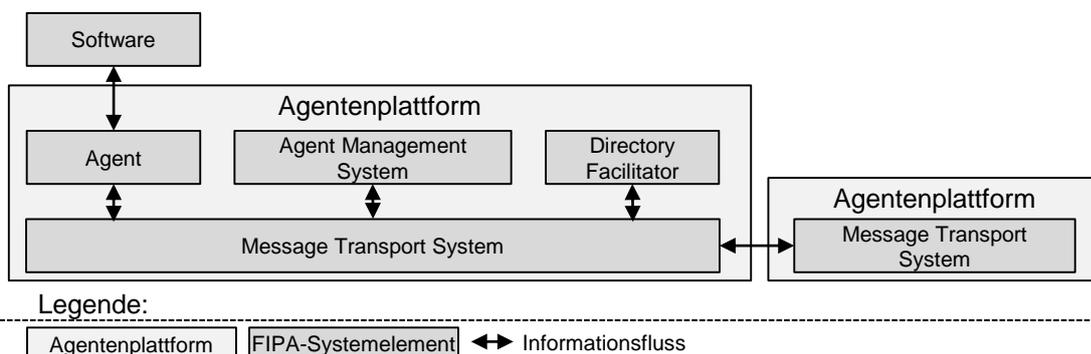


Abbildung 3-8: Agent-Management-Referenzmodell (WEIß & JAKOB 2005)

Die Agentenplattform, auch Framework genannt, stellt die Infrastruktur des Systems dar. Das Design dieser Plattform(en) ist durch die FIPA nicht im Detail spezifiziert, sodass im Sinne der Dezentralisierung verschiedene Plattformen auf

3.4 Kommunikation auf Basis von Agentensystemen in der Produktion

unterschiedlichen Rechnern, den Hosts, kombinierbar sind. Zu den Bestandteilen einer Plattform zählen u. a. Komponenten und Betriebssysteme des FIPA-Managements sowie unterstützende Software für die Agenten. Die FIPA bezeichnet einen Agenten als einen komplexen Rechenprozess mit mindestens einem Service, welchen er auf der Plattform anbietet. Zur Unterscheidung der Agenten innerhalb einer Plattform erhalten diese eine eindeutige ID. Kommuniziert wird in FIPA-konformen Systemen über die Agentenkommunikationssprache (ACL). Dies gilt ebenso für die Kommunikation mit dem Directory Facilitator (DF), welcher auch als Gelbe-Seiten-Dienstleister bezeichnet wird. Hier können Agenten ihre Services sowohl an- als auch abmelden bzw. aktualisieren. Der DF stellt einen optionalen Dienstvermittler dar und schließt somit eine direkte Kontaktierung eines anderen Agenten nicht aus. Ein notwendiges und einzigartiges Element einer Agentenplattform ist das Agentenmanagementsystem (AMS). Das AMS stellt die überwachende Instanz eines Agentensystems dar, in welcher sich alle Agenten registrieren und ihre ID erhalten. Um Informationen außerhalb des Agentensystems nutzbar zu machen, wird das Message Transport System als Standard-Kommunikationsmethode genutzt, welche nach FIPA auf Hypertext Transfer Protocol oder Internet Inter-ORB Protocol als standardisierte Protokolle zurückgreift. (FIPA 2004, WEIB & JAKOB 2005)

Neben den Richtlinien der FIPA wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine weitere Referenzarchitektur verwiesen, welche sich auf den Aufbau von Agenten in Automatisierungssystemen bezieht und in die Architektur nach FIPA integrierbar ist. In diesem Ansatz nach LEPUSCHITZ ET AL. (2011) wird zwischen einer physischen und einer softwareseitigen Komponente unterschieden (vgl. Abbildung 3-9).

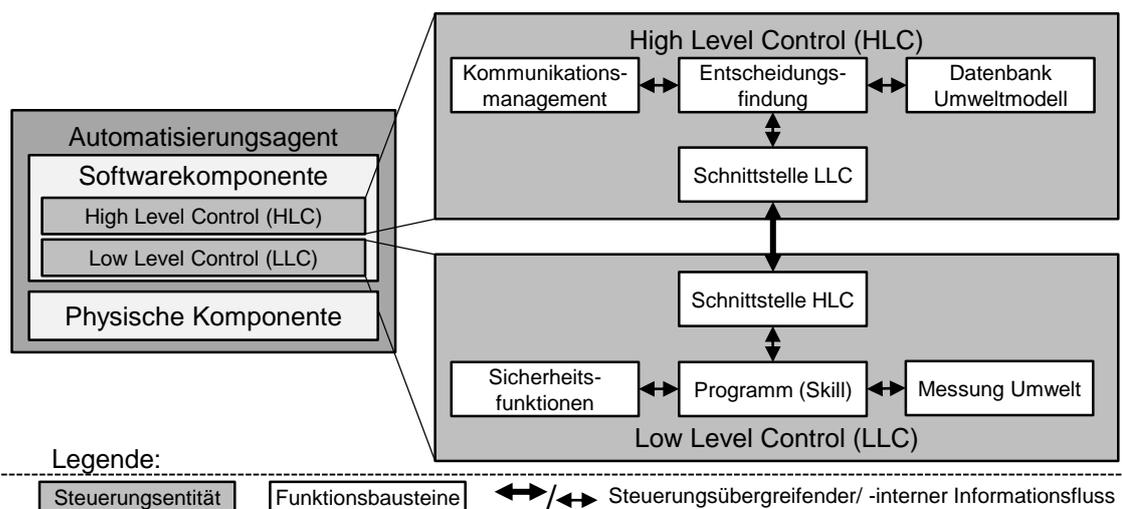


Abbildung 3-9: Automationsagent-Referenzmodell (LEPUSCHITZ ET AL. 2011)

Die physische Komponente wird als ausführendes Element des Agenten in der realen Welt verstanden, z. B. ein Roboter, der Handhabungsaufgaben ausführt. Die Softwarekomponente zählt zu den hybriden Strukturen und besteht aus der High Level Control (HLC), welche einen Agenten nach der Definition in Abschnitt 2.4.2.3 darstellt. Dieses entscheidungsfähige Organ wird um eine Schnittstelle zur Low Level Control (LLC) erweitert. Die LLC führt aus steuerungstechnischer Sicht die Programme aus und ist darüber hinaus für die Messung der Umwelt wie auch für die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen verantwortlich. Beispiele für die LLC sind Robotersteuerungen oder Speicher Programmierbare Steuerungen (SPS). Unter Verwendung dieser Architektur können Aufgaben und Funktionen gezielt den Steuerungsebenen HLC und LLC zugewiesen werden, sodass sich die Schnittstellendefinition zwischen Realität und Virtualität vereinfacht.

3.4.2 Frameworks

In der Referenzarchitektur nach FIPA (2204) ist ein zentraler Baustein das verwendete Framework. Frameworks nehmen direkten Einfluss auf den Programmcode und bestimmen bspw. zu verwendende Ontologien, die das Vokabular der Agentenkommunikation darstellen. Sie enthalten zudem bereits verschiedene Funktionalitäten, bspw. zur Registrierung der Agenten (TWEEDALE 2014). Eine Übersicht verfügbarer Frameworks ist in Tabelle 10-3 im Anhang zu finden. Weitere Frameworks können LEON ET AL. (2015) entnommen werden.

In KRAVARI & BASSILIADES (2015) ist eine ausführliche Bewertung der einzelnen Frameworks, bestehend aus den Kategorien Plattformeigenschaften, Benutzerfreundlichkeit, Betriebsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Sicherheitsmanagement, zu finden. In jeder dieser Kategorien wird das Framework JADE mit sehr gut bewertet. Aus weiteren Benchmarks geht zudem hervor, dass ZEUS und JADE performanter als andere Frameworks sind (JUN & SHAKSHUKI 2004, SHAKSHUKI & JUN 2004, TWEEDALE 2014, BELSIS ET AL. 2014). Darüber hinaus ist JavaScript, genutzt in JADE, die am weitesten verbreitete Programmiersprache (STACKOVERFLOW 2016). Ein weiterer Vorteil von JADE ist die vollumfängliche FIPA-Konformität, sodass dieses Framework detaillierter betrachtet wird. Wenn die Mobilität der Agenten im Fokus steht, stellt das Framework „eve“ eine sehr gute Alternative dar (KRAVARI & BASSILIADES 2015). Aus produktionstechnischer Sicht wird dies benötigt, wenn in einem Produktionsnetzwerk Objekte in der Supply Chain weitergegeben werden und infolgedessen die Plattform wechseln.

3.4 Kommunikation auf Basis von Agentensystemen in der Produktion

Die Architektur von JADE ist identisch zum Agent-Management-Referenzmodell (vgl. Abbildung 3-8). Über die vordefinierten Message-Transport-System-Agenten kann die Plattform dezentral über mehrere Hosts verteilt sein. Diese müssen eine Java Virtual Machine besitzen, welche eine Laufzeitumgebung, einen sog. Container, für die Agenten bereitstellt. Der AMS- und der DF-Agent sind in den Main-Container integriert (vgl. Abbildung 3-10) und werden gemeinsam automatisch gestartet (JADE 2018). Die Identifizierung weiterer Container und der darin befindlichen Agenten erfolgt über die AID. Diese werden in der Containertabelle (CT) hinterlegt. Die Daten der Agenten, die sich im Main-Container befinden, werden auf die local agent descriptor tables (LADT) und die global agent descriptor tables (GADT) verteilt. Der Unterschied der Tabellen ist mit globalen und lokalen Variablen in einem SPS-Programm vergleichbar. Die Kommunikation der Agenten erfolgt über die ACL. Für eine plattformübergreifende Kommunikation wird das Internal Message Transport Protocol (IMTP) bzw. das Message Transport Protocol (MTP) genutzt. Um den FIPA-Standard sicherzustellen, werden in JADE neben dieser Architektur Klassen und Pakete zur Verfügung gestellt. Diese definieren bspw. das Verhalten der Agenten sowie ihre Art und Weise zu kommunizieren.

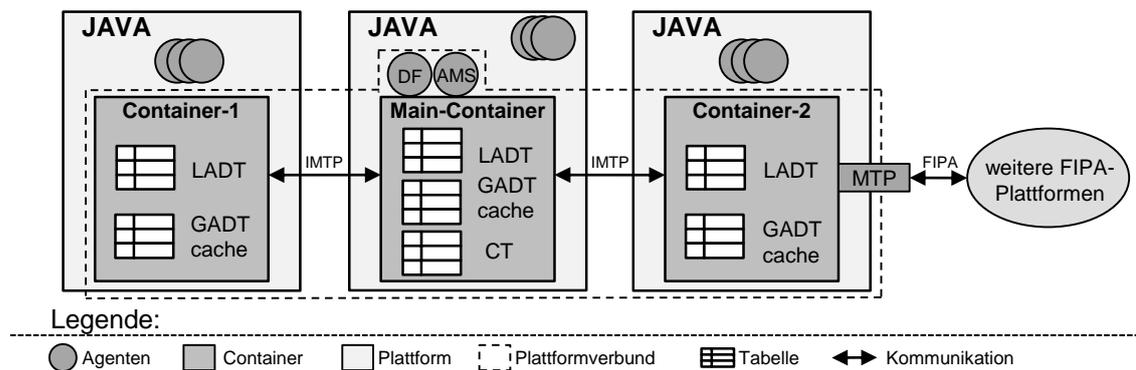


Abbildung 3-10: JADE-Architektur (BELLIFEMINE ET AL. 2004)

3.4.3 Agentensysteme und Objektagenten

In einem Selbststeuerungssystem nehmen vor allem die Objektagenten eine entscheidende Rolle ein (WINDT & HÜLSMANN 2007). In Tabelle 3-6 sind die Bestandteile bestehender Objektagenten enthalten, welche in den zugehörigen Agentensystemen für die Steuerung eines Systems genutzt werden. Um Objekten ihre Selbststeuerung zu ermöglichen, müssen ihre Agenten in der Lage sein, neben ihrem Zustand die relevanten Steuerungsparameter zu übermitteln (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015). Im produktionstechnischen Umfeld sind diese Parameter zumeist an die Geometrie des Objekts gekoppelt. Unter den betrachteten Systemen befindet

sich kein Ansatz, der das Tripel aus Zustand, Parametern und Geometriemodell bereitstellt. Folglich müssen die bestehenden Ansätze kombiniert werden. Darüber hinaus wurde in keinem dieser Systemansätze eine Selbststeuerung auf Basis direkter Identifikationsverfahren betrachtet. In Anlehnung an das Referenzmodell nach LEPUSCHITZ ET AL. (2011) wurde entsprechend nicht berücksichtigt, wie Objektagenten ohne eine LLC mit der Umwelt interagieren können.

Tabelle 3-6: Übersicht von Objektagenten

Quellen	Kriterien	Arbeitsplan	Zielsuche	Verhandlung	Zustand	Eigenschaften	Parameter	Position	Geometriemodell
(BASRAN ET AL. 1997)		○	●	○	○	●	○	●	○
(SUNDERMEYER & BUSSMANN 2001)		○	●	●	●	○	○	○	●
(KLOSTERMEYER & KLEMM 2003)		●	●	●	●	●	○	○	○
(BUSSMANN & SCHILD 2001)		●	●	●	●	○	○	○	○
(LIU ET AL. 2005)		●	●	●	●	○	○	○	○
(WANG & YU 2006)		●	○	○	○	●	○	○	●
(BEHRENS ET AL. 2006)		●	●	●	○	○	○	○	○
(HIGUERA & MONTALVO 2007)		●	●	●	●	●	○	●	○
(LEPUSCHITZ ET AL. 2011)		●	●	●	○	○	○	○	○
(LIBERT & HOMPEL 2011)		●	●	○	●	○	○	●	○
(SCHÜTZ ET AL. 2011)		●	●	○	○	●	●	○	●
(VOGEL-HEUSER ET AL. 2014)		●	●	●	○	○	○	○	○
(HARJES & SCHOLZ-REITER 2014A)		●	●	●	●	○	○	●	○
(ANTZOULATOS ET AL. 2014)		●	○	○	○	●	●	○	○

Füllgrad der Kreise gibt den Grad der Umsetzung an

3.4.4 Entwicklung von Agentensystemen

Die Agententheorie hat im Laufe der Zeit eine Vielzahl unterschiedlicher Entwicklungsmodelle und -methoden hervorgebracht (AKBARI 2010). Ebenso zahlreich sind die unterschiedlichen Bewertungs- und Evaluationsvorgehen zur Auswahl einer geeigneten Methode (DAM & WINIKOFF 2004, WEIß & JAKOB 2005, VDI 2653). Im Anhang befindet sich eine Liste aller analysierten Methoden im Bereich der Entwicklung von Agenten(systemen) (vgl. Tabelle 10-4). Im Folgenden werden zwei dieser Methoden beschrieben, welche die Entwicklung von Agentensystemen unterstützen und einen Überblick über die notwendigen Schritte im Rahmen der Entwicklung geben.

3.4 Kommunikation auf Basis von Agentensystemen in der Produktion

PASSI ist eine iterative und objektorientierte Methode für den Entwurf und die Entwicklung von FIPA-konformen Agentensystemen. Sie besteht aus fünf verschiedenen Modellen, in welchen UML als Modellierungssprache bzw. die Standards der FIPA für die Implementierung genutzt werden (vgl. Abbildung 3-11). Das Anforderungsmodell dient der Erfassung und Modellierung der Systemanforderungen. Die im letzten Teilschritt definierten Aufgaben der Agenten werden im Agenten-Gesellschaftsmodell dazu genutzt, um Abhängigkeiten zwischen den Agenten abzuleiten. Diese Abhängigkeiten dienen zur Detailierung der Ontologien, der Rollen sowie der Kommunikationsprotokolle. Im Gesellschaftsmodell wird das Zusammenspiel der Agenten aus Multiagentensicht definiert. Die dort definierten Kommunikationsregeln sind ein zentraler Input zur Gestaltung der Systemarchitektur sowie für die Struktur der Agenten selbst (vgl. Agentenimplementierungsmodell). Unter Berücksichtigung der Sichtweiten (Multi- und Einzelagentensicht) wird im Implementierungsmodell für jeden Agenten ein Klassendiagramm erstellt. In der vierten Phase, dem Code-Modell, wird schließlich der Programmcode erstellt, welcher ggf. auf existierenden Vorlagen aufbauen kann. Abschließend gilt es im Verteilungsmodell zu definieren, auf wie vielen und welchen Recheneinheiten der Code verteilt werden soll. Dieser Schritt umfasst ebenso die Schnittstellenimplementierung zu anderen Plattformen. Mithilfe des ersten Codes und den implementierten Schnittstellen wird dieser Ablauf so lange durchgeführt, bis das gewünschte Ergebnis erreicht wird. (COSSENTINO & SEIDITA 2014)

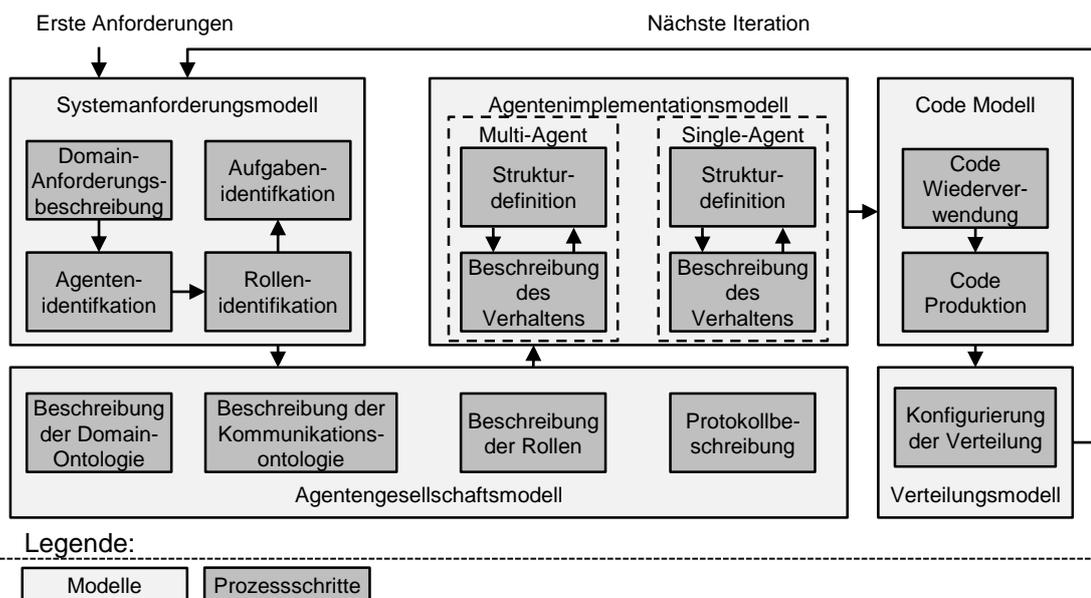


Abbildung 3-11: PASSI-Vorgehensmodell (COSSENTINO & SEIDITA 2014)

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Eine umfangreich unterstützte Methode ist ZEUS. Diese besitzt ein eigenes Toolkit, welches optional zur Anwendung hinzugezogen werden kann (WEIß & JAKOB 2005). In der Entwicklung nach ZEUS steht die Definition von Rollen bereits zu Beginn der Vorgehensweise im Fokus (vgl. Abbildung 3-12). Entsprechend werden im Rahmen von ZEUS Kriterien vorgegeben, welche die Definition von Rollen vereinheitlichen sollen (vgl. Tabelle 3-7). Mithilfe dieser Rollen werden die Agenten und die Verantwortlichkeiten definiert. Dabei gelten zwei Entwurfsregeln. Die Zuweisung von Verantwortungsbereichen zu Agenten sollte eins zu eins sein. Darüber hinaus sollte es für jede Verbindung zu einer Ressource einen Agenten geben. Im Anschluss wird für jeden dieser Agenten ein konkretes Problem formuliert und dessen Lösung in die Verhaltens- und Vorgehensweise des individuellen Agenten implementiert. Die Modellierung des deklarativen Wissens bildet den letzten Schritt der Entwurfsphase. In der Realisierungsphase werden schließlich die einzelnen Agenten erzeugt, konfiguriert und implementiert, bevor abschließend der entstandene Code getestet wird. (WEIß & JAKOB 2005)

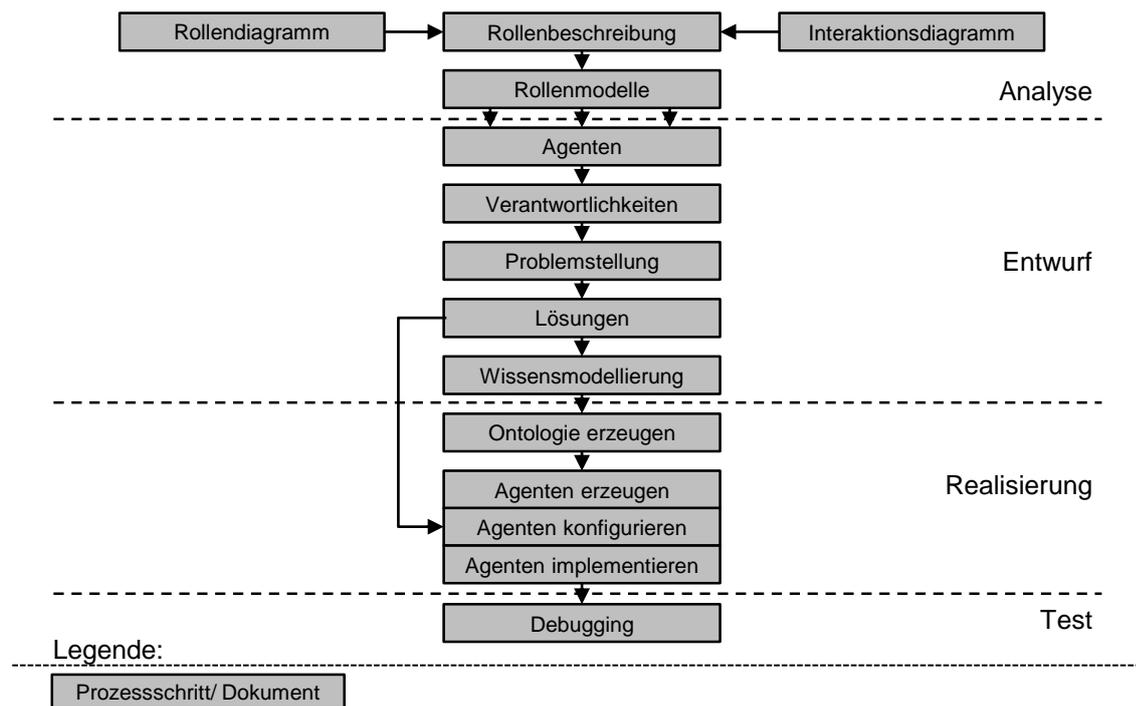


Abbildung 3-12: ZEUS-Vorgehensmodell (WEIß & JAKOB 2005)

Für weitere Informationen zu dieser rollenorientierten Methode und für einen detaillierten Einblick in das Toolkit wird auf die Ausführungen von COLLINS & NDUMU (1999A, 1999B, 2000) verwiesen.

3.4 Kommunikation auf Basis von Agentensystemen in der Produktion

Tabelle 3-7: Kriterien zur Festlegung von Rollen (WEIß & JAKOB 2005)

Kriterium	Beschreibung
Modularität	Eine Rolle soll von verschiedenen Agenten (sequenziell oder gleichzeitig) übernommen werden können.
Kohäsion	Die korrespondierenden Aufgaben und Funktionen einer Rolle müssen eindeutig definiert sein.
Sparsamkeit	Unnötige Aufgaben sind zu vermeiden.
Vollständigkeit	Triviale Rollen sollen vermieden werden. Stattdessen ist eine Integration anzustreben.
Koppelung	Abhängigkeiten zwischen den Rollen sollen minimiert werden.

Zur Auswahl einer geeigneten Entwicklungsmethode sind verschiedene Bewertungskataloge entstanden (vgl. Tabelle 10-5). Eine wiederkehrende Bewertungsgröße, teilweise als komplette Kategorie aufgeführt (DAM & WINIKOFF 2004), ist die Anwendbarkeit der Methode. In der vorliegenden Arbeit soll die Konzeption eines Agentensystems in eine übergeordnete Methodik eingebettet werden, welche zur Implementierung in einem frühen Planungsstadium dient. Aufgrund der frühen Planungsphase gelten andere Randbedingungen für die Anwendung. Die aufgeführten Methoden (vgl. Tabelle 10-4) setzen einen Softwareentwickler mit Kenntnissen aus dem Bereich Agentensysteme als Anwender voraus. Um bspw. einen Fabrikplaner zur Anwendung zu befähigen, muss das zur Verfügung gestellte Erfahrungswissen entsprechend vervielfacht werden.

3.4.5 Analyse und Fazit

Für einen industriellen Einsatz eines Agentensystems in der Produktion ist die Einhaltung von Standards essenziell (VDI 2653). Folglich sind Frameworks und Entwicklungsmethoden, welche auf die FIPA-Konformität achten, zu bevorzugen. Zur Bestimmung von Schnittstellen zwischen den realen Produktionselementen und deren virtueller Repräsentanzen eignet sich der Ansatz nach LEPUSCHITZ ET AL. (2011). Für die Gestaltung der enthaltenen HLC sind entsprechend die Regeln der FIPA zu berücksichtigen. Im Bereich der Objektagenten erfüllt keiner der bestehenden Ansätze die Anforderungen eines Selbststeuerungssystems.

Die Auswahl einer allgemeingültig überlegenen Entwicklungsmethode ist im Hinblick auf die unterschiedlichen Bewertungsverfahren und Applikationen nicht möglich bzw. nicht zweckmäßig. Darüber hinaus wird für die Anwendung der bestehenden Methoden ein umfangreiches Wissen vorausgesetzt, welches im Betrachtungsbereich dieser Arbeit nicht zwingend vorliegt.

3.5 Übergreifendes Fazit und Handlungsbedarf

Ein Selbststeuerungssystem auf Basis direkter Identifikationsverfahren wurde bisher nicht konzipiert bzw. untersucht. Folglich wurden Merkmale weder isoliert noch in Verbindung mit korrespondierenden Sensorsystemen auf deren Eignung zur Identifikation in Selbststeuerungen analysiert. Demzufolge gilt es, bestehende Merkmalssammlungen zu konsolidieren und jedes Merkmal auf dessen Eignung unter Berücksichtigung der Anforderungen an Identifikationssysteme zu analysieren. Im Bereich der Lokalisierung ist keine Technologie verfügbar, welche den konsekutiven Anforderungen aus der Nutzung direkter Identifikationsverfahren genügt. Folglich muss für die Lokalisierung ein neues Verfahren entwickelt werden. Im Bereich der Agentensysteme, welche zur Sicherstellung der Kommunikationsfähigkeit genutzt werden, muss eine neue Struktur für Objektagenten entwickelt werden. Hierbei ist vor allem die Interaktion des Objektagenten mit der realen Produktionsumgebung neu zu konzipieren und die Auswirkungen auf das gesamte Agentensystem zu analysieren. Zusammenfassend ist aus den technischen Vorarbeiten abzuleiten, dass eine Selbststeuerung auf Basis direkter Identifikationsverfahren zahlreiche neue Prozesse und korrespondierende Systemelemente erfordert, die aufeinander abzustimmen sind. Bevor eine methodische Unterstützung zur Entwicklung des angestrebten direkten Selbststeuerungsansatzes erfolgen kann, muss folglich zunächst ein Systemansatz konzipiert und entwickelt werden. Aus diesem Ansatz sind weitere Randbedingungen und Anforderungen an die methodische Unterstützung abzuleiten.

Bestehende methodische Ansätze der einzelnen Themenbereiche berücksichtigen weder eine Selbststeuerung noch eine frühe Planungsphase als Ausgangssituation für ein methodisches Vorgehen. Um die Anwendbarkeit für den Betrachtungsbereich dieser Arbeit sicherzustellen, muss die Benutzerfreundlichkeit benötigter methodischer Bausteine erhöht werden. Entsprechend gilt es, spezifische Kriterien zu definieren und anschließend neue Methoden zu generieren bzw. bestehende Ansätze zu adaptieren. Im Bereich der agentenorientierten Methoden müssen bspw. umfassende Informationen zu potenziellen Rollen, Agenten und deren Aufgaben im produktionstechnischen Umfeld hinterlegt werden. Um diese Informationen zu erhalten, ist es aus methodischer Sicht ebenfalls unablässig, zuvor ein Referenzsystem zu erstellen. Aus diesem System sind spezielle Aufgaben aus dem produktionstechnischen Kontext sowie der direkten Identifikation und Lokalisierung abzuleiten. Ein Systemansatz zur merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerung wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

Aus der Einführung sowie dem Stand der Wissenschaft und Technik ist abzuleiten, dass die Entwicklung einer Methodik zur Planung von Selbststeuerungssystemen auf Basis von direkten Identifikationsverfahren zunächst der Entwicklung eines Systemansatzes bedarf. Hierzu werden im ersten Abschnitt Randbedingungen und Anforderungen an das System abgeleitet. Aufbauend auf den Anforderungen wird die Entwicklung eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems (MASS) dargestellt und dessen Aufbau sowie Ablauf beschrieben. Der Ablauf der merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerung (MAS) wurde zudem auf potenzielle Fehlerquellen analysiert, um zusätzliche Aufgaben der Systemelemente abzuleiten. Diese Aufgaben sind abschließend in den Rollenbeschreibungen skizziert und stellen einen zentralen Input für diverse Werkzeuge der Methodik dar.

4.1 Randbedingungen und Anforderungen an das System

Die Basis zur Bestimmung der Randbedingungen bildet die Systemgrenze. Der Betrachtungsbereich der Arbeit (vgl. Abschnitt 1.3) bezieht sich auf die zu entwickelnde Methodik, mit welcher der folgende Systemansatz situationspezifisch adaptier- und implementierbar sein soll. In Anlehnung an diesen Betrachtungsbereich und die bestehenden Voraussetzungen für Selbststeuerungssysteme wurden die folgenden Randbedingungen des Systems (RS) und Anforderungen an das System (AS) deduziert.

4.1.1 Randbedingungen

RS1 - Struktur: Für den Systemansatz selbst bleibt die strukturelle Eingrenzung (vgl. Abbildung 1-2) bestehen, sodass die Produktion an einem Standort fokussiert wird. Standortübergreifende Prozesse sowie Aktivitäten aus indirekten Geschäftsbereichen werden nicht betrachtet.

RS2 - Zeit: Die zeitliche Begrenzung verschiebt sich für den Systemansatz von der Planungs- in die Betriebsphase. Folglich werden wertschöpfende und nicht wertschöpfende Prozesse innerhalb der Produktion berücksichtigt. Als Eingrenzung werden die DIN 8580 sowie die VDI-Richtlinien VDI 3300, VDI 2860 genutzt, welche unterschiedliche Fertigungsverfahren als auch Prozesse aus den Bereichen Handhabung und Logistik beinhalten.

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

RS3 - Produktspektrum: In Anlehnung an die geschilderte Ausgangssituation wird eine variantenreiche Produktion betrachtet. Im Fokus stehen unterschiedliche Stückgüter. Schüttgüter hingegen werden indirekt über deren Packung bzw. Werkstückträger berücksichtigt. Darüber hinaus werden, analog zu bestehenden Selbststeuerungssystemen, Hilfsfügeteile (z. B. Schrauben, Mutter) und Hilfsstoffe (z. B. Fette, Öle) nicht in den Selbststeuerungsprozess einbezogen.

RS4 - Identifikation: Durch den Einsatz der merkmalsbasierten Identifikation ist, abgesehen von Ausnahmen wie den PUFs, eine eindeutige Identifikation nicht möglich. Demzufolge wird die eindeutige oder vollständige Identifikation nicht als Randbedingung angesehen. Stattdessen gilt es, eine ausreichende Identifikation zu gewährleisten, die im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert wird: Es werden so viele Merkmale des Objekts bzw. der Objektklasse identifiziert, bis das Objekt von den im System befindlichen Objekten unterschieden werden kann. Der Terminus „ausreichend“ bezieht sich auf die Anforderung zur Selbststeuerung eines Produkts, welche aus der Übermittlung des Tripels aus Bearbeitungsstatus, Steuerungsparameter und der Objektgeometrie besteht. Dieses Tripel ist einer Objektklasse zuzuordnen. Eine entscheidende resultierende Randbedingung ist, dass die Verwechslung identischer Objekte keinen negativen Einfluss auf die folgenden Produktionsschritte nehmen darf. In Produktionen mit einer eindeutigen Nachweispflicht aller Bauteile wie bspw. die Pharma- oder Luftfahrtbranche ist der alternative Selbststeuerungsansatz nicht nutzbar. Diese Randbedingungen sind zu überprüfen, bevor die Gestaltung eines Systems initiiert wird.

4.1.2 Anforderungen

AS1 - Identifikation: Der Prozess der Identifikation unterliegt den Anforderungen an Auto-ID-Systeme (vgl. Abschnitt 2.2). Hervorzuheben sind an dieser Stelle die Kompatibilität, die Lesegeschwindigkeit sowie die Kosteneffizienz. Entsprechend werden etablierte Sensorsysteme fokussiert, die über die Erfassung und ggf. Kombination einfach und schnell messbarer Merkmale eine ausreichende Identifikation ermöglichen. Zusammenfassend müssen die Merkmale zerstörungsfrei, kosteneffizient und schnell prüfbar sein. Um dies zu ermöglichen, sind der Identifikationsprozess und die benötigten Betriebsmittel in die Produktion zu integrieren.

AS2 - Lokalisierung: Die Positionsbestimmung der einzelnen Objekte besitzt in einem MASS einen besonders hohen Stellenwert. Verschiedene Identifikationsverfahren sind auf eine eindeutige Pose des Objekts angewiesen, um ein Merkmal

für die Identifikation richtig zu erfassen. Aus diesem Grund muss die Genauigkeit der Lokalisierung in diesen Fällen fokussiert werden.

AS3 - Kommunikation: Aus dem direkten Identifikationsansatz und dem Verzicht auf eine ID dürfen keine Einschränkungen hinsichtlich der Kommunikation resultieren. Darüber hinaus soll die Architektur des MASS eine Abstimmung der Systemelemente bereits vor der Identifikation fördern. Auf diese Weise sind analog zu simulationsbasierten Selbststeuerungssystemen Elemente der Produktionsplanung integrierbar und es liegt keine rein reaktive Steuerung vor.

AS4 - Sicherstellung der Funktionalität der PPS: Das angestrebte Selbststeuerungssystem soll in der Lage sein, die Hauptfunktionen einer konventionellen PPS auszuführen. Der Einsatz eines Agentensystems bedeutet, dass die Ziele und Funktionen der Agenten diese Hauptfunktionen abbilden müssen. Um übergeordnete Zielgrößen (z. B. maximale Fehlerrate) einzuhalten, bestehen unterschiedliche Möglichkeiten, welche durch verschiedene Rollen abgebildet werden.

AS5 - Industrielle Einsatzbarkeit: Das System soll auf Standards (z. B. der FIPA) aufbauen, um eine industrielle Anwendung zu fördern. Darüber hinaus ist die Wirtschaftlichkeit des Systems eine Voraussetzung für eine industrielle Applikation.

4.2 Komponenten und Struktur

Ein Selbststeuerungssystem benützt ein virtuelles Abbild der Produktion, dessen Systemelemente informationstechnisch vernetzt sind und somit durch direkte Kommunikation dezentral Entscheidungen treffen können (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Struktur als auch die Komponenten der realen Fabrik spiegeln sich folglich in einem Selbststeuerungssystem wider. Dieser Zusammenhang gilt unabhängig von der Identifikationsstrategie und somit auch für ein MASS (vgl. Abbildung 4-1).

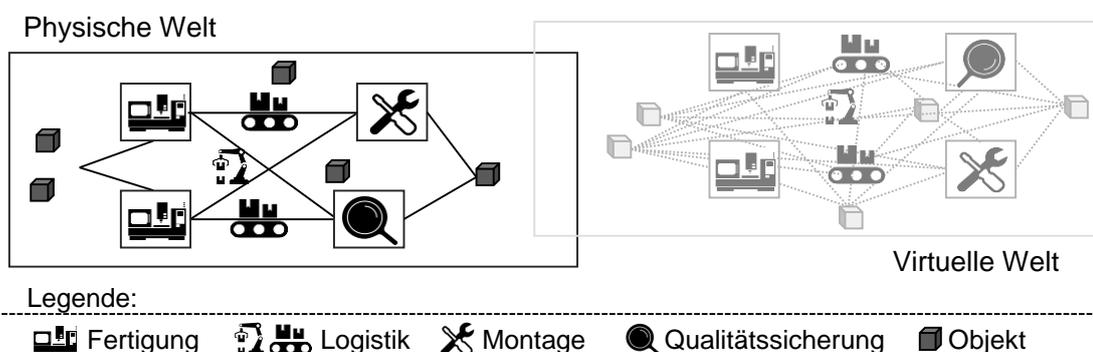


Abbildung 4-1: Virtuelles Abbild der Produktion

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

Nach WIENDAHL (2005) zählen Fertigungs-, Montage-, Logistik-, Qualitätssicherungs-, Kommunikations- und Ver-/Entsorgungseinrichtungen sowie übergeordnete Systeme zu den relevanten Betriebsmitteln einer Fabrik. Diese bilden zusammen mit den Objekten in der Fabrik die Systemelemente, welche sich in einem Selbststeuerungssystem wiederfinden müssen. Diese Systemelemente gilt es, in ein virtuelles Abbild der Produktion zu überführen und miteinander zu vernetzen. In Anlehnung an den Stand der Wissenschaft und Technik wurden Agentensysteme aufgrund ihrer flexiblen Einsatzfähigkeit im folgenden Ansatz verwendet, sodass für jedes Systemelement eine entsprechende Agentenrolle zu konzipieren ist. In Abbildung 4-1 ist dieser Zusammenhang beispielhaft dargestellt. Die Agenten in der „virtuellen Welt“ sind grau eingefärbt und besitzen im Vergleich zu ihrem Antagonisten in der „physischen Welt“ einen deutlich höheren Vernetzungsgrad. Die Vernetzung ist erforderlich, um im Kontext eines Selbststeuerungssystems dezentral Entscheidungen zu treffen und die Funktionen der von WIENDAHL (2005) aufgeführten übergeordneten Systeme in die Agenten zu integrieren.

In diesem dargestellten Rahmen müssen nun die spezifischen Anforderungen an ein MASS erfüllt und die hierzu benötigten Funktionen in geeignete Komponenten integriert werden. Den ersten Schritt stellt die Detaillierung und Integration der direkten Identifikation dar. Anschließend werden die Auswirkungen auf die Lokalisierung und die benötigten Kommunikationsabläufe analysiert, um die Architektur eines MASS abzuleiten (KIEFER ET AL. 2017).

4.2.1 Identifikation in einem MASS

Basis der Identifikation in einem MASS bildet die vorangegangene Definition verwendbarer Merkmale. Zur Analyse der verschiedenen Merkmalssammlungen bspw. der Datenbank der DIN 4002 wurden die Bestandteile der Anforderung der Identifikation verwendet. Unter Applikation dieser Anforderungen und in Anlehnung an die Beschreibungen nach KRÄMER (2002) und JÜNEMANN & BEYER (2013) wurden folgende verwendbaren Objektmerkmale abgeleitet und in zwei Gruppen unterteilt (vgl. Tabelle 4-1). Die primären Merkmale beschreiben die Grundform eines Objekts. Subformen werden über die sekundären Merkmale beschrieben. Die ersten drei Spalten bezeichnen die Merkmale erster bis dritter Ordnung, welche eine Hierarchie der Merkmale darstellen. In der vierten Spalte sind die korrespondierenden Messgrößen dargestellt. Nach DIN 4002 stellen die Messgrößen selbst Merkmale dar, die isoliert betrachtet jedoch keinen Rückschluss auf ein bestimmtes Objekt erlauben.

Tabelle 4-1: Identifizierbare Objektmerkmale

Merkmal Stufe I	Merkmal Stufe II	Merkmal Stufe III	Messgröße
Primäre Merkmale – Grundform			
Gewicht			Gewicht
Farbe			RGB-Wert
Geometrie	Form	Kanten	Position, Länge (l), Winkel, Radius (r)
Geometrie	Form	Flächen	l, Breite (b), Durchmesser (d)
Geometrie	Form	Ecken	Position, Winkel
Werkstoff	Topologie / Textur	Absorption	
Werkstoff	Topologie / Textur	Reflexion	
Werkstoff	Topologie / Textur	Oberflächenrauheit	
Sekundäre Merkmale – Subformen			
Nut			Position, l, b, h
Bohrung			Position, Tiefe, d
Gewinde			Position, Tiefe, d
Fase			Position, l, Winkel
Schlitz			Position, l, b, Tiefe
Ausschnitt			Position, l, b, Tiefe
Absatz, Bund			Position, l, b, h
Sicke			Position, l, b, h

Aus Tabelle 4-1 geht hervor, dass neben den direkt messbaren Merkmalen erster Ordnung (Gewicht und Farbe) geometrische Messgrößen zu nutzen sind. Zur Erfassung dieser Messgrößen eignen sich optische Verfahren als auch punktförmige Sensoren in Form einer Matrix. Alternativ zur Matrixanordnung können punktförmige Sensoren durch eine Bewegung mehrere Punkte und somit Bahnen bzw. Flächen eines Objekts vermessen. Die Merkmale zur Beschreibung eines Werkstoffs sind prinzipiell messbar. Jedoch erfüllen sie die Anforderungen hinsichtlich Messgeschwindigkeit und Kosteneffizienz nur bedingt. Da die Unterscheidung von Werkstoffen in vielen Applikationen von Relevanz ist, sind sie in der Tabelle aufgeführt. Sofern andere Merkmale für die Identifikation ausreichen, gilt es diese zu bevorzugen. Dennoch ist eine Messung aller Objektmerkmale zur Identifikation zu aufwendig und vor allem zu zeitintensiv.

Um die Anforderungen an die Identifikationszeit zu erfüllen, muss der Prozess durch eine Vorbereitung vereinfacht werden. In dem vorliegenden Ansatz wird folglich die Identifikation über einen Plausibilitätscheck angestrebt. Das bedeutet, dass nicht alle Merkmale eines Objekts überprüft werden, sondern lediglich einzelne Merkmale, im Idealfall lediglich ein einziges Merkmal des Objekts. Damit dies im Produktionsbetrieb umgesetzt werden kann, müssen alle Objekte,

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

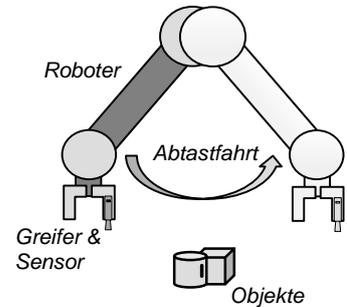
welche gleichzeitig in der Produktion aktiv sind, bekannt sein. In diesem Kontext wird unter der Aktivität verstanden, dass sich ein Objekt in Bearbeitung oder zwischen zwei Bearbeitungsschritten befindet. Aus der Betrachtung ausgenommen sind Objekte, welche an einem definierten Ort auf unbestimmte Zeit eingelagert sind. Aus der Menge der aktiven Objekte und ihren zugehörigen Merkmalen können die spezifischen Unterschiede der Objekte abgeleitet werden. Sind bspw. zwölf unterschiedliche Objektklassen zur gleichen Zeit aktiv, welche alle ein signifikant unterschiedliches Gewicht besitzen, ist es ausreichend, die Bauteile zu wiegen, um die Objektklasse zu bestimmen. Das bedeutet auch, dass sich die zu messenden Merkmale je nach Produktionssituation ändern können. Sensorsysteme, welche mehrere Merkmale erfassen können, sind aus diesem Grund besonders relevant für ein MASS. Um gezielt eines oder mehrere Merkmale zu messen, muss das zu identifizierende Objekt bereits im Vorfeld bekannt sein, sodass sich der angesprochene Plausibilitätscheck ergibt.

Um zu entscheiden, in welcher Komponente des Systems die Identifikation verortbar ist, ergeben sich drei mögliche Optionen. Die erste Option ist die Aufstellung zusätzlicher Prüfstationen, welche den Vorteil einer umfangreichen Prüfung bieten. Nachteilig sind der resultierende zusätzliche Prozessschritt inkl. der Bauteilzuführung sowie die notwendige Installation mehrerer Stationen zur Schaffung robuster Prozesse. Die Integration der Identifikation in Fertigungssysteme stellt die zweite Option dar. Als Vorteil ist eine hohe Fehlervermeidung durch eine Prüfung unmittelbar vor dem Prozess festzuhalten. Demgegenüber steht die aufwendige Integration der Sensorik in meist gekapselte Anlagen. Die dritte Option bildet die Integration der Identifikation in Handhabungsprozesse. Als Bindeglied zwischen den einzelnen Fertigungsprozessen stellen Handhabungsprozesse eine hohe Identifikationsfrequenz sicher, welche zudem unabhängig von der Produktionsstruktur ist. Darüber hinaus sind Prüfvorgänge in Handhabungssystemen bereits etabliert (VDI 2860, HESSE 2013) und können durch flexible Handhabungsgeräte vereinfacht werden. Die flexible Positionierung einer Kamera, die an einem Roboter befestigt ist, stellt nur eines von vielen Beispielen dar, in welchen ein Identifikationsprozess durch das Zusammenspiel mit einem Handhabungsgerät vereinfacht bzw. verbessert wird. Demzufolge soll die Identifikation im Rahmen von Handhabungsprozessen stattfinden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene sog. integrierte Identifikationsverfahren erarbeitet. Das methodische Vorgehen zur Erarbeitung dieser Verfahren wird in Kapitel 5 geschildert. Die Beschreibungsform der Verfahren ist am Beispiel des 3-Punkt-Verfahrens in Tabelle 4-2 dargestellt. Neben einer Beschreibung der benötigten Ressourcen sind zudem Informationen zur Inbetriebnahme des integrierten Identifikationssystems

und zum Identifikationsprozess enthalten. Darüber hinaus enthält die Beschreibung der entwickelten Verfahren Bedingungen und Eigenschaften, welche für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens von Bedeutung sind.

Tabelle 4-2: Beschreibungsform integrierter Identifikationsverfahren

3-Punkt-Verfahren		
Merkmale	Länge, Breite, Höhe	
Ressourcen	Handhabung	3D HHG
	Sensorklasse	Näherungsschalter
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle
Bedingungen	Pose ist bekannt Vibrationslose Umgebung Trockene Umgebung	
Vorbereitung	1. Referenzposition für Objekt sicherstellen (z. B. durch Anschlag, Markierungen) 2. Erzeugen eines Musters am Ablageort bzw. auf dem Objekt 3. Koordinatenpunkte der Objekte (Sollwerte x, y, z) speichern	
Prozessablauf Beschreibung	1. Objekt in Pose bringen (z. B. durch mech. Anschlag) 2. Greifer über Objekt positionieren 3. Punktueller Abtasten des Objekts mit Näherungsschalter (Rastergitter x, y, z mit Matrix wird überprüft, Zustand 0 oder 1 möglich) 4. Erzeugung eines Ist-Musters (Form) 5. Auswertung durch Soll-Istwert-Abgleich 6. Identifikation des Objekts anhand der Form	
Prozessablauf	//MASS/act_3_Punkt_Verfahren	
Integration VDI 2860		
Kommentare	Für ein genaues Ergebnis ist ein kleiner Messbereich zu verwenden. Verfahren sind für Objekte, die kleiner als der minimale Messbereich sind, nicht anwendbar.	
Eigenschaften	Berührungsloses Messverfahren Befestigung des Sensors direkt am Greifer möglich Messdauer abhängig von der Objektform	



4.2.2 Lokalisierung in einem MASS

Sofern keine Datenträger oder Empfänger am Objekt befestigt werden, bieten sich, nach einer Analyse bestehender Verfahren und Ansätze, keine geeigneten Alternativen für die Lokalisierung. Der Einsatz von Kamerasystemen, welche über die Identifikation eines Bauteils hinaus dessen Pose bestimmen können, kann in Einzelfällen eine wirtschaftliche Option sein. Jedoch ist die Abdeckung der gesamten Produktionsfläche durch bildgebende und bildverarbeitende Verfahren

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

nach BRENA ET AL. (2017) sehr kostspielig und aus diesem Grund für ein Referenzsystem mit dem Anspruch der industriellen Einsetzbarkeit keine Option. Folglich muss ein neues passives Lokalisierungsverfahren entwickelt werden, welches idealerweise keine zusätzlichen Kosten verursacht.

Die Grundidee des entwickelten Ansatzes beruht auf der dauerhaften Speicherung und unmittelbaren Aktualisierung der Pose, sobald sich ein Objekt bewegt. Die Pose eines Objekts kann dauerhaft in seinem virtuellen Pendant, seinem Agenten, gespeichert werden. Entscheidend für diesen Ansatz sind die Definition eines reichsübergreifenden Koordinatensystems sowie die Aktualisierung der Pose. Die Definition eines sog. Weltkoordinatensystems ist notwendig, um im Rahmen von Verhandlungen aus den Posen den tatsächlichen Standort eines Objekts zu verwenden. Die korrekte Aktualisierung der Pose stellt aus wissenschaftlicher wie auch technischer Sicht eine deutlich größere Herausforderung dar. Wenn die Pose bei jeder Bewegung zu aktualisieren ist, sodass ein wiederkehrender Lokalisierungsprozess (passiv oder aktiv) nicht erforderlich ist, ist es sinnvoll, jene Systemkomponenten zu analysieren, welche für die Bewegung der Objekte verantwortlich sind. Im entwickelten Ansatz der kontinuierlichen Lokalisierung übernehmen demzufolge die am Transport beteiligten Ressourcen (z. B. Materialfluss- und Handhabungssysteme) die Aufgabe der Aktualisierung. Die Grundlagen der kontinuierlichen Lokalisierung bestehen folglich aus den Wissenschaftsbereichen der Materialfluss- und Handhabungstechnik, welche in die folgenden Ausführungen für ein besseres Verständnis integriert wurden.

Der zentrale Unterschied zwischen den Bereichen Materialfluss (VDI 2411) und Handhabung (VDI 2860) besteht darin, dass sich Handhaben auf geometrisch bestimmte Objekte bezieht, während Fördern und Speichern ebenso für formlose, gasförmige, flüssige und pulverförmige Objekte durchgeführt wird. Im Kontext der zunehmenden Individualisierung und der Selbststeuerung, in welcher sich einzelne Objekte selbstständig durch die Produktion steuern, nimmt die Handhabung einen größeren Anteil ein und wird in diesem Ansatz fokussiert.

In einem Handhabungsprozess wird ein Objekt von einem definierten Startpunkt zu einem definierten Endpunkt bewegt. Nach HÖRMANN & HÖRMANN (1990) sind die zentralen Funktionen die Feinbewegungen an Start und Ziel sowie der Greifvorgang. Wie diese Funktionen umgesetzt werden und wie in diesem Zusammenhang die Position eines Objekts aktualisiert werden kann, ist von der Bewegungsart abhängig. Die Art der Bewegung ist an die Fähigkeiten des eingesetzten Handhabungsgeräts gekoppelt. In der VDI 2860 sind unterschiedliche

Symbole enthalten, welche diese Fähigkeiten beschreiben. Darin enthalten sind elementare Fähigkeiten, die in Kombination einen definierten Handhabungsvorgang ergeben. Zu diesen Funktionen zählen Verschieben, Drehen, Schwenken, Halten, Lösen und Prüfen. Die Verwendung dieser elementaren Funktionen eignet sich für eine geräteunabhängige Beschreibung und Spezifizierung benötigter Aufgaben und Bewegungen (BJORKELUND ET AL. 2011). Um Handhabungssysteme auszuwählen, werden die elementaren Funktionen auch als Skill Primitives (MICHNIEWICZ & REINHART 2014) oder Elemental Actions (THOMAS ET AL. 2013) bezeichnet sowie mit Einschränkungen detailliert (HUCKABY & CHRISTENSEN 2012). Diese Einschränkungen beziehen sich bspw. auf die maximale Greifkraft oder die potenziellen Bewegungsrichtungen in einem Koordinatensystem. Unter Nutzung dieser Bewegungsrichtungen ist eine fähigkeitsbasierte Kategorisierung verschiedener Handhabungsgeräte in ein-, zwei- und dreidimensionale Handhabungsgeräte möglich.

Eindimensionale Handhabungsgeräte sind Linearachsen gleichzusetzen, welche nach KÜNNE (2001) lineare Relativbewegungen von Objekten ermöglichen und einen Freiheitsgrad besitzen. Förderbänder bilden die einfachste Klasse der Handhabungsgeräte. In der getakteten Förderung werden sie in Form von Montagebändern zur Handhabung eingesetzt (GRIEMERT & RÖMISCH 2015). Um die Position eines Objekts auf einem kontinuierlich angetriebenen Förderband bestimmen zu können, ist der Zeitpunkt, zu dem das Objekt auf das Förderband gelegt wurde, entscheidend. Aus der Zeitspanne, die sich das Objekt bereits auf dem Förderband befindet, der Aufgabeposition und der Förderbandgeschwindigkeit kann die aktuelle Position eines Objekts bestimmt werden. Dieser Zusammenhang ist auf alle kontinuierlichen Fördersysteme übertragbar und stellt bereits den komplexesten Zusammenhang zur Lokalisierung der Objekte dar.

Zweidimensionale Handhabungsgeräte haben die Fähigkeit, Objekte in zwei Raumrichtungen zu bewegen. Sofern in diesen beiden Richtungen jeder beliebige Punkt auf einer Achse angefahren werden kann, ergibt sich eine Fläche, auf welcher sich potenzielle Ablagepunkte für den Handhabungsprozess befinden. Ausnahmen stellen Umlaufsysteme und spurgebundene fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) dar, deren Ablagepunkte an eine bestimmte Bahn gebunden sind. Spurungebundene FTF können wiederum ganze Flächen befahren und nutzen Navigationsverfahren, um die unterschiedlichen Positionen zu erreichen (ULLRICH 2014). Die Koordination in einem fahrerlosen Transportsystem (FTS) wird zunehmend dezentral durchgeführt (GÜNTNER & HOMPEL 2010). Hierbei gibt jedes FTF autonom die Endpose an den Objektagenten weiter.

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

Industrieroboter mit mindestens drei Achsen zählen, unabhängig von ihrer Bauform, zu den dreidimensionalen Handhabungsgeräten (HESSE 2013). In Kombination mit einem Greifer bilden sie ein Handhabungssystem und werden befähigt, definierte Handhabungsoperationen durchzuführen (SCHMALZ ET AL. 2015). Basierend auf einer Koordinatentransformation wird die benötigte Stellung von Gelenken oder Positionsschlitten ermittelt, um eine Position in einem Bezugskoordinatensystem einzunehmen (HESSE 2013). Auf diese Weise kann die genaue Pose berechnet und über die Robotersteuerung ausgegeben werden.

Durch die Integration der Identifikation als auch der Lokalisierung in Handhabungssysteme sind sie für ein MASS von großer Bedeutung. Sofern die Handhabungssysteme für eine Produktion in der Planungsphase noch nicht festgelegt wurden, sollten diese Punkte im Rahmen eines Auswahlprozesses berücksichtigt werden. Um eine geeignete applikationsspezifische Wahl zu treffen, werden in der Literatur zudem weitere Einflussfaktoren genannt. Im Anhang sind beispielhaft verschiedene Auswahlkriterien für Industrieroboter aufgeführt (vgl. Tabelle 10-2). Diese Auflistungen können ebenso für ein- und zweidimensionale Geräte adaptiert werden. Aufgrund der hohen Relevanz dreidimensionaler Geräte in flexiblen Systemen werden diese fokussiert und für weitere Auswahlkriterien auf HESSE (2013), GÜNTNER (2012), VDI 2510, VDI 3589 und MARTIN (2011) verwiesen.

In Abhängigkeit des eingesetzten Handhabungssystems wird folglich auf unterschiedliche Art und Weise die Position bzw. Pose des Objekts bestimmt (vgl. Abbildung 4-2). Für eine Berechnung sind die Koordinaten des Startpunkts und der Bewegungsvektor notwendig. Für die Ausgabe ist es ausreichend, die Koordinaten am Endpunkt aus der Steuerung zu extrahieren. In Anlehnung an das Referenzmodell nach LEPUSCHITZ ET AL. (2011) wird diese Berechnung bzw. Parameterausgabe im vorliegenden Systemansatz von der LLC ausgeführt. Wie diese Werte an die HLC des Handhabungsagenten weitergegeben und anschließend an den Objektagenten kommuniziert werden, wird im folgenden Abschnitt, der Kommunikation in einem MASS, beleuchtet. Voraussetzung für diesen Ansatz ist die Verwendung von Robotern bzw. frei programmierbaren Handhabungssystemen.

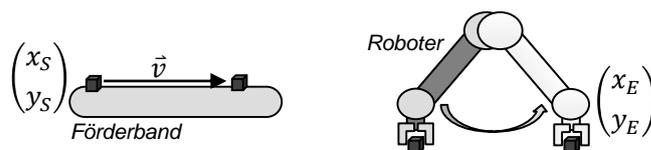


Abbildung 4-2: Berechnung und Ausgabe der Pose

4.2.3 Kommunikation in einem MASS

Durch die Vorauswahl eines Agentensystems zur virtuellen Repräsentation aller Systemelemente ist für die Gestaltung der Kommunikation zunächst ein Framework auszuwählen. Im konzipierten Ansatz eines MASS wurde nach den Kriterien von KRAVARI & BASSILIADES (2015) JADE ausgewählt. Dieses Framework erfüllt den industriell geforderten FIPA-Standard und somit die Anforderung der industriellen Einsetzbarkeit. Darüber hinaus besitzt JADE eine hohe Performanz, wenn viele Agenten gleichzeitig verwendet werden. In einem MASS, in welchem neben den Betriebsmitteln alle Objekte an der Produktionssteuerung teilnehmen, ist dies von besonderer Relevanz. Wann welche Inhalte kommuniziert werden, um ein funktionsfähiges Gesamtsystem zu erhalten, ist maßgeblich von den Abläufen in der Produktion und der Art des Selbststeuerungssystems bestimmt. Hierbei nimmt die Identifikation als wiederkehrender zentraler Prozess eine entscheidende Rolle ein. Im Abschnitt zur Identifikation wurde dargelegt, dass aufgrund der Komplexität der direkten Erkennung ein Plausibilitätscheck angestrebt wird, welcher durch eine vorangegangene Kommunikation unterstützt wird. Daraus folgt, dass der Objektagent die Initiative in dem Selbststeuerungsprozess übernimmt und mit einer Anfrage den Selbststeuerungsprozess startet (vgl. Abbildung 4-3). Der Objektagent übermittelt die relevanten Parameter und Solldaten bspw. an die Agenten der Handhabungssysteme, welche für den Transport als auch die Identifikation und Lokalisierung zuständig sind.

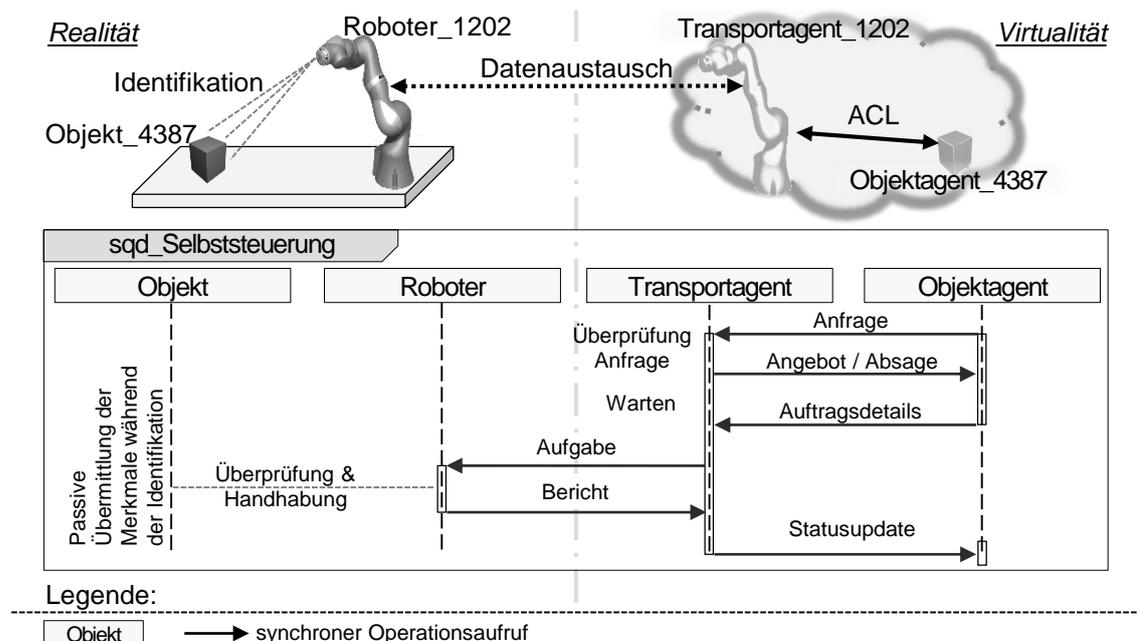


Abbildung 4-3: Ablauf in einer merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerung

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

In diesem Ablauf sind ein technischer Fähigkeitsabgleich, eine Verhandlung sowie der Identifikations- und Lokalisierungsprozess vereint. Zunächst überprüft der Transportagent die Anfrage des Objektagenten. Passen die technischen Rahmenbedingungen, erstellt der Transportagent ein Angebot, welches der Objektagent wiederum annehmen bzw. ablehnen kann und hierzu verschiedene Angebote von Transportagenten vergleicht. Die Kommunikation erfolgt über die Agentenkommunikationssprache (ACL). Im Anschluss werden die Parameter an die LLC, im dargestellten Fall eine Robotersteuerung, übermittelt und in der realen Produktion erfolgt unmittelbar vor oder während der Handhabung die Objektidentifikation. Liegt die richtige Objektklasse vor, wird der Handhabungsprozess durchgeführt und der Status des Objekts, inkl. dessen Pose, aktualisiert. Anschließend kann der Prozess erneut beginnen.

Aus Abbildung 4-3 ist ebenfalls zu entnehmen, dass der Datenaustausch zwischen den Hardwarekomponenten in der realen Produktion und dem Agentensystem objektseitig in einem MASS nicht durchgeführt wird. Die Aktualisierung von Objektdaten muss folglich durch die anderen Agenten durchgeführt werden. Neben der Pose betrifft dies vor allem die Geometrie der Objekte, welche durch die Bearbeitung verändert wird. Die Initialisierung, Aktualisierung und Vereinigung von Agenten zählen zu den sekundären Prozessen im Ablauf einer MAS. In bestehenden Selbststeuerungssystemen ist eine prozessintegrierte Initialisierung von Objektagenten nicht möglich, da das Objekt zunächst mit einer ID vereint werden muss. Durch den Verzicht auf die ID und die Befähigung von Fertigungsagenten zur Durchführung der sekundären Prozesse ist es einem neu entstandenen Objekt sofort möglich, seine Steuerung selbst zu übernehmen. Im dargestellten Trennprozess (vgl. Abbildung 4-4) erstellt der Fertigungsagent den neuen Objektagenten samt Parameterliste und aktualisiert das verwendete Ausgangsobjekt.

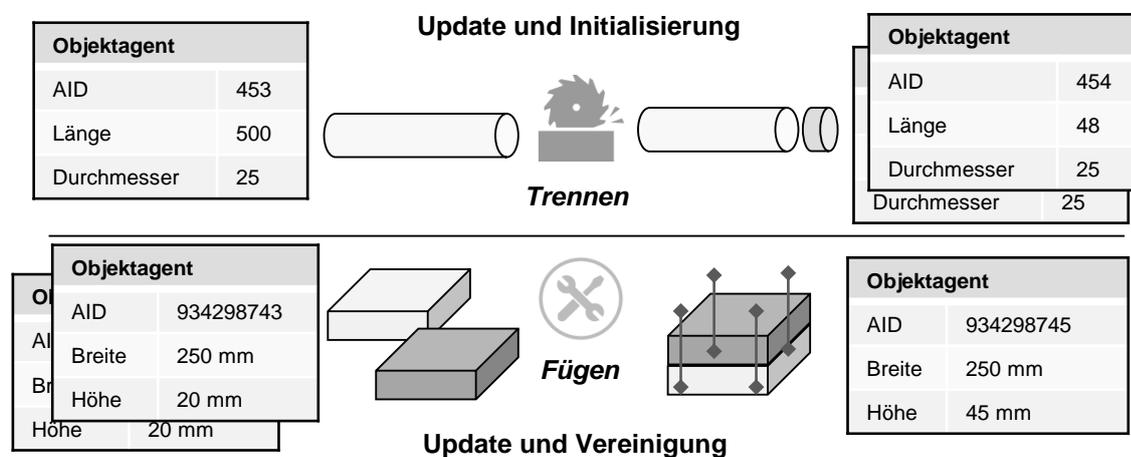


Abbildung 4-4: Agentenaktualisierung am Beispiel von Trennen und Fügen

In einem Selbststeuerungssystem auf Basis indirekter Identifikationsverfahren müsste jede Fertigungsstation der Kategorie Trennen mit einer Station zur Anbringung einer ID kombiniert werden, um diese Durchgängigkeit der Selbststeuerung zu ermöglichen. Diese Kombination stellt aufgrund der Vielzahl benötigter Betriebsmittel keine wirtschaftliche Applikation dar. Neben den prozesstechnischen Restriktionen ist dies ein weiterer entscheidender Grund, warum bestehende Systeme vorrangig in der Montage und eben nicht durchgängig in der Produktion einsetzbar sind. Im Fall von Fügeprozessen können durch die Vereinigung weitere Nachteile der indirekten Identifikation umgangen werden. Durch die Verwendung mehrerer IDs auf engem Raum können Verwechslungen entstehen, welche durch den Verzicht auf IDs ausgeschlossen sind. Da die sekundären Prozesse Initialisierung, Aktualisierung und Vereinigung in ID-basierten Selbststeuerungssystemen (IDSS) aus technischen Gründen teilweise irrelevant sind, wurden sie nicht vollumfänglich betrachtet. Für ein MASS erfolgt die Ableitung der benötigten zusätzlichen Fähigkeiten und Aufgaben aus einer Analyse der sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Die Verhandlung zwischen Agenten repräsentiert in diesem Fall einen Großteil der Funktionen der konventionellen PPS. Wichtige Funktionen (Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung) nach LÖDDING (2016) und zugehörige potenzielle Verfahren zur Funktionserfüllung sind in Tabelle 4-3 dargestellt. Ein wichtiger Bestandteil dieser Auflistung ist der Einfluss der Verfahren auf das Agentensystem und die entsprechend zu gestaltenden Agenten. Dies umfasst die Einbindung von Bereichs- und Verwaltungsagenten wie auch die Kommunikationstrategie. Sollen Agenten bspw. zunächst Informationen in einem Blackboard sammeln oder direkt miteinander kommunizieren.

*Tabelle 4-3: Funktionen und Verfahren der Produktionssteuerung
in Anlehnung an ENGELHARDT (2015) und LÖDDING (2016)*

	Verfahren	Beschreibung	Einfluss auf Agenten
Auftragsfreigabe	Constant Work in Process	Umlaufbestand (Aufträge, Bauteile, etc.) soll möglichst konstant sein.	Umsetzung durch Verwaltungsagenten
	Engpasssteuerung	Definition eines Engpassbereiches und bestands-geregelte Freigabe bis zum Engpass	Umsetzung durch Bereichsagenten
	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe	Sortierung der Aufträge nach Dringlichkeit und anschließend bestandsge-regelte Freigabe der drin-gendsten Aufträge	Umsetzung durch Verhandlungsstrategien Kommunikation Blackboardbasiert

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

	Verfahren	Beschreibung	Einfluss auf Agenten
Reihenfolgebildung	First In – First Out	Erste Anfrage wird zuerst bearbeitet.	Message Passing und Blackboard Kommunikation möglich
	Last In – First Out	Letzte Anfrage wird zuerst bearbeitet.	Blackboard Kommunikation
	Frühester Plan-Starttermin	Bedingt die Definition von Plan-Startterminen	In situativen Steuerungen nicht geeignet
	Frühester Plan-Endtermin	Bedingt die Definition von Plan-Endterminen	Blackboard Kommunikation
	Schlupfzeitregelung	Auftrag mit kürzester Schlupfzeit	Blackboard Kommunikation
	Auslastungsorientiert	Minimierung von Rüstzeiten	Blackboard Kommunikation
Kapazitäten	Rückstandsregelung	Anpassung der Kapazität an aktuellen Rückstand	In situativen Steuerungen nicht geeignet
	Planorientierte Kapazitätssteuerung	Differenz von Plan zu Ist-Kapazität	In situativen Steuerungen nicht geeignet
	Terminorientierte Kapazitätssteuerung	Erhöhung der Kapazität im Falle einer Verspätung	Umsetzung durch Bereichsagenten

Aufgrund des Einsatzes der direkten Identifikation gilt es, verschiedene Fehlerfälle zu analysieren, welche einen direkten Einfluss auf die benötigten Abläufe und die einhergehende Kommunikation der Agenten besitzen. Die verschiedenen Fälle sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Hier wird zwischen falschen und fehlerbehafteten Objekten unterschieden. Falsch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Objekt nicht der Objektklasse entspricht, die der Agent vorgegeben hat. Fehlerbehaftet bezeichnet, dass die Objektklasse korrekt ist, aber qualitative Mängel vorliegen.

