

Wissensmanagementsystem zur Parametrisierung ereignisdiskreter
Simulationsmodelle
im betriebsbegleitenden Einsatz

Kilian Michael Scholze, geb. Vernickel

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen
Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Die Dissertation wurde am 04.03.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 19.06.2024 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, für die wohlwollende Betreuung dieser Arbeit sowie die Förderung meiner Tätigkeiten am Institut und darüber hinaus. Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp danke ich für die Übernahme der Rolle des Mentors und die damit verbundenen Diskussionen und Weiterentwicklung der Arbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen sowie den Studierenden, die zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben. Explizit erwähnen möchte ich auch die Mitarbeitenden der im Forschungsprojekt DAMOKLEZ beteiligten Firmen, die mit ihrer Motivation und Freude an der gemeinsamen Arbeit zu einer gelungenen Umsetzung der Ideen beigetragen haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei Dr.-Ing. Martin Schreiber für seine durchgehende Unterstützung während unserer gemeinsamen Zeit am Institut sowie die detaillierte Durchsicht dieser Arbeit. Herzlichen Dank auch an Judith Weber für die kritischen Anmerkungen und die Zeit als Zimmerkollegin.

Mein größter Dank gilt meiner Familie: Meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht und mich in allen Lebenslagen unterstützt sowie an mich geglaubt haben. Meinen Schwestern danke ich für ihre aufmunternden Worte, vor allem in der Endphase. Zu guter Letzt danke ich meiner Frau Veronika, die mich in schwierigen Zeiten motiviert, mich bestärkt und mir in den entscheidenden Phasen den Rücken frei gehalten hat.

Gleichstellung der Geschlechter

In dieser Arbeit wird, soweit es die Lesbarkeit ermöglicht, auf eine geschlechtergerechte Sprache geachtet. Die männliche Sprachform wird nur verwendet, wenn dies der Beibehaltung eines hohen Maßes an Lesbarkeit dient. Sämtliche Bezeichnungen gelten jedoch ausdrücklich gleichermaßen für alle Geschlechter.

*So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig,
man muss sie für fertig erklären,
wenn man nach Zeit und Umständen
das Mögliche getan hat.*

Johann Wolfgang von Goethe

Inhalt

Abstract	V
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Spezifizierung des Betrachtungsbereiches	4
1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Methodik	5
1.6 Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen und Begriffsklärung	9
2.1 Produktionstechnische Grundlagen	9
2.1.1 Zielsystem der Produktion	9
2.1.2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung	10
2.1.3 Produktlebenszyklus	11
2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld	12
2.2.1 Begriffsklärung und Definition	12
2.2.2 Wissensformen und -arten	13
2.2.3 Wissenstransformation	14
2.2.4 Wissensträger	15
2.2.5 Wissensbasis	16
2.2.6 Wissensrepräsentation	17
2.2.7 Wissensmanagement im Unternehmen	22
2.2.8 Wissensmanagementsysteme	24
2.3 Simulation im produktionstechnischen Umfeld	25
2.3.1 Klassifikation von Simulationsmethoden	27
2.3.2 Grundlagen der ereignisdiskreten Simulation	27
2.3.3 Vorgehen bei Simulationsprojekten	28
2.3.4 Datenquellen für ereignisdiskrete Simulationsmodelle	32

2.3.5	Parametrisierung von Simulationsmodellen	34
2.3.6	Betriebsbegleitende Simulation	35
2.3.7	Güte von Simulationsmodellen	37
3	Stand der Wissenschaft und Technik	39
3.1	Automatisierte Generierung und Synchronisierung von EDS	39
3.1.1	Automatisierte Simulationsmodellgenerierung	39
3.1.2	Synchronisierung von Simulationsmodellen	42
3.2	Vorgehen zur Optimierung der Datenerhebung und -verarbeitung	46
3.3	Einsatz von Wissen in der Produktion und Simulation	47
3.3.1	Relevante Ansätze des Wissensmanagements	48
3.3.2	Einsatz von Ontologien in der Produktionstechnik	50
3.4	Handlungsbedarf und wissenschaftliche Fragestellung	53
3.4.1	Bewertung des Standes der Wissenschaft und Technik	54
3.4.2	Ableitung der spezifischen Fragestellung	56
4	Wissensmanagementsystem zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz	59
4.1	Anforderungen an das System <i>WMS4SimPar</i>	60
4.1.1	Anforderungen aus der anwendungsorientierten Wissenschaft	60
4.1.2	Spezifische Anforderungen	61
4.2	Systemübersicht	64
4.3	Systemarchitektur von <i>WMS4SimPar</i>	65
4.4	Anwendungsfallbeschreibung	68
5	Abweichungsidentifikation	71
5.1	Voraussetzungen für die Abweichungsidentifikation	71
5.1.1	Voraussetzungen des Produktionssystems	71
5.1.2	Voraussetzungen der Simulation	73
5.2	Identifikation und Eingrenzung der relevanten Kennzahlen	74
5.3	Verknüpfung der Datenpunkte anhand eines Datenmodells	76
5.4	Festlegung der Abweichungsgrenzwerte	78
5.5	Bestimmung der Abstrakte und des Beobachtungszeitraums	80
6	Wissensgenerierung und -verarbeitung	83
6.1	Auswahl einer geeigneten Wissensrepräsentation	83
6.2	Aufbau einer Wissensdatenbank	84

6.3	Integration eines Personalisierungsdienstes	92
6.4	Ablauf der Wissensgenerierung	94
6.5	Speicherung des Wissens in der Datenbank	96
6.6	Entwicklung eines User Interfaces	97
7	Simulationsmodellparametrisierung	101
7.1	Ermittlung der Simulationsparameter	102
7.2	Erweiterung der Ontologie zur Parametrisierung	104
7.3	User Interface für die Simulationsexperten	105
7.4	Abfrage aktueller Abweichungen	106
7.5	Erwerb von Wissen zur aktuellen Abweichung	106
7.6	Parametrisierung des Simulationsmodells	106
7.7	Initialisierung des Simulationsmodells	107
8	Anwendung und Bewertung des Systems	109
8.1	Evaluierung mittels eines Demonstrators	109
8.1.1	Aufbau des Demonstrators	109
8.1.2	Anwendungsfallbeschreibung	111
8.1.3	Abweichungsidentifikation	112
8.1.4	Wissensgenerierung und -verarbeitung	115
8.1.5	Wissenstransformation und Parametrisierung des Modells	119
8.1.6	Evaluierung im Rahmen eines Forschungsprojekts	122
8.2	Partielle Umsetzung an einem industriellen Produktionssystem	123
8.3	Bewertung der Anforderungserfüllung	126
8.3.1	Anforderungserfüllung der betriebsbegleitenden Simulation	126
8.3.2	Anforderungserfüllung des Wissensmanagementsystems	127
8.3.3	Anforderungserfüllung des Gesamtsystems	128
8.3.4	Anforderungserfüllung aus Sicht der anwendungsorientierten Wissenschaft	129
8.4	Bewertung der Wirtschaftlichkeit	130
8.4.1	Aufwand	131
8.4.2	Nutzen	132
8.4.3	Verallgemeinerung der Wirtschaftlichkeit	133
8.4.4	Qualitative Kriterien der Wirtschaftlichkeit	134

9 Zusammenfassung und Ausblick	137
9.1 Zusammenfassung	137
9.2 Ausblick	139
Literaturverzeichnis	141
Abkürzungsverzeichnis	173
Verzeichnis der Formelzeichen	176
Abbildungsverzeichnis	177
Tabellenverzeichnis	181
A Ontologie in WMS4SimPar	183
A.1 Auszug aus der grafischen Aufbereitung	183
A.2 User Interface der Umsetzung von WMS4SimPar	184
A.3 Fragebogen für die Evaluation	186
A.4 Zusammenfassung der Antworten aus der Befragung	195
Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	198
Publikationsliste	200

Abstract

The increasing linkage and digitalization of production systems are leading to growing complexity. This makes it more difficult for people to carry out planning and optimization processes. For this reason, companies are increasingly relying on digital methods, such as discrete-event simulation (DES), for mapping the material flow within a production system. The use of a DES in the operational phase of a production system results in particular requirements for the timeliness and accuracy of the simulation model. Current approaches for the automated generation or synchronization of simulation models need a lot of data, which leads to high effort for data acquisition and processing. Meanwhile, employees' existing knowledge remains completely unused in the previous approaches. However, there is much potential in the existing expert knowledge of the employees; thus, a small data basis can be expanded in a target-oriented way. Targeted use of data and existing knowledge is a key aspect of this work.

This research presents a *knowledge management system* (KMS) for the parametrization of DES models in the operational phase of a production system. The system is called WMS4SimPar and consists of four components. The first component aims to limit and sharpen the scope of consideration. With question techniques, it is possible to check whether using WMS4SimPar is target-oriented in the use case. The second component handles the data-based deviation identification. The component maps simulation processes to the real production system to identify corresponding deviations. Subsequently, deviations that exceed limit values start a knowledge-generation process. The third component presents the KMS with its ontology for storing knowledge. Personalization services are used to identify relevant knowledge carriers. A knowledge generation process supports the extraction of relevant knowledge. The actual adaptation of the simulation parameters takes place in the fourth component. Based on identified correlations between measurement parameters and adjustable simulation parameters, the system supports the simulation experts in the parametrization.

A pilot application on a demonstrator and a partial implementation on an industrial use case shows the use and added value of the system. In summary, WMS4SimPar leads to a more accurate simulation model and, therefore, more precise simulation results.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Produktionssysteme werden aufgrund der zunehmenden digitalen Vernetzung und Automatisierung immer komplexer (DITTLER et al. 2022, S. 1; REINHART 2017, S. 20; KRÖNING 2014, S. 1). Dies hat zur Folge, dass Aufgaben, wie bspw. die Entwicklung oder Optimierung von Produktionssystemen sowie die Durchführung von Planungen, für beteiligte Personen im produktionstechnischen Umfeld schwer durchzuführen sind.

Ein Hilfsmittel, um der Komplexität entgegenzutreten, ist die Simulation. Gemäß der Definition der Digitalen Fabrik (vgl. VDI 4499-1) stellt sie eine geeignete Methode zur Planung und Verbesserung aller Strukturen, Prozesse sowie Ressourcen dar. Vor allem bei der Planung von komplexen Produktions- und Logistiksystemen eignet sich Simulation als Methode zur Absicherung und besseren Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Planungsphasen (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 1).

Die für die Planung von Produktions- und Logistiksystemen am besten geeignete Simulationsmethode ist die ereignisdiskrete Simulation, bei der Zustandswechsel im System nur zu bestimmten Zeitpunkten auftreten (GREASLEY & EDWARDS 2021, S. 1; GLATT et al. 2018; VDI 3633-1; BERGMANN 2014, S. 11). Zur Durchführung von Simulationsexperimenten ist ein Simulationsmodell erforderlich, welches die dynamischen Zusammenhänge des betrachteten Systems über den simulierten Zeithorizont abbildet (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 51). Das Modell muss vorab anhand von vielen wissensintensiven Phasen erstellt werden (WENZEL & PETER 2017). Charakteristisch für wissensintensive Phasen ist, dass Expertenwissen für die Ausführung erforderlich ist. Entscheidend für die Aussagekraft eines Simulationsexperiments ist die Qualität des verwendeten Modells (VDI 3633-1, S. 6). Da es sich bei Modellen stets um eine für einen bestimmten Zweck hinreichend genaue Abbildung eines realen Systems oder Prozesses handelt, ist die Qualität des Modells vom Erfahrungswissen der Modellersteller (i. d. R. Simulationsexperten) und deren Wissen über die Abläufe und Zusammenhänge des abzubildenden Systems abhängig (ROSEN et al. 2020, S. 1). Die Abstraktion bei der

1 Einleitung

Modellierung führt zu einer sogenannten *Reality-Gap* (DITTLER et al. 2022; MEIER et al. 2021).

Durch Veränderungen am realen Produktionssystem, bspw. hervorgerufen durch mechanischen Verschleiß oder unberücksichtigten Umbau während der Produktion, vergrößert sich die *Reality-Gap* (siehe Abbildung 1.1). Dadurch kommt es zu größeren Abweichungen zwischen dem Verhalten des realen Systems und des Simulationsmodells (DITTLER et al. 2022, S. 1; HÄRLE et al. 2021). Dies hat zur Folge, dass Erkenntnisse aus Simulationsstudien zu Fehlentscheidungen in der Planung führen. Im Produktionsbetrieb können die simulierten Planungsgrößen nicht eingehalten werden, wodurch kurzfristige Änderungen im Produktionsablauf notwendig werden (WENZEL et al. 2008; RABE et al. 2008). In der Produktion und Logistik können diese Fehlentscheidungen zu Kosten führen, die deutlich größer sind als die monetären Aufwände für die Simulation selbst (RABE et al. 2008, S. 1).

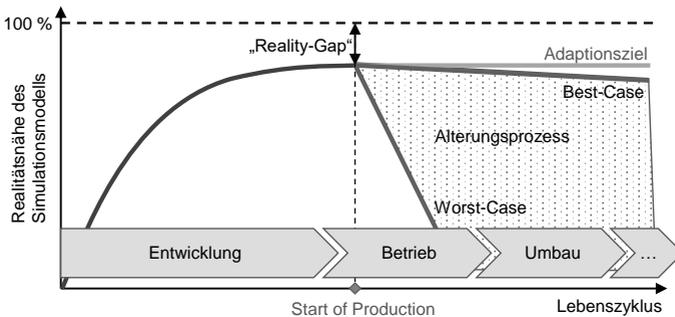


Abbildung 1.1: Realitätsnähe des Simulationsmodells im Lebenszyklus in Anlehnung an DITTLER et al. (2022, S. 2)

Eine automatische Simulationsmodellsynchronisierung versucht, Abweichungen zwischen Simulationsmodell und realem System während des Betriebs zu vermeiden. Hierbei wird das reale System mittels Sensorik datentechnisch erfasst und im Nachgang ein Abgleich des Simulationsmodells mit dem realen System durchgeführt (ASHTARI TALKHESTANI et al. 2018b). Nachteile der automatisierten Synchronisierung sind zum einen der hohe zeitliche und finanzielle Aufwand, um solch ein System zu realisieren und zu pflegen. Zum anderen ist die Berücksichtigung von zukünftigen Veränderungen nicht möglich, da nur der aktuelle Ist-Zustand des Systems erfasst werden kann (ASHTARI TALKHESTANI 2020).

1.2 Problemstellung

Rein datentechnische Vorgehen zur Simulationsmodellensynchronisierung haben die Nachteile, dass sie das vorhandene Wissen bzw. die Kompetenz von Personen aus dem direkten Produktionsumfeld nicht berücksichtigen. Diese Personen können i. d. R. anhand ihrer langjährigen Erfahrung sehr gute Aussagen über den Ist-Zustand und das zukünftige Verhalten der Produktionsanlage treffen. Jedoch existieren aktuell keine geeigneten Systeme und Methoden, um das vorhandene Wissen in der Praxis zielgerichtet bei der Anpassung von Simulationsmodellen anzuwenden.

Die Generierung von Wissen, vor allem in der betriebsbegleitenden Durchführung von Simulationsstudien für die Planung und Optimierung des Produktionssystems, stellt eine große Herausforderung dar. Wissen über den aktuellen Zustand und mögliche Änderungen des Zustandes in der Zukunft eines Produktionssystems ist oftmals nur in Form von personengebundenem, sog. implizitem Wissen vorhanden und wird mangelhaft weitergegeben (WESTKÄMPER et al. 2013; PRINZ 2018, S. 71). Wie in Abbildung 1.2 dargestellt, existieren im produktionstechnischen Umfeld Hemmnisse bei der Wissensweitergabe. Dies hat zur Folge, dass entweder große Aufwände bei der Identifikation von relevantem Wissen für die Parametrisierung von Simulationsmodellen notwendig sind oder die Aufwände dadurch vermieden werden, dass mit abweichenden Simulationsmodellen oder ggf. ohne simulative Unterstützung gearbeitet wird.

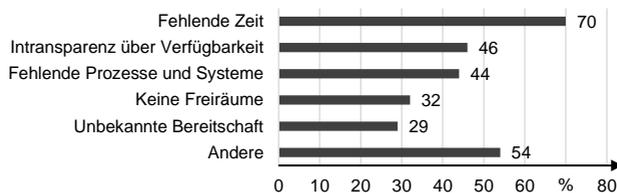


Abbildung 1.2: Hemmnisse bei der Weitergabe von Wissen nach TANDEMPLOY (2019)

In Wissenschaft und Technik fehlt aktuell ein System, das eine kontinuierliche Simulationsmodellensynchronisierung mittels eines daten- und wissensbasierten Ansatzes unterstützt. In der Praxis werden vorhandene Simulationsmodelle nach der Entwicklungsphase des Systems nicht mehr verwendet, obwohl im Produktionsbetrieb eine simulative Absicherung oder Optimierung hilfreich wäre. Unternehmen können das vorhandene Potenzial deshalb nicht ausnutzen oder gelangen nur über zeitliche und monetäre Mehraufwände zum selben Ergebnis.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Wissensmanagementsystems (WMS) zur Bestimmung und Überwachung von Simulationsparametern mit dem Ziel, Abweichungen zwischen dem realen Produktionssystem und dessen Simulationsmodell möglichst gering zu halten. Ziel der fortlaufenden Parametrisierung des Modells ist die Bereitstellung eines ausreichend genauen Simulationsmodells bezüglich eines definierten Anwendungsfalls, um während des Betriebs Planungs- und Steuerungs- sowie Optimierungsprozesse anhand von Simulationsstudien durchführen zu können.

Das System soll Abweichungen datenbasiert erkennen. Hierzu werden die vorhandenen Ansätze aus der automatischen Simulationsmodellensynchronisierung analysiert und aufgegriffen. Das System soll jedoch auch mit einer im Vergleich zur herkömmlichen automatischen Simulationsmodellensynchronisierung geringeren Datenmenge nutzbar sein, um die Aufwände bei der Implementierung des Systems zu reduzieren. Zudem soll das System sicherstellen, dass die für die Synchronisierung relevanten Daten zur Parametrisierung verwendet werden.

Darüber hinaus verfolgt die Arbeit das Ziel, ein Wissensmanagementsystem sinnvoll im Kontext der Parametrisierung von Simulationsmodellen einzusetzen. Zur Analyse und Interpretation der Abweichungen soll ein zielgerichtetes WMS entwickelt werden, welches das personengebundene Erfahrungs-/ Expertenwissen externalisiert und speichert. Zudem soll der Prozess durch den Einsatz digitaler Werkzeuge unterstützt werden.

Abschließend soll das System die Simulationsexperten bei der Parametrisierung unterstützen und das generierte Wissen konsolidiert zur Verfügung stellen. Dadurch sollen der Prozess beschleunigt und die Qualität des Simulationsmodells gesteigert werden.

Der Einsatz des Systems soll Unternehmen befähigen, Simulationsmodelle betriebsbegleitend einsetzen zu können. Für die notwendige Parametrisierung des Modells soll das System sowohl auf vorhandene Daten als auch auf das vorhandene Wissen aus der Produktion zurückgreifen, um das bisher ungenutzte Potenzial auszuschöpfen.

1.4 Spezifizierung des Betrachtungsbereiches

Diese Arbeit betrachtet den Einsatz ereignisdiskreter Simulationsmodelle, da diese i. d. R. zur Simulation von Produktionsprozessen bei Stückgutprozessen zur Anwen-

1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Methodik

zung kommen. Eine Anwendung in anderen Fachgebieten, bspw. bei kontinuierlichen Prozessen in der Verfahrenstechnik, ist grundsätzlich möglich, wird aber im Rahmen der Arbeit nicht detailliert betrachtet, weshalb keine fundierte Aussage zur Anwendbarkeit getroffen wird.

Im Fokus stehen Produktionssysteme, bei denen qualifizierte Mitarbeitende im Produktionsumfeld tätig sind, die über Fachwissen bezüglich der Produktionssysteme und der dort ablaufenden Prozesse verfügen. Während des Betriebs müssen zyklisch Planungstätigkeiten ausgeführt werden, in denen ereignisdiskrete Simulations-(EDS)-Modelle verwendet werden. Für diese Tätigkeiten muss das Modell an die aktuellen und zukünftigen Veränderungen in der Produktion angepasst werden. Sofern keine strukturellen Anpassungen am Produktionssystem durchgeführt werden, handelt es sich bei den notwendigen Anpassungen um die Parametrisierung des Modells. Diese Arbeit fokussiert daher die Parametrisierung von Simulationsmodellen im betriebsbegleitenden Einsatz mit Hilfe eines Wissensmanagementsystems.

Der Fokus liegt auf der technischen Umsetzung eines WMS. Neben der technischen Realisierung ist auch die Motivation der beteiligten Mitarbeitenden eine wesentliche Voraussetzung für ein erfolgreiches Wissensmanagement (WM) (VDI 5610-1, S. 18). Dieser soziale Aspekt der Mitarbeitermotivation zur Verwendung eines WMS stellt in Umfang und Komplexität ein eigenes Forschungsgebiet dar und überschreitet den Rahmen dieser Arbeit. An dieser Stelle sei auf die weiterführende Literatur verwiesen, bspw. von SOCHOR et al. (2021a), die sich im Detail mit der Mitarbeitermotivation im produktionstechnischen Umfeld beschäftigen.

1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Methodik

Die wissenschaftstheoretische Einordnung der vorliegenden Arbeit erfolgt nach P. ULRICH & HILL (1976, S. 305). Grundlegend wird zwischen den *Formalwissenschaften* und den *Realwissenschaften* unterschieden. Die Realwissenschaften unterteilen sich in Abhängigkeit von ihrem Ziel in die *Grundlagenwissenschaften* und die *anwendungsorientierten Wissenschaften*¹.

¹Im weiteren Verlauf wird der Begriff *anwendungsorientierte Wissenschaften* stellvertretend für die Begriffe *angewandte Wissenschaften*, bzw. *anwendungsnahe Wissenschaften* verwendet.

1 Einleitung

Die vorliegende Problemstellung zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz mittels eines Wissensmanagementsystems hat ihren Ursprung in der industriellen Praxis. Die Entwicklung des Gesamtsystems ist den anwendungsorientierten Wissenschaften zuzuordnen. Darüber hinaus kommen Modelle und Methoden aus der Mathematik und somit aus den Formalwissenschaften zur Anwendung, um die Parametrisierung der Simulationsmodelle durchzuführen. Diese Arbeit hat folglich übergeordnet einen interdisziplinären Charakter.

Für die Erarbeitung der wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Arbeit liefert die Forschungsmethodik *Design Research Methodology* (DRM) nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) ein geeignetes Rahmenwerk, weil sie ein wissenschaftliches Vorgehen zur Erstellung neuer Entwürfe bietet. Mit dem Ziel dieser Arbeit, ein neuartiges System zu entwerfen, bietet die DRM geeignete Prozesse und Werkzeuge für ein strukturiertes und wissenschaftlich belegtes Vorgehen (vgl. Abbildung 1.3).

Die Methodik besteht aus den Phasen *Research Clarification* (RC), *Descriptive Study I* (DS-I), *Prescriptive Study* (PS) und *Descriptive Study II* (DS-II). In der RC-Phase erfolgt die Formulierung eines klaren, anspruchsvollen, aber realistischen Gesamtforschungsplans. Ergebnisse dieser Phase sind bspw. ein initiales Referenzmodell, vorläufige Bewertungskriterien, Forschungsschwerpunkt und -ziele, Forschungsfragen sowie die zu erwartenden Ergebnisse.

In der DS-I-Phase wird das Verständnis anhand von Literaturanalysen, empirischer Forschung und durch eigene Überlegungen weiter vertieft. Ergebnisse sind das vollständige Referenzmodell sowie die festgelegten Erfolgskriterien und Kennzahlen, die die aktuelle Situation beschreiben und das Defizit herausstellen. Daraus leitet sich die Relevanz des Forschungsthemas ab und die wichtigsten Punkte zur Verbesserung der Situation werden aufgezeigt.

Innerhalb der PS-Phase wird auf Basis der zuvor erlangten Erkenntnisse eine neue Lösung für das identifizierte Defizit entwickelt. Ergebnis dieser Phase ist der vollständig umgesetzte, beschriebene und dokumentierte Lösungsansatz, bspw. anhand von Checklisten, Software, Modellen oder Plänen. Zudem erfolgt die Planung der Evaluation für die nachfolgende DS-II-Phase.

Die DS-II-Phase fokussiert die Evaluation der entwickelten Lösung aus der PS. Forschungsergebnisse werden in der Praxis angewendet und durch Nutzerinnen und Nutzer bewertet. In den meisten Fällen dient ein Prototyp oder Demonstrator als Basis für die Evaluation. Es ist darauf zu achten, dass die Ergebnisse bei der Evaluation allumfassend und allgemeingültig sind. BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 37) unterscheiden deshalb zwischen zwei Arten der Evaluation. In der ersten Art, der Anwendungsevaluation, wird überprüft, ob die entwickelte Lösung auf das identifizierte Defizit angewendet werden kann. Der Fokus liegt auf der Benutzbarkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Lösung. In der zweiten Art, der Erfolgsevaluation, wird untersucht, ob die erhoffte Wirkung durch die Verwendung der entwickelten Lösung eintritt. Der Fokus liegt auf der Nützlichkeit (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 30 ff.).

Die Anwendung der DRM erfolgt dabei nicht starr oder linear. Angepasst an die jeweiligen Rahmenbedingungen und Erkenntnisse im Projekt wird die Methodik ggf. iterativ durchlaufen. Die Forschungsergebnisse dieser Arbeit sind ebenfalls nicht linear entstanden, sondern sind die Ergebnisse eines iterativen Prozesses, dessen Chronologie nicht der Struktur dieser Arbeit folgt.

Gemäß der DRM sind Ergebnisse aus der RC-Phase in Kapitel 1, Kapitel 2, Abschnitt 3.4 und teilweise in Abschnitt 4.1 zu finden. Erkenntnisse aus der DS-I-Phase sind in Kapitel 3 und Abschnitt 4.1 niedergeschrieben. Die in der PS-Phase entwickelte Lösung für das in Abschnitt 1.2 beschriebene Problem wird ausführlich in den Kapiteln 4, 5, 6 und 7 vorgestellt. Die Evaluation der DS-II-Phase findet in Kapitel 8 statt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird an den entsprechenden Stellen auf die jeweils verwendeten Werkzeuge, wie bspw. Studien, Experimente oder Fragebögen, hingewiesen.