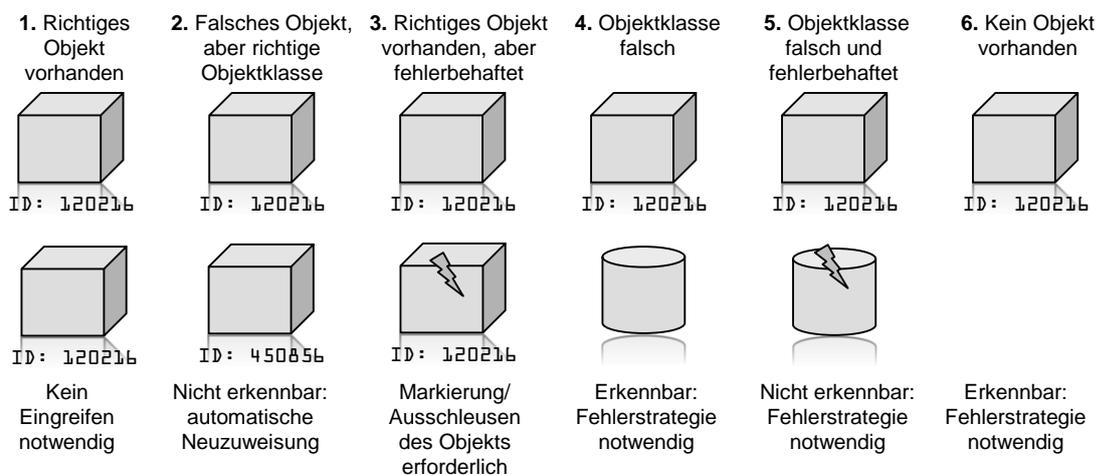


Abbildung 4-5: Fehlerfälle und Auswirkungen auf die merkmalsbasierte Identifikation

Liegt ein falsches Objekt, aber die richtige Objektklasse vor (Fall 2), ist dies in der merkmalsbasierten Selbststeuerung nicht zu erkennen. Bei einer erfolgreichen Erkennung der Objektklasse geht der Agent davon aus, dass kein Eingreifen notwendig ist. Sofern keine Nachweispflicht für das Bauteil besteht, ist dies auch der Fall und das reale Objekt tauscht folglich die ID mit einem Objekt der gleichen Klasse. In Summe hat dies keine Auswirkung auf die Wertschöpfungskette.

Fall 3 ist nur erkennbar, wenn der Produktfehler messbar ist bzw. durch die Messung Rückschlüsse auf einen Fehler möglich sind. Beispielsweise kann durch die Messung des Gewichts nicht erkannt werden, an welcher Stelle Bohrungen fehlen. Dennoch kann aus dem zu hohen Gewicht gefolgert werden, dass ein Fehler vorliegt. Sofern das gemessene Gewicht mit keinem anderen der aktiven Objekte übereinstimmt, muss ein fehlerbehaftetes Objekt vorliegen. In diesem Fall besteht die Möglichkeit des Aussonderns, indem das Objekt in einen markierten Werkstückträger gelegt wird, das Objekt selbst markiert wird oder softwareseitig der Agent des Objekts markiert wird. Daraufhin gilt es zu überprüfen, ob das fehlerbehaftete Objekt auch der richtigen Objektklasse angehört und nicht Fall 5 vorliegt. Anschließend muss eine entsprechende Umplanung erfolgen, welche von der Nacharbeit des Objekts vor Ort bis zur Neuintiierung des Auftrags reichen kann.

Wird hingegen eine andere Objektklasse eindeutig erkannt (Fall 4), erfolgt direkt eine Umplanung. Um die Fehlerquelle zu finden, wird ein zusätzlicher Lokalisierungsagent implementiert bzw. eine Lokalisierungsfunktion in einen bestehenden Agenten integriert. Um das Objekt zu lokalisieren, werden die letzten Prozessschritte des vermissten Objekts sowie der potenziell vorliegenden Objekte, sprich alle aktiven Objekte der identifizierten Objektklasse, untersucht.

Sofern eine andere Objektklasse vorliegt, welche zudem fehlerbehaftet ist, kann dies nur in Ausnahmen erkannt werden. Zu diesen Ausnahmen zählen sehr umfangreiche Prüfvorgänge, welche in dem vorliegenden Ansatz im Hinblick auf die Anforderungen an die Identifikation vermieden und entsprechend nicht betrachtet werden. Folglich ist davon auszugehen, dass in diesem Fall ein fehlerhaftes Objekt identifiziert wird, welches analog zu einem fehlerbehafteten Objekt der richtigen Objektklasse behandelt wird.

Sofern kein Objekt detektiert werden kann, ist ein Fehler unmittelbar vor der Prüfung naheliegend, welchen es entsprechend zu lokalisieren gilt. In diesem Fall gilt es zudem sicherzustellen, dass das Sensorsystem fehlerfrei funktioniert und der Fehler nicht der Messung selbst zuzuordnen ist.

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

Nahezu alle der dargestellten Fehlertypen können ebenso beim Einsatz eines ID-basierten Selbststeuerungssystems auftreten. Fall 2 und 4 treten in einem IDSS jedoch nur auf, wenn der Fehler bereits bei der Anbringung der ID entstanden ist. In diesen beiden Fällen wird der Fehler weitergereicht, da dieser durch das Auslesen der ID nicht zu detektieren ist. Dies gilt zudem für Fall 3, in welchem ein fehlerhaftes Produkt vorliegt. In diesen Fällen bietet ein MASS durch die Messung der Merkmale, welche einer Qualitätsprüfung entspricht, deutliche Vorteile im Hinblick auf die Fehlererkennung. Um die unterschiedlichen Fehlerstrategien in einem MASS umzusetzen, müssen zusätzliche Aufgaben und Funktionen wie bspw. das Suchen verlorener Objekte implementiert werden. Darüber hinaus müssen die Agenten in der Lage sein, Fehler, die nicht automatisch zu beheben sind, an einen Bediener zu kommunizieren. In der folgenden resultierenden Architektur eines MASS werden diese Funktionalitäten verschiedenen Agenten zugeordnet.

4.2.4 Struktur des Agentensystems eines MASS

In Abbildung 4-6 sind die übergeordneten Rollen von Agenten und deren Zusammenhang dargestellt. Die Agenten sind vollständig miteinander vernetzt und kommunizieren über das Message Transport System. Durch die Auswahl von JADE als Framework wird ein Agent Management System sowie ein Directory Facilitator verwendet und der FIPA-Standard eingehalten. Diese Instanzen stellen rein virtuelle Agenten, dar, welche weder über eine LLC noch über ein reelles Gegenstück in der Produktion verfügen. Von den Produktionsagenten verfügen lediglich Objektagenten und einfach ausgeprägte Lageragenten nicht über eine LLC. Die Aufteilung der Aufgaben und Funktionalitäten der Agenten eines MASS werden im folgenden Abschnitt rollenspezifisch erläutert.

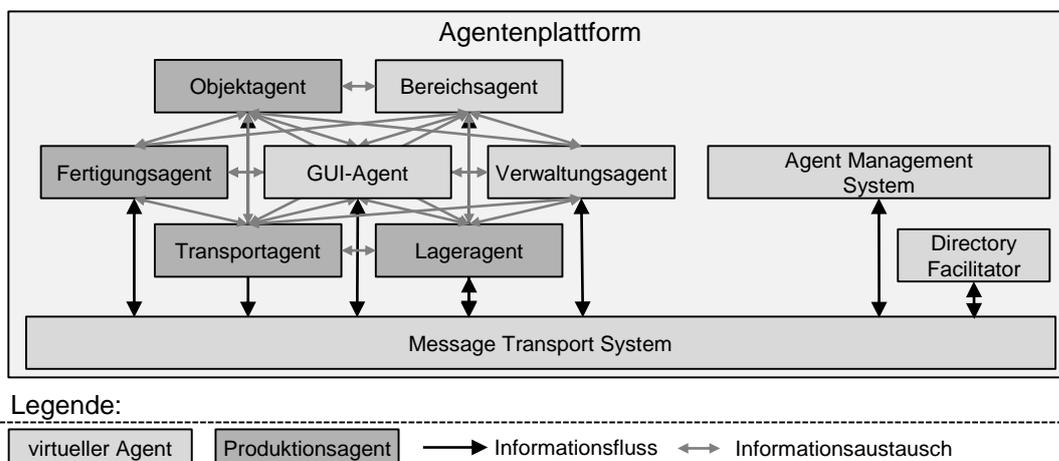


Abbildung 4-6: Struktur des Agentensystems eines MASS

4.3 Rollen und Aufgaben der Agenten

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Agentenrollen eines MASS und deren Aufgaben beschrieben. Durch die Verwendung von JADE ergeben sich verschiedene Grundfähigkeiten, welche alle Agenten besitzen. Neben der An- und Abmeldung an der Agentenplattform ist bspw. jeder Agent in der Lage, eine Fehlermeldung zu versenden. Auf diese grundlegenden Funktionen wird im Folgenden nicht explizit eingegangen, da sie zum Stand der Technik zählen.

4.3.1 Objektagent

Diese Rolle dient der Virtualisierung von Objekten des Produktionssystems. Dies umfasst nach der Definition in Abschnitt 2.1.3 einzelne Bauteile sowie zusammengesetzte Produkte aus mindestens zwei Bauteilen. Initialisiert werden die Objektagenten durch den Verwaltungsagenten. Zu den Aufgaben der Objektagenten zählt die An- und Abmeldung bei den Bereichsagenten inkl. der Auskunft, ob der Objektagent aktiv bzw. inaktiv ist. Das Ziel eines Objekts ist seine Transformation in den gewünschten Endzustand durch einen oder mehrere Fertigungsschritte. Zu diesem Zweck kommuniziert der Objektagent sowohl mit Fertigungs-, Transport- und Lageragenten. Neben übergeordneten (z. B. Pose) und zustandsbezogenen (z. B. Geometrie-)Eigenschaften des Objekts, enthält der Agent auftragsbezogene Informationen in Anlehnung an PHILIPP (2014), welche eine gezielte Verhandlung ermöglichen (vgl. Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Informationen des Objektagenten - Auszug

	Objekt-ID			
Auftragsbezogene Informationen	Übergeordnete Eigenschaften	Bearbeitungszustand [0]	Bearbeitungszustand [1]	Bearbeitungszustand [n]
Liefertermin	X	Werkstoff	Werkstoff	Werkstoff
Zielkosten	Y	Gewicht	Gewicht	Gewicht
Bearbeitungszustand	Z	Farbe	Farbe	Farbe
Schlupfzeit	α	<u>Geometrie</u>	<u>Geometrie</u>	<u>Geometrie</u>
	β	<u>Erkennungsmerkmal [1]</u>	<u>Erkennungsmerkmal [1]</u>	<u>Erkennungsmerkmal [1]</u>
	γ	<u>Erkennungsmerkmal [2]</u>	<u>Erkennungsmerkmal [2]</u>	<u>Erkennungsmerkmal [2]</u>
	Fehler	<u>Bearbeitungsparameter</u>	<u>Bearbeitungsparameter</u>	<u>Bearbeitungsparameter</u>
		<u>Griffpunkt [1]</u>	<u>Griffpunkt [1]</u>	<u>Griffpunkt [1]</u>
		<u>Griffpunkt [2]</u>	<u>Griffpunkt [2]</u>	<u>Griffpunkt [2]</u>

Allen Informationen übergeordnet ist die ID des Agenten, welche für eine eindeutige Kommunikation notwendig ist. Der Bearbeitungszustand [0] stellt den Ausgangszustand und der Bearbeitungszustand [n] den Endzustand des Objekts dar. Für jeden dieser Zustände werden durch die Arbeitsvorbereitung Bearbeitungsparameter bestimmt, welche nötig sind, um das Objekt in diesen Zustand zu heben. Der Agent verweist hier (unterstrichener Eintrag) auf eine weitere spezifische Tabelle, in welcher die Details des Prozessschritts enthalten sind. Für die prozessspezifische Erstellung dieser Tabellen können einfache Planungsmethoden verwendet werden oder die benötigten Prozessdaten werden aus aufgabenorientierten Programmierverfahren gewonnen (siehe z. B. BACKHAUS 2015). Analog werden Griffpunkte des Objekts zustandsspezifisch definiert, welche ebenfalls über verschiedene Verfahren bestimmt werden können (z. B. MANGIALARDI ET AL. 1996, MILLER ET AL. 2003, SDAHL & KUHLENKOETTER 2005, BLEY 2009). Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Beschreibung der Geometrie eines Objekts. Die Darstellung über einfache Werte ist nur für simple Geometrien sinnvoll, sodass sie ebenfalls über einen Verweis im Agenten hinterlegt werden. Zur Einhaltung industrieller Standards wird die Verwendung von Step-Dateien empfohlen. Ein anderer Ansatz zur Beschreibung der Geometrie, welcher von Agenten direkt auswertbar ist, ist die Verwendung des G-Codes. Dieser Code beschreibt ein Objekt in einzelnen Ebenen in Abhängigkeit seiner Orientierung (siehe α , β , γ in Tabelle 4-4). Dies ermöglicht die Extrahierung sichtbarer Konturen und einzelner Submerkmale, welche als Erkennungsmerkmale für die einzelnen Zustände hinterlegt werden können. Die Generierung von G-Code, aus CAD-Daten wie Step, ist programmspezifisch. Im Rahmen dieser Arbeit wurde CATIA V5 als CAD-Programm verwendet und der Code nach HOFFMANN (2011) abgeleitet. Die hinterlegten Informationen für ein Objekt können erweitert werden, entscheidend ist die Einhaltung der Struktur der Informationen, sodass eine zustandsbezogene Beschreibung erhalten bleibt.

4.3.2 Fertigungsagent

Fertigungssysteme dienen zur Bearbeitung bzw. Verarbeitung der Objekte, um einen Zustandswechsel des Objekts zu ermöglichen. Folglich müssen sie in der Lage sein, die Bearbeitungsparameter eines Objekts zu lesen und zu verstehen. Sie gleichen ihre Fähigkeiten mit der Anfrage der Objekte ab und entscheiden, entweder regelbasiert oder situativ, ob sie die Anfrage bearbeiten. Je nach Fertigungsverfahren sind diese Agenten neben der Aktualisierung für die Initialisierung oder Vereinigung der Objektagenten zuständig. Aus der DIN 8580 wurden

die verfahrensspezifischen Fähigkeiten der Fertigungsagenten abgeleitet (vgl. Tabelle 4-5). Hervorzuheben sind Fügeprozesse, welche durch die Vereinigung von mindestens zwei Objekten charakterisiert sind. Analog zur Operation in der realen Produktion werden die Agenten dieser Objekte zu einem Agenten zusammengefasst. In diesem Fall wird jedoch keiner der Agenten gelöscht, sondern ein Agent in den anderen integriert. Auf diese Weise bleiben alle Informationen erhalten und im Falle von Wartungs-, Reparatur- oder Demontagearbeiten ist es möglich, die Bestandteile eines Produkts zu identifizieren.

Tabelle 4-5: Zusätzliche Fähigkeiten von Fertigungsagenten

Fertigungsverfahren	Fähigkeiten
Urformen	Initialisierung eines oder mehrerer Objektagenten
Umformen	Aktualisierung eines oder mehrerer Objektagenten
Trennen	Aktualisierung eines oder mehrerer Objektagenten Initialisierung eines oder mehrerer Objektagenten
Fügen	Aktualisierung eines oder mehrerer Objektagenten Vereinigung eines oder mehrerer Objektagenten
Beschichten	Aktualisierung eines oder mehrerer Objektagenten
Stoffeigenschaft ändern	Aktualisierung eines oder mehrerer Objektagenten

Aus der Betrachtung der aufgeführten Fertigungsverfahren sind die Fähigkeiten weiterer Produktionsprozesse ableitbar. Ein Verpackungsprozess, in welchem ein Bauteil in eine Kiste eingelegt und verschlossen wird, kann bspw. als Fügeprozess betrachtet werden, sofern das Objekt als Packgut und der Karton als Packstoff zuvor als Agenten an der Steuerung teilgenommen haben. Wird der Packstoff als Hilfsmittel angesehen, welches nicht als Agent repräsentiert wird, kann der Prozess wie eine Beschichtung des Objekts betrachtet werden.

Die Fähigkeiten sind so gestaltet, dass sie auf einen oder mehrere Agenten anwendbar sind. Neben der Situation, dass mehrere Objekte gleichzeitig gefügt werden, gilt es zu berücksichtigen, dass viele Maschinen mehrere Objekte in einem Prozessschritt bearbeiten bzw. herstellen. Im Hinblick auf flexible Verfahren gilt zudem, dass die Objekte nicht identisch sein müssen. In additiven Fertigungsverfahren werden bspw. mehrere unterschiedliche Objekte gleichzeitig hergestellt, welche alle durch den Agenten der additiven Anlage initialisiert werden. Hierzu werden über die Schnittstelle zwischen LLC und HLC die Objektinformationen aus der Maschinensteuerung extrahiert. Über diese Schnittstelle werden zudem prognostizierte Bearbeitungszeiten für Reihenfolgebildung weitergegeben.

4.3.3 Transportagent

Im vorliegenden Systemansatz kommt dieser Agentenrolle eine besondere Bedeutung zu, da sie neben der Vernetzung der einzelnen Fertigungssysteme für die Identifikation und Lokalisierung der Objekte zuständig ist. Prinzipiell ist es möglich, einen separaten Identifikationsagenten zu implementieren, um den Regeln nach WEIß & JAKOB (2005) zur Rollendefinition stärker zu folgen. Da die Aufgaben aber in einem System gekapselt werden, ist es sinnvoll, analog die Agenten zu kapseln. In Abhängigkeit des eingesetzten Identifikationssystems gilt es, eine zweite Schnittstelle zur LLC zu implementieren, welche die Kommunikation des Agenten sowohl mit der Steuerung des Handhabungssystems als auch mit einem Rechner der Bildverarbeitung ermöglicht. Aufgrund der hohen Varianz werden die Verfahren zur Identifikation und zur Lokalisierung nicht von der HLC, sondern der LLC durchgeführt. Dies ermöglicht es wiederum, die Aufgaben der HCL geräte- und verfahrensunabhängig zu implementieren, sodass die Positionsaktualisierung unabhängig von einer zuvor erfolgten Positionsextraktion (Roboter) oder einer Positionsberechnung (Förderbänder) durchgeführt wird.

4.3.4 Lageragent

Den Lageragenten sind sowohl feste Lagerplätze als auch mobile Werkstückträger zugeordnet. Diese Agenten besitzen, ähnlich den fügen Fertigungssystemen, die Fähigkeit, Agenten zu vereinigen. Hierbei handelt es sich stets um eine temporäre Vereinigung von Agenten, deren Genauigkeit je nach Lagertyp, in Anlehnung an den Ordnungszustand eines Objekts, variiert. Werden bspw. mehrere Objekte ungeordnet in einer Kiste gelagert, geht die Orientierung der Objekte verloren und die Position wird als Bereich statt als Wert angegeben. Der Bereich wird im Koordinatensystem des Ladungsträgers angegeben und ist von seiner Größe abhängig. Im Fall einer Gitterbox wird die Position der unsortierten Objekte mit X (0-1200), Y (0-800) und Z (0-1000) angegeben, was der Länge, Breite und Höhe der Box entspricht. Für einfache Lager, wie Boxen und Paletten, übernimmt die HLC die Lagerüberwachung. Dies beinhaltet bspw. die Erfassung der Lagerdauer sowie die Kommunikation von Ist- und Sicherheitsbeständen.

4.3.5 Visualisierungsagent

Dieser Agent ist für die Visualisierung der verschiedenen Prozesse im System zuständig und ist in der Lage, unterschiedliche Informationen, welche maßgeblich

von den Bereichs- und Verwaltungsagenten zur Verfügung gestellt werden, für den Menschen darzustellen. Darüber hinaus stellt dieser Agent die notwendige Schnittstelle zur Eingabe von Informationen durch den Menschen bereit.

4.3.6 Bereichsagent und Verwaltungsagent

Die Definition und Gestaltung dieser beiden Rollen ist abhängig vom gewünschten Autonomiegrad. Der große Vorteil der Implementierung von Bereichsagenten ist, dass nach Belieben eine Unterteilung und Hierarchisierung der Produktion möglich ist, indem sie wie ein Dienstvermittler in SOA die Verhandlungen zwischen Objekten und Betriebsmitteln substituieren können. Die Produktionsagenten müssen für diesen Fall nicht direkt angepasst werden. Einzig und allein ihre Interaktionsprotokolle werden geändert. Sofern diesen Agenten die Fähigkeit verliehen wird, die Verhaltensweisen anderer Agenten zu überschreiben, kann auf diese Weise der Autonomiegrad in der Betriebsphase angepasst werden (vgl. Abschnitt 3.1.1). Zu den Aufgaben, die unter diesen beiden Rollen verteilt werden müssen, zählen die Auswertung von Produktionsaufträgen und die darauffolgende Initialisierung von Agenten nach den Verfahren der Auftragsfreigabe (vgl. Tabelle 4-3). Darüber hinaus sind diese Rollen für das Identifikationsmanagement zuständig und bestimmen die situationsspezifisch ausreichenden Merkmale für die Identifikation der Objekte. Zu diesem Zweck werden der Zustand und die korrespondierenden Erkennungsmerkmale der aktiven Objektagenten ausgelesen und auf Unterschiede untersucht. Diese Unterschiede werden anschließend, unter Einbeziehung der Identifikationsfähigkeiten der Transportagenten, auf ihre Messbarkeit überprüft. Über diesen Prüfvorgang kann bspw. die Aktivierung eines Objektagenten verhindert werden, wenn dieser nicht von einem oder mehreren Objekten unterschieden werden kann. Um sicherzustellen, dass diese Option nur in Ausnahmefällen genutzt wird, gilt es, die Produktion vorab auf ihre Eignung für eine merkmalsbasierte Selbststeuerung zu überprüfen.

4.4 Analyse des Ansatzes und methodischer Handlungsbedarf

Das konzipierte MASS bietet zahlreiche Vorteile gegenüber bestehenden Ansätzen, wie die durchgängige Anwendbarkeit und die integrierte punktuelle Qualitätskontrolle, welche die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern erhöht. Darüber hinaus besteht in einem MASS die Möglichkeit, dass Objekte ihre Selbststeuerung unmittelbar nach ihrer Herstellung starten. Der Nachteil des Ansatzes besteht in der nicht eindeutigen Identifikation, welche einen branchenübergreifenden Einsatz

4 Ansatz eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems

verhindert. Um dies zu umgehen, könnte zukünftig ein MASS mit einem IDSS kombiniert werden, sodass sicherheitskritische Objekte eine ID erhalten und sich einfache Objekte, z. B. Verbindungselemente, ID-los selbst steuern. Bevor eine Kombination angestrebt werden kann, müssen erste MASS implementiert und Erfahrungen in der MAS gesammelt werden. Hierzu wird in den folgenden Kapiteln auf die Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise eingegangen, um die Planung und Konfiguration eines MASS zu unterstützen.

Aufgrund der hohen Komplexität des Ansatzes und der benötigten Anpassungen von Betriebsmitteln, z. B. den Handhabungssystemen, ist eine szenariospezifische Eignungsprüfung eines MASS, dessen Planung und Konfiguration voranzusetzen. Durch die benötigten Anpassungen wird die Planung eines neuen Produktionssystems fokussiert, sodass diese Eignungsprüfung wie auch die folgenden Entwicklungsschritte in einer frühen Planungsphase zu verorten sind.

Die direkte Identifikation in einem MASS stützt sich auf die Unterscheidung von Objekten anhand ihrer Merkmale. Daher muss ein weiterer Bestandteil der methodischen Vorgehensweise die Definition identifizierbarer Objektmerkmale im Hinblick auf das Produktspektrum sein, um die benötigten Sensorsysteme zu definieren. Sofern die Menge an unterschiedlichen Merkmalsausprägungen zu gering ist, kann das System nicht wirtschaftlich eingesetzt werden. Folglich ist in diesen methodischen Baustein eine zweite Eignungsprüfung zu integrieren.

Der Lösungsansatz, die Identifikation in Handhabungsprozesse zu integrieren, stellt aufgrund der hohen Varianz an Sensor- und Handhabungssystemen ebenfalls eine komplexe Aufgabe dar. In diesem Bereich existieren verschiedene Ansätze, welche auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen und im Bedarfsfall zu adaptieren sind.

Für die Planung und Konfiguration von Agentensystemen stehen ebenfalls zahlreiche Methoden zur Verfügung. Diese werden im produktionstechnischen Umfeld jedoch erst angewandt, wenn bereits ein System vorliegt. Zudem berücksichtigen sie keine der spezifischen abgeleiteten Aufgaben, welche aus der direkten Identifikation und der kontinuierlichen Lokalisierung resultieren.

Zusammenfassend ergibt sich der Bedarf einer methodischen Unterstützung in vier unterschiedlichen Bereichen, zu welchen teilweise bereits erste methodische Ansätze vorliegen. Im folgenden Kapitel wird ein Vorgehen geschildert, in welchem bestehende Methoden und methodische Schnittstellen berücksichtigt werden, um eine Methodik zu entwickeln.

5 Methodik zur Planung und Konfiguration von MASS

Aus dem Stand der Wissenschaft und Technik sowie der Analyse des Systemansatzes wurden vier Themenbereiche abgeleitet, welche einer methodischen Vorgehensweise bedürfen. Aufgrund der Varianz der Bereiche sind sie in separaten Methoden zu adressieren (vgl. Tabelle 5-1). Der Begriff Methode beschreibt hierbei ein planmäßiges, regelbasiertes Vorgehen, nach dessen Vorgabe definierte Tätigkeiten durchzuführen sind, um ein Ziel zu erreichen (LINDEMANN 2009).

Tabelle 5-1: Übersicht der methodischen Bausteine

Methodischer Baustein	
1	Szenariospezifische Eignungsprüfung der Produktion zur Selbststeuerung in einer frühen Planungsphase
2	Definition identifizierbarer Merkmale anhand des Produktspektrums und Auswahl geeigneter Sensoren zu deren Messung
3	Integration von Sensoren in die Handhabung zur Kopplung von Identifikations-, Lokalisierungs- und Identifikationsvorgängen
4	Planung und Konfiguration von Rollen und Agentenaufgaben unter Berücksichtigung direkter Identifikations- und diskontinuierlicher Lokalisierungsstrategien

Unter Verwendung des Münchner Methodenmodells (MMM) nach PONN & LINDEMANN (2011) wird in dieser Arbeit ein systematisches und wissenschaftlich begründetes Vorgehen bei der Entwicklung der vier Methoden sichergestellt. Darüber hinaus werden systematische Schnittstellen geschaffen, welche ein Zusammenwirken der Methoden ermöglichen und dadurch eine ganzheitliche Methodik formen (LINDEMANN 2009). Um auf diese Weise eine durchgängige Vorgehensweise zu erhalten, wurde das MMM erweitert, sodass der Out- und Input aufeinanderfolgender Methoden identisch ist (vgl. Abschnitt 10.3.1).

Da die direkte Identifikation durch Kombination von Merkmalen, Zuständen, Sensoren und Handhabungssystemen ein sehr komplexes System darstellt, wurden Bestandteile des strukturellen Komplexitätsmanagements (SKM) in der Entwicklung der Methodik angewandt. Da diese Bestandteile maßgeblich die Anwendung der Methodik unterstützen und einen geringeren Einfluss auf den wissenschaftlichen Gang der Untersuchung haben, wird auf diese lediglich verwiesen. Zum Beispiel werden für verschiedene Matrizen die Begriffe Domain Mapping Matrix (DMM) und Design Structure Matrix (DSM) verwendet. Diese Matrizen wurden aus dem SKM abgeleitet. Eine Übersicht der wichtigsten Bestandteile des SKM und zugehörige verwendete Formeln sind in Abschnitt 10.3.2 zu finden.

Um in Anlehnung an das MMM den Methodeneinsatz zu klären, gilt es, den Zweck der Methode zu erörtern. In der vorliegenden Arbeit wird das Ziel einer merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerung verfolgt. Hierzu wird zunächst überprüft, ob der Einsatz einer Selbststeuerung unabhängig von ihrer Ausprägung sinnvoll ist, bevor anschließend ein Selbststeuerungssystem entwickelt wird. Aufgrund der vielfältigen Bedingungen und Einflüsse auf die Betriebsmittel durch die Verwendung eines MASS ist der Gang der Untersuchung in eine frühe Planungsphase zu legen. Für Produktionssysteme ist diese Phase der Fabrikplanung gleichzusetzen (GRUNDIG 2015). Daraus folgt, dass sich ein anderer Anwendungskreis für die Methodik ergibt und sich der Detaillierungsgrad der Informationsbasis verringert. Von diesen Änderungen bzw. Einschränkungen ist vorrangig die Bestimmung des optimalen Autonomiegrades, welche der Entscheidung für bzw. gegen ein Selbststeuerungssystem gleichzusetzen ist, betroffen. Mit bestehenden Verfahren ist diese Entscheidung auf die partielle Implementierung des Steuerungssystems zur Durchführung eines Benchmarkings mit Referenzsystemen angewiesen (vgl. Abschnitt 3.1.1). Eine Implementierung ist in diesem frühen Stadium jedoch nicht möglich, sodass ein alternativer Ansatz zu entwickeln ist. Zudem gilt es, die Granularität der Informationen im Rahmen der Auswahl identifizierbarer Merkmale und korrespondierender Kombinationen aus Sensor- und Handhabungssystemen zu berücksichtigen.

Zusammenfassend ist der Zweck der Methodik die abgesicherte Entwicklung eines MASS. Abgesichert bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die vorangestellte Eignungsprüfung. Als Situation, zu welcher die Entwicklung stattfinden soll, wird die Fabrikplanung definiert. Die Wirkung der Methodik ist ein konfiguriertes Agentensystem sowie eine Übersicht verwendbarer Merkmale und kombinierte Sensor- und Handhabungssysteme, sofern dieser hohe Autonomiegrad die Wirtschaftlichkeit erhöht. Aus der Beschreibung dieser drei Kategorien und den Randbedingungen (RS) und Anforderungen (AS) an den Systemansatz wurden die folgende Randbedingung an die Methodik (RM) und Anforderungen (AM) abgeleitet. Diese Anforderungen beziehen sich auf die Planungsvorgehen und unterstützenden Werkzeuge aller Methoden wie auf die Methodik selbst.

Des Weiteren wurden spezifische Anforderungen an einzelne Methoden abgeleitet, welche ebenso als Evaluationskriterien für die Auswahl potenziell adaptierbarer bestehender Methoden dienen.

5.1 Randbedingungen und Anforderungen an die Methodik

RM1 - Spezifikation der betrachteten Objekte: Die Fähigkeit zur Selbststeuerung soll prinzipiell allen Bauteilen in der Produktion zukommen. In einzelnen Fällen sind jedoch nicht alle Daten für die Selbststeuerung bekannt oder erforderlich. Im Fall von Fluiden werden nicht einzelne Objekte ver- bzw. bearbeitet, sondern eine gewisse Menge. Fluide und Schüttgüter sind in einem Behälter kapselbar (SCHLICK ET AL. 2014), sodass alle potenziellen Objekte über Stückgüter repräsentierbar sind. Produktionsabfälle (z. B. Späne) werden analog behandelt. Für sie gilt ebenfalls, dass der gesamte Behälterinhalt die gleiche Destination besitzt und eine Unterteilung des Behälterinhalts keinen Einfluss auf die folgenden Prozessschritte besitzt. Eine weitere Restriktion stellen Hilfsteile, z. B. Fügehilfsteile nach DIN 8593, dar, welche einem eigenen Materialflusskonzept unterliegen. In der Regel werden diese Teile, wie bspw. Schrauben und Muttern, nicht auftragsbezogen in größeren Mengen an den Arbeitsplätzen oder Bereichen zur Verfügung gestellt (JÜNEMANN & BEYER 1998, ARNOLD & FURMANS 2009). Analog zu den Fügehilfsteilen werden Hilfsstoffe nicht als Objekte betrachtet.

AM1 - Integration in die Fabrikplanung: Die Umsetzung eines MASS nimmt einen großen Einfluss auf die benötigten Betriebsmittel. Eine Integration des MASS in eine bestehende Produktion ist folglich mit einem erhöhten Aufwand verbunden. Für einen wirtschaftlichen Einsatz wird stattdessen die Planung einer neuen Fabrik fokussiert. Basierend auf diesem Ansatz und dem direkten Bezug eines MASS auf die Betriebsmittelauswahl ist eine Integration der Methodik in die Fabrikplanung anzustreben. Um eine möglichst hohe Kompatibilität zu der Vielzahl an unterschiedlichen Fabrikplanungsvorgehen zu ermöglichen, werden die allgemeinen Phasen nach GRUNDIG (2015) genutzt (vgl. Abbildung 5-1).

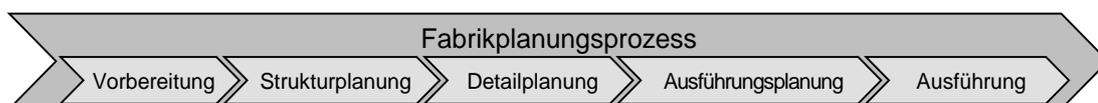


Abbildung 5-1: Allgemeine Phasen der Fabrikplanung (GRUNDIG 2015)

AM2 - Schnittstelle zur iterativen Entwicklung von Agentensystemen: Für die Steuerung von dezentralen, heterarchischen Produktionssystemen besitzen Agentensysteme das größte Potenzial (vgl. Abschnitt 2.4.2.3). Durch den iterativen Aufbau von Methoden zur Agentensystementwicklung nimmt die Konfiguration eines Agentensystems auf alle Entwicklungsschritte des Systems einen Einfluss. Aus diesem Grund muss die Methodik an alle Entwicklungsschritte von Agentensystemen anknüpfen bzw. diese berücksichtigen.

AM3 - Benutzerfreundlichkeit: Die Methodik ist verständlich und nachvollziehbar zu gestalten. Folglich ist das benötigte Expertenwissen vollständig in Werkzeuge der Methodik zu integrieren. Zur Evaluation bestehender Methoden und Überprüfung dieser Anforderung sind folgende Fragestellungen verwendbar. Wie groß ist der Aufwand, die Methoden zu erlernen? Werden spezielle Kenntnisse benötigt?

AM4 – Genauigkeit und Eindeutigkeit: Diese Anforderung bezieht sich auf den Detaillierungsgrad der Planungsschritte. Um final ein funktionsfähiges System zu erhalten, müssen die Ergebnisse über Vorlagen genau und eindeutig spezifiziert sein. Sind die Aufgaben und Zwischenergebnisse der einzelnen Schritte eindeutig beschrieben? Werden Beispiele zur Verfügung gestellt?

AM5 - Vollständigkeit: Mit dieser Anforderung wird überprüft, ob alle notwendigen Planungs- und Entwicklungsschritte methodisch unterstützt werden. Deckt die Methode alle Bereiche der Entwicklung ab? Ist eine Kombination von Methoden erforderlich?

AM6 – Skalier- und Adaptierbarkeit: Die Themenbereiche der Methodik unterliegen einer hohen Innovationsdynamik, sodass sich bspw. die Eigenschaften von Sensoren stetig verbessern und zudem neue Wirkprinzipien eine Marktreife erreichen. Demzufolge müssen die Entscheidungsgrundlagen in den Methoden erweiterbar sein. Zudem adressiert die Anforderung den Umfang des Anwendungsbereichs. Sind die Hilfsmittel und Werkzeuge der Methode erweiterbar? Ist die Methode bspw. für kleine und große Agentensysteme anwendbar?

AM7 – Variabilität und Wiederverwendbarkeit: Die Möglichkeit, Veränderungen und Anpassungen durchzuführen, wird durch diese Anforderung adressiert. Dies umfasst ebenfalls die Mehrfachnutzung von Modellen durch eine Rückkopplung der Ergebnisse, um bspw. Werkzeuge zu erweitern. Können Ergebnisse gespeichert und angepasst werden, um Planungsschritte zu wiederholen bzw. nachfolgende Entwicklungsprojekte durch eine Wiederverwendung zu vereinfachen?

Die aufgeführten Anforderungen beziehen sich auf die Methodik und die enthaltenen Methoden. Um die einzelnen Themenbereiche zu adressieren und bestehende Methoden auf ihre Adaptierbarkeit gezielt zu untersuchen und zu bewerten, werden die Anforderungen für verschiedene Methoden spezifisch erweitert.

Für den zweiten methodischen Baustein, die Definition identifizierbarer Merkmale, werden zusätzlich die Anforderungen der mehrstufigen Auswahl sowie der Komplexität definiert. Diese spezifischen Anforderungen an die Methode (SAM) beziehen sich vorrangig auf die erforderliche Auswahl von Sensorklassen.

5.1 Randbedingungen und Anforderungen an die Methodik

SAM1 - Mehrstufige Auswahl: Eine automatische Bestimmung des am besten geeigneten Sensors reduziert die Wiederverwendbarkeit und Mehrfachzuordnung der Sensoren. Dies erhöht die Varianz der benötigten Sensorsysteme und Verfahren und führt zu höheren Kosten. Daher ist der Auswahlprozess mehrstufig zu gestalten, um eine Menge an geeigneten Sensorklassen zu erhalten, aus welcher nach einer übergreifenden Betrachtung geeignete Sensorsysteme auszuwählen sind.

SAM2 - Komplexität: Aufgrund der hohen Anzahl benötigter Auswahlprozesse müssen diese einfach und im besten Fall automatisierbar sein, da der Aufwand andernfalls zu groß wird. Sind die einzelnen Entscheidungen automatisierbar?

Für die Evaluation des dritten Bausteins, welcher die Integration von Identifikationssystemen in Handhabungssysteme fokussiert, wird zusätzlich die spezifische Anforderung der Implementierbarkeit verwendet.

SAM3 - Implementierbarkeit: Diese Anforderung beschreibt den erforderlichen Aufwand, um basierend auf den erarbeiteten Konzepten eine Implementierung des Identifikationsprozesses durchzuführen. Diese Anforderung stellt eine Kombination und Detaillierung der Anforderungen AM4 und AM5 dar. Demzufolge müssen die Ergebnisse dieser Methode über die Planungsphase hinweg für die Betriebsphase nutzbar sein. Werden der Prozess der Integration sowie der integrierte Identifikationsprozess verständlich und nutzbar beschrieben?

Der vierte methodische Baustein besitzt eine starke informationstechnische Prägung und verlangt folglich nach mehreren spezifischen Anforderungen, um die Methode im Vergleich zu bestehenden Ansätzen zu bewerten. Zu diesem Zweck wurden bestehende Evaluationsverfahren (vgl. Tabelle 10-5) analysiert und erweitert.

SAM4 – Kommunikation und Ontologien: Um ein funktionsfähiges Agentensystem zu planen und zu konfigurieren, muss die Methode Möglichkeiten zur Modellierung der Kommunikation bieten. Darüber hinaus muss das Vokabular der Kommunikation, die Ontologie, spezifiziert werden, um die Funktionsfähigkeit sicherzustellen. Wie wird die Kommunikation modelliert? Welche Protokolle und Sprachen werden berücksichtigt? Wie gut wird die Spezifikation von Ontologien bzw. die Integration bestehender Ontologien unterstützt?

SAM5 - Offenheit: Kombinationsmöglichkeit mit anderen Vorgehensweisen und Werkzeugen. Wie unabhängig ist die Modellierung der Modelle? Werden sie durch die Architektur, Infrastruktur oder Programmiersprache eingeschränkt?

SAM6 - Flexibilität: In einem MASS ist die Kommunikationsinitiative den Agenten zugeordnet, sodass proaktive Agenten benötigt werden. Unterschiedliche Produktionssteuerungsstrategien können zudem verschiedene Verhaltensweisen von Agenten fordern (z. B. egoistisch oder kooperativ). Wie werden unterschiedliche bzw. veränderliche Verhaltensweisen von Agenten berücksichtigt?

SAM7 - Betrachtungsebenen: Berücksichtigung von Agenten- und Systemebene, um sowohl objekt- und betriebsmittelspezifische Details als auch Aufgaben der PPS zu berücksichtigen. Unterstützt die Methode beide Bereiche der Entwicklung? Sind diese Bereiche voneinander getrennt, sodass ein paralleles Arbeiten möglich ist?

SAM8 – Produktionsspezifische Rollen und Schnittstellen: Diese Anforderung stellt eine Kombination und Detaillierung der Anforderungen AM3, 4 und 5 aus Sicht der agentenorientierten Entwicklung dar. Diese Methode muss produktionspezifisches Wissen mit den Grundlagen der Agentenentwicklung kombinieren, um ein vollständiges und genau spezifiziertes Gesamtsystem zu schaffen. In einem Produktionssystem sind unterschiedlichste Rollen vorhanden (vgl. Fertigungsprozesse), welche verschiedenen Agenten zuzuordnen sind. Darüber hinaus muss die Methode die Definition von Schnittstellen zwischen dem Produktions- (LLC) und dem Selbststeuerungssystem (HLC) unterstützen. Wie gut unterstützt die Methode die Definition und Beschreibung von Rollen? Inwiefern werden Schnittstellen zum Datenaustausch in der Methode berücksichtigt?

SAM9 – Programmierung: Erforderlicher Aufwand, um aus den erarbeiteten Modellen und Diagrammen Programmcode abzuleiten. Kann der Programmcode automatisch aus den Modellen generiert werden?

Die folgende Beschreibung der Methoden orientiert sich an den Schritten des MMM und ist stets in die Abschnitte Methodeneinsatz klären, Methode auswählen und Methode anpassen bzw. generieren unterteilt. Ob eine Methode anpassbar ist oder eine neue Methode generiert werden muss, ist abhängig vom Eignungsgrad bestehender Ansätze. Die erarbeiteten Methoden sind so aufgebaut, dass sie im Rahmen der Methodik und isoliert anwendbar sind, sodass sich für einen Teil der Methoden verschiedene Einsatzsituationen ergeben.

Bevor auf die einzelnen Methoden und deren Entwicklung eingegangen wird, ist im folgenden Abschnitt eine Übersicht der Methodik und ihre Einordnung in den allgemeinen Fabrikplanungsprozess dargestellt.

5.2 Übersicht der Methodik

In Abbildung 5-2 sind die einzelnen Methoden in ihrer inhaltlichen und zeitlichen Abfolge dargestellt und den allgemeinen Phasen der Fabrikplanung zugeordnet. Aus Sicht der Methodik ist die Einsatzsituation der Methoden 2 bis 4 gleichbedeutend mit dem Abschluss der vorangegangenen Methode. Analog dazu besteht der Zweck der ersten drei Methoden maßgeblich aus der Bereitstellung der benötigten Informationen für die Folgende. Darüber hinaus sind die Methoden isoliert anwendbar und entsprechend in unterschiedlichen Situationen einsetzbar. Beispielsweise ist die Merkmalsdefinition derart gestaltet, dass sie ebenso in der Betriebsphase eingesetzt werden kann, um die Produkte in einem Fabrikbereich auf ihre Eignung zur MAS zu überprüfen. Dies ist vor allem für bestehende IDSS interessant, welche in ein MASS überführt werden sollen.

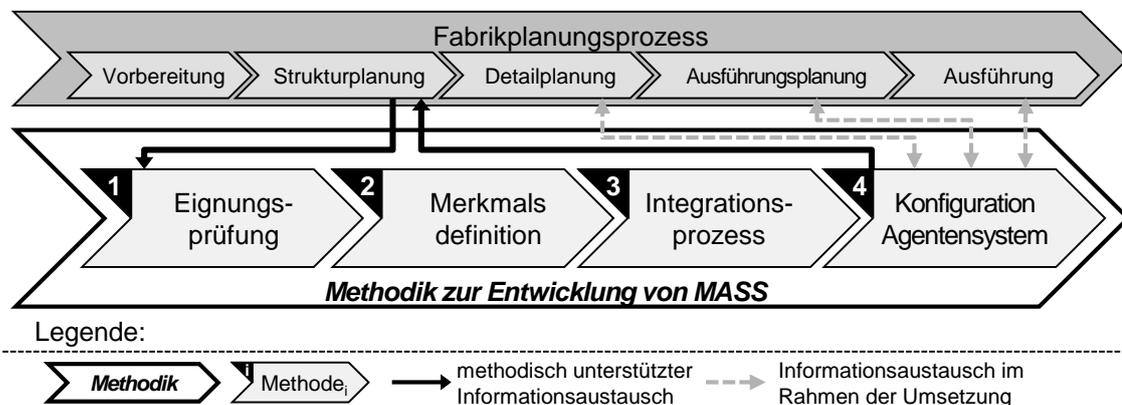


Abbildung 5-2: Übersicht und Einordnung der Methodik

Der Aufbau der Methodik spiegelt hierbei den wissenschaftlichen Kern der Arbeit, die Grenzen einer merkmalsbasierten Selbststeuerung zu erörtern, wider. Demzufolge wird der merkmalsbasierte Steuerungsprozess und das korrespondierende Selbststeuerungssystem mit wachsendem Informationsgehalt im Planungsprozess iterativ auf seine Eignung untersucht. Auf Grund der Komplexität dieser Systeme ist eine binäre Entscheidung zu Beginn des Planungsprozesses nicht möglich, sodass nach jeder Prüfung das System detailliert und anschließend wieder geprüft wird. Um trotz dieser mehrfachen Prüfung nicht in eine planerische Sackgasse zu gelangen wird die ID-basierte Selbststeuerung in Auszügen ebenfalls betrachtet. Durch die Integration der ID-basierten Selbststeuerung in die Methodik wird einerseits die Thematik Selbststeuerung vollständig durchleuchtet. Andererseits werden durch diesen Ansatz weitere Alternativen betrachtet und methodisch unterstützt. Die Verwendung der gebildeten Alternativen unterstützt gleichzeitig

die Bewertung der einzelnen Planungsergebnisse. Dies ist vor allem für die wirtschaftlichen Grenzen einer merkmalsbasierten Selbststeuerung relevant. Diese Grenze ist von Anwendungsfall zu Anwendungsfall sehr unterschiedlich und wird maßgeblich durch die Alternativen einer ID-basierten Selbststeuerung oder eines konventionellen Steuerungssystems bestimmt. Analog gilt dies für die technischen Grenzen der merkmalsbasierten Selbststeuerung, welche maßgeblich durch das Produktspektrum, die vorliegende Fertigungstypologie und die verwendeten Betriebsmittel bestimmt werden. Diese Punkte werden folglich szenariospezifisch in den einzelnen Methoden aufgegriffen und untersucht.

Um Methode 1, die Eignungsprüfung, im Rahmen der Fabrikplanung durchzuführen, müssen erste Informationen der Produktion im Planungsstadium vorliegen. Im Bereich der Fabrikplanung wird von einem ersten Abbild der Produktion gesprochen, welches neben den zu fertigen Produkten bereits korrespondierende Betriebsmittel, deren Anzahl und deren grobe Positionierung beinhaltet. Dieses Abbild wird im Laufe der Strukturplanung erzeugt und dient als zentraler Input für die Methodik und die Eignungsprüfung. Bestandteil dieser Eignungsprüfung ist die Analyse dieses Abbilds unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien. Aus dieser Analyse wird eine prinzipielle Eignung eines MASS abgeleitet und in Relationen zu einer hierarchischen Steuerungsarchitektur bzw. zu einem IDSS gesetzt, um eine isolierte Betrachtung zu vermeiden.

Die folgende Merkmalsdefinition (Methode 2) beinhaltet eine umfassende Produktanalyse, welche nur ausgeführt wird, wenn die prinzipielle Eignung eines MASS vorliegt. Durch diese zweistufige Eignungsprüfung werden stets nur benötigte Analysen durchgeführt und unnötige Aufwendungen vermieden. Den Hauptbestandteil dieser Methode bildet die Ableitung identifizierbarer Merkmale und korrespondierender Sensorsysteme. Mit diesen Informationen können die Kosten der Identifikationssysteme prognostiziert werden und es wird eine finale Entscheidung über den Einsatz eines MASS getroffen. Hierzu wird das MASS erneut mit einem IDSS verglichen, sodass die Entscheidung auf szenariospezifischen Grenzwerten basiert.

Im Rahmen von Methode 3, dem Integrationsprozess, werden die zur Identifikation benötigten Sensorsysteme mit zuvor definierten Handhabungssystemen aus der Fabrikplanung abgeglichen. Um diesen Abgleich zu vereinfachen, wurden sog. integrierte Identifikationsverfahren erarbeitet, welche eine Kombination aus Handhabung und Identifikation darstellen (vgl. Abschnitt 4.2.1). Die Methode

beinhaltet zudem das Vorgehen und die Werkzeuge zur Entwicklung weiterer integrierter Identifikationsverfahren.

Den letzten Schritt der Methodik stellt die Methode 4 zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen dar. In dieser Methode werden alle zuvor generierten Informationen zur Produktion und der enthaltenen Betriebsmittel gesammelt, um ein Agentensystem als virtuelles Abbild der Produktion zu entwickeln. In dieser Methode werden die aus dem Systemansatz abgeleitete Architektur für MASS und alle erforderlichen zusätzlichen Funktionen der Agenten berücksichtigt. Hierbei wird das Agentensystem initial implementiert und erprobt. Diese Evaluation erlaubt Rückschlüsse auf die Performanz der Produktion und ist in einem iterativen Vorgehen zur Optimierung des Systems im Rahmen der Umsetzung nutzbar.

Die folgende Beschreibung der einzelnen Methoden folgt einer klaren Struktur (vgl. Abschnitt 10.1), sodass der *Zweck*, die *Situationen* sowie die *Wirkung* (Wandlung von In- in Output) der Methoden im Rahmen der Klärung des Methodeneinsatzes erläutert werden. Anschließend wird gemäß dem MMM versucht, eine adaptierbare Methode auszuwählen. Abschließend wird die ausgewählte Methode adaptiert oder eine neue Methode generiert.

5.3 Methode zur Eignungsprüfung von Selbststeuerungssystemen

Um eine isolierte Betrachtung zu vermeiden, dient diese Methode der szenariospezifischen Eignungsprüfung von Selbststeuerungssystemen, MASS und IDSS, für die Produktion. Im Folgenden wird zunächst der Methodeneinsatz geklärt und überprüft, inwiefern die Methode auf bestehenden Ansätzen aufbauen kann. Abschließend werden das Vorgehen und unterstützende Werkzeuge beschrieben.

5.3.1 Methodeneinsatz klären

Die Eignungsprüfung bildet den ersten Schritt der Methodik, sodass ihre Einsatzsituation mit jener der Methodik identisch ist. Im Kontext der Methodik ist diese Methode als eine Vorabprüfung zu sehen, welche über einfache Kriterien und Verfahren eine schnelle Schlussfolgerung ermöglichen soll, um ggf. unnötige Aufwände zu vermeiden. Um diese Schlussfolgerung zu ermöglichen, sind verschiedene Informationen aus der Fabrikplanung notwendig, welche einen Rückschluss auf die potenziellen Eigenschaften eines Selbststeuerungssystems ermöglichen. In Tabelle 2-1 sind verschiedene Anforderungen zum Einsatz von Selbststeuerungen aufgelistet, welche sich auf das Steuerungssystem selbst als Lösung, aber auch auf das Produktionssystem beziehen. Vor allem die Anzahl der Produktionsalternativen (z. B. unterschiedliche Betriebsmittel) und der daraus folgenden Entscheidungswege sind eine wichtige Kenngröße für den Einsatz eines Selbststeuerungssystems. Auf diese Kenngröße nimmt vorrangig die Flexibilität der Betriebsmittel einen Einfluss. Sind bspw. mehrere unflexible Anlagen miteinander verkettet, ist das Verhandlungsergebnis der Agenten bereits vorbestimmt und die Verhandlung selbst somit obsolet. Um die Flexibilität des Produktionssystems im Rahmen der Fabrikplanung bestimmen zu können, wird ein erstes Layout der Produktion inklusive der verwendeten Maschinen und Anlagen verwendet. Darüber hinaus sollte die Varianz der Produkte bekannt sein, um die Entscheidungsalternativen aus Sicht der Betriebsmittel bestimmen zu können. Aus diesem Grund wird die Schnittstelle der Methodik zur Fabrikplanung in die Strukturplanung gelegt. In dieser Planungsphase werden die sogenannten Produktrepräsentanten und der daraus ableitbare Produktkorridor bestimmt (GRUNDIG 2015). Mithilfe dieses Korridors können die benötigten Fertigungsprozesse und korrespondierenden Betriebsmittel bestimmt und in einem ersten Layout angeordnet werden, sodass ein erstes Abbild der Produktion vorliegt. Hierbei gilt

5.3 Methode zur Eignungsprüfung von Selbststeuerungssystemen

es zu berücksichtigen, dass die ersten Planungsschritte der Fabrikplanung für unterschiedliche Szenarien durchgeführt werden (GRUNDIG 2015). Diese szenario-spezifische Betrachtung muss für eine Kopplung der Planungsprozesse in die Methodik und die Eignungsprüfung überführt werden.

Der Zweck, die Situation sowie die Wirkung, spezifiziert durch den verfügbaren In- und den angestrebten Output, werden zusammenfassend als Einsatzparameter bezeichnet, welche in Tabelle 5-2 dargestellt sind. Die folgenden drei Methoden werden analog beschrieben.

Tabelle 5-2: Einsatzparameter - Eignungsprüfung

Zweck	Entscheidung über den Einsatz eines Selbststeuerungssystems
Situation	Frühe Phase der Fabrikplanung, in welcher bereits ein erstes Abbild der Produktion vorliegt
Wirkung	
Verfügbarer Input	Ergebnisse der Vorbereitungsphase sowie Teilergebnisse der Strukturplanungsphase aus dem Fabrikplanungsprozess <ul style="list-style-type: none"> • Ziele der Produktion • Szenarien • Produktrepräsentanten • Anzahl und Ausprägung der benötigten Betriebsmittel • Ideallayout
Angestrebter Output	Eignungsgrad eines Selbststeuerungssystems, basierend auf: <ul style="list-style-type: none"> • Expertenmeinungen • Vernetzungsgrad der Produktion • Anzahl an Produktionsalternativen • Flexibilität der Betriebsmittel

5.3.2 Methode auswählen

Bestehende Verfahren zur Bestimmung des Autonomiegrades benötigen einen vollständigen Systementwurf sowie reelle oder prognostizierte Daten aus der Produktion, welche mit einem Referenzsystem verglichen werden (vgl. Abschnitt 3.1.1). Dieses Vorgehen ist im Rahmen der Fabrikplanung, vor allem im Hinblick auf die unterschiedlichen Szenarien, nicht praktikabel. Entsprechend liegen keine Verfahren, Vorgehensweisen bzw. Methoden vor, welche nach dem zweiten Schritt des MMM für eine Auswahl zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund entfällt der zweite Schritt des MMM für die erste Methode. Stattdessen wurden für die Generierung der neuen Methode Elemente der Szenario- und Fabrikplanung aus GAUSEMEIER & PLASS (2014) und GRUNDIG (2015) verwendet und in eine eigens erarbeitete Vorgehensweise eingebettet.

5.3.3 Methode generieren

Das erste Abbild der Produktion, welches zur Eignungsprüfung eines Selbststeuerungssystems benötigt wird, ist abhängig von den Zielen, den Stakeholdern sowie den daraus abgeleiteten Szenarien. Diese Informationen werden in der Vorbereitungsphase der Fabrikplanung definiert. Ihre Beschreibung kann sich, in Abhängigkeit des verwendeten Fabrikplanungsvorgehens sowie der unternehmensspezifischen Richtlinien und Arbeitsdokumente, unterscheiden. Um die Eindeutigkeit der Methode zur Eignungsprüfung zu gewährleisten, werden im ersten Schritt, welcher die methodische Schnittstelle zur Fabrikplanung darstellt, diese Dokumente auf ihre Vollständigkeit überprüft und ggf. neu erstellt. Zu diesem Zweck werden dem Fabrikplaner als Anwender der Methode verschiedene Werkzeuge zur Verfügung gestellt, welche in diesem ersten Schritt unterschiedlichen Formblättern und Tabellen gleichzusetzen sind. Die strukturiert dokumentierten Informationen bilden den Input für den zweiten Schritt, in welchem die Bedingungen zum Einsatz einer Selbststeuerung überprüft werden. Abschließend werden die Ergebnisse im Rahmen einer Nutzwertanalyse ausgewertet und eine Entscheidung abgeleitet. Die Verwendung eines qualitativen Bewertungsverfahrens vereinfacht und beschleunigt den Entscheidungsprozess. Das Vorgehen und die zur Verfügung gestellten unterstützenden Werkzeuge der Anforderungsanalyse sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Die folgende Erläuterung der Hauptschritte orientiert sich an einer Neuerstellung aller Dokumente.

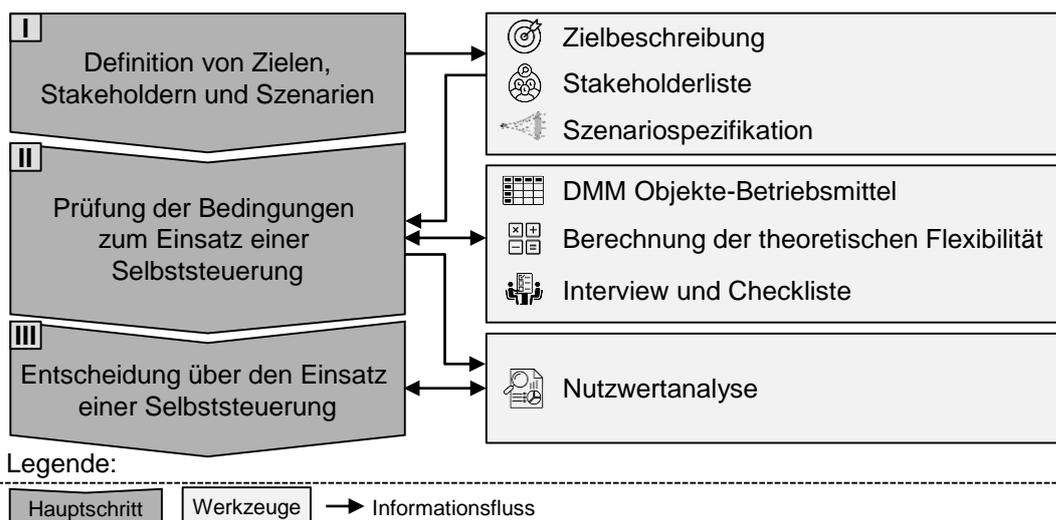


Abbildung 5-3: Vorgehensweise und Werkzeuge zur Eignungsprüfung

5.3.3.1 I: Definition von Zielen, Stakeholdern und Szenarien

Der erste Schritt der Methode ist einer Informationsakquisition gleichzusetzen, in welcher zunächst die Ziele der Produktion definiert werden. Die Zieldefinition besteht aus einem Anforderungsworkshop, in welchem durch alle Teilnehmer Ziele und Zielgrößen gesammelt und anschließend in der Gruppe vorgestellt werden. Anschließend werden diese Ziele in der Gruppe erweitert und aus der Sammlung ein Ähnlichkeitsdiagramm erstellt (vgl. Abbildung 5-4). Das Ähnlichkeitsdiagramm dient zur Gruppierung der einzelnen Ziele und vereinfacht die darauffolgende Definition smarterer Ziele, welche über die Attribute spezifisch, messbar, Priorität, realistisch und terminiert eindeutig und überprüfbar beschrieben sind. Für die Zielspezifikation liegt eine Excel-basierte Vorlage vor, welche neben leitenden Fragestellungen Beispielziele enthält, welche das Ausfüllen erleichtern.

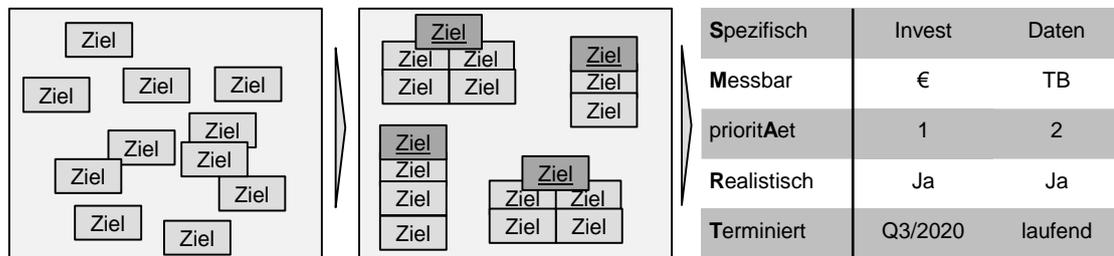


Abbildung 5-4: Dokumente der Zieldefinition - Sammlung (l.), Ähnlichkeitsdiagramm (m.), Zielspezifikation (r.)

Optional kann die Zielspezifikation mit der Stakeholderliste verknüpft werden, in welche die Verantwortlichen für verschiedene Planungsbereiche und ggf. für die definierten Ziele durch den Leiter des Fabrikplanungsprojekts eingetragen werden. Neben den Kontaktdaten werden für die internen wie auch externen Stakeholder Prioritäten vergeben, welche zu einer Gewichtung des Stimmrechts in Entscheidungsrunden nutzbar sind. Zu den internen Stakeholdern zählen Mitarbeiter, welche an dem Projekt beteiligt sind. Externe Stakeholder dienen maßgeblich zur Berücksichtigung der Kundensicht. Die Definition der Stakeholder dient der Reduktion der Planungskomplexität, indem die Verantwortlichkeiten zu Beginn klar definiert werden. Die internen Stakeholder sind in alle bereichsübergreifenden Entscheidungen vollständig eingebunden.

Aus den Zielen und weiteren Planungsdaten aus der Fabrikplanung wie potenzielle Produktspektren und potenzielle Absatzzahlen leitet das erweiterte Projektteam unterschiedliche Szenarien ab. Für die Entwicklung der Szenarien kann bspw. das Vorgehensmodell nach GAUSEMEIER & PLASS (2014) verwendet werden, welches aus den Schritten Szenarioanalyse, Szenariofeldanalyse, Projektionsentwicklung,

Szenariobildung und Szenariotransfer besteht. Für die folgenden Schritte der Methode ist jedoch nicht das Entwicklungsvorgehen, sondern die Spezifikation der Szenarien entscheidend, welche dem Anwender als Vorlage zur Verfügung gestellt wird (vgl. Abbildung 5-3). Die in Tabelle 5-3 dargestellte Liste gilt es in Schritt I der Eignungsprüfung abschließend auszufüllen. Um die Komplexität in der Szenariospezifikation zu reduzieren, werden ausschließlich die wichtigsten Elemente aufgeführt und nicht näher detailliert. Beispielsweise werden zu einem Produktrepräsentanten lediglich der Name, die Variantenanzahl und die prognostizierte Absatzmenge eingetragen. Die genaue Produktzusammensetzung aus einer Stückliste bzw. einem Gozintographen wird auf den Produktrepräsentanten verlinkt. Folglich setzt sich die Szenariospezifikation aus der Eintrittswahrscheinlichkeit, den verschiedenen Produkten, den Betriebsmitteln zur Fertigung der Produkte und der Anordnung dieser Betriebsmittel in einem Layout zusammen. Die Größe der Liste für eine teilautomatische Auswertung wird durch die Anzahl der unterschiedlichen Produktrepräsentanten und Betriebsmittel definiert.

Tabelle 5-3: Szenariospezifikation - Beispiel

Spezifikation	Szenario I	...	Szenario n
Eintrittswahrscheinlichkeit	0,4		0,3
Produktrepräsentant (PR)_I	Produkt_I		Produkt_I
Variantenanzahl PR_I	5		5
Absatz PR_I / Jahr	50.000		75.000
Produktrepräsentant_n	Produkt_n		Produkt_n
Variantenanzahl PR_n	8		12
Absatz PR_n / Jahr	60.000		12.500
Betriebsmittel_I	CNC-Fräsmaschine		CNC-Fräsmaschine
Anzahl Betriebsmittel_I	3		2
Betriebsmittel_n	Laseranlage		Pulverbeschichtung
Anzahl Betriebsmittel_n	1		1
Layout	<u>Layout_I</u>		<u>Layout_n</u>

Die Szenariospezifikation stellt eine Zusammenfassung der relevanten Informationen und eine Übersicht der unterschiedlichen Szenarien dar. In allen weiteren Schritten gilt es, stets den Bezug zum betrachteten Szenario zu wahren, um Verwechslungen auszuschließen. Darüber hinaus dient dieses Dokument zum Austausch mit der parallelen Fabrikplanung, in welchem Änderungen während des Planungsprozesses eingetragen werden, bspw. eine Erweiterung um einen Produktrepräsentanten oder eine Anpassung der Eintrittswahrscheinlichkeiten.

5.3.3.2 II: Prüfung der Bedingungen zum Einsatz einer Selbststeuerung

In diesem Schritt wird für jedes Szenario die Eignungsprüfung in einem zwei-stufigen Verfahren durchgeführt. Einer Untersuchung der Prüfkriterien auf Basis des SKM brachte keine kritischen Elemente mit einem hohen Vernetzungsgrad für die Entscheidung hervor. Die Kriterien beeinflussen folglich die Eignung einer Selbststeuerung, jedoch nicht sich gegenseitig. Daraus folgt, dass die Reihenfolge der entwickelten Eignungsprüfungen vertauschbar ist. In dieser Beschreibung wird zunächst die Berechnung der theoretischen Flexibilität verfolgt. Hierbei handelt es sich um einen selbst definierten Wert, welcher die Anzahl der möglichen Produktionsalternativen repräsentiert (KIEFER ET AL. 2019A). Zur Berechnung dieses Kennwerts ist eine detaillierte Produkt-Betriebsmittel-Matrix vonnöten. In der Strukturplanung werden solche Matrizen erstellt, um aus der qualitativen Kapazität die quantitative Kapazität der benötigten Betriebsmittel abzuleiten (GRUNDIG 2015). In diesen Matrizen, in der Literatur auch als Listen oder Graphen dargestellt und bezeichnet, sind den einzelnen Fertigungsstufen (vgl. Bearbeitungszustände, Tabelle 4-4) der Objekte Betriebsmittel (Maschinen und Anlagen) zugeordnet, welche ein Objekt in die nächste Stufe heben können. In der erstellten Vorlage, in welche durch den Anwender die Informationen aus Listen, Graphen oder anderen Matrizen zu kopieren sind, werden auf der linken Seite die unterschiedlichen Objekte einer Fabrik und deren Zustände dargestellt (vgl. Tabelle 5-4). Demzufolge wird jeder Fertigungszustand eines Objekts in einer separaten Zeile dargestellt. Auf diese Weise werden alle Bauteile und Zwischenerzeugnisse, die sich in der Fabrik befinden können, abgebildet. Den Bauteilen werden entsprechend jene Betriebsmittel zugeordnet, welche für die Weiterverarbeitung in Frage kommen.

Tabelle 5-4: DMM Objekte-Betriebsmittel - Beispiel

DMM Objekte Betriebsmittel	Betriebsm.1	Betriebsm.2	Betriebsm.3	Betriebsm.4	Betriebsm.5	$pp_{r,i}$
Objekt _{1,1}	X	X			X	3
Objekt _{1,2}			X			1
Objekt _{1,3}	X				X	2
Objekt _{2,1}			X	X	X	3
Objekt _{2,2}		X			X	2
$pb_{o,j}$	2	2	2	1	4	

Ein Kreuz „X“ in der Matrix bedeutet, dass ein Objekt von einem Betriebsmittel in seinen nächsten Fertigungszustand versetzt werden kann. Berechnet man die aus dem SKM bekannten Aktiv- und Passivsummen in der resultierenden DMM, sind diese mit der Anzahl der Produktionsalternativen aus Produkt- bzw. Betriebsmittelsicht gleichzusetzen. In dem dargestellten Beispiel kann Objekt 1.1 zwischen den Betriebsmitteln 1, 2 und 5 wählen. Betriebsmittel 1 kann wählen, ob es das Objekt 1.1 oder 1.3 fertigen möchte. Diese Betrachtung ist stark vereinfacht, um in einer frühen Phase eine Prognose treffen zu können. Folglich werden in diesem Schritt keine Restriktionen durch das Layout betrachtet. Randbedingungen, wie saisonale Produkte, die nicht zur gleichen Zeit gefertigt werden und die Alternativen aus Betriebsmittelsicht senken, werden ebenfalls nicht betrachtet. Darüber hinaus werden die Objekte und Betriebsmittelpaarungen einer Spalte bzw. einer Zeile als gleichwertig betrachtet. Zustandsdominanzen, Wahrscheinlichkeitsdominanzen, etc. aus der Entscheidungstheorie (vgl. LAUX 2007) werden nicht betrachtet. Ungeachtet dieser potenziellen Einschränkungen, welche in dieser Planungsphase maßgeblich noch nicht bestimmt werden können, ist es möglich, mit den berechneten Aktiv- und Passivsummen den Durchschnitt herstellbarer Teile und potenzieller Betriebsmittel zu bestimmen. Multipliziert man diese Werte, ergibt sich die definierte theoretische Flexibilität. Dieser Wert entspricht in Anlehnung an die Spieltheorie den möglichen Entscheidungen in einem System (BAMBERG ET AL. 2008), welche in diesem vereinfachten Fall alle als gleichwertig angesehen werden. In Fabriken mit vielen Betriebsmitteln ergeben sich folglich mehr Entscheidungsalternativen, welche für eine Selbststeuerung sprechen. Da die theoretische Flexibilität von der Größe der Produktion abhängig ist, wurde der Grenzwert zur Eignungsprüfung ebenfalls abhängig von der Größe der Produktion definiert. Als Vergleichswert hat sich die Anzahl der Betriebsmittel als nutzbarer Kennwert herausgestellt (vgl. Formel 1).

$$\Phi p p_b \cdot \Phi p b_o = F \geq \sum_{i=1}^n b_i \quad (1)$$

$p p_{r,i}$ = Anzahl herstellbarer Objekte durch Betriebsmittel i

$p b_{o,j}$ = Anzahl potenzieller Betriebsmittel für Objekt j

F = Theoretische Flexibilität

b_i = Betriebsmittel i

In Anlehnung an das in Tabelle 5-4 dargestellte Beispiel ergibt sich eine theoretische Flexibilität von $2.2 * 2.2 = 4.84$, welche kleiner der Anzahl an Betriebsmitteln

und folglich nicht für eine Selbststeuerung geeignet ist. Könnte nun in diesem Beispiel jedes Objekt von jedem Betriebsmittel bearbeitet werden, ergibt sich eine theoretische Flexibilität von 25 und eine Selbststeuerung wird befürwortet.