1.6 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in insgesamt neun Kapitel (vgl. Abbildung 1.3). In Kapitel 1 wurden bereits die Ausgangssituation und Motivation sowie die daraus resultierende Problemstellung aufgezeigt. Hieraus wurde die Zielsetzung abgeleitet und der Betrachtungsbereich eingegrenzt. In Kapitel 2 folgt die Beschreibung der wesentlichen Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit relevant sind. In diesem Zusammenhang wird auf die produktionstechnischen Grundlagen, den Themenbereich Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld sowie auf die Grundlagen der Simulation eingegangen. Anschließend folgt in Kapitel 3 die Vorstellung der

1 Einleitung

relevanten Ansätze aus der Wissenschaft und Technik. Daraus werden abschließend der resultierende Handlungsbedarf sowie die wissenschaftlichen Fragestellungen dieser Arbeit abgeleitet. In Kapitel 4 wird das entwickelte Wissensmanagementsystem zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz (WMS4SimPar) vorgestellt. Die Systemübersicht, die Anforderungen an das System sowie die Systemarchitektur von WMS4SimPar werden ebenfalls in Kapitel 4 beschrieben. Das System setzt sich aus vier Bausteinen zusammen. Der erste Baustein zur Anwendungsfallbeschreibung wird noch in Kapitel 4 vorgestellt. Die weiteren drei Bausteine sind in Kapitel 5, Kapitel 6 und Kapitel 7 beschrieben. Die Anwendung und Bewertung des Systems wird in Kapitel 8 dargelegt. Abschließend wird in Kapitel 9 die Arbeit nochmals zusammengefasst und ein Ausblick auf anknüpfende Forschungstätigkeiten gegeben.

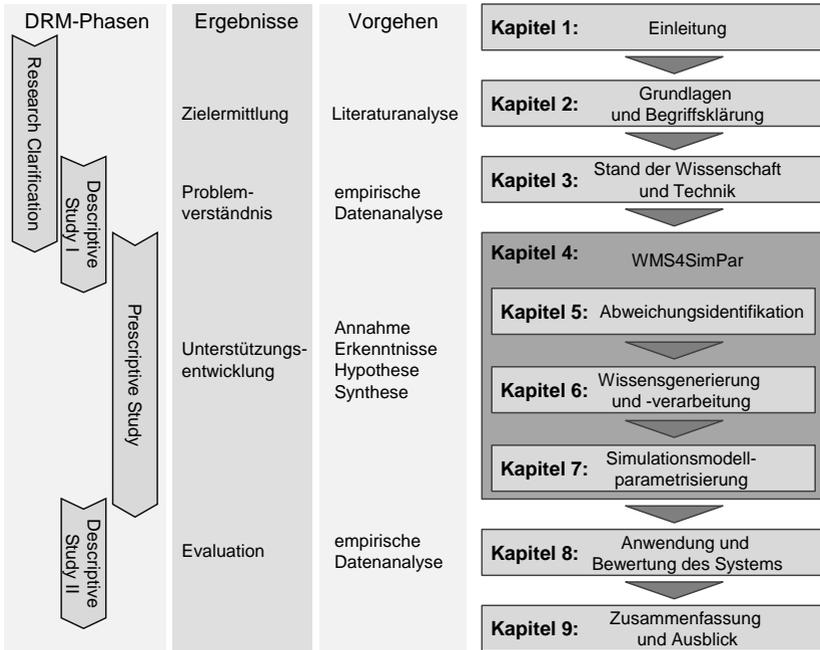


Abbildung 1.3: Einordnung des forschungsmethodischen Vorgehens in die Design Research Methodology nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 15) sowie Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Begriffsklärung

2.1 Produktionstechnische Grundlagen

In einer Produktion werden menschliche Arbeitsleistungen mit Arbeits- und Betriebsmitteln zu einer produktiven Kombination verbunden, um Güter zu erzeugen (GUTENBERG 1971, S. 2). Es handelt sich um einen Umwandlungs- und Transformationsprozess, bei dem aus Input, den sogenannten Produktionsfaktoren, Output (Produkte) erzeugt wird (DANGELMAIER 2009, S. 1 f.; WEBER et al. 2018, S. 9). Aufgrund der eindeutig abgrenzbaren Anordnung von Komponenten, die miteinander in Beziehung stehen, ist die Produktion im Speziellen ein sogenanntes soziotechnisches System, worin eine organisierte Menge an Personen mit Hilfe von Technologien strukturiert ein Ergebnis produziert (VDI 3633-1, S. 3; BERGMANN 2014, S. 9). Die erzeugten Produkte sind entweder End- oder Zwischenprodukte, wobei es sich sowohl um materielle als auch immaterielle Güter oder Dienstleistungen handeln kann. Der für die Herstellung benötigte Input (z. B. Material, Energie, Know-how) wird in wertschöpfenden Tätigkeiten (z. B. Montage) und verknüpften Prozessen zu Output (z. B. Produkte, Kosten, Reststoffe) transformiert (NYHUIS 2008; EVERSHEIM 1996, S. 1536; BERGMANN 2014, S. 10).

2.1.1 Zielsystem der Produktion

Zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens ist die Produktion gezwungen, die Zielgrößen der Wirtschaftlichkeit (Kosten, Qualität und Zeit) zu verfolgen (KLETTI & SCHUMACHER 2014, S. 4). Aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung der drei Größen ergibt sich ein Zielkonflikt, da der Versuch der Optimierung einer der Größen gleichzeitig zu einer Verschlechterung einer der beiden anderen Zielgrößen führt. Beispielsweise führt eine Qualitätssteigerung durch das Einführen weiterer Prüfschritte zu einer negativen Erhöhung sowohl der Durchlaufzeit als auch der Kosten (KLETTI & SCHUMACHER 2014, S. 5). Kennzahlen, die einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens haben, sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

2 Grundlagen und Begriffsklärung

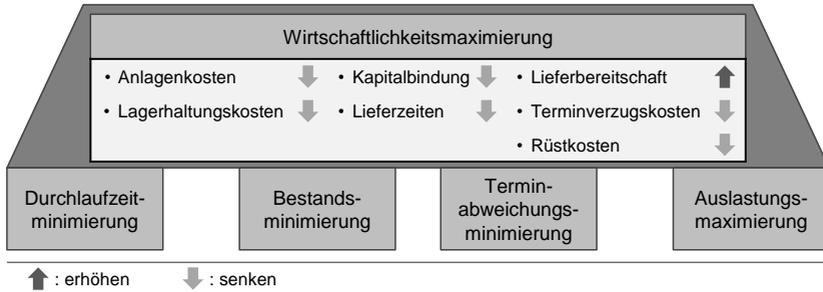


Abbildung 2.1: Zielsystem der Produktion in Anlehnung an VDI 3633-1

KLETTI & SCHUMACHER (2014, S. 4) definieren zwei weitere primäre Zielgrößen, um die Anforderungen an die Produktion der Zukunft gemäß Industrie 4.0 zu erfüllen. Diese beiden Zielgrößen, Transparenz und Reaktionsfähigkeit, sind zwei wesentliche Voraussetzungen, um eine hohe Flexibilität und Termintreue bei sich schnell verändernden Markt- und Produkthanforderungen (vgl. REINHART (2017, S. 514)) zu gewährleisten (KLETTI & SCHUMACHER 2014, S. 6). Das magische Dreieck der Wirtschaftlichkeit einer modernen Produktion kann zum magischen Dreieck der perfekten Produktion erweitert werden (siehe Abbildung 2.2).

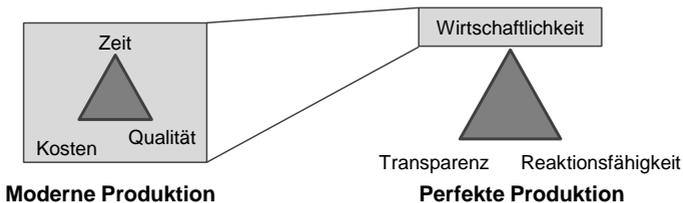


Abbildung 2.2: Von der modernen Produktion zur perfekten Produktion in Anlehnung an KLETTI & SCHUMACHER (2014, S. 4 ff.)

2.1.2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung

Mit der Zielerreichung in der Produktion beschäftigt sich die Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Die Produktionsplanung ist nach VDI (1992, S. 167) das „Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele“. Ergebnis der Produktionsplanung

ist ein Produktionsplan, der nachfolgend anhand der Produktionssteuerung im realen Produktionssystem umgesetzt wird. Aufgabe der Produktionssteuerung ist daher das „Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und Kosten und Arbeitsbedingungen“ (VDI 1992, S. 167). Die Verwendung von Simulationswerkzeugen, in der PPS vor allem auch die ereignisdiskrete Simulation, dienen zur Ermittlung und Absicherung realisierbarer Planungen. Dabei ist die PPS auf verlässliche Simulationsmodelle, die mit der jeweiligen Ist-Situation der Produktionssysteme synchronisiert sind, angewiesen (VDI 3633-1).

2.1.3 Produktlebenszyklus

EIGNER & STELZER (2009, S. 2) definieren acht Phasen des Produktlebenszyklus (PLZ). Die Produktion stellt darin nur eine der acht Phasen dar. Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, beginnt der PLZ mit der Produktentwicklung, die aus den Phasen der Anforderungsdefinition, Produktplanung, Entwicklung und Prozessplanung besteht. Anschließend folgt die Produktion, auf die nachgelagert der Betrieb und das Recycling folgen.

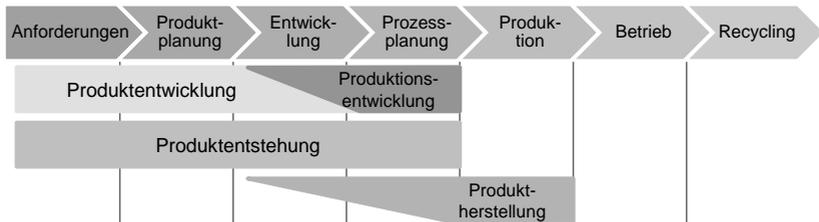


Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen Produkt- und Produktionsentwicklung sowie Produktentstehung und Produktherstellung im PLZ in Anlehnung an EIGNER & STELZER (2009, S. 2)

Die Produktionstechnik steht immer vor der Herausforderung, dass es sich bei einem Produktionssystem um ein Produkt handelt, welches sich innerhalb des eigenen PLZ bereits im Betrieb befindet, während der Output des Produktionssystems, die eigentlichen Produkte, in der Phase der Produktion sind. Weiterentwicklungen eines Produkts führen immer zu Anpassungen des sich im Betrieb befindlichen Produktionssystems.

2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld

Ein zielgerichteter Umgang mit dem Wettbewerbsfaktor *Wissen* ist aufgrund schneller Innovationszyklen, der zunehmenden Internationalisierung von Unternehmen sowie deren durch eine alternde Belegschaft bedingte Umstrukturierung ein entscheidender Erfolgsfaktor (VDI 5610-1). Die Einbindung eines Wissensmanagementsystems WMS in die unternehmerischen Abläufe und aus Ingenieurssicht vor allem auch in den Wertschöpfungsprozess ist demnach unerlässlich (VDI 5610-1).

In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen für das Themengebiet des WMS in produzierenden Unternehmen dargelegt.

2.2.1 Begriffsklärung und Definition

Eng verzahnt mit dem Begriff Wissen sind die Begriffe *Zeichen*, *Daten* und *Information*, die zusammen die Grundlage für die Erzeugung von Wissen bilden. Nach BODENDORF (2006, S. 1) und NORTH (2016, S. 35 ff.) werden aus einem Zeichenvorrat mit definierten Syntaxregeln Daten gebildet. Daten bilden das „Rohmaterial“ und sind ohne Zusammenhang und weitere Hintergründe nicht deutbar (VDI 5610-1). Information entsteht, wenn ein Bezug zwischen den Daten hergestellt wird. Die Daten stehen in einem Kontext und beschreiben einen Sachverhalt. Informationen fehlt der Bezug zu anderen aktuellen oder in der Vergangenheit gespeicherten Informationen. Die Vernetzung und Einordnung von Information in Erfahrungen oder Erwartungen lässt Wissen entstehen. Dieses Wissen kann zu einer Entscheidung führen. Demzufolge ist nach VDI 5610-1 Wissen definiert als „*vernetzte Information, die in die Lage versetzt, Vergleiche anzustellen, Verknüpfungen herzustellen und Entscheidungen zu treffen.*“

In der Wissenstreppe nach NORTH (2016, S. 37) in Abbildung 2.4 folgt hierarchisch auf der nächsten Stufe das Handeln, indem das erlangte Wissen in eine Tat umgesetzt wird. Darüber hinaus benötigt es eine Motivation, die Personen dazu bringt, eine Handlung zu vollziehen. Unternehmen müssen dementsprechend Anreize und Freiräume schaffen, damit Mitarbeitende im Sinne der Wertschöpfung zielgerichtet handeln können.

Das Themengebiet der Mitarbeitermotivation in produzierenden Unternehmen stellt ein eigenes Forschungsgebiet dar, auf das nicht detaillierter eingegangen wird. An dieser Stelle sei auf die weiterführende Literatur, z. B. SOCHOR et al. (2021a), verwiesen.

2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld

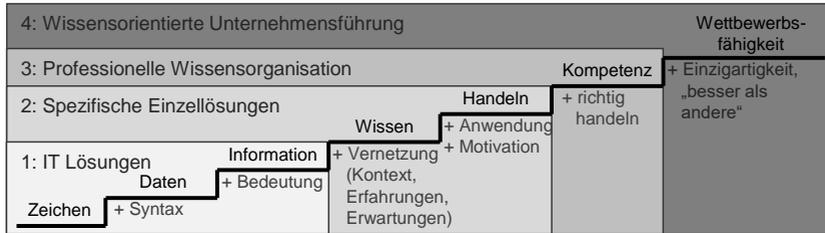


Abbildung 2.4: Wissenstreppe nach NORTH (2016, S. 40)

Aus der Wissensanwendung entsteht durch einen Lernprozess *Kompetenz*, die dazu führt, dass zukünftig ein situationsadäquates Handeln möglich ist. Kompetenz unterscheidet sich von der reinen Anwendung von Wissen folglich durch zweckorientierte, offene und selbstorganisierte Handlungen (PRINZ 2018, S. 25; NORTH 2016, S. 38; ERPENBECK et al. 2017, S. XIII).

Formiert sich innerhalb einer Organisation ein Verbund an Fähigkeiten und Technologien, der auf explizitem und implizitem Wissen (vgl. Abschnitt 2.2.2) basiert, wird dies als Kernkompetenz einer Organisation bezeichnet (NORTH 2016, S. 39). Mittels dieser Kernkompetenzen erhält eine Firma ihre Wettbewerbsfähigkeit, da einzigartige Mehrwerte generiert werden können, die schwer transferierbar oder imitierbar sind.

2.2.2 Wissensformen und -arten

Die beiden Begriffe der Wissensform und der Wissensart werden in der Literatur zum Teil gleichbedeutend verwendet und unterscheiden sich je nach Quelle nur im Detail (PRINZ 2018, S. 26; VDI 5610-1). Nach VDI 5610-1 werden zwei Arten von Wissen – implizites Wissen (engl. *tacit knowledge*) und explizites Wissen (engl. *explicit knowledge*) – unterschieden.

Implizites Wissen bezeichnet Fähigkeiten und Fertigkeiten einer Person, die unterbewusst und aus der Intuition heraus angewendet werden. Eine Weitergabe dieses Wissens ist kaum möglich, weil es den Wissensträgern oftmals schwer fällt, das Wissen in Worte zu fassen, also es direkt zu artikulieren. Diese Eigenschaft führt dazu, dass implizites Wissen i. d. R. nur personengebunden vorhanden ist (REINHARDT 2004, S. 71).

Anhand von speziellen Frage- oder Beobachtungstechniken lässt sich das implizite Wissen jedoch externalisieren. Gelingt es zudem, das Wissen transferier-, archivier- und

2 Grundlagen und Begriffsklärung

reproduzierbar zu machen, wird dies als explizites Wissen bezeichnet. Das Wissen ist nun nicht mehr personengebunden und steht anderen Personen in Form von Sprache oder Schrift zur Verfügung (PRINZ 2018, S. 26; NONAKA & TAKEUCHI 2012, S. 77).

2.2.3 Wissenstransformation

Ein Grundproblem des Wissensmanagements (neben der Erzeugung von Wissen) ist die Überführung von implizitem Wissen in explizites Wissen und umgekehrt (NORTH 2016, S. 46). Die Überführung wird als Wissenstransformation bezeichnet und findet in der Realität immer in beide Richtungen statt. NONAKA (1994, S. 19) benennt die vier Möglichkeiten der Transformation von explizitem und implizitem Wissen (siehe Abbildung 2.5).



Abbildung 2.5: Wissenstransformation nach NONAKA & TAKEUCHI (2012, S. 79)

Sozialisation Die Transformation von implizitem zu implizitem Wissen wird als Sozialisation bezeichnet. Die Wissensart bleibt dabei gleich, zudem findet nur begrenzt eine Wissenserzeugung statt, weshalb diese Art der Transformation als Übertragung bezeichnet wird (NORTH 2016, S. 46 f.; NONAKA 1994, S. 19). Mittels Interaktion geht implizites Wissen von einem Individuum auf ein anderes über. NONAKA (1994, S. 19) betont, dass Sozialisation auch ohne den Gebrauch von Sprache erfolgen kann. Die Übertragung erfolgt durch Beobachtung, Imitation und Übung. Beispiel für eine Wissensübertragung durch Sozialisation ist eine Lehrling-Meister-Beziehungen.

Externalisierung Bei der Externalisierung findet ein Übergang von implizitem zu explizitem Wissen statt. Herausforderung ist hierbei die Artikulierung des impliziten Wissens, um es zu dokumentieren. Dieser Schritt wird auch als Wissenserzeugung bezeichnet, da nach der Externalisierung bisher nicht dokumentiertes Wissen allgemein

2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld

zur Verfügung steht. Hilfsmittel wie beispielsweise Dialoge, Metaphern, Frage- oder Beobachtungstechniken unterstützen den Prozess der Externalisierung und damit die eigentliche Erzeugung von Wissen (PRINZ 2018, S. 26; NONAKA 1994, S. 19).

Kombination Bei der Kombination entsteht aus bereits bekanntem expliziten Wissen neues explizites Wissen. Mittels Austausch, Zusammentragen und Neubewerten von bereits externalisiertem Wissen ist es möglich, neue Schlüsse, Erkenntnisse und neues Wissen zu gewinnen. Nach NORTH (2016, S. 48) wird das Gesamtwissen dabei aber nicht vermehrt, da „bereits Bekanntes nur zusammengefasst oder in einer anderen Form dargestellt wird“.

Internalisierung Bei der Internalisierung wird explizites zu implizitem Wissen transformiert. Das explizite Wissen wird von einer Person zunächst gelernt. Daraufhin verinnerlicht die Person die gelernten Inhalte (explizites Wissen) durch praktische Umsetzung, Anwendung und Erfahrung. Mittels einer erfolgreichen Anwendung in einem Prozess wird das Wissen vollständig internalisiert und steht der Person als implizites Wissen zur Verfügung (NONAKA 1994, S. 19).

Innerhalb eines Unternehmens führt das gezielte Durchlaufen der vier Phasen einerseits zu einer Verfügbarmachung des Wissens auf unterschiedlichen Ebenen und andererseits zu einem Wissenszuwachs für das Unternehmen (NORTH 2016, S. 48). Den Prozess unterstützen NONAKA & TAKEUCHI (2012, S. 89 ff.) mit der sogenannten Wissensspirale, welche in Abschnitt 3.3.1 näher vorgestellt wird.

2.2.4 Wissensträger

Wissen selbst ist immateriell und deshalb immer an Wissensträger gebunden (AMELINGMEYER 2004, S. 53). Als Wissensträger werden alle körperlichen Trägermedien verstanden, in denen Wissen manifestiert wird. Nach AMELINGMEYER (2004, S. 55) werden drei Hauptkategorien von Wissensträgern – (1) personelle Wissensträger, (2) materielle Wissensträger und (3) kollektive Wissensträger – unterschieden.

Personelle Wissensträger sind bspw. alle Mitarbeitenden eines Unternehmens. Bücher, Computer, Fertigungsmaschinen und Datenbanken stellen materielle Wissensträger dar. Materielle Wissensträger haben als primäres Ziel die Speicherung und Aufbewahrung von Wissen. Kollektive Wissensträger sind eine Mischform und beinhalten personelle und/oder materielle Wissensträger, die über ein gemeinsames, summiertes Wissen verfügen (PRINZ 2018, S. 53; AMELINGMEYER 2004, S. 55).

2 Grundlagen und Begriffsklärung

Das Wissen von personellen Wissensträgern kann des Weiteren in die Bereiche Fachkompetenz (berufsspezifisches Wissen), Methodenkompetenz (fachübergreifende Kenntnisse) und Persönlichkeitskompetenz (individuelle Eigenschaften und Fähigkeiten) untergliedert werden. Erst durch das Zusammenwirken dieser drei Bereiche entsteht Handlungskompetenz (SONNTAG 1996, S. 56 ff.), die die Mitarbeitenden befähigt, ihr Wissen in die betrieblichen Prozesse einzubringen (AMELINGMEYER 2004, S. 56).

2.2.5 Wissensbasis

Eine Wissensbasis stellt die Gesamtheit des zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbaren, an personelle, materielle und/oder kollektive Wissensträger gebundenen Wissens dar (AMELINGMEYER 2004, S. 84).

Aufgrund der Verteilung des Wissens auf die Wissensträger (siehe Abschnitt 2.2.4) stellt die Gesamtheit des Wissens in der Wissensbasis nur ein theoretisches Konstrukt für das Unternehmen dar. Der Umfang des implizit vorhandenen Wissens bei den personellen und kollektiven Wissensträgern ist nicht zu bestimmen. PAUTZKE (1989, S. 79) unterteilt die Wissensbasis einer Organisation hinsichtlich der Zugänglichkeit des Wissens in fünf Schichten (siehe Abbildung 2.6) (PRINZ 2018, S. 28).

Schicht (1) beinhaltet das von allen Organisationsmitgliedern geteilte Wissen. Dieses Wissen steht der Organisation zu jedem Zeitpunkt und durch jede Person gleichermaßen zur Verfügung (TROJAN 2006, S. 107). Neben den personellen Wissensträgern beinhaltet die erste Schicht auch alles Wissen, welches in Form von materiellen oder kollektiven Wissensträgern gespeichert ist und dadurch der Organisation zur Verfügung steht.

Schicht (2) beinhaltet das der Organisation zugängliche individuelle Wissen. Dies umfasst das Wissen, welches bei einzelnen Organisationsmitgliedern vorhanden ist und für Handlungen angewendet oder durch Weitergabe an weitere Personen kollektiviert wird (WELTER 2005, S. 75).

Schicht (1) und (2) bilden zusammen die aktuelle Wissensbasis einer Organisation.

Schicht (3) des Modells nach PAUTZKE (1989, S. 79) beinhaltet, analog zu Schicht (2), das individuelle Wissen einzelner Organisationsmitglieder. Jedoch handelt es sich entweder um für die Organisation irrelevantes Wissen oder um Wissen, welches aus unterschiedlichen Gründen nicht geteilt wird bzw. nicht in den organisatorischen Entscheidungsprozess einfließt (TROJAN 2006, S. 108).

2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld

Schicht (4) beinhaltet sogenanntes Metawissen von Personen, d. h. eine Person weiß, wie sie an Wissen zu einem bestimmten Kontext kommen kann, wobei dies immer mit einem mehr oder weniger großen Aufwand verbunden ist (TROJAN 2006, S. 109).

Das Wissen aus den Schichten (3) und (4) steht der Organisation nicht direkt zur Verfügung und wird daher als latente Wissensbasis bezeichnet.

Schicht (5) vereint das kosmische Wissen, welches theoretisch allen zugänglich ist.

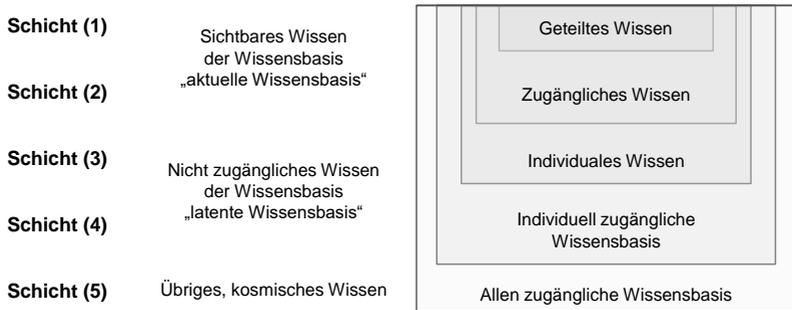


Abbildung 2.6: Fünf Schichten¹ der Wissensbasis einer Organisation in Anlehnung an PAUTZKE (1989, S. 79)

2.2.6 Wissensrepräsentation

Als Wissensrepräsentation wird die Art und Weise der Wissensspeicherung und Darstellung bezeichnet, die eine Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ermöglicht (BRANDMEIER 2020, S. 47; DENGEL 2012, S. 21). Mittels Techniken, Methoden und Werkzeugen wird Wissen in digitalen Speichermedien abgebildet. Dort kann das Wissen gesucht und gefunden werden (W. G. STOCK & M. STOCK 2008). Anhand der Gestaltung von Informationsarchitekturen, die auf Begriffen und Begriffsordnungen basieren, wird Wissen und dessen Bedeutungszusammenhang dargestellt (BRANDMEIER 2020, S. 47; W. G. STOCK & M. STOCK 2008). Ziel der Wissensrepräsentation ist die Abbildung von Faktenwissen, welches anhand der in Abbildung 2.7 dargestellten

¹PAUTZKE (1989, S. 79) spricht explizit von einem Schichtenmodell. Die Darstellung als Schalenmodell, wie in der Abbildung dargestellt, verdeutlicht nach Meinung des Autors besser die Zusammenhänge der unterschiedlichen Wissensbasen.