Diese Berechnung wird als erster Schritt zur Überprüfung der Bedingungen empfohlen, da er eine objektive Entscheidung ermöglicht und durch die vorliegenden Vorlagen zum Großteil automatisiert durchführbar ist. Dennoch sollte dieser Wert nicht das einzige Entscheidungskriterium für die Eignungsprüfung darstellen. Demzufolge werden weitere Kriterien in Form einer Checkliste und im Rahmen von Interviews mit den Stakeholdern überprüft. Je nach Teamaufteilung kann es sinnvoll sein, die Checkliste statt über Einzelinterviews in einem weiteren Workshop auszufüllen. Um die Checkliste in beiden Fällen einsetzen zu können, ist sie auf verschiedene Kategorien aufgeteilt, welche den Stakeholdern als Interviewpartner zugeordnet werden. In der Checkliste werden für jedes Szenario die Anforderungen überprüft, welche in ihren Kategorien wiederum in Pflicht- und Evaluationskriterien unterteilt sind. Werden Pflichtkriterien nicht erfüllt, wird die MAS für dieses Szenario nicht weiter betrachtet. Um die Kriterien in einer zielgerichteten Reihenfolge abzufragen, wurden diese in einer DSM gesammelt und auf Verbindungen zwischen den Kriterien untersucht. Aus der teiltriangularisierten Form dieser DSM (vgl. Tabelle 10-22) geht hervor, dass für die Eignungsprüfung kein iteratives Vorgehen notwendig ist. Beispielsweise kann der Einfluss der Nacharbeit in dieser frühen Planungsphase lediglich abgeschätzt werden, sodass die Prognosen der Absatzzahlen dadurch nicht anzupassen sind.

Die Checkliste ist in Tabelle 5-5 dargestellt und wird durch das Projektteam als Ganzes oder in einzelnen Interviews ausgefüllt. Da es sich um eine subjektive Bewertung der Kriterien handelt, müssen die Ergebnisse abschließend im Team diskutiert und freigegeben werden. Ziel dieser Checkliste ist es zu erarbeiten, wie hoch die Komplexität und Flexibilität des geplanten Produktionssystems und wie groß der resultierende Bedarf an einer reaktionsfähigen und situativen Produktionssteuerung ist. Darüber hinaus werden Kriterien abgefragt, die Rückschlüsse erlauben, welche Ausprägung eines Selbststeuerungssystems prävalent ist. Sind bspw. Objekte mit einer Nachweispflicht in der Produktion vorhanden und können nicht einem bestimmten Bereich zugeordnet werden, wird ein MASS aufgrund der fehlenden Eindeutigkeit für dieses Szenario nicht weiter betrachtet. Sobald die Checkliste für alle Szenarien ausgefüllt und abgestimmt ist, werden die Ergebnisse zur szenariospezifischen Bewertung des Eignungsgrades von MASS und IDSS verwendet und in Relation zu einem hierarchischen Ansatz gesetzt.

Tabelle 5-5: Checkliste zur Eignungsprüfung

Kriterium	Frage(n)	Wert
Nachweis	Gibt es Produkte/ Objekte mit einer Nachweispflicht, die eindeutig gekennzeichnet sein müssen?	[J/N]
	Können diese Objekte einem bestimmten Fabrikbereich zugeordnet werden?	[J/N]
Absatz	Wie groß sind die Absatzzahlen in Relation zur Menge der Betriebsmittel?	[1-10]
Varianten	Wie groß ist die Anzahl der Varianten in Relation zu den Absatzzahlen?	[1-10]
Haltbarkeit	Wie groß ist der Anteil an Objekten mit begrenzter Haltbarkeit?	[1-10]
Zukaufteile	Wie groß ist der Anteil an Zukaufteilen?	[1-10]
Fertigungstiefe	Wie groß ist die mittlere Fertigungstiefe?	[1-10]
	<i>Wie viele Prozessschritte werden im Mittel mit dem Objekt durchgeführt?</i>	
Flexibilität	Wie groß ist die mittlere Formatflexibilität der Betriebsmittel? <i>Gegenüberstellung Objekte-Betriebsmittel nutzen</i>	[1-10]
Minimale Losgröße	Wie groß ist der Anteil an Betriebsmitteln, welche eine minimale Losgröße besitzen?	[1-10]
	Wie groß ist der Anteil vorgegebener minimaler Losgrößen durch die Produktionsstrategie?	[1-10]
	Wie groß ist die mittlere minimale Losgröße in Relation zu den Absatzzahlen?	[1-10]
Redundanz	Wie groß ist der Anteil redundanter Betriebsmittel, welche die gleichen Fähigkeiten besitzen?	[1-10]
Parallelität	Wie groß ist der Anteil paralleler Produktionsstationen mit den gleichen Betriebsmitteln und Fähigkeiten?	[1-10]
Nacharbeit	Wie groß ist der Anteil an Nacharbeit?	[1-10]
Bestellungen	Wie groß sind die vorliegenden Bestellschwankungen?	[1-10]
	Wie groß ist der Anteil an Eilaufträgen?	[1-10]
Lieferzeit	Wie lang ist die Lieferzeit in Relation zur Durchlaufzeit?	[1-10]
Fertigungsprinzip	Wie eng ist der Kundenentkopplungspunkt mit der Produktionsplanung verknüpft?	[1-10]
	<i>Make to Stock, Make to assemble, etc.</i>	

5.3.3.3 III: Entscheidung über den Einsatz einer Selbststeuerung

Die Ergebnisse aus den Befragungen bzw. dem Anforderungsworkshop werden abschließend für eine Nutzwertanalyse verwendet, in welcher für jedes Szenario die eingetragenen Anforderungen in eine Bewertung überführt werden. Um eine Beeinflussung der Nutzwertanalyse durch persönliche Präferenzen zu minimieren, wird die szenariospezifische Bewertung der Steuerungsarchitekturen automatisch aus den Checklisten und der berechneten theoretischen Flexibilität abgeleitet. Die

automatische Bewertung basiert auf einer erweiterten DMM, in welcher die Kriterien der Checkliste jenen der Nutzwertanalyse gegenübergestellt wurden. Hierbei wurden positive Einflüsse mit dem Wert „1“ eingetragen, welcher einen vereinfachten proportionalen Zusammenhang darstellt. Umgekehrt proportionale Zusammenhänge sind durch den Wert „-1“ gekennzeichnet. Besteht kein Zusammenhang zwischen den Kriterien, ist die Zelle leer. Diese DMM wurde für MASS, IDSS und den hierarchischen Vergleichsansatz erstellt (vgl. Tabellen 8-22 bis 8-24). Neben direkten Zusammenhängen wurden zwei Axiome für die Erstellung der DMM verwendet.

Das erste Axiom bezieht sich auf die Anzahl der Bauteile und der Varianten. Ist eine Produktion auf sehr hohe Stückzahlen ausgerichtet und das Produktspektrum weist eine geringe Varianz auf, können die Vorteile einer Selbststeuerung nur bedingt genutzt werden, sodass diese Konstellation für den Einsatz einer konventionellen hierarchischen Steuerung spricht. Weist das Produktspektrum eine hohe Varianz, aber einen geringen kumulierten Absatz auf, spricht dies für eine ID-basierte Selbststeuerung. Der dargelegte Zusammenhang ist auf die tendenziell höheren Investitionskosten einer merkmalsbasierten Selbststeuerung zurückzuführen, welche durch hohe Absatzzahlen schneller amortisiert werden. Folglich eignet sich ein MASS besonders für eine variantenreiche Produktion mit hohen Absatzzahlen, welche auch als Mass Customization bezeichnet wird.

Die Eigenfertigungstiefe und die Anzahl an Zukaufteilen werden im zweiten Axiom verwendet, um die Ausprägung eines Selbststeuerungssystems zu bestimmen. Je höher die Eigenfertigungstiefe in einer Produktion ist, desto mehr Bearbeitungsprozesse und Zwischenerzeugnisse befinden sich in der Fabrik. Abgesehen von der Montage stellen die meisten Fertigungsprozesse einen Nachteil für den Einsatz einer ID dar, da diese beschädigt werden könnte. Für eine hohe Eigenfertigungstiefe ist eine merkmalsbasierte Selbststeuerung besser geeignet. Ist die Eigenfertigungstiefe geringer und der Anteil an Zukaufteilen, welche lediglich montiert werden, höher, ist der Einsatz von IDs zu bevorzugen.

Unter Anwendung dieser Axiome, weiteren direkten Zusammenhängen und einfachen Umrechnungsmethoden werden die Ergebnisse der Eignungsprüfungen auf die verschiedenen Kriterien der Nutzwertanalyse umgerechnet. Wird in der Checkliste das binäre Pflichtkriterium der Nachweispflicht negativ beantwortet, wird der Nutzwert eines MASS unabhängig von den Bewertungsgrößen auf null gesetzt. Die definierten Kriterien (vgl. Tabelle 5-6) sind so gestaltet, dass sie vollständig aus den Ergebnissen der Checkliste ableitbar sind. Die Kriterien 1 bis 4

5 Methodik zur Planung und Konfiguration von MASS

ergeben für ein MASS und ein IDSS stets die gleiche Bewertung, sodass diese sich auf die allgemeine Eignung eines Selbststeuerungssystems beziehen. Die Ausprägungen eines Selbststeuerungssystems werden folglich über ihren maßgeblichen Unterschied, die Identifikation, miteinander verglichen. Der hierarchische Vergleichsansatz, erhält hinsichtlich des nicht vorhandenen Identifikationsaufwands pauschal die Höchstwertung von zehn Punkten.

Tabelle 5-6: Nutzwertanalyse gleichgewichtet - Beispiel

	Kriterium	Szenario 1		
		MASS	IDSS	Hierarchisch
1	Beherrschung Systemkomplexität	9	9	5
2	Erforderliche Systemflexibilität	8	8	8
3	Erforderliche Reaktionsfähigkeit	7	7	2
4	Liefertreue	7	7	6
5	Identifikationsaufwand	7	4	10
	Nutzwert	38	35	31

Im Folgenden wird die Berechnung der Nutzwerte für MASS und IDSS erörtert, welche für die Kriterien 1 bis 4, wie beschrieben, identisch ist. Die Berechnung des Identifikationsaufwands wird folgend getrennt geschildert. Verschiedene Kriterien der Checkliste setzen sich aus mehreren Werten zusammen. In diesen Fällen wird zunächst der Mittelwert aus den einzelnen Befragungsergebnissen gebildet und dieser für die weitere Berechnung verwendet.

Die Beherrschung der Systemkomplexität setzt sich zu gleichen Anteilen aus den Werten der Flexibilität, der Redundanz, der Parallelität und der Produktvarianz zusammen. Demzufolge werden die Werte der vier Kriterien durch vier geteilt und addiert.

Die erforderliche Systemflexibilität wird durch die Werte der Nacharbeit, der Bestellschwankungen, des Fertigungsprinzips und dem Verhältnis der Produktvarianz zur Absatzprognose zu gleichen Anteilen bestimmt. Um das Verhältnis zu berechnen, wird der Wert der Absatzprognose von jedem der Varianz zunächst subtrahiert. Abhängig vom Vorzeichen wird der Wert mit zwei (positives Vorzeichen) oder ein Viertel (negatives Vorzeichen) multipliziert und anschließend der Betrag gebildet. Dieser Zwischenwert ist unabhängig vom Rechenergebnis wie alle anderen Werte auf die Menge der natürlichen Zahlen 1 bis 10 beschränkt. Sollte das Ergebnis der Berechnung den Wert 1 unterschreiten, wird entsprechend auf 1 aufgerundet und analog alle höheren Werte auf 10 abgerundet.

Um die erforderliche Reaktionsfähigkeit zu bestimmen, wird der Mittelwert der Produktvarianz, der Bestellungen, des Fertigungsprinzips und der Haltbarkeit (mal 2 - begrenzt auf 10) verwendet. Testinterviews zeigten, dass die Haltbarkeit von Produkten tendenziell stark unterschätzt wird. Liegt jedoch bereits ein geringer Anteil an Produkten mit begrenzter Haltbarkeit vor, hat sich in verschiedenen Anwendungen im Bereich der Lebensmittelindustrie gezeigt, dass sich die erforderliche Reaktionsfähigkeit sehr schnell erhöht. Aus diesem Grund wird der Wert dieses Kriteriums explizit verstärkt.

Einen Einfluss auf die Liefertreue nehmen die Lieferzeit, die Bestellungen und die invertierte minimale Losgröße. Im verwendeten Zahlenbereich von 1 bis 10 bedeutet invertiert, dass der Wert 1 zu einer 10 wird und umgekehrt.

Der Identifikationsaufwand für IDSS setzt sich aus dem invertierten Absatz, der invertierten Fertigungstiefe und der Anzahl an Zukaufteilen zusammen.

Um den Identifikationsaufwand eines MASS zu bestimmen, werden die Kriterien für ein IDSS jeweils invertiert und der Mittelwert berechnet.

Das Planungsteam besitzt prinzipiell die Möglichkeit, diese Werte zu überschreiben bzw. die Berechnungsregeln anzupassen. Eine unternehmensspezifische Beeinflussung des Nutzwerts ist über eine individuelle Gewichtung der Bewertungskriterien möglich. Über einen Paarweisen Vergleich (vgl. Abschnitt 10.3.4.4) der Kriterien ist es jedem Stakeholder möglich, diese anhand seiner individuellen Ziele zu gewichten und somit den Nutzwert zu beeinflussen. Unter Verwendung dieser Nutzwerte wird untersucht, für welche Szenarien die weitere Planung eines Selbststeuerungssystems sinnvoll ist. Unter Verwendung der Erwartungswerte der einzelnen Szenarien wird entschieden, ob auf ein Planungsverfahren für eine konventionelle PPS zurückgegriffen und die dargestellte methodische Vorgehensweise abgebrochen wird. Sofern nach dieser Untersuchung weiterhin ein Potenzial einer Selbststeuerung vorliegt, wird in Abhängigkeit der Nutzwerte mit der zweiten Methode (Eignung MASS) bzw. der vierten Methode (Eignung IDSS) fortgefahren.

5.4 Methode zur Definition identifizierbarer Merkmale

Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Methode werden nach einer erfolgreichen ersten Eignungsprüfung eines MASS die Merkmale der Objekte in einer zweiten Stufe überprüft, bevor das System geplant wird. Die Ergebnisse dieser Methode bilden bereits zentrale Parameter für ein künftiges MASS.

5.4.1 Methodeneinsatz klären

Das Ziel dieser Methode ist es, identifizierbare Merkmale zu definieren und anhand der hierbei gewonnenen Informationen ein MASS hinsichtlich des vorliegenden Produktspektrums auf seine Einsatzfähigkeit zu überprüfen und eine szenariospezifische Kostenprognose abzuleiten. Im Kontext eines MASS wird ein Merkmal als identifizierbar bezeichnet, wenn sich dessen objektspezifische Ausprägungen unterscheiden und diese Ausprägungen messbar sind. Neben dem Anwendungsbereich im Rahmen der Methodik ist diese Methode nutzbar, um bestehende IDSS zu untersuchen und die Wirtschaftlichkeit einer Weiterentwicklung zu einem MASS zu überprüfen. Mit dieser monetären Bewertung wird eine Investitionsentscheidung hinsichtlich eines Selbststeuerungssystems und dessen Ausprägung getroffen. Um diesen Output zu generieren, ist eine detaillierte Analyse aller Objekte und ihrer Merkmale notwendig. Die benötigten Informationen stammen aus der parallelen Fabrikplanung (z. B. Produktbeschreibungen). Die abschließende Kostenindikation (vgl. Tabelle 5-7) wird als methodische Schnittstelle verwendet, um über das weitere Vorgehen im Rahmen der Methodik zu entscheiden.

Tabelle 5-7: Einsatzparameter - Merkmalsdefinition

Zweck	Definition identifizierbarer Merkmale auf Basis einer Produktanalyse und parallele Eignungsprüfung eines MASS
Situation	(1) Phase der Fabrikplanung, in welcher ein erstes Abbild der Produktion und eine prinzipielle Eignung eines MASS vorliegt (2) ID-basierte Selbststeuerung im Betrieb
Wirkung	
Verfügbarer Input	Produktrepräsentanten und deren Merkmale <ul style="list-style-type: none">• Produktbeschreibungen• Auftragsbezogene Produktinformationen
Angestrebter Output	Identifizierbare Merkmale inkl. Identifikationssysteme und eine finale Entscheidung über den Einsatz eines MASS, basierend auf: <ul style="list-style-type: none">• Merkmalspezifikationen• Vorauswahl an Identifikationssystemen• Kostenindikation

5.4.2 Methode auswählen

Aus der Analyse des Stands der Wissenschaft und Technik gingen keine methodischen Vorgehensweisen zur Definition identifizierbarer Merkmale hervor, sodass dieser Teil der Methode neu zu entwickeln ist. Bestandteil der Definition ist zudem die Auswahl potenzieller Sensoren, welche den Identifikationssystemen gleichgesetzt sind. Hierfür liegen verschiedene Vorgehensweisen vor, welche iterativ auf die einzelnen Merkmale anwendbar sind, um anschließend die benötigte Menge an Sensoren auszuwählen. Um eine adaptierbare Methode für den Schritt der Sensorauswahl auszuwählen, wurden die definierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1) in einem Paarweisen Vergleich gegenübergestellt und gewichtet (vgl. Tabelle 10-26). Neben den spezifischen Anforderungen *SAM1* und 2 wurden die Anforderungen *AM3* bis 7 für die Evaluation bestehender Methoden verwendet. Die Anforderungen *AM1* und 2 beziehen sich auf das Zusammenspiel der Methoden und die Methodik im Gesamten und werden daher nicht als Evaluationskriterien für einzelne Methoden im Rahmen des MMM verwendet. In Tabelle 5-8 ist die Bewertung der Methoden dargestellt. Hierbei wurde das Verfahren nach VDMA (2018) ausgewählt, da dieses mit einem Nutzwert von 15 die höchste Eignung für den Anwendungsfall besitzt. Ausschlaggebend für die Auswahl war die Unterteilung der Entscheidungsfindung in viele kleine und einfache Fragestellungen, welche ein großes Potenzial für eine automatisierte Entscheidungsfindung und Auswertung besitzen. Dieses Vorgehen wurde in den zweiten Schritt der folgenden Methode integriert und um Werkzeuge zur automatischen Auswahl erweitert.

Tabelle 5-8: *Bewertung und Nutzwerte von Methoden zur Sensorauswahl*

Kriterium	Prio	(BERNSTEIN 2014)	(VDMA 2018)	(GRAF 2018)	(GROTE 2016)
Mehrstufige Auswahl	3	1	1	1	1
Komplexität	3	0	1	0	0
Skalier- und Adaptierbarkeit	3	1	1	-1	-1
Genauigkeit und Eindeutigkeit	2	1	1	0	-1
Benutzerfreundlichkeit	2	1	1	0	0
Variabilität und Wiederverwendbarkeit	1	1	1	1	0
Vollständigkeit	1	1	1	1	0
Nutzwert		12	<u>15</u>	2	-2

5.4.3 Methode anpassen und generieren

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Anforderungen und aufbauend auf der Methode nach VDMA (2018) wurden die Vorgehensweise sowie die passenden Werkzeuge erarbeitet (vgl. Abbildung 5-5). Den Fokus der dreistufigen Methode bildet der zweite Schritt, welcher in die Merkmalsanalyse und die Sensorauswahl unterteilt ist. Hierbei werden verschiedene Werkzeuge aus der Fabrikplanung, z. B. Gozintographen, verwendet, welche zur besseren Verständlichkeit im Anhang beschrieben sind (vgl. Abschnitt 10.3.5). Die Kapitalwertmethode, welche im letzten Schritt der Methode eingesetzt wird, ist ebenfalls zur Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit in Abschnitt 10.3.4.2 beschrieben.

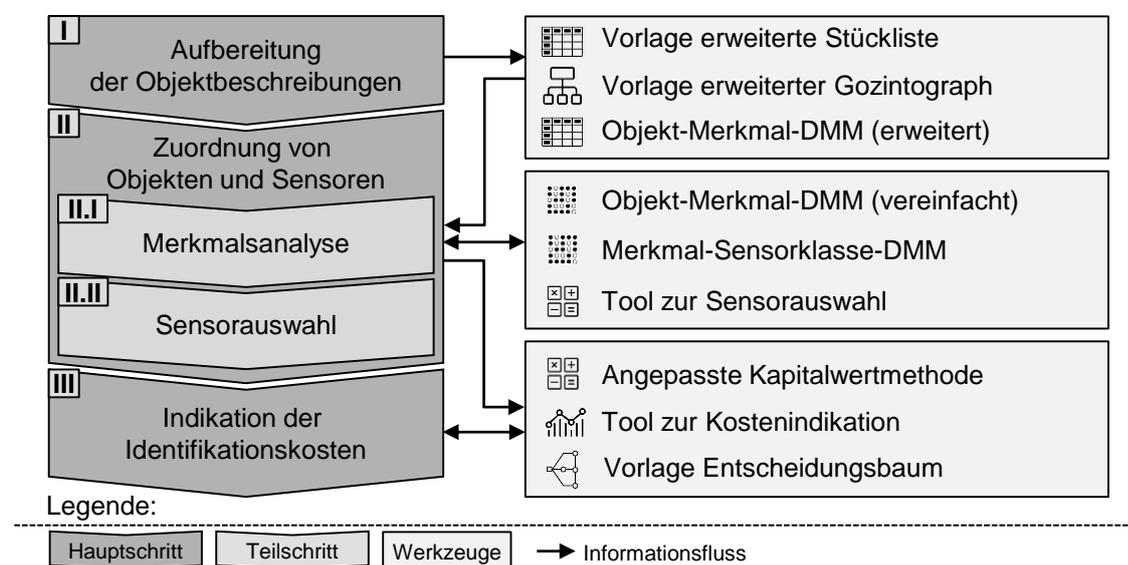


Abbildung 5-5: Vorgehensweise und Werkzeuge der Merkmalsdefinition

5.4.3.1 I: Aufbereitung der Objektbeschreibungen

Dieser Schritt dient zur Überprüfung der benötigten Produktinformationen, welche für jedes Objekt und jeden seiner Zustände vorliegen müssen, und stellt eine methodische Schnittstelle zur Fabrikplanung dar. Die Aufteilung der einzelnen Bauteile in ihre zustandsabhängigen Halbzeuge erfolgt bereits in der ersten Methode und muss im Fall einer Weiterentwicklung eines IDSS nachgeholt werden. Hierbei sind die Informationen in einem PLM-System vorhanden oder können bspw. aus der Arbeitsvorbereitung gewonnen werden. Der Unterschied der Erweiterung der Produktinformationen in der Eignungsprüfung und der Merkmalsdefinition ist am Beispiel eines Gozintographen in Abbildung 5-6 dargestellt.

5.4 Methode zur Definition identifizierbarer Merkmale

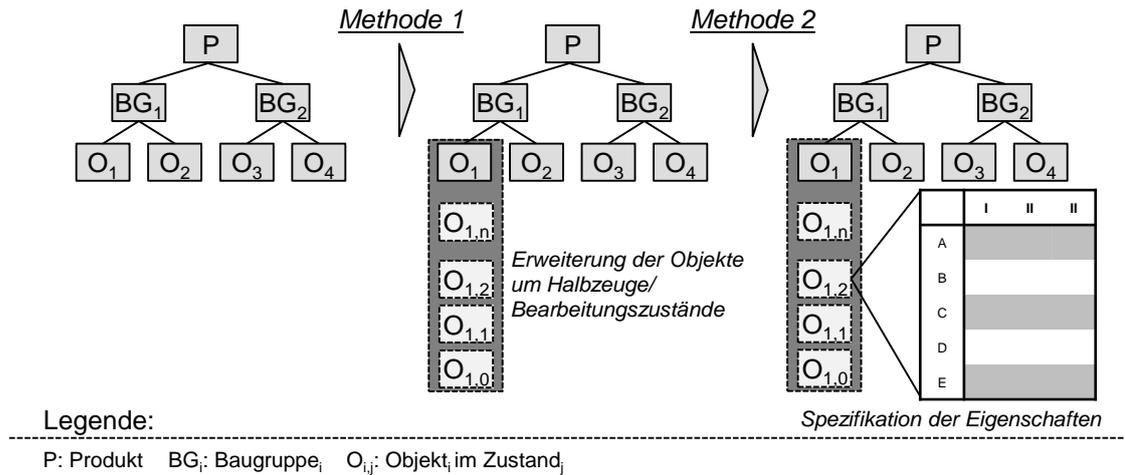


Abbildung 5-6: Konkretisierung der Objekteigenschaften - Beispiel

Im ersten Schritt steht die Information im Vordergrund wie viele Halbzeuge existieren und welche Betriebsmittel eine Zustandsänderung des Objekts bewirken können. Im zweiten Schritt gilt es, diese Halbzeuge im Hinblick auf ihre Merkmale zu konkretisieren, um deren zustandsabhängige Instanzen (Eigenschaften) miteinander vergleichen zu können. Für diesen Schritt wird die in Tabelle 4-4 dargestellte Struktur des Objektagenten verwendet, in welcher jede Spalte einen Zustand des Objekts darstellt. In diesem Schritt werden zudem potenzielle Merkmale durch die Analyse der geplanten Fertigungsschritte abgeleitet. Aus den Beschreibungen der Fertigungsprozesse ist es möglich, die Zustandsänderungen direkt abzuleiten. Werden bspw. in eine Platte (40x60x5 mm) vier Löcher mit einem Durchmesser von 8 mm gebohrt (zentrisches Bohrmuster 30x50 mm), sind aus diesem Prozessschritt vier zusätzliche Merkmale bzw. ein Merkmalsverbund ableitbar. Die resultierenden Merkmale werden in die Spalte des jeweiligen Objektzustands eingetragen und für die Merkmalsanalyse hinzugezogen. Um aus diesen erweiterten Objektbeschreibungen und Stücklisten eine auswertbare Matrix zu generieren, werden die Spalten transponiert und die Bearbeitungsparameter sowie Griffpunkte entfernt. Dadurch entsteht eine erweiterte DMM, welche Objekte bzw. Objektzustände und Merkmale gegenüberstellt (vgl. Tabelle 5-9). Die Spalten der Matrix wurden in Anlehnung an die definierten grundsätzlich nutzbaren Merkmale (vgl. Tabelle 4-1) erstellt. Zur Übersichtlichkeit ist die weitere Unterteilung der jeweiligen Spalten in die einzelnen Messgrößen und Zusatzinformationen der Merkmale nicht dargestellt. Diese Informationen werden zusammen in ein Feld der Liste eingetragen. Dies gilt ebenso für mehrfach vorliegende Merkmale wie bspw. mehrere Bohrmuster. Hierbei wird nicht die Anzahl der Spalten, sondern der Eintrag in der Liste mit einem Trennzeichen erweitert.

Auf diese Weise besitzt die Beschreibung stets eine definierte Spaltenanzahl, welche eine automatische Auswertung ermöglicht und die Benutzerfreundlichkeit erhöht. Die Merkmalsliste ist jederzeit erweiterbar, falls nicht aufgeführte Merkmale durch neue Sensoren messbar werden.

Tabelle 5-9: Objekt-Merkmal-DMM – Beispiel für ein Objekt

Objekt ₁	Werkstoff	Gewicht	Farbe	Länge	Breite	Höhe	Nut	Bohrung	Gewinde	Fase	Schlitz	Ausschnitt	Absatz/ Bund	Sicke	Oberfläche
Objekt _{1.1}	Al	8	X	7	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	R _a 8
Objekt _{1.2}	Al	5	X	5	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	R _a 8
Objekt _{1.3}	Al	4	X	5	5	4	0	4	0	0	0	0	0	0	R _a 3

5.4.3.2 II: Zuordnung von Objekten und Sensoren

Liegen alle Produktinformationen vor, werden die Merkmale aller Objekte miteinander verglichen, um diese auf ihre Identifizierbarkeit zu prüfen. Hierbei sind die unterschiedlichen Merkmalsausprägungen und die Messbarkeit entscheidend. Die vordefinierten Merkmale sind alle messbar, sofern ein Sollwert vorliegt. Um die „Gleichheit“ von Soll- und Realwert zu prüfen, ist der Geltungsbereich zu definieren. Dieser kann nicht allgemein definiert werden, sondern ist in Abhängigkeit der Objekte zu bestimmen. Hierzu wird die Varianz der Merkmalsausprägungen und somit der Messbereich im Rahmen der Sensorauswahl bestimmt.

II.1 - Merkmalsanalyse: Unter Verwendung der erweiterten Objekt-Merkmal-DMM werden verschiedene Kennwerte zur Bestimmung potenzieller Merkmale verwendet. Im ersten Schritt wird für jedes Merkmal das Verhältnis der eindeutigen Ausprägungen zur Gesamtanzahl der Ausprägungen berechnet, folgend als Erkennungsverhältnis (EV) bezeichnet. Zu diesem Zweck wurde ein Excel-basiertes Analysetool erstellt, dessen Funktionsweise in Abschnitt 6.1 erläutert wird. Wenn das EV für ein Merkmal genau den Wert 1 beträgt, besitzt jedes Objekt zu diesem Merkmal eine eindeutige Ausprägung und es werden keine weiteren Merkmale für die Identifikation benötigt. Damit gilt auch: Je höher der Wert des EV, desto besser ist das Merkmal für die Identifikation geeignet. Weisen bspw. alle Merkmale ein EV von 0 auf, sollte ein frühzeitiger Abbruch in Betracht gezogen werden. In diesem Fall gestaltet sich die merkmalsbasierte Identifikation sehr komplex, da jedes Objekt maximal über eine Merkmalskombination

5.4 Methode zur Definition identifizierbarer Merkmale

identifizierbar ist. Folglich wäre ein MASS für das Produktspektrum nicht geeignet. Ein definitiver Abbruch erfolgt, wenn zwei Objektklassen grundsätzlich nicht voneinander zu unterscheiden sind. Liegt eine Gleichheit von zwei Objekten vor, wird überprüft, ob dies auf eine fälschliche Dopplung zurückzuführen ist oder tatsächlich ein nicht erfassbarer Unterschied vorliegt. Diesen Plausibilitätscheck gilt es durchzuführen, bevor der Algorithmus zur Bestimmung der benötigten Merkmalsmenge angewandt wird.

Der Algorithmus des Analysetools filtert Schritt für Schritt Objekte, welche über ein einziges Merkmal erkennbar sind, bis sich für die Restmenge der Objekte ein Merkmal mit einem EV* von 1 ergibt (vgl. Abbildung 5-7, oxm-Matrizen). Im dargestellten Beispiel wird deutlich, dass für die Identifikation der Objekte 1, 3 und 5 deren Höhe ausreicht. Für die Objekte 2 und 4 müssen die Höhe und die Breite gemessen werden, um über diese Merkmalskombination die Objekte zu identifizieren. Neben der notwendigen Anzahl der Merkmale geht aus dieser Untersuchung der Geltungsbereich der Merkmale hervor. Im dargestellten Beispiel wird bspw. für die Breite ein Wertebereich von zwei bis drei Längeneinheiten abgeleitet, welcher zur Bestimmung des Messbereichs und der Sensorauswahl verwendet wird.

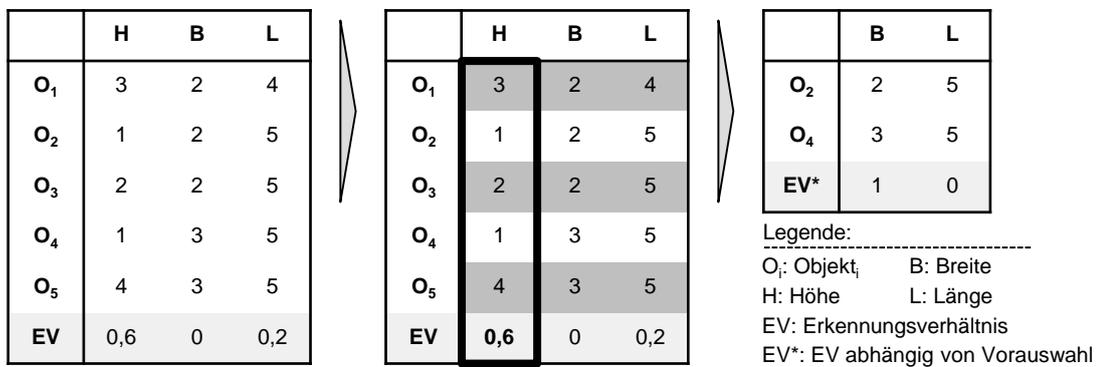


Abbildung 5-7: Vorgehen zur Merkmalsbestimmung - Beispiel

II.II - Sensorauswahl: In diesem Schritt werden zunächst die benötigten Klassen von Sensoren bestimmt. Hierzu wird die erweiterte Objekt-Merkmal-DMM mithilfe der identifizierbaren Merkmale vereinfacht, indem die für ein Objekt relevanten Merkmale mit dem Wert 1 gekennzeichnet werden. Die übrigen Zellen werden mit dem Wert 0 befüllt. Auf diese Weise ergibt sich eine oxm-Matrix mit binären Einträgen. Als Hilfsmittel für die automatisierte Auswahl wurde eine Merkmal-Sensorklasse-DMM (mxs) erarbeitet, in welcher jedem Merkmal geeignete Sensorklassen zugeordnet sind (vgl. Tabelle 10-27). Da die Menge der betrachteten Merkmale fest definiert ist, entspricht die Spaltenanzahl der Objekt-

5 Methodik zur Planung und Konfiguration von MASS

Merkmal-DMM der Zeilenanzahl der erarbeiteten Merkmal-Sensorklasse-DMM, sodass diese miteinander multipliziert werden können. Als Ergebnis entsteht eine oxs-Matrix, welche den Objekten Sensorklassen zur Identifikation zuordnet. Der Eintrag in der Matrix gibt Auskunft, wie viele der relevanten Merkmale durch den jeweiligen Sensor messbar sind (vgl. Abbildung 5-8). Durch den Aufbau ist diese Zuordnung unabhängig von der Objektanzahl und somit vollständig skalierbar. Zudem ist die Menge der betrachteten Sensoren einfach erweiter- bzw. austauschbar, sodass der Anwender ebenso spezifische präferierte Sensoren verwenden kann, sofern vorab eine Zuordnung zu den Merkmalen erfolgt.

	M₁	M₂	M₃			S₁	S₂	S₃	S₄			S₁	S₂	S₃	S₄
O₁	1	0	0		M₁	1	0	0	1		O₁	1	0	0	1
O₂	1	1	0	X	M₂	0	1	0	1	=	O₂	1	1	0	2
O₃	1	0	0		M₃	0	1	1	1		O₃	1	0	0	1
O₄	1	1	0								O₄	1	1	0	2
O₅	1	0	0								O₅	1	0	0	1

Legende:

O_i: Objekt_i M_j: Merkmal_j S_k: Sensor_k

Abbildung 5-8: Zuordnung von Objekten zu Sensoren - Matrizenmultiplikation

Über die grundsätzliche Eignung hinaus müssen Sensoren mehrere Kriterien erfüllen, um im industriellen Umfeld Einsatz zu finden. Zur Überprüfung dieser Kriterien wird das adaptierte Vorgehen nach VDMA (2018) eingesetzt. Die erste Leitfrage der Vorgehensweise ist durch den Anwendungsfall der Identifikation bereits beantwortet. Die zweite Leitfrage wird durch die matrixbasierte Vorauswahl teilweise beantwortet. Ausstehend ist die Verwertung der abgeleiteten Messbereiche, welche zusammen mit den Leitfragen drei bis sechs der Vorgehensweise in eine multikriterielle Bewertung der Sensoren einfließen. In dieser Bewertung werden die Anforderungen an Sensorsysteme mit einer Sensordatenbank verglichen. Die Kriterien aus der leitfragenbasierten Untersuchung wurden mit weiteren Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Sensorsystemen kombiniert und bezüglich ihrer Relevanz auf den Anwendungsfall über einen Paarweisen Vergleich gewichtet. Darüber hinaus wurden die Kriterien in die Kategorien Einsatzfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Prozessintegrationsfähigkeit eingeteilt (vgl. Tabelle 10-29).

Zu den Kriterien der Einsatzfähigkeit zählt die zerstörungsfreie Prüfung, welche gleichzeitig als Anforderung an die Methode gilt. Die Genauigkeit gibt die Abweichung des Messergebnisses vom physikalisch absoluten Wert an. Aus dieser

Abweichung ist die Toleranz des Sensors ableitbar, welche den kleinsten messbaren Abstand zweier Werte angibt. Mit diesem Wert eng verbunden ist der Messbereich, der erfassbar ist. Der Zusammenhang von Genauigkeit und Messbereich wird an den unterschiedlichen Ausprägungen von Waagen deutlich. Während Präzisionswaagen in der Regel einen Messbereich von 0 bis 1000 g mit einer Werteausgabe bis zur vierten Nachkommastelle besitzen, geben Schwerlastwaagen eine bis keine Nachkommastelle an, können aber Werte von einem Kilogramm bis mehrere Tonnen messen. Das letzte Kriterium der Einsatzfähigkeit ist die Sensorreichweite, welche die maximale und minimale Entfernung zwischen Sensor und Objekt angibt.

Zu den Kriterien der Wirtschaftlichkeit zählen neben den Kosten weitere Kriterien, welche sich indirekt auf die Kosten auswirken. Besitzt z. B. ein Sensor eine geringe Zuverlässigkeit, welche prozentual die Wahrscheinlichkeit beschreibt, zu einem bestimmten Zeitpunkt die Anforderungen der Messaufgabe zu erfüllen, kann dies zu Verzögerungen in der Produktion führen, welche die Kosten erhöhen. Die Störanfälligkeit charakterisiert die Unabhängigkeit des Sensors von Störeinflüssen wie bspw. Vibrationen. Die Zeit zur Erfassung und Auswertung des Messwerts wird als Messdauer bezeichnet. In Relation zur Messdauer steht die Abtastrate, welche die Frequenz der aufeinanderfolgenden Messungen angibt. Der Kalibrieraufwand bezeichnet den Aufwand zur Einstellung und Ausrichtung des Sensorsystems und die damit verbundenen Kosten vor und während der Verwendung. Die Kosten des Sensorsystems bezeichnen die gesamten Kosten der einzelnen Sensorelemente einschließlich der Integration, Installation und Inbetriebnahme.

Die dritte Kategorie bildet die Prozessintegrationsfähigkeit, welche sich auf die Integration der Sensorsysteme in den Handhabungsprozess bezieht. Das Auswertesystem oder allgemein die Peripherie betrachtet die Kompatibilität des Sensors in Relation zu den eingesetzten Steuerungen. Dazu zählt auch die separat aufgeführte Art der Schnittstelle, welche den Datenaustausch zwischen Sensor und Steuerung ermöglicht. Die Umgebungsbedingungen beschreiben den Einfluss von Umwelteinflüssen wie bspw. der Sonneneinstrahlung. Die Schutzklassifizierung nach DIN EN 60529 enthält Gestaltungsvorschriften, welche verschiedene Kombinationen von Umwelteinflüssen und Schutzmaßnahmen umfassen. Die Befestigungsmöglichkeit des Sensors kann durch den Handhabungsprozess und die Sensorreichweite vorgegeben sein. Andernfalls ist diese aus dem Bauraum und dem Gewicht des Sensorsystems abzuleiten, welche ebenfalls separat aufgeführt sind.

Die Grenzwerte der einzelnen Kriterien (z. B. mindestens Schutzklasse IP 58) werden durch den Anwender in ein unterstützendes Werkzeug zur Sensorauswahl eingegeben. Anschließend erfolgt automatisch ein Werteabgleich mit einer Sensordatenbank, deren Aufbau einer Tabelle entspricht, die Sensoren und Kriterien gegenüberstellt. Die verbleibenden Sensoren werden mithilfe einer Nutzwertanalyse bewertet, um eine finale Menge an Sensoren auszuwählen.

5.4.3.3 III: Indikation der Identifikationskosten

Der abschließende Schritt dient der monetären Bewertung der einzelnen Szenarien, aus welcher eine finale Entscheidung getroffen wird, ob ein MASS aus wirtschaftlicher Sicht einsetzbar ist. Nachdem die benötigten Sensorsysteme zur Identifikation der Objekte bestimmt wurden, gilt es nun, die benötigte Quantität dieser Systeme zu bestimmen. Hierzu werden neben den Absatzzahlen der Produkte und der Messdauer der ausgewählten Sensoren die Anzahl der Handhabungssysteme inkl. der Anzahl der Tool-Center-Points und der Übergabestellen verwendet. Aus der Anzahl und der Ausprägung der Sensoren wird die benötigte Peripherie bestimmt und auf dieser Basis die gesamten Kosten zur Beschaffung und Kalibrierung der Sensoren abgeleitet. Anschließend gilt es, die Kosten für die Inbetriebnahme quantitativ zu bestimmen. Dies kann über eine Kostenabschätzung basierend auf der vorangegangenen qualitativen Bewertung der Sensoren erfolgen. Alternativ besteht die Möglichkeit bei verschiedenen Systemintegratoren und Dienstleistern Angebote einzuholen und diese in die Kostenaufstellung einfließen zu lassen. Analog werden die Investitionskosten für ein indirektes Identifikationssystem bestimmt. Die Planung und Konfiguration eines direkten Systems ist nicht Bestandteil der Methode. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung z. B. FINKENZELLER (2015), welche die Auswahl eines geeigneten Identifikators und den korrespondierenden Lesegeräten anhand unterschiedlicher Kriterien (vgl. z. B. Tabelle 2-2) unterstützen. Für die indirekte Identifikation wird darauf hingewiesen, dass mindestens eine zusätzliche Station in das Layout eingeplant werden muss, in welcher die Objekte mit einer ID versehen werden.

Die Betriebskosten der indirekten und direkten Identifikation unterscheiden sich in ihrer Mengenabhängigkeit. Die merkmalsbasierten, direkten Systeme besitzen keine mengenabhängigen Kosten, sodass sich die Betriebskosten auf Kalibrier- und Wartungskosten sowie den Energieverbrauch der Sensoren reduzieren. Die Betriebskosten eines indirekten Systems setzen sich aus den Wartungskosten und dem Energieverbrauch der Lesegeräte und den Kosten für die Identifikatoren

zusammen. Je nach Kaufvertrag werden die Betriebskosten beider Ansätze durch Lizenzkosten für Softwaretools weiter erhöht.

Die Kosten für die ID, welche an jedem Objekt anzubringen sind, sind direkt vom Absatz der Produkte abhängig. Durch die mengenabhängigen Kosten, deren kumulierter Anteil über die Zeit stetig steigt, ist für die Kostenindikation, aus der eine Investitionsentscheidung abzuleiten ist, nur ein dynamisches Investitionsrechnungsverfahren anwendbar (DÄUMLER & GRABE 2007). Unter den dynamischen Verfahren hat sich im industriellen Umfeld die Kapitalwertmethode durchgesetzt (DILLERUP & ALBRECHT 2005). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kapitalwertmethode ausgewählt und im Hinblick auf die Anforderungen an die Methode vereinfacht, um die Komplexität zu reduzieren. Der Anwender kann an dieser Stelle wählen, ob er die vereinfachte Kapitalwertmethode nutzt oder unter Erhebung aller notwendigen Daten die Kapitalwertmethode vollumfänglich durchführt. Eine Beschreibung der Methode und die zugehörige Formel befindet sich im Anhang der Arbeit (vgl. Abschnitt 10.3.4.2).

Im Kontext dieser Arbeit werden die eingehenden Zahlungsströme jeder Periode mit den Erlösen bzw. Einsparungen in der Produktion durch den Einsatz einer Selbststeuerung in Anlehnung an SCHMITZ (1994) und EICHHORN (2012) gleichgesetzt. Analog werden die ausgehenden Zahlungsströme als Betriebskosten angesehen. Für die Vereinfachung der Methode wurden vier Annahmen getroffen:

Annahme I: Der identifikationsunabhängige Investitionskostenanteil der merkmals- und der ID-basierten Selbststeuerungssysteme ist identisch.

Annahme II: Die Einsparungen durch die Selbststeuerung bleiben konstant und sind für merkmals- wie auch ID-basierte Systeme identisch. Im Rahmen einer detaillierten Anwendung wird darauf hingewiesen, dass die Einsparungen in einem merkmalsbasierten System durch die integrierte Qualitätskontrolle höher anzusetzen sind. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die Komplexität in einer Produktion über die Jahre hinweg bspw. durch neue Varianten zunimmt. Entsprechend ist von ansteigenden Einsparungen auszugehen.

Annahme III: Die Betriebskosten beider Systeme bleiben konstant. In Bezug auf die detaillierte Anwendung ergeben sich in diesem Punkt vielfältige Erweiterungsmöglichkeiten. In erster Linie wirken sich zunehmende oder abnehmende Absatzzahlen direkt auf die Betriebskosten eines IDSS aus. Im Hinblick auf ein MASS könnten die in der Sensordatenbank enthaltenen Lebensdauern der Sensoren direkt in die Kapitalwertmethode mit einfließen, um Anschlussinvestitionen abzubilden.

5 Methodik zur Planung und Konfiguration von MASS

Aus dieser inversen Betrachtung ergibt sich die Nebenannahme, dass die Lebensdauer der Investitionsgüter größer als der Betrachtungszeitraum ist.

Annahme IV: Es wird eine lineare Abschreibungsmethode angewandt, sodass die Abschreibung im Betrachtungszeitraum ebenfalls konstant bleibt.

Eine Substitution der Namensgebung einzelner Parameter in Verbindung mit den getroffenen Annahmen und dem Distributivgesetz ergibt Formel (2). Diese Formel kann unter Abschätzung der Einsparungen genutzt werden, um die Kapitalwerte der Ansätze zu vergleichen. Um die minimalen Einsparungen zu berechnen, wird der Termin gleich 0 gesetzt und umgeformt, sodass sich Formel (3) ergibt.

$$KW = -I_0 + [E - K - s(E - K - AfA)] \sum_{t=1}^T \frac{1}{[1 + i(1 - s)]^t} \quad (2)$$

$$\frac{\frac{I_0}{1} + K(1 - s) + sAfA}{\frac{\sum_{t=1}^T \frac{1}{[1 + i(1 - s)]^t}}{(1 - s)}} \leq E \quad (3)$$

KW: Kapitalwert

E_t, K_t: Einsparungen und Betriebskosten

AfA_t: Steuerliche Abschreibung

I₀: Investitionssumme

T: Betrachtungszeitraum

t: Laufvariable für die Anzahl der Perioden

i: Kalkulationszinsfuß

s: Steuersatz

Mit dieser Formel können die minimalen Einsparungen (E_{\min}) berechnet werden, die sich durch den Einsatz der Selbststeuerung ergeben müssen. Dieser Wert sollte durch den Anwender auf seine Plausibilität überprüft werden, bevor weitere Planungsschritte eingeleitet werden. Sollte E_{\min} nicht realistisch sein, wird die Planung eines Selbststeuerungssystems in diesem Schritt abgebrochen und eine konventionelle Produktionssteuerung eingeplant. Um die minimalen Einsparungen zu berechnen und die Ansätze miteinander zu vergleichen, müssen die Investitionssumme und die Betriebskosten der Ansätze bestimmt werden. Abschließend wird länderspezifisch der Steuersatz eingetragen und unternehmensspezifisch der Kalkulationszinsfuß eingetragen. Die Ergebnisse werden zudem graphisch dargestellt, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen (vgl. Abbildung 5-9).

5.4 Methode zur Definition identifizierbarer Merkmale

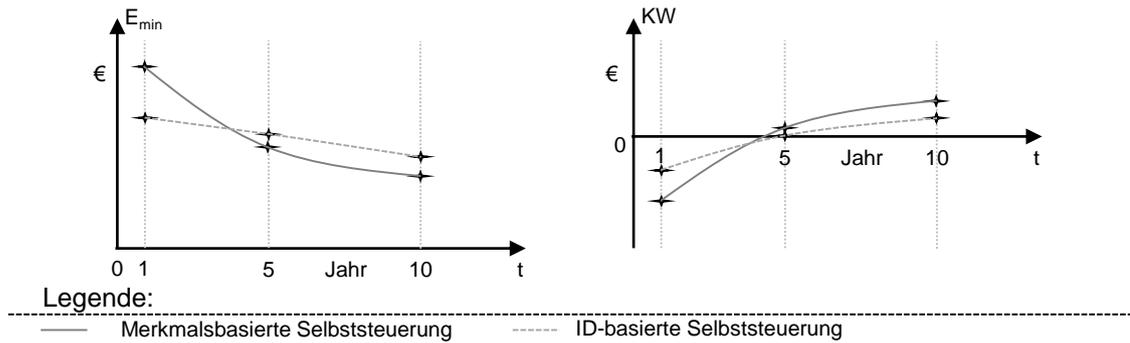


Abbildung 5-9: Ausgabe der investitionsorientierten Kostenindikation

Wichtig ist, dass die minimalen zu erzielenden Einsparungen szenariospezifisch zu bestimmen sind, sofern sich die parallel laufende Fabrikplanung noch nicht auf ein bestimmtes Szenario für die Planung festgelegt hat. In diesem Fall werden die Szenarien mit ihren Erwartungswerten und den berechneten Kapitalwerten in einer Baumstruktur ähnlich der Entscheidungstheorie angeordnet (vgl. Abbildung 5-10) und auf diese Weise ein szenariounabhängiger geglätteter Gesamtkapitalwert berechnet, welcher ein erneutes Feedback über die Eignung der Selbststeuerung im Hinblick auf die vorliegende Fabrikplanung gibt (LAUX 2007, BAMBERG ET AL. 2008). Auf diese Weise können die Entwicklungen der parallelen Planung stetig abgeglichen werden, um die Transparenz und Planungssicherheit zu erhöhen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, aus diesem Diagramm ein Szenario für die weitere Entwicklung zu fokussieren.

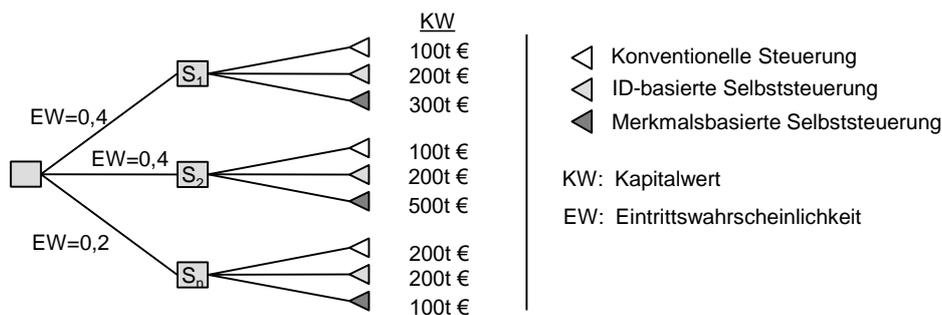


Abbildung 5-10: Entscheidungsbaum - Beispiel

In den beiden folgenden Methoden wird jeweils ein ausgewähltes Szenario betrachtet. Sofern sich das Projektteam nicht auf ein Szenario festlegt, gilt es, die folgenden Schritte entsprechend mehrmals durchzuführen.

5.5 Methode zur Integration direkter Identifikationsverfahren in Handhabungsprozesse

Die zuvor ausgewählten Sensoren gilt es in dieser Methode in Handhabungsprozesse zu integrieren, um die Systemanforderungen ASI-6 zu erfüllen.

5.5.1 Methodeneinsatz klären

Das Ziel dieser Methode ist es, unterschiedliche Alternativen zur Integration von Sensoren in Handhabungssysteme zu entwickeln, welche durch ihre Beschreibung die Implementierung der Verfahren zu einem späteren Zeitpunkt unterstützen (vgl. Tabelle 5-10). Ausgangsbasis für diese Untersuchung bildet die Menge an ausgewählten Sensoren sowie die parallel in der Fabrikplanung definierten Handhabungssysteme. Die Handhabungssysteme werden aus der Materialflussplanung abgeleitet. Hierbei werden in der frühen Planungsphase Klassen von Handhabungssystemen bestimmt, daher liegen zu diesem Zeitpunkt noch keine genauen Gerätebeschreibungen vor (BLESSING 2000, HOMPEL ET AL. 2007, ARNOLD & FURMANS 2009, JÜNEMANN & BEYER 2013, GRUNDIG 2015). Aus diesem Grund werden die Klassen relevanter Handhabungs- und Sensorsysteme auf ihre Verträglichkeit analysiert, um aus den Anforderungen der vorangegangenen Planungsschritte geeignete Kombinationen abzuleiten. Für die Entwicklung der integrierten Identifikationsverfahren wurden und werden die 6-3-5-Methode, ein Morphologischer Kasten und verschiedene Funktionsmodelle verwendet, welche im Anhang erörtert sind (vgl. Abschnitte 10.3.4.5 bis 10.3.4.7). Zur Verbesserung des Leseflusses wird die Methode im Folgenden vereinfacht als Integrationsprozess bezeichnet.

Tabelle 5-10: Einsatzparameter - Integrationsprozess

Zweck	Integration direkter Identifikationsverfahren in Handhabungsprozesse
Situation	(1) Eignung eines MASS für den vorliegenden Anwendungsfall (2) Inline-Qualitätskontrolle spezifischer definierter Merkmale
Wirkung	
Verfügbarer Input	Ausgewählte Identifikationsverfahren und Randbedingungen zu verwendender Handhabungssysteme <ul style="list-style-type: none">• Eigenschaften der Sensorsysteme• Eigenschaften der Handhabungssysteme
Angestrebter Output	In Handhabungsprozesse integrierbare bzw. integrierte Identifikationsverfahren <ul style="list-style-type: none">• Verfahrensbeschreibungen• Integrationsanweisungen

5.5.2 Methode auswählen

Im Stand der Wissenschaft und Technik wurden zwei methodische Vorgehensweisen identifiziert, welche die Integration von Sensoren betrachten. Um diese Methoden zu bewerten, werden die definierten Anforderungen an die Methodik sowie die spezifische Anforderung an den Integrationsprozess als Evaluationskriterien verwendet.

In der Methode nach GROTE (2016) werden ausschließlich bildgebende Verfahren betrachtet, sodass diese die Anforderung der Vollständigkeit nicht erfüllt. Zudem wird in GRAF (2018) durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Abstraktionsebenen in Anlehnung an das Münchner Produktkonkretisierungsmodell die Skalierbarkeit und Genauigkeit für eine frühe Planungsphase besser bewertet. Basierend auf diesen Bewertungen wurde der Ansatz nach GRAF (2018) ausgewählt und wie folgt adaptiert und erweitert (vgl. Tabelle 5-11).

Tabelle 5-11: Bewertung und Nutzwerte von Methoden zur Sensorintegration

Kriterium	Prio	(GRAF 2018)	(GROTE 2016)
Implementierbarkeit	3	0	0
Skalier- und Adaptierbarkeit	3	1	0
Genauigkeit und Eindeutigkeit	2	1	0
Benutzerfreundlichkeit	2	0	0
Variabilität und Wiederverwendbarkeit	1	1	0
Vollständigkeit	1	1	-1
Nutzwert		7	-1

5.5.3 Methode anpassen und generieren

Um den definierten Zweck unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen zu erzielen, wurden die dargestellte dreistufige Vorgehensweise sowie die zugehörigen Werkzeuge erarbeitet (vgl. Abbildung 5-11). Im Idealfall sind alle benötigten integrierten Identifikationsverfahren in der Identifikationsdatenbank enthalten und der Anwender führt lediglich den Auswahlprozess und die Kombination der Verfahren aus. Die Identifikationsdatenbank stellt das zentrale Werkzeug der Methode dar, welche unter Applikation der Schritte II.I bis II.III erstellt wurde. In dieser sind unterschiedliche Verfahren beschrieben und mit einer einfachen Auswahlhilfe verlinkt. Der Schritt II wird ausschließlich benötigt, sofern diese Datenbank keine der zuvor ausgewählten Sensorklassen oder Handhabungssysteme enthält und dementsprechend weitere integrierte Identifikationsverfahren entwickelt werden müssen. Aus der vorangegangenen Methode geht hervor, dass in vielen Fällen eine Kombination von Sensoren benötigt wird. Aus diesem Grund

wird im abschließenden Schritt III untersucht, inwiefern die integrierten Verfahren wiederum miteinander kombiniert werden können.

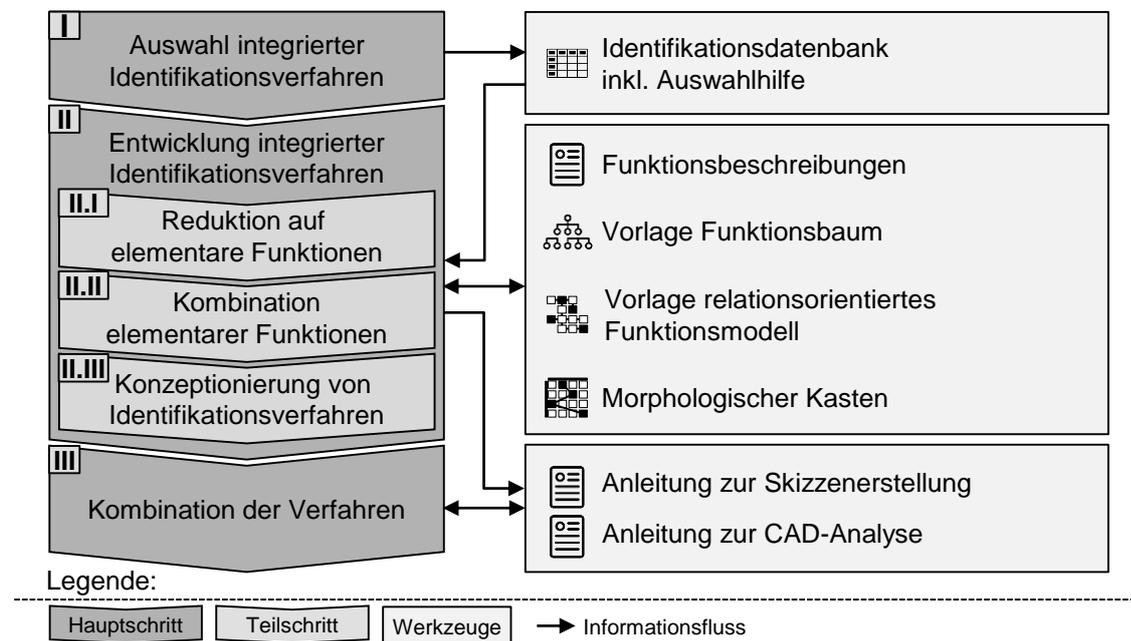


Abbildung 5-11: Vorgehensweise und Werkzeuge des Integrationsprozesses

Die folgende Beschreibung der Hauptschritte orientiert sich an der Vorgehensweise des Anwenders, sodass in Schritt I bereits die Identifikationsdatenbank erläutert wird. Im Hinblick auf den zugrunde gelegten Gang der Untersuchung ist dies teilweise eine inverse Beschreibung, da die eigens durchgeführten Entwicklungsschritte zur Erarbeitung der Datenbank mit den Teilschritten des Anwenders im zweiten Teil der Methode identisch sind.

5.5.3.1 I: Auswahl integrierter Identifikationsverfahren

Das Ziel dieses Schritts ist die Auswahl integrierter Identifikationsverfahren, in Abstimmung mit der Materialflussplanung und unter Berücksichtigung des Fabriklayouts. Die erforderlichen Eingabewerte des Anwenders reduzieren sich auf die ausgewählten Sensoren und die aus der Materialflussplanung vorgegebenen Handhabungssysteme. Hierbei werden durch einen einfachen Abgleich der Eingabewerte (Sensorklassen, Handhabungsgeräte, Merkmale, etc.) geeignete integrierte Identifikationsverfahren ausgewählt. In Tabelle 5-12 sind die entwickelten Verfahren in einer Übersicht dargestellt. Ist unter den Ressourcen weder ein Handhabungssystem (HHS) noch ein Handhabungsgerät (HHG) aufgeführt, kann der eingesetzte Sensor prinzipiell mit jedem HHS kombiniert werden.

5.5 Methode zur Integration direkter Identifikationsverfahren in Handhabungsprozesse

Tabelle 5-12: Verfahren der Identifikationsdatenbank

Bezeichnung	Merkmal	Ressourcen	Kurzbeschreibung
3-Punkt-Verfahren	Form	punktförmiger Sensor + 3D-HHS	Sensor wird an Greifer befestigt, mit dem durch punktuellen Abtasten die Objektform überprüft wird
Optische Geometriebestimmung	Form	Kamera + BVS	Objekt wird durch Kamera + BVS während des Handhabungsprozesses identifiziert
Sequenzielles Wiegen	Gewicht	Plattformwaage + 2/3D-HHS	Objekt wird während des Produktionsprozesses auf einer Plattformwaage gewogen
Integriertes Wiegen	Gewicht	Kranwaage + 3D-HHS	Kranwaage zw. Greifer und Roboter. Wiegen während des Handhabungsprozesses
Wiegen auf Förderband	Gewicht	Förderbandwaage	Objekt wird auf einem Förderband gewogen und identifiziert
Farbmessung	Farbe	Farbsensor	Abgleich des RGB-Werts durch Farbsensor
Kombination: Farbmessung; Geometriebest.	Farbe + Form	Farbkamera + BVS	Objekt durch Messung der Farbausprägungen durch Kamera + BVS identifizieren
Identifikation der Objektform durch induktives Messfeld	Form	Förderband + induktive Sensoren	Objekt steht bzw. fährt durch induktives Feld. Matrixmuster wird gebildet und lässt so die Objektform ermitteln
Überprüfung der Objektform durch Greifen	Höhe, Breite, Länge	Integrierte Sensoren im Greifer	Anfahren verschiedener Punkte und testweises Greifen zum Überprüfen der Greifweiten
Überprüfung der Objektform mit Aktormatrix	Breite, Länge	Sauggreifer in Matrixanordnung	Rückschlagventile geben aus, an welchen Saugern gerade ein Bauteil anliegt.
Integriertes Wiegen durch Bewegung	Gewicht	Integrierte Sensoren in 3D-HHG	Referenzbewegung des HHG verändert aufgenommene Momente
Oberflächen-detektion über gepulsten Laserstrahl	Oberfläche	Laser + Detektorschirm	Gepulster Laserstrahl auf Objekt senden und mit einem Detektor auffangen
Hyperspektralanalyse	Werkstoff	Hyperspektralkamera	Kamera scannt das Objekt und wertet dessen Werkstoff aus

Basis des Auswahlprozesses bildet die Einteilung in 1-, 2- und 3-dimensionale HHG bzw. HHS (vgl. Abschnitt 4.2.2), welche noch feiner in unterschiedliche Be-

wegungsrichtungen (z. B. X, Y und Z) unterteilt wird. Besitzt ein Handhabungssystem bspw. nicht die Fähigkeit, ein Objekt in Z-Richtung zu bewegen, ist dieses nicht für Messverfahren geeignet, in welchen das Objekt kurz auf einem Messpunkt oder Messbereich abgelegt werden muss. Zur weiterführenden Unterstützung des Anwenders umfasst die Beschreibung der einzelnen Verfahren neben den identifizierbaren Merkmalen und den benötigten Ressourcen Bedingungen und Hinweise zur Implementierung (vgl. Tabelle 4-2). Die weiteren integrierten Identifikationsverfahren sind im Anhang dargestellt (vgl. Tabelle 10-9 bis Tabelle 10-20).

Die Beschreibung umfasst zudem einen schematischen Systemaufbau, um die Nachvollziehbarkeit zu erhöhen. Die aufgeführten Bedingungen können sich sowohl auf die Objekte als auch die Umgebung beziehen. Sofern diese noch nicht vollständig bekannt sind, gilt es, diese Anforderungen zu vermerken und die Planung des Fabrikbereichs darauf abzustimmen. Unter dem Punkt Vorbereitung werden Aktionen geschildert, welche vor der Betriebsphase des Selbststeuerungssystems durchzuführen sind. Die enthaltene Prozessbeschreibung dient ebenfalls zur Verbesserung des Verständnisses. Als Vorbereitung für eine spätere Implementierung ist diese mit einem Aktivitätsdiagramm verlinkt, in welchem Transitionen und Bedingungen enthalten sind, die ein softwareseitiges Grundkonzept darstellen. Ergänzend wird der Identifikationsschritt über Symbole in den Handhabungsprozess eingeordnet, sodass sequenzielle oder parallele Prozesse leicht zu erkennen sind. Abschließend enthält die Beschreibung Kommentare und Eigenschaften des Verfahrens, welche eine weitere Hilfestellung und Vorbereitung der Implementierung darstellen. Die dort enthaltenen Hinweise und Toleranzbereiche wurden aus verschiedenen Versuchen und Marktrecherchen abgeleitet. An dieser Stelle wird auf die Erweiterbarkeit dieser Beschreibungen hingewiesen, sodass diese um unternehmensspezifisches Wissen ergänzt werden können.

Sofern für eine Identifikationsaufgabe keine Verfahren in der Datenbank enthalten sind, besteht die Notwendigkeit, die Datenbank durch die Entwicklung neuer Verfahren (gemäß Schritt II) zu erweitern. Liegt bereits ein geeignetes Verfahren vor, werden diese in Schritt III auf ihre Kombinationsfähigkeit untersucht.

5.5.3.2 II: Entwicklung integrierter Identifikationsverfahren

Bevor die Entwicklung neuer integrierter Identifikationsverfahren initiiert wird, ist diese mit der Fabrikplanung abzustimmen. Je nach Menge der benötigten zusätzlichen Verfahren könnte die Entwicklung nicht freigegeben werden, sodass

5.5 Methode zur Integration direkter Identifikationsverfahren in Handhabungsprozesse

die Planung eines MASS an dieser Stelle abgebrochen wird. Dieser Fall kann im Rahmen der Methodik nur eintreten, wenn die Menge der betrachteten Sensoren oder der HHS im Vorfeld erweitert wurde, da die vorliegenden Verfahren für die zuvor zur Verfügung gestellten Hilfsmittel einen vollumfänglichen Lösungspool darstellen.

II.I - Reduktion auf elementare Funktionen: Um ein neues integriertes Identifikationsverfahren zu entwickeln, wird stets ein Sensorsystem und ein HHS bzw. deren Klassen betrachtet. Hierbei werden in Anlehnung an die Methode nach GRAF (2018) sowohl das Sensorsystem als auch das Handhabungssystem auf seine elementaren Funktionen reduziert. Im Fall der Handhabungssysteme kann zu diesem Zweck die eingeführte Kategorisierung in Verbindung mit den Funktionen der VDI 2860 genutzt werden. Für Sensorsysteme gilt es, das zugrunde gelegte Wirkprinzip zu analysieren. Für diese Analyse wird die Verwendung eines Funktionsbaums empfohlen, welcher die Hauptfunktion über verschiedene Hierarchieebenen hinweg immer weiter unterteilt (vgl. Abbildung 5-12).

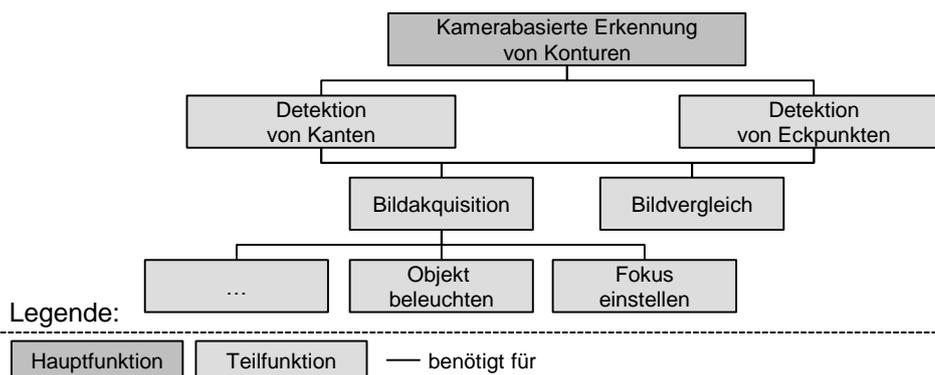


Abbildung 5-12: Auszug Funktionsbaum - Kamerabasierte Erkennung

In beispielhaften Funktionsbäumen (z. B. EHRENSPIEL & MEERKAMM 2013) ergeben sich unabhängige Äste ohne Querverbindungen. Diese sind abhängig von der Hauptfunktion nur durch eine Mehrfachnennung von Teilfunktionen erreichbar, welche im vorliegenden Anwendungsfall nicht empfohlen wird. Der Funktionsbaum dient der initialen Sammlung von Teilfunktionen, welche anschließend in ein relationsorientiertes Funktionsmodell (vgl. Abschnitt 10.3.4.5) überführt werden. In diesem Diagrammtyp sind Mehrfachzuweisungen wie bspw. die Zuordnung der Bildakquisition sowohl zur Kanten- als auch zur Eckpunktdetektion (vgl. Abbildung 5-12) nach der allgemeinen Konvention erlaubt.

II.II - Kombination elementarer Funktionen: Zunächst wird das relationsorientierte Funktionsmodell für den Sensor und das Handhabungssystem isoliert erstellt

5 Methodik zur Planung und Konfiguration von MASS

und anschließend zusammengeführt (vgl. Abbildung 5-13). Auf diese Weise können schädliche Funktionen identifiziert werden, welche nur in Kombination auftreten. Die schädlichen Funktionen müssen untersucht werden, sodass je nach prognostizierter Auftrittswahrscheinlichkeit und Schwere der daraus folgenden Fehler eine Funktion eingeführt wird, welche die schädliche Funktion vermeidet. Das Beispiel verdeutlicht die Herausforderung, eine Kamera am Roboter zu befestigen, ohne das Referenzsystem für die Identifikation zu verlieren. In diesem Fall wird die aktuelle Position des HHS für eine dynamische Referenz verwendet.

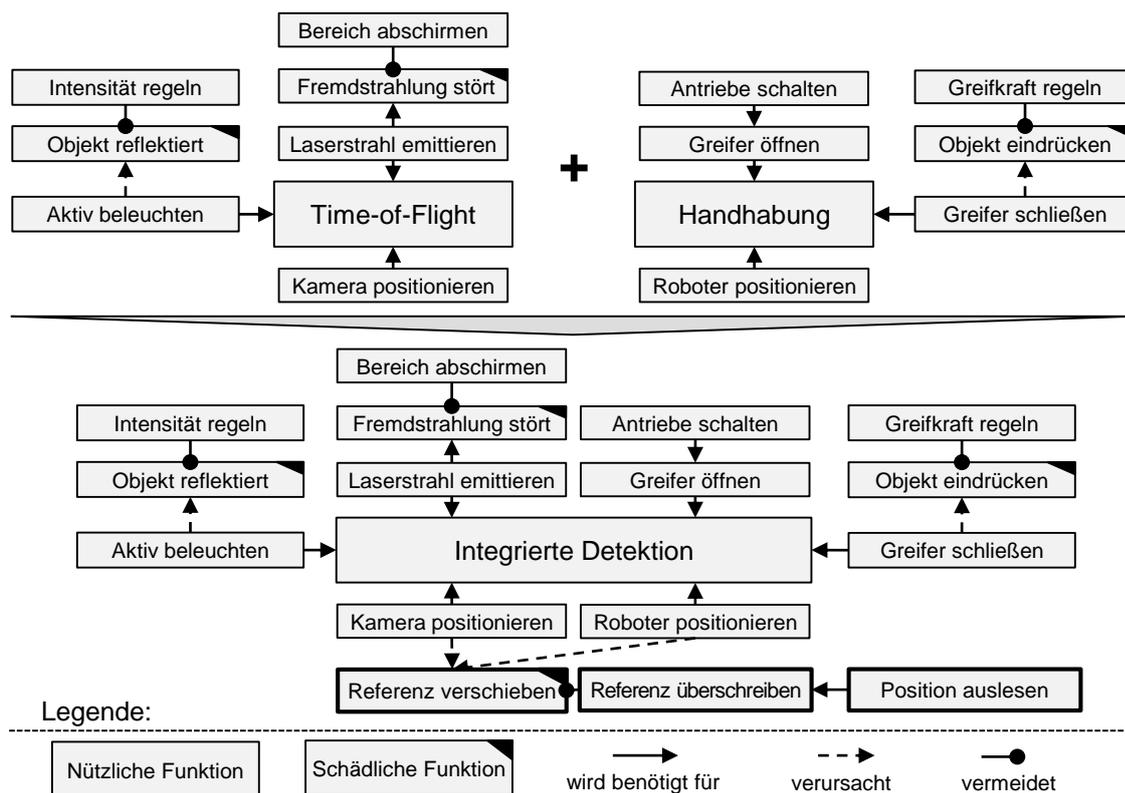


Abbildung 5-13: Erstellung relationsorientiertes Funktionsmodell für integrierte Identifikationsverfahren – Beispiel optische Erkennung

Aus dem erarbeiteten kombinierten relationsorientierten Funktionsmodell werden die nützlichen Funktionen am Ende der einzelnen Funktionsstränge extrahiert und in einen morphologischen Kasten (vgl. Abschnitt 10.3.4.5) überführt. Im nächsten Schritt werden zu diesen Teilfunktionen passende Teillösungen gesucht.

II.III - Konzeptionierung von Identifikationsverfahren: Zur Erarbeitung der Teillösungen wird nach der Entwicklung der Identifikationsdatenbank eine Kombination systematischer Recherchen und verschiedener Kreativitätstechniken empfohlen. Beginnend mit einem Brainstorming können erste Lösungsideen abgeleitet werden. Den nächsten Schritt stellt die sog. 6-3-5-Methode dar (vgl.

5.5 Methode zur Integration direkter Identifikationsverfahren in Handhabungsprozesse

Abschnitt 10.3.4.7). Um mithilfe dieser Methode gezielt detaillierte Teillösungen zu ermitteln, können die einzelnen Lösungsspalten verschiedenen Teillösungen zugeordnet werden. Nach der Durchführung der 6-3-5-Methode wird diese ausgewertet, indem Lösungscluster gebildet werden, welche anschließend in den Morphologischen Kasten überführt werden. Zur Erstellung der initialen Identifikationsdatenbank wurde die Methode mit acht Teilnehmern aus den Bereichen Anlagen- und Steuerungstechnik, Produktionsplanung und -management sowie Fabrikplanung durchgeführt. Aus den mehr als 100 Ideen konnten 20 Lösungscluster abgeleitet werden, welche vorrangig alternative örtliche Anordnungen der Systeme beschreiben. Aus der Anwendung der Methode wurde die Nutzung der im Handhabungssystem vorhandenen Sensorik zur Merkmalsidentifikation abgeleitet. Beispielsweise können elektrische Parallelbackengreifer die aktuelle Greifweite ausgeben und auf diese Weise einen Teil der äußeren Bauteilkontur bestimmen. Ein weiteres Beispiel im Bereich der Greifer stellt die Verwendung einer Saugermatrix dar, die häufig zur Absortierung von Blechen verwendet werden. Durch die Integration von Rückschlagventilen mit einer binären Ausgabe kann die Fläche eines Objekts bestimmt werden (vgl. Abbildung 5-14).

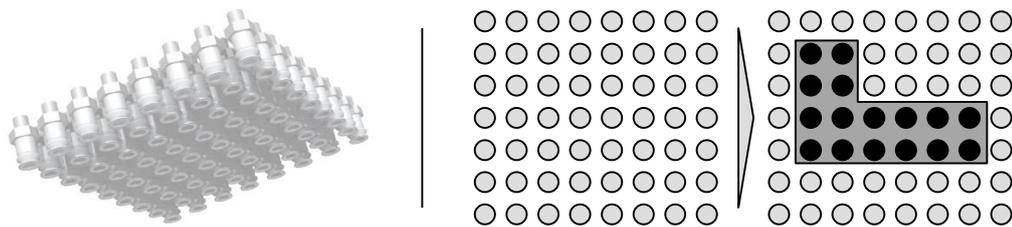


Abbildung 5-14: Saugermatrix (links) und Formerkennung (rechts)

In variantenreichen Produktionen ist der Anteil flexibler Anlagentechnik vor allem im Bereich der Handhabungstechnik höher. Die flexible Anlagentechnik zeichnet sich dadurch aus, dass die Systeme durch den verstärkten Einsatz von Sensorik und Aktorik unterschiedliche Konfigurationen annehmen können, um die Formatflexibilität zu erhöhen. Diese Anlagentechnik bietet ein großes Potenzial zur integrierten Objektidentifikation, welches jedoch individuell zu prüfen ist. Die sensorlosen Identifikationsverfahren sind im Auswahltool derart zu verlinken, dass sie durch die Eingabebeschreibung dennoch auffindbar sind. Die Saugermatrix wird bspw. analog zur Matrix aus punktförmigen Sensoren betrachtet.

Die Ergebnisse aus der Kreativitätstechnik sind durch gezielte Marktrecherchen zu erweitern und zu überprüfen. Sobald diese aus Sicht des Projektteams vollständig sind, werden Konzeptbahnen gebildet, welche die einzelnen Teillösungen zu ganzheitlichen Konzepten kombinieren. Diese werden anschließend als generisches

Konzept in der Datenbank hinterlegt und für den Anwendungsfall detailliert. Um ein neues Verfahren anzulegen, wird eine Vorlage zur Verfügung gestellt, sodass über Auswahllisten einheitliche Benennungen erhalten bleiben und die Auswahlhilfe für künftige Planungen funktionsfähig bleibt. Sofern mehrere Sensoren erforderlich sind, gilt es, deren Verfahren abschließend zu kombinieren.

5.5.3.3 III: Kombination der Verfahren

In diesem Schritt werden die ausgewählten integrierten Identifikationsverfahren und die zugehörigen Systeme kombiniert. In Anlehnung an GRAF (2018) und das Münchner Produktkonkretisierungsmodell (PONN & LINDEMANN 2011) wird die Verträglichkeitsanalyse der integrierten Identifikationsverfahren auf der Bauebene durchgeführt. In diesem Zusammenhang bestehen für den Anwender zwei unterschiedliche Möglichkeiten, welche in Anlehnung an den Fortschritt der Fabrikplanung und die Fähigkeiten des Anwenders ausgewählt werden.

Die erste Möglichkeit, welche keiner besonderen Kenntnisse und nur eines groben Planungsstands bedarf, ist die Anfertigung einer Systemskizze, in welcher die Anordnung der Systemelemente, die Bewegungsbahn und der Messbereich der Sensoren eingezeichnet wird (vgl. Tabelle 5-13). Sollten sich die Messbereiche überschneiden, muss überprüft werden, ob eine gegenseitige Beeinflussung der Sensoren die Messwerte verfälscht. In diesem Fall gilt es, eine andere Anordnung (iterative Anwendung der Prozessschritte 4 und 5) oder eine andere Kombination von Sensoren anzustreben. Nachteil der Systemskizze ist der händische Aufwand, ein aussagekräftiges und damit maßstäbliches Modell zu erhalten.

Tabelle 5-13: Anleitung zur Skizzenerstellung

	Prozessschritt
1.	Sammeln geometrischer Beschreibungen (Umwelt, Systeme, Messbereiche)
2.	Anfertigen von Schablonen der Messbereiche
3.	Vereinfachte Darstellung der Umwelt, des Objekts und der Bewegungsbahn
4.	Auflegen der Schablonen in geeigneter Anordnung
5.	Überprüfen der Messbereiche und der Auswirkungen auf die Betriebsmittel
6.	Vervollständigen und Sichern der Skizze

Für die zweite Möglichkeit sind die CAD-Daten der Systemelemente und entsprechende CAD-Kenntnisse notwendig. Durch eine einfache Modellierung der Messbereiche und den Aufbau einer Baugruppe kann das Gesamtsystem dreidimensional untersucht werden. Nahezu alle Anbieter stellen CAD-Modelle ihrer Produkte bereit, welche direkt in eine Baugruppe kopierbar sind und dadurch

5.5 Methode zur Integration direkter Identifikationsverfahren in Handhabungsprozesse

eine einfache Erstellung des Modells erlauben. Darüber hinaus könnte das erstellte Modell in der parallelen Fabrikplanung für eine virtuelle Inbetriebnahme genutzt werden. Die Anleitung zur CAD-Analyse ist in Tabelle 5-14 dargestellt.

Tabelle 5-14: Anleitung zur CAD-Analyse

	Prozessschritt
1.	Sammeln geometrischer Beschreibungen (Umwelt, Systeme, Messbereiche)
2.	Sammeln bzw. Erstellen der einzelnen Modelle sowie der Messbereiche
3.	Anordnung der einzelnen Modelle in einem Gesamtmodell
4.	Überprüfen der Messbereiche und der Auswirkungen auf die Betriebsmittel
5.	Vervollständigen und Sichern des Modells bzw. der Datei

Aus der räumlichen Anordnung der Systemelemente geht hervor, ob die Überprüfung der einzelnen Merkmale parallel erfolgen kann oder sequenziell durchgeführt wird. Beispielsweise die Erfassung der Objektkontur durch eine Kamera am Greifer vor der Bauteilaufnahme und die Überprüfung des Werkstoffes durch einen hyperspektralen Sensor (vgl. Abbildung 5-15). Liegt eine sequenzielle Prüfung vor, werden abschließend die benötigten Messzeiten und ggf. eine zusätzlich benötigte Transportzeit addiert und mit der initial definierten maximalen Messdauer, welche bereits für die Vorauswahl der Sensoren genutzt wurde, verglichen. Auf diese Weise wird der Einsatz der Verfahrenskombination mehrdimensional abgesichert.



Abbildung 5-15: CAD-Analyse - Beispiel

Im letzten Schritt werden die Spezifikationen der benötigten Peripherie abgeglichen bzw. zusammengefasst, um eine geeignete Steuerung für das Gesamtsystem auszuwählen. Diese Steuerung bildet in der Betriebsphase die LLC, welche für die Identifikation zuständig ist. Welche Aufgaben diese Klasse von Agenten besitzt und wie diese in der Planung und Konfiguration eines Agentensystems zur merkmalsbasierten Selbststeuerung berücksichtigt werden, wird in der abschließenden Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen erörtert.

5.6 Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

Diese Methode dient der Planung und Konfiguration eines Agentensystems zur Selbststeuerung. In Anlehnung an den Systemansatz sind die Vorgehensweise und die enthaltenen Werkzeuge so gestaltet, dass sie für die Planung und Konfiguration von MASS, IDSS sowie für Mischformen einsetzbar sind.

5.6.1 Methodeneinsatz klären

Der Zweck dieser Methode ist die Erarbeitung eines Agentensystems für eine Selbststeuerung. Um eine abgesicherte Entwicklung zu realisieren, soll trotz der frühen Planungsphase bereits ein Programmcode entstehen, welcher für eine iterative Evaluation der Systemplanung nutzbar ist. Hierzu wird das Agentensystem initial geplant und konfiguriert sowie der resultierende Code iterativ und begleitend zur Fabrikplanung weiterentwickelt (vgl. Abbildung 5-2). Die Methode soll für die Entwicklung jeglicher Agentensysteme im Bereich der Selbststeuerung geeignet sein. Die besonderen Anforderungen eines MASS sind durch Werkzeuge und Hilfsmittel zu berücksichtigen, sodass die Vorgehensweise in jedem Fall nutzbar ist. In Anlehnung an bestehenden Methoden werden in der Methode verschiedene UML-Modelle verwendet (KIEFER ET AL. 2019B), deren Grundlagen in Abschnitt 10.3.4.1 beschrieben sind.

Tabelle 5-15: Einsatzparameter – Planung & Konfiguration von Agentensystemen

Zweck	Konzeption und initiale Implementierung eines Agentensystems zur autonomen Produktionssteuerung
Situation	Eignung einer Selbststeuerung für den vorliegenden Anwendungsfall und alle benötigten Betriebsmittel und deren Anzahl bekannt
Wirkung	Detailliertes Entwicklungsszenario, in welchem die Ergebnisse der Methoden 1-3 in Form aller Betriebsmittel enthalten sind
Verfügbarer Input	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte, strukturierte Objektinformationen • Anzahl und Ausprägung der Betriebsmittel • Anzahl und Ausprägung der Identifikationsverfahren • Anforderungen an das Produktionssystem
Angestrebter Output	Konfiguriertes Agentensystem: <ul style="list-style-type: none"> • Rollen und Agentendefinition • Definierte Verhaltensweise und Kommunikationsregeln • Umfassende Gesamtsystembeschreibung • Programmcode zur Steuerung und Evaluation der Produktion bzw. des Produktionsplanungsstands

5.6.2 Methode auswählen

Im Vergleich zu den anderen Methoden liegen im Bereich der Agentenentwicklung fast achtzig Ansätze vor, welche in Betracht zu ziehen sind (AKBARI 2010). Um den Lösungsraum einzugrenzen, wurde basierend auf deren Beschreibungen und den Anforderungen an die Methodik eine Vorauswahl getroffen. Darüber hinaus wurden die verschiedenen Phasen der bestehenden Methoden sowie deren Output einheitlich beschrieben, indem Synonyme zusammengefasst wurden. Auf diese Weise wurden Aufbau und Output der Methoden direkt miteinander vergleichbar, um eine Bewertung durchzuführen. In Tabelle 5-16 ist die Vorauswahl dargestellt, welche in die einzelnen Phasen (Teilschritte kursiv dargestellt), die Eigenschaft der Iteration und die Outputs gegliedert ist. Die korrespondierenden Quellen der Methoden sind in Tabelle 10-4 separat dargestellt.

Tabelle 5-16: Vergleich vorausgewählter agentenorientierter Methoden

Methode	Analyse	Anforderungsanalyse	Design	Architekturdesign	Detaildesign	Implementierung	Iterativ	Anwendungsfalldiagramm	Agentendiagramm	Rollendiagramm	Aufgabendiagramm	Programmcode
PASSI	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MaSE	●	○	●	○	○	●	○	○	●	●	○	○
O-MaSE	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●
Gaia	●	○	●	●	●	○	○	○	●	●	○	○
Tropos	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Prometheus	●	●	●	●	●	○	●	●	●	○	○	○
Adelfe	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○	○	●
Gormas	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	●
Romas	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○
Soda	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○
Mobmas	●	●	●	●	●	○	●	○	●	●	●	●
Roadmap	●	●	●	○	○	○	○	●	●	●	○	○
ADMuJADE	●	●	●	○	○	○	●	●	●	○	○	○
Aspects	●	●	●	●	○	●	●	●	○	●	○	●
Ingenias	●	●	●	○	○	○	●	●	●	○	●	●
HIM	●	○	●	○	○	●	○	○	●	○	○	○
Sonia	●	●	●	●	●	○	○	○	●	○	●	○
Zeus	●	○	●	○	○	●	○	●	●	●	●	●
Message/UML	●	○	●	○	○	○	●	○	○	●	○	○

Füllgrad der Kreise gibt den Grad der Umsetzung an

Die Vereinheitlichung der Methodenbeschreibungen führte zu den drei Hauptschritten Analyse, Design und Implementierung. In der Analysephase wird teilweise spezifischer auf eine Anforderungsanalyse eingegangen, welche im Rahmen einer frühen Planungsphase wie der Fabrikplanung von besonderer Bedeutung ist und entsprechend hervorgehoben wurde. Analog dazu gehen verschiedene Methoden auf den Unterschied zwischen Architekturdesign und Detaildesign ein. Unter der Architektur wird das System als Ganzes sowie die Schnittstellen zwischen den Agenten verstanden, während im Detaildesign spezifisch auf die einzelnen Agenten eingegangen wird. In einer frühen Phase, in welcher maßgeblich veränderliche Planungsdaten verwendet werden, sind darüber hinaus iterative Verfahren zu bevorzugen, welche die Integration von Umplanungen und Änderungen unterstützen (PONN & LINDEMANN 2011). Ebenso von Bedeutung ist die Unterstützung des Anwenders durch verschiedene Werkzeuge sowie klarer Ergebnisse der einzelnen Entwicklungsphasen. Vor allem für Fabrikplaner ohne Expertenwissen müssen eindeutige Ergebnisbeschreibungen vorgegeben werden, welche eine zielgerichtete Entwicklung fördern. Aus diesem Grund ist die Anzahl der definierten und unterstützten Diagramme ein wichtiges Indiz für die Auswahl einer passenden Methode, welches bspw. in den Anforderungen Benutzerfreundlichkeit und Genauigkeit aufgegriffen wird.

Um die Bewertung noch spezifischer auf den Anwendungsfall der Entwicklung eines MASS abzustimmen, wurden die Anforderungen, welche nun analog zu den anderen Methodenentwicklungen als Evaluationskriterien verwendet werden, unter Verwendung eines Paarweisen Vergleichs gewichtet (vgl. Tabelle 10-28). Für die Auswahl einer geeigneten Methode wurden die einzelnen Wertungen mit der Gewichtung multipliziert, um einen Nutzwert zu berechnen. Die Granularität der Beschreibung der einzelnen Methoden unterliegt einer sehr hohen Varianz, von umfangreichen Büchern bis hin zu einzelnen Veröffentlichungen. Aus diesem Grund ist die Bewertung einzelner Methoden nicht für jedes Kriterium möglich, da die Informationsmenge nicht ausreicht. Demzufolge wurde für die Bewertung eine Skala von „2“ bis „-1“ verwendet, welche Bewertungen von „gut erfüllt“, „erfüllt“, „nicht bekannt“ bis „nicht erfüllt“ abbildet (vgl. Tabelle 5-17). Auf diese Weise wird der Einfluss nicht bekannter Informationen reduziert und die Vergleichbarkeit der Methoden verbessert.

5.6 Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

Tabelle 5-17: Bewertung der Methoden für die Entwicklung von Agentensystemen

Kriterium	Gewichtung										
		PASSI	Mobmas	Romas	ADMuJADE	Zeus	Ingenias	Prometheus	Aspects	MaSE	Message/UML
Kommunikation & Ontologien	3	2	1	2	2	1	2	2	1	2	0
Flexibilität	3	2	1	2	2	-1	1	1	2	-1	2
Rollen & Schnittstellen	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Betrachtungsebenen	3	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1
Variabilität & Wiederverwendbarkeit	2	2	2	1	2	1	1	-1	-1	1	1
Benutzerfreundlichkeit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Genauigkeit & Eindeutigkeit	2	2	2	2	1	2	2	-1	2	1	-1
Vollständigkeit	2	2	2	1	1	2	-1	2	-1	2	2
Offenheit	1	1	2	2	2	2	0	-1	2	-1	-1
Skalier- & Adaptierbarkeit	1	2	1	2	0	2	1	2	1	2	0
Programmierung	1	2	2	-1	1	1	-1	2	-1	1	2
Nutzwert		42	36	33	33	28	26	25	24	23	21

Methoden mit einem Nutzwert kleiner als 20 wie bspw. HIM sind in Tabelle 5-17 für eine bessere Übersicht nicht dargestellt. In Verbindung mit der Gewichtung stellt PASSI mit einem Nutzwert von 42 die am besten geeignete Methode dar.

5.6.3 Methode anpassen und generieren

Die Entwicklungsmethode PASSI (vgl. Abschnitt 3.4.4) dient als Ausgangsbasis für die Entwicklung einer neuen Methode. Darüber hinaus sind Elemente der ebenfalls sehr gut geeigneten Methode Mobmas eingeflossen, welche als einzige der untersuchten Methoden im Rahmen des Architekturdesigns spezifisch auf die Agentenumgebung und die Spezifizierung der Infrastruktur eingeht, welche für die Definition der Schnittstellen zwischen HLC und LLC und die Einbindung produktionspezifischen Wissens genutzt werden kann. Für eine detaillierte Beschreibung von Mobmas wird auf TRAN & LOW (2008) verwiesen. Aus der durchgeführten Adaption von PASSI sind ein fünfstufiges Vorgehen und korrespondierende Werkzeuge entstanden (vgl. Abbildung 5-16).

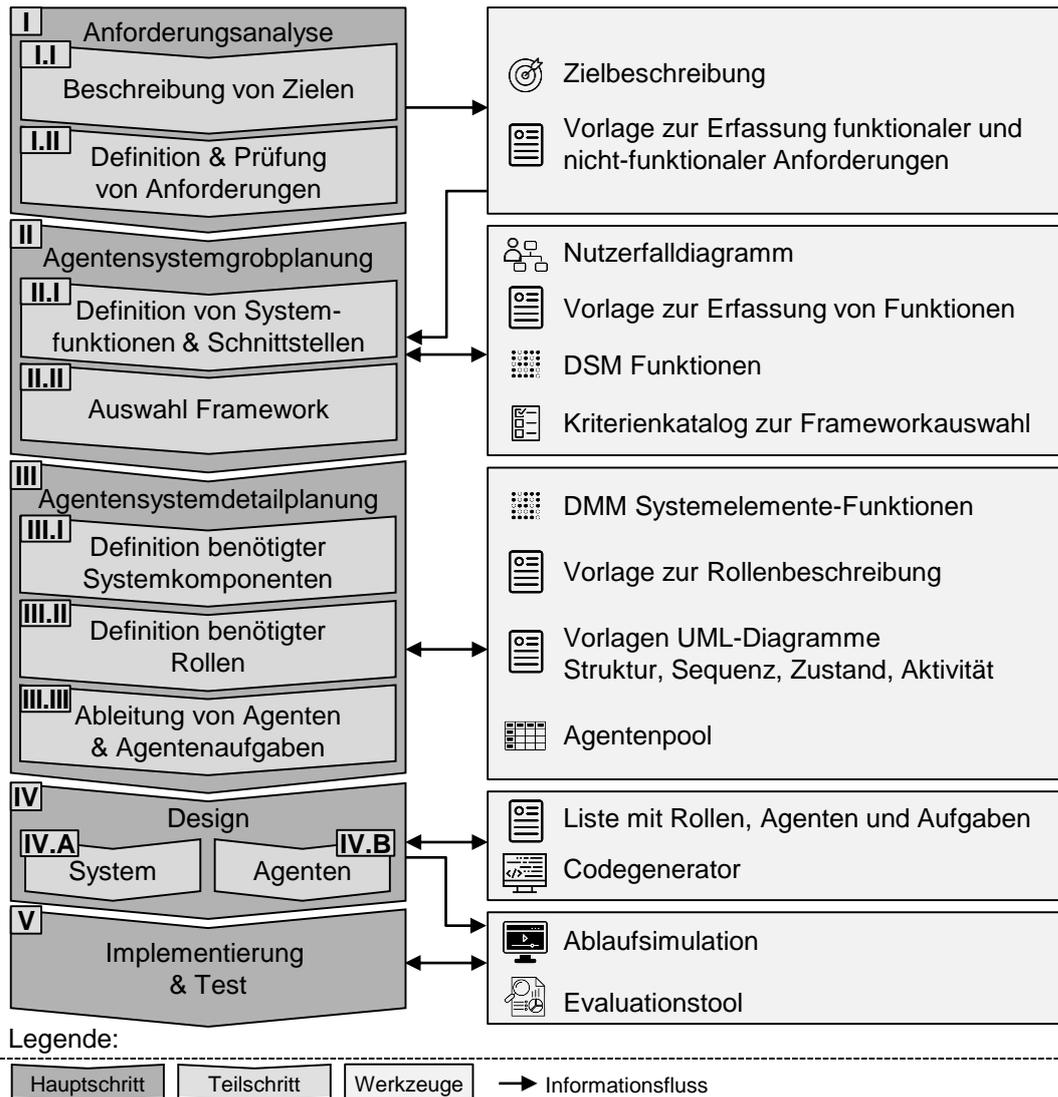


Abbildung 5-16: Vorgehensweise und Werkzeuge zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

5.6.3.1 I: Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse dient maßgeblich zur Überprüfung der Vollständigkeit aller benötigten Informationen. Darüber hinaus wird eine Anforderungsliste erstellt, die vollständig auf den Anwendungsfall abgestimmt ist und auf Plausibilität überprüft wird. Die Anforderungsanalyse ist unterteilt in die Beschreibung von Zielen und die Definition von Anforderungen sowie deren Überprüfung.

I.I - Beschreibung von Zielen: In diesem Schritt werden die smarten Ziele aus der Eignungsprüfung aus Sicht der Informationstechnik detailliert und erweitert. Im Fall einer isolierten Anwendung der Methode ist das Vorgehen analog zur Zieldefinition in der Methode zur Eignungsprüfung von Selbststeuerungssystemen.

5.6 Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

Beispielhafte Zielkategorien sind Datentypen, Speicherplatz, Schnittstellen intern und extern, Zugriffsrechte und Informationssicherheit. Ein Beispiel für eine Detaillierung der Ziele ist die Unterteilung der Datentypen in ihre Kompatibilität mit verschiedenen CAX-Systemen.

I.II - Definition und Prüfung von Anforderungen: Aufbauend auf den Zielbeschreibungen werden Anforderungen an das System definiert. Hierbei wird zwischen funktionalen Anforderungen und nicht-funktionalen Anforderungen unterschieden. Die funktionalen Anforderungen beschreiben in diesem Kontext, was das Agentensystem leisten soll, während nicht-funktionale Anforderungen definieren, wie gut das Agentensystem agieren soll. Letztere sind entsprechend mit einem Zielwert zu versehen (ROBERTSON & ROBERTSON 2011, EIGNER ET AL. 2012). Die Vorlage zur Erfassung der Anforderungen beinhaltet vordefinierte auswählbare Anforderungen, welche die Definition erleichtern. Diese sind durch den Anwender lediglich mit individuellen Ziel- (E_{Ziel}) und Abbruchwerten (E_{krit}) zu komplettieren (vgl. Tabelle 5-18). Fügt der Anwender eine neue Anforderung ein, wird diese automatisch inkl. ihrer Beschreibung und der definierten Einheit (E) zur Überprüfung der Anforderung in der Auswahlliste hinterlegt, sodass sie für künftige Planungen zur Verfügung steht.

Tabelle 5-18: Erfassung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen - Auszug

	Anforderung	Beschreibung	E	E_{Ziel}	E_{krit}
Funktional	FIPA-Konformität	Einhaltung der Designregeln der FIPA, z. B. über Verwendung eines konformen Frameworks	-		
	Dokumentation der Kommunikation	Die Kommunikation zwischen den Agenten soll in einem Textdokument o.ä. protokolliert werden.	-		
	Anpassungsfähigkeit	Möglichkeit, die Produktionsprozesse zu verändern	-		
	Agenten hinzufügen und entfernen	Möglichkeit, Agenten in der Betriebsphase zu initialisieren und zu löschen bzw. (de-)aktivieren	-		
Nicht-funktional	Anzahl der Agenten (Start)	Anzahl an Agenten, die gleichzeitig gestartet werden können	Stk.		
	Anzahl der Agenten (Laufzeitänderung)	Anzahl an Agenten im Betrieb, die gleichzeitig gestartet / hinzugefügt werden können	Stk.		
	Anzahl der Agenten (Betrieb)	Gibt an, wie viele Agenten gleichzeitig aktiv sein können.	Stk.		
	Effizienz (Entscheidung)	Max. Dauer eines verhandlungs-basierten Entscheidungsprozesses	s		

Die entstandene Anforderungsliste wird anschließend auf Vollständigkeit geprüft. Abschließend werden die Ziel- und Abbruchwerte diskutiert, auf ihre Erfüllbarkeit geprüft und final abgestimmt.

Die zentralen Ergebnisse des ersten Hauptschritts stellen folglich die Zielbeschreibung und die funktionalen sowie die nicht-funktionalen Anforderungen dar, welche in einer geprüften Liste vorliegen.

5.6.3.2 II: Agentensystemgrobplanung

Aufbauend auf der Anforderungsanalyse werden in diesem Schritt in einem zweistufigen Verfahren sowohl die benötigten Systemfunktionen und Schnittstellen definiert, als auch eine Agentenplattform ausgewählt.

II.1 - Definition von Systemfunktionen und Schnittstellen: Aus den funktionalen Anforderungen an das System sind verschiedene Funktionen wie bspw. die Initialisierung von Agenten in der Betriebsphase direkt ableitbar. Um den Aufwand für den Anwender in diesem Schritt ebenfalls zu reduzieren, sind die deduzierten Funktionen der hinterlegten Basisanforderungen in einer analog gestalteten Vorlage zur Erfassung der Systemfunktionen enthalten. Weitere Funktionen des Agentensystems ergeben sich aus einer Analyse des Produktionssystems und der geplanten Ausrichtung der PPS (vgl. Tabelle 4-3). Ein Beispiel einer benötigten Systemfunktion, welche aus dem Produktionssystem abgeleitet wird, ist die Vergabe von Prioritäten im Falle zeitkritischer Kausalitäten von Produktionsprozessen (z. B. Warmumformen). Die zusätzlichen Funktionen können zudem unter Verwendung von Nutzerfalldiagrammen (vgl. Abschnitt 10.3.4.1) abgeleitet werden. Wird die Verwendung dieser Diagramme im Projektteam beschlossen, werden diese nach dem Grundprinzip vom Ganzen zum Detail zunächst für das gesamte Produktionssystem und anschließend für die einzelnen Produktionsbereiche erarbeitet. Um unterschiedliche Use-Cases abzuleiten, werden die verschiedenen Zustände der vorliegenden Betriebsmittel (z. B. Betrieb, Wartung, Fehler) zu Systemzuständen kombiniert. Darüber hinaus sind weitere Szenarien aus unterschiedlichen Produktionsaufträgen (geringe bzw. hohe Produktanzahl, geringe bzw. hohe Varianz) ableitbar. Um den Aspekt der Sicherheit abzudecken, können aus einer Prozess-FMEA (Fehler-Möglichkeits-Einfluss-Analyse) weitere Use-Cases und Systemfunktionen deduziert werden. Der Detaillierungsgrad dieser Untersuchung ist unternehmensspezifisch zu wählen. Durch die vorgesehene iterative Vorgehensweise, welche aus PASSI

5.6 Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

übernommen wurde, besteht die Möglichkeit, die Untersuchung in mehreren Stufen zu detaillieren. Eine vollständige Aufnahme der Funktionen bietet jedoch den Vorteil, dass der Gesamtaufwand proportional zur Anzahl nachträglicher Änderungen und Erweiterungen sowie der Iterationsschritte reduziert wird.

Um basierend auf den identifizierten Funktionen benötigte Schnittstellen abzuleiten, müssen die Zusammenhänge der Funktionen identifiziert werden. Eine Liste vordefinierter Schnittstellen mit zugehörigen Funktionen dient einerseits als Basis für diesen Planungsschritt und stellt andererseits eine Blaupause des zu erzielenden Ergebnisses dar, sodass die Benutzerfreundlichkeit und Genauigkeit der Methode erhöht werden. Als Hilfsmittel wird in diesem Teilschritt das strukturelle Komplexitätsmanagement in Form einer erweiterbaren DSM verwendet. In dieser sind die Basisfunktionen und ihre Relationen, welche den erforderlichen Schnittstellen entsprechen, enthalten (vgl. Tabelle 5-19).

Tabelle 5-19: DSM Funktionen zur Schnittstellenidentifikation – Auszug

DSM Funktionen	Start/ Ende GUI	Anzeigen Zustände	Agenten initialisieren	Agenten löschen	Agenten aktivieren	Agenten deaktivieren	Agenten aktualisieren	Urformen	Umformen	Funktion_n
Start/ Ende GUI		X	X	X	X	X	X			
Anzeigen Zustände	X		X	X	X	X	X			
Agenten initialisieren	X	X								
Agenten löschen	X	X								
Agenten aktivieren	X	X								
Agenten deaktivieren	X	X								
Agenten aktualisieren	X	X								
Urformen			X							
Umformen							X			
Funktion_n										

Aus der Tabelle 5-19 geht hervor, dass die Anzahl der Relationen nicht der Anzahl der benötigten Schnittstellen entspricht, da verschiedene Relationen zu einer Schnittstelle zusammengefasst werden können. Vorteil dieser Vorgehensweise ist eine funktionsorientierte Systemübersicht, welche für die Auswahl eines Frameworks nutzbar ist. Darüber hinaus wird die spätere Ausgestaltung der Schnittstellen vereinfacht, da deren Bestandteile aus Funktionssicht bereits definiert sind.

II.II: Auswahl Framework: Zunächst wird überprüft, ob branchenspezifische Standards ein Framework vorgeben, bspw. um eine durchgängige Kompatibilität in einer Supply Chain zu gewährleisten. Wird keines vorgegeben, wird in Abhängigkeit der Systemfunktionen und des Kriterienkatalogs nach KRAVARI & BASSILIADES (2015) ein geeignetes Framework ausgewählt. Die Bewertung nach KRAVARI & BASSILIADES (2015) nimmt keinen Bezug zu einem spezifischen Anwendungsfall. Entsprechend werden die Evaluationskriterien unter Berücksichtigung der Anforderungen und Systemfunktionen in einem Paarweisen Vergleich gewichtet, sodass im Anschluss ein Nutzwert berechnet und ein Framework ausgewählt werden. Die Systemfunktionen und Anforderungen sind folglich kein Indikator, wie gut ein Framework in den einzelnen Kategorien zu bewerten ist, sondern welche Relevanz diesem Kriterium im vorliegenden Anwendungsfall zukommt. In Tabelle 10-6 sind die Kriterien nach KRAVARI & BASSILIADES (2015), welche durch die Systemfunktionen in ihrer Relevanz beeinflusst werden, kursiv markiert. Diese fokussieren sich auf die Benutzerfreundlichkeit, welche mit einer zunehmenden Anzahl an Schnittstellen zum Anwender an Relevanz gewinnen sollte. Die Betriebsfähigkeit sollte mit zunehmender Anzahl an Funktionen und Schnittstellen ebenfalls relevanter als andere Kriterien sein.

Die identifizierten Funktionen, die vordefinierten Schnittstellen und das ausgewählte Framework stellen die zentralen Ergebnisse dieses Teilschritts dar.

5.6.3.3 III: Agentensystemdetailplanung

Den Systemfunktionen werden in diesem Schritt Systemelemente zugewiesen. Im Kontext der Agentensysteme sind diese Komponenten den unterschiedlichen Rollen oder auch Agentenklassen gleichzusetzen. Jeder Rolle werden bestimmte Aufgaben zugeordnet, zu deren Erfüllung wiederum die gesammelten Funktionen durchgeführt werden.

III.I: Identifikation von Systemelementen: Im ersten Schritt werden die Systemelemente des Produktionssystems identifiziert, welche an der Selbststeuerung teilnehmen und durch einen Agenten repräsentiert werden müssen. Als Input dient im Rahmen der Methodik die Zuordnung des Produktspektrums zu den verschiedenen Betriebsmitteln. Ist eine Produktion bereits in Betrieb, können die benötigten Daten aus dem ERP- und PLM-System gewonnen werden. Diese Systemelemente werden in Klassen gruppiert, z. B. Fügestationen, Lager, und in einer DMM den Funktionen gegenübergestellt (Systemelement-Funktion-DMM). Über ein Kreuz in der Matrix werden die Funktionen den Systemelementen

5.6 Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

zugeordnet. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass Mehrfachzuordnungen möglich sind und die Funktionen im ersten Schritt nicht vollständig auf die vorliegenden Systemelemente verteilt werden müssen. Die im ersten Schritt nicht zuordenbaren Funktionen dienen im zweiten Schritt dazu, die Matrix um benötigte Komponenten zu erweitern. Hierzu zählen Verwaltungsagenten, Bereichsagenten, der Directory Facilitator (DF), sprich Komponenten, welche kein Pendant im reellen Produktionssystem besitzen und aus diesem Grund als rein virtuelle Agenten bezeichnet werden. In einem FIPA-konformen Agentensystem wird bspw. der DF ohnehin benötigt. Dennoch wird empfohlen, diese erst nach einer ersten Zuordnung in die Matrix zu übernehmen. Exemplarische Anwendungen der Methode durch themenfremde Probanden zeigten, dass andernfalls nahezu alle Funktionen den verschiedenen Verwaltungs- und Bereichsagenten zugeordnet werden, sodass dem Grundgedanken der Dezentralisierung in Selbststeuerungssystemen nicht Rechnung getragen wird und eine durch Agenten aufgebaute hierarchische Architektur entsteht. Zur Orientierung kann der Anwender auf Vorlagen in der folgenden Rollendefinition zurückgreifen.

III.II: Definition benötigter Rollen: Die Beschreibung einer Rolle setzt sich aus ihren Eigenschaften und ihren Funktionen zusammen. Nun werden die bestimmten Funktionen mit den Eigenschaften gekoppelt und zu einer ganzheitlichen Beschreibung geformt. Dieser Schritt wird erneut über ein softwarebasiertes Werkzeug unterstützt, in welchem vordefinierte Rollen aus dem Bereich der Produktion enthalten sind, um das angestrebte Ergebnis des Schritts zu spezifizieren und den Aufwand zu reduzieren. Dieses Werkzeug bildet die Basis für die spätere Codegenerierung und wird im Rahmen der softwaretechnischen Umsetzung (vgl. Abschnitt 6.1) detailliert beschrieben. Im Folgenden steht die Beschreibung der erarbeiteten Kategorien zur Rollendefinition im Fokus.

- **Rollename:** Zunächst wird der Rolle ein eindeutiger Name gegeben. Dieser kann bei Bedarf im Laufe der Entwicklung angepasst werden.
- **Agentenart:** Diese Kategorie ist in die Ausprägungen virtuelle Agenten und Produktionsagenten unterteilt und nimmt direkten Bezug auf den entwickelten Systemansatz (vgl. Abschnitt 4.2.4).
- **Produktionsagent:** Im Fall eines Produktionsagenten wird diese Kategorie näher spezifiziert, z. B. über die Ausprägung eines Betriebsmittel in Anlehnung an die verschiedenen Fertigungsverfahren (vgl. Tabelle 4-5). Für virtuelle Agenten ist dies nicht erforderlich.

- Aufgaben: Diese Kategorie ist in Haupt- und Nebenaufgaben unterteilt, welche sich aus den Funktionen zusammensetzen. Die Zuordnung erfolgt aus einer agentenorientierten Sicht, sodass die Hauptaufgaben die Betriebsfähigkeit des Agentensystems sicherstellen, während produktionsorientierte Aufgaben, z. B. die Fähigkeiten des Betriebssystems, den Nebenaufgaben zugeordnet sind.
- Verhalten: Ein Agent kann seine Entscheidungen regelbasiert oder situativ treffen. Zu den regelbasierten Verhaltensweisen werden bspw. die Verfahren zur Reihenfolgebildung aus der PPS (vgl. Tabelle 4-3) gezählt. Situativ agierende Agenten können egoistisch (Maximierung des eigenen Nutzens) oder kooperativ (Maximierung des Gesamtnutzens einer bestimmten Agentengruppe) entscheiden und handeln. In Abhängigkeit der Systemkonfiguration ist es bspw. möglich, die Verhaltensweise während der Betriebsphase anzupassen.
- Interaktionen: In dieser Kategorie werden andere Rollen hinterlegt, mit denen die Rolle kommuniziert.
- Parameter: Hier werden die unterschiedlichen Merkmale der Rolle beschrieben (vgl. Objektmerkmale) und im Idealfall direkt einem Datentyp zugeordnet.
- Prozessablauf: Im Prozessablauf der Rollen sind nicht die Prozesse der einzelnen Aufgaben hinterlegt, sondern das Hauptprogramm einer Rolle, in welcher die einzelnen Zustände und Zustandsübergänge beschrieben sind.

Um diese Kategorien zu füllen, werden zunächst die aus der DMM abgeleiteten Rollen mit ihrem Namen, der Agentenart und ggf. der Spezifikation der physischen Komponenten angelegt. Anschließend werden die vordefinierten Aufgaben durch die anwendungsspezifischen Daten aus der DMM erweitert und ggf. reduziert. Daraufhin werden die vordefinierten Parameter (Merkmale) der Rollen überprüft und ggf. angepasst. Mit diesen Informationen wird ein erstes Strukturdiagramm (UML) der Rollen angefertigt, in welchem jede Rolle durch eine Klasse dargestellt ist (vgl. Abbildung 5-17 und Abschnitt 10.3.4.1). In den einzelnen Kästen ist die Rolle über ihren Namen, ihre Merkmale und ihre Aufgaben beschrieben. Durch unterschiedliche Pfeile werden die Abhängigkeit der Rollen zueinander und die daraus abzuleitende Interaktion spezifiziert. Als Hilfsmittel wird die erstellte DSM der Funktionen verwendet. Stehen zwei Funktionen in Relation zueinander und sind diese Funktionen zwei unterschiedlichen Rollen zugeordnet, resultiert ein funktionaler Zusammenhang der Rollen, dessen Ausprägung zu definieren ist. Zur systematischen Erstellung des Diagramms können diese Relationen zunächst unbestimmt eingezeichnet und in einem zweiten Schritt spezifiziert werden. In Abbildung 5-17 handelt es sich um drei Rollen, die bspw. zur Realisierung eines Zuführprozesses miteinander interagieren müssen, jedoch keinen strukturellen Zusammenhang aufweisen.

5.6 Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

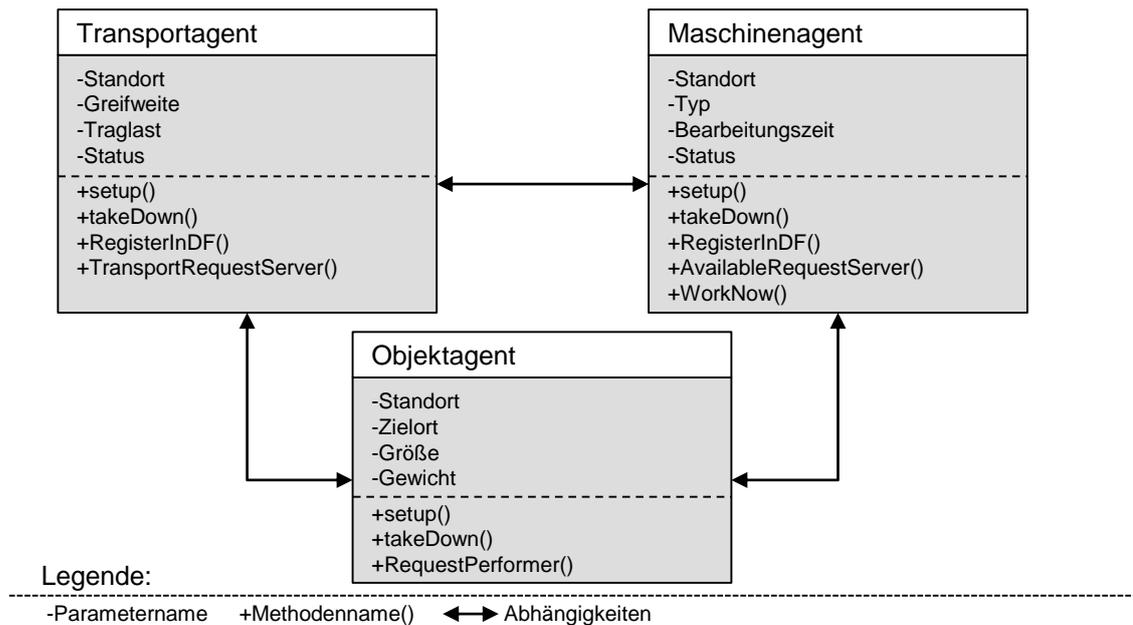


Abbildung 5-17: Strukturdiagramm verschiedener Agentenrollen - Auszug

Aus dem Strukturdiagramm werden die unterschiedlichen Interaktionen der Rolle abgeleitet und in die Beschreibung integriert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, einen Auszug des Strukturdiagramms als Bild in die Beschreibung zu übernehmen. Um die Aufgaben, die Verhaltensweisen sowie den Prozessablauf inkl. der Zustände im Detail zu bestimmen, ist die Anzahl der Agenten und ihre Varianz innerhalb der Rollen erforderlich.

III.II.I: Identifikation von Agenten: In Abhängigkeit des ausgewählten Szenarios des zugehörigen Produktionsprogramms und der benötigten Betriebsmittel werden die benötigten Agenten identifiziert und vorab einer definierten Rolle zugeordnet. Auf diese Weise entsteht eine Datenbank der benötigten Agenten, im Folgenden als Agentenpool bezeichnet. Für die Erstellung dieser Datenbank werden Betriebsmittel vollständig aufgenommen, d. h. redundante Anlagen werden mehrfach eingetragen und direkt mit einer individuellen ID versehen. Objekte werden lediglich einmal im Agentenpool aufgeführt. Im nächsten Schritt werden für jeden Agenten die Aufgaben spezifiziert.

III.II.II: Spezifikation der Aufgaben von Agenten: Um den Aufwand zu reduzieren, werden zunächst die Aufgaben aus den Rollenbeschreibungen untersucht und zu diesem Zweck die Aufgabe in einem Aktivitätsdiagramm (UML) dargestellt (vgl. Abschnitt 10.3.4.1). Bestandteil dieser Diagramme sind eingehende und abgehende Informationen, welche wiederum die Schnittstellen zu anderen Agenten detaillieren. Nachdem diese Diagramme für alle Aufgaben erstellt wurden, werden

diese aus Sicht der einzelnen Agenten untersucht und ggf. spezifisch angepasst. Eine beispielhafte Detaillierung einer Aufgabe ist die Erfassung der Lagerzeit eines Produkts, welches im Lager reifen oder abkühlen muss. Aus der Summe der Aktivitätsdiagramme sind die verschiedenen Betriebszustände der Rollen ableitbar, welche in einem Zustandsdiagramm (UML) (vgl. Abschnitt 10.3.4.1) dargestellt werden. Diese Zustandsdiagramme stellen einen ersten Entwurf dar, welcher im Rahmen der folgenden Designphase zu erweitern ist. Die Anpassungen der Aufgaben werden abschließend gesammelt dokumentiert und für die Überprüfung und Erweiterung der Rollen genutzt.

III.II.III: Überprüfung der Zuordnung und Erweiterung der Rollen: Ein Beispiel für die Erweiterung einer Rolle basierend auf der Detaillierung der Aufgaben ist die zusätzliche Benachrichtigung von Maschinenagenten untereinander aufgrund schwankender prozessspezifischer Bearbeitungsparameter. Bedarf eine Rolle wegen einer kleinen Menge von Agenten oder eines einzelnen Agenten eine umfassende Anpassung, wird eine neue Rolle hinzugefügt und das Strukturdiagramm entsprechend erweitert.

III.II.IV: Überprüfung der Rollen: Nachdem alle Felder der Rollenbeschreibung ausgefüllt wurden, wird die Rolle abschließend einem Plausibilitätscheck unterzogen, welche auf den Kriterien zur Rollendefinition der ZEUS-Methode basiert (vgl. Tabelle 3-7). Zu diesem Zweck wurden die Kriterien in Fragen umformuliert, die der Anwender für jede Rolle mit „Ja“ beantworten sollte:

- Modularität: Kann diese Rolle sequenziell oder gleichzeitig von verschiedenen Agenten übernommen werden?
- Kohäsion: Sind die korrespondierenden Aufgaben und enthaltenen Funktionen der Rolle eindeutig definiert?
- Sparsamkeit: Sind der Rolle unnötige Aufgaben zugeordnet? Kann das Aufgabenspektrum reduziert werden?
- Vollständigkeit: Kann die Rolle in eine andere Rolle integriert werden, ohne die Kriterien Modularität, Kohäsion oder Sparsamkeit negativ zu beeinflussen?
- Koppelung: Sind alle eingetragenen Interaktionen und Abhängigkeiten der Rolle zu anderen Rollen notwendig?

Die zentralen Ergebnisse der Systemdetailplanung bilden das Strukturdiagramm, die Rollenbeschreibungen sowie die im Agentenpool gesammelten Beschreibungen der Agenten ihrer Aufgaben in Form von Aktivitätsdiagrammen.

5.6.3.4 IV: Designphase

Aufbauend auf der detaillierten Beschreibung der Agenten wird im nächsten Schritt die Implementierung vorbereitet. Das Design des Agentensystems findet in Anlehnung an *SAMII* auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen statt, sodass parallel die Eigenschaften der Agenten als auch des Produktionssystems selbst für die Implementierung modelliert werden.

IV.A: System: Nachdem die Agenten selbst in der Planungsphase beschrieben wurden, wird in der Designphase zunächst auf der Systemebene eingegangen. Ziel dieses Schritts ist es, den Ablauf des Gesamtsystems zu beschreiben und die benötigten Interaktionen zwischen den Agenten auszuarbeiten. Als Input dienen die modellierte Systemstruktur sowie die erarbeiteten Aktivitätsdiagramme.

IV.A.I: Ausarbeitung der Kommunikation: Den ersten Teilschritt stellt die Ausarbeitung der Kommunikation dar. Auf Basis der identifizierten Interaktionen aus der Systemstruktur und den auszutauschenden Daten aus den Aktivitätsdiagrammen werden im nächsten Schritt Kommunikationsszenarien für jede Interaktion ausgearbeitet und die Inhaltssprache definiert. Hierzu wird die minimale Anzahl an Nachrichten ermittelt, welche für eine Interaktion benötigt werden. Anschließend wird jede Nachricht im Detail ausgearbeitet. Ziel ist es, den Inhalt der Nachricht zu modellieren und zu ermitteln, welche Informationen in welcher Nachricht versendet werden. Zu diesem Zweck werden Sequenzdiagramme (UML) verwendet, in denen jede Interaktion in ihre inkrementellen Bestandteile zerlegt wird. Im Rahmen der Programmierung und Implementierung stellen diese einen bestimmten Befehl dar. Der Aufbau der Interaktion ist vorrangig von der Kommunikationsstrategie abhängig. Demzufolge muss der Anwender an dieser Stelle entscheiden, ob die Interaktion bspw. über einen Eintrag in eine Liste (Blackboard-Architektur) oder über eine direkte „Unterhaltung“ (Message-Passing) erfolgen soll. Als Entscheidungsgrundlage wird aus den UML-Modellen die Anzahl der beteiligten Agenten abgeleitet und in das Sequenzdiagramm eingetragen. Ist eine Aktion oder eine Entscheidung von dem Input mehrerer verschiedener Rollen abhängig, ist es für den angefragten Agenten sinnvoll, zunächst die Informationen zu sammeln, um anschließend basierend auf einer Analyse der Alternativen zu handeln. Diese Konstellation spricht für eine Blackboard-Architektur. Muss hingegen sehr schnell eine Entscheidung getroffen werden, ist eine direkte Kommunikation über Message-Passing vorteilhaft. Eine allgemeingültige Regel für verschiedene Konstellationen ist in diesem Fall nicht ableitbar.

5 Methodik zur Planung und Konfiguration von MASS

In Abhängigkeit der Produktion können in Relation zur Rechenzeit des Agentensystems, welche wiederum von der eingesetzten Hardware, dem Netzwerk und der Anzahl der Agenten in der Betriebsphase abhängt, alle oder keine der Interaktionen als zeitkritisch deklariert werden. Aus diesem Grund sollen die Vor- und Nachteile der Strategien (vgl. Tabelle 10-7) als Entscheidungsbasis dienen. Darüber hinaus wird in diesem Teilschritt bestimmt, welcher Agent die Initiative für eine Verhandlung ergreift. Zu dieser Entscheidung konnte aus der Anwendung der Methodik ein Zusammenhang hinsichtlich der Produktionsalternativen aus Sicht der Objekte und der Betriebsmittel hergeleitet werden (vgl. Tabelle 5-4). Ist pb_o (mittlere Anzahl an Alternativen eines Objekts) deutlich größer als pp_r (mittlere Anzahl der Alternativen eines Betriebsmittels), wird die Entscheidung über den nachfolgenden Produktionsprozess durch den Agenten des Betriebsmittels getroffen. Im umgekehrten Fall sollte die Entscheidung durch den Objektagenten getroffen werden. Auf diese Weise wird die Entscheidung stets von jener Instanz getroffen, die mehr Auswahlmöglichkeiten besitzt und die Wahrscheinlichkeit eines lokalen Optimums erhöht.

IV.A.II: Modellierung Ontologie: Nachdem die einzelnen Nachrichten und deren Inhalt festgelegt wurden, muss das Vokabular der Agenten, die sog. Ontologie, modelliert werden. Eine Ontologie besteht aus Konzepten, welche die Systemdomäne beschreiben, Prädikaten, welche die Konzepte charakterisieren, und Aktionen (vgl. Aktivitätendiagramm), die ein Agent ausführen kann. In diesem Schritt werden die einzelnen Bestandteile unter den Vorgaben des ausgewählten Frameworks mit einer Syntax versehen (vgl. Abbildung 5-18). Das Konzept „Objekt“ ist der Agentenaktion „Transport“ zugeordnet und wird durch verschiedene Parameter (Prädikate) beschrieben. Zum Beispiel stellen die Parameter „objektX“ und „objektY“ vereinfacht den Standort des Objekts dar. Für Details zu Ontologien wird auf die frameworkspezifischen Quellen in Tabelle 10-3 verwiesen. Abschließend werden den Parametern Datentypen, z. B. double, zugewiesen.

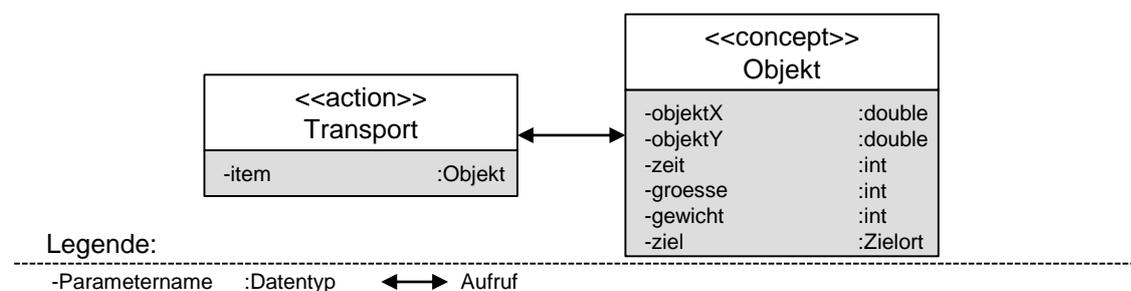


Abbildung 5-18: Beispielhafter Auszug einer Ontologie

5.6 Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen für Selbststeuerungssysteme

IV.B: Agent: In diesem parallelen Schritt werden die Agenten isoliert betrachtet. Analog zur Systemebene ist das Ziel eine detaillierte Konfiguration, aus welcher der Programmcode ableitbar ist. Zunächst wird die interne Struktur bestimmt und anschließend der interne Ablauf definiert. Im Gegensatz zur Systemebene, in welcher alle Interaktionen agentenspezifisch zu untersuchen sind, um die Menge an Interaktionen zu begrenzen, können die folgenden Schritte auf der Agentenebene zunächst auf die definierten Rollen angewandt und anschließend auf die einzelnen Agenten übertragen und angepasst werden, um den Aufwand der Modellierung zu reduzieren.

IV.B.I: Definition der internen Struktur der Agenten: In diesem Schritt wird mithilfe des Agentenpools und den Aufgabenbeschreibungen der Agenten die interne Struktur jedes Agenten spezifiziert. Die interne Struktur des Agenten beschreibt, welche Parameter, Methoden und Zustände er zur Erfüllung seiner Aufgaben benötigt. Parameter, Methoden und Zustände werden zunächst in einem agentenspezifischen Strukturdiagramm dargestellt. Die Inhalte des Diagramms können zusätzlich in einer MDM mit den Domänen Parameter, Methoden und Zustände dargestellt werden. Durch die Matrixdarstellung wird die Identifikation komplexerer Zusammenhänge vereinfacht. Ziel ist die Definition der minimalen Anzahl benötigter Zustände und die Zuordnung der Methoden zu diesen Zuständen, um zu bestimmen, in welchem Zustand welches Unterprogramm gestartet wird. Beispielsweise stellt ein Objektagent erst eine Bearbeitungsanfrage, nachdem er den Zustandswechsel von der Initialisierung zum Betrieb vollzogen hat. Die möglichen Zustandswechsel stellen die möglichen internen Abläufe des Agenten dar.

IV.B.II: Beschreibung des internen Ablaufs der Agenten: Sofern sich der Anwender für die Verwendung der MDM als Hilfsmittel entscheidet, werden die Zustandswechsel in der enthaltenen DSM der Zustände als gerichtete Relationen eingetragen und für jede dieser Relationen Bedingungen definiert. Die Relationen und Bedingungen bilden alle benötigten Informationen zur Erstellung eines Zustandsdiagramms (UML) (vgl. Abschnitt 10.3.4.1). Alternativ kann das Zustandsdiagramm direkt erstellt werden.

Die aufbereitete Interaktion (Sequenzdiagramm, Syntax und Datentypen), die elementaren Bestandteile der internen Struktur (Klassendiagramm) und der interne Ablauf (Zustands- und Aktivitätsdiagramme) der Agenten stellen die zentralen Ergebnisse der Designphase dar.

5.6.3.5 V: Implementierung und Test

Um die Anforderung der Vollständigkeit (*AM5*) zu erfüllen und eine kombinierte Entwicklung mit der Fabrikplanung (*AMI*) zu ermöglichen, werden die modellierten Agenten abschließend in einen Steuerungscode überführt, welcher für eine Evaluation der Systemkonfiguration verwendbar ist.

Im Rahmen der Implementierung wird zunächst ein initialer Programmcode generiert. An dieser Stelle wird in der vorliegenden Methode die erarbeitete und stetig detaillierte Vorlage der Rollenbeschreibung verwendet. Diese ist mit einem Codegenerator verlinkt, welcher aus den Beschreibungen der einzelnen Kategorien einen kommentierten Programmcode erstellt. Der Code-generator wird für jeden Agenten einzeln angewandt, um eine finale Überprüfung der Beschreibung unter Verwendung der erstellten UML-Diagramme zu gewährleisten. Die Funktionsweise des Codegenerators und die Umsetzungsschritte sind in Abschnitt 6.1 beschrieben.

Sobald der vollständige Code fehlerfrei kompiliert wird, erfolgt die Evaluation des Codes sowie der Systemkonfiguration. Um schnell ein Feedback zu bekommen und eine Rückkopplung zur Fabrikplanung zu ermöglichen, wurde für den abschließenden Schritt der Methode und der Methodik ein Evaluationstool entwickelt, mit welchem unter Verwendung des Steuerungscode das gesamte System (Fertigungs-, Transport-, Objektagenten, etc.) überprüft wird. Hierzu werden Testläufe mit unterschiedlichen Konfigurationen des Agentensystems, u. a. unterschiedliche Ausfallwahrscheinlichkeiten und unterschiedliche Anzahl an Produktagenten, durchgeführt, parallel visualisiert und anschließend ausgewertet. Aus der Auswertung sind unterschiedliche Bewertungsgrößen ablesbar. Beispielsweise werden die Auslastungen der Betriebsmittel berechnet und alle relevanten Zeitintervalle (z. B. Gesamt-, Bearbeitungs-, Lager- und Transportzeit) erfasst.

Stellt die Systemkonfiguration ein zufriedenstellendes Ergebnis dar, kann das Selbststeuerungssystem in der Produktion implementiert werden. Andernfalls werden die Konfiguration und ggf. der Programmcode weiter angepasst und anschließend erneut getestet, bis das Produktionssystem die eingangs definierten Ziele und zusammenfassend die gewünschte Performance erreicht.

5.7 Zusammenfassung der Methodik

Die Unterstützung der erstellten Methodik sowie der einzelnen enthaltenen Methoden reicht von der initialen Idee, ein MASS zu verwenden, bis hin zu dessen softwaretechnischen Implementierung. Hierbei wird zunächst zweistufig die Eignung eines MASS in einer frühen Planungsphase untersucht, um ggf. unnötige Planungsaufwände zu minimieren. Die durchzuführenden Schritte wurden hierbei sehr schlank gestaltet, sodass mehrere Szenarien betrachtet werden können. Im Rahmen der Eignungsprüfung hinsichtlich des vorliegenden Produktspektrums werden parallel die identifizierbaren Merkmale der Objekte definiert, welche das Fundament eines MASS bilden. Die Integration und Implementierung von Identifikationssystemen wird ebenfalls durch eine umfangreiche Beschreibung der integrierten Identifikationsverfahren unterstützt (vgl. Tabellen 8-9 bis 8-20). Sobald sich das Abbild der Produktion in der parallelen Fabrikplanung konkretisiert hat und die für ein MASS notwendigen zusätzlichen Systemkomponenten (z. B. Sensoren zur Identifikation) bestimmt wurden, erfolgt die Entwicklung eines Agentensystems zur Sicherstellung der Kommunikationsfähigkeit aller Systemkomponenten.

Die größte Herausforderung in der Gestaltung der Methodik und der Methoden bestand in der Minimierung des Interpretationsspielraums. Durch die unterschiedlichen Themenbereiche und die Anwendung parallel zur Fabrikplanung mussten themenfremde Anwender berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden in Summe mehr als 35 Werkzeuge zur Unterstützung der Vorgehensweisen entwickelt, in welchen das benötigte Expertenwissen integriert wurde. Ein Großteil dieser Werkzeuge ist softwarebasiert, welche den Planungsschritt (teil-) automatisiert durchführen.

Im folgenden Kapitel wird zunächst auf die softwaretechnische Umsetzung der wichtigsten bzw. komplexesten Werkzeuge eingegangen. Anschließend werden die Methodik und ihr Zusammenspiel mit der parallelen Fabrikplanung im Rahmen einer exemplarischen Anwendung nochmals verdeutlicht. Basierend auf der exemplarischen Anwendung und einem resultierenden MASS werden der Systemansatz und die Methodik bewertet.

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

In diesem Kapitel wird zunächst auf die softwaretechnische Umsetzung einzelner Werkzeuge der Methodik eingegangen. Anschließend wird die Anwendung der Methodik unter Verwendung dieser Werkzeuge erläutert und evaluiert. Um auf die unterschiedlichen Aspekte der Methodik einzugehen und die Schnittstellen der einzelnen Methoden untereinander sowie zur parallelen Fabrikplanung zu verdeutlichen, wurde die Planung im Rahmen des Forschungsprojekts RoboFill4.0 als durchgängiges Anwendungsbeispiel gewählt. In dem Projekt wurden sämtliche Bestandteile der Methodik angewandt und erprobt, um eine produzierende Abfüllanlage zu realisieren. Zur Überprüfung der Anforderungen der Skalierbarkeit und Wiederverwendbarkeit sowie zur Demonstration der Einsatzfähigkeit der Werkzeuge wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Um eine übersichtliche und durchgängige Anwendung der Methodik darzustellen, wird auf die darauf folgende weiterführende Umsetzung an relevanten Stellen verwiesen. Abschließend erfolgt eine technische und wirtschaftliche Bewertung.

6.1 Softwaretechnische Umsetzung der Werkzeuge

Dieser Abschnitt fokussiert die elementaren Werkzeuge der vier Methoden, deren Umsetzung in der Erstellung den größten Anteil eingenommen haben und für den Anwender die größte Zeitersparnis in der Anwendung der Methodik bedeuten. Um die Anforderungen der Benutzerfreundlichkeit und Erweiterbarkeit zu adressieren, wurden alle Werkzeuge mit Microsoft Excel erstellt, da dies das am weitesten verbreitete Tabellenkalkulationsprogramm darstellt. Eine Übersicht der erstellten Werkzeuge und der verwendeten Programme ist in Tabelle 10-21 dargestellt.

6.1.1 Werkzeug zur Merkmalsanalyse und Sensorauswahl

Basis des Werkzeugs bildet die modulare Beschreibung von allgemeinen Objektmerkmalen, welche dem vorliegenden Objektspektrum gegenübergestellt wird. Auf diese Weise entsteht eine Tabelle mit einheitlichen Referenzen der Objekte zu ihren Merkmalen, welche als Input für die automatisierte Merkmalsanalyse dient.

Zunächst überprüft das Werkzeug, ob identische Objektbeschreibungen vorliegen. Hierzu werden in diesem Analysetool alle Zeilen paarweise miteinander verglichen und eine Prüfsumme ermittelt, welche der Spaltenanzahl entspricht.