2 Grundlagen und Begriffsklärung

Methoden realisiert werden kann. Wissensrepräsentationsmethoden (WRM) werden in die drei Bereiche (1) deklarative, (2) prozedurale und (3) hybride WRM gegliedert. Ziel von deklarativen WRM ist die reine Beschreibung von Fakten (BRANDMEIER 2020, S. 47), während prozedurale WRM Wissen durch aufrufbare Prozeduren beschreiben und aufzeigen, wie Wissen angewendet wird (FUCHS 2008, S. 26). Hybride WRM bilden entsprechende Mischformen.

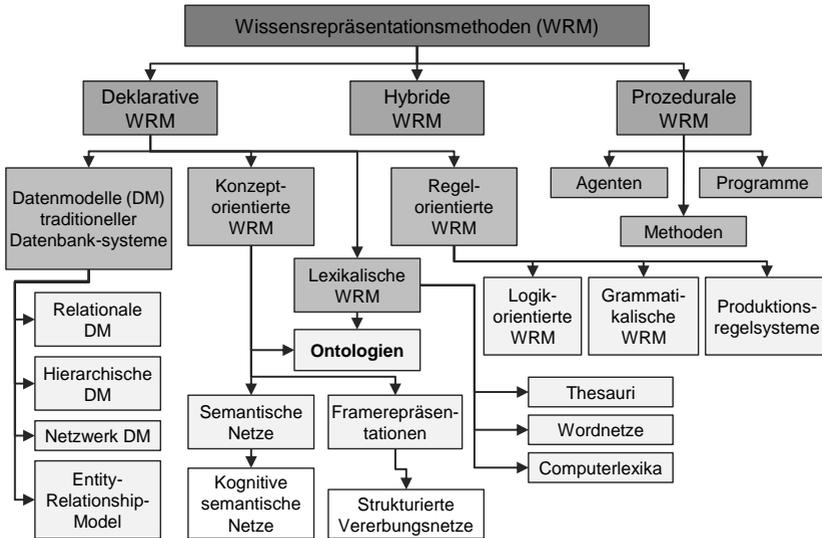


Abbildung 2.7: Methoden der Wissensrepräsentation in Anlehnung an HELBIG (2008) und BRANDMEIER (2020, S. 47)

Ontologien

Eine weit verbreitete Methode aus den Formalwissenschaften zur Darstellung von Wissen sind Ontologien (VOGEL-HEUSER et al. 2021, S. 4; BRANDMEIER et al. 2016, S. 188; HAARMANN 2014, S. 15). Das Wort Ontologie stammt aus dem Griechischen und bedeutet wörtlich übersetzt „Lehre vom Sein“. Die Lehre selbst geht zurück auf Aristoteles (384 bis 322 v. Chr.), der seine Wissenschaft als „das Seiende, insofern es Seiendes ist“ bezeichnet (HAARMANN 2014, S. 26). Mit der zunehmenden Digitalisierung und der Notwendigkeit, Wissen digital zu speichern sowie weiterzuverarbeiten, erhält der Begriff Einzug in die Informatik. Die informationswissenschaftliche Bedeutung bezieht sich im Gegensatz zur Philosophie nicht auf eine Lehre oder eine abstrakte

2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld

Ebene, sondern viel mehr auf die konkrete Spezifikation von Fakten, die auf Medien gespeichert werden können (HAARMANN 2014, S. 30).

T. GRUBER (2016) definiert den Begriff Ontologien für den Bereich der Computer- und Informationswissenschaften wie folgt: „Eine Ontologie definiert einen Satz von Darstellungsprimitiven, mit denen ein Wissens- oder Diskursbereich modelliert wird.“ Darstellungsprimitiven sind in der Regel Klassen, Attribute und Beziehungen, deren logisch konsistente Anwendung vorab festgelegt wird.

Im Zusammenhang mit Datenbanksystemen kann die Ontologie, analog zu hierarchischen und relationalen Modellen, als eine Abstraktionsebene von Datenmodellen betrachtet werden. Ziel ist die Modellierung von Wissen über Individuen, ihre Attribute und ihre Beziehungen zu anderen Individuen. Ontologien werden i. d. R. mittels semantischer Sprache ausgedrückt. Im Gegensatz dazu bilden Datenbankschemata Datenmodelle auf der *logischen* oder *physikalischen* Ebene ab (T. GRUBER 2016).

Wie bereits eingeführt, muss bei einer Ontologie vorab die logisch konsistente Anwendung festgelegt werden. Anhand des Grades der Spezifität wird, wie in Abbildung 2.8 dargestellt, auf unterschiedlichen Levels die Art der Ontologie klassifiziert (OCKER et al. 2019b).

Upper-Level-Ontologien, teilweise auch Top-Level-Ontologien genannt, befinden sich auf der höchsten Ebene. Diese beschreiben ein fundamentales Konzept und Zusammenhänge für die darunterliegenden anwendungsnahen Ontologien. Die Domänenunabhängigkeit sowie die generische und abstrakte Beschreibung sind charakteristisch für Upper-Level-Ontologien (SEMY et al. 2004). Deren Ziel ist es einen Rahmen bzw. ein Grundkonzept für die Integration verschiedener Ontologien auf Domänenebene zu schaffen (GASEVIC et al. 2006, S. 76). Ein Vergleich der verbreitetsten Upper-Level-Ontologien findet sich in der Arbeit von (MASCARDI et al. 2007).

Mid-Level-Ontologien umfassen sogenannte bereichs- bzw. aufgabenbezogene Ontologien. Sie stellen Konzepte für die spätere Anwendung von Ontologien auf Domänenebene bereit (BRANDMEIER 2020, S. 57; GUARINO 1998, S. 7).

Domänen-Level-Ontologien bilden konkret das Wissen in Form von domänenspezifischen Entitäten und Beziehungen für einen Anwendungsfall ab (BRANDMEIER 2020, S. 57). In einer Ontologie auf Domänenebene kann das verfügbare Wissen einer Organisation gespeichert werden. Ein Vergleich von verschiedenen Domänen-Level-Ontologien ist in der Veröffentlichung von OCKER et al. (2019a, S. 508) zu sehen.

2 Grundlagen und Begriffsklärung



Abbildung 2.8: Hierarchische Einteilung von Ontologien hinsichtlich ihres Grades der Spezifität in Anlehnung an BRANDMEIER (2020, S. 57) und GASEVIC et al. (2006, S. 74)

Durch den Einsatz von Ontologien ergeben sich folgende Vorteile (NOY & MCGUINNESS 2001, S. 1):

- Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses der Struktur von Informationen zwischen Menschen und/oder Software-Agenten
- Wiederverwendung von Fachwissen
- Externalisierung von Domänenwissen
- Trennung von Domänenwissen und operativem Wissen
- Analysieren von Wissen

Die Implementierung von Ontologien erfolgt anhand von Repräsentationssprachen. Sie ermöglichen es, Informationen in einer präzisen, maschineninterpretierbaren Form auszudrücken. Software-Agenten können dadurch die gespeicherte Information verarbeiten und wiederverwenden (BRANDMEIER 2020, S. 58; GASEVIC et al. 2006, S. 79 f.). Innerhalb des Semantic Web existieren unterschiedliche Repräsentationssprachen, die teilweise aufeinander aufbauen (BRANDMEIER 2020, S. 58). Alle Sprachen des Semantic Web basieren auf der *Standard Generalized Markup Language* (SGML). Sie ist eine Metasprache für die Definition von Dokumentensprachen. Aufbauend auf SGML strukturiert *Hypertext Markup Language* (HTML) die Daten für Browser-Darstellungen. Die einfache Handhabung von HTML führte zwar zu einer großen Verbreitung, nachteilig ist jedoch, dass bei HTML eine Vermischung von Struktur und Layout stattfindet. Die Lösung und Grundlage für die weitere Entwicklung von Ontologiesprachen stellt die *eXtensible Markup Language* (XML) dar, anhand derer standardisierte, atomare Datentypen für Attribute definiert und komplexe Typen mit Vererbungsbeziehungen realisiert werden können (HAHN et al. 2004, S. 23 ff.).

2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld

Aus XML heraus entwickelte das World Wide Web Consortium (W3C) das *Resource Description Framework* (RDF), den aktuell bekanntesten Standard des Semantic Web (HAHN et al. 2004, S. 26) (vgl. Abbildung 2.9a). In RDF werden Ressourcen in Form von *Statements*, die als *Tripel* aufgebaut sind, gespeichert. Ein Tripel besteht immer aus der Ressource selbst sowie einer Eigenschaft (Property) und dem entsprechenden Wert (Value). ZARRI (2010, S. 1356) stellt basierend auf dem ursprünglich von BERNERS-LEE et al. (2001) vorgestellten Semantic Web Layer Cake vor, dass Ressourcen immer über einen eindeutigen *Uniform Resource Identifier* (URI) oder *Internationalized Resource Identifier* (IRI) identifizierbar (vgl. Abbildung 2.9b) sind. Dadurch sind gespeicherte Ressourcen und Properties eindeutig und können nicht verwechselt werden. Eine genaue Beschreibung des RDF-Vokabulars ist mittels des *Resource Description Framework Schema* (RDFS) möglich. Mit Hilfe des Schemas können Eigenschaften und Beziehungen genauer beschrieben sowie Regeln für die Definition von Attributen festgelegt werden (HAHN et al. 2004, S. 28).

Auf *DARPA Agent Markup Language* (DAML) und *Ontology Interchange Language* (OIL) wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da beide Sprachen nicht weiterentwickelt werden und sich hauptsächlich nur in der Syntax von *Web Ontology Language* (OWL) unterscheiden.

Seit 2004 ist OWL die offizielle Empfehlung des W3C zur Beschreibung und Instanziierung von Ontologien und bildet die Basis zahlreicher wissensbasierter Systeme (Vogel-Heuser et al. 2014, S. 715; BRANDMEIER 2020, S. 59; OWL WORKING GROUP 2004; HAHN et al. 2004, S. 31). Aufbauend auf den Möglichkeiten zur Definition von Klassen und Eigenschaften aus RDF und RDFS, kann zwischen Objekteigenschaften und Datentypeigenschaften unterschieden werden. Objekteigenschaften beschreiben Beziehungen zwischen Instanzen zweier Klassen, während Datentypeigenschaften Wertebereiche und Datentypen beschreiben (HAHN et al. 2004, S. 31).

Mit Hilfe der Anfragesprache *SPARQL Protocol And RDF Query Language* (SPARQL) können Wissen und Informationen aus Ontologien im RDF-Format abgefragt werden (HITZLER et al. 2008, S. 202).

Das *Rule Interchange Format* (RIF) im Semantic Web legt Regeln zur Formalisierung von Wissen fest, damit Programme logische Schlüsse ziehen können. Im Gegensatz zu RDF, OWL oder SPARQL handelt es sich bei RIF nicht um eine einzige Sprache, sondern um eine ganze Familie an RIF-Dialekten, um den Austausch von möglichst vielen Paradigmen, die Regeln in der Wissensrepräsentation und Geschäftsmodellierung

2 Grundlagen und Begriffsklärung

verwenden, zu unterstützen (KIFER & BOLEY 2013). Auf die weiteren Schichten des Semantic Web Layer Cake sei an dieser Stelle auf die Webseite des W3C² verwiesen.

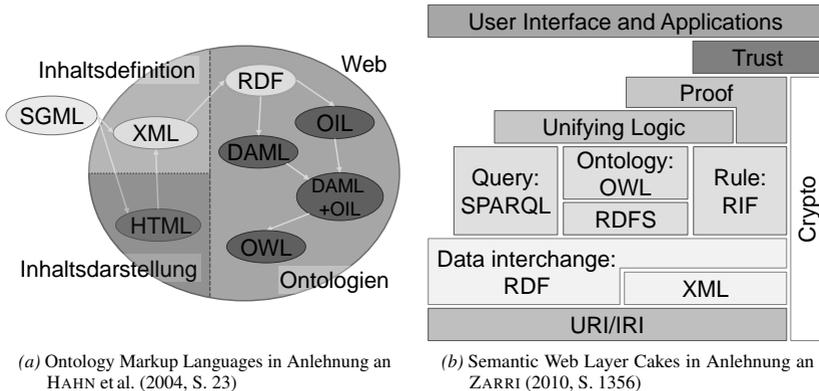


Abbildung 2.9: Inhaltlicher Aufbau von Repräsentationssprachen und Struktur des Semantic Web Layer Cakes

Für die Entwicklung von Ontologien existieren mehrere Softwareprogramme: Protégé, NeOn, DUET, TopBraid Composer und weitere. Unter ihnen ist Protégé derzeit das am häufigsten verwendete Programm (YU 2015, S. 602). Protégé basiert auf der Programmiersprache Java und wurde vom Stanford Center for Biomedical Informatics Research (BMIR) der Stanford University School of Medicine entwickelt (STANFORD CENTER FOR BIOMEDICAL INFORMATICS RESEARCH 2022; MUSEN 2015). Aufgrund der übersichtlichen und funktionalen Gestaltung des Editors ist Protégé weit in Industrie und Forschung verbreitet. Angesichts dieser Vorteile erfolgt auch die Entwicklung der Ontologie für diese Arbeit in Protégé.

2.2.7 Wissensmanagement im Unternehmen

Im unternehmerischen Kontext beinhaltet ein Wissensmanagement (WM) das Gestalten, Lenken und Entwickeln der organisationalen Wissensbasis (NORTH 2016, S. 161). Die VDI 5610-1 definiert das WM als „das Organisieren aller Prozesse, in denen Informa-

²<https://www.w3.org/>

2.2 Wissen im unternehmerischen und produktionstechnischen Umfeld

tionen, Erkenntnisse und Erfahrungen identifiziert, erzeugt, gespeichert, verteilt und angewendet werden“. Kernaktivitäten unterstützen dabei den systematischen Umgang mit Wissen.