Identische Zeilen werden extrahiert und zur Prüfung in einem separaten Tabellenblatt dargestellt. Wird für jede Dopplung eine plausible Erklärung gefunden, welche den Einsatz eines MASS nicht beeinträchtigt, werden alle Dopplungen gelöscht. Mit den verbleibenden Werten wird für jedes Merkmal das Erkennungsverhältnis (EV) berechnet (vgl. Abschnitt 5.4.3.2). Zur Bestimmung des EV werden zunächst alle Duplikate der Merkmalsausprägungen (Werte) ausgeblendet. Anschließend werden die vorliegenden Werte eingelesen, in einer separaten Liste dargestellt und für jeden Wert die Funktion „ZÄHLENWENN“ implementiert. Daraufhin werden die Duplikate wieder eingeblendet und die „ZÄHLENWENN“-Funktion auf die Spalte angewandt. Auf diese Weise können alle Werte extrahiert und benannt werden, welche eindeutig sind. Die Menge dieser Werte wird wiederum durch die Gesamtzahl der Zeilen der erweiterten Objekt-Merkmal-DMM dividiert und auf diese Weise das EV berechnet. Aus der separaten Liste geht zudem die Anzahl der einzelnen Ausprägungen hervor. Diese Operation wird für alle Merkmale durchgeführt, bis jedes EV berechnet wurde. Im Anschluss liest der Algorithmus die einzelnen Spalten absteigend nach ihrem EV ein und blendet die eindeutigen Werte sowie ihre zugehörigen Zeilen aus. Wenn ein EV bspw. 0,7 (70 %) beträgt, werden im nächsten Schritt lediglich noch 30 % der ursprünglichen Liste weiter analysiert. Die im ersten Iterationsschritt gefilterten Objekte sind folglich über ein einziges Merkmal identifizierbar.

Im nächsten Iterationsschritt wird für die reduzierte Liste ein temporäres EV (EV*) berechnet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis ein EV* den Wert 1 annimmt und folglich keine weiteren Merkmale zur Identifikation benötigt werden (vgl. Abbildung 5-7). Abschließend wird eine vereinfachte Objekt-Merkmal-DMM erstellt. In dieser befinden sich nicht die Merkmalsausprägungen, sondern die Information, mit welchen Merkmalen das Objekt zu identifizieren ist. Diese Objekt-Merkmal-DMM wird anschließend mit der Merkmal-Sensorklasse-DMM multipliziert, sodass sich eine Vorauswahl geeigneter Sensorklassen zur Identifikation der Objekte ergibt. Der Wert in der entstehenden Objekt-Sensorklasse-DMM gibt an, wie viele der benötigten Merkmale eines Objekts durch die Sensorklasse erfassbar sind. Diese Information ist essenziell, um eine minimale und somit wirtschaftliche Varianz einzusetzender Sensoren zu erhalten. Die Zuordnung der Objekte zu den Sensoren ermöglicht in Verbindung mit den szenariospezifischen Absatzzahlen der einzelnen Produkte, welche aus den Objekten bestehen, die Bestimmung der erforderlichen Sensoranzahl. Diese Werte nehmen Einfluss auf die Auswahl spezifischer Sensoren und die abschließende Kostenindikation, welche somit durch dieses zentrale Werkzeug der Merkmalsdefinition vorbereitet wird.

6.1.2 Kombiniertes Werkzeug zur Rollendefinition und Codegenerierung

Dieses softwarebasierte Werkzeug verbindet die Vorlage zur Rollenbeschreibung mit den erarbeiteten Listen der spezifischen Rollen, Agenten und Aufgaben im produktionstechnischen Umfeld (vgl. Abbildung 5-16). Diese Informationen sind zudem mit einem Programm zur automatischen Codegenerierung verlinkt und stellen in Summe das kombinierte Werkzeug dar. In Abschnitt 5.6.3.3 sind die entwickelten Kategorien zur Definition einer Rolle und ihrer Verhaltensweise geschildert. Für die Beschreibung wurden erweiterbare Dropdown-Auswahllisten hinterlegt, welche miteinander verlinkt sind. Auf diese Weise wird mit jeder Auswahl ein Teil der nächsten Kategorie bereits ausgefüllt. Wird bspw. ein Objektagent angelegt, werden grundlegende Haupt- und Nebenaufgaben automatisch definiert (vgl. Screenshot, Abbildung 6-1).

Objektagent						
Agentenart	physischer_Agent		Allgemeine Beschreibung			
Agententyp	Werkstück					
Aufgaben	Hauptaufgaben	Setup Clean-up Produktion durchlaufen Fehlerbehebung	Die Rolle Objektagent beinhaltet Agenten, die ein virtuelles Abbild zu einem Werkstück des Produktionssystems darstellen.			
	Unteraufgaben	Anmeldung Agentenplattform Abmeldung Agentenplattform			Bearbeitungstyp	Bearbeitungstyp auswählen (nur bei Bearbeitungsmaschine)
	Funktionen	Parameter initialisieren Service von DF abmelden			Framework	JADE
Verhalten	Regelbasiert	First-In-First-Out (FIFO) Last-In-First-Out (LIFO)	Dateipfad	H:\Agentensystem\ Generierter Programmcode		
	Situativ	Kooperativität Proaktivität Egoismus			Zustände	initialisiert aktiv wartend verloren abgemeldet
Interaktionen	Transportagent Fertigungsagent Lageragent Verwaltungsagent Lokalisierungsagent		[Bild von Rollendiagramm einfügen]			
Parameter	Standort Werkstück Zielstandort Werkstück Produktionszeit Größe Werkstück Gewicht Werkstück Prüfmöglichkeiten Objekterkennung Bearbeitungszustände Werkstück Bestandteile Objekt					
Prozessablauf	[Link Prozessablauf]					

Abbildung 6-1: Beispiel einer Rollenbeschreibung - Auszug

Um die Vorauswahl anzupassen, kann der Anwender nach der Eingabe eines Passworts die Dropdown-Auswahllisten wie auch deren Verlinkungen anpassen. Dieses Prinzip wurde für verschiedene Werkzeuge wie bspw. die Vorlage zur Erstellung neuer integrierter Identifikationsverfahren angewandt. Die Dropdown-Auswahllisten sichern eine einheitliche Benennung. Diese ist essenziell, um aus

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

der Rollenbeschreibung den Code des Agenten abzuleiten. Hierzu wurden Tabellen erstellt, welche der Eingabe in der Rollendefinition eine Codezeile zuordnet (vgl. Abbildung 6-2). Auf diese Weise ist die Codegenerierung einfach einsehbar und analog zu den Dropdown-Auswahllisten anpassbar. Die ausgewählten Verhaltensweisen der Rolle sind in dieser Tabelle nicht zu finden. Sie bestimmen das Zustandsdiagramm der Rolle und somit über die Anordnung und Verknüpfung der einzelnen Codezeilen. Die Ausgabe des Codegenerators ist ein vordefinierter Agent als txt-Datei, sodass sie für jeden Anwender über einen einfachen Editor einsehbar ist. Diese Datei beinhaltet eine umfassende Kommentierung, sodass Platzhalter für agentenspezifische Eigenschaften in einer Programmierumgebung, z. B. Eclipse, zudem farblich hervorgehoben werden.

Eingabe	Programmcode
Standort Maschine	<code>double[] standort = new double[2]; // Standort der Maschine</code>
Bearbeitungszeit Maschine	<code>int bearbZeit = 5; // Bearbeitungszeit der Maschine</code>
Rüstzeit Maschine	<code>int ruestZeit = 5; // Rüstzeit der Maschine</code>
Wartungsintervall Maschine	<code>int wartInt = 5; // Wartungsintervall der Maschine</code>
Status Maschine	<code>boolean available = true; // Verfügbarkeitsstatus der Maschine</code>

Abbildung 6-2: Screenshot – Wertezuweisung des Codegenerators

Im Anschluss muss der Anwender den Programmcode lediglich über das Ausfüllen der Platzhalter anpassen und somit komplettieren. Die Verwendung des Codegenerators ist an die Verwendung von JADE als Framework gebunden. Wird ein anderes Framework ausgewählt, müsste der Codegenerator um weitere Listen und Kombinationsalgorithmen erweitert werden. Alternativ gilt es, den Code analog zu anderen Entwicklungsmethoden basierend auf den UML-Diagrammen manuell zu erstellen. Durch die Verwendung der UML-Diagramme besteht aber zudem die Möglichkeit, andere Open-Source Generatoren für Java oder JavaScript zu verwenden, sodass der Aufwand reduziert werden kann. In diesem Fall wird empfohlen, analog zum entwickelten Codegenerator zunächst eine Codestruktur basierend auf den Rollenbeschreibungen zu programmieren und diese anschließend auf die einzelnen Agenten anzupassen. Sofern viele Erweiterungen notwendig sind, ist die Anpassung des Programmcodes an den vorliegenden Anwendungsfall und einzelnen Agenten unterschiedlich umfangreich. Liegt für eine Methode keine vordefinierte Syntax vor, ist in diesem Fall dieser Abschnitt des Codes neu zu erstellen. Der neu geschriebene Code wird nach einem initialen Test als Vorlage hinterlegt, um diesen im Rahmen der iterativen Implementierung für weitere Agenten nutzen zu können. Der Programmcode wird folglich stetig weiterentwickelt und angepasst (vgl. Abbildung 5-2).

6.1.3 Simulations- und Evaluationstool

Um den erstellten Code und die entwickelte Systemkonfiguration zu testen, wurde ein Simulations- und Evaluationstool entwickelt. Für die Konfiguration werden die erstellten Agenten in eine Konfigurationstabelle kopiert und durch ein Objektspektrum erweitert, d. h. unterschiedliche Objektagenten werden aktiviert und vervielfältigt. Die Agenten der Betriebsmittel werden bspw. mit prognostizierten Prozesszeiten und Zuverlässigkeiten versehen. Anschließend werden das Agentensystem basierend auf JavaScript gestartet und je nach Testszenario während der Laufzeit weitere Agenten hinzugefügt. Um den Test zu beschleunigen, sind die Prozesszeiten um einen einheitlichen Faktor reduzierbar. Entscheidend ist, dass zur Simulation und Evaluation kein zusätzlicher Programmieraufwand entsteht. Es werden lediglich die Schnittstellen zwischen HLC und LLC auskommentiert und die Rückgabezeiten mit Timern ersetzt. Auf diese Weise wird der spätere Steuerungscode direkt für die Evaluation des aktuellen Planungsstands der Fabrikplanung genutzt, welche auf zusätzliche Materialflusssimulationen verzichten kann und sehr stark von den Ergebnissen profitiert. Der Ablauf wird parallel in einer vereinfachten Simulation dargestellt, in welcher zudem durch die Position der einzelnen Betriebsmittel ein Groblayout der Fabrik dargestellt ist (vgl. Abbildung 6-3). Nach dem Testlauf wird die gesamte protokollierte Interaktion der Agenten automatisch in eine Excel-basierte Evaluationsvorlage gespeichert und entsprechend umformatiert. Hieraus ergeben sich produktionstechnische Kennzahlen für alle Systemelemente, welche die Weiterentwicklung der Produktion wie auch der Agenten unterstützen.

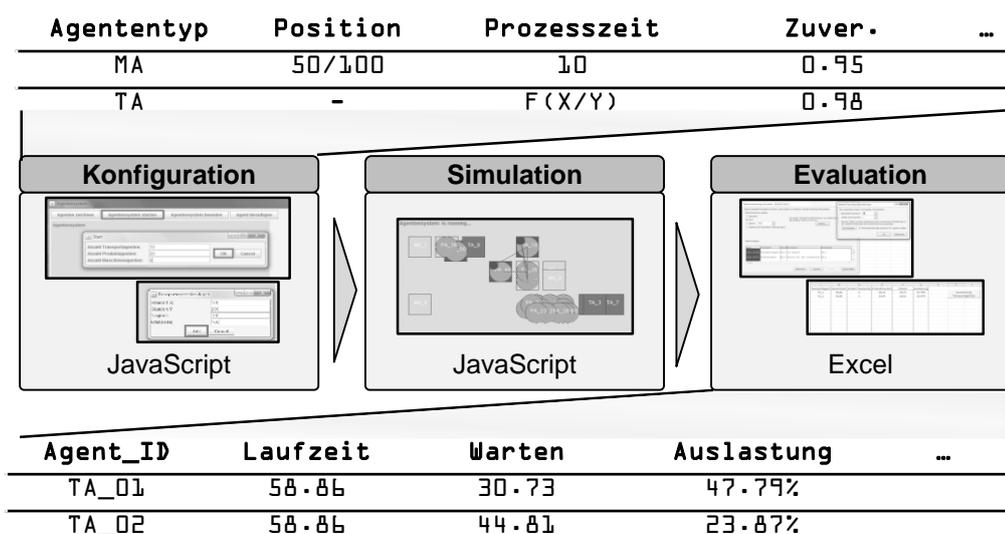


Abbildung 6-3: Vorgehen des Evaluationstools

6.2 Anwendung am Beispiel des Projekts RoboFill4.0

Als durchgängiges Beispiel wird die Planung und Entwicklung eines Produktionssystems zur individuellen und vollautomatisierten Abfüllung von Getränken im Rahmen des Forschungsprojekts RoboFill4.0 verwendet (NEUGRODDA ET AL. 2019). In diesem Anwendungsfall wurde die Methodik in enger Abstimmung mit der Fabrikplanung angewandt.

In der Getränkeindustrie werden gewöhnlich große Mengen in starren Anlagen produziert. Ziel des Forschungsprojekts war es, eine nachweislich wirtschaftliche Produktion von kundeninnovierten Produkten in der Getränkeindustrie zu entwickeln. Um dies zu erreichen, wurde eine dezentrale Steuerungsarchitektur in Form eines Selbststeuerungssystems angestrebt. Die Anlagenmodule sollten über eine Intelligenz verfügen und mit einem Kundenportal verbunden werden, sodass die kundenindividuelle Bestellung automatisch hergestellt wird (vgl. Abbildung 6-4).

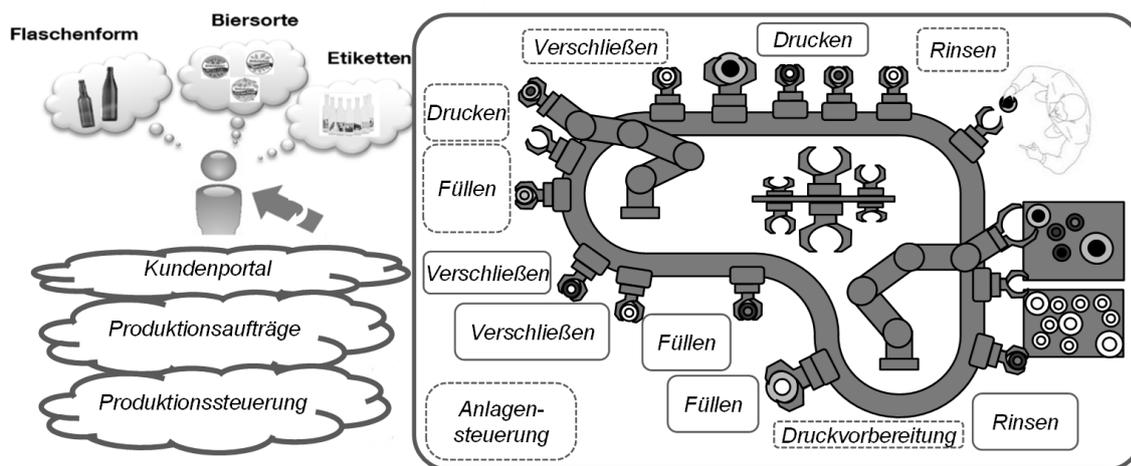


Abbildung 6-4: Zielbild Forschungsprojekt RoboFill4.0

Aufgrund der geringen Margen der Getränkeindustrie, welche die Kosten von Identifikatoren nicht deckt, galt es, alternative Lösungswege zu identifizieren. Der Beitrag der entwickelten Methodik für die Planung und Entwicklung der geschilderten Anlage wird im Folgenden beschrieben. In Auszügen sind die Ergebnisse der parallelen Fabrikplanung dargestellt, um die methodischen Schnittstellen zu verdeutlichen. Die Arbeitsinhalte der Fabrikplanung sind entsprechend gekennzeichnet.

6.2.1 Eignungsprüfung

Zu Beginn der Planung wurden analog zur Methodik zunächst die Ziele, das Produktspektrum und die Stakeholder definiert. Aus diesen Informationen wurden verschiedene Szenarien erarbeitet.

Fabrikplanung & Eignungsprüfung: Die Definition der Stakeholder orientierte sich im Rahmen des Forschungsprojektes an den einzelnen Forschungs- und Industriepartnern, denen durch die Projektstruktur bereits verschiedene Themengebiete zugeordnet wurden. Beispielsweise bestand die Hauptaufgabe des Fraunhofer IGCV in der Planung des Materialflusssystems (KIEFER 2019).

Aus den Projektzielen wurden verschiedene Szenarien deduziert, welche sowohl die geplante Demonstratoranlage mit geringen Stückzahlen als auch verschiedene Konzepte für eine individuelle Massenproduktion adressierten. Analog zur Szenariospezifikation (vgl. Tabelle 5-3) wurden unterschiedliche Produktportfolios und Betriebsmittel für die Abfüllanlage konzipiert, welche aus einer allgemeinen Prozessanalyse resultierten (vgl. Abbildung 6-5). Da die Anlage Unikate in Form von kundeninnovierten Produkten herstellen soll, wurden die Absatzzahlen der Produktrepräsentanten auf die drei zu betrachtenden Flaschenformen bezogen und für die Planung gleichmäßig verteilt. Aus den definierten Zielen wurde eine geplante Ausbringungsmenge von 150 Flaschen pro Stunde festgelegt, welche im Einschichtbetrieb einer jährlichen Ausbringungsmenge von 300.000 Flaschen entspricht.

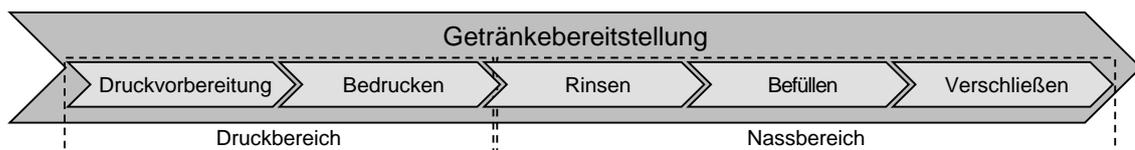


Abbildung 6-5: Prozess der Getränkebereitstellung

Zur Vernetzung der Prozessmodule wurden verschiedene Materialflusskonfigurationen erarbeitet und daraus weitere Szenarien, inkl. Handhabungsgeräten, definiert. Im Fokus des Projekts stand die Validierung des Anlagenkonzepts, sodass ausschließlich die potenziellen Betriebsmittel einen Einfluss auf die unterschiedlichen Szenarien hatten. Daher basierte die Entscheidung für ein Szenario auf der Bewertung verschiedener Materialflusskonzepte. Für diese Bewertung wurden verschiedene Kriterien gesammelt, in einem Paarweisen Vergleich gewichtet und auf die Konzepte appliziert (vgl. Tabelle 10-32 und Tabelle 10-33). Diese Betrachtung führte zum Einsatz mehrerer Roboter (vgl. Abbildung 6-6).

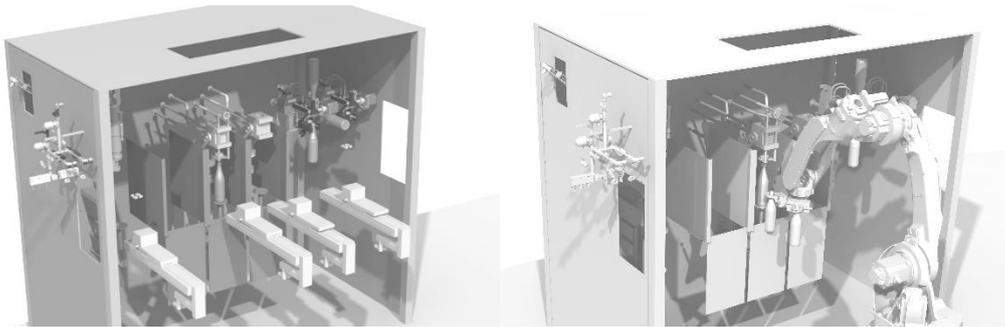


Abbildung 6-6: Auszug konkurrierender Materialflusskonzepte; lineare Zuführeinheiten (links), Roboter (rechts)

Für das ausgewählte Szenario wurde die theoretische Flexibilität berechnet. Durch die geplante Produktion von Unikaten ist die Anzahl der Objektvarianten und somit die theoretische Flexibilität unendlich, sodass die Anzahl der benötigten Betriebsmittel irrelevant war. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die durchschnittliche Anzahl potenzieller Betriebsmittel aus Sicht der Objekte bei 1,2 lag, da lediglich das Abfüllmodul und der Rinser zweifach in der Gesamtanlage verbaut wurden. Dieses Ergebnis ist für die Konfiguration des Agentensystems von Bedeutung, da in diesem Fall die Betriebsmittel die entscheidende Instanz in den Verhandlungen darstellen. Aus diesem Anwendungsbeispiel geht hervor, dass neben der theoretischen Flexibilität des Gesamtsystems die Betrachtung der Werte pp_r und pb_o eine relevante Aussage für die Systemkonfiguration darstellt. Folglich wurde der Vergleich dieser beiden Kennzahlen in den Designschritt (vgl. Abbildung 5-16) integriert und für die Gestaltung des Agentensystems berücksichtigt.

In der abschließenden Nutzwertanalyse wurde der Ansatz eines MASS mit einem IDSS und einer hierarchischen Steuerung verglichen. Das Ergebnis der Bewertung ist in Tabelle 6-1, das vorangegangene Ausfüllen der Checkliste in Tabelle 10-34 dargestellt. Aufgrund des geringen geplanten Durchsatzes der Gesamtanlage ist der Identifikationsaufwand in einem IDSS nur etwas geringer.

Tabelle 6-1: Nutzwertanalyse im Rahmen von RoboFill

Kriterium	Szenario - 3 Flaschentypen (150 Stk./h)		
	MASS	IDSS	Hierarchisch
Beherrschung Systemkomplexität	7	7	4
Erforderliche Systemflexibilität	9	9	4
Erforderliche Reaktionsfähigkeit	10	10	2
Liefertreue	8	8	4
Identifikationsaufwand	7	4	10
Nutzwert	41	38	24

6.2.2 Merkmalsdefinition

Die Merkmalsdefinition baut auf dem definierten Produktspektrum aus der Eignungsanalyse auf. Im Rahmen des Forschungsprojekts RoboFill beschränkte sich die Merkmalsdefinition auf die Analyse von drei Grundvarianten, welche über den Wareneingang in die vollautomatisierte Anlage gelangen. Hierbei wurden die Flaschentypen 0,33 l, 0,5 l und 0,66 l auf ihre unterschiedlichen Merkmale untersucht (vgl. Tabelle 6-2) und ein eindeutiges Ergebnis abgeleitet. Jeder Flaschentyp verfügte über eindeutige Merkmalsausprägungen. Darüber hinaus standen mit dem Gewicht, der Höhe und der Breite, welche für zylindrische Objekte dem Durchmesser entspricht, mehrere Merkmale für die Identifikation zur Auswahl und eine Merkmalskombination war nicht erforderlich. Um die Einsatzfähigkeit der erstellten Werkzeuge zur Merkmalsanalyse zu demonstrieren, wurde das gesamte Produktportfolio eines mittelständischen Maschinenbauunternehmens analysiert (vgl. Abschnitt 6.3.1)

Tabelle 6-2: Vergleich der Flaschentypen im Rahmen von RoboFill

	Werkstoff	Gewicht	Farbe	Länge	Breite	Höhe
Flasche _{0,33}	Glas	225	139;90;43	-	59,8	235,5
Flasche _{0,5}	Glas	270	139;90;43	-	67,5	249,5
Flasche _{0,66}	Glas	320	139;90;43	-	75,4	270

Aus der Zuordnung der Objekte zu Sensoren gingen folglich mehrere potenzielle Sensorsysteme wie Wägezellen, Abstandssensoren und unterschiedliche Kamerasysteme hervor. Unter Berücksichtigung der vollautomatisierten Anlage und der roboterbasierten Vernetzung der Module war eine eindeutige Pose der Flaschen zu jedem Produktionszeitpunkt bereits sichergestellt, sodass diese Umweltbedingungen in Verbindung mit den prognostizierten Kosten der Sensoren zur Auswahl von vergleichsweise einfachen Abstandssensoren führten. Mit diesen Sensoren wird die Flaschenform erkannt und in Verbindung mit den durch den Agenten kommunizierten Daten zur Steuerung genutzt. Trotz der vollständigen Protokollierung der Agenten, welche einen Fehlerfall absichern, wird im Rahmen des Druckprozesses gleichzeitig ein QR-Code aufgedruckt, welcher eine zusätzliche Absicherung zur Identifikation dargestellt. Dieser Code wird zur Steuerung der Flasche nicht genutzt und dient ausschließlich als Absicherung im Fehlerfall und zur Nachweisführung nach der Auslieferung des Getränks.

Für das konzeptionell betrachtete Szenario einer individuellen Massenproduktion, in welcher die Pose der Flasche nicht als bekannt vorausgesetzt werden kann, ist

der individuelle Druck der Flaschen ein geeignetes Merkmal für die Identifikation der Flaschen. Die hierzu einzusetzenden optischen Sensoren sind zudem fähig, die Form der Flasche zu erkennen. An dieser Stelle wird vermerkt, dass ein individueller Druck eine Physical Unclonable Function (vgl. Abschnitt 3.2.1) darstellt, mit welcher analog zu einer ID eine eindeutige Erkennung der Flasche möglich wäre.

Im nächsten Schritt wurden die Identifikationskosten des Systems prognostiziert und über das Werkzeug zur Kostenindikation mit einem IDSS verglichen. Da keine Kombination von Merkmalen und Sensoren zur Identifikation erforderlich war, leitete sich die Anzahl benötigter Identifikationssysteme direkt aus der Anzahl der verwendeten Handhabungssysteme und deren Bewegungsbahnen ab. Durch die Verwendung von jeweils zwei Greifern je Roboter galt es, pro Roboter zwei Abstandssensoren vorzusehen. Ebenso mussten für ein eingesetztes Umlaufsystem zwei Sensoren eingeplant werden, da dieses in der RoboFill-Anlage zwei unterschiedliche Übergabestationen ansteuert. Diese Zusammenhänge waren vor der Anwendung der Methodik nicht bekannt und wurden entsprechend nachträglich in den Schritt der Kostenindikation integriert (vgl. Abschnitt 5.4.3.3).

Für die Kosten der Abstandssensoren wurde ein Stückpreis von 200 Euro kalkuliert. Für die Inbetriebnahme der Sensoren und deren Programmierung, um drei unterschiedliche Größen zu erkennen, wurden zwei Tagessätze und somit 1600 Euro eingeplant. Folglich belaufen sich die Investitionskosten für die direkte Identifikation auf 2800 Euro. Die Betriebskosten sind in diesem Fall vollständig zu vernachlässigen, da weder eine aufwendige Wartung noch ein hoher Stromverbrauch oder jährliche Lizenzkosten für die Verwendung von sechs Abstandssensoren entstehen.

Für ein vergleichbares IDSS wurde in Anlehnung an die Kriterien und Beschreibungen nach FINKENZELLER (2015) ein Barcode als Identifikator bestimmt. Der Einsatz von RFID-Transpondern hätte weniger Lesegeräte benötigt, ist jedoch aufgrund des engen Bauraums der Anlage und der Einhausungen der einzelnen Module aus Metall sowie der vorliegenden Flüssigkeiten nicht ratsam. In diesem Fall könnten zu viele Störeinflüsse wirken und die Funktionsweise des Auto-ID-Systems negativ beeinträchtigen. Eine Abstimmung im Projektteam hat ergeben, dass in diesem Fall neben einer Station zur Anbringung eines Barcodes mindestens zwei Stationen für das Auslesen des Barcodes anzubringen sind, um jeweils eine Kontrolle im Druck- und Nassbereich der Anlage (vgl. Abbildung 6-5) durchzuführen. Für eine robuste Detektion des Barcodes muss die Flasche darüber hinaus mindestens einmal um ihre eigene Achse gedreht werden. Für die hierzu benötigte

Hardware inkl. Leseinheit wurden jeweils 1000 Euro eingeplant. Für die Anbringung des Barcodes bestanden zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Entweder wird die bereits vorhandene Druckstation für diesen Prozessschritt verwendet oder es wird eine separate Station eingesetzt, welche die Flaschen vor der Einbringung in die Anlage markiert. Die Wahl der ersten Option hätte zur Folge, dass sich die Flaschen nicht von Beginn an selbst steuern können. Um ein vergleichbares Szenario zu betrachten, wurde für die Kostenindikation folglich die zweite Option der separaten Station verwendet, welche mit Investitionskosten von weiteren 1000 Euro berücksichtigt wurde. Für die Inbetriebnahme der drei resultierenden Stationen wurden fünf Tagessätze prognostiziert (4000 Euro), sodass sich für ein IDSS Investitionskosten von 7000 Euro ergeben. Für die indirekte Identifikation sind zudem Betriebskosten je Flasche zu berücksichtigen, z. B. Aufkleber. Mit diesem Ergebnis wurde die Kostenindikation aufgrund der vorliegenden deutlichen wirtschaftlichen Vorteile eines MASS verkürzt und direkt die Möglichkeiten zur Integration der Abstandssensoren untersucht.

6.2.3 Integrationsprozess

Als konsekutiver Schritt der Merkmalsdefinition wurden im Rahmen des Integrationsprozesses die ausgewählten Sensoren auf ihre Integrationsfähigkeit geprüft. Im Anwendungsbeispiel standen die benötigten Handhabungsgeräte zur Realisierung des Materialflusses bereits fest.

Fabrikplanung: Als erforderlichen Input für die Integration der Identifikationsverfahren wurden die verwendeten Handhabungssysteme weiter detailliert und die Endeffektoren der Roboter spezifiziert. Um die unterschiedlichen Flaschen sicher zu greifen und verschiedene Übergabepositionen an die Module zu ermöglichen, wurde ein elektrischer Langhubgreifer ausgewählt, welcher die Flaschen sowohl am Flaschenhals wie auch am Flaschenbauch greifen kann (vgl. Abbildung 6-7).

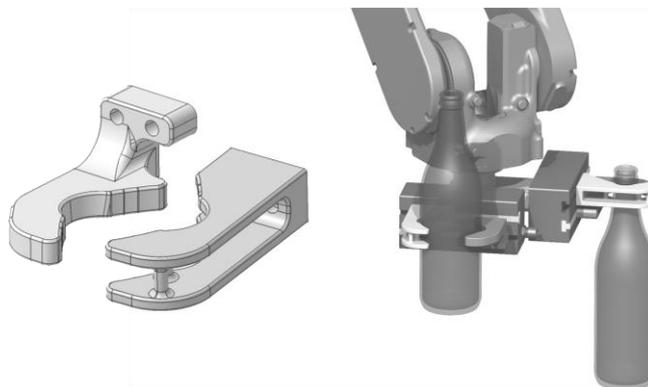


Abbildung 6-7: Flexibler elektrischer Langhubgreifer mit Prismenbacken

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

Integrationsprozess: Für die Integration der Abstandssensoren in die verwendeten Robotersysteme bzw. deren Greifsysteme wurde zunächst gemäß der Methode ein Funktionsbaum für den Langhubgreifer erstellt (vgl. Abbildung 6-8).

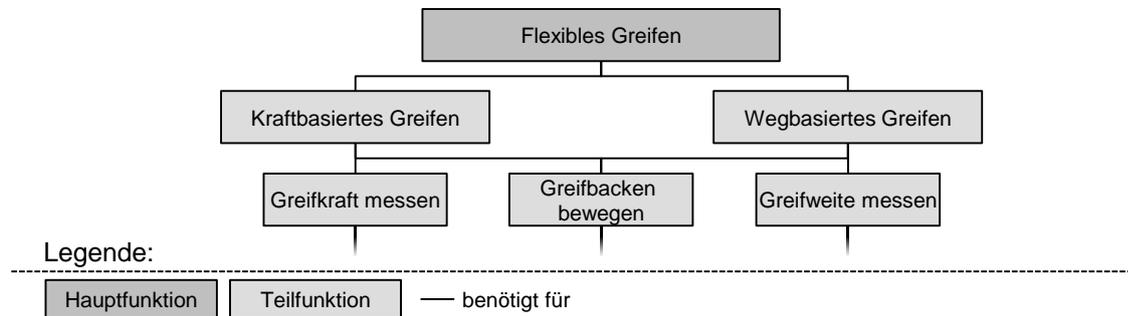


Abbildung 6-8: Funktionsbaum des flexiblen Greifens - Auszug

Aus dem dargestellten Funktionsbaum geht hervor, dass die ausgewählten Greifsysteme bereits ein integriertes Messsystem besitzen, welches die aktuelle Position der einzelnen Greifbacken und somit die Greifweite bestimmt. Demzufolge musste lediglich die Geometrie der Prismenbacken berücksichtigt werden, um aus den Referenzpunkten der bereits integrierten Sensoren den tatsächlichen Abstand zu bestimmen. Sofern die Greifer bereits vorliegen, kann anstelle der Berechnung eine Referenzmessung erfolgen. Mit diesem Abstand kann direkt der Durchmesser der Flasche bestimmt werden. Liegt keine Flasche vor (vgl. Fehlerfall 6, Abbildung 4-5), ist dies zudem über die integrierte Greifkraftmessung erkennbar. In Verbindung mit einem Roboter als dreidimensionales bewegungsfreies Handhabungsgerät, welches den Greifer flexibel an einem Objekt positionieren kann, ist dieses Setup ebenso für die Erkennung komplexerer Bauteile nutzbar. Hierzu werden nacheinander verschiedene vorab definierte Messpunkte angefahren und der Abstand zweier Oberflächen bzw. ein Durchmesser bestimmt. Basierend auf diesem Konzept wurde ein neues integriertes Identifikationsverfahren angelegt (vgl. Tabelle 5-12) und daraufhin weitere integrierte Identifikationsverfahren entwickelt, welche den Greifer selbst als Identifikationssystem nutzen (vgl. Saugermatrix in Abbildung 5-14).

Am Beispiel der eingesetzten Roboter wird an dieser Stelle auf die kontinuierliche Lokalisierung eingegangen, welche aufgrund der herstellereigenen Umsetzung methodisch nicht unterstützt wird. Im vorliegenden Fall wurden Roboter (MH24) des Herstellers Yaskawa verwendet, welche ihre Fahrbefehle von einer zugehörigen Steuerung (DX200) erhalten. In der Bibliothek der Steuerung ist ein Funktionsbaustein mit der Bezeichnung *GETE* () enthalten, welcher

übersetzt „Element extrahieren bzw. einlesen“ bedeutet. Hier besteht die Möglichkeit in das Platzhalterelement die einzelne Position bzw. Orientierung der aktuellen Istposition des Roboters bzw. seines Tool Center Points einzutragen. Am Ende jeder Handhabungsoperation kann dieser Befehl für die Koordinaten X, Y und Z sowie für die Orientierungen ϕ , ϑ und ψ angewandt werden, um die Werte in eine Liste zu speichern. Die Werte dieser Liste können in der aufgebauten Anlage über OPC-UA an den Agenten des Roboters weitergegeben werden, welcher diese wiederum dem Objektagenten in Form einer Statusaktualisierung mitteilt (vgl. Abbildung 4-3). Für das verwendete Umlaufsystem zur Vernetzung der beiden Robotersysteme standen ebenfalls Funktionsbausteine zur Verfügung, mit welchen die aktuelle Position eines jeden sog. Movers auslesbar und über OPC-UA kommunizierbar war. Demzufolge konnten alle benötigten zusätzlichen Funktionen eines MASS und die gestellten hardwareseitigen Systemanforderungen (ASI-5) durch die bereits vorliegenden Betriebsmittel abgedeckt werden und es waren keine weiteren Änderungen oder zusätzliche Befestigungselemente für Sensorsysteme notwendig. Daraufhin wurde in der parallelen *Fabrikplanung* das finale Modell der RoboFill-Anlage erstellt (vgl. Abbildung 6-9). Mit diesem Modell waren alle Systemelemente und somit die Informationsbasis für die Planung und Konfiguration des Agentensystems gegeben.

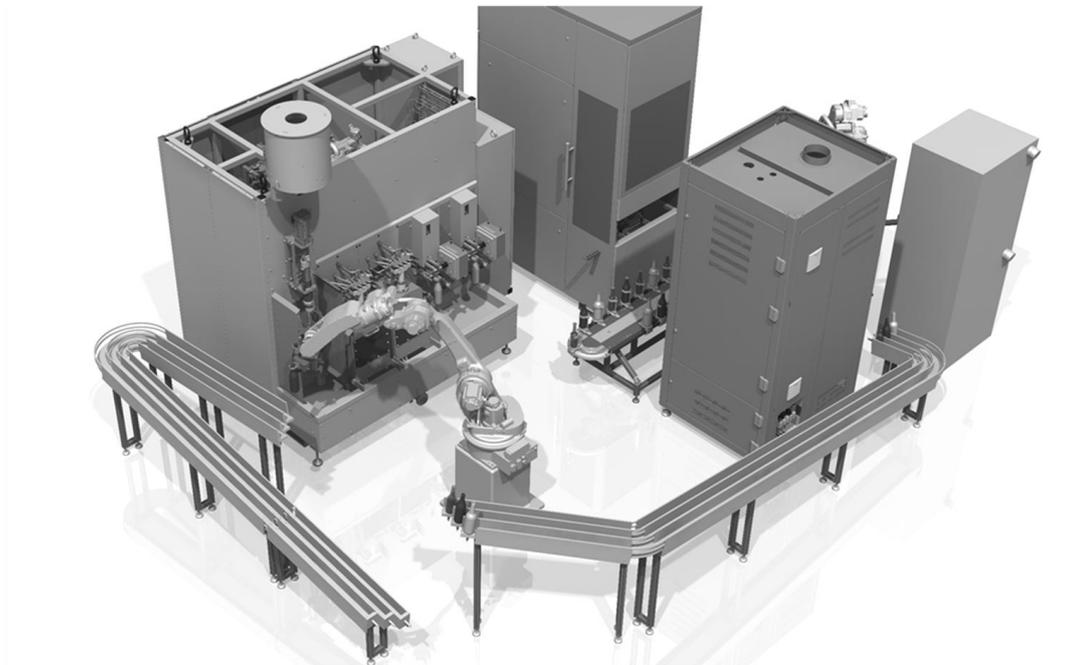


Abbildung 6-9: *Finales CAD-Modell der RoboFill-Anlage*

6.2.4 Planung und Konfiguration eines Agentensystems

Zum Zeitpunkt der Anwendung der Methodik standen der entwickelte Code-generator und das Evaluationstool noch nicht zur Verfügung. Diese wurden parallel zur Entwicklung des Agentensystems erarbeitet und anschließend finalisiert. Aus diesem Grund nahm die Anwendung der vierten Methode den größten Teil der Umsetzung in Anspruch und motivierte zu der umfassenden Erarbeitung der verschiedenen Werkzeuge und Anpassungen der Methode nach ihrer Anwendung.

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel handelt es sich um eine vollautomatisierte Abfüllanlage, welche in die Bestandteile Wareneingang, Druckvorbereitung, Drucker, Roboter-Druckbereich, Umlaufsystem, Roboter-Nassbereich, Rinser-1, Rinser-2, Füller-1, Füller-2, Verschließer, Flaschendusche und Warenausgang untergliederbar ist. Diese Betriebsmittel sollen mit den Flaschen über deren weitere Verarbeitung verhandeln, um die einzelnen Flaschen in ihren Endzustand, die bedruckte, gefüllte, verschlossene und saubere Flasche zu überführen. Basierend auf dem ausgewählten Szenario der Eignungsprüfung (vgl. Abschnitt 6.2.1) sind die Zielgrößen des Durchsatzes (150 Flaschen pro Stunde) und die unterschiedlichen Varianten (0,33 l, 0,5 l und 0,66 l Flaschen) abzuleiten. Aus dem Ansatz eines MASS leiten sich zudem die funktionale Anforderung der softwareseitigen Rückverfolgbarkeit von Agenten ab, um auf die in Abbildung 4-5 skizzierten Fehlerfälle reagieren zu können.

Um weitere nicht-funktionale Anforderungen zu bestimmen, wurde die Anlage bspw. hinsichtlich ihrer Kapazitäten untersucht. Die einzelnen Prozessmodule können jeweils eine Flasche und somit einen Agenten gleichzeitig verarbeiten, während die Handhabungssysteme in Summe 20 Flaschen beinhalten können, je zwei pro Roboter aufgrund des Mehrfachgreifers und 16 Flaschen, eine je Mover, in dem Umlaufsystem. Unter der Berücksichtigung der Kapazitäten von Wareneingang und -ausgang von ca. 300 Flaschen ergibt sich eine Gesamtsumme von ca. 350 Agenten, die theoretisch gleichzeitig miteinander interagieren müssen. Folglich wurde der Zielwert der gleichzeitig zu agierenden Agenten diesen Werten angepasst. Hinsichtlich der Anzahl der Betriebsmittel und der Menge an Objektagenten, die sich direkt in den Modulen befinden können, wurde die minimale Anzahl gleichzeitig startbarer Agenten (15) und die minimale Anzahl interagierender Agenten (30) festgelegt (vgl. Tabelle 6-3).

6.2 Anwendung am Beispiel des Projekts RoboFill4.0

Tabelle 6-3: Anforderungen an das Agentensystem - RoboFill4.0

	Anforderung	Beschreibung	E	Eziel	Ekrit
Funktional	FIPA-Konformität	Einhaltung der Designregeln der FIPA, z. B. über Verwendung eines konformen Frameworks	-		
	Dokumentation der Kommunikation	Die Kommunikation zwischen den Agenten soll in einem Textdokument o. ä. protokolliert werden.	-		
	Anpassungsfähigkeit	Möglichkeit, die Produktionsprozesse zu verändern	-		
	Hinzufügen und Entfernen von Agenten	Möglichkeit, Agenten in der Betriebsphase zu initialisieren und zu löschen bzw. (de-)aktivieren	-		
	Interface	Über eine HMI soll ein Benutzer das System konfigurieren und auf Fehler reagieren können.	-		
	Rückverfolgbarkeit	Die Objekte sollen softwaretechnisch rückverfolgbar sein.	-		
Nicht-funktional	Anzahl der Agenten (Start)	Anzahl an Agenten, die gleichzeitig gestartet werden können	Stk.	350	15
	Anzahl der Agenten (Laufzeitänderung)	Anzahl an Agenten im Betrieb, die gleichzeitig gestartet/hinzugefügt werden können	Stk.	50	6
	Anzahl der Agenten (Betrieb)	Gibt an, wie viele Agenten gleichzeitig aktiv sein können	Stk.	350	30
	Effizienz (Entscheidung)	Max. Dauer eines verhandlungs-basierten Entscheidungsprozesses	s	0,1	1

Nach einer Überprüfung der gestellten Anforderungen wurde ein Nutzerfall-diagramm erstellt und anschließend die benötigten Aufgaben (A), Unteraufgaben (UA) und zugehörigen Systemfunktionen (FK) abgeleitet. Um die industrielle Einsetzbarkeit sicherzustellen und die FIPA-Konformität zu erfüllen, wurde analog zum Systemansatz das Framework JADE ausgewählt und diese Auswahl über eine Bewertung abgesichert (vgl. Tabelle 10-35). Die benötigten Systemkomponenten wurden in den vorherigen Phasen der Methodik bereits bestimmt. Diese wurden in Rollen überführt und den bestimmten Aufgaben zugeordnet (vgl. Tabelle 6-4). Hierbei wurden zur Übersichtlichkeit die Roboter inkl. Greifer und das Umlaufsystem unter dem Begriff des Transportagenten zusammengefasst. Analog bezeichnet der Fertigungsagent alle Prozessmodule und der Lageragent repräsentiert den Wareneingang und -ausgang. Die Lokalisierung der Flaschen ist sowohl den Transportagenten als auch dem Verwaltungsagenten zugeordnet. Hierbei wird der Verwaltungsagent nur im Fehlerfall eingesetzt. Wird ein Objekt nicht richtig bzw. nicht identifiziert, werden über seine Interaktionsprotokolle die letzten Schritte rückverfolgt, um auf die Fehlerursache zu schließen.

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

Tabelle 6-4: Aufgaben der Rollen - RoboFill4.0

Aufgabe	Aufgabenart	Flaschenagent	Transportagent	Fertigungsagent	Lageragent	Verwaltungsagent	HMI-Agent
Verarbeitung der Flasche	A	x	-	-	-	-	-
Steuerung Transport	A	-	x	-	-	-	-
Steuerung Bearbeitung	A	-	-	x	-	-	-
Lagerung der Flasche	A	-	-	-	x	-	-
Lagerentnahme	A	-	-	-	x	-	-
Agenten identifizieren	A	-	-	x	-	-	-
Agenten lokalisieren	A	-	x	-	-	x	-
Benutzerinteraktion	A	-	-	-	-	-	x
Agenten registrieren	A	-	-	-	-	x	-
Agenten abmelden	A	-	-	x	-	x	-
Agenten identifizieren	A	-	x	-	-	x	-
Setup	A	x	x	x	x	x	x
Cleanup	A	x	x	x	x	x	x
Fehlerbehebung	A	x	x	x	x	-	x
Lokalisierung	A	x	x	x	x	-	-
Wartung	A	-	x	x	x	-	-
Umrüstung	A	-	x	x	x	-	-
Anmeldung Agentenplattform	UA	x	x	x	x	x	x
Abmeldung Agentenplattform	UA	x	x	x	x	x	x
Agenten splitten	UA	-	-	x	-	-	-
Agenten zusammenfassen	UA	-	-	x	-	-	-
Parameter initialisieren	FK	x	x	x	x	x	x
Anfragen zu Agenten senden	FK	x	x	x	x	-	-
Anfragen bearbeiten	FK	-	x	x	x	x	x
Agenten auswählen	FK	x	-	-	-	-	-
Agenten aktualisieren	FK	-	x	x	x	x	-
Service in DF registrieren	FK	-	x	x	x	x	x
Service von DF abmelden	FK	-	x	x	x	x	x
Service in DF suchen	FK	x	x	x	x	-	x

A: Aufgabe, UA: Unteraufgabe, FK: Funktion, x: vorhanden, -: nicht vorhanden

Eine Übersicht aller Agentenklassen ist in Tabelle 10-37 gegeben. Der Zusammenhang der Rollen ist im Strukturdiagramm in Abbildung 10-12 dargestellt. Um die Rollenbeschreibungen im nächsten Schritt zu vervollständigen, wurden den Rollen

unterschiedliche Zustände zugeordnet, die sie annehmen können. Hierbei wurden initial die folgenden Zustände aufgenommen:

- Initialisiert: Ein Agent befindet sich in diesem Zustand, sobald dieser durch einen anderen Agenten oder den Nutzer bei der Agentenplattform angemeldet wurde.
- Aktiv: Führt ein Agent aktiv seine Aufgaben aus und nimmt im Sinne eines Selbststeuerungssystems aktiv am Produktionsprozess teil, ist er aktiv.
- Wartend: In diesen Zustand wechselt ein aktiver Agent, wenn dieser auf eine Antwort eines anderen Agenten wartet.
- Fehler: Die Transition, in den Fehlerzustand zu wechseln, kann durch die LLC eines Agenten (Produktionsfehler) oder durch einen softwaretechnischen Fehler ausgelöst werden.
- Wartung: In diesen Zustand wechselt der Agent entweder für eine planmäßige Wartung oder nachdem ein Fehler aufgetreten ist.
- Rüsten: Muss ein Betriebsmittel für den nächsten Produktionsschritt umgebaut werden, wechselt der zugehörige Agent in diesen Zustand.
- Verloren: Kann ein Agent nicht mehr lokalisiert werden, wird er in den Zustand „verloren“ versetzt.
- Inaktiv: In diesen Zustand wechseln Agenten beispielsweise, wenn sie auf unbestimmte Zeit eingelagert werden. In jedem Fall wird dieser Zustand vor der Abmeldung eines Agenten eingenommen.
- Abgemeldet: Nachdem ein Agent von der Agentenplattform abgemeldet wurde bzw. sich selbst abgemeldet hat, befindet er sich in diesem Zustand und wird anschließend in eine Datenbank überführt.

Anschließend wurde bestimmt, welche dieser Zustände die jeweilige Rolle annehmen kann (vgl. Tabelle 10-36). Die Zustände sind entscheidend, um die Zustandsdiagramme (UML) der einzelnen Rollen abzuleiten. Hierzu wurden die identifizierten Aufgaben den einzelnen Zuständen zugeordnet (vgl. Beispiel Flaschenagent, Tabelle 6-5). Durch diese Zuordnung ist deutlich, welche Aufgaben miteinander zu kombinieren sind und auf Basis welcher Aktionen ein Zustandswechsel hervorgerufen wird. Mit diesen Informationen wurden die Aktivitätsdiagramme für jeden Zustand einer jeden Rolle erstellt. Für verschiedene Zustände sind die Aktivitätsdiagramme übertragbar. Die Aufgaben im Rahmen der Initialisierung können sich bspw. in den einzelnen Parametern unterscheiden, der Ablauf ist jedoch identisch. Dies gilt ebenso für die Aufgaben selbst, sodass ein Anmeldeprozess an der Agentenplattform für alle Agenten gleich aufgebaut ist.

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

Tabelle 6-5: Zuordnung von Aufgaben und Zuständen – Beispiel Flaschenagent

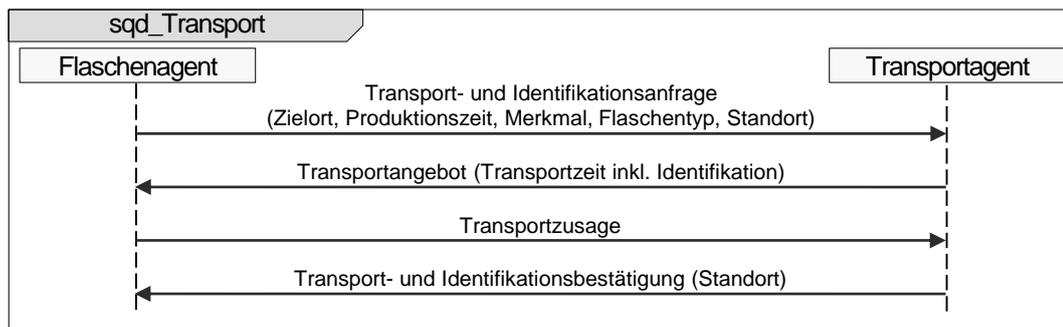
Aufgaben	Zustand	initialisiert	aktiv	wartend	Fehler	verloren	inaktiv	abgemeldet
Setup		x	-	-	-	-	-	-
Verarbeitung der Flasche		-	x	x	-	-	-	-
Fehlerbehebung		-	-	x	x	-	-	-
Lokalisierung		-	x	-	-	x	-	-
Cleanup		-	-	-	-	-	x	-
Anmeldung Agentenplattform		x	-	-	-	-	-	-
Abmeldung Agentenplattform		-	-	-	-	-	x	-
Parameter initialisieren		x	-	-	-	-	-	-
Anfrage versenden		x	x	x	x	x	-	-
Agenten auswählen		-	x	-	-	-	-	-
Service in DF suchen		x	x	-	x	x	-	-

x: vorhanden, -:nicht vorhanden

Während die innere Struktur der Agenten über ihre Zustände und Abläufe spezifiziert wurde, galt es, für ein funktionsfähiges System ebenso das Zusammenspiel zwischen den Agenten zu definieren. Hierzu wurden zunächst die Agentenrollen in einer DSM gegenübergestellt und notwendige Kommunikationen eingetragen. Im Fall des vergleichsweise kleinen RoboFill-Systems wurde dies direkt in die Gegenüberstellung der einzelnen Agenten überführt (vgl. Tabelle 6-6). Der Flaschen-, der Verwaltungs- wie auch der HMI-Agent sind mit allen anderen Agenten vernetzt und benötigen ein Interaktionsprotokoll mit allen anderen Agenten. Für die Darstellung der Interaktionsprotokolle wurden zur Einhaltung des UML-Standards Sequenzdiagramme genutzt, in welchen stets zwei Agenten miteinander kommunizieren. In Abbildung 6-10 ist ein beispielhaftes Sequenzdiagramm dargestellt, welches die Interaktion eines Flaschenagenten mit einem Transportagenten zeigt. In dem Diagramm sind zudem die auszutauschenden Parameter dargestellt. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden diese hinsichtlich des Austauschs der HLC mit der LLC vereinfacht, um vorparameterisierte Programme (z. B. Transport vom Wareneingang zur Druckvorbereitung) aufzurufen. Die Vereinfachung bezieht sich auf die Verwendung vordefinierter Standorte anstelle der Position in einem Referenzsystem sowie der Übermittlung des Flaschentyps anstelle der vollständigen Parameterliste. In der inneren Struktur des Agenten wurden alle Parameter beibehalten. Durch diese Vereinfachungen ist es möglich, die Kommunikation effizienter zu gestalten.

Tabelle 6-6: DSM-Agenten - RoboFill4.0

Agentenrolle	Flaschenagent	Roboter_Druck	Roboter_Nass	Umlaufsystem	Druckvorbereitung	Druck	Rinser_1	Rinser_2	Füller_1	Füller_2	Verschleißer	Wareneingang	Warenausgang	Verwaltungsagent	HMI-Agent
Flaschenagent		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Roboter_Druck	X			X	X	X						X		X	X
Roboter_Nass	X			X			X	X	X	X	X		X	X	X
Umlaufsystem	X	X	X											X	X
Druckvorbereitung	X	X												X	X
Druck	X	X												X	X
Rinser_1	X		X											X	X
Rinser_2	X		X											X	X
Füller_1	X		X											X	X
Füller_2	X		X											X	X
Verschleißer	X		X											X	X
Wareneingang	X	X												X	X
Warenausgang	X		X											X	X
Verwaltungsagent	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
HMI-Agent	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	



Legende:

Objekt → synchroner Operationsaufruf

Abbildung 6-10: Sequenzdiagramm einer Transportanfrage

Auf Basis der unterschiedlichen UML-Diagramme wurden abschließend die Ontologien, z. B. die Transportontologie (vgl. Abbildung 10-11), definiert und der Code der Agenten in JavaScript implementiert.

6.3 Weiterführende Umsetzung

Aufgrund des Fokus auf das übergreifende Anwendungsbeispiel, in welchem die Werkzeuge der Merkmalsanalyse nur ansatzweise evaluiert werden konnten, wurde die Analyse zusätzlich mit dem Produktportfolio eines mittelständischen Maschinenbauunternehmens durchgeführt. Aus Gründen der Vertraulichkeit ist der Unternehmensname nicht aufgeführt. Weiterhin werden in diesem Abschnitt zwei integrierte Identifikationsverfahren und deren Umsetzung beschrieben.

6.3.1 Merkmalsanalyse

Im Rahmen einer Merkmalsanalyse wurden 462.642 Positionen aus dem ERP-System des Unternehmens extrahiert, in mehreren Stufen bereinigt und auf die beiden Unternehmensstandorte aufgeteilt. Anschließend wurden für Standort A 58.710 und für Standort B 13.390 unterschiedliche Objekte miteinander verglichen. Die extrahierten Informationen beschränkten sich auf die eindeutige Artikelnummer, die Stücklistentiefe, welche der Fertigungstiefe des Objekts entspricht, die Einteilung in Kauf- und Eigenfertigungsteile, die äußeren Abmaße des Objekts, das Gewicht und das Material. Im Rahmen der Analyse wurde die Vollständigkeit der Daten überprüft. An Standort A waren lediglich 6 % der Daten vollständig, sodass sich bspw. für das Gewicht lediglich ein EV von 4 % ergab (vgl. Abbildung 6-11). Am Standort B wurde für das Gewicht ein EV von 63 % berechnet, sodass bereits dieses eine Merkmal eine sehr gute Basis für eine merkmalsbasierte Identifikation darstellt.

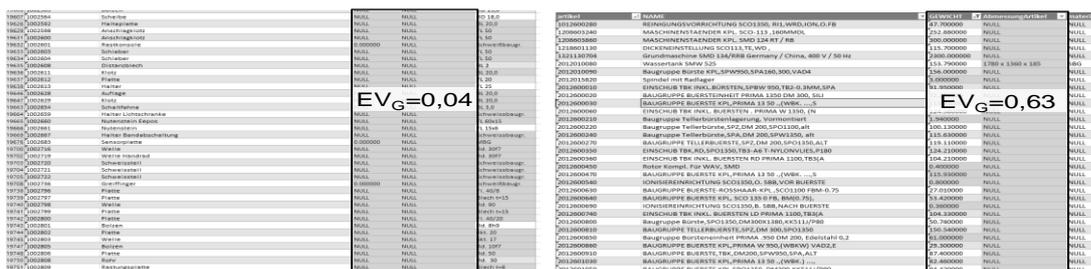


Abbildung 6-11: Merkmalsanalyse einer bestehenden Produktion - Screenshots

Ergebnis dieser umfangreichen Analyse war, dass ein MASS nur für Standort A in Betracht zu ziehen ist. An Standort B konnte aufgrund von unvollständigen Datensätzen keine aussagekräftige Auswertung durchgeführt werden. Zudem konnte das Excel-basierte Werkzeug für große Datenmengen validiert werden. Werden hingegen noch deutlich größere Datenmengen erwartet, sollte für die Verwendung von Excel eine Kopplung zu einer Access-Datenbank integriert werden.

6.3.2 Integration von Sensoren in Handhabungsgeräte

Durch den Einsatz der elektrischen Greifer in der RoboFill-Anlage war ein Integrationsprozess nicht notwendig. Daher wurde die Integration mit zwei weiteren repräsentativen Beispielen durchgeführt. Als zu identifizierende Objekte wurden Tetrominos verwendet (vgl. Abbildung 6-12). Unter der Verwendung der additiv gefertigten Tetrominos wurden unterschiedliche Identifikationsverfahren auf ihre Robustheit in Versuchen überprüft. Hierbei wurden verschiedene Formen, Größen, Farben und Fülldichten der Tetrominos aufgebaut und für die Versuche verwendet.

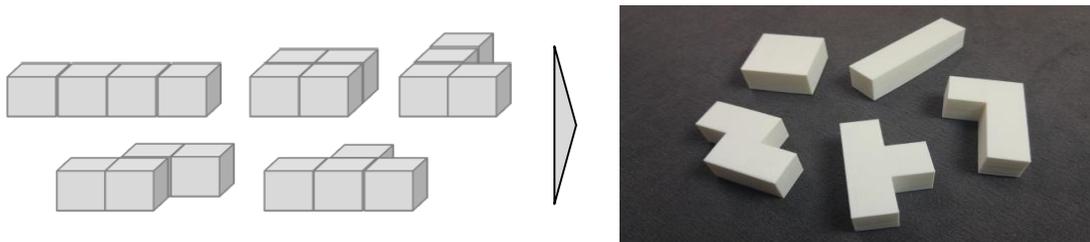


Abbildung 6-12: Tetrominos I, O, L bzw. J, Z und T

6.3.2.1 Evaluation 3-Punkt-Verfahren

Im Fall des 3-Punkt-Verfahrens bestand die Herausforderung darin, die Grenzen des Verfahrens abzuleiten. Hierbei ergab eine Recherche, dass kapazitive Sensoren bis zu einem Durchmesser von 10 mm von zahlreichen Herstellern angeboten werden und dies eine repräsentative Sensorgröße darstellt. Folglich wurde ein Sensor dieser Größe in eine Greifbacke integriert und getestet. Die Greifbacke wurde mit einer integrierten Befestigung und Kabelführung für den Sensor versehen und additiv aufgebaut. Die Tetrominos wurden über einen mechanischen Anschlag positioniert und anschließend überprüft (vgl. Abbildung 6-13).

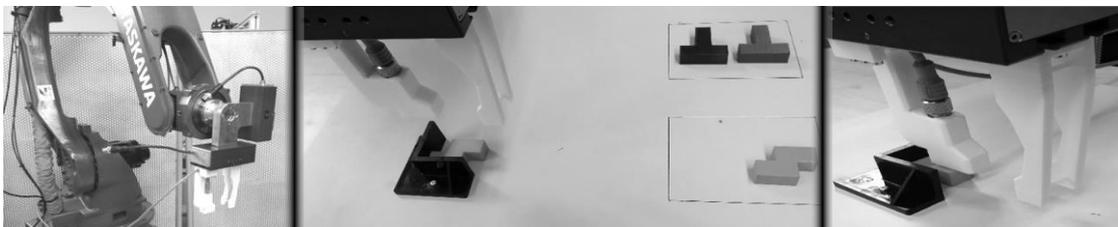


Abbildung 6-13: Integration eines kapazitiven Sensors in eine Greifbacke

Ergebnis der Untersuchungen war, dass die quadratischen Subelemente der Tetrominos mit 12 mm größer sein müssen, um eine robuste Unterscheidung zu erzielen. Anderenfalls wurden deren Ränder erkannt und fälschlicherweise auf eine größere Variante geschlossen. Der Einsatz des 3-Punkt-Verfahrens ist folglich

an das Material des Objekts und die damit verbundenen Sensorgrößen und ihren Messbereich gebunden. Sind die zu erfassenden Merkmalsausprägungen kleiner als der Messbereich, ist eine robuste Identifikation in Frage zu stellen. Dieser Zusammenhang wurde zusätzlich über die Detektion von Bohrungen evaluiert. Hierbei wurden Bohrungen mit einem Durchmesser von 14 mm und größer sowie einer Tiefe von mindestens 20 mm detektiert.

6.3.2.2 Evaluation der Integration einer Chipkamera

Im zweiten Fall wurde die Integration einer 2D-Kamera in ein Greifsystem zur Identifikation und Lokalisierung der Bauteile überprüft. Aus Expertengesprächen wurde abgeleitet, dass 2D-Kameras mit C-Mount-Objektiven für die Anwendung geeignet sind, jedoch aufgrund ihres Bauraums nicht gut integrierbar sind, ohne die Objektzugänglichkeit zu verringern. Um die Anforderungen im Hinblick auf den Bauraum und die Kosten zu erfüllen, wurden im Rahmen der Untersuchung eine miniaturisierte Kamera und ein korrespondierendes S-Mount-Objektiv auf ihre Einsatzfähigkeit überprüft. Der Nachteil des zu verwendenden S-Mount-Objektivs ist die Festbrennweite, sodass die Objekte nicht automatisch fokussierbar sind, um scharfe Konturen zur Identifikation der Objektform zu nutzen. Hierzu wurde ein eigenes Verfahren entwickelt, welches die Bewegungsfreiheit des Roboters nutzt, um die Kamera und das Objektiv mit einer Festbrennweite in unterschiedlichen Abständen zum Objekt zu positionieren. Der Aufbau und Ablauf des entwickelten Systems sind in Abbildung 6-14 dargestellt.

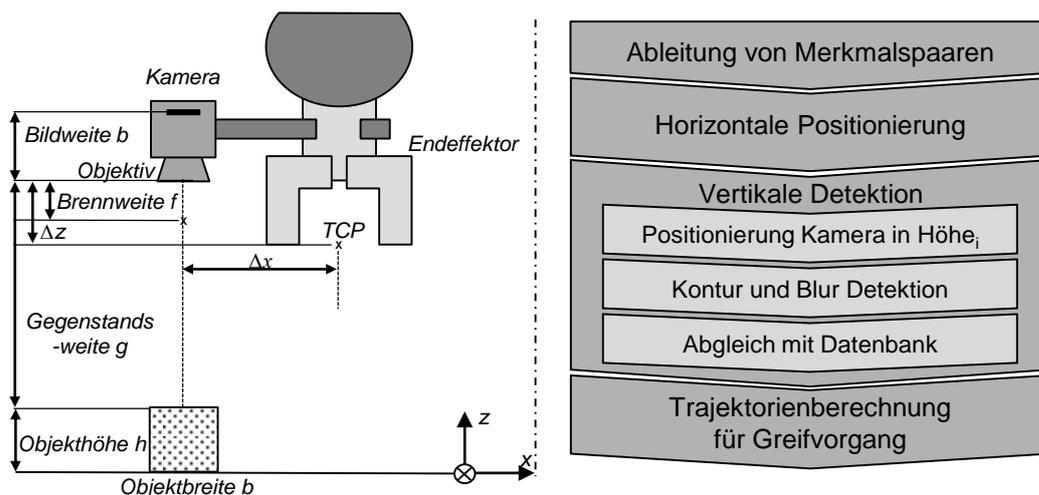


Abbildung 6-14: Aufbau (links) und Ablauf (rechts) zur Objekt- und Posendetektion auf Basis einfacher 2D-Kamerasysteme

Im ersten Schritt werden die benötigten Merkmalspaare abgeleitet. In diesem Verfahren werden die Objekte über ihre oberste Kontur in Z-Richtung identifiziert. Hierbei wurde zudem untersucht, wie gut auf diese Weise unterschiedliche Orientierungen des Objekts berücksichtigt und erkannt werden können. Die Grundidee des Verfahrens ist, dass der Roboter den Kamerasensor mit dem vorgeschalteten S-Mount-Objektiv mittig über dem Detektionsraum positioniert. Anschließend nimmt der Roboter die maximale Gegenstandsweite im Hinblick auf die orientierungsabhängige maximale Höhe des Bauteils ein. Ein O-Tetromino kann in Abhängigkeit seiner Orientierung eine Höhe von einer oder von zwei Längeneinheiten besitzen. Hierbei startet der Erkennungsablauf stets mit der maximalen Höhe und überprüft in einer sog. Blur-Detektion den Unschärfegrad (UG) einer erkannten Kontur. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, das Objekt direkt über seine Kontur zu erkennen und über den Unschärfegrad gleichzeitig die Höhe des Objekts zu überprüfen, um die Erkennung abzusichern. Dieser Vorgang wird für alle potenziellen Höhen des Objekts durchgeführt, bis das Objekt erkannt ist. Nachdem das Objekt und dessen Pose auf diese Weise bestimmt wurden, wird eine Trajektorie für den Handhabungsprozess geplant. In verschiedenen Testreihen mit den unterschiedlichen Tetrominos konnte die Nutzung des Unschärfegrades teilweise validiert werden (vgl. Abbildung 6-15).

TCP-Höhe [mm] UG O-Tetromino (gemustert)

75,02	0,08 (u)
85,03	0,07 (u)
95,00	0,05 (u)
100,01	0,05 (u)
105,00	0,04 (u)
110,01	0,03 (u)
115,00	0,03 (u)
130,02	0,02 (u)
140,00	0,008 (u)

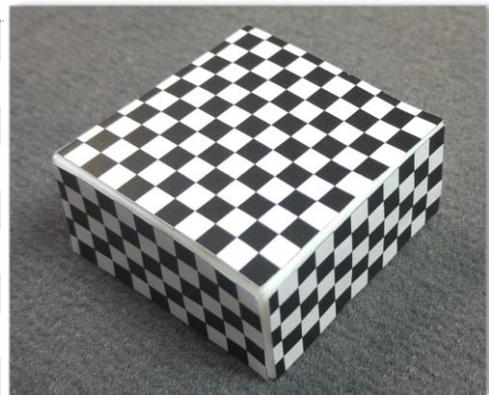


Abbildung 6-15: Überprüfung der Blur-Detektion – Beispiel O-Tetromino

Aus den Daten geht hervor, dass der Unschärfegrad messbar ist, hierzu jedoch eine erhebliche Abstandsvariation notwendig ist. Folglich ist dieser Teil des Verfahrens lediglich für größere Bauteile geeignet. Dennoch konnten die unterschiedlichen Tetrominos durch das Teach von Referenzbildern robust erkannt werden, sodass der Einsatz von Chipkameras eine prinzipielle Eignung besitzt, welche für bauraumkritische Integrationsprozesse in Betracht gezogen werden sollte.

6.4 Bewertung

Die kritische Bewertung einer Methodik oder eines Vorgehens kann durch den Vergleich mit anderen Vorgehen als auch mit den gestellten Anforderungen erfolgen. In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik anhand der gestellten Anforderungen *AM1-7* und *SAMI-9* evaluiert. Durch die exemplarische Anwendung der Methodik und dem daraus entstandenen MASS ist es zudem möglich, eine technische und wirtschaftliche Bewertung dieses Systems durchzuführen.

6.4.1 Bewertung der Methodik

Die Bewertung der Methodik hinsichtlich der gestellten Anforderungen ist in Tabelle 6-7 zusammenfassend dargestellt. In den folgenden Erläuterungen wird zunächst allgemein auf die Bewertung der Methodik und anschließend auf die spezifischen Anforderungen an die Methoden 2 bis 4 eingegangen

Tabelle 6-7: *Bewertung der Methodik anhand der gestellten Anforderungen*

<i>Nr</i>	<i>Anforderung</i>	Bewertung
<i>AM1</i>	<i>Integration in die Fabrikplanung</i>	●
<i>AM2</i>	<i>Schnittstelle zur iterativen Entwicklung von Agentensystemen</i>	●
<i>AM3</i>	<i>Benutzerfreundlichkeit</i>	●
<i>AM4</i>	<i>Genauigkeit und Eindeutigkeit</i>	●
<i>AM5</i>	<i>Vollständigkeit</i>	●
<i>AM6</i>	<i>Skalier- und Adaptierbarkeit</i>	●
<i>AM7</i>	<i>Variabilität und Wiederverwendbarkeit</i>	●
<i>SAMI</i>	<i>Mehrstufige Auswahl</i>	●
<i>SAM2</i>	<i>Komplexität</i>	●
<i>SAM3</i>	<i>Implementierbarkeit</i>	●
<i>SAM4</i>	<i>Kommunikation und Ontologien</i>	●
<i>SAM5</i>	<i>Offenheit</i>	●
<i>SAM6</i>	<i>Flexibilität</i>	●
<i>SAM7</i>	<i>Betrachtungsebenen</i>	●
<i>SAM8</i>	<i>Produktionsspezifische Rollen und Schnittstellen</i>	●
<i>SAM9</i>	<i>Programmierung</i>	●

Methodik: Die Integration der Methodik in die Fabrikplanung wurde durch die Definition klarer Schnittstellen und auszutauschender Informationen vollständig erfüllt. Darüber hinaus wird über das Simulations- und Evaluationstool eine Unterstützung über den Betrachtungsbereich der Methodik hinaus gewährleistet. Durch die Integration der Agentensystementwicklung in die Methodik ist auch diese Schnittstelle gegeben. Auf diese Weise ist die Vollständigkeit der Methodik ebenfalls sichergestellt, da sie den Anwender bis hin zum Steuerungscode unterstützt.

Der Anwender der Methodik wird in jedem Schritt mit mehreren Werkzeugen unterstützt, in welchen eine separate Beschreibung zur Verwendung hinterlegt wurde. Durch diese umfangreiche Beschreibung in Verbindung mit dem hohen Automatisierungsgrad zahlreicher softwarebasierter Werkzeuge ist die Anwendung der Methodik selbst fachfremden Nutzern möglich. Durch die schrittweise Erarbeitung der Ergebnisse, welche stetig indirekt über die Auswahl vordefinierter Begriffe (vgl. Dropdown-Auswahllisten) überprüft wird, liegen genaue Vorgaben vor. Auf diese Weise werden die Anforderungen hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit und Eindeutigkeit ebenfalls voll erfüllt.

Die erfolgreiche erweiterte Umsetzung sowie die unterschiedlichen Testszenarien verdeutlichen die sehr gute Skalierbarkeit der Methodik. Durch die durchgängige Verwendung von Excel und dem modularen Aufbau aller entwickelten Werkzeuge ist die Adaptierbarkeit vollumfänglich sichergestellt.

Der hohe Automatisierungsgrad der bereitgestellten und miteinander verlinkbaren Werkzeuge erhöht neben der Benutzerfreundlichkeit die Variabilität, da Änderungen schnell über eine Aktualisierung der Informationen durchführbar sind. Dies verdeutlicht im Zusammenhang mit der iterativen Entwicklung des entstandenen Systems ebenso die Wiederverwendbarkeit der Ergebnisse.

Method 2: Über die erstellte Wissensmatrix in Form einer Merkmal-Sensor-klassen-DMM werden zunächst keine konkreten Sensoren ausgewählt. Dies erfolgt erst im Anschluss, sodass in jedem Fall eine zweistufige Auswahl der Sensoren erfolgt und die Komplexität reduziert wird. Indem zunächst allgemeine Sensorklassen genutzt werden, ist eine automatisierte Vorauswahl möglich, welche die Komplexität kapselt, statt sie in die Anwendung der Methode zu übertragen.

Method 3: Die Beschreibung der integrierten Identifikationsverfahren umfasst neben deren detailliertem Ablauf die notwendigen Schritte zur Implementierung. Demzufolge ist nicht nur das steuerungsunabhängige Ergebnis in Form eines Aktivitätsdiagramms enthalten, sondern ebenso eine Anleitung, diesen Ablauf auf die verwendeten Geräte zu applizieren. Zudem wird die Ausgestaltung der Systeme durch Skizzen bzw. CAD-Modelle auf Bauebene untersucht.

Method 4: Die Modellierung der Kommunikation wird vollständig durchgeführt und fokussiert den UML-Standard als die am weitesten verbreitete Modellierungssprache. Die Spezifikation der Ontologien wird dem Anwender für das als am relevantesten identifizierte Framework JADE bereits vorgegeben, sodass diese Anforderung für JADE vollständig erfüllt ist.

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

Durch die umfangreiche und durchgängige Verwendung von UML-Diagrammen in Verbindung mit einfachen Matrizen sind die Modelle der Methode zur Planung und Konfiguration von Agentensystemen in anderen Methoden, z. B. ZEUS, nutzbar. Obwohl die methodische Unterstützung in der Implementierungsphase JADE fokussiert, ist auch in diesem Bereich die Offenheit der Methode durch die Frameworkauswahl enthalten.

Neben regelbasierten Verhaltensweisen wurden zudem situative Verhaltensweisen der Agenten programmiert und in die Werkzeuge integriert. Durch die optionale Integration von Bereichsagenten kann zudem der Grad an Autonomie verändert und durch das kombinierte Simulations- und Evaluationstool erprobt werden. Demzufolge wurde die Anforderung der Flexibilität vollumfänglich erfüllt.

Die Rollenbeschreibung mit Fokus auf das produktionstechnische Umfeld stellt den zentralen Schritt der entwickelten Methode dar. Diese wird sehr genau und umfassend durchgeführt, um aus ihr anschließend alle Informationen für die einzelnen Agenten und ihre Antagonisten in der realen Produktion ableiten zu können. Hierbei wird die erforderliche Schnittstelle zwischen der HLC und LLC durch die Kopplung der Systemelemente mit den benötigten Funktionen adressiert. Darüber hinaus ist die Schnittstelle für das Framework JADE und den Einsatz von OPC-UA im Codegenerator implementiert und nutzbar.

Die Unterteilung der Betrachtungsebenen wurde in die Vorgehensweise integriert. Durch die funktionsorientierte Beschreibung und die Verwendung der Matrizen wird eine Zusammenführung der entstandenen Ergebnisse zudem vereinfacht.

Durch die Erstellung des Codegenerators wurde die Programmierung sehr stark vereinfacht, sodass in Testanwendungen themenfremde Nutzer in der Lage waren, innerhalb weniger Stunden ein lauffähiges Testsystem zu implementieren.

Zusammenfassend konnten alle gestellten Anforderungen erfüllt werden. Die einzige Einschränkung stellt der Zielkonflikt der Benutzerfreundlichkeit und Eindeutigkeit (*AM3* und *4*) mit der Offenheit und der Anforderung hinsichtlich der Ontologien (*SAM4* und *5*) dar. Die Anforderungen *AM3* und *AM4* wurden hierbei im Hinblick auf die Anwendung durch ggf. nicht spezialisierte Nutzer in einer frühen Planungsphase höher priorisiert, sodass für den Anwendungsfall der Selbststeuerung und im speziellen eines MASS das Framework JADE fokussiert und die unabhängige Auswahl von Ontologien eingeschränkt wird.

6.4.2 Technische und wirtschaftliche Bewertung des Systems

Für die technische Bewertung des Systemansatzes werden die Eigenschaften des Demonstrators mit den initial definierten Anforderungen abgeglichen. Die wirtschaftliche Bewertung des Systemansatzes erfolgt anhand von abgestimmten Plandaten, welche im Rahmen der weiterführenden Umsetzung gewonnen wurden.

6.4.2.1 Technische Bewertung

Zur technischen Bewertung des entwickelten Systems wird im Folgenden zu jeder Anforderung an das System, vgl. Tabelle 6-8, Stellung bezogen, ihr Erfüllungsgrad untersucht und auf Ergebnisse der Umsetzung verwiesen.

Tabelle 6-8: Bewertung des Systems anhand der gestellten Anforderungen

<i>Nr</i>	<i>Anforderung</i>	Bewertung
<i>AS1</i>	<i>Identifikation</i>	●
<i>AS2</i>	<i>Lokalisierung</i>	●
<i>AS3</i>	<i>Kommunikation</i>	●
<i>AS4</i>	<i>Sicherstellung der Funktionalität der PPS</i>	●
<i>AS5</i>	<i>Industrielle Einsetzbarkeit</i>	●

Im Rahmen der Arbeit wurde ein MASS vollumfänglich umgesetzt, welches sich nun im Einsatz befindet. Hierbei wurden Standards wie die FIPA-Konformität oder UML-Richtlinien hinsichtlich der Modellierung vollständig und durchgängig eingehalten. Sicherheitstechnische Aspekte wurden ebenso berücksichtigt, sodass die Anlage in einer Einhausung autonom betrieben wird (vgl. Abbildung 6-16).



Abbildung 6-16: RoboFill-Anlage im Einsatz

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

Im Rahmen des Umsetzungsbeispiels wurden bereits integrierte Sensoren zur Identifikation verwendet, welche die Objekte ohne zusätzlichen zeitlichen Aufwand während des Handhabungsprozesses identifizieren. Dadurch sind alle Anforderungen an die Identifikation erfüllt. Die im Rahmen der weiterführenden Umsetzung erprobten Verfahren haben ebenfalls alle Kriterien der Identifikation erfüllt. Lediglich die situativ angepasste Merkmalsidentifikation, in welcher die Anzahl der zu identifizierenden Merkmale durch das aktuelle Spektrum der aktiven Objekte reduzierbar ist, konnte nicht überprüft werden. Die Nutzung dieses Potenzials erfordert jedoch keine weiteren Aufwendungen und kann das System und seine Funktionsweise nicht negativ beeinflussen.

Das verwendete Umlaufsystem wie auch die eingesetzten Robotersysteme sind in der Lage, die aktuelle Position der Flaschen stets in Abhängigkeit ihrer Positioniergenauigkeit, in diesem Fall ± 1 mm, zu übermitteln. Dieser Prozess ist nicht mit zusätzlichen Kosten verbunden und benötigt keine Lokalisierungszeit. Im Rahmen der erweiterten Umsetzung konnte zudem dargelegt werden, dass verschiedene Systeme zur Identifikation ebenfalls für die Lokalisierung verwendbar sind.

Die Kommunikation des Systems und dessen Performanz war zunächst abhängig von der Anzahl der gleichzeitig gestarteten Agenten (vgl. Abbildung 6-17). Mit steigender Anzahl nahm die benötigte Gesamtzeit der Objektagenten in der Beispielanlage stark zu. Hierzu wurden mit vier unterschiedlichen Ausfallraten und Objektmengen jeweils fünf Testläufe durchgeführt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde der zusätzliche Agentenzustand „inaktiv“ eingeführt. Agenten in diesem Zustand senden keine Nachrichten, welche den Systemspeicher überlasten. Durch diesen Zustand waren im Durchschnitt maximal 700 Agenten in dem aufgebauten Testsystem aktiv, sodass die mittlere Gesamtzeit zur Fertigung eines Objektagenten 250 Sekunden nicht überstieg (Ausfallrate 0 %).

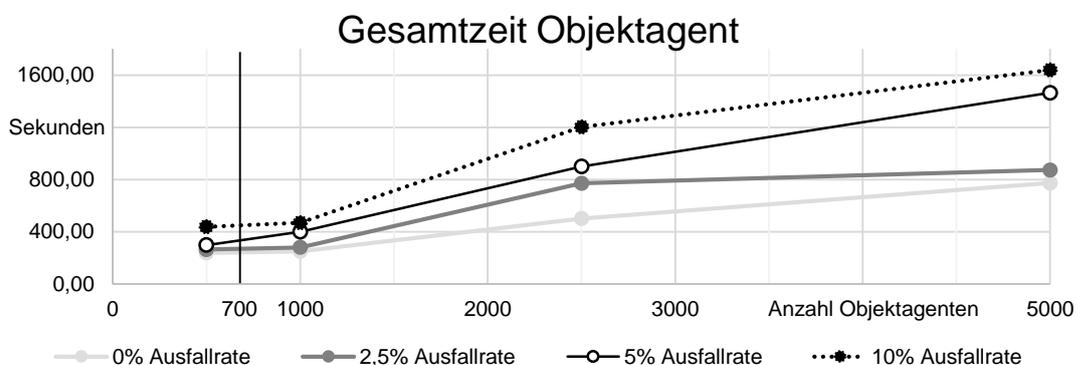


Abbildung 6-17: Auswertung der Testläufe - Auszug

Durch die optionale Verwendung von Bereichsagenten können zudem verschiedene Szenarien vorab geplant und erprobt werden, um die folgenden Verhandlungen zu beeinflussen. Dies ist über das entwickelte Evaluationstool möglich, welches für die Betriebsphase des Systems adaptierbar und nutzbar ist. Dies führt direkt zur Sicherstellung der Funktionalität der PPS. Durch die Kombinationsmöglichkeiten im Bereich der Kommunikation und der unterschiedlichen implementierbaren Verhaltensweisen der Agenten (vgl. Codegenerator), können unterschiedlichste Funktionen und Steuerungsstrategien genutzt werden. Zudem wurde die Funktionsweise des Agentensystems als PPS in weit mehr als hundert Simulationen unter Beweis gestellt (vgl. Abbildung 6-18). Die Simulation zeigt das abstrahierte Abbild der RoboFill-Anlage. Die dunkelgrauen ovalen Symbole stellen den Wareneingang und -ausgang dar. Die Prozessmodule abgekürzt mit FA_1-10 sind als hellgraue Quadrate und die Handhabungssysteme analog als dunkelgraue Quadrate dargestellt. Die Flaschen, allgemein als Objekt-agent (OA) beschrieben, sind als Kreise dargestellt.

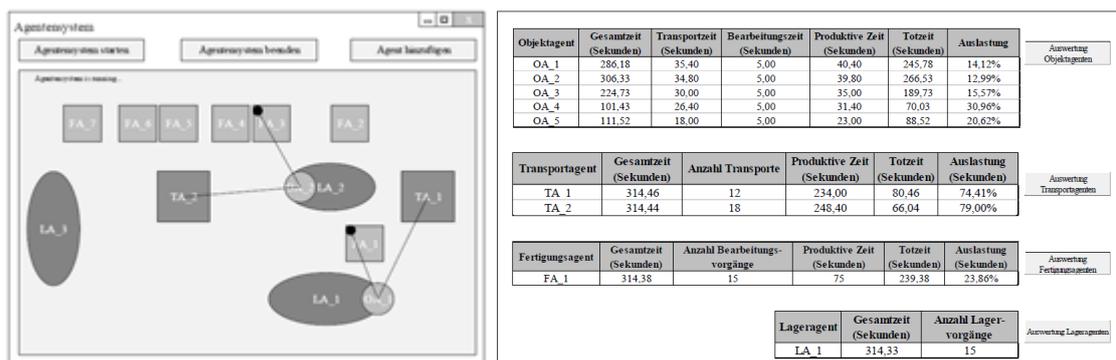


Abbildung 6-18: Simulation des Agentensystems – Beispiel

6.4.2.2 Wirtschaftliche Bewertung

Das im Rahmen des Projekts RoboFill4.0 entwickelte MASS hat bereits während der Planungsphase, in welcher noch von einem Einsatz zusätzlicher Sensoren ausgegangen wurde, deutliche wirtschaftliche Vorteile im Vergleich zu bestehenden Selbststeuerungssystemen gezeigt (vgl. Abschnitt 6.2.2). Diese Vorteile wurden durch die Nutzung bereits vorhandener Betriebsmittel weiter verstärkt, sodass zusätzliche Investitions- und Betriebskosten in diesem Anwendungsbeispiel komplett entfallen. Da die Anlage in den Simulationen wie auch in der Erprobungsphase keine Einschränkungen aufweist, ist die Wirtschaftlichkeit für diesen Anwendungsfall vollumfänglich gegeben.

Um die Wirtschaftlichkeit und die Anwendung der vereinfachten Kapitalwertmethode (vgl. Abschnitt 5.4.3.3) für weitere Fälle zu beweisen, wurden die Ergebnisse aus der weiterführenden Umsetzung (vgl. Abschnitt 6.3) um weitere Annahmen ergänzt. Hierbei wird auf die potenziellen Investitions- und Betriebskosten eines Unternehmens für ein MASS und ein IDSS eingegangen.

Aus der Analyse der Produktdaten (vgl. Abschnitt 6.3) wurde eine grundlegende Eignung eines MASS abgeleitet. Für die weitere Betrachtung wird die Eignung exemplarisch auf den Bereich der metallischen Fertigung beschränkt und die Annahme getroffen, dass in diesem Bereich Automatisierungssysteme zur Vernetzung der Bearbeitungszentren eingesetzt werden. Um das System in diesem Szenario zu nutzen, wurde für den untersuchten Fabrikbereich von 2500 m² der Bedarf an zehn Wägezellen und ebenfalls zehn 3D-Kameras abgeleitet. Unter Berücksichtigung der benötigten Bildverarbeitungssoftware und den Rechereinheiten wurden die Investitionskosten aus Tabelle 6-9 deduziert. Für das Agentensystem und seine Anpassung ist keine kostenpflichtige Software notwendig. Die Agenten können nach dem FIPA-Standard auf den verteilten Rechnern der Bildverarbeitung gestartet werden. Die Betriebskosten des MASS beschränken sich auf die Wartungskosten der Sensoren und die Implementierung von Identifikationsprogrammen für neue Produkte. Die Energiekosten sind im Vergleich zu den eingesetzten Bearbeitungszentren so gering, dass sie keiner Berücksichtigung bedürfen.

Für den Einsatz eines IDSS werden ebenfalls zwei Rechereinheiten benötigt und zudem fünf RFID-Lesegeräte. Der Implementierungsaufwand ist zu großen Teilen identisch, jedoch wird der Aufwand zur Implementierung standardisierter Lesegeräte geringer eingeschätzt. Die Personalschulungen wurden im Rahmen von Expertengesprächen als gleichwertig eingestuft.

Tabelle 6-9: Kostenvergleich MASS und IDSS

Investitionskosten	MASS	IDSS
Wägezellen (10 Stk.)	20.000 €	-
3D-Kamera – Time-of-Flight	10.000 €	-
Rechnereinheiten	15.000 €	3.000 €
Anbringung RFID-Transponder	-	10.000 €
RFID-Lesegeräte	-	5.000 €
Lizenz Bildverarbeitungssoftware	10.000 €	-
Implementierungsaufwand (inkl. Anpassungen)	500.000 €	450.000 €
Personalschulungen	30.000 €	30.000 €
Betriebskosten / Jahr		
Wartung der Sensoren/Lesegeräte	3000 €	2000 €
Implementierung Identifikationsprogramme (neue Produkte)	10.000 €	-
Implementierung RFID-Transponder (neue Produkte)	-	5000 €
Absatzabhängige Kosten für RFID-Transponder	-	0,06 €/Stk.
Personalkosten für die Systembetreuung	100.000 €	100.000 €

Mit diesen Werten können unterschiedliche Szenarien hinsichtlich der Menge zu fertigender Produkte analysiert werden. In Abstimmung mit dem Unternehmen wurde die jährliche Anzahl an Objekten, welche diesen Fertigungsbereich durchlaufen, auf 0,8 bis 1,2 Mio Stück geschätzt und für die Kapitalwertmethode verwendet. Daraus ergeben sich für IDSS zusätzliche jährliche Betriebskosten von 48.000 bis 72.000 Euro. Unter Verwendung eines kalkulatorischen Zinssatzes von 7 % und einem Steuersatz von 22,2 % (SPENGEL ET AL. 2018) ergeben sich für einen Betrachtungszeitraum von fünf Jahren die in Tabelle 6-10 dargestellten erforderlichen jährlichen Einsparungen.

Aus einer Diskussion der Ergebnisse mit der Geschäftsführung des Unternehmens wurden die potenziellen Kosteneinsparungen durch eine optimierte und reaktionsfähige PPS auf 8 bis 12 % der Produktionskosten geschätzt. Dies entspricht ca. 1,2 bis 1,8 Mio. Euro pro Jahr. In Verbindung mit der prognostizierten Anzahl der gefertigten Einzelteile wurde der Kapitalwert für die vier unterschiedlichen Szenarien S1.1-S2.2 bestimmt (vgl. Tabelle 6-10).

Tabelle 6-10: Erforderliche Einsparungen und Kapitalwerte

Erforderliche Einsparungen	MASS	IDSS	Δ
S1 – 0,8 Mio. Stk.	274.293 €	292.306 €	18.013 €
S2 – 1,2 Mio. Stk.	274.293 €	316.306 €	42.013 €
Kapitalwerte			
S1.1 – 0,8 Mio. Stk. & Einsparung 1,2 Mio. €	4.539.222 €	4.411.422 €	127.800 €
S1.2 – 0,8 Mio. Stk. & Einsparung 1,8 Mio. €	7.283.397 €	7.155.596 €	
S2.1 – 1,2 Mio. Stk. & Einsparung 1,2 Mio. €	4.539.222 €	4.301.655 €	237.568 €
S2.1 – 1,2 Mio. Stk. & Einsparung 1,2 Mio. €	7.283.397 €	7.045.829 €	

6 Umsetzung, Anwendung und Bewertung

In diesem Fall ist das wirtschaftliche Potenzial von Selbststeuerungssystemen deutlich erkennbar. Voraussetzung für das untersuchte Unternehmen wäre hingegen ein höherer Automatisierungsgrad in diesem Fabrikbereich, der für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angenommen wurde.

Die Differenz der beiden Ansätze zeigt, dass selbst im Fall benötigter Sensor-kombinationen ein MASS wirtschaftliche Vorteile besitzt. Zudem wurden mit 6 Cent sehr geringe Kosten für die RFID-Transponder angenommen und weitere Kosteneinsparungen durch die integrierte Qualitätskontrolle in einem MASS nicht berücksichtigt. ENGELHARDT (2015) verwendet bspw. Stückkosten von 2,50 Euro pro Transponder. Dieser Zusammenhang ist stets an die Eignung eines MASS hinsichtlich des vorliegenden Produktspektrums und der Absatzzahlen gekoppelt, sodass eine allgemeingültige Prävalenz nicht abzuleiten ist.

Im abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf künftige Forschungsfelder gegeben.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung und Fazit

Ziel der Arbeit war es, den Anwendungsbereich von Selbststeuerungssystemen zu erweitern, um deren Vorteile in der gesamten Produktion nutzbar zu machen. Aufgrund der mengenabhängigen Kosten und der prozesstechnischen Restriktionen bestehender ID-basierter Selbststeuerungssysteme musste für die Erreichung der Zielstellung ein neuer Systemansatz entwickelt werden, welcher die bestehenden Nachteile negiert. Zu diesem Zweck wurde der bislang nicht betrachtete Ansatz einer merkmalsbasierten Selbststeuerung konzipiert und umgesetzt. Das Fundament dieses Ansatzes bildet die merkmalsbasierte Identifikation in Verbindung mit der konsekutiv entwickelten kontinuierlichen Lokalisierung und der agentenbasierten Kommunikation. Die zentralen Betriebsmittel des Ansatzes stellen Handhabungssysteme dar, in welche die Identifikationsverfahren zu integrieren sind, um eine produktionsunabhängige hohe Identifikationsfrequenz sicherzustellen. Darüber hinaus wird die entwickelte kontinuierliche Lokalisierung ebenfalls durch Handhabungssysteme durchgeführt, welche die Position von Objekten nach jeder Bewegung aktualisieren. Um das resultierende MASS und seine Vorteile anwendungsübergreifend nutzbar zu gestalten, wurde eine ganzheitliche Methodik entwickelt, welche einen Anwender von der initialen Idee eine Selbststeuerung einzusetzen bis hin zu ihrer Implementierung unterstützt. Hierbei wurden vier unterschiedliche Themenbereiche identifiziert, welche einer methodischen Unterstützung bedürfen. In Anlehnung an den Stand der Wissenschaft und Technik sowie den entwickelten Systemansatz wurden acht themenübergreifende und dreizehn spezifische Anforderungen abgeleitet, welche den Rahmen für die Entwicklung der methodischen Unterstützung bildeten. Unter der Verwendung des Münchner Methodenmodells (MMM) in Kombination mit dem strukturellen Komplexitätsmanagement wurde zu jedem der Themenbereiche eine Methode bestehend aus einer Vorgehensweise und mehreren unterstützenden Werkzeugen erarbeitet. Darüber hinaus wurde das MMM erweitert, um gezielt methodische Schnittstellen zu erarbeiten, welche eine Kombination der einzelnen Methoden in der ganzheitlichen Methodik sicherstellen.

Im ersten Schritt wird szenariospezifisch die grundlegende Eignung eines MASS für eine Produktion im Planungsstadium geprüft. Ist diese gegeben, wird anschließend das Produktspektrum analysiert, um identifizierbare Merkmale und

7 Schlussbetrachtung

weitere Informationen wie bspw. die Menge und Ausprägung benötigter Identifikationssysteme abzuleiten. Mit diesen Informationen ist es möglich, eine Kostenindikation durchzuführen und die Eignung eines MASS aus Produkt- und Kostensicht abzusichern. Durch diese zweistufige Eignungsprüfung werden potenziell überflüssige Aufwände in der Planung vermieden. Die dritte Methode befasst sich mit der Auswahl bzw. Entwicklung von integrierten Identifikationsverfahren. Hierbei handelt es sich um Identifikationsverfahren, welche in Handhabungsprozesse integriert wurden. Sobald alle benötigten Betriebsmittel und Produktionsprozesse vorliegen, wird in der vierten Methode ein Agentensystem geplant und konfiguriert, welches die Kommunikation aller Systemelemente sicherstellt und die Basis für eine dezentrale und autonome Entscheidungsfindung bildet. Bestandteil dieser Methode ist ein Codegenerator und ein Evaluationstool, welche eine effiziente Entwicklung sicherstellen.

Diese Methodik wurde anschließend im Rahmen des Forschungsprojekts RoboFill4.0 angewandt, um eine vollautomatisierte und autonom gesteuerte Abfüllanlage zu realisieren. Das hierbei gewonnene Erfahrungswissen wurde in die Methodik zurückgespiegelt und maßgeblich in den verschiedenen entwickelten Werkzeugen gebündelt, um es selbst für themenfremde Anwender nutzbar zu machen. Auf diese Weise wurde die Methodik iterativ weiterentwickelt. Das Ergebnis ist eine umfassend unterstützte Vorgehensweise, welche alle gestellten Anforderungen erfüllt.

Am Beispiel der vollautomatisierten Abfüllanlage wurde zudem gezeigt, dass der merkmalsbasierte Identifikationsansatz keine negativen Auswirkungen auf den Prozessablauf oder die Prozesszeiten besitzt. Durch die Nutzung vorhandener Sensoren innerhalb der Handhabungs- und Greifsysteme konnten neben den Betriebskosten die Investitionskosten im Vergleich zu einem ID-basierten Ansatz gesenkt werden. Aus der erweiterten Umsetzung und der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung geht hervor, dass der entwickelte Systemansatz übertragbar ist und ein großes wirtschaftliches Potenzial besitzt.

Zusammenfassend konnte im Rahmen dieser Arbeit die Funktionsweise einer merkmalsbasierten Selbststeuerung dargelegt werden. Das entstandene MASS eignet sich vorrangig für die Produktion individueller Güter und ist mit zudem mit einer ID-basierten Selbststeuerung kombinierbar. Dies stellt sicher, dass eine durchgängige Selbststeuerung im produktionstechnischen Umfeld auch dann sichergestellt ist, wenn die identifizierten äußeren Rahmenbedingungen eine reine merkmalsbasierte Selbststeuerung nicht zulassen.

7.2 Ausblick

Bereits im Rahmen der Anforderungsdefinition wurde die hohe Innovationsdynamik im Bereich der Sensorik aufgegriffen und über die Anforderungen der Skalier- und Adaptierbarkeit (*AM6*) sowie der Variabilität und Wiederverwendbarkeit (*AM7*) berücksichtigt. Aufgrund der zahlreichen Verfahren, die in diesem Bereich neu entstehen bzw. optimiert werden, ist davon auszugehen, dass künftig noch weitere Merkmale und Sensoren in einem MASS nutzbar sind. Neben der Weiterentwicklung der Identifikationstechnologien sowie der Vereinfachung ihrer Inbetriebnahme bspw. durch den Einsatz von Machine-Learning-Verfahren, kann die Identifikation aus Objektsicht vereinfacht werden. Die vorgestellte Methodik setzt in einer frühen Planungsphase an, in welcher das Produktspektrum einerseits ausreichend genau definiert sein muss. Andererseits besteht zu diesem Zeitpunkt noch die Möglichkeit, die Produkte und ihre Bauteile zu verändern. In Anlehnung an bestehende Design-for-X-Ansätze könnte ein Design-for-Identification-Ansatz erarbeitet werden, welcher sowohl die direkte Identifikation durch die gezielte Einbringung einfach erkennbarer Merkmale als auch die Anbringung von IDs vereinfacht. Ein Beispiel für Design-for-Identification ist die Anpassung bestehender Hilfsgeometrien. Im Karosseriebau ist die Einbringung von Löchern für die präzise Bauteilaufnahme in Fügestationen ein gängiges Verfahren. In diesem Fall könnten die Positionen der Löcher leicht abgeändert werden, um eindeutige Lochmuster zu schaffen, welche entsprechend einfach identifizierbar sind.

Ein weiteres potenzielles Forschungsfeld stellt die Kombination der beiden Identifikationsalternativen dar. Auf diese Weise könnten Synergien genutzt und die Wirtschaftlichkeit weiter erhöht werden. Um die Ansätze zu kombinieren, muss für die einzelnen Objekte der individuelle Zeitpunkt bzw. Zustand bestimmt werden, ab wann eine ID benötigt wird. Hierbei könnte z. B. eine kostenbasierte Entscheidung in Abhängigkeit der Wertentwicklung eines Objekts verwendet werden. Im Rahmen verschiedener Fabrikplanungsmethoden werden Diagramme zur Wertentwicklung der Produktrepräsentanten erarbeitet, um die szenariospezifischen Stückkosten zu bestimmen. Basis dieser Diagramme bilden die definierten benötigten Prozessschritte, welche auf der Y-Achse des Diagramms aufgetragen werden. Nach dem Grundprinzip der Problemzerlegung werden auf diese Weise die einzelnen Kostenpositionen abgeschätzt und auf die X-Achse als Wert des Objekts aufgetragen (vgl. Abbildung 7-1).

7 Schlussbetrachtung

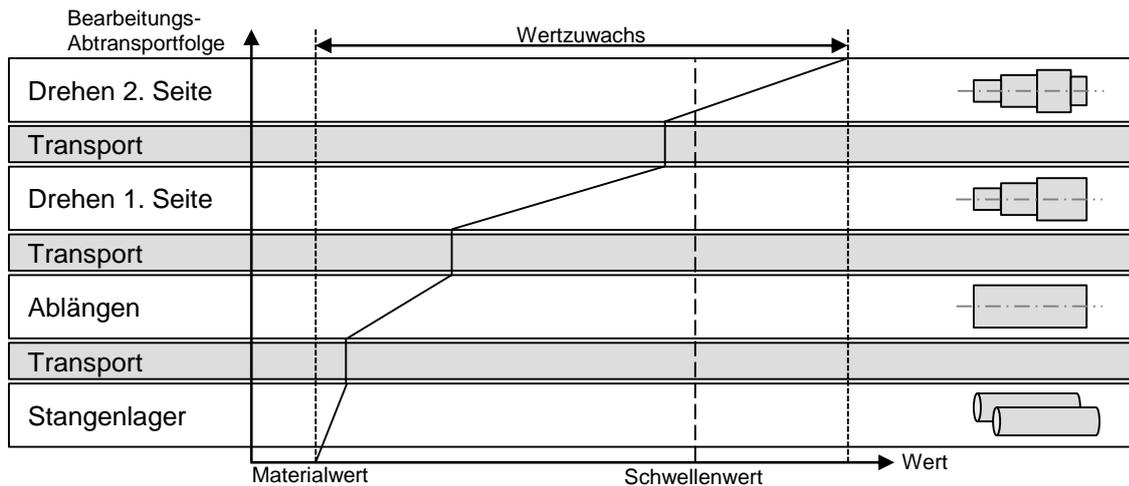


Abbildung 7-1: Wertentwicklung von Objekten in Anlehnung an WARNECKE (1993)

In diesen Graphen könnte produktions- bzw. produktspezifisch ein Schwellenwert eingetragen werden, ab wann die Identifikation indirekt durchgeführt werden soll. Aus methodischer Sicht stellt dieses Forschungsfeld die konsekutiven Arbeitsinhalte aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit dar.

8 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten und eigener Veröffentlichungen

8.1 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden an der Fraunhofer-Einrichtung IGCV, ehemals Fraunhofer Projektgruppe RMV, in den Jahren 2015 bis 2019 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Identifikation, Lokalisierung und Kommunikation in Selbststeuerungssystemen untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Entwicklung eines flexiblen Greiferkonzepts für eine individualisierte Getränkeabfüllung (Wohlschläger, Lukas 2016, Bachelorarbeit; Abschnitt 5.5)

Entwicklung einer flexiblen Greifersteuerung für eine individualisierte Getränkeabfüllung (Schäffer, Bernhard 2016, Bachelorarbeit; Abschnitt 6.2.3)

Entwurf und Realisierung eines agentenbasierten und dezentralen Steuerungskonzeptes zur flexiblen Produktion individueller Güter am Beispiel einer modularen Getränkeabfüllanlage (Frei, Thomas Daniel 2016, Masterarbeit; Abschnitt 6.2)

Vorgehensweise zur Auswahl und Integration von Handhabungssystemen in eine agentenbasierte Materialflusssteuerung (Schwegler, David 2016, Masterarbeit; Abschnitt 5.6)

Entwicklung einer flexiblen kamerabasierten Manipulationsstrategie für Objekte in ungewisser Pose (Geitner, Carolin Maria 2016, Semesterarbeit; Kapitel 6.3.2.2)

Analyse zur Einsatzfähigkeit merkmalsbasierter Objektidentifikation in autonomen Produktionssystemen (Schuch, Patrick 2018, Bachelorarbeit; Abschnitt 5.3)

Entwicklungsmethodik für ein Agentensystem im Umfeld einer merkmalsbasierten Selbststeuerung (Königl, Daniel 2018, Bachelorarbeit; Abschnitt 5.5)

Softwaregestützte Methode zur Planung und Konfiguration eines Agentensystems im produktionstechnischen Umfeld (Königl, Daniel 2019, Masterarbeit; Kapitel 4 und Abschnitte 5.6 und 6.1)

8.2 Eigene Veröffentlichungen

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden an der Fraunhofer-Einrichtung IGCV unter wesentlicher Beteiligung des Autors mehrere Veröffentlichungen, in welchen bereits Auszüge der vorliegenden Arbeit dargestellt und diskutiert wurden. Diese sind im Folgenden aufgelistet:

SCHMALZ ET AL. 2015

Schmalz, J.; Kiefer, L.; Behncke, F.: Analysis of the System Handling using Methods of Structural Complexity Management. Applied Mechanics & Materials 794. (2015)

KIEFER ET AL. 2017

Kiefer, L.; Richter, C.; Reinhart, G.: Autonome Produktionssteuerung mittels direkter Identifikationsverfahren. In: VDI Automationskongress. Baden Baden. VDI Verlag. ISBN: 978-3-18-092293-5. (2017)

KIEFER ET AL. 2019A

Kiefer, L.; Voit, P.; Richter, C.; Reinhart, G.: Attribute-based identification processes for autonomous manufacturing systems – an approach for the integration in factory planning. Procedia CIRP – ICME, Volume 79, Pages 204-209, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.047> (2019)

KIEFER ET AL. 2019B

Kiefer, L.; Königl, D.; Richter, C.; Reinhart, G.: Planning and Configuration of Agent Systems for Autonomous Production Control – Partially Automated Code Generation in an early Planning Phase. International Conference on Competitive Manufacturing - COMA 19 Proceedings. Stellenbosch. ISBN: 978-0-7972-1779-9. (2019)

KIEFER 2019

Kiefer, L.: Flexible Anlagenvernetzung in der Getränkeindustrie. BRAUWELT Sonderheft-RoboFill 4.0. Nr. 20/2019. S.579-580. ISSN 0724-696X (2019)

NEUGRODDA ET AL. 2019

Neugrodde, C.; Voigt, T.; Kiefer, L.: Abschlussbericht des Forschungsprojektes RoboFill 4.0. Förderung der Bayerischen Forschungstiftung 2015-2019. (2019)

9 Literaturverzeichnis

ADAM ET AL. 1997

Adam, W.; Busch, M.; Nickolay, B.: Sensoren für die Produktionstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 1997. ISBN: 978-3-642-60342-6.

AGENT TECHNOLOGY CENTER 2018

Agent Technology Center: AGLOBE. <<http://agents.felk.cvut.cz/projects/aglobe>> - 16.08.2018.

AGENTBUILDER 2016

AgentBuilder: AgentBuilder- an integrated software toolkit that allows software developers to quickly develop intelligent software agents and agent-based applications. <<http://www.agentbuilder.com/>> - 16.08.2018.

AGENTFACTORY 2016

AgentFactory: The AgentFactory Framework. <<https://sourceforge.net/projects/agentfactory/>> - 16.08.2018.

AGENTSCAPE 2014

AgentScape: AgentScape - Distributed Agent Middleware. <<http://www.agentscape.org/>> - 16.08.2018.

AKBARI 2010

Akbari, Z.: A survey of agent-oriented software engineering paradigm. Towards its industrial acceptance 1 (2010), S. 14-28.

ALONSO ET AL. 2005

Alonso, F.; Frutos, S.; Martínez, L.; Montes, C.: SONIA: A Methodology for Natural Agent Development. In: Gleizes, M.-P. et al. (Hrsg.): Engineering societies in the agents world V. 5th international workshop, ESAW 2004, Toulouse, France, 20-22.10.2004; revised selected and invited papers. Berlin: Springer 2005, S. 245-260. ISBN: 978-3-540-27330-1. (Lecture notes in computer science > Lecture notes in artificial intelligence; 3451).

ANTZOULATOS ET AL. 2014

Antzoulatos, N.; Castro, E.; Scrimieri, D.; Ratchev, S.: A multi-agent architecture for plug and produce on an industrial assembly platform. Production Engineering 8 (2014) 6, S. 773-781.

AOS GROUP 2015

AOS Group: Documentation & Instructional Material. <http://www.agent-software.com/products/jack/documentation_and_instructi/> - 16.08.2018.

ARGENTE ET AL. 2011

Argente, E.; Botti, V.; Julian, V.: GORMAS: An Organizational-Oriented Methodological Guideline for Open MAS. In: Gleizes, M.-P. et al. (Hrsg.): Agent-oriented software engineering X. 10th international workshop, AOSE 2009, Budapest, Hungary, 11-12.05.2009 ; revised selected papers. Berlin: Springer 2011, S. 32-47. ISBN: 978-3-642-19207-4. (Lecture Notes in Computer Science 6038).

ARNOLD & FURMANS 2009

Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 6., erweiterte Aufl.: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2009. ISBN: 978-3-642-01404-8. (VDI-Buch).

ATUG ET AL. 2016

Atug, J.; Hees, A.; Wagner, M.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Production planning for customer innovated products. In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management et al. (Hrsg.): IEEM 2016, 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Bali, Indonesia, 4-7.12.2016. Piscataway, NJ: IEEE 2016, S. 931-935. ISBN: 978-1-5090-3665-3.

BACKHAUS 2015

Backhaus, J.: Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. (Dissertation) Technische Universität München. 2015. ISBN: 978-3-8316-4570-1. (Forschungsberichte IWB, Nr. 319).

BADKE-SCHAUB & FRANKENBERGER 2001

Badke-Schaub, P.; Frankenberger, E.: Management kritischer Situationen. In: I Mech E (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design. Glasgow, UK. Berlin: Springer 2001.

BADR 2011

Badr, I.: Agent-based dynamic scheduling for flexible manufacturing systems. (Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2010). Aachen: Shaker 2011. ISBN: 978-3-8322-9736-7. (IAS-Forschungsberichte 2011,1).

BALZERT 1999

Balzert, H.: Lehrbuch der Objektmodellierung. Analyse und Entwurf; mit CD-ROM. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. 1999. ISBN: 3827402859. (Lehrbücher der Informatik).

BAMBERG ET AL. 2008

Bamberg, G.; Coenenberg, A. G.; Krapp, M.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 14., überarb. Aufl. Aufl: 2008. ISBN: 978-3-8006-3506-1. (Vahlens Kurzlehrbücher).

BAO & FRITCHMANN 2018

Bao, L.; Fritchman, J. C.: Information of Complex Systems and Applications in Agent Based Modeling. Scientific reports 8 (2018) 1, S. 6177.

BARBOSA & LEITAO 2011

Barbosa, J.; Leitão, P.: Simulation of multi-agent manufacturing systems using Agent-Based Modelling platforms. (Hrsg.): 2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Lisbon, Portugal, 26.07.2011 - 29.07.2011: IEEE 2011, S. 477-482. ISBN: 978-1-4577-0435-2.

BARBOSA ET AL. 2015

Barbosa, J.; Leitão, P.; Adam, E.; Trentesaux, D.: Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems. The ADACOR evolution. Computers in Industry 66 (2015), S. 99-111.

BARTENSCHLAGER ET AL. 1998

Bartenschlager, J.; Hebel, H.; Schmidt, G.: Handhabungstechnik mit Robotertechnik. Funktion, Arbeitsweise, Programmierung. Braunschweig: Vieweg 1998. ISBN: 978-3-528-03830-4.

BASRAN ET AL. 1997

Basran, J. S.; Petriu, E. M.; Petriu, D. C.: Flexible agent-based robotic assembly cell. In: IEEE Robotics and Automation Society Staff (Hrsg.): 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, NM, USA, 20-25.04.1997. S. 3461-3466. ISBN: 0-7803-3612-7.

BAUERNHANSL ET AL. 2014

Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-04681-1. (SpringerLink).

BECKER ET AL. 2012

Becker, J.; Probandt, W.; Vering, O.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement. Berlin: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-642-30412-5.

BEHRENS ET AL. 2006

Behrens, C.; Becker, M.; Gehrke, J. D.; Jedermann, R.; Görg, C.; Herzog, O.; Lang, W.; Laur, R.: Ein Multi-Agentensystem für Selbststeuerung in der Transportlogistik. (Hrsg.): VDE Kongress 2016. Aachen 2006.

BELLIFEMINE ET AL. 2001

Bellifemine, F.; Poggi, A.; Rimassa, G.: Developing multi-agent systems with a FIPA-compliant agent framework. *Software: Practice and Experience* 31 (2001) 2, S. 103-128.

BELLIFEMINE ET AL. 2004

Bellifemine, F.; Caire, G.; Greenwood, D. P.: Developing multi-agent systems with JADE. Reprinted. Aufl. Chichester: Wiley 2004. ISBN: 978-0-470-05747-6. (Wiley series in agent technology).

BELSYS ET AL. 2014

Belsis, P.; Gritzalis, S.; Lambrinoudakis, C.; Skourlas, C.; Tsoukalas, V.; Vassis, D.: An Agent Based Architecture Benchmark. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 147 (2014), S. 429-435.

BERNON ET AL. 2003

Bernon, C.; Gleizes, M.-P.; Peyruqueou, S.; Picard, G.: ADELFE: A Methodology for Adaptive Multi-agent Systems Engineering. In: Petta, P. et al. (Hrsg.): *Engineering Societies in the Agents World III. Third International Workshop, ESAW 2002 Madrid, Spain, September 16-17, 2002 Revised Papers*. Berlin, Heidelberg: Springer 2003, S. 156-169. ISBN: 978-3-540-14009-2. (Lecture Notes in Computer Science 2577).

BERNSTEIN 2014

Bernstein, H.: *Messelektronik und Sensoren. Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014. ISBN: 978-3-658-00548-1.

BHATTACHARYA ET AL. 2005

Bhattacharya, A.; Sarkar, B.; Mukherjee, S. K.: Integrating AHP with QFD for robot selection under requirement perspective. *International Journal of Production Research* 43 (2005) 17, S. 3671-3685.

BJORKELUND ET AL. 2011

Bjorkelund, A.; Edstrom, L.; Haage, M.; Malec, J.; Nilsson, K.; Nugues, P.; Robertz, S. G.; Storkle, D.; Blomdell, A.; Johansson, R.; Linderöth, M.; Nilsson, A.; Robertsson, A.; Stolt, A.; Bruyninckx, H.: On the integration of skilled robot motions for productivity in manufacturing. (Hrsg.): 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). Tampere, Finland, 25-27.05.2011: IEEE 2011. S. 1-9. ISBN: 978-1-61284-342-1.

BLESSING 2000

Blessing, S.: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1999). München: Utz 2000. ISBN: 3896756907. (Forschungsberichte IWB, Nr. 134).

BLEY 2009

Bley, F.: Grifferrmittlung für anthropomorphe Endeffektoren mit Hilfe von geometrischem Vorwissen. (Techn. Hochsch., Diss. Aachen, 2008). 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2009. ISBN: 978-3-899-63932-2. (Ingenieurwissenschaften).

BLUNCK & WINDT 2013

Blunck, H.; Windt, K.: „Komplexität schafft Spielraum für Selbststeuerung“. Werkstattstechnik (WT) 103 (2013) 2, S. 109-113.

BÖHNLEIN ET AL. 2011

Böhnlein, D.; Schweiger, K.; Tuma, A.: Multi-agent-based transport planning in the newspaper industry. International Journal of Production Economics 131 (2011) 1, S. 146-157.

BORANGIU ET AL. 2015

Boranguiu, T.; Răileanu, S.; Berger, T.; Trentesaux, D.: Switching mode control strategy in manufacturing execution systems. International Journal of Production Research 53 (2015) 7, S. 1950-1963.

BORDINI ET AL. 2007

Bordini, R. H.; Hübner, J. F.; Wooldridge, M. J.: Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason. ebrary, Inc. Chichester, England, Hoboken, NJ: J. Wiley 2007. ISBN: 978-0-470-06183-1. (Wiley series in agent technology).

BOUBEKRI ET AL. 1991

Boubekri, N.; Sahoui, M.; Lakrib, C.: Development of an expert system for industrial robot selection. Computers & industrial engineering 20 (1991) 1, S. 119-127.

BRAUBACH & POKAHR 2013

Braubach, L.; Pokahr, A.: The Jadex Project. In: Ganzha, M. et al. (Hrsg.): Multi-agent Systems and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2013, S. 107-128. ISBN: 978-3-642-33322-4. (Intelligent Systems Reference Library).

BRENA ET AL. 2017

Brena, R. F.; García-Vázquez, J. P.; Galván-Tejada, C. E.; Muñoz-Rodríguez, D.; Vargas-Rosales, C.; Fangmeyer, J.: Evolution of Indoor Positioning Technologies. A Survey. Journal of Sensors 2017 (2017), S. 21.

BRENNAN & NORRIE 1998

Brennan, R. W.; Norrie, D. H.: Evaluating the relative performance of alternative control architectures for manufacturing. (Hrsg.): Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC) held jointly with IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA) Intelligent Systems and Semiotics (ISAS) (Cat. No.98CH36262). Gaithersburg, MD, USA, 14-17.09.1998. S. 90-95. ISBN: 0-7803-4423-5.

BRENNAN 2000

Brennan, R.W.: Performance comparison and analysis of reactive and planning-based control architectures for manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 16 (2000) 2-3, S. 191-200.

BRENNER ET AL. 1998

Brenner, W.; Zarnekow, R.; Wittig, H.: Intelligente Softwareagenten. Grundlagen und Anwendungen. Berlin u.a.: Springer 1998. ISBN: 3540634312.

BRESCIANI ET AL. 2004

Bresciani, P.; Perini, A.; Giorgini, P.; Giunchiglia, F.; Mylopoulos, J.: Tropos: An Agent-Oriented Software Development Methodology. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 8 (2004) 3, S. 203-236.

BUSSMANN 1998

Bussmann, S.: An agent-oriented architecture for holonic manufacturing control. (Hrsg.): Proceedings of first international workshop on IMS, Lausanne, Switzerland 1998, S. 1-12.

BUSSMANN ET AL. 2004

Bussmann, S.; Jennings, N. R.; Wooldridge, M.: Multiagent Systems for Manufacturing Control. A Design Methodology. Berlin, Heidelberg: Springer 2004. ISBN: 978-3-642-05890-5. (Springer Series on Agent Technology).

BUSSMANN & SCHILD 2001

Bussmann, S.; Schild, K.: An agent-based approach to the control of flexible production systems. In: IEEE, Press Staff (Hrsg.): IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation 2001, ETFA 2001. 2001 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Antibes-Juan les Pins, France, 15-18.10.2001. Piscataway: IEEE Oct. 2001, S. 481-488. ISBN: 0-7803-7241-7.

CAIRE ET AL. 2002

Caire, G.; Coulier, W.; Garijo, F.; Gomez, J.; Pavon, J.; Leal, F.; Chainho, P.; Kearney, P.; Stark, J.; Evans, R.; Massonet, P.: Agent Oriented Analysis Using Message/UML. In: Wooldridge, M. J. et al. (Hrsg.): Agent-Oriented Software Engineering II. Second International Workshop, AOSE 2001 Montreal, Canada, 29.05.2001. Revised Papers and Invited Contributions. Berlin, Heidelberg: Springer 2002, S. 119-135. ISBN: 978-3-540-43282-1. (Lecture Notes in Computer Science 2222).

CARDIN & CASTAGNA 2009

Cardin, O.; Castagna, P.: Using online simulation in Holonic manufacturing systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22 (2009) 7, S. 1025-1033.

CARDIN ET AL. 2017

Cardin, O.; Trentesaux, D.; Thomas, A.; Castagna, P.; Berger, T.; Bril El-Haouzi, H.: Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures. State of the art and future challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (2017) 7, S. 1503-1517.

CAVALIERI ET AL. 1999

Cavaliere, S.; Bongaerts, L.; Macchi, M.; Taisch, M.; Wyns, J.: A benchmark framework for manufacturing control. In: van Brussel, H. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems 1999. Heverlee: Katholieke Universiteit Leuven, Departement Werktuigkunde 1999, S. 225-236. ISBN: 90-73802-69-5.

CIRAD 2018

Cirad: CORMAS - COmmon-pool Resources and Multi-Agent Simulations. <<http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm>> - 16.08.2018.

9 Literaturverzeichnis

CLASEN 2007

Clasen, M.: Wirtschaftlicher RFID-Einsatz - Standards ermöglichen multiple Anwendungen. In: Herzog, O., Rödiger, K.-H., Ronthaler, M. & Koschke, R. (Hrsg.), Informatik 2007 – Informatik trifft Logistik – Band 2. Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V.. (S. 5-9).

CLAUS ET AL. 2015

Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen. Berlin: Springer Gabler 2015. ISBN: 978-3-662-43542-7.

COLLINS & NDUMU 1999A

Collins, J.; Ndumu, D.: ZEUS methodology documentation, part I. The role modelling guide (1999).

COLLINS & NDUMU 1999B

Collins, J.; Ndumu, D.: ZEUS methodology documentation, Part III. The application realisation guide. Intelligent Systems Research Group, BT Labs. Release 1 (1999).

COLLINS & NDUMU 2000

Collins, J.; Ndumu, D.: ZEUS Methodology Documentation, Part IV. The Runtime Guide (2000).

COLLINS ET AL. 1998

Collis, J. C.; Ndumu, D. T.; Nwana, H. S.; Lee, L. C.: The ZEUS agent building tool-kit. BT Technology Journal 16 (1998) 3, S. 60-68.

COSENTINO ET AL. 2010

Cossentino, M.; Gaud, N.; Hilaire, V.; Galland, S.; Koukam, A.: ASPECS. An agent-oriented software process for engineering complex systems. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 20 (2010) 2, S. 260-304.

COSENTINO & SEIDITA 2014

Cossentino, M.; Seidita, V.: PASSI. In: Cossentino, M. et al. (Hrsg.): Handbook on Agent-Oriented Design Processes. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2014, S. 287-329. ISBN: 978-3-642-39974-9.

COVANICH & MCFARLANE 2009

Covanich, W.; McFarlane, D.: Assessing ease of reconfiguration of conventional and Holonic manufacturing systems. Approach and case study. Engineering Applications of Artificial Intelligence 22 (2009) 7, S. 1015-1024.

DAENZER ET AL. 2002

Daenzer, W. F.; Büchel, A.; Habermüller, R.: Systems Engineering. Methodik und Praxis. 11. durchges. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 2002. ISBN: 385743998X.

DAHL 2012

Dahl, K.: Die 6-3-5-Methode. <<https://www.mittwald.de/blog/arbeitsalltag/sonstiges/kreativitaetstechniken-4-die-6-3-5-methode>> - 10.10.2018.

DAM & WINIKOFF 2004

Dam, K. H.; Winikoff, M.: Comparing Agent-Oriented Methodologies. In: Kanade, T. et al. (Hrsg.): Agent-Oriented Information Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2004, S. 78-93. ISBN: 978-3-540-22127-2. (Lecture Notes in Computer Science).

DÄUMLER & GRABE 2007

Däumler, K.-D.; Grabe, J.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. Aufgaben und Lösungen, Testklausur, Checklisten, Tabellen für die finanzmathematischen Faktoren; [Lehrbuch inklusive CD]. 12., vollst. überarb. Aufl. Herne: Verl. Neue Wirtschafts-Briefe 2007. ISBN: 978-3-482-52302-1. (NWB-Studium Betriebswirtschaft).

DELOACH 1999

DeLoach, S.: Multiagent Systems Engineering: A Methodology And Language for Designing Agent Systems. (Hrsg.): Proceedings of First International Bi-conference Workshop on Agent-Oriented Information Systems (AOIS '99). Seattle, USA 1999.

DELOACH & GARCIA-OJEDA 2014

DeLoach, S. A.; Garcia-Ojeda, J. C.: O-MaSE. In: Shehory, O. et al. (Hrsg.): Agent-Oriented Software Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2014, S. 173-191. ISBN: 978-3-642-54431-6.

DEUGO 2001

Deugo, D.: Mobile agent messaging models. (Hrsg.): Proceedings 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. Dallas, TX, USA, 26-28 March 2001: IEEE Comput. Soc 2001, S. 278-286. ISBN: 0-7695-1065-5.

DILLERUP & ALBRECHT 2005

Dillerup, R.; Albrecht, T.: Kapitalwertmethode. Haufe Rechnungswesen Office 1 (2005).

9 Literaturverzeichnis

DIN 4002

DIN 4002: Merkmale und Geltungsbereiche zum Produktdatenaustausch. Berlin: Beuth 01.08.2012.

DIN 6763

DIN 6763: Nummerung Grundbegriffe: Beuth 1985.

DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung: Beuth 2003.

DIN 8593

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 2003.

D'INVERNO ET AL. 1998

d'Inverno, M.; Kinny, D.; Luck, M.; Wooldridge, M.: A formal specification of dMARS. In: Carbonell, J. G. et al. (Hrsg.): Intelligent Agents IV Agent Theories, Architectures, and Languages. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 1998, S. 155-176. ISBN: 978-3-540-64162-9. (Lecture Notes in Computer Science).

DÖRNER 2003

Dörner, D.: Die Logik des Mißlingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek: Rowohlt 2003.

EHRENSPIEL & MEERKAMM 2013

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-446-43627-5.

EICHHORN 2012

Eichhorn, N.: Rüstprozessoptimierung in der Zerspanung. Methode zur Effizienzsteigerung beim Rüsten von Bearbeitungszentren in der Kleinserienfertigung. (Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011). Aachen: Shaker 2012. ISBN: 978-3-8440-0722-0.

EIGNER ET AL. 2012

Eigner, M.; Gerhardt, F.; Gilz, T.: Informationstechnologie für Ingenieure. 2012. ISBN: 978-3-642-24893-1.

ELAMMARI ET AL. 2000

Elammari, M.; Lalonde, W.: An Agent-Oriented Methodology: High-Level and Intermediate Models. (Hrsg.): Proceedings of Workshop on Agent Oriented Information Systems. 2000.

EMERALD 2018

EMERALD. <<http://lpis.csd.auth.gr/systems/emerald/>> - 16.08.2018.

ENGELHARDT 2015

Engelhardt, P. R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. München: Utz 2015. ISBN: 3831644721. (Forschungsberichte IWB, Nr. 299).

EPPLE 2011

Epple, U.: Merkmale als Grundlage der Interoperabilität technischer Systeme. at - Automatisierungstechnik 59 (2011) 7, S. 440-450.

ERHARDT 2008

Erhardt, A.: Einführung in die Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen, Systeme und Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2008. ISBN: 978-3-519-00478-3.

EVE 2015

eve: Eve - a web-based agent platform. < <https://eve.almende.com/> > 16.08.2018.

Favre-Bulle 2004

Favre-Bulle, B.: Automatisierung komplexer Industrieprozesse. Systeme, Verfahren und Informationsmanagement. Vienna, s.l.: Springer Vienna 2004. ISBN: 978-3-7091-0562-7.

FININ ET AL. 1994

Finin, T.; Fritzon, R.; McKay, D.; McEntire, R.: KQML as an agent communication language. In: Adam, N. R. et al. (Hrsg.): Proceedings of the third international conference on Information and knowledge management - CIKM '94, the third international conference. Gaithersburg, Maryland, United States, 29.11.1994 - 02.12.1994. New York, USA: ACM Press 1994, S. 456-463. ISBN: 0897916743.

FINKENZELLER 2015

Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage: 2015. ISBN: 978-3-446-44439-3.

FIPA 2004

FIPA: FIPA Agent Management Specification (2004).

FRANKE ET AL. 2010

9 Literaturverzeichnis

Franke, J.; Merhof, J.; Hopfensitz, S.: Einsatz von dezentralen Multiagentensystemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 12, S. 1075-1078.

FRESE 2005

Frese, E.: Grundlagen der Organisation. Entscheidungsorientiertes Konzept der Organisationsgestaltung. 9., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2005. ISBN: 3409126813. (Gabler-Lehrbuch).

FREY ET AL. 2003

Frey, D.; Nimis, J.; Wörn, H.; Lockemann, P.: Benchmarking and robust multi-agent-based production planning and control. Engineering Applications of Artificial Intelligence 16 (2003) 4, S. 307-320.

FUCHS 2013

Fuchs, S.: Wertstromorientierte Auftragsfreigabe bei dynamischen Engpässen in der Produktion nach dem Werkstattprinzip: Apprimus-Verlag 2013.

GARCÍA ANSOLA ET AL. 2015

García Ansola, P.; García Higuera, A.; las Morenas, J. de: Aligning decision support with shop floor operations: a proposal of intelligent product based on BDI physical agents. International Journal of Advanced Logistics 4 (2015) 3, S. 159-169.

GAUSEMEIER & PLASS 2014

Gausemeier, J.; Plass, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2., überarb. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43631-2.

GÖHNER 2013

Göhner, P.: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-31767-5.

GOMEZ-SANZ ET AL. 2017

Gomez-Sanz, J.; Fuentes, R.; Pavón, J.: INGENIAS. <<https://sourceforge.net/projects/ingenias/files/INGENIAS%20Development%20Kit/Aranjuez/IAFDevelopmentGuide.pdf/download>> - 16.08.2018.

GÖTZ 2018

Götz, G. A.: Methode zur Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen. München: Utz, Herbert 2018. ISBN: 978-3-8316-4332-5. (Forschungsberichte IWB, Nr. 337).

GOU ET AL. 1994

Gou, L.; Hasegawa, T.; Luh, P. B.; Tamura, S.; Oblak, J. M.; others: Holonic planning and scheduling for a robotic assembly testbed. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology 1994, S. 142-149.

GRAF 2018

Graf, J.: Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge. (Dissertation) Technische Universität München. München (2018). ISBN: 978-3-8316-4745-3. (Forschungsberichte IWB, Nr. 339).

GRIEMERT & RÖMISCH 2015

Griemert, R.; Römisch, P.: Fördertechnik. Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen. 11., überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-658-09083-8.

GRIGNARD ET AL. 2013

Grignard, A.; Taillandier, P.; Gaudou, B.; Vo, D. A.; Huynh, N. Q.; Drogoul, A.: GAMA 1.6. In: Hutchison, D. et al. (Hrsg.): PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2013, S. 117-131. ISBN: 978-3-642-44926-0. (Lecture Notes in Computer Science).

GRIGORYEV 2018

Grigoryev, I.: AnyLogic 8 in Three Days: A Quick Course in Simulation Modeling: Amazon - Kindle eBooks 2018.

GRONAU 2018

Gronau, N.: Der angemessene Grad von Autonomie in Cyberphysischen Produktionssystemen. *industrie 4.0 Management* 2018 (2018) 6, S. 7-12.

GRONAU & THEUER 2016

Gronau, N.; Theuer, H.: Determination of the Optimal Degree of Autonomy in a Cyber-Physical Production System. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 110-115.

GROTE 2016

Grote, A.: Integrale Betrachtung zur systematischen Definition von 3D Bildgebungssystemen in der Produktionstechnik. (Dissertation) Verlag Dr. Hut (2016).

GRUNDIG 2015

9 Literaturverzeichnis

Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser 2015. ISBN: 978-3-446-44215-3.

GRUNDSTEIN ET AL. 2013A

Grundstein, S.; Schukraft, S.; Görges, M.; Scholz-Reiter, B.: An approach for applying autonomous production control methods with central production planning. (Hrsg.): International Journal of Systems Applications, Engineering & Development 2013 (7).

GRUNDSTEIN ET AL. 2013B

Grundstein, S.; Schukraft, S.; Görges, M.; Scholz-Reiter, B.: Interlinking central production planning with autonomous production control. Advances in Production, Automation and Transportation Systems. 2013. ISBN: 978-1-61804-193-7.

GÜLLER ET AL. 2015

Güller, M.; Koc, E.; Hegmanns, T.; Henke, M.; Noche, B.: A simulation-based decision support framework for real-time supply chain risk management. International Journal of Advanced Logistics 4 (2015) 1, S. 17-26.

GÜNTHNER ET AL. 2010

Günthner, W.; Hompel, M. ten: Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin: Springer-Verlag 2010. ISBN: 9783642048951. (VDI-Buch).

GUTKNECHT & FERBER 2000

Gutknecht, O.; Ferber, J.: MadKit: a Generic Multi-Agent Platform. In: Sierra, C. et al. (Hrsg.): Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents - AGENTS '00, the fourth international conference. Barcelona, Spain, 03-07.06.2000. New York, USA: ACM Press 2000, S. 78-79. ISBN: 1581132301.

HARJES & SCHOLZ-REITER 2014A

Harjes, F.; Scholz-Reiter, B.: Autonomous Control in Closed Dynamic Logistic Systems. Procedia Technology 15 (2014), S. 313-322.

HARJES & SCHOLZ-REITER 2014B

Harjes, F.; Scholz-Reiter, B.: Integration aspects of autonomous control in event logistics. Research in logistics & production (2014) 4, S. 5-20.

HAUSBERG 2017

Hausberg, C. B.: Bestimmung der strukturbedingten Leistungsgrenzen der Produktionssteuerung. IIF - Institut für Industriekommunikation und Fachmedien GmbH. Aachen: Apprimus Verlag 2017. ISBN: 978-3-86359-510-4. (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 2017, Band 10).

HEEG 2005

Heeg, M.: Ein Beitrag zur Modellierung von Merkmalen im Umfeld der Prozessleittechnik: VDI-Verlag 2005.

HELSINGER ET AL. 2004

Helsing, A.; Thome, M.; Wright, T.: Cougaar. (Hrsg.): 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583), 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583). The Hague, Netherlands, 10-13.10.2004: IEEE 2004, S. 1910-1917. ISBN: 0-7803-8567-5.

HENKE ET AL. 2017

Henke, Michael; Kuhn, Axel (Hrsg.): Kollaboration als Schlüssel zum erfolgreichen Transfer von Innovationen. Analyse von Treibern und Hemmnissen in der Automobillogistik. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017. ISBN: 978-3-831-64618-0.

HERING & SCHÖNFELDER 2018

Hering, Ekbert; Schönfelder, Gert (Hrsg.): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018. ISBN: 978-3-658-12562-2.

HERRERA ET AL. 2014

Herrera, C.; Thomas, A.; Parada, V.: A product-driven system approach for multilevel decisions in manufacturing planning and control. Production & Manufacturing Research 2 (2014) 1, S. 756-766.

HERZOG & SCHILDHAUER 2009

Herzog, O.; Schildhauer, T.: Intelligente Objekte: Technische Gestaltung - Wirtschaftliche Verwertung - Gesellschaftliche Wirkung. Heidelberg u.a. Springer Verlag 2009

HESSE 2013

Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. 3. neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 3446435964.

HESSE & SCHNELL 2014

9 Literaturverzeichnis

Hesse, S.; Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion - Ausführung - Anwendung. 6., korr. und verb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-05867-8.

HIGUERA & MONTALVO 2007

Higuera, A. G.; Montalvo, A. C.: RFID-enhanced multi-agent based control for a machining system. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 19 (2007) 1, S. 41-61.

HIMMELSPACH & UHRMACHER 2007

Himmelspace, J.; Uhrmacher, A. M.: Plug'n Simulate. (Hrsg.): 40th Annual Simulation Symposium (ANSS'07), 40th Annual Simulation Symposium (ANSS'07). Norfolk, USA, 26.-28.03.2007: IEEE 2007, S. 137-143. ISBN: 0-7695-2814-7.

HINDRIKS 2018

Hindriks, K.: Tutorials, Documentation and Education of GOAL. <<https://goalapl.atlassian.net/wiki/spaces/GOAL/pages/33043/Tutorials+Documentation+and+Education>> - 16.08.2018.

HIPPENMEYER 2016

Hippenmeyer, H.: Automatische Identifikation für Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2016. ISBN: 978-3-662-52701-6.

HIRSCH ET AL. 2009

Hirsch, B.; Konnerth, T.; Heßler, A.: Merging Agents and Services — the JIAC Agent Platform. In: Bordini, R. H. (Hrsg.): Multi-agent programming. Languages, tools and applications. New York, London: Springer 2009, S. 159-185. ISBN: 978-0-387-89299-3.

HOFFMANN 2011

Hoffmann, M.: CAD/CAM mit CATIA V5. NC-Programmierung, Postprocessing, Simulation. 2., überarb. Aufl.: 2011. ISBN: 978-3-446-42284-1. (Edition CAD.DE).

HOMPEL ET AL. 2007

Hompel, M. ten; Jünemann, R.; Nagel, L.: Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik. 3., völlig neu bearbeitete Aufl.: 2007. ISBN: 978-3-540-73236-5. (VDI-Buch).

HOMPEL ET AL. 2008A

Hompel, M. ten; Büchter, H.; Franzke, U.: Identifikationssysteme und Automatisierung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2008. ISBN: 978-3-540-75881-5. (VDI-Buch).

HOMPEL ET AL. 2008B

Hompel, M. ten; Libert, S.; Roidl, M.: Erarbeitung von Methoden und Regeln zur Gestaltung agentengestützter, dezentraler Steuerungen für den Einsatz in komplexen Materialflusssystemen. Forschungsbericht: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen 2008.

HOPP & SPEARMANN 2011

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory physics. 3. ed., reissued. Aufl. Long Grove, Ill.: Waveland Press 2011. ISBN: 978-1-577-66739-1.

HÖRMANN & HÖRMANN 1990

Hörmann, A.; Hörmann, K.: Planung kollisionsfreier Greifoperationen: Analyse der Objektgeometrie. (Hrsg.): Robotersysteme: Springer 1990, S. 39-50. (6).

HOWDEN ET AL. 2001

Howden, N.; Rönquist, R.; Hodgson, A.; Lucas, A.: JACK intelligent agents-summary of an agent infrastructure. (Hrsg.): 5th International Conference on Autonomous Agents. Montreal 2001, S. 1-4.

HUCKABY & CHRISTENSEN 2012

Huckaby, J.; Christensen, H. I.: Cognitive robotics. Papers from the 2012 AAAI Workshop. 22- 23.07.2012 in Toronto, Ontario, Canada. AAAI Cognitive Robotics Workshop; AAAI; IAAI. Palo Alto, Calif.: AAAI Press 2012. ISBN: 978-157735571-7. (Technical report / American Association for Artificial Intelligence WS 2012,6).

HÜLSMANN & WINDT 2007

Hülsmann, Michael; Windt, Katja (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2007. ISBN: 978-3-540-47449-4.

IRRENHAUSER 2014

Irrenhauser, T.: Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014). München: Utz 2014. ISBN: 978-3-831-64404-9. (Forschungsberichte IWB, Nr. 288).

JADE 2018

9 Literaturverzeichnis

JADE: JAVA Agent DEvelopment Framework. <<http://jade.tilab.com/>> - 16.08.2018.

JENNINGS 2001

Jennings, N. R.: An agent-based approach for building complex software systems. *Communications of the ACM* 44 (2001) 4, S. 35-41.

JONG ET AL. 2013

Jong, J. d.; Stellingwerff, L.; Paziienza, G. E.: Eve. (Hrsg.): 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2013). Manchester, 13.10.2013 - 16.10.2013: IEEE 2013, S. 1537-1541. ISBN: 978-1-4799-0652-9.

JUAN ET AL. 2002

Juan, T.; Pearce, A.; Sterling, L.: ROADMAP. In: Gini, M. (Hrsg.): Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems part 2, the first international joint conference. Bologna, Italy, 7/15/2002 - 7/19/2002. New York, NY: ACM 2002, S. 3. ISBN: 1581134800.

JUN & SHAKSHUKI 2004

Jun, Y.; Shakshuki, E.: Performance Evaluation of Agent Toolkits. In: Kanade, T. et al. (Hrsg.): *Advances in Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2004, S. 556-558. ISBN: 978-3-540-22004-6. (Lecture Notes in Computer Science).