In Abbildung 2.10a ist zu sehen, dass in der Richtlinie VDI 5610-1 zwischen einer übergeordneten und vier operativen Kernaktivitäten unterschieden wird. In der Aktivität *Wissen planen*, *identifizieren*, *bewerten* werden das bereits vorhandene Wissen sowie die Wissensträger identifiziert, das zukünftig notwendige Wissen definiert und bezüglich seiner Qualität bewertet. In den operativen Aktivitäten wird Wissen erzeugt, gespeichert, verteilt und angewendet. Die operativen Kernaktivitäten sind für eine erfolgreiche Wissenstransformation notwendig (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Im Gegensatz dazu unterscheiden PROBST et al. (2012, S. 30) und HEISIG & ORT (2005, S. 28) nicht zwischen übergeordneten und operativen Aktivitäten. Sie differenzieren in der Erzeugung von Wissen feiner und unterscheiden, ob es sich um einen Wissenserwerb (*acquire*) oder die Erschaffung von Wissen (*create*) handelt (vgl. Abbildung 2.10b).

Beide Betrachtungen haben jedoch gemein, dass sie die in einem Unternehmen notwendigen Aktivitäten für eine erfolgreiche Wissenstransformation aus Abschnitt 2.2.3 erreichen wollen, um Wissen für das Unternehmen zielgerichtet einsetzen zu können.

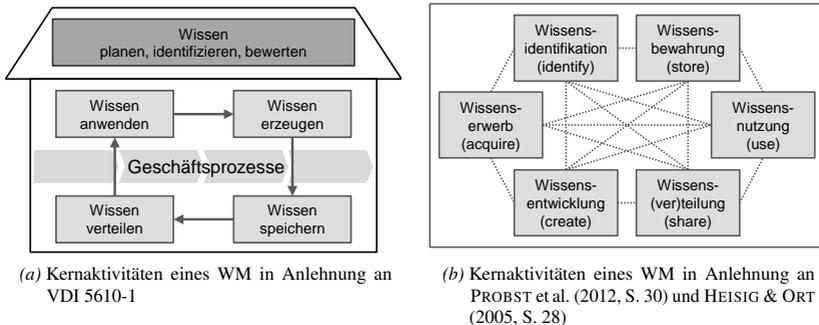


Abbildung 2.10: Kernaktivitäten eines WMs nach VDI 5610-1, PROBST et al. (2012, S. 30) und HEISIG & ORT (2005, S. 28)

Wissensmanagement in der Produktion

In der Produktion können mit Hilfe eines durchgängigen Daten- und Wissensmanagements größere Optimierungspotenziale ausgeschöpft werden (WESTKÄMPER et al.

2 Grundlagen und Begriffsklärung

2013, S. 111). Klassischerweise werden jedoch Mitarbeitende aus der Produktion nicht als Wissensarbeiter angesehen und daher nur selten in ein übergreifendes Wissensmanagement eines Unternehmens eingebunden (FISCHBACH & PUTZKE 2019; PRINZ 2018, S. 17). Nach VDI 4499-1 haben sie aber ein umfangreiches Erfahrungswissen. Da sich dieses Wissen i. d. R. auf physische Arbeit und nicht auf reine Wissensprozesse bezieht, stellt sich die Erfassung des Wissens als besonders schwierig dar. Aus diesem Grund sollte mittels eines WMs dieses Wissen für das Unternehmen und die Produktion gesichert sowie nutzbar gemacht werden (PRINZ 2018, S. 17; ZAPP 2014, S. 37).

2.2.8 Wissensmanagementsysteme

Die Realisierung eines Wissensmanagements in Unternehmen erfolgt durch den Einsatz entsprechender technischer Systeme, die in ihrer Gesamtheit ein sogenanntes Wissensmanagementsystem (WMS) darstellen. MAIER (2007, S. 86) definiert ein WMS als ein Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-System im Sinne eines Anwendungssystems oder einer IKT-Plattform. Es enthält Funktionen für den kontextbezogenen Umgang mit explizitem und implizitem Wissen in der gesamten Organisation oder in dem Teil der Organisation, auf den eine WM-Initiative abzielt. Ein WMS bietet integrierte Dienste zum Einsatz von WM-Werkzeugen für Netzwerke von Teilnehmern, d. h. aktiven Wissensarbeitern, in wissensintensiven Geschäftsprozessen entlang des gesamten Wissenslebenszyklus. Das primäre Ziel von WMS ist die Unterstützung der Dynamik des organisatorischen Lernens und der organisatorischen Effektivität.

Ein WMS setzt sich immer aus mehreren einzelnen technischen Anwendungen zusammen (HEISIG & ORT 2005, S. 55). Auf unterschiedlichen Ebenen verarbeiten die Dienste dabei bidirektional Daten, Informationen oder Wissen und stellen das Ergebnis auf oberster Ebene den Wissensarbeitern zur Verfügung (BRANDMEIER 2020, S. 44; MAIER 2007, S. 319). Eine klassische Architektur ist in Abbildung 2.11 zu sehen. Die Basis eines WMS bilden verschiedene Datenquellen (Ebene VI). Das Anbinden der unterschiedlich gearteten Daten erfolgt auf Ebene V. Hierzu sind zum Teil unterschiedliche IT-Infrastrukturen aufzubauen. Auf der Ebene IV erfolgt die Zusammenführung in eine einheitliche Wissensbasis, die stets aktuell gehalten wird. Die allgemeine Verarbeitung des Wissens erfolgt auf Ebene III. Darüber liegend dient Ebene II einer personalisierten Verarbeitung von Wissen, auf das über Ebene I mit Hilfe eines *User Interface* (UI) zugegriffen werden kann.

2.3 Simulation im produktionstechnischen Umfeld



Abbildung 2.11: Architektur eines WMS in Anlehnung an BRANDMEIER (2020, S. 44) und MAIER (2007, S. 319)

2.3 Simulation im produktionstechnischen Umfeld

Der Einsatz von Simulation spielt eine zentrale Rolle, um die Wettbewerbsfähigkeit der produzierenden Unternehmen zu erhalten, da experimentelle Untersuchungen am realen Produktionssystem zu zeit-, kostenintensiv und risikobehaftet sind (VDI 3633-1, S. 9; K. FELDMANN & REINHART 2000, S. 2).

Nach VDI 3633-1 ist Simulation definiert als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

2 Grundlagen und Begriffsklärung

Aus wirtschaftlicher Sicht ist bereits seit einigen Jahrzehnten bekannt, dass sich der Einsatz von Simulation sowohl monetär als auch zeitlich lohnt (K. FELDMANN & REINHART 2000, S. 2). Eine Simulation senkt sowohl die Kosten als auch den Zeitbedarf der Planungs- und Inbetriebnahmephase (vgl. Abbildung 2.12). Zudem führt der Einsatz von Simulation zu einer erhöhten Verfügbarkeit und einer gestiegenen Sicherheit in der Betriebsphase, wodurch sich in der Gesamtbetrachtung die Amortisationszeit verkürzt (GLATZ 2022, S. 95 ff.).

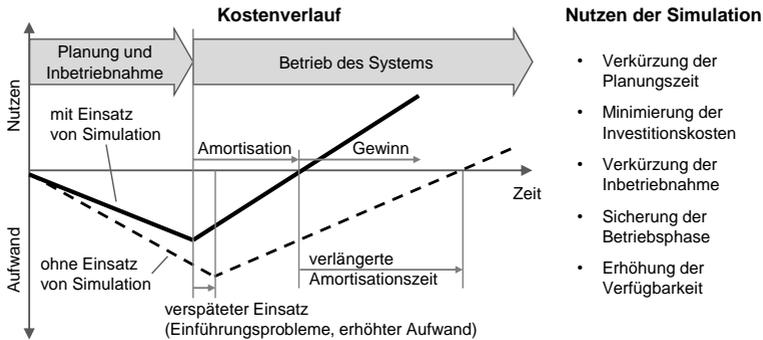


Abbildung 2.12: Vergleich der Kostenverläufe mit und ohne Simulationseinsatz über den PLZ von Produktionssystemen in Anlehnung an K. FELDMANN & REINHART (2000, S. 2)

Ein Modell ist immer eine vereinfachte Darstellung eines realen Systems oder Problems, um die Komplexität auf das für die Fragestellung Wesentliche zu reduzieren (DOMSCHKE et al. 2015). Die Berücksichtigung aller Sachverhalte eines realen Systems, wie bspw. eines Produktionssystems, ist in der Praxis oft nicht möglich (R. KLEIN & SCHOLL 2012, S. 31).

In der betrieblichen Entscheidungsfindung kommt Simulation in nahezu jedem Bereich zum Einsatz (GUTENSWAGER et al. 2017, S. 44). Die Fachgruppe *Simulation in Produktion und Logistik* schlägt den Einsatz von Simulation vor, wenn die Grenzen analytischer Methoden erreicht sind, das menschliche Vorstellungsvermögen überschritten ist, Neuland beschritten wird oder Experimente am realen System nicht möglich bzw. zu kostenintensiv sind (ASIM 1997, S. 6). Auch im Idealbild der Digitalen Fabrik wird in der Definition nach VDI 4499-1 Simulation als entscheidende Methode für die Planung und Verbesserung aller Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik genannt (BRACHT et al. 2018, S. 9 ff.).

2.3.1 Klassifikation von Simulationsmethoden

Die Art und Weise, in der das Zeitverhalten innerhalb der Simulation ausgeprägt ist, wird als *Simulationsmethode* bezeichnet. Die *Simulationszeit* ist dabei die im abgebildeten System voranschreitende Zeit im Simulationsmodell, sie wird oft auch als Simulationsuhr bezeichnet (FURMANS et al. 2008, S. 78). Für den Fortschritt der Simulationszeit innerhalb des Modells während eines Simulationslaufes wird entweder die *kontinuierliche* Simulationsmethode oder die *diskrete* Simulationsmethode angewendet. Bei der kontinuierlichen Simulation erfolgt die Veränderung der Zustandsvariablen des Modells kontinuierlich, d. h. die Beschreibung des Systemverhaltens erfolgt mittels gekoppelter Differentialgleichungen (FURMANS et al. 2008, S. 78). Bei der diskreten Simulation erfolgt der Zustandswechsel sprunghaft zu diskreten Zeitpunkten (VDI 3633-1), wobei die Auslösung eines diskreten Events entweder durch das Eintreten eines zuvor terminierten Ereignisses (ereignisgesteuert) oder durch ein festes Zeitintervall (zeitgesteuert) erfolgt. Die zeitdiskret ereignisorientierte Simulationsmethode wird in der Literatur i. d. R. als *ereignisdiskrete Simulation (EDS)* bezeichnet (GUTENSCHWAGER et al. 2017; FURMANS et al. 2008).

2.3.2 Grundlagen der ereignisdiskreten Simulation

Allgemein dient die ereignisdiskrete Simulation (EDS) „zur Planung, Bewertung, Verbesserung und Steuerung von Systemen und Prozessen“ (WENZEL et al. 2008, S. 1). Bei der Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen wird deshalb i. d. R. die EDS-Methode verwendet, da sie u. a. für die Abbildung eines diskreten Materialflusses zwischen einzelnen Stationen entwickelt wurde (CLAUS et al. 2015, S. 232; CASSANDRAS & LAFORTUNE 2010). Die kontinuierliche Simulation spielt hierbei eine untergeordnete Rolle (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 25), weshalb in der Literatur mit dem Begriff *Materialflusssimulation* oftmals direkt der Einsatz der EDS-Methode gemeint ist (HOMPEL et al. 2018, S. 371). Im Kontext von Produktionssystemen teilen sich, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, die Anwendungsfelder in die Planungs-, Realisierungs- und Betriebsphase auf (VDI 3633-1, S. 4).

In der Planungsphase helfen Simulationsstudien bei der Absicherung und Verbesserung der Planung von Systemen und Prozessen. Simulation kann sowohl für Neuplanungen (eng. *Greenfield*) als auch für Überarbeitungen bestehender Systeme (eng. *Brownfield*) eingesetzt werden. Typische Aufgabenstellungen sind die Ermittlung von Kapazitäts-

2 Grundlagen und Begriffsklärung

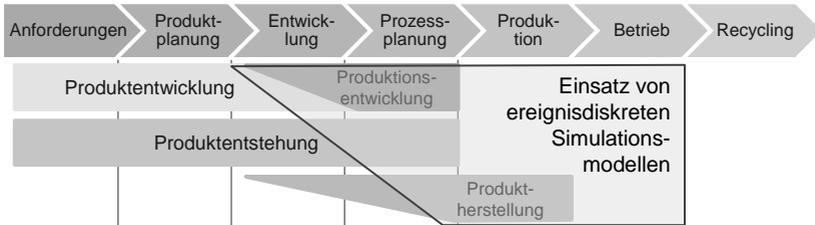


Abbildung 2.13: Einordnung des Einsatzes der EDS in den PLZ (vgl. Abschnitt 2.1.3)

grenzen und Schwachstellen der Anlage sowie die Beurteilung der Auswirkungen von möglichen Veränderungen der Einflussgrößen und Randbedingungen (VDI 3633-1, S. 6). In der Realisierungsphase ermöglicht die Simulation das Anlaufverhalten des Systems zu analysieren und kann zudem zur Mitarbeiterschulung sowie zum Training des Leitstandpersonals eingesetzt werden (VDI 3633-1, S. 7). Beim Einsatz in der Betriebsphase dient die Simulation zur kurzfristigen Bewertung von Ablaufvarianten sowie zur vorausschauenden Untersuchung von Strategien im Falle von Störungen oder Veränderungen im Betrieb (VDI 3633-1, S. 8). Weitere Anwendungsfelder der Simulation sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. In dieser Arbeit steht der Einsatz der Simulation in der Betriebsphase im Fokus. In Abschnitt 2.3.6 wird detailliert auf diesen Anwendungsfall eingegangen.