JÜNEMANN & BEYER 1998

Jünemann, R.; Beyer, A.: *Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen*. In: *Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik*. Berlin u.a.: Springer 1998. ISBN: 978-3-540-64514-6. (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen).

JÜNEMANN & BEYER 2013

Jünemann, R.; Beyer, A.: *Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen*. In: *Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik*: Springer Berlin, Heidelberg 2013. ISBN: 978-3-642-72225-7. (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen).

KARATKEVICH 2008

Karatkevich, A.: On algorithms for decyclisation of oriented graphs. *The International Workshop on Discrete Event System Design (DESDes'01)*. Przytok, Poland. 27-29.06.2001.

KEFERSTEIN & MARXER 2015

Keferstein, C. P.; Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik. Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 8., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-8348-2582-7.

Khouja & Felix 1994

Khouja, M.; Felix, O.: The Industrial Robots Selection Problem. Literature Review And Directions For Future Research. IIE Transactions 26 (1994) 4, S. 50-61.

KLEINERT & SONTOW 2010

Kleinert, A.; Sontow, K.: MES-Lösungen. Ersatz oder Ergänzung von ERP/PPS-Systemen. Productivity Management 15 (2010) 2.

KLOSTERMEYER & KLEMM 2003

Klostermeyer, A.; Klemm, E.: Pabadis - an agent based flexible manufacturing concept. In: Weaver, A. C. et al. (Hrsg.): IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2003. INDIN 2003. Banff, AB, Canada, Aug. 21-24, 2003. Piscataway, N.J: IEEE 2003, S. 286-293. ISBN: 0-7803-8200-5.

KLÜGL ET AL. 2006

Klügl, F.; Herrler, R.; Fehler, M.: SeSAM. In: Nakashima, H. et al. (Hrsg.): Proceedings of the fifth international joint conference on autonomous agents and multiagent systems - AAMAS '06, the fifth international joint conference. Hakodate, Japan, 08.-12.05.2006. New York, USA: ACM Press 2006, S. 1439. ISBN: 1595933034.

KRÄMER 2002

Krämer, K.: Automatisierung in Materialfluss und Logistik. Ebenen, Informationslogistik, Identifikationssysteme, intelligente Geräte. 2002. ISBN: 13:978-3-8244-2152-7.

KRAVARI & BASSILIADES 2015

Kravari, K.; Bassiliades, N.: A Survey of Agent Platforms. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 18 (2015) 1.

KRAVARI ET AL. 2010

Kravari, K.; Kontopoulos, E.; Bassiliades, N.: EMERALD. In: Hutchison, D. et al. (Hrsg.): Artificial Intelligence: Theories, Models and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2010, S. 173-182. ISBN: 978-3-642-12841-7. (Lecture Notes in Computer Science).

9 Literaturverzeichnis

KÜNNE 2001

Künne, B.: Einführung in die Maschinenelemente. Gestaltung - Berechnung - Konstruktion. 2., überarbeitete Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2001. ISBN: 978-3-519-16335-0.

KÜPPER 2005

Küpper, A.: Location-based services. Fundamentals and operation. 2005. ISBN: 978-0-470-09231-6.

LAS MORENAS ET AL. 2014

las Morenas, J. de; García Higuera, A.; García Ansola, P.: MAS-based control in industrial controllers. International Journal of Advanced Logistics 3 (2014) 1-2, S. 10-16.

LAU 2010

Lau, C.: Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung: Herbert Utz Verlag 2010. ISBN: 978-3-8316-4012-6. (Forschungsberichte IWB, Nr. 238).

LAUX 2007

Laux, H.: Entscheidungstheorie. 7., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-71161-2. (Springer-Lehrbuch).

LEITÃO ET AL. 2005

Leitão, P.; Colombo, A. W.; Restivo, F. J.: ADACOR. A Collaborative Production Automation and Control Architecture. IEEE Intelligent Systems 20 (2005) 1, S. 58-66.

LEITÃO ET AL. 2010

Leitão, P.; Alves, J.; Mendes, J. M.; Colombo, A. W.: Energy aware knowledge extraction from Petri nets supporting decision-making in service-oriented automation. (Hrsg.): 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010). Bari, Italy, 04-07.07.2010: IEEE 2010, S. 3521-3526. ISBN: 978-1-4244-6390-9.

LEITÃO & RESTIVO 2008

Leitão, P.; Restivo, F. J.: Implementation of a Holonic Control System in a Flexible Manufacturing System. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) 38 (2008) 5, S. 699-709.

LEON ET AL. 2015

Leon, F.; Paprzycki, M.; Ganzha, M.: A review of agent platforms. In: ICT COST Action IC1404 (Hrsg.): Multi-Paradigm Modelling for Cyber-Physical Systems (MPM4CPS) 2015.

LEPUSCHITZ ET AL. 2011

Lepuschitz, W.; Zoitl, A.; Vallée, M.; Merdan, M.: Toward Self-Reconfiguration of Manufacturing Systems Using Automation Agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) 41 (2011) 1, S. 52-69.

LEWANDOWSKI ET AL. 2013

Lewandowski, M.; Gath, M.; Werthmann, D.; Lawo, M.: Agent-based Control for Material Handling Systems in In-House Logistics. In: Smart SysTech et al. (Hrsg.): Smart SysTech 2013. Piscataway, NJ: IEEE 2013. ISBN: 978-3-8007-3521-1.

LIBERT & HOMPEL 2011

Libert, S.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Beitrag zur agentenbasierten Gestaltung von Materialflusssteuerungen. Dortmund: Verl. Praxiswissen 2011. ISBN: 978-3-869-75049-1. (Logistik für die Praxis).

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2009. ISBN: 3642014232. (VDI-Buch).

LINDEMANN ET AL. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-25506-2. (VDI-Buch).

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural complexity management. An approach for the field of product design. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-87889-6.

LIU ET AL. 2005

Liu, M. R.; Zhang, Q. L.; Ni, L. M.; Tseng, M. M.: An RFID-Based Distributed Control System for Mass Customization Manufacturing. In: Hutchison, D. et al. (Hrsg.): Parallel and Distributed Processing and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2005, S. 1039-1049. ISBN: 978-3-540-24128-7. (Lecture Notes in Computer Science).

9 Literaturverzeichnis

LÖDDING 2016

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016. ISBN: 978-3-662-48458-6. (VDI-Buch).

LOTTER & WIENDAHL 2012

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

LUKE ET AL. 2005

Luke, S.; Cioffi-Revilla, C.; Panait, L.; Sullivan, K.; Balan, G.: MASON. A Multiagent Simulation Environment. Simulation: Transactions of the society for Modeling and Simulation 81 (2005) 7, S. 517-527.

MANGIALARDI ET AL. 1996

Mangialardi, L.; Mantriota, G.; Trentadue, A.: A three-dimensional criterion for the determination of optimal grip points. In: Elsevier (Hrsg.): Robotics & Computer-Integrated Manufacturing. Great Britain 1996, S. 157-167. (Vol 12, No. 2).

MARSEU ET AL. 2016

Marseu, E.; Kolberg, D.; Birtel, M.; Zühlke, D.: Interdisciplinary Engineering Methodology for changeable Cyber-Physical Production Systems. IFAC-PapersOnLine 49 (2016) 31, S. 85-90.

MARTIN 2011

Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik; mit 48 Tabellen. 8., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011. ISBN: 978-3-8348-1350-3. (Praxis).

MARTINS ET AL. 2018

Martins, L.; Fernandes, N.; Varela, L.: Autonomous Production Control. (Hrsg.): Machado, J. M.; Soares, F.; Veiga, G.. Innovation, Engineering and Entrepreneurship: Springer 2018, S. 425-431.

MAYER ET AL. 2010

Mayer, T.; Libert, S.; Hompel, M. ten: Contribution to the performance evaluation of decentralized material flow controls on the example of a control prototype. Logistics Journal: Referierte Veröffentlichungen (2010).

McFARLANE ET AL. 2003

McFarlane, D. C.; Sarma, S.; Chirn, J. L.; Wong, C. Y.; Ashton, K.: Auto-ID Systems and Intelligent Manufacturing Control. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence 2003, S. 365-376.

MELZER 2007

Melzer, I.: Service-orientierte Architekturen mit Web Services. Konzepte - Standard - Praxis. 2. Aufl. München: Elsevier Spektrum Akad. Verl. 2007. ISBN: 978-3-8274-1885-2.

MICHNIEWICZ & REINHART 2014

Michniewicz, J.; Reinhart, G.: Cyber-physical Robotics – Automated Analysis, Programming and Configuration of Robot Cells based on Cyber-physical-systems. Procedia Technology 15 (2014), S. 566-575.

MILLER ET AL. 2003

Miller, A. T.; Knoop, S.; Christensen, H. J.; Allen, P. K.: Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives. (Hrsg.): International Conference on Robotics & Automation. Taipei, Taiwan 2003, S. 1824-1829.

MORLEY & MYERS 2004

Morley, D.; Myers, K.: The SPARK Agent Framework. In: Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (Hrsg.): Proceedings of the third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. New York: Association for Computing Machinery 2004. ISBN: 1-58113-864-4.

MÜLLER ET AL. 2016

Müller, R.; Vette, M.; Hörauf, L.; Speicher, C.: Consistent data Usage and Exchange Between Virtuality and Reality to Manage Complexities in Assembly Planning. Procedia CIRP 44 (2016), S. 73-78.

MÜLLER ET AL. 2017

Müller, V.; Lam, T.-L.; Elkmann, N.: Sensor design and model-based tactile feature recognition. (Hrsg.): 2017 IEEE SENSORS, 2017 IEEE SENSORS. Glasgow, 29.10.2017 - 01.11.2017: IEEE 2017, S. 1-3. ISBN: 978-1-5090-1012-7.

NATER ET AL. 2008

Nater, R.; Reichmuth, A.; Schwartz, R.; Borys, M.; Zervos, P.: Wägelexikon. Leitfaden wägetechnischer Begriffe. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008. ISBN: 978-3-540-75908-9.

NEUGRODDA ET AL. 2019

Neugrodda, C.; Voigt, T.; Kiefer, L.: Abschlussbericht des Forschungsprojektes RoboFill4.0. Förderung der Bayerischen Forschungsstiftung 2015-2019. (2019).

NEUMANN & WESTKÄMPER 2013

Neumann, M.; Westkämper, E.: Method for Situation-based Modeling and Simulation of Assembly Systems. *Procedia CIRP* 7 (2013), S. 413-418.

NIKRAZ ET AL. 2006

Nikraz, M.; Claire, G.; Bahri, P.: A methodology for the development of multi-agent systems using the JADE platform. In: *Computer Systems Science and Engineering* 2006, S. 99-116. (21 (2)).

NORTH ET AL. 2007

North, M. J.; Howe, T. R.; Collier, N. T.; Vos, J. R.: A Declarative Model Assembly Infrastructure for Verification and Validation. In: Takahashi, S. et al. (Hrsg.): *Advancing Social Simulation: The First World Congress*. Tokyo: Springer Japan 2007, S. 129-140. ISBN: 978-4-431-73150-4.

NOVAS ET AL. 2012

Novas, J. M.; Bahtiar, R.; van Belle, J.; Valckenaers, P.: An Approach for the Integration of a Scheduling System and a Multi-Agent Manufacturing Execution System. *Towards a Collaborative Framework*. IFAC Proceedings Volumes 45 (2012) 6, S. 728-733.

NYHUIS ET AL. 2016

Nyhuis, P.; Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes, P. (Hrsg.): *Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen*. Studienergebnisse. TEWISS - Technik und Wissen GmbH. Garbsen: PZH Verlag Oktober 2016. ISBN: 978-3-95900-104-5.

NYHUIS & WIENDAHL 2012

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien*. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-540-92839-3. (VDI-Buch).

OEY ET AL. 2010

Oey, M.; van Splunter, S.; Ogston, E.; Warnier, M.; Brazier, F. M.T.: A Framework for Developing Agent-Based Distributed Applications. (Hrsg.): 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT). Toronto, AB, Canada, 31.08.2010 - 03.09.2010: IEEE 2010, S. 470-474. ISBN: 978-1-4244-8482-9.

OMICINI 2001

Omicini, A.: SODA: Societies and Infrastructures in the Analysis and Design of Agent-Based Systems. In: Ciancarini, P. (Hrsg.): Agent-Oriented Software Engineering. First International Workshop, AOSE 2000 Limerick, Ireland, 10.06.2000 Revised Papers. Springer Berlin, Heidelberg 2001, S. 185-193. ISBN: 978-3-540-41594-7. (Lecture Notes in Computer Science 1957).

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. (Dissertation) Technische Universität München. 2012. ISBN 978-3-8316-4206-9. (Forschungsberichte IWB, Nr. 265)

PAHL ET AL. 2005

Pahl, G.; Beitz†, W.; Feldhusen, J.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2005. ISBN: 978-3-540-26789-8.

PANNEQUIN ET AL. 2009

Pannequin, R.; Morel, G.; Thomas, A.: The performance of product-driven manufacturing control. An emulation-based benchmarking study. Computers in Industry 60 (2009) 3, S. 195-203.

PARK ET AL. 2012

Park, H.-S.; Tran, N.-H.: An autonomous manufacturing system based on swarm of cognitive agents. Journal of Manufacturing Systems 31 (2012) 3, S. 337-348.

PERRIDON ET AL. 2012

Perridon, L.; Steiner, M.; Rathgeber, A. W.: Finanzwirtschaft der Unternehmung. 16., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen 2012. ISBN: 978-3-800-63679-2. (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

PFEIFER ET AL. 2006

Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Autonome Produktionszellen. Komplexe Produktionsprozesse flexibel automatisieren. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-1-280-61801-7. (VDI-Buch).

PHILIPP 2014

Philipp, T.: RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Dissertation Technische Universität München. 2014. ISBN: 978-3-8316-4346-2. (Forschungsberichte IWB, Nr. 282).

PHILIPP ET AL. 2007

Philipp, T.; Beer, C. de; Windt, K.; Scholz-Reiter, B.: Evaluation of Autonomous Logistic Processes - Analysis of the Influence of Structural Complexity. In: Hülsmann, M. et al. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2007, S. 303-324. ISBN: 978-3-540-47449-4.

PILLE 2010

Pille, C.: In-Process Embedding of Piezo Sensors and RFID Transponders into Cast Parts for Autonomous Manufacturing Logistics. In: Gessner, T. (Hrsg.): Smart systems integration 2010. 4th European Conference & Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems - MEMS, MOEMS, ICs and Electronic Components, Como, Italy, 23-24.03.2010. Berlin: VDE-Verl. 2010. ISBN: 978-3-8007-3208-1.

PIRVU ET AL. 2016

Pirvu, B.-C.; Zamfirescu, C.-B.; Gorecky, D.: Engineering insights from an anthropocentric cyber-physical system. A case study for an assembly station 34 (2016), S. 147-159.

PONN & LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2011. ISBN: 978-3-642-20579-8. (VDI-Buch).

RAUE 2016

Raue, N.: Agentenbasierte Automatisierung des Betriebs Industrieller Produkt-Service Systeme: Fraunhofer IRB Verlag 2016.

REHR 1989

Rehr, W.: Automatisierung mit Industrierobotern Komponenten, Programmierung, Anwendung. Referate der Fachtagung Automatisierung mit Industrierobotern. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 1989. ISBN: 978-3-528-06364-1.

REINHART 2017

Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017. ISBN: 978-3-446-44989-3.

REINHART ET AL. 2014

Reinhart, G.; Hees, A.; Teschemacher, U.: Produktionsorganisation für die Herstellung kundeninnovierter Produkte. In: ZWF 2014, S. 16-19.

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Marktchance Individualisierung. Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-642-62456-8.

RICHTER ET AL. 2005

Richter, J.-P.; Haller, H.; Schrey, P.: Serviceorientierte Architektur. Informatik-Spektrum 28 (2005) 5, S. 413-416.

ROBERTSON & ROBERSTON 2011

Robertson, S.; Robertson, J.: Mastering the requirements process. 2. überarb. und 9. gedruckte Aufl. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley 2011. ISBN: 0321419499.

ROCHA ET AL. 2014

Rocha, A.; Di Orio, G.; Barata, J.; Antzoulatos, N.; Castro, E.; Scrimieri, D.; Ratchev, S.; Ribeiro, L.: An agent based framework to support plug and produce. In: IEEE (Hrsg.): Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference on 2014, S. 504-510.

RODRIGUEZ ET AL. 2014

Rodriguez, S.; Gaud, N.; Galland, S.: SARL. (Hrsg.): 2014 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT). Warsaw, Poland, 11-14.08.2014: IEEE 2014, S. 103-110. ISBN: 978-1-4799-4143-8.

RUMPE 2017

Rumpe, B.: Agile Modeling with UML. Code Generation, Testing, Refactoring. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer 2017. ISBN: 978-3-319-58862-9.

9 Literaturverzeichnis

RUSSELL ET AL. 2011

Russell, S.; Jordan, H.; O'Hare, G. M.; Collier, R. W.: Agent Factory. In: Klügl, F. et al. (Hrsg.): Multiagent System Technologies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2011, S. 125-136. ISBN: 978-3-642-24602-9. (Lecture Notes in Computer Science).

SCHLICK ET AL. 2010

Schlick, C.; Luczak, H.; Bruder, R.: Arbeitswissenschaft. ebrary, Inc. Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-540-78333-6.

SCHLICK ET AL. 2014

Schlick, J.; Stephan, P.; Loskyll, M.; Lappe, D.: Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014, S. 57-84. ISBN: 978-3-658-04681-1.

SCHMALZ ET AL. 2015

Schmalz, J.; Kiefer, L.; Behncke, F.: Analysis of the System Handling using Methods of Structural Complexity Management. Applied Mechanics & Materials 794 (2015).

SCHMITZ 1994

Schmitz, M.: Flexibel automatisierte Fertigungssysteme. Bewertungsprobleme und Lösungsansätze. Gabler Edition Wissenschaft Aufl. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag 1994. ISBN: 978-3-8244-6031-1.

SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 712-729.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2005

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; Beer, C. de; Jagalski, T.: Modelling and analysis of autonomous shop floor control. (Hrsg.): Proceedings of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Florianopolis, BR: Universidade Federal de Santa Catarina 2005.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2006

Scholz-Reiter et al.: Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen. 2006.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2009A

Scholz-Reiter, B.; Görges, M.; Philipp, T.: Autonomously controlled production systems - Influence of autonomous control level on logistic performance. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 1, S. 395-398.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2009B

Scholz-Reiter, B.; Rippel, D.; Sowade, S.; Teucke, M.: Selbststeuerung als Ansatz in der Praxis manuell getriebener Logistik. (Hrsg.): Erfolg kommt von innen. 26. Deutscher Logistik-Kongress Berlin. Hamburg: DVV Media Group, Dt. Verkehrs-Verl. 2009, S. 555-588. ISBN: 978-3-87154-401-9.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2014

Scholz-Reiter, B.; Harjes, F.; Rippel, D.: Von der Selbststeuerung zu cyber-physischen Systemen. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Enterprise-Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen. Berlin: Springer Vieweg 2014, S. 63-76. ISBN: 978-3-642-41890-7. (VDI-Buch).

SCHREIBER 2013

Schreiber, S.: Entwicklung einer Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeit von dezentralen Steuerungsarchitekturen für Produktionssysteme. Helmut Schmidt Universität. Hamburg: 2013.

SCHUH ET AL. 2007

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.: High Resolution Production Management. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 1, S. 439-442.

SCHUH & STICH 2012A

Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. 4. Aufl: 2012. ISBN: 978-3-642-25423-9. (VDI-Buch).

SCHUH & STICH 2012B

Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 2. Evolution der PPS. 4., überarb. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-25427-7. (VDI-Buch).

SCHULDT 2012

Schuldt, A.: Multiagent Coordination Enabling Autonomous Logistics. KI - Künstliche Intelligenz 26 (2012) 1, S. 91-94.

SCHÜTZ ET AL. 2011

Schütz, D.; Schraufstetter, M.; Folmer, J.; Vogel-Heuser, B.; Gmeiner, T.; Shea, K.: Highly Reconfigurable Production Systems Controlled by Real-Time Agents. (Hrsg.): IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011.

SDAHL & KUHLENKOETTER 2005

Sdahl, M.; Kuhlenkoetter, B.: CAD-Daten gestützte Greifpunktbewertung für Sauggreifer. München: Carl Hanser Verlag 2005.

SEITZ & NYHUIS 2015

Seitz, K.-F.; Nyhuis, P.: Cyber-Physical Production Systems Combined with Logistic Models – A Learning Factory Concept for an Improved Production Planning and Control. *Procedia CIRP* 32 (2015), S. 92-97.

SHAKSHUKI & JUN 2004

Shakshuki, E.; Jun, Y.: Multi-agent Development Toolkits. In: Kanade, T. et al. (Hrsg.): *Innovations in Applied Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2004, S. 209-218. ISBN: 978-3-540-22007-7. (Lecture Notes in Computer Science).

SHEHORY & STURM 2014

Shehory, O.; Sturm, A. (Hrsg.): *Agent-Oriented Software Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2014. ISBN: 978-3-642-54431-6.

ŠIŠLÁK ET AL. 2006

Šišlák, D.; Reháč, M.; Pěchouček, M.; Pavlíček, D.: Deployment of A-globe multi-agent platform. In: Nakashima, H. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the fifth international joint conference on autonomous agents and multiagent systems - AAMAS '06, the fifth international joint conference*. Hakodate, Japan, 08-12.05.2006. New York, New York, USA: ACM Press 2006, S. 1447. ISBN: 1595933034.

SONNESSA ET AL. 2006

Sonnessa, M.; Boero, R.; Ferraris, G.; Richiardi, M.: JAS. Jaba Agent-based Simulation library. <https://www.academia.edu/4818547/JAS_Java_Agent-based_Simulation_library._An_open_framework_for_algorithm-intensive_simulations> 16.08.2018.

SPENDEL ET AL. 2018

Spengel, C.; Nicolay, K.; Werner, A.-C.; Olbert, M.; Steinbrenner, D.; Schmidt, F.; Wolf, T.: Steuerliche Standortattraktivität digitaler Geschäftsmodelle. Steuerlicher Digitalisierungsindex 2018. <<https://www.pwc.de/digitalisierungsindex>> - 29.04.2019.

STACKOVERFLOW 2016

Stackoverflow: Developer Survey Results 2016. Most Popular Technologies per Dev Type. <<https://insights.stackoverflow.com/survey/2016#technology>> 10.11.2018.

STANEV ET AL. 2009

Stanev, S.; Awad, R.; Prieur, M.; Walla, W.; Pölz, S.; Ovtcharova, J.: Production-oriented Product Validation Method as Support for the Reuse of Production Lines in the Automotive Industry. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, München, Germany 2009.

SUDA 1989

Suda, H.: Future factory system formulated in Japan. Japanese Journal of Advanced Automation Technology 1 (1989) 1, S. 15-25.

SUNDERMEYER & BUSSMANN 2001

Sundermeyer, K.; Bussmann, S.: Einführung der Agententechnologie in einem produzierenden Unternehmen — ein Erfahrungsbericht. Wirtschaftsinformatik 43 (2001) 2, S. 135-142.

SÜBE & RODNER 2014

Süße, H.; Rodner, E.: Bildverarbeitung und Objekterkennung. Computer Vision in Industrie und Medizin. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-8348-2606-0.

THOMAS ET AL. 2013

Thomas, U.; Hirzinger, G.; Rumpe, B.; Schulze, C.; Wortmann, A.: A new skill based robot programming language using UML/P Statecharts. (Hrsg.): 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Karlsruhe, Germany, 06.05.2013 - 10.05.2013: IEEE 2013, S. 461-466. ISBN: 978-1-4673-5643-5.

TISUE & WILENSKY 2004

Tisue, S.; Wilensky, U.: NetLogo: Design and Implementation of a Multi-Agent Modeling Environment. (Hrsg.): Agent 2004. Chicago 2004.

TRAN & LOW 2008

Tran, Q.-N. N.; Low, G.: MOBMAS. A methodology for ontology-based multi-agent systems development. *Information and Software Technology* 50 (2008) 7-8, S. 697-722.

TRAN ET AL. 2005

Tran, Q.-N. N.; Low, G.; Williams, M.-A.: A Preliminary Comparative Feature Analysis of Multi-agent Systems Development Methodologies. In: Hutchison, D. et al. (Hrsg.): *Agent-Oriented Information Systems II*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2005, S. 157-168. ISBN: 978-3-540-25911-4. (Lecture Notes in Computer Science).

TRÄNKLER & FISCHERAUER 2014

Tränkler, H.-R.; Fischerauer, G.: *Das Ingenieurwissen: Messtechnik*. Berlin: Springer Berlin 2014. ISBN: 3662440296.

TWEEDALE 2014

Tweedale, J. W.: A Review of Cognitive Decision-making within Future Mission Systems. *Procedia Computer Science* 35 (2014), S. 1043-1052.

UHLMANN ET AL. 2013

Uhlmann, E.; Hohwieler, E.; Kraft, M.: Selbstorganisierende Produktion mit verteilter Intelligenz. *Intelligente Werkstücke steuern ihren Weg durch die Fertigung. wt Werkstattstechnik online* 103 (2013) 2, S. 114-117.

ULLRICH 2014

Ullrich, G.: *Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung*. 2., erw. und überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 9783834825926. (Fortschritte der Robotik).

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5 (1976) 7+8, S. 304-309.

VALLEE ET AL. 2011

Vallee, M.; Merdan, M.; Lepuschitz, W.; Koppensteiner, G.: Decentralized Reconfiguration of a Flexible Transportation System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7 (2011) 3, S. 505-516.

VAN BRUSSEL ET AL. 1998

van Brussel, H.; Wyns, J.; Valckenaers, P.; Bongaerts, L.; Peeters, P.: Reference architecture for holonic manufacturing systems. PROSA. Computers in Industry 37 (1998) 3, S. 255-274.

VDI 1992

VDI: Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. VDI. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1992. ISBN: 3184010066.

VDI-RICHTLINIE 2510

VDI-Richtlinie 2510: Fahrerlose Transportsysteme (FTS): Beuth 2005.

VDI-RICHTLINIE 2653

VDI-Richtlinie 2653: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen: Beuth 2017.

VDI-RICHTLINIE 2860

VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen und Symbole: Beuth 1990.

VDI-RICHTLINIE 2861

VDI-Richtlinie 2861, Blatt 2: Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Einsatzspezifische Kenngrößen: Beuth 2009.

VDI-RICHTLINIE 3300

VDI-Richtlinie 3300: Materialfluss-Untersuchungen: Beuth 1973.

VDI-RICHTLINIE 3589

VDI-Richtlinie 3589: Auswahlkriterien für die Beschaffung von Flurförderzeugen: Beuth 2014.

VDI-RICHTLINIE 5200

VDI-Richtlinie 5200: VDI 5200 Blatt 1 Fabrikplanung - Planungsvorgehen: Beuth Verlag Berlin.

VDMA 2018

VDMA: Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0. Wege zu kostengünstigen Sensorsystemen. <https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26254718/Leitfaden_I40_Sensorik_LR_1526542973767.pdf/efb9f14d-d7e4-8325-765e-38ac99fc9126> - 23.08.2018.

9 Literaturverzeichnis

VEIGT ET AL. 2015

Veigt, M.; Lappe, D.; Franke, M.; Thoben, K.-D.; Freitag, M.: Entwicklung und Potenziale Cyber-Physischer Logistiksysteme am Beispiel eines Zahnradfertigers. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2015, S. 213-225. ISBN: 978-3-8396-0930-9.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2014

Vogel-Heuser, B.; Diedrich, C.; Pantforder, D.; Gohner, P.: Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system. In: Pereira, C. E. (Hrsg.): 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2014). Porto Alegre RS, Brazil. Piscataway, NJ: IEEE 2014, S. 713-719. ISBN: 978-1-4799-4905-2.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2015

Vogel-Heuser, B.; Lee, J.; Leitão, P.: Agents enabling cyber-physical production systems. *at-Automatisierungstechnik* 2015 (2015) 63(10), S. 777-789.

WAGNER ET AL. 2003

Wagner, T.; Urbano, P.; Göhrner, P.: Softwareagenten-Einführung und Überblick über eine alternative Art der Softwareentwicklung. Teil 1: Agentenorientierte Softwareentwicklung. *Automatisierungstechnische Praxis atp* 45 (2003).

WANG & YU 2006

Wang, D.; Yu, T.: Study on Virtual Intelligent Assembly System for Machine Tools Based on Multi-Agent and Petri-Net. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers et al. (Hrsg.): International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2006. Dalian, China. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center 2006, S. 28-33. ISBN: 1-4244-0061-9.

WARNECKE 1985

Warnecke, H.-J.: Montage · Handhabung · Industrieroboter. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 1985. ISBN: 978-3-540-15500-3.

WARNECKE 1993

Warnecke, H.-J.: Der Produktionsbetrieb. Eine Industriebetriebslehre für Ingenieure. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin, Heidelberg 1993. ISBN: 978-3-662-06541-9.

WEGO & GESKE 2010

Wego, A.; Geske, G.: Korrekte Erkennung von Farben und Oberflächen mit Farbsensoren. *Photonik*, Ausgabe 5 (2010), S. 38-42.

WEIGELT 1994

Weigelt, M.: Dezentrale Produktionssteuerung mit Agenten-Systemen. Entwicklung neuer Verfahren und Vergleich mit zentraler Lenkung. (Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1994). Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; Gabler 1994. ISBN: 3824460785. (Gabler Edition Wissenschaft).

WEIß ET AL. 2005

Weiß, G.; Jakob, R.: Agentenorientierte Softwareentwicklung. Methoden und Tools. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-00062-3.

WIENDAHL 2005

Wiendahl, H.-P.: Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München, Wien: Hanser 2005. ISBN: 3-446-40045-1.

WIENDAHL 2014

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit 3 Tabellen. 8., überarb. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-44053-1.

WIGGER ET AL. 2018

Wigger, B.; Meissner, T.; Förste, A.; Jetter, V.; Zimmermann, A.: Using unique surface patterns of injection moulded plastic components as an image based Physical Unclonable Function for secure component identification. Scientific reports 8 (2018) 1, S. 4738.

WILDEMANN 2016

Wildemann, H.: Variantenmanagement. Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess. 24. Aufl. München: TCW-Verlag 2016. ISBN: 978-3-929-91817-5. (Leitfaden / TCW Transfer-Centrum für Produktionslogistik und Technologie-Management 5).

WILLEKE ET AL. 2017

Willeke, N.; Kuhrke, B.; Kuschicke, F.: Simulativer Vergleich zentraler und dezentraler Steuerungen einer Getriebefertigung. In: Wenzel, S. et al. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2017. Kassel: Kassel University Press GmbH 2017, S. 249-258. ISBN: 978-3-737-60192-4.

WINDT ET AL. 2007

Windt, K.; Böse, F.; Philipp, T.: Autonomy in production logistics. Identification, characterisation and application. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24 (2007) 4, S. 572-578.

WINDT & HÜLSMANN 2007

Windt, Katja; Hülsmann, Michael (Hrsg.): Understanding autonomous cooperation and control in logistics. The impact of autonomy on management, information, communication and material flow. Berlin, New York: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-47450-0.

WINIKOFF 2005

Winikoff, M.: Jack™ Intelligent Agents. In: Weiss, G. et al. (Hrsg.): Multi-Agent Programming. Boston, MA: Springer US 2005, S. 175-193. ISBN: 978-0-387-24568-3. (Multiagent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations).

WINIKOFF ET AL. 2004

Winikoff, M.; Padgham, L.: The Prometheus Methodology. In: Bergenti, F. et al. (Hrsg.): Methodologies and Software Engineering for Agent Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers 2004, S. 217-234. ISBN: 1-4020-8057-3. (Multiagent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations).

WIPOTEC 2018

WIPOTEC: Hochpräzise und ultraschnelle Kontrollwaagen-Lösungen. <https://www.wipotec-ocs.com/de/loesungen/kontrollwaagen/?gclid=EAIaIQob-ChMIsP6w75f03AIV0_hRCh2psAqzEAAYAiAAEgLWAvD_BwE> - 17.08.2018.

WITTROCK 1990

Wittrock, R.: Scheduling parallel machines with major and minor setup times. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4.

WÖHE & DÖRING 2013

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 25., überarb. und aktualisierte Aufl: 2013. ISBN: 978-3-8006-4687-6. (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

WOOLDRIDGE & JENNINGS 1995

Wooldridge, M.; Jennings, N. R.: Intelligent agents. Theory and practice. The Knowledge Engineering Review 10 (1995) 2, S. 115-152.

WULF 2002

Wulf, J.: Elementarmethoden zur Lösungssuche. (Dissertation). Produktentwicklung, Technische Universität München. München (2002).

YAN ET AL. 2003

Yan, Q. I.; Shan, L.-J.; Mao, X.-J.; Qi, Z.-C.: RoMAS: A Role-based Modeling Method For Multi-Agent System. In: Li, J. P. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Conference on Active Media Technology. Chongqing, P R China, 29-31.05.2003. Singapore, River Edge, N.J: World Scientific Pub. Co 2003, S. 156-161. ISBN: 978-981-238-343-3.

YILMAZ ET AL. 2012

Yilmaz, B.; Makatsoris, C.; Chang, Y. S.: Adaptive Electronics Manufacturing Services Using Intelligent Agents. International Journal of Advanced Logistics 1 (2012) 2, S. 70-91.

ZAMBONELLI 2001

Zambonelli: Cooperative information agents 5. Berlin [etc.]: Springer 2001. ISBN: 3-540-42545-4.

ZANTOW ET AL. 2016

Zantow, R.; Dinauer, J.; Schäffler, C.: Finanzwirtschaft des Unternehmens. Die Grundlagen des modernen Finanzmanagements. 4., aktualisierte Auflage inklusive Zugangscodes MyLab|Finanzwirtschaft Aufl.: 2016. ISBN: 978-3-863-26782-7. (Wi, Wirtschaft).

ZARNEKOW 1999

Zarnekow, R.: Softwareagenten und elektronische Kaufprozesse. Referenzmodelle zur Integration. Gabler Edition Wissenschaft Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 1999. ISBN: 978-3-8244-6936-9.

ZBIB ET AL. 2008

Zbib, N.; Raileanu, S.; Sallaez, Y.; Berger, T.; Trentesaux, D.: From Passive Products to Intelligent Products: The Augmentation Module Concept. (Hrsg.): 5th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2008) 2008, S. 243-259.

ZUG ET AL. 2017

Zug, S.; Müller, V.; Seidel, M.; Krenckel, P.: Optimized configuration of a tactile sensor system for flexible grippers. (Hrsg.): 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Limassol, 12-15.09.2017: IEEE 2017, S. 1-4. ISBN: 978-1-5090-6505-9.

10 Anhang

10.1 Weiterführende Informationen zum Stand der Wissenschaft und Technik

Tabelle 10-1: Auszug Referenzsysteme (SCHREIBER 2013)

System/ Quelle	Konfiguration	Kennzahlen
TMS (BRENNAN 2000) (BRENNAN & NORRIE 1998)	Über Roboter vernetzt, Arbeitsstationen (4) Operationen (8)	Ø Durchsatz Ø Wartezeit Ø Durchlaufzeit Ø Verspätung
GMS (CAVALIERI ET AL. 1999)	Über FTS vernetzt Arbeitsstationen (4)	Ø Durchlaufzeit Ø Verspätung (inkl. Anzahl)
CIM (LEITAO ET AL. 2005) (LEITAO & RESTIVO 2008)	Über FTS vernetzt Arbeitsstationen (3) Produktvarianten (n) Operationen (17)	Ø Durchsatz Ø Durchlaufzeit Ø Verspätung Ø Auslastung
IBM Test Line (WITTRUCK 1990) (BADR 2011)	Über FTS vernetzt Arbeitsstationen (31) aus 4 Varianten Produktvarianten (10)	Ø Durchlaufzeit Ø Auslastung
KRASH (FREY ET AL. 2003)	Über FTS vernetzte Ferti- gungslinie	Ø Durchlaufzeit Ø Bestand in Puffern
HPC (COVANICH & MCFAR- LANE 2009)	Über Förderbänder und Übergaben vernetzt Arbeitsstationen (2) Produktvarianten (4)	Ø Durchsatz Robustheit Rekonfigurierbarkeit
FlexLink-DAS (BARBOSA & LEITAO 2011) (LEITAO ET AL. 2010)	Transportnetz über Auf- züge und Transportbänder	Ø Durchlaufzeit
FTS testbed (CARDIN & CASTAGNA 2009)	Über FTS vernetzt (40) Entscheidungspunkte FIFO-Puffer vor Stationen	Ø Durchlaufzeit Ø Transport Entfernung
SFB 637 (SCHOLZ-REITER ET AL. 2009A)	Arbeitsstationen (22) Produktvarianten (2)	Ø Durchsatz Ø Durchlaufzeit Ø Liefertreue
Testbed DHC (VALLEE ET AL. 2011)	Transportsystem Produkttypen (3)	Ø Durchsatz Ø Transportzeit

Tabelle 10-2: Auswahlkriterien für Industrieroboter

Quellen/ Kriterien	(SCHMALZ ET AL. 2015)	(VDI 2861, Blatt 2)	(BARTENSCHLAGER ET AL. 1998)	(HESSE 2013)	(REHR 1989)	(BOUBEKRI ET AL. 1991)	(WARNECKE 1985)	(KHOJJA & FELIX 1994)	(BHATTACHARYA ET AL. 2005)
Traglast	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Genauigkeit	◐	●	◐	●	◐	●	●	◐	◐
Arbeitsraum	●	●	●	●	●	◐	●	●	◐
Geschwindigkeit	●	●	◐	◐	◐	◐	●	●	◐
Beschleunigung	●	●	◐	◐	◐	◐	●	●	◐
Kosten	●	○	●	○	●	○	○	○	●
Antrieb	●	○	○	○	●	○	○	○	●
Gewicht	●	○	○	○	○	●	○	○	●
Schnittstellen/Greifer	●	○	●	●	●	◐	○	○	○
Steuerung	●	○	○	○	●	●	○	●	○
Sonderbedingungen	●	○	●	○	○	○	○	○	○
Zuverlässigkeit	●	○	○	○	○	○	○	●	○
Lebensdauer	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Programmierung	○	○	●	●	●	●	○	●	●
Bahn	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Befestigung	●	○	○	○	○	●	○	○	○
Energieeffizienz	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Kinematik	○	○	●	○	●	●	○	●	○
Größe	◐	○	○	○	○	○	○	○	●
Steifigkeit	○	○	○	○	●	○	○	○	○
Fehlererkennung	○	○	○	○		○	○	●	○
Messsystem	○	○	○	○	●	●	○	○	○
Art der Anwendung	○	○	○	○	○	●	○	○	●
Zugänglichkeit	●	○	○	●	○	○	○	○	○
Arbeitssicherheit	○	○	○	●	○	○	○	○	○
Mitarbeiterqualifikation	○	○	○	●	○	○	○	○	○

*Tabelle 10-3: Agentenframeworks in Anlehnung an
(KRAVARI & BASSILIADES 2015)*

Framework	Quellen
AIM	(BAO & FRITCHMAN 2018)
Agent Factory	(RUSSELL ET AL. 2011)(AGENTFACTORY 2016)
Agent Builder	(FININ ET AL. 1994)(AGENTBUILDER 2016)
AgentScape	(OEY ET AL. 2010)(AGENTSCAPE 2014)
AgentSpeak /Jason	(BORDINI ET AL. 2007)
AGLOBE	(AGENT TECHNOLOGY CENTER 2018, ŠIŠLÁK ET AL. 2006)
AnyLogic	(GRIGORYEV 2018)
Cormas	(CIRAD 2018)
Cougaar	(HELSENGER ET AL. 2004)
dMARS	(D'INVERNO ET AL. 1998)
EMERALD	(KRAVARI ET AL. 2010, EMERALD 2018)
Eve	(JONG ET AL. 2013, EVE 2015)
GAMA	(GRIGNARD ET AL. 2013)
GOAL	(HINDRIKS 2018)
INGENIAS	(GOMEZ-SANZ ET AL. 2017)
JACK	(HOWDEN ET AL. 2001)(WINIKOFF 2005)(AOS GROUP 2015)
JADE	(BELLIFEMINE ET AL. 2001, BELLIFEMINE ET AL. 2004, JADE 2018)
Jadex	(BRAUBACH & POKAHR 2013)
JAMES II	(HIMMELSPACH & UHRMACHER 2007)
JAS	(SONNESSA ET AL. 2006)
JIAC	(HIRSCH ET AL. 2009)
MaDKit	(GUTKNECHT & FERBER 2000)
MASON	(LUKE ET AL. 2005)
NetLogo	(TISUE & WILENSKY 2004)
Repast	(NORTH ET AL. 2007)
SARL	(RODRIGUEZ ET AL. 2014)
SeSAm	(KLÜGL ET AL. 2006)
SPARK	(MORLEY & MYERS 2004)
ZEUS	(COLLIS ET AL. 1998)

Tabelle 10-4: Übersicht agentenorientierter Entwicklungsmethoden

Methode	Quelle
PASSI	COSENTINO & SEIDITA (2014)
MaSE	(DELOACH 1999)
O-MaSE	DELOACH & GARCIA-OJEDA (2014)
Gaia	(ZAMBONELLI 2001)
Tropos	BRESCIANI ET AL. (2004)
Prometheus	WINIKOFF & PADGHAM (2004)
Adelfe	(BERNON ET AL. 2003)
Gormas	(ARGENTE ET AL. 2011)
Romas	(YAN ET AL. 2003)
Soda	(OMICINI 2001)
Mobmas	(TRAN & LOW 2008)
Roadmap	(JUAN ET AL. 2002)
ADMuJADE	(NIKRAZ ET AL. 2006)
Aspects	(COSENTINO ET AL. 2010)
Ingenias	(GOMEZ-SANZ ET AL. 2017)
HIM	(ELAMMARI & LALONDE 2000)
Sonia	(ALONSO ET AL. 2005)
Zeus	(COLLIS ET AL. 1998, COLLINS & NDUMU 1999B, 2000)
Message/UML	(CAIRE ET AL. 2002)

Tabelle 10-5: Bewertungskategorien agentenorientierter Entwicklungsmethoden

(VDI 2653)	(SHEHORY & STURM 2014)	(DAM & WINIKOFF 2004)	(TRAN ET AL. 2005)
Allgemein	Persistenz	Konzepte	Prozess
Domänen	Zugänglichkeit	Eigenschaften	Techniken
Entwurfsprozess	Aussagekraft	Modellierung	Modellierung
System	Modularität	Notationen	
Agenten	Ausführbarkeit	Prozess	
Flexibilität	Weiterentwicklung	Anwendbarkeit	
	Analysierbarkeit		
	Offenheit		

Tabelle 10-6: Evaluationskriterien zur Frameworkauswahl
(KRAVARI & BASSILIADES 2015)

Plattform-eigenschaften	Benutzer-freundlichkeit	Betriebs-fähigkeit	Praktikabilität	Sicherheits-management
Entwickler / Organisation	<i>Einfachheit</i>	<i>Performance</i>	Installation	End-to-end-Sicherheit
Primäre Domäne	<i>Lernfähigkeit</i>	<i>Stabilität</i>	Support	Fairness
Letzte Aktualisierung	<i>Skalierbarkeit</i>	<i>Robustheit</i>	Popularität	Plattform-sicherheit
Lizenz	<i>Standard-kompatibilität</i>	<i>Programmiersprachen</i>	Technischer Reifegrad	
Open-Source	<i>Kommunikation</i>	<i>Betriebssystem</i>	Kosten	

Tabelle 10-7: Bewertung von Kommunikationsstrategien (DEUGO 2001)

	Message-Passing	Black-board	Home-Proxy	Forwarder-Proxy	Broadcast
Anzahl Agenten	Viele	Viele	Viele	Viele	Wenige
Nachrichtenart	Direkt	Indirekt	Direkt	Direkt	Direkt
Nachrichtenkosten	+	+	0	0	-
Speicherkosten	0	+	0	-	0
Designkomplexität	0	+	0	-	+
Applikationskomplexität	+	-	+	+	+
Fehlerpotenzial	-	+	-	-	0
Sicherheit	+	-	+	-	-

Tabelle 10-8: Liste vordefinierter JADE-Ontologien

Ontologie	Paket	Beschreibung
FIPA-Agent-Management	jade.domain.FIPAAgent Management	Eine Ontologie, die Instanzen und Aktionen für die Interaktion mit dem AMS und DF enthält (FIPA-konform)
JADE-Agent-Management	jade.domain.JADEAgent Management	Eine Ontologie mit JADE-Erweiterungen der FIPA-Agent-Management-Ontologie
JADE-Introspection	jade.domain.introspection	Eine Ontologie mit JADE-Erweiterungen in Bezug auf die Überwachung der Plattformereignisse
JADE-Mobility	jade.domain.mobility	Eine Ontologie mit JADE-Erweiterungen in Bezug auf die Agenten-Mobilität
JADE-Persistence	jade.domain.persistence	Eine Ontologie mit JADE-Erweiterungen in Bezug auf die Agenten-Persistenz
DFApplet-Management	jade.domain.DFGUI Management	Eine Ontologie, welche für die Interaktion mit dem DF verwendet wird. Es können mehrere Benutzeroberflächen verwendet werden und zusätzlich als Applets implementiert werden.

10.2 Weiterführende Informationen zum Ansatz eines MASS

In den folgenden Tabellen werden die konzipierten integrierten Identifikationsverfahren dargestellt.

Tabelle 10-9: Optische Geometriebestimmung

Optische Geometriebestimmung		
Merkmale	Form, Sekundärmerkmale	
Ressourcen	Handhabung	3D-HHG
	Sensorklasse	3D-Kamera
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle
Bedingungen	Keine reflektierenden Oberflächen Keine vollabsorbierenden Oberflächen	
Vorbereitung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einrichten und Installation der BVS 2. Integration und Implementation der Kamera + BVS mit der zugehörigen Steuerung 3. Datenbank mit Sollwerten beschaffen oder ggf. neu erstellen 	
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Objekt durch Kamera während des HHP abschnappen 2. Bildverarbeitung durch Software 3. Auswertung durch Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung mit der Datenbank 4. Identifikation des Objekts anhand der Form 	
Prozessablauf	//MASS/act_pkt_Sensor	
Integration VDI 2860		
Kommentare	<p>Befestigung des Sensors flexibel (über/seitlich von Förderband, an Robotergreifer, usw.)</p> <p>Vergleichsweise hoher Komplexitätsgrad für die Einrichtung des Komplettsystems</p> <p>Identifikation vor, während oder nach dem Handhabungsprozess möglich</p>	
Eigenschaften	<p>Berührungsloses Messverfahren</p> <p>Messbereich + Toleranz: ca. 30 mm - ∞</p> <p>Messzeit < 1 s</p> <p>Mehrere Kamerasysteme zur Bildbeschaffung existent (z. B. CCD-Kamera, CMOS-Kamera)</p>	

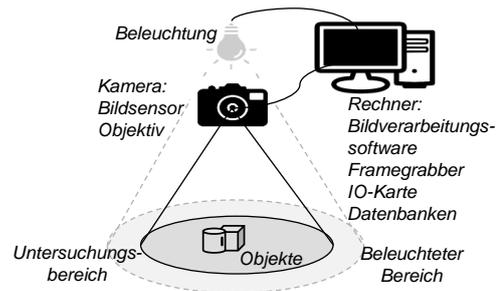


Tabelle 10-10: Sequenzielles Wiegen

Sequenzielles Wiegen			
Merkmale	Gewicht		
Ressourcen	Handhabung	3D-HHG	
	Sensorklasse	Wägezelle	
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle	
Bedingungen	Messgenauigkeit kleiner als minimale Differenz der Merkmalsausprägungen des Gewichts		
Vorbereitung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Waage auf Objektklassen kalibrieren 2. Vergleichbare Sollwerte von Datenbanken bereitstellen 		
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Objekt auf Waage positionieren 2. Messung des Gewichts von Objekt 3. Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung 4. Identifikation des Objekts anhand des Gewichts 		
Prozessablauf	//MASS/act_Sequ_Wiegen		
Integration VDI 2860			
Kommentare	Einfaches und kostengünstiges Identifikationsverfahren Verfahren industrietauglich und bereits etabliert		
Eigenschaften	Berührendes Messverfahren Messbereich + Toleranzen: Je nach Ausführung unterschiedlich (Bsp.: 1 g – 5000 g +/- 0,1 g; Messzeit < 1 s)		

Tabelle 10-11: Integriertes Wiegen

Integriertes Wiegen			
Merkmale	Gewicht		
Ressourcen	Handhabung	3D-HHG	
	Sensorklasse	Wägezelle (Kranwaage)	
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle	
Bedingungen	Pose für Handhabungsvorgang bekannt		
Vorbereitung			
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Objekt mit Greifer aufnehmen 2. Messung des Gewichts durch Kranwaage 3. Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung 4. Identifikation des Objekts anhand des Gewichts 		
Prozessablauf	//MASS/act_Integriertes_Wiegen		
Integration VDI 2860			
Kommentare	Befestigung des Sensors am Roboter/Greifer Sonderanfertigung		
Eigenschaften	Berührendes Messverfahren Messbereich + Toleranzen: Je nach Ausführung unterschiedlich (Bsp.: 1 g – 5000 g +/- 0,1 g; Messzeit < 1 s)		

Tabelle 10-12: Wiegen auf Förderband

Wiegen auf Förderband			
Merkmale	Gewicht		
Ressourcen	Handhabung	Förderband	
	Sensorklasse	Wägezelle	
	Peripherie	Steuerung Schnittstelle	
Bedingungen	Anzahl und Klasse der Objekte auf dem Förderband sind bekannt		
Vorbereitung			
Prozessablauf Beschreibung	1. Messung des Gewichts einzelner oder mehrerer Objekte auf dem Förderband 2. Berechnung eines Objekts bei mehrfacher Anzahl an Objekten auf dem Förderband 3. Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung 4. Identifikation des Objekts anhand des Gewichts		
Prozessablauf	//MASS/act_Wiegen_FB		
Integration VDI 2860			
Kommentare	Systeme am Markt bereits verfügbar		
Eigenschaften	Berührendes Messverfahren Identifikation parallel zum HHP Messbereich + Toleranzen: je nach Ausführung unterschiedlich		

Tabelle 10-13: Farbmessung

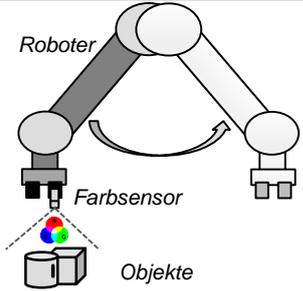
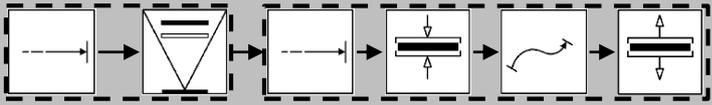
Farbmessung			
Merkmale	Farbe		
Ressourcen	Handhabung	1-3D-HHG	
	Sensorklasse	Farbsensor	
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle	
Bedingungen	Für mehrfarbige Objekte (Pose bekannt)		
Vorbereitung	<ol style="list-style-type: none"> 1. RGB-Sollwert bestimmen 2. RGB-Wert Toleranz bestimmen 3. RGB-Sollwert inkl. Toleranz in Datenbank hinterlegen 4. Messbereich einteichen 		
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Objekt in Pose bringen 2. Messung der Farbausprägung des Objekts 3. Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung 4. Identifikation des Objekts anhand des Farbausprägung 		
Prozessablauf	//MASS/act_Farbmessung		
Integration VDI 2860			
Kommentare	Befestigung des Sensors flexibel (über/seitlich von Förderband, an Robotergreifer, usw.) Identifikation vor, während oder nach dem Handhabungsprozess möglich		
Eigenschaften	Berührungsloses Messverfahren Messbereich inkl. Toleranzen: ca. 10 - 150 mm Messzeit < 1 s		

Tabelle 10-14: Kombination Farbmessung und Geometriebestimmung

Kombination Farbmessung und Geometriebestimmung		
Merkmale	Form, Farbe, Sekundärmerkmale	
Ressourcen	Handhabung	1-3D-HHG
	Sensorklasse	Farbkamera
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle
Bedingungen	Für mehrfarbige Objekte (Pose erfassen)	
Vorbereitung	<ol style="list-style-type: none"> 1. RGB- und Kontursollwert bestimmen 2. RGB-Wert und Konturtoleranzen bestimmen 3. RGB- und Kontursollwert inkl. Toleranz in Datenbank hinterlegen 4. Messbereich einteachen 5. Kalibrierung und Parametrisierung (z. B. Belichtungszeit) der Kamera 6. Referenzbilder von Objekten in Vorzugspose bzw. potenziellen Posen erstellen 7. Referenzbilder in Datenbank hinterlegen 	
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Objekt durch Kamera während des Handhabungsprozesses abscannen 2. Messung der Farbausprägung und Auswertung durch Bildverarbeitungssoftware 3. Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung 4. Identifikation des Objekts anhand der Farbausprägungen 	
Prozessablauf	//MASS/act_Farbe_und_Geometrie	
Integration VDI 2860		
Kommentare	<p>Mehrere Detektoren zur Farberkennung + Farb-Chip-Auflösung Mehrere Farbräume (z. B. RGB, HSV, Lab) und mehrere Farbkanäle zur Verfügung Befestigung des Sensors flexibel (über/seitlich von Förderband, an Roboter befestigt, usw.) Identifikation vor, während oder nach dem Handhabungsprozess möglich</p>	
Eigenschaften	Berührungsloses Messverfahren Messbereich + Toleranzen: ca. 30 mm - 5 m Messzeit < 1 s	

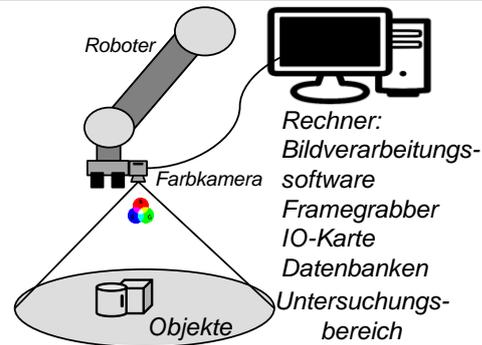


Tabelle 10-15: Identifikation der Objektform durch induktives Messfeld

Identifikation der Objektform durch induktives Messfeld		
Merkmale	Breite, Länge, (Werkstoff)	
Ressourcen	Handhabung	1-3D-HHG
	Sensorklasse	Induktive Sensoren
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle
Bedingungen	Pose ist teilweise bekannt Metallische Objekte Unterschiede in Breite und Länge müssen größer als die Auflösung der Sensoren sein.	
Vorbereitung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kontursollwert bestimmen 2. Konturtoleranzen bestimmen 3. Kontursollwert inkl. Toleranz in Datenbank hinterlegen 4. Höheneinstellung der Induktiven Sensoren einteachen 	
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Objekt fährt auf Förderband in induktives Messfeld 2. Induktives Messfeld ist unterteilt in Quadranten und liefert ein Matrixmuster (Pixelbild) 3. Durch die Geschwindigkeit des Förderbands kann auch die Zeit, die das Objekt für das Durchfahren benötigt, berechnet werden 4. Abbildung eines 2D-Musters des Objekts 3. Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung 4. Identifikation des Objekts anhand der Form 	
Prozessablauf	//MASS/act_Induktives_Messfeld	
Integration VDI 2860		
Kommentare	Identifikation vor, während oder nach dem Handhabungsprozess möglich Sofern die Höhe genau bekannt ist, kann durch die Auswertung der Sensorsignale auf verschiedene Werkstoffe geschlossen werden.	
Eigenschaften	Berührungsloses Messverfahren	

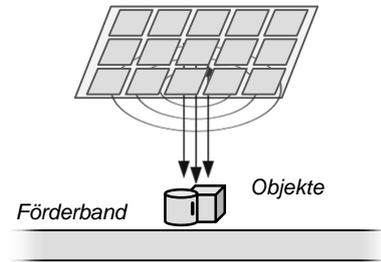


Tabelle 10-16: Überprüfung der Objektform durch Greifen

Überprüfung der Objektform durch Greifen		
Merkmale	Breite, Länge, (Höhe)	
Ressourcen	Handhabung	1-3D-HHG
	Sensorklasse	Elektrischer Greifer (iS)
	Peripherie	Steuerung Schnittstelle
Bedingungen	Pose bekannt Eindeutige Griffflächen	
Vorbereitung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Messpunkte inkl. Sollwerte bestimmen 2. Greifweite in Abhängigkeit der Greifbacken bestimmen 3. Toleranz an Messpunkten bestimmen 4. Sollwerte inkl. Toleranz in Datenbank hinterlegen 5. Greifstrategie (Reihenfolge bei mehreren Messpunkten) bestimmen 	
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Positionierung des Greifers an erstem Messpunkt 2. Greifen des Bauteils und gleichzeitige Überprüfung der Greifweite sowie der Greifkraft 3. Eventuell analog weitere Messpunkte durch einen Greifvorgang überprüfen 	
Prozessablauf	//MASS/act_Integriertes_Greifen	
Integration VDI 2860		
Kommentare	Identifikation vor oder während dem Handhabungsprozess möglich. Wenn mehrere Messpunkte erforderlich sind, ist der letzte Messpunkt als Griffpunkt für die Handhabung zu verwenden.	
Eigenschaften	Berührendes Messverfahren Messzeit entspricht der Greifzeit (falls ein Messpunkt ausreicht, wird keine zusätzliche Zeit benötigt)	

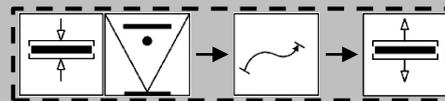
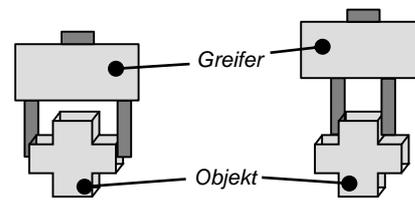


Tabelle 10-17: Überprüfung der Objektform durch Aktormatrix

Überprüfung der Objektform durch Aktormatrix		
Merkmale	Breite, Länge, (Höhe)	
Ressourcen	Handhabung	2-3D-HHG
	Sensorklasse	Kontaktbasierte Aktoren Binäre Schaltung
	Peripherie	Steuerung Schnittstelle
Bedingungen	<p>Pose ist bekannt Unterschiede in Breite und Länge müssen größer als die Auflösung der Aktormatrix sein. Um die Höhe zu bestimmen, müssen die Unterschiede größer als die Positioniergenauigkeit des eingesetzten HHG sein.</p>	
Vorbereitung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eckpunkte für die Platzierung der Objekte definieren 2. Erforderliche Auflösung der Aktoren definieren 3. Greifmuster ableiten 	
Prozessablauf Beschreibung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Positionierung des Greifers 1 mm über dem Objekt und Test, ob ein größeres Objekt vorliegt 2. Kontakt zum Objekt herstellen und Aktoren schalten (Greifen) 3. Signale der einzelnen Aktoren auswerten und mit Datenbank überprüfen 	
Prozessablauf	//MASS/act_Integrierte_Aktormatrix	
Integration VDI 2860		
Kommentare	Identifikation vor oder während dem Handhabungsprozess möglich	
Eigenschaften	Berührendes Messverfahren	

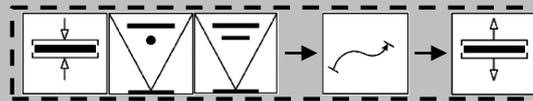
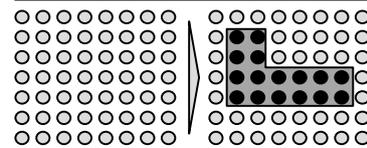
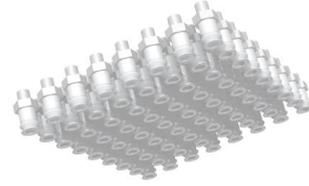


Tabelle 10-18: Integriertes Wiegen durch Bewegung

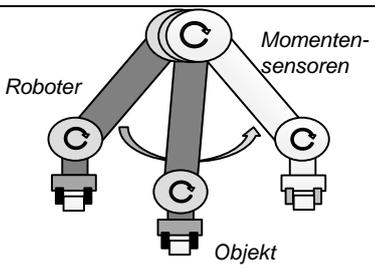
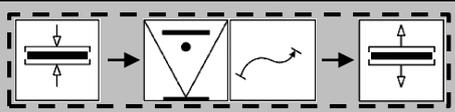
Integriertes Wiegen durch Bewegung			
Merkmale	Gewicht		
Ressourcen	Handhabung	3D-HHG (iS)	
	Sensorklasse	Momentensensor	
	Peripherie	Steuerung	
Bedingungen	Pose bekannt für Bauteilaufnahme Gewichtsunterschiede von mindestens 200 g		
Vorbereitung	1. Messbewegung (z. B. Schütteln) definieren und programmieren 2. Motorströme mit Vergleichsbauteilen bestimmen und ggf. Messbewegung anpassen 3. Sollmotorströme für verschiedene Gewichte bestimmen und in einer Datenbank hinterlegen		
Prozessablauf Beschreibung	1. Greifen des Bauteils 2. Messbewegung während der Handhabung ausführen 3. Motorströme überprüfen und je nach Messwert Handhabungsprozess abschließen		
Prozessablauf	//MASS/act_Wiegen_durch_Bewegung		
Integration VDI 2860			
Kommentare	Nur für große Gewichtsunterschiede einsetzbar Einbeziehung der Gesamtschwerpunkte in die Berechnung notwendig. Gesamtschwerpunkt (Greifer + Bauteil) abhängig vom Griffpunkt. Aufwändige Vorbereitung vonnöten und nur für einfache Geometrien und vergleichsweise große Gewichtsunterschiede einsetzbar.		
Eigenschaften	Berührendes Messverfahren		

Tabelle 10-19: Oberflächendetektion über gepulsten Laserstrahl

Oberflächendetektion über gepulsten Laserstrahl		
Merkmale	Oberflächenbeschaffenheit	
Ressourcen	Handhabung	1-3D-HHG
	Sensorklasse	Laserquelle
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle
Bedingungen	Wenig bis kein Umgebungslicht (ggf. Abschirmung benötigt) Objekt mit Reflektionseigenschaften Trockene Umgebung Pose ist bekannt	
Vorbereitung	1. Messbereich einteichen 2. Referenzmessung der vorliegenden Rauigkeitswerte (Materialabhängigkeiten beachten) 3. Referenzwerte in Datenbank hinterlegen	
Prozessablauf Beschreibung	1. Gepulster Laserstrahl wird auf Objekt gestrahlt 2. Reflektierten Laserstrahl durch Detektorschirm auffangen 3. Soll-Istwert -bgleich des zurückgeworfenen Laserstrahls in Steuerung 4. Identifikation des Objekts anhand der Oberflächenbeschaffenheit	
Prozessablauf	//MASS/act_Oberfläche_Laser	
Integration VDI 2860		
Kommentare	ggf. mehrere Detektoren zum Auffangen verwenden Befestigung des Sensors mit Detektorschirm sorgfältig einteichen Identifikation vor, während oder nach dem Handhabungsprozess möglich	
Eigenschaften	Berührungsloses Messverfahren Messzeit (tbd)	

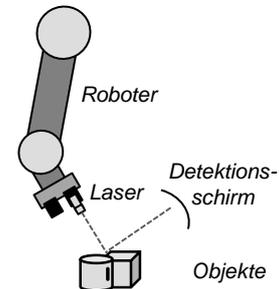
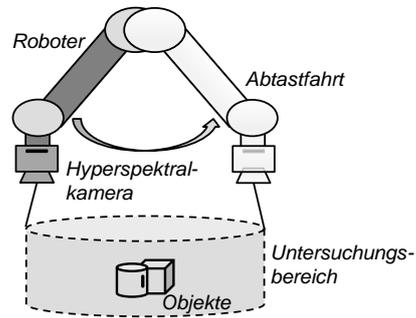


Tabelle 10-20: Hyperspektralanalyse

Hyperspektralanalyse		
Merkmale	Werkstoff	
Ressourcen	Handhabung	1-3D-HHG
	Sensorklasse	Hyperspektral-kamera
	Peripherie	Steuerung Software Schnittstelle
Bedingungen	Werkstoff trotz unterschiedlicher Bearbeitungszustände erkennbar	
Vorbereitung	1. Einrichten und Installation der BVS 2. Integration und Implementation der Kamera + BVS mit der zugehörigen Steuerung 3. Datenbank mit Sollwerten beschaffen oder ggf. neu erstellen	
Prozessablauf Beschreibung	1. Objekt durch Kamera während des HHP abscannen 2. Bildverarbeitung durch Software 3. Auswertung durch Soll-Istwert-Abgleich in Steuerung mit der Datenbank 4. Identifikation des Objekts anhand des Werkstoffs	
Prozessablauf	//MASS/act_Hyperspektral_Werkstoff	
Integration VDI 2860		
Kommentare	Vergleichsweise neues Verfahren, welches zunächst im produktionstechnischen Umfeld erprobt werden muss Alternativ Bewegung des Bauteils statt der Kamera	
Eigenschaften	Berührungsloses Messverfahren Messzeit (tbd)	



10.3 Weiterführende Informationen zur Methodik und ihrer Entwicklung

10.3.1 Anwendung des Münchner Methodenmodells

Den initialen Schritt des MMM bildet die Klärung des Methodeneinsatzes. Dazu zählen die Definition der zu beantwortenden Fragen sowie die Bestimmung des verfügbaren Inputs und des angestrebten Outputs (vgl. Abbildung 10-1). Anschließend werden Anforderungen definiert, um eine Vorauswahl an bestehenden Methoden hinsichtlich ihrer In- und Outputs auf Überschneidungen mit dem geplanten Methodeneinsatz zu prüfen. Die geeignetste Methode wird angepasst und zu einer neuen Methode geformt, welche im Rahmen ihrer Anwendung detailliert wird. In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung der Methodik in einem separaten Kapitel beschrieben (vgl. Kapitel 6). Die Erkenntnisse, welche bei der Anwendung gewonnen wurden, sind bereits in die Beschreibung der Methodik eingeflossen. Demzufolge entspricht die Reihenfolge der Ergebnisse nicht vollständig der Reihenfolge der vorangegangenen inhaltlichen Auseinandersetzung mit dem Themenbereich. Die Ergebnisse aus der Anwendung der Methodik sind maßgeblich in die Detaillierung der unterstützenden Werkzeuge eingeflossen, zu welchen bspw. Formblätter, Checklisten und Softwaretools zählen (LINDEMANN 2009).

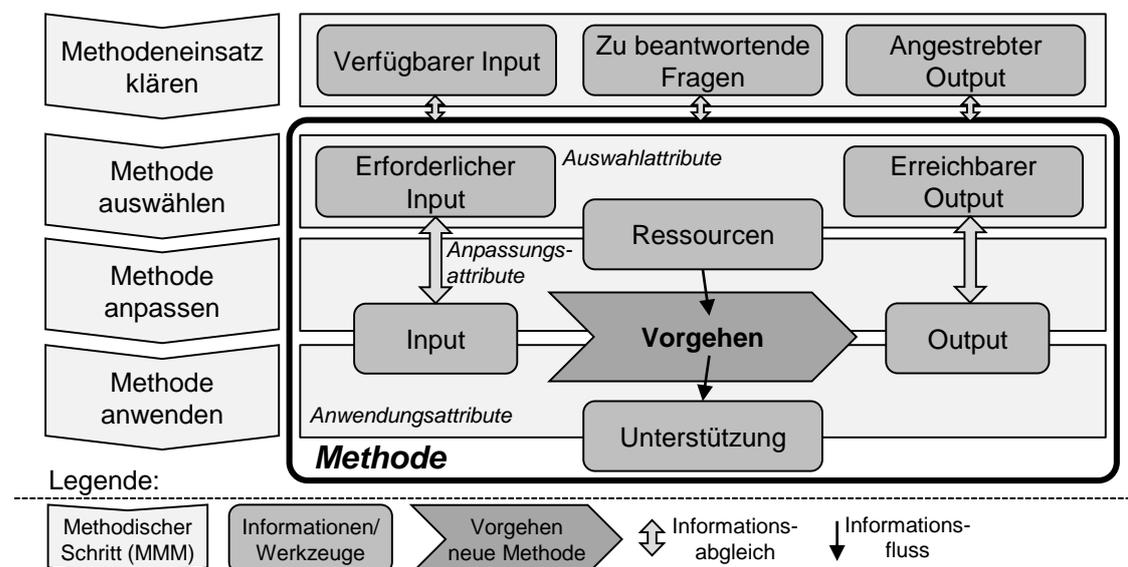


Abbildung 10-1: Münchner Methodenmodell (PONN & LINDEMANN 2011)

Zur ganzheitlichen Beschreibung einer Methode eignet sich die Verwendung von fünf Kategorien (LINDEMANN 2009). Über den *Zweck* wird die Tätigkeit bzw. Aufgabe beschrieben, welche durch die Methode unterstützt wird. Die *Situation* beschreibt den Anwendungsbereich sowie die definierten Randbedingungen. Der erreichbare Output, wird als *Wirkung* der Methode bezeichnet. Mithilfe dieser drei Kategorien kann ein Anwender entscheiden, ob eine Methode für seinen Anwendungsfall geeignet ist. Das *Vorgehen*, also die Schritte im Rahmen der Anwendung sowie die *Werkzeuge*, welche in Abbildung 10-1 als Unterstützung beschrieben sind, können als Betriebsanleitung für die Methode angesehen werden (LINDEMANN 2009). Diese fünf Kategorien bilden in Kombination mit den Schritten des MMM die Gliederung zur Beschreibung der erarbeiteten Methoden. Zwischen den einzelnen Methoden gilt es zudem, passende Schnittstellen zu schaffen. Zu diesem Zweck wurde das MMM erweitert (vgl. Abbildung 10-2). Im Fokus der Schnittstellenentwicklung steht die Abstimmung von Out- und Input der aufeinanderfolgenden Methoden. Um diese Zwischenergebnisse zu definieren, wird in Anlehnung an die Grundprinzipien des Handelns (vgl. Abschnitt 10.3.4.7) das Grundprinzip der Problemzerlegung (DÖRNER 2003) und das Prinzip „Vom Ganzen zum Detail“ (DAENZER ET AL. 2002) verfolgt. Entsprechend wurden aus einer ganzheitlichen Betrachtung die vier Bausteine zur Lösung einzelner in sich geschlossener Aufgaben definiert. Durch die Definition von *Zweck*, *Situation* und *Wirkung* der Methodik wurde ein Rahmen für die einzelnen Methoden geschaffen.

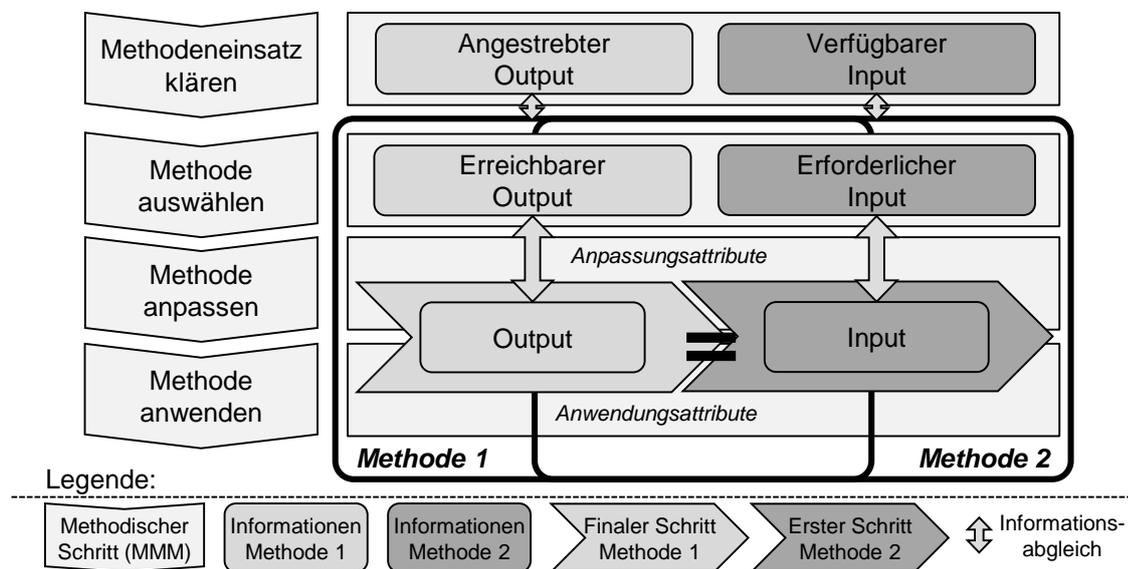


Abbildung 10-2: Erweiterung des Münchner Methodenmodells

10.3.2 Einsatz des strukturellen Komplexitätsmanagements

Das SKM fokussiert die Beherrschung der System- bzw. Prozesskomplexität, statt sie zu reduzieren oder zu vermeiden (LINDEMANN ET AL. 2009). Das Fundament der Vorgehensweise des SKM ist die Definition der vorliegenden Struktur mithilfe der sog. Multi-Domain-Matrix (MDM) (vgl. Abbildung 10-3).

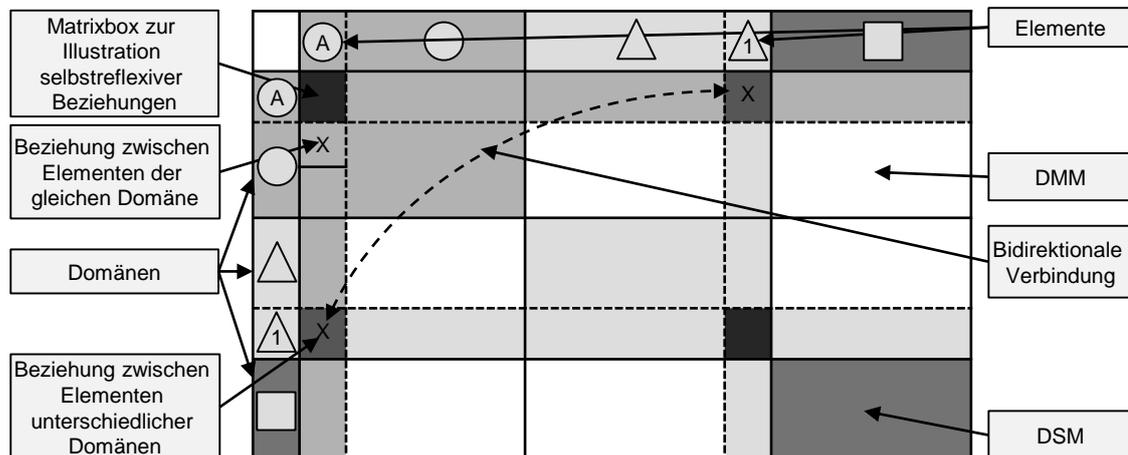


Abbildung 10-3: Multi-Domain Matrix (MDM) (LINDEMANN ET AL. 2009)

In der MDM werden Domänen, Elemente und Relationen des Systems gesammelt. Hierzu werden die Elemente in Domänen gruppiert und gegenübergestellt, sodass die erste Spalte der transponierten ersten Zeile der Matrix entspricht. Demzufolge besteht die Diagonale der $n \times n$ -Matrix aus selbstreflexiven Beziehungen der Elemente. Durch die Verwendung von Submatrizen, welche domänenübergreifende Relationen (Domain Mapping Matrix - DMM) oder domäneninterne Relationen (Design Structure Matrix - DSM) darstellen, wird die Übersichtlichkeit erhöht.

Um automatische Auswertungen zu ermöglichen, werden Relationen zwischen Elementen mit dem Wert 1 repräsentiert, während nicht vorhandene Relationen durch den Wert 0 angezeigt werden. Bevor eine Auswertung erfolgt, sind die Informationen in der Matrix zu überprüfen. Durch eine Sensitivitätsanalyse werden besonders relevante Relationen hervorgehoben (KARATKEVICH 2008). Das Gewicht einer Relation nach KARATKEVICH (2008) wird über die Menge an Inputs und Outputs der verknüpften Elemente berechnet. Diese Berechnung wird für jede Zelle in der MDM durchgeführt. Anschließend können über Filterfunktionen die Relationen mit den höchsten Werten (z. B. die obersten 10 %) gefiltert und erneut auf ihre Plausibilität untersucht werden (SCHMALZ ET AL. 2015). Um das System anschließend zu analysieren, werden die Aktiv- und Passivsummen sowie die Kritikalität der Elemente abgeleitet (LINDEMANN ET AL. 2009).

Elemente mit einer hohen Aktivität beeinflussen das System stark und eignen sich folglich zur Steuerung eines Systems (LINDEMANN ET AL. 2009). Im Hinblick auf eine Vorgehensentwicklung sollten diese Elemente möglichst früh bestimmt werden (SCHMALZ ET AL. 2015). Eine hohe Passivität besitzen Elemente, die stark durch das System kontrolliert werden und entsprechend am Ende eines Vorgehens betrachtet werden sollten. Elemente mit einer hohen Kritikalität sind stark in das System eingebunden und von besonderer Relevanz für das Systemverhalten. Sind mehrere kritische Elemente in einem System enthalten, welche zudem miteinander in Verbindung stehen, folgt für eine Vorgehensweise daraus, dass eine sequenzielle Bestimmung dieser Elemente nicht möglich ist. Stattdessen gilt es, einen multikriterielle Entscheidung zu gestalten, welche der parallelen Definition mehrerer Elemente dient. Die Formeln zur Berechnung der Aktivität, Passivität, Kritikalität und des Gewichts nach KARATKEVICH (2008) sind folgend aufgeführt.

Gewicht nach KARATKEVICH (2008):

$$\text{Karatkevich}_{ij} = \#Input_i - \#Output_i + \#Output_j - \#Input_j \quad (4)$$

Aktivsumme (AS) und Passivsumme (PS) nach LINDEMANN ET AL. (2009):

$$AS_i = \text{Menge an Elementen, die Element}_i \text{ direkt beeinflusst} \quad (5)$$

$$PS_i = \text{Menge an Elementen, die Element}_i \text{ direkt beeinflusst} \quad (6)$$

Aktivität, Passivität und Kritikalität nach LINDEMANN ET AL. (2009):

$$\text{Aktivität}_i = \frac{\text{Aktivsumme}_i}{\text{Passivsumme}_i} \quad (7)$$

$$\text{Passivität}_i = \frac{\text{Passivsumme}_i}{\text{Aktivsumme}_i} \quad (8)$$

$$\text{Kritikalität}_i = \text{Aktivsumme}_i * \text{Passivsumme}_i \quad (9)$$

In Anlehnung an die Vorgehensentwicklung nach SCHMALZ ET AL. (2015) wurde in der vorliegenden Arbeit das zu entwickelnde System auf seine Komplexität untersucht. Anschließend wurden die Ausprägungen der einzelnen Systemelemente auf gegenseitigen Einfluss geprüft. Auf diese Weise kann über die Berechnung der Aktiv- und Passivsummen eine ideale Reihenfolge bestimmt werden, in welcher die Systemelemente zu betrachten und zu konfigurieren sind. Mit diesem Ansatz wurden Iterationen minimiert und zielgerichtete und schlanke Methoden erarbeitet. Darüber hinaus wurden weitere Elemente des SKM, wie bspw. die Triangulation zur Reihenfolgebildung, für die Erstellung verschiedener Werkzeuge (z. B. Tools) genutzt, welche die Vorgehensweisen unterstützen.

10.3.3 Ergänzende Tabellen zur Entwicklung der Methodik

Table 10-21: Übersicht der erstellten Werkzeuge

Methoden	Bezeichnung	Programm
1	Zielbeschreibung	Excel
	Stakeholderliste	Excel
	Szenariospezifikation	Excel
	Objekt-Betriebsmittel-DMM	Excel
	Berechnung der theoretischen Flexibilität	Excel
	Interview und Checklisten	Excel
	Nutzwertanalyse	Excel
2	Vorlage erweiterte Stückliste	Excel
	Vorlage erweiterter Gozinthograph	Visio
	Objekt-Merkmal-DMM (erweitert)	Excel
	Objekt-Merkmal-DMM (vereinfacht)	Excel
	Merkmal-Sensorklasse-DMM	Excel
	Tool zur Sensorauswahl	Excel
	Angepasste Kapitalwertmethode	Excel
	Tool zur Kostenindikation	Excel
	Vorlage Entscheidungsbaum	Visio / Excel
3	Identifikationsdatenbank inkl. Auswahlhilfe	Excel
	Funktionsbeschreibungen	Excel
	Funktionsbaum	Visio
	Relationsorientiertes Funktionsmodell	Visio
	Morphologischer Kasten	Excel
	Anleitung Skizzenerstellung	Excel
	Anleitung CAD-Analyse	Excel
4	Zielbeschreibung	Excel
	Funktionale & nicht-funktionale Anforderungen	Excel
	Nutzerfalldiagramm	Visio
	Vorlage zur Erfassung von Funktionen	Excel
	DSM-Funktionen	Excel
	Kriterienkatalog zur Frameworkauswahl	Excel
	Systemelement-Funktion-DMM	Excel
	Vorlage Rollenbeschreibung	Excel
	Vorlagen UML-Diagramme (Struktur, Sequenz, etc.)	Visio
	Agentenpool	Excel
	Liste mit Rollen, Agenten und Aufgaben	Excel
	Codegenerator	Excel
	Ablaufsimulation	JavaScript
Evaluationstool	Excel	

10 Anhang

Tabelle 10-22: DSM-Kriterien Checkliste - teiltriangularisiert

DSM-Kriterien Checkliste	Absatz	Varianten	Haltbarkeit	Nachweis	Zukaufteile	Fertigungstiefe	Flexibilität	Minimale Losgröße	Redundanz	Parallelität	Nacharbeit	Bestellschwankungen	Lieferzeit	Fertigungsprinzip
Absatz	X				X	X		X			X	X	X	X
Varianten		X			X	X	X		X		X			
Haltbarkeit			X										X	X
Nachweis				X										
Zukaufteile					X									
Fertigungstiefe						X								
Flexibilität							X	X			X			
Minimale Losgröße							X	X	X				X	X
Redundanz									X	X				
Parallelität										X			X	
Nacharbeit	X										X		X	X
Bestellschwankungen												X	X	X
Lieferzeit													X	X
Fertigungsprinzip								X					X	

Tabelle 10-23: DMM-Kriterien Nutzwert (MASS)

DMM-Kriterien Nutzwert	Beherrschung Systemkomplexität	Erforderliche Systemflexibilität	Erforderliche Reaktionsfähigkeit	Liefertreue	Identifikations- aufwand
Absatz		1			-1
Varianten	1	1	1		
Haltbarkeit			2		
Zukaufteile					1
Fertigungstiefe					-1
Flexibilität	1				
Minimale Losgröße				-1	
Redundanz	1				
Parallelität	1				
Nacharbeit		1			
Bestellschwankungen		1	1	1	
Lieferzeit				1	
Fertigungsprinzip		1	1		

Tabelle 10-24: DMM-Kriterien Nutzwert (IDSS)

DMM-Kriterien Nutzwert	Beherrschung Systemkomplexität	Erforderliche Systemflexibilität	Erforderliche Reaktionsfähigkeit	Liefertreue	Identifikations- aufwand
Absatz		1			1
Varianten	1	1	1		
Haltbarkeit			2		
Zukaufteile					-1
Fertigungstiefe					1
Flexibilität	1				
Minimale Losgröße				-1	
Redundanz	1				
Parallelität	1				
Nacharbeit		1			
Bestellschwankungen		1	1	1	
Lieferzeit				1	
Fertigungsprinzip		1	1		

Tabelle 10-25: DMM-Kriterien Nutzwert (konventionelle Steuerung)

DMM-Kriterien Nutzwert	Beherrschung Systemkomplexität	Erforderliche Systemflexibilität	Erforderliche Reaktionsfähigkeit	Liefertreue	Identifikationsaufwand
Absatz		1			
Varianten	-1	-1	-1		
Haltbarkeit			-1		
Zukaufteile					
Fertigungstiefe					
Flexibilität	-1				
Minimale Losgröße				1	
Redundanz	-1	1	1	1	
Parallelität	-1	1	1	1	
Nacharbeit		-1			
Bestellschwankungen		-1	-1	-1	
Lieferzeit				1	
Fertigungsprinzip		-1	-1		

Tabelle 10-26: Paarweiser Vergleich der Kriterien zur Auswahl einer Methode zur Sensorauswahl

Kriterien Methoden-auswahl	Benutzerfreund.	Genauigkeit	Vollständigkeit	Skalierbarkeit	Komplexität	Mehrstufig	Summe	Rang
Benutzerfreund.		0	1	-1	-1	-1	-2	5
Genauigkeit	0		1	0	-1	-1	-1	4
Vollständigkeit	-1	-1		-1	-1	-1	-5	6
Skalierbarkeit	1	0	1		0	0	2	3
Komplexität	1	1	1	0		0	3	1
Mehrstufig	1	1	1	0	0		3	1

Tabelle 10-27: Wissensmatrix - Merkmal-Sensorklasse-DMM (transponiert)

DMM-Sensoren Merkmale	Werkstoff	Gewicht	Farbe	Länge	Breite	Höhe	Nut	Bohrung	Gewinde	Fase	Schlitz	Ausschnitt	Absatz/Bund	Sicke
	Wägezelle	1												
Induktiver NS			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kapazitiver NS			1	1	1									
Ultraschallsensor			1	1	1									
Lichttaster			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Taktile Sensoren			1	1	1									
Farbsensor	1													
2D-Kamera		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	
Schwenkspiegel-Scanner			1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	
Lichtgitter			1	1	1									
Lasertriangulation			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lichtschnittverfahren			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Stereoaufnahme		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Streifenlichtprojektion		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Time-of-Flight			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hyperspektralsensoren	1													

Tabelle 10-28: Paarweiser Vergleich der Kriterien zur Auswahl einer agentenorientierten Methode

Kriterien Methoden-auswahl	Kommunikation & Ontologien	Flexibilität	Rollen & Schnittstellen	Betrachtungsebenen	Benutzerfreundlichkeit	Variabilität & Wiederverwend.	Genauigkeit & Eindeutigkeit	Vollständigkeit	Offenheit	Skalier- & Adaptierbarkeit	Programmierung	Summe	Rang
	Kommunikation & Ontologien	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
Flexibilität	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	6	2
Rollen & Schnittstellen	-1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	6	2
Betrachtungsebenen	-1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	6	2
Benutzerfreundlichkeit	-1	0	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	3	5
Variabilität & Wiederverwendbarkeit	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	1	1	1	1	-2	6
Genauigkeit & Eindeutigkeit	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	1	-2	6
Vollständigkeit	-1	-1	-1	-1	-1	1	0	0	1	1	1	-2	6
Offenheit	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	-7	9
Skalier- & Adaptierbarkeit	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	-7	9
Programmierung	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	1	-9	11

10 Anhang

Tabelle 10-29: Kriterien zur Auswahl von Sensoren - gewichtet

Kriterium	Ausprägung				Prio
Einsatzfähigkeit					
zerstörungsfreie Prüfung	zerstörend		zerstörungsfrei		3
Genauigkeit	X>5 %	1 %<X<5 %	1 %>X	0,1 %>X	3
Messbereich	Abhängig vom verwendeten Sensorsystem und dem vorliegenden Anwendungsfall				3
Sensorreichweite	Je nach Funktionsprinzip des Sensors unterschiedlich (von berührend - max. ~4 m)				2
Wirtschaftlichkeit					
Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit	nie verfügbar	selten verfügbar	oft verfügbar	immer verfügbar	2
Störanfälligkeit	sehr anfällig	anfällig	neutral	nicht anfällig	2
Messdauer	X>0,1 s	0,1 s>X	0,01 s>X	0,001 s>X	2
Abtastrate	Je nach Anwendungsfall unterschiedlich gewünscht (von ~ 1 Hz - 10 kHz)				1
Kalibrier-aufwand	hoher Aufwand	mittlerer Aufwand	geringer Aufwand	kein Aufwand	2
erwartete Lebensdauer	1 Tag>X	1 Monat<X	1 Jahr<X	5 Jahr<X	2
Kosten Sensorsystem	sehr teuer	teuer	neutral	günstig	2
Prozessintegrationsfähigkeit					
Auswertesystem	zentral	überwiegend zentral	überwiegend dezentral	dezentral	3
Art der Schnittstelle	analog		digital		1
Umgebungsbedingungen	großer Einfluss	mittlerer Einfluss	geringer Einfluss	kein Einfluss	2
Schutzklassifizierung	0	1-2	3-4	5-6	2
Befestigungsmöglichkeit	sehr komplex	komplex	neutral	leicht	1
Bauraum des Sensorsystems	groß	neutral	klein	sehr klein	1
Gewicht des Sensorsystems	hoch	neutral	gering	sehr gering	1

10.3.4 Ergänzende Grundlagen zu verwendeten Modellen und methodischen Hilfsmitteln im Rahmen der Methodik

In diesem Abschnitt sind verschiedene methodische Hilfsmittel erläutert, welche zur Erarbeitung der Ergebnisse genutzt wurden oder im Rahmen der erarbeiteten Methodik verwendet werden sollen.

10.3.4.1 Modellierungsgrundlagen nach UML

Die Unified Modelling Language (UML) ist eine häufig verwendete Modellierungssprache, welche die Möglichkeit bietet, Teile des Steuerungscode aus der Modellierung zu gewinnen (RUMPE 2017). Die verschiedenen Modelle werden in *Struktur-* und *Verhaltensdiagramme* unterteilt. Zu den wichtigsten Modellen zählen *Nutzerfall-*, *Klassen-*, *Zustands-*, *Sequenz-* und *Aktivitätsdiagramme*, welche im Folgenden erläutert werden.

Nutzerfalldiagramme dienen der Darstellung eines Anwendungsfalls. Sie werden auch als Use-Case- und Anwendungsfalldiagramme bezeichnet. Ihre zentralen Elemente bilden die Akteure, welche bestimmte Personen oder ein System darstellen können, und die vorliegenden Anwendungsfälle. Diese werden über Assoziationen miteinander innerhalb einer Systemgrenze verknüpft. Zudem werden Beziehungen zwischen einzelnen Anwendungsfällen dargestellt, welche eine Inklusion bzw. eine Erweiterung von Anwendungsfällen bezeichnen (vgl. Abbildung 10-4).

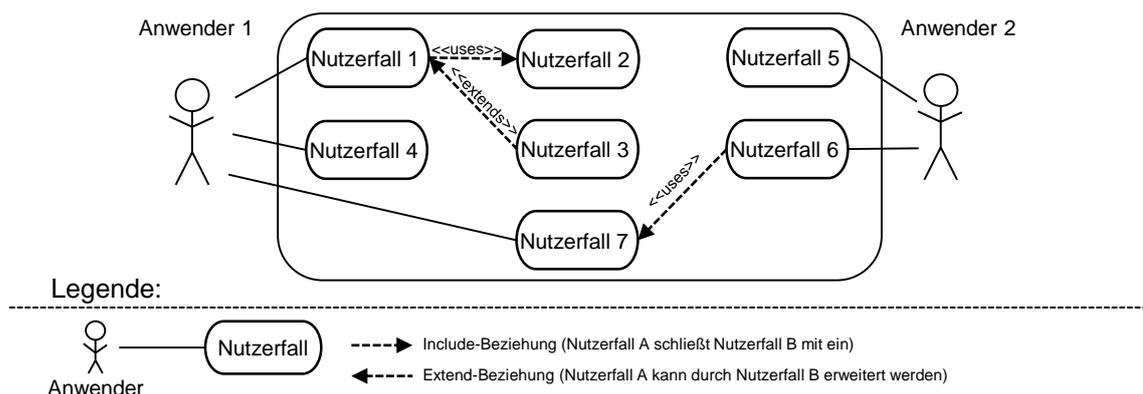


Abbildung 10-4: Nutzerfalldiagramm - Beispiel

Klassendiagramme zählen zu den Strukturdiagrammen und dienen dazu, die Komponenten eines Systems zu erfassen. Die einzelnen Klassen werden über ihre Attribute und Operationen beschrieben und durch die Verwendung von verschiedenen Beziehungen wie Kompositionen und Aggregationen in einen strukturellen Kontext gesetzt. Kompositionen bezeichnen eine existenzielle Notwendigkeit, während Aggregationen einen Zusammenhang darstellen (vgl. Abbildung 10-5).

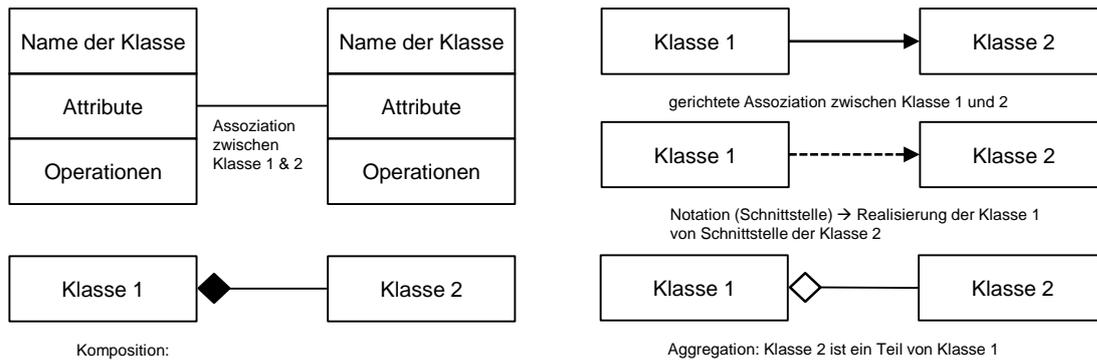
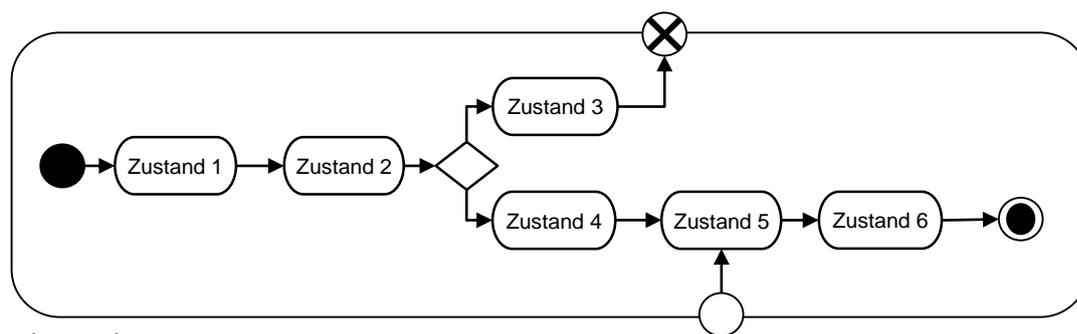


Abbildung 10-5: Klassendiagramme - Beispiele

In *Zustandsdiagrammen* werden Übergänge von Zuständen dargestellt. Hierbei werden einfache Zustände und Zustände mit Verhaltensspezifikationen unterschieden. Der Übergang in einen anderen Zustand ist an Transitionen gebunden, welche sich bspw. auf eine Verhaltensspezifikation beziehen. In Abhängigkeit des Systems und der Systemgrenze können mehrere parallele Zustände entstehen und die Zustandsübergänge können sich beliebig komplex gestalten (vgl. Abbildung 10-6).



Legende:

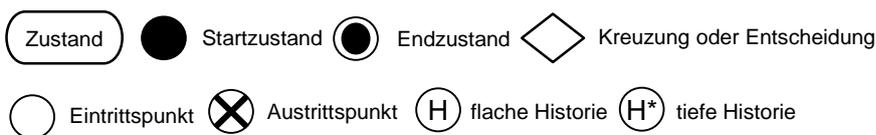


Abbildung 10-6: Zustandsdiagramm - Beispiel

Sequenzdiagramme dienen der Interaktionsdarstellung. Im Fokus steht der Kommunikationsablauf zwischen mindestens zwei Systemelementen. Dieser Diagrammtyp eignet sich zur Definition von Schnittstellen und gibt Auskunft, wann welche Informationen zur Übermittlung bereitstehen müssen. Um eine eindeutige Modellierung zu ermöglichen, wird in einem Sequenzdiagramm für gewöhnlich eine einzige Alternative dargestellt. Wird der Kommunikationsablauf durch Entscheidungen verändert, gilt es, diese in unterschiedlichen Diagrammen darzustellen. Die verwendeten Nachrichten werden graphisch in synchrone und asynchrone Operationsaufrufe unterschieden (vgl. Abbildung 10-7).

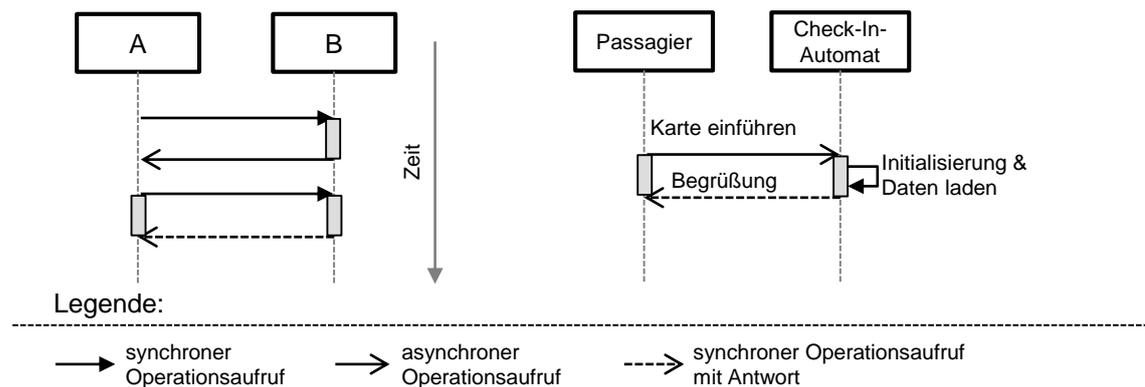


Abbildung 10-7: Sequenzdiagramm - Beispiel

Ein weiterer Vertreter der Verhaltensdiagramme ist das *Aktivitätsdiagramm*. In diesem Diagramm sind benötigte Aktionen zur Erfüllung einer, auf einen bestimmten Anwendungsfall bezogenen, Aufgabe dargestellt. Die einzelnen Aktionen sind logisch über Transitionen miteinander vernetzt und mit einem Objektfluss verbunden. Ziel der Aktionen ist es, ein Objekt von seinem Ausgangs- in seinen Zielzustand zu überführen (vgl. Abbildung 10-8).

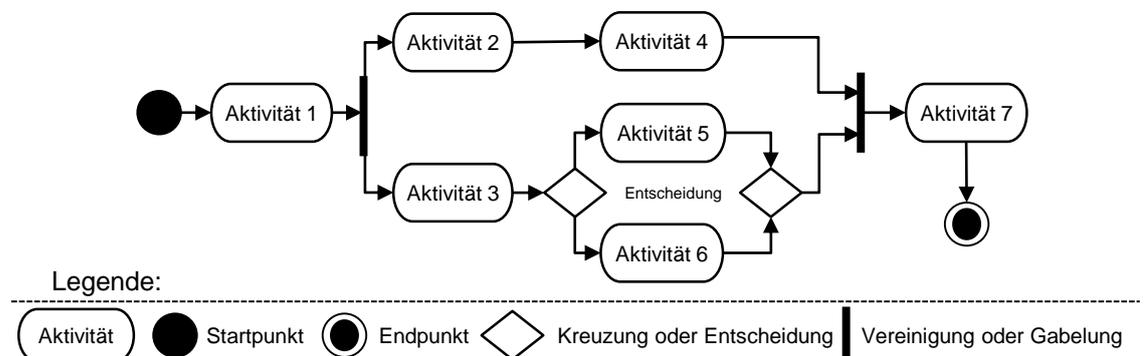


Abbildung 10-8: Aktivitätsdiagramm - Beispiel

10.3.4.2 Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode ermittelt den Barwert eines Stroms von Aus- und Einzahlungen. Sie ist mit der statischen Methode des Gesamtgewinnvergleichs verwandt. Bei beiden Methoden ist das Vergleichskriterium ein absoluter Überschuss. Bei der Kapitalwertmethode wird die Summe abdiskontierter Nettozahlungen (Zahlungsüberschüsse) über alle Jahre der Investition betrachtet. Der Kapitalwert entspricht daher der Summe der Gesamtgewinne *aller Investitionsjahre* und nicht wie beim Gesamtgewinnvergleich dem Überschuss von Erlösen über Kosten *pro Jahr* (ZANTOW ET AL. 2016). Ein positiver Kapitalwert bedeutet:

- Wiedergewinnung der eingesetzten Mittel
- Erzielung eines rechnerischen Überschusses in Höhe des Kapitalwerts
- Verzinsung der eingesetzten Mittel in Höhe des Kalkulationszinsfußes

Die Berechnung des Kapitalwerts unter Berücksichtigung von Abschreibungen und Steuersätzen nach PERRIDON ET AL. (2012) ist Formel (9) zu entnehmen:

$$KW = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{E_t - A_t - s(E_t - A_t - AfA_t)}{[1 + i(1 - s)]^t} \quad (10)$$

KW = Kapitalwert

E_t, A_t = Ein- und Auszahlungen in Periode t

AfA_t = Steuerliche Abschreibung in Periode t

I_0 = Investitionssumme

T = Betrachtungszeitraum

t = Laufvariable für die Anzahl der Perioden

i = Kalkulationszinsfuß

s = Steuersatz

10.3.4.3 Nutzwertanalyse

Durch die Nutzwertanalyse wird eine einseitige Ausrichtung einer Entscheidung anhand eines quantitativen Werts aufgehoben. Sie stellt ein systematisches Verfahren dar, in welchem qualitative Kriterien in einem mehrdimensionalen Zielsystem beschrieben und bewertet werden. Der Nutzwert stellt den Gesamtnutzen einer Entscheidungsalternative im Hinblick auf die definierten Kriterien dar. Der Ablauf der Nutzwertanalyse gliedert sich wie folgt (ZANTOW ET AL. 2016):

1. Festlegung und Gewichtung der Zielkriterien
2. Festlegung der Messskala für die Zielbeiträge und Transformation in eine einheitliche Nutzenskala
3. Ermittlung der Zielerreichung durch die Alternativen und Errechnung von Teil- und Gesamtnutzen

10.3.4.4 Paarweiser Vergleich

Zur Gewichtung einer Menge von Elementen werden diese in eine $n \times n$ -Matrix eingetragen (vgl. Tabelle 10-30). Zum Ausfüllen der Matrix ist es ausreichend, die obere Dreiecksmatrix (grau) auszufüllen, da die untere Hälfte genau dem Gegenteil entspricht. Wird in die Zelle der Wert 0 eingetragen bedeutet dies, dass die Kriterien von gleicher Relevanz sind. Der Wert 1 beschreibt, dass das Kriterium der Zeile wichtiger und -1 entsprechend weniger wichtig als das Kriterium der Spalte ist. Bildet man anschließend die Summe der Zeile, kann daraus der Rang der Kriterien abgeleitet und für eine Gewichtung verwendet werden.

Tabelle 10-30: Paarweiser Vergleich - Beispiel

Paarweiser Vergleich	Kriterium I	Kriterium II	Kriterium III	Kriterium IV	Kriterium V	Kriterium VI	Summe	Rang
Kriterium I		0	1	-1	-1	-1	-2	5
Kriterium II	0		1	0	-1	-1	-1	4
Kriterium III	-1	-1		-1	-1	-1	-5	6
Kriterium IV	1	0	1		0	0	2	3
Kriterium V	1	1	1	0		0	3	1
Kriterium VI	1	1	1	0	0		3	1

10.3.4.5 Relationsorientiertes Funktionsmodell

Ein relationsorientiertes Funktionsmodell beinhaltet eine Unterteilung in nützliche und schädliche Funktionen (vgl. Abbildung 10-9). Des Weiteren werden Relationen zwischen den einzelnen Funktionen bzgl. ihrer Kausalität bzw. Intention definiert. Im Fokus der relationsorientierten Funktionsmodellierung steht nicht die vollständige Modellierung eines Gesamtsystems, sondern die Identifikation wesentlicher Systemzusammenhänge und die Konzentration auf die wichtigsten technischen Problemstellungen. Auf diese Weise kann insbesondere die Verträglichkeit von Teillösungen (vgl. Morphologischer Kasten, Abschnitt 10.3.4.6) gut überprüft werden (PONN & LINDEMANN 2011).

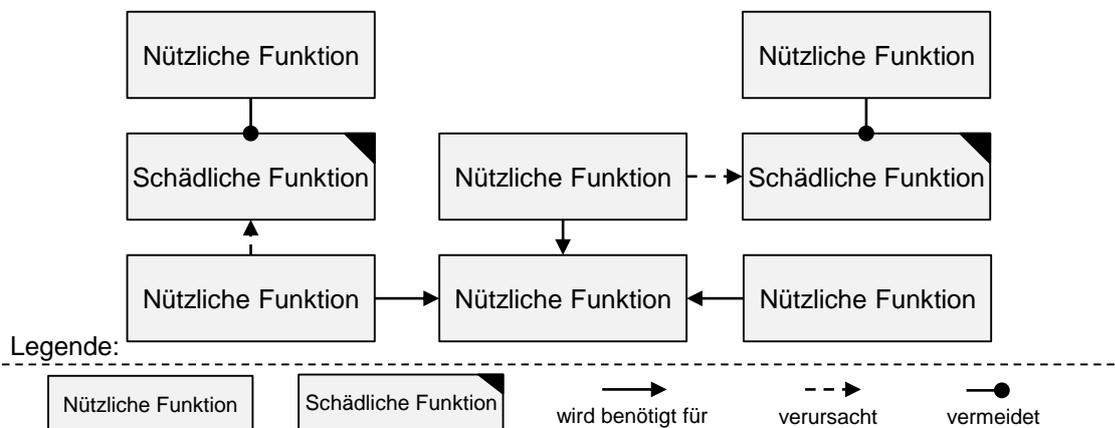


Abbildung 10-9: Aufbau eines relationsorientierten Funktionsmodells

Zur Erstellung eines relationsorientierten Funktionsmodells wird zunächst eine Funktionsliste erstellt, in welcher gewünschte nützliche und bekannte schädliche Funktionen gesammelt werden. Anschließend wird ausgehend von der wesentlichen nützlichen Funktion das Modell erstellt. Zur Erweiterung des Modells dienen vier Fragestellungen:

- Wird die Funktion zur Erfüllung einer weiteren nützlichen Funktion benötigt?
- Verursacht die nützliche Funktion weitere schädliche Funktionen?
- Wurde die Funktion eingeführt, um eine schädliche Funktion zu vermeiden?
- Setzt die Funktion die Erfüllung weiterer Funktionen voraus?

10.3.4.6 Morphologischer Kasten

Dieses Hilfsmittel dient der systematischen Entwicklung von Systemen basierend auf dem Grundprinzip der Problemzerlegung (vgl. Abschnitt 10.3.6). Die Hauptfunktion des angestrebten Systems wird in ihre Teilfunktionen untergliedert. Anschließend werden zu jeder Teilfunktion mehrere Teillösungen gesammelt. Durch die Kombination der Lösungen (Beispiel, grau) werden anschließend verschiedene Konzepte abgeleitet, welche zu einer Gesamtlösung detailliert werden.

Tabelle 10-31: Morphologischer Kasten - Beispiel

Morphologischer Kasten	Teillösung I	Teillösung II	Teillösung III	Teillösung IV
Bewegen	6-Achs	Portal	Scara	Delta
Greifen	Klemmgreifer	Sauggreifer	Magnetgreifer	
Kontakt herstellen	Punkt	Linie	Fläche	

10.3.4.7 6-3-5-Methode

In dieser Kreativitätstechnik entwickeln sechs Teilnehmer drei unterschiedliche Ideen innerhalb von fünf Minuten. Nachdem jeder Teilnehmer drei initiale Ideen auf einem Formblatt beschrieben hat, werden diese Formblätter weitergegeben und in der nächsten Runde von fünf Minuten weiterentwickelt. Dieser Prozess wird insgesamt fünfmal wiederholt, sodass jeder Teilnehmer jedes Formblatt einmal bearbeitet hat. Das Team sollte möglichst interdisziplinär sein, um ein breites Spektrum an unterschiedlichsten Lösungsansätzen zu erhalten. Im Idealfall entstehen auf diese Weise in kürzester Zeit 108 verschiedene Ideen (DAHL 2012).

10.3.5 Werkzeuge und Hilfsmittel der Fabrikplanung

In diesem Abschnitt werden Werkzeuge und Hilfsmittel aus der Fabrikplanung erläutert, welche im Rahmen der Methodik verwendet bzw. analysiert werden.

10.3.5.1 Produktrepräsentanten

Produktrepräsentanten werden als vorläufige Produkte verwendet, welche die Planungsbasis für die Produktion darstellen. Hierbei wird das sog. Inversionsgesetz angewandt, d. h. der zukünftige stoffliche Output des Produktionssystems (Produktionsprogramm) bildet den informationellen Input für die Produktionssystemplanung. Durch die Reduktion des Produktionsprogramms auf Produktrepräsentanten wird Planungskomplexität vermindert. Der Produktrepräsentant ist ein reales oder ideelles Produkt (Komplettteil bestehend aus verschiedenen Bauteilen), welches weitestgehend die Anforderungen der gesamten Produktgruppe zusammenfasst. Über verschiedene Variabilitätsstufen können diese Repräsentanten im Laufe der Planung detailliert und in einem Toleranzbereich spezifiziert werden (GRUNDIG 2015).

10.3.5.2 Fertigungsstufen und Gozintograph

Ein Gozintograph ist inhaltlich mit einer Stückliste eines Produktrepräsentanten gleichzusetzen. An der Spitze des Graphen steht das finale Produkt, welches sich aus verschiedenen Baugruppen, Zukaufteilen, Halbzeugen und Bauteilen zusammensetzt (vgl. Abbildung 10-10). Hierbei werden verschiedene Fertigungsstufen unterschieden, welche GRUNDIG (2015) wie folgt definiert:

Auf unterster Ebene befinden sich Rohmaterialien, Rohteile und Kaufteile. Der Unterschied zwischen Kaufteilen und Rohteilen besteht darin, dass Kaufteile direkt montiert werden, während Rohteile eine weitere Bearbeitung benötigen. Über die Vorfertigung bzw. Teilefertigung werden aus den Rohmaterialien und -teilen Einzelteile gefertigt. In gängigen Gozintographen werden die hier entstehenden Halbzeuge zur Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Durch verschiedene Fügeverfahren werden in der Baugruppenmontage aus den Einzel- und Kaufteilen Baugruppen gebildet, welche wiederum zu Hauptbaugruppen zusammengefasst werden. Unternehmensspezifisch und in Abhängigkeit der Produktkomplexität sind im Bereich der Montage unterschiedlich viele Hierarchiestufen zu finden. Die finale Fertigungsstufe bildet in jedem Fall die Endmontage der Hauptbaugruppen, aus welcher das fertige Produkt bzw. Erzeugnis resultiert.

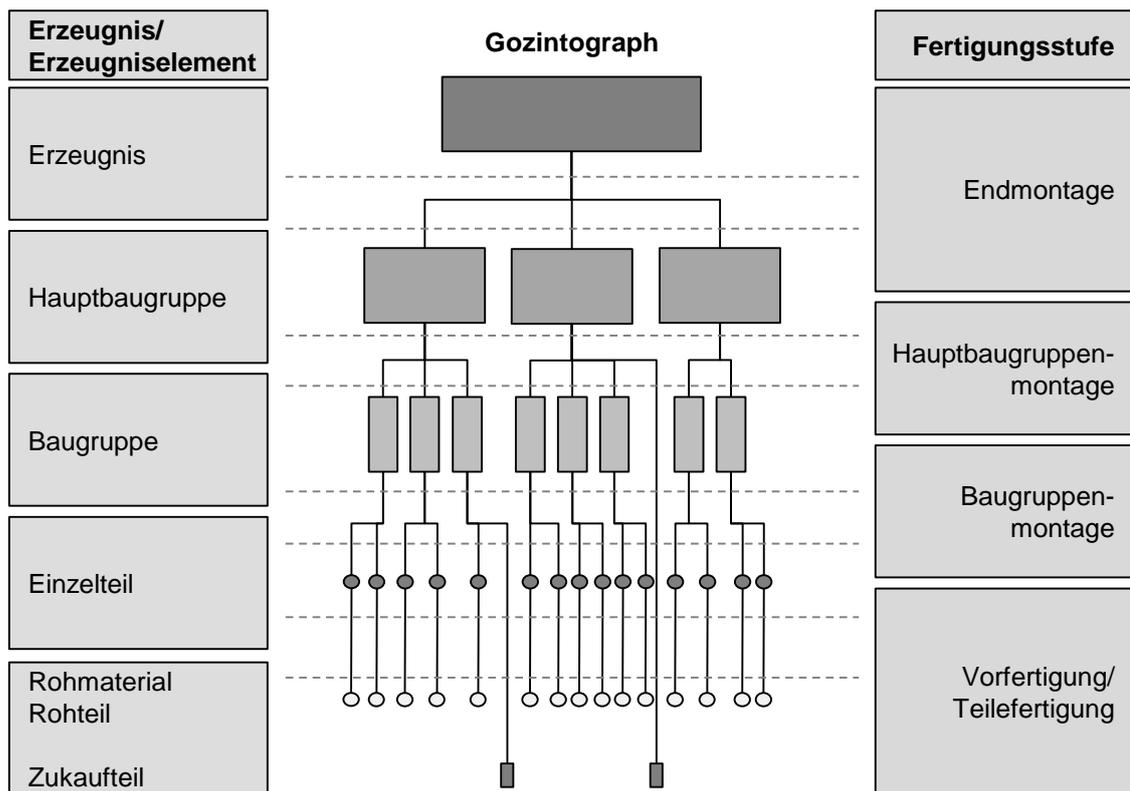


Abbildung 10-10: Beispielhafter Gozintograph

10.3.5.3 Ideallayout

Unter dem Begriff Ideallayout wird eine Anordnung der benötigten Betriebsmittel verstanden, welche keine räumlichen Begrenzungen durch das Gebäude berücksichtigt. Im Fokus steht die ideale Anordnung der Betriebsmittel (in der frühen Phase auch als Struktureinheiten bezeichnet) unter Berücksichtigung der Flächenbedarfe und der flusstechnischen Zusammenhänge.

Zur Erstellung eines Ideallayouts wird zunächst ein flächenmaßstäbliches Beziehungsschema erstellt. Die Darstellung des flusstechnischen Zusammenhangs der einzelnen Struktureinheiten wird folglich um deren Flächenbedarf erweitert. Im zweiten Schritt wird ein Blocklayout erstellt, in welchem die einzelnen Struktureinheiten in der idealen Reihenfolge nach dem künftigen Materialfluss angeordnet werden. In diesem Layout sind alle benötigten Struktureinheiten dargestellt und über den Materialfluss miteinander verknüpft, sodass serielle und parallele Anordnungen zur Berechnung der Gesamtzuverlässigkeit ersichtlich werden (VDI 5200).

10.3.6 Angewendete methodische Grundprinzipien und Vorgehensweisen

Grundprinzipien des Handelns (LINDEMANN 2009, S. 55)

Grundprinzip des Systemdenkens (DAENZER ET AL. 2002): Die Denkweise, welche es ermöglicht, ein System ganzheitlich verstehen und gestalten zu können, wird als Systemdenken bezeichnet. Das Systemdenken soll eine Modellvorstellung eines offenen Systems unterstützen, sodass die Systemgrenze, welche sich aus gegebenen Sachverhalten und Problemen ergibt, nicht als unveränderbar angesehen wird.

Grundprinzip der Problemzerlegung (DÖRNER 2003): Um komplexe Problemstellungen besser bearbeiten zu können, ist es hilfreich, diese in mehrere Teilprobleme zu zerlegen. Diese Teilprobleme sind besser überschaubar und können leichter bearbeitet werden. Durch Abstimmung der Lösungen der Teilprobleme wird die komplexe Problemstellung gelöst.

Grundprinzip „Vom Ganzen zum Detail“ (DAENZER ET AL. 2002): Dieses Grundprinzip basiert auf dem systemhierarchischen Denken, in welchem der Aufbau eines Systems oder einer Problemstellung abgebildet wird. Aus diesem Grund kann es eingesetzt werden, um Probleme oder Lösungen zu strukturieren, bspw. um eine komplexe Problemstellung in Teilprobleme zu zerlegen.

Grundprinzip „Vom Abstrakten zum Konkreten“ (PAHL ET AL. 2005): Um Probleme zu lösen, werden diese häufig abstrahiert, um eine größere Lösungsmenge zu generieren. Die abstrakte Formulierung eines Problems, welche nach mehreren Schritten zu einer konkreten Lösung führen soll, wird mit diesem Grundprinzip zum Ausdruck gebracht.

Grundprinzip des diskursiven Vorgehens (WULF 2002): Ein diskursives Vorgehen bedeutet, dass jede Handlung eine genaue Zielsetzung und eine Ergebnisprüfung beinhaltet. Nach jedem Schritt wird das Ziel mit dem Ergebnis verglichen und eine neue Zielsetzung erarbeitet.

Grundprinzip der wiederkehrenden Reflexion (BADKE-SCHAUB & FRANKENBERGER 2001): Das Grundprinzip der wiederkehrenden Reflexion ähnelt stark dem des diskursiven Vorgehens, da der Vergleich am Ende jeder Handlung durchaus auch als Reflexion bezeichnet werden kann. Der Unterschied besteht darin, dass dieses Grundprinzip die Reflexion bereits während der Handlung vorsieht und stark auf die Frage „Warum?“ abzielt.

Grundprinzip „Denken in Alternativen“ (DAENZER ET AL. 2002): Das Denken in Alternativen beschreibt die Erarbeitung mehrerer Lösungen für ein Problem. Selbst wenn die erste Lösungsidee vielversprechend erscheint, sollten weitere Alternativen generiert werden, da nicht mit Sicherheit die erste Lösung auch die beste ist. Des Weiteren stellt dieses Grundprinzip eine Absicherung im Falle sich ändernder externer Anforderungen dar.

Grundprinzip des Modalitätenwechsels (LINDEMANN 2009): Ein Modalitätenwechsel dient der Generierung einer alternativen Problemsicht, um durch eine entstandene Routine keine Alternativen zu vernachlässigen. Dieses Grundprinzip kann daher unterstützend bei der Anwendung des „Denken in Alternativen“ angewandt werden.

Grundsätze der Modellierung (BECKER ET AL. 2012):

Grundsatz der Klarheit: Erzielen der bestmöglichen Leserlichkeit, Verständlichkeit und Anschaulichkeit durch geringe Kompliziertheit des Modells

Grundsatz des systematischen Aufbaus: Gewährung einer sichtübergreifenden Konsistenz der Detailtiefe bei Modellen mit unterschiedlichen Sichten

Grundsatz der Richtigkeit: Repräsentation des Originals in einem Modell entspricht dem Original in wesentlichen Zügen

Grundsatz der Relevanz: Im Modell befinden sich nur für den Modellierungszweck relevante Aspekte.

Grundsatz der Wirtschaftlichkeit: Der Detaillierungsgrad des Modells muss so hoch wie nötig, aber so niedrig wie möglich sein.

Grundsatz der Vergleichbarkeit: Vergleichbarkeit von Modellen ermöglichen, die mit unterschiedlichen Modellierungsverfahren erstellt worden sind.

10.4 Weiterführende Informationen zum Anwendungsbeispiel RoboFill4.0

Tabelle 10-32: Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien zur Auswahl eines Materialflusskonzepts - RoboFill4.0

Kriterien Materialfluss	Kosten	Taktzeit	Flexibilität	Modularität	Skalierbarkeit	Komplexität	Zuverlässigkeit	Reinigbarkeit	Platzbedarf	Energieeffizienz	Rang	Gewichtung
Kosten	■	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	17%
Taktzeit	-1	■	1	1	1	0	0	0	1	1	2	14%
Flexibilität	-1	-1	■	0	0	-1	0	0	1	1	6	9%
Modularität	-1	-1	0	■	0	0	-1	0	1	1	6	9%
Skalierbarkeit	-1	-1	0	0	■	-1	-1	0	1	1	8	8%
Komplexität	0	0	1	0	1	■	0	0	1	1	2	14%
Zuverlässigkeit	-1	0	0	1	1	0	■	0	1	1	4	13%
Reinigbarkeit	0	0	0	0	0	0	0	■	1	0	5	11%
Platzbedarf	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	■	-1	10	1%
Energieeffizienz	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	■	9	4%

Tabelle 10-33: Bewertung der Materialflusskonzepte (MK) - RoboFill4.0

Kriterium	Prio	MK1	Erklärung MK1	MK2	Erklärung MK2
Kosten	17%	-	gilt nur im Projekt, da Finanzierung der Achsen unklar	+	gilt nur im Projekt, da Finanzierung der Roboter geklärt
Taktzeit	14%	+	ausreichend; könnte durch feste Aktorik deutlich verbessert werden	--	mit einem Roboter zu gering
Flexibilität	9%	0	wenig redundante Transportwege; komplette Bandbreite an Flaschen verarbeitbar	++	Roboter kann fast alle Zielpunkte anfahren
Modularität	9%	++	Neues Modul + Achse kann überall am Umlaufsystem angebracht werden	-	Prinzipiell gegeben; problematisch ist max. Anzahl unterschiedlicher Module, die mit einem Roboter bestückt werden sollen
Skalierbarkeit	8%	++	Sehr gut skalierbar	--	Kosten steigen sehr stark an
Aufwand bzw. Komplexität inkl. Ausgleich von Toleranzen	14%	--	Auswahl geeigneter Komponenten + Synchronisation der einzelnen Aktoren und Sensoren	+	Einstellung des Roboters aufgrund der Toleranzen der Flaschen nicht ideal; ansonsten fast Plug-and-Play
Zuverlässig & Verfügbarkeit	13%	0	Keine parallelen/ redundanten Transportmöglichkeiten	0	Keine parallelen/ redundanten Transportmöglichkeiten
Hygiene bzw. Reinigbarkeit	11%	-	Reinigbarkeit und Hygiene mit Einfluss auf Produktqualität; IP67 unklar für Linearantrieb, nur IP40 (Rückfrage durch Hr. Kiefer)	+	Reinigbarkeit und Hygiene mit Einfluss auf Produktqualität, höhere IP-Zertifizierung des Roboters
Platzbedarf	1%	0	Platzbedarf im Hinblick auf Scale up	--	Platzbedarf im Scale Up; Berechnung Fraunhofer 200 Roboter für 25000-Flaschenanlage
Energieeffizienz	4%	0	Keine Referenzwerte, da Aktorik fehlt	-	Keine Referenz, da Robotertyp nicht final ausgewählt
Gesamtbewertung		2,92		3,01	
Ranking		2		1	

10 Anhang

Tabelle 10-34: Checkliste zur Eignungsprüfung - RoboFill4.0

Kriterium	Frage(n)	Wert
Nachweis	Gibt es Produkte/Objekte mit einer Nachweispflicht, die eindeutig gekennzeichnet sein müssen?	N
	Können diese Objekte einem bestimmten Fabrikbereich zugeordnet werden?	-
Absatz	Wie groß sind die Absatzzahlen in Relation zur Menge der Betriebsmittel?	5
Varianten	Wie groß ist die Anzahl der Varianten in Relation zu den Absatzzahlen?	10
Haltbarkeit	Wie groß ist der Anteil an Objekten mit begrenzter Haltbarkeit?	10
Zukaufteile	Wie groß ist der Anteil an Zukaufteilen?	3
Fertigungstiefe	Wie groß ist die mittlere Fertigungstiefe?	8
	<i>Wie viele Prozessschritte werden im Mittel mit dem Objekt durchgeführt?</i>	
Flexibilität	Wie groß ist die mittlere Formatflexibilität der Betriebsmittel?	10
	<i>Gegenüberstellung Objekte-Betriebsmittel nutzen</i>	
Minimale Losgröße	Wie groß ist der Anteil an Betriebsmitteln, welche eine minimale Losgröße besitzen?	1
	Wie groß ist der Anteil vorgegebener minimaler Losgrößen durch die Produktionsstrategie?	1
	Wie groß ist die mittlere minimale Losgröße in Relation zu den Absatzzahlen?	1
Redundanz	Wie groß ist der Anteil redundanter Betriebsmittel, welche die gleichen Fähigkeiten besitzen?	4
Parallelität	Wie groß ist der Anteil paralleler Produktionsstationen mit den gleichen Betriebsmitteln und Fähigkeiten?	4
Nacharbeit	Wie groß ist der Anteil an Nacharbeit?	1
Bestellungen	Wie groß sind die vorliegenden Bestellschwankungen?	10
	Wie groß ist der Anteil an Eilaufträgen?	10
Lieferzeit	Wie lang ist die Lieferzeit in Relation zur Durchlaufzeit?	8
Fertigungsprinzip	Wie eng ist der Kundenentkopplungspunkt mit der Produktionsplanung verknüpft?	10
	<i>Make to Stock, Make to assemble, etc.</i>	

Tabelle 10-35: Evaluation von Frameworks im Rahmen von RoboFill4.0
in Anlehnung an KRAVARI & BASSILIADES (2015)

Framework	Neustes Release	Programmiersprache	Einfachheit	Lernfähigkeit	Standardkompatibilität	Kommunikation	Performance	Popularität	SUMME
Agent Factory	1	2	1	1	2	1	1	-1	8
AgentScape	1	2	1	1	0	1	1	-1	6
AGLOBE	-1	2	1	2	2	2	2	1	11
Cormas	1	-1	2	2	0	1	2	1	8
Cougaar	1	2	2	1	0	1	2	-1	8
EMERALD	1	2	2	2	2	2	2	-1	12
GAMA	1	-1	2	2	2	2	1	-1	8
INGENIAS	1	2	2	2	1	1	1	1	11
JACK	1	2	1	2	2	1	2	2	13
JADE	1	2	2	2	2	2	2	2	15
Jadex	1	2	2	1	2	1	2	2	13
JAMES II	1	2	2	2	0	1	2	1	11
JAS	-1	2	1	2	1	1	1	1	8
Jason	1	2	1	2	1	1	1	2	11
JIAC	1	2	1	1	0	1	2	-1	7
MaDKit	1	2	-1	1	1	1	1	1	7
MASON	1	2	-1	1	0	1	1	1	6
NetLogo	1	-1	1	2	0	1	1	2	7
Repast	1	2	1	2	0	1	2	1	10
SeSAm	1	2	1	2	0	1	1	1	9
Swarm	-1	2	1	1	0	1	2	1	7

Tabelle 10-36: Zuordnung von Zuständen zu Rollen - RoboFill4.0

Zustand/Rolle	Flaschenagent	Transportagent	Fertigungsagent	Lageragent	Verwaltungsagent	HMI-Agent
initialisiert	X	X	X	X	X	X
aktiv	X	X	X	X	X	X
wartend	X	X	X	X	X	X
Fehler	X	X	X	X	X	X
Wartung		X	X	X		
rüsten		X	X	X		
verloren	X	X				
inaktiv	X	X	X	X		
abgemeldet	X	X	X	X	X	X

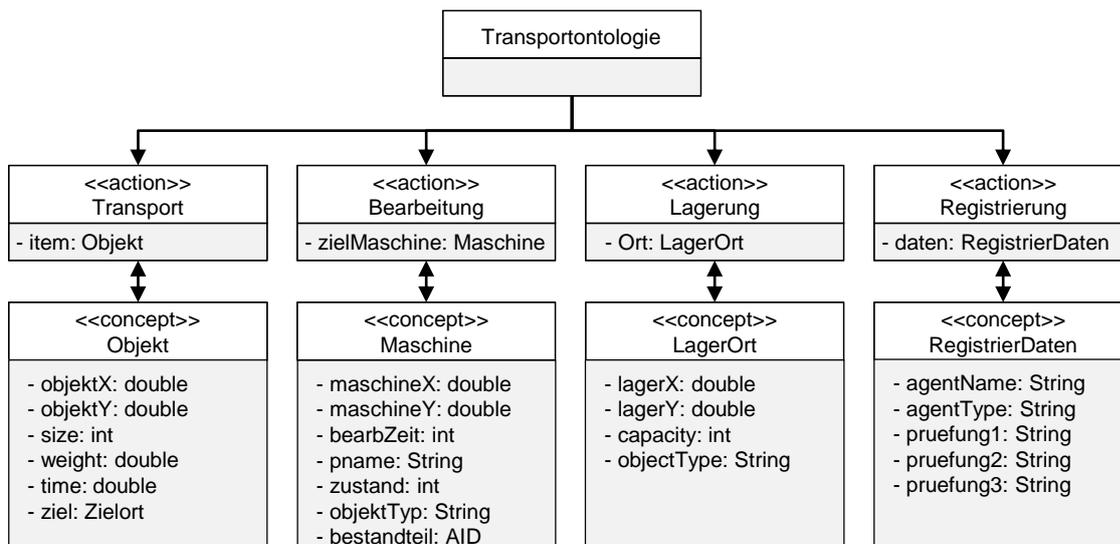


Abbildung 10-11: Transportontologie verwendet für ein Testsystem - RoboFill4.0

Tabelle 10-37: Übersicht der erstellten Agentenklassen - RoboFill4.0

Paket	Klasse	Beschreibung
agentenGrafik	FertigungsagentGui	öffnet eine Eingabemaske, mit der ein Fertigungsagent, unter Eingabe seiner Parameter, manuell gestartet wird
	Kreis	Die Klasse Kreis wird verwendet, um im Grafikfenster Kreise (Objektagenten und Lageragenten) zu zeichnen.
	LageragentGui	öffnet eine Eingabemaske, mit der ein Lageragent, unter Eingabe seiner Parameter, manuell gestartet wird
	Linie	wird verwendet, um im Grafikfenster Linien (zw. Start- und Zielpunkt der Agenten) darzustellen
	Main	startet das Hauptprogramm
	MyFrame	erstellt ein Benutzerfenster, in dem sich das Grafikfenster und verschiedene Buttons befinden
	MyPanel	erstellt ein Grafikfenster, in dem das Agentensystem visualisiert wird.
	ObjektagentGui	öffnet eine Eingabemaske, mit der ein Objektagent, unter Eingabe seiner Parameter, manuell gestartet wird
	PaintAgents	wird verwendet, um die verschiedenen Agenten im Grafikfenster zu visualisieren
	Rechteck	wird verwendet, um im Grafikfenster Rechtecke (Transportagenten und Fertigungsagenten) zu zeichnen
	Target	wird verwendet, um im Grafikfenster Zielpunkte der Agenten zu zeichnen
	Transportagent Gui	öffnet eine Eingabemaske, mit der ein Transportagent, unter Eingabe seiner Parameter, manuell gestartet werden kann
	WindowHandler	startet das Benutzerfenster und reagiert auf Benutzereingaben (z.B. Klick auf eine Button)
AgentenRollen	Fertigungsagent	beinhaltet die Behaviours und Methoden der Fertigungsagenten
	HMI-Agent	beinhaltet die Behaviours und Methoden des HMI-Agenten
	Lageragent	beinhaltet die Behaviours und Methoden der Lageragenten
	Lokalisierungsagent	beinhaltet die Behaviours und Methoden des Lokalisierungsagenten
	MainContainer	stellt die Umgebung der Agenten des Agentensystems bereit
	Objektagent	beinhaltet die Behaviours und Methoden der Objektagenten
	Transportagent	beinhaltet Behaviours und Methoden der Transportagenten
	Verwaltungsagent	beinhaltet Behaviours und Methoden des Verwaltungsagenten

agentenRollen.ontology	Agentdaten	stellt die get()- und set()-Methoden für die Agentendaten bei einer Lokalisierung bereit
	Anzeigedaten	stellt die get()- und set()-Methoden für die Anzeigedaten im Benutzerfenster durch den HMI-Agent bereit
	Bearbeitung	stellt die get()- und set()-Methoden für ein Objekt, das bearbeitet wird, bereit
	Fehler	stellt die get()- und set()-Methoden für die Informationen eines Fehlers bereit
	Fehlerdaten	stellt die get()- und set()-Methoden für die Fehlerdaten bereit
	Lagerort	stellt die get()- und set()-Methoden für einen Lagerort bereit
	Lagerung	stellt die get()- und set()-Methoden für ein Objekt, das gelagert wird, bereit
	Lokalisierung	stellt die get()- und set()-Methoden für die Informationen einer Lokalisierung bereit
	Maschine	stellt die get()- und set()-Methoden für eine Bearbeitungsmaschine bereit
	Objekt	stellt die get()- und set()-Methoden für ein Objekt bereit
	Registrierdaten	stellt die get()- und set()-Methoden für die Registrierdaten bei einer Registrierung bereit
	Registrierung	stellt die get()- und set()-Methoden für ein Objekt, das registriert wird, bereit
	Transport	stellt die get()- und set()-Methoden für ein Objekt, das transportiert wird, bereit
	TransportOntology	enthält die gemeinsame Sprache, welche die Agenten zur Kommunikation verwenden
	TransportVocabulary	definiert das Vokabular, das die Agenten zur Kommunikation verwenden
	Visualisierung	stellt die get()- und set()-Methoden für die Informationen einer Visualisierung bereit
Zielort	stellt die get()- und set()-Methoden für einen Zielort bereit. Diese Klasse wird zur Agentenkommunikation benötigt.	
agenten-Setup	ReadExcel	wird verwendet, um Daten aus einer Excel-Datei zu lesen, die verschiedene Zustandslisten für Objektagenten enthält
logging	LogWindow	erstellt das Loggingfenster des HMI-Agenten, in dem Nachrichten für den Benutzer geschrieben werden
	WriteFile	wird verwendet, um Daten in eine Textdatei zu schreiben.
testAgents	Lager	wird verwendet, um eine unbestimmte Anzahl von Lageragenten automatisch zu starten
	Maschinen	wird verwendet, um eine unbestimmte Anzahl von Fertigungsagenten automatisch zu starten
	Produkte	wird verwendet, um eine unbestimmte Anzahl von Objektagenten automatisch zu starten

Transporter wird verwendet, um eine unbestimmte Anzahl von Transportagenten automatisch zu starten

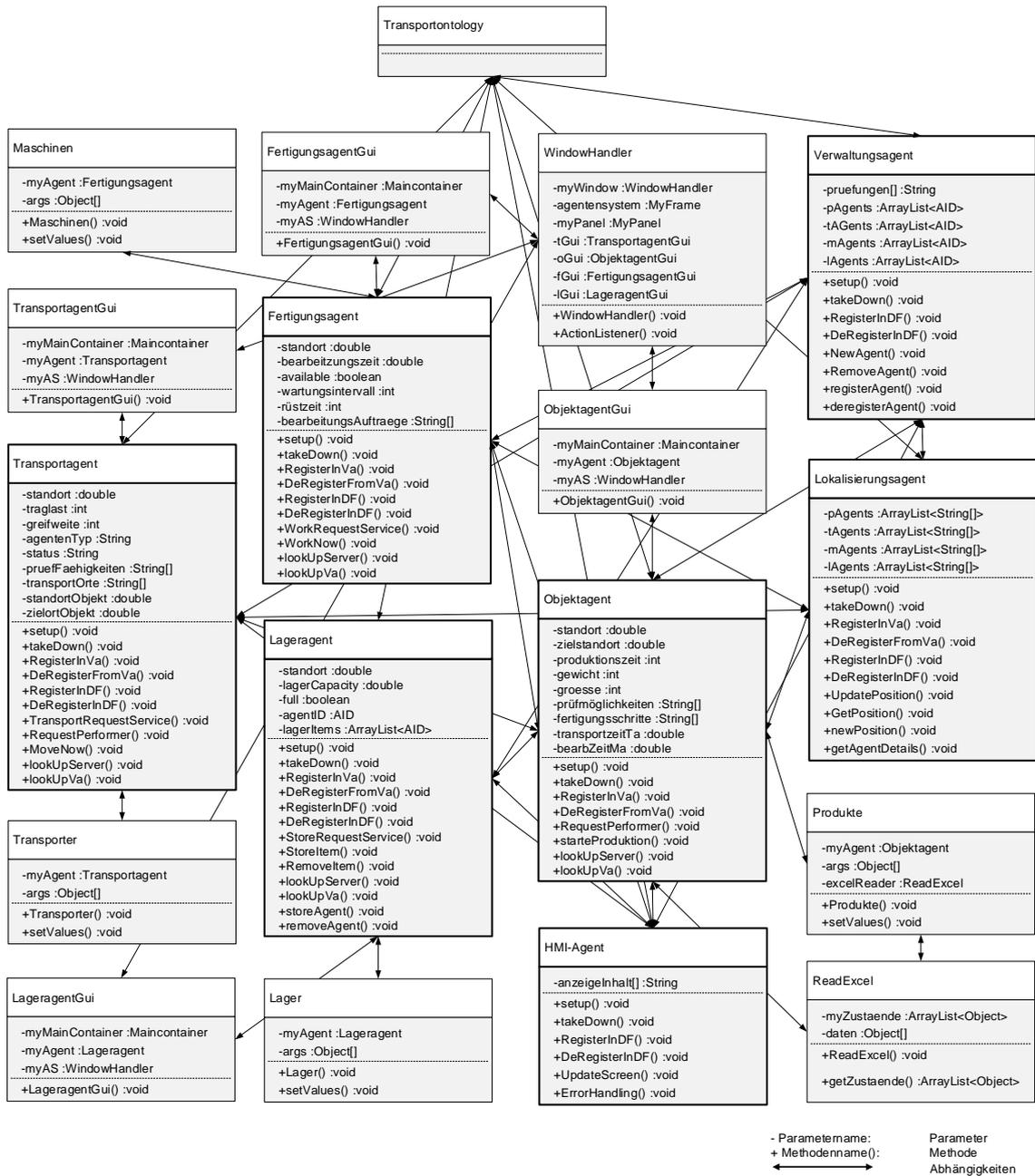


Abbildung 10-12: Auszug des Strukturdiagramms - RoboFill4.0