2.3.3 Vorgehen bei Simulationsprojekten

In VDI 3633-1 ist die grundsätzliche Vorgehensweise bei Simulationsstudien von Materialflusssystemen definiert. Das Vorgehen gliedert sich in die Phasen Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung, Experimente und Analyse sowie in die dazu parallel verlaufenden Schritte der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung. In Abbildung 2.14 sind zudem die jeweiligen Ergebnisse der einzelnen Phasen dargestellt. Alle Ergebnisdaten und -modelle müssen auf ihre Richtigkeit und Eignung untersucht werden. Dies erfolgt in der kontinuierlichen Verifikation und Validierung (V&V), die in allen Phasen begleitend ausgeführt wird. Bei der Verifikation (lat. *veritas* = Wahrheit) wird das Simulationsmodell auf dessen Korrektheit überprüft. Bei der Validierung (lat. *validus* = kräftig, wirksam, fest) hingegen wird untersucht, ob das Modell die Realität ausreichend genau wiedergibt und für Experimente verwendet werden kann (RABE et al. 2008, S. 13). Laut VDI 3633-1 ist die V&V eine der wich-

2.3 Simulation im produktionstechnischen Umfeld

Tabelle 2.1: Anwendungsfelder der Simulation in Anlehnung an (KOHL 2016, S. 29), SMITH (2003) und NEGAHBAN & SMITH (2014, S. 243)

Planungsphase	Realisierungsphase	Betriebsphase
Planungsabsicherung	Virtuelle Inbetriebnahme	Vorausschauende Untersuchung von Alternativstrategien
Funktionsprüfung	Entwicklung von Notfallstrategien	Einplanung neuer Aufträge in verfügbare Abläufe
Dimensionsprüfung (z. B. Puffer und Lager)	Darstellung der Funktionalität	Reaktion auf Störfälle
Einsparung/Vereinfachung von Systemelementen	Entwickeln und Prüfen von interagierender Software	Datengrundlage für Condition-Monitoring
Sensitivitätsanalyse zur Identifikation von kritischen Eingangsgrößen		Planung und Terminierung von Produktionsabläufen
Allgemeiner Systementwurf und Entwurf/Layout der Anlage		Steuerung in Echtzeit

tigsten Aufgaben in Simulationsprojekten. Die Prozesse der V&V werden als iterative Prüf- und Korrekturprozesse zur Modellbildung verstanden. Die Dokumentation der Ergebnisse ist nicht explizit als Phase ausgewiesen, ist jedoch in jedem Schritt enthalten und hat einen hohen Stellenwert (WENZEL et al. 2008, S. 5). Die einzelnen Schritte, welche in Abhängigkeit des Phasenergebnisses auch wiederholt durchlaufen werden können, werden im Folgenden kurz erläutert.

1. Aufgabendefinition: Die erste Phase dient der Schaffung eines Problemverständnisses, um daraus eine klare Zieldefinition formulieren zu können. Aus dem Gesamtziel, z. B. der Wirtschaftlichkeitsmaximierung, werden Teilziele, z. B. die Minimierung der Durchlaufzeit oder die Maximierung der Auslastung, abgeleitet. Diese Teilziele stehen oft in Wechselwirkung miteinander, weshalb die hierbei auftretenden Zielkonflikte mit Hilfe der Simulation aufgedeckt werden sollen. Im Rahmen der Aufgabendefinition wird der entsprechend notwendige Experimentplan definiert (VDI 3633-1, S. 21).

2. Systemanalyse: Durch eine Analyse und Abstraktion des realen Systems wird in

2 Grundlagen und Begriffsklärung

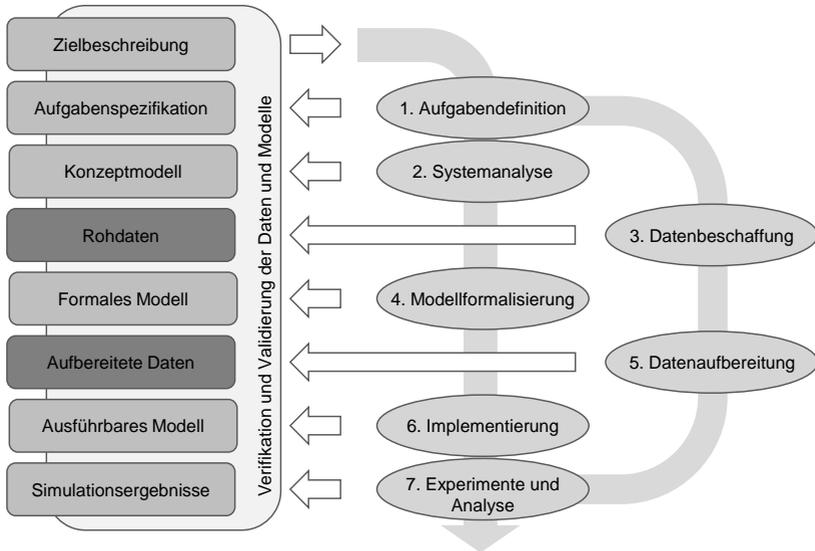


Abbildung 2.14: Vorgehen bei Simulationsstudien in Anlehnung an ASIM (1997) und VDI 3633-1

der Systemanalyse ein symbolisches, nicht ablauffähiges oder experimentierbares Konzeptmodell erstellt. Grundlegende Bestandteile sind die Untersuchung der Struktur und Funktion des Systems. Ausgehend von den Vorkenntnissen über das System sollen die für den weiteren Verlauf der Modellbildung wesentlichen Informationen und Wirkzusammenhänge von den unwesentlichen getrennt werden, um so zu einem besseren Systemverständnis zu gelangen. Zu diesem Zweck wird das betrachtete Objekt in einzelne Elemente zerlegt. Die Analyse kann ausgehend vom Ganzen hin zum Detail erfolgen (Top-Down-Ansatz) oder ausgehend vom Detail das Ganze schrittweise abbilden (Bottom-Up-Ansatz). Die Abstraktion des Problems kann sowohl durch Reduktion, d. h. die Eliminierung unwichtiger Details, als auch durch Idealisierung, d. h. eine Vereinfachung unverzichtbarer Details, erfolgen. Die Herausforderung besteht darin, den Detaillierungsgrad der verschiedenen Bereiche je nach Aufgabenstellung optimal zu wählen. Ein höherer Detaillierungsgrad korreliert mit steigenden Modellerstellungskosten und steht im Konflikt mit der Wirtschaftlichkeit von Simulationsergebnissen (VDI 3633-1, S. 22; WENZEL et al. 2008, S. 132).

4. Modellformalisierung und 6. Implementierung: Aus dem zuvor erstellten Kon-

zeptmodell wird in der Modellformalisierung ein detailliertes Modell mit konkreten Datenspezifikationen sowie Ablauflogiken generiert. Als Beschreibungsmethoden können hierzu Zustandsdiagramme, Blockdiagramme, Programmablaufpläne sowie Entscheidungstabellen für Strategien und Regeln verwendet werden. Bestandteile des formalen Modells sind bspw. die Modellstruktur, enthaltene Komponenten, der Detaillierungsgrad, die Datenspezifikation sowie Ablauflogiken. In der Phase der Implementierung wird anschließend das lauffähige Simulationsmodell in der ausgewählten Simulationssoftware umgesetzt. Dies geschieht in der Regel mit Hilfe der Programmierumgebung des Simulationswerkzeuges (VDI 3633-1, S. 31; WENZEL et al. 2008, S. 139 ff.).

3. Datenbeschaffung und 5. Datenaufbereitung: Die Datenbeschaffung und -aufbereitung basiert ebenfalls auf den zu Beginn definierten Zielen in der Aufgabenspezifikation. Parallel zur Modellbildung ausgeführt, besteht in der Praxis eine starke Vernetzung zwischen der Datenbeschaffung und -aufbereitung sowie den Phasen der Modellbildung. Für den Erfolg einer Simulationsstudie sind vollständige und fehlerfreie Daten ausschlaggebend. Der festgestellte Informationsbedarf muss deshalb gedeckt sein und die Daten auf eine ausreichende Qualität hin geprüft werden. Nach VDI 3633-1 werden die für die Simulation benötigten Daten folgendermaßen eingeteilt:

- Systemlastdaten (z. B. Auftragsdaten und Produktdaten)
- Organisationsdaten (z. B. Arbeitszeitorganisation und Ressourcenzuordnung)
- Technische Daten (z. B. Fertigungsdaten, Materialflussdaten und Stördaten)

Der genaue Bedarf an Umfang und Granularität der Daten klärt sich meist erst im Laufe des iterativen Durchlaufens des Vorgehensmodells. Die technischen und organisatorischen Daten sind nach BERGMANN (2014, S. 20) als statisch zu betrachten und werden direkt für die Modellerstellung benötigt. Die Systemlastdaten sind hingegen veränderlich und werden vor allem in der Experimentphase, das heißt bei der Ausführung der Simulation benötigt. Eine Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung ist für sämtliche Daten nötig. Laut WENZEL et al. (2008, S. 122) hängt die Qualität von Simulationsmodellen maßgeblich von der Qualität der Eingabedaten ab. Die Phasen der Datenbeschaffung und -aufbereitung haben daher eine hohe Relevanz, werden jedoch im Aufwand oft unterschätzt. Mögliche Datenquellen werden in Abschnitt 2.3.4 genauer beschrieben (VDI 3633-1, S. 33; WENZEL et al. 2008, S. 119 f.).

7. Experimente und Analyse: Nach der Erstellung des Modells sowie der Datenbeschaffung und -aufbereitung erfolgt die Experimentierphase. Hier werden verschiedene

2 Grundlagen und Begriffsklärung

Prozessszenarien und -alternativen gemäß des Experimentplans aus der Aufgabende-
finition simuliert, um zu Erkenntnissen bezüglich der definierten Ziele zu gelangen.
Nach Durchführung der Experimente erfolgt die Aufbereitung, Auswertung, Interpre-
tation und Dokumentation der Ergebnisse, bspw. in Form von Statistiken, Listen und
grafischen Darstellungen (z. B. Animationen) (VDI 3633-1, S. 16).

2.3.4 Datenquellen für ereignisdiskrete Simulationsmodelle

Wie in dem Vorgehensmodell nach VDI 3633-1 zu erkennen ist, sind Daten ein zentraler
Bestandteil von Simulationsstudien (BERGMANN 2014, S. 20). In Abhängigkeit von der
Zielstellung sind unterschiedliche Arten von Daten erforderlich. Zudem hängt der Um-
fang der benötigten Daten stark von der geforderten Detailtiefe des Simulationsmodells
sowie von der Komplexität des Systems ab (VDI 3633-1, S. 33). Die erforderlichen
Daten können in drei Bereiche gegliedert werden: Systemlastdaten, Organisationsdaten
und technische Daten. Eine weitere Unterteilung der Bereiche ist in Abbildung 2.15 zu
sehen.

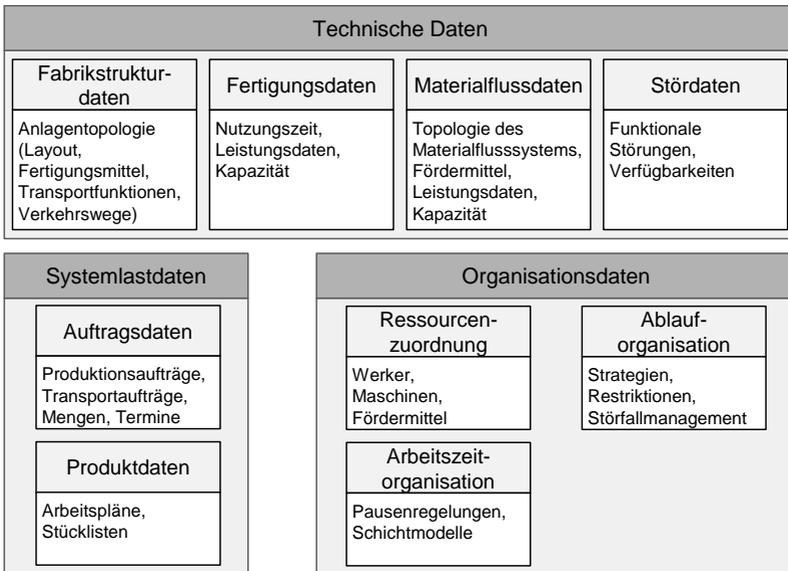


Abbildung 2.15: Daten für die Simulation in Anlehnung an VDI 3633-1

2.3 Simulation im produktionstechnischen Umfeld

Der Datenursprung kann aus unterschiedlichen Quellen stammen (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 161 ff.). Wie in Abbildung 2.16 dargestellt, verteilen sich die Datenquellen auf unterschiedliche Leitebenen eines Unternehmens. Für die EDS stellen vor allem die Daten aus den Systemen der *PPS* eine gute Basis dar, da diese Stammdaten (z. B. Erzeugnisstrukturdaten, Arbeitsplandaten und Betriebsmitteldaten) und Bewegungsdaten (z. B. Lagerbestände, Bedarfe und Aufträge) beinhalten. Aus der Unternehmensleitebene liefern häufig auch *Enterprise-Resource-Planning (ERP)*- oder *Data-Warehouses (DWH)*-Systeme relevante Daten. Auf der Ebene der Fertigungsleitebene sind die Daten in der Regel detaillierter. So dienen *Betriebsdatenerfassung (BDE)*-Systeme als Quelle für Daten zum Personaleinsatz, zu Aufträgen, Maschinen oder Betriebsmitteln, Fertigungshilfsmitteln, Lager und Material sowie Prozessen und Qualität aus dem laufenden Betrieb (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 163). Ebenfalls aus dem operativen Betrieb stammende Datenquellen sind *Manufacturing-Execution-Systeme (MES)*, die zwischen den PPS- und BDE-Systemen einzuordnen sind, und *Lagerverwaltungssysteme (LVS)*, die Informationen zu Lagerorten, Menge und Material enthalten. Umfangreiche Daten zu laufenden Prozessen können über *Supervisory-Control-and-Data-Acquisition (SCADA)*-Systeme bezogen werden, die neben aufbereiteten BDE-Daten auch Daten zu Steuerbefehlen und -logiken enthalten (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 228; VDI 3699-1). Auf unterster Ebene, der Fertigungsebene, liefern speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) in erster Linie relevante Daten für die Simulation. In manchen Fällen können Daten direkt von Sensoren oder Aktoren abgegriffen und genutzt werden.

Neben den Daten aus dem Betrieb stellen vor allem Quellen aus anderen Phasen des PLZ wichtige Daten für die Simulation bereit. In der Engineering-Phase (siehe Abschnitt 2.1.3) liefern in erster Linie *Computer-aided-x (CAx)*-Systeme, wie bspw. *Computer-aided Design (CAD)*, *Computer-aided Manufacturing (CAM)* oder *Computer-aided Planning (CAP)* wichtige Daten für Simulationsmodelle. Diese Daten befinden sich in der Regel in den *Product-Lifecycle-Management (PLM)*-Systemen (KURBEL 2016, S. 380 ff.; GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 164).

Bei der Verwendung der Daten aus Planungsphasen ist zu beachten, dass es sich oft um Annahmen handelt, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussage zu den exakten Daten getroffen werden kann (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 2). Das Treffen von Annahmen ist in Zusammenarbeit mit Experten jedoch oft der einzig sinnvolle Weg, um zu einer ausreichenden Datenbasis zu gelangen. Die für diese Arbeit hilfreichen Methoden werden in Abschnitt 6.4 vorgestellt. Weitere Herangehensweisen sind in GUTENSCHWAGER et al. (2017, S. 166), (BERNHARD et al. 2007) und (BERNHARD &

2 Grundlagen und Begriffsklärung

WENZEL 2005) detailliert beschrieben.

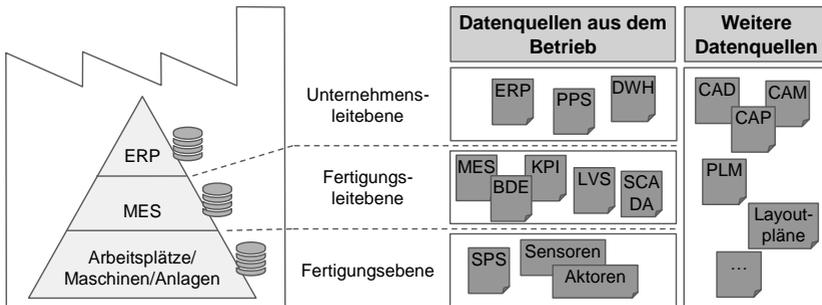


Abbildung 2.16: Auswahl an möglichen Datenquellen für die EDS sowie Einteilung in die Leitebenen eines Unternehmens in Anlehnung an VDI 5600-1, VDMA 66412-1 und GUTENSCHWAGER et al. (2017, S. 161 ff.)

2.3.5 Parametrisierung von Simulationsmodellen

Für die Erstellung eines ausführbaren Modells werden in der Phase der Implementierung (vgl. Abbildung 2.14) die Simulationsobjekte (z. B. Bearbeitungsstationen, Schichtpläne etc.) des formalen Modells mit Parametern versehen, um das zeitliche Verhalten des realen Systems abzubilden (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 157). Dieser Schritt wird in der Literatur als Parametrisierung oder Parametrierung des Simulationsmodells bezeichnet. In dieser Arbeit wird der Begriff Parametrisierung verwendet. In der Praxis kommt es vor, dass (noch) keine empirischen Daten vorliegen, die für die Parametrisierung verwendet werden können. In diesen Fällen muss entweder auf Basis von existierendem Wissen über den zugrunde liegenden Prozess eine theoretische Verteilung abgeleitet oder eine Schätzung auf Basis von Erfahrungswissen durchgeführt werden (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 126; LAW 2015, S. 283 ff.).

Eine Sonderform ist die Initialisierung, bei der das Simulationsmodell anhand von Betriebsdaten auf einen bestimmten oder den aktuellen Zustand des Produktionssystems parametrisiert wird. Dadurch kann die Einschwingphase des Simulationsmodells bei einer erneuten Ausführung des Modells reduziert oder eliminiert werden (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 251; WENZEL et al. 2008, S. 141).

2.3.6 Betriebsbegleitende Simulation

Die ereignisdiskrete Simulation findet sowohl in der Neu- bzw. Umplanung von Produktionsstrukturen (planungsbegleitend) als auch während des Betriebs ihre Anwendung (SELKE 2005, S. 16). Im Vergleich zur planungsbegleitenden Simulation haben die Simulationsexperimente in der betriebsbegleitenden Simulation eine kürzere Simulationszeit, da sie sich vorwiegend mit Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung auseinandersetzen, um „während der Betriebsphase die operative Planung des Fabrikbetriebs an permanent wechselnde Randbedingungen anzupassen und zu verbessern“ (VDI 4499-2, S. 15). Sie dient vor allem bei folgenden Aufgaben der PPS als unterstützende Methode (VDI 3633-1, S. 8):

- Produktionsprogrammplanung
 - Mengenplanung
 - Termin- und Kapazitätsplanung
 - Auftragsfreigabe
 - Auftragsüberwachung
- } Produktionsplanung
} Produktionssteuerung

Zudem werden betriebsbegleitend Störfälle und Veränderungen untersucht. Die Bewertung, Auswahl und Parametrisierung von Steuerungsstrategien sowie die Terminierung von Aufträgen erfolgen basierend auf einem existierendem Simulationsmodell aus der Entwurfsphase. Typische Fragestellungen sind gemäß VDI 3633-1:

- Untersuchung von Dispositionsalternativen in der Fertigungssteuerung
- Variantenuntersuchung zur operativen Entscheidungsfindung, z. B. für situationsabhängige Maschinenbelegungen, Auftragsreihenfolgen, Losgrößen und Personaleinsatz
- Überprüfen von Notfallstrategien oder von Sofortmaßnahmen vor der Realisierung bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Ausbringung, z. B. Sperren von Parallelbahnen oder das sequenzielle Ausweichen auf andere Transportmittel
- Ausbildung neuer Mitarbeiter
- Variantenuntersuchungen für Prognosezwecke bezüglich veränderter Produktstruktur, Ausbringung, verändertem Arbeitszeitmodell, Maschinenpark und Arbeitsablauf oder bezüglich der Ausgliederung von Fertigungsstufen

Eine besondere Herausforderung ist die kontinuierliche Anpassung des Modells an die sich ändernden Bedingungen des realen Produktionssystems (DITTLER et al. 2022;

2 Grundlagen und Begriffsklärung

BOHÁCS et al. 2012, S. 559). Findet keine Anpassung statt, erhöht sich der Modellfehler (engl. *reality gap*) mit der Zeit, wie in Abbildung 2.17a dargestellt (HÄRLE et al. 2021). Mittels einer Anpassung des Simulationsmodells während der Laufzeit des realen Systems kann der Modellfehler des Simulationsmodells reduziert und die Ergebnisqualität der Simulationsexperimente erhöht werden (vgl. Abbildung 2.17b).

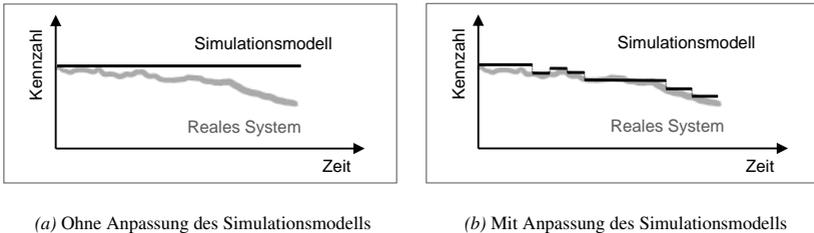


Abbildung 2.17: Abweichung zwischen der Simulation und dem realen System in Anlehnung an BOHÁCS et al. (2012, S. 559) und NYHUIS (2009, S. 53)

In Abbildung 2.18 ist hierzu ein möglicher Aufbau einer betriebsbegleitenden Simulation dargestellt. Im Simulationsmodell werden auf Basis des Produktionsziels unterschiedliche Szenarien getestet, um die operative Planung des Fabrikbetriebs zu verbessern (VDI 4499-2, S. 15). Der Ist-Zustand des realen Produktionsprozesses muss hierfür in das Simulationsmodell übertragen werden, damit Veränderungen und Störungen bei den Simulationsexperimenten berücksichtigt werden können.

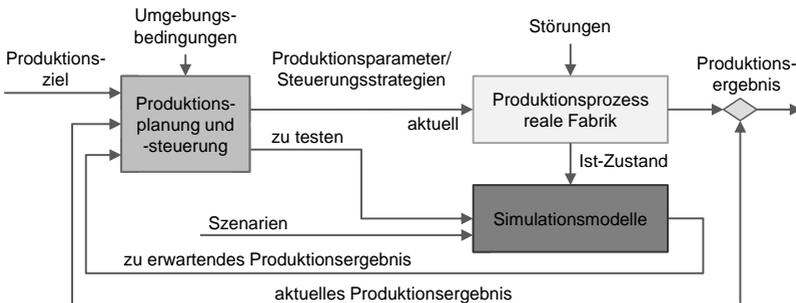


Abbildung 2.18: Komponenten einer betriebsbegleitenden Simulation in Anlehnung an VDI 4499-2

2.3.7 Güte von Simulationsmodellen

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, ist ein Simulationsmodell immer eine vereinfachte Darstellung eines realen Systems und dient der Durchführung von Experimenten. Die Fragestellung sowie der notwendige Abstraktionsgrad legen die erforderliche Güte des Simulationsmodells fest. In der Planungsphase, in der Simulationsmodelle als internes Design- und Engineering-Werkzeug zum Einsatz kommen, liegt die Entscheidung bezüglich der geforderten Qualität oftmals bei den Entwicklern (ROSEN et al. 2020, S. 16). Der Sicherung der Güte eines Simulationsmodells ist besonders relevant, da ansonsten wertlose oder irreführende Simulationsergebnisse erzeugt werden, die zu Fehlentscheidungen führen. Gerade in der betriebsbegleitenden Simulation führt dies im Nachgang zu zusätzlichen Aufwänden in der Produktion (GUTENSWAGER et al. 2017, S. 202; WENZEL & PETER 2017).

Für die Sicherung der Qualität von Simulationsprojekten legen WENZEL et al. (2008, S. 169) fünf grundlegende Qualitätskriterien fest:

1. Sorgfältige Projektvorbereitung
2. Konsequente Dokumentation
3. Durchgängige Verifikation und Validierung
4. Kontinuierliche Integration des Auftraggebers
5. Systematische Projektdurchführung

Auf das Simulationsmodell und dessen betriebsbegleitenden Einsatz bezogen, ist die durchgängige Verifikation und Validierung relevant für die Sicherstellung der Modellgüte (vgl. Abschnitt 2.3.3). Die in Tabelle 2.2 gelisteten V&V-Kriterien für die Simulation in Produktion und Logistik geben einen Überblick über die zu berücksichtigenden Aspekte. Für die betriebsbegleitende Simulation sind relevante Beispiele der jeweiligen V&V-Kriterien gegeben.

Ein formal vollständiger Beweis, dass ein Simulationsmodell gültig ist, ist durch eine V&V nicht möglich. Sie erhöht jedoch das Vertrauen in das Modell (RABE et al. 2008, S. 20). Um die Durchführung zu erleichtern, haben BARTH et al. (2020) ein Schema entwickelt, das basierend auf der ISO/IEC 25010 aus der Software-Entwicklung die Qualität von Simulationsmodellen systematisch bewertet.

2 Grundlagen und Begriffsklärung

Für eine Detaillierung sei an dieser Stelle auf die beiden Veröffentlichungen (BARTH et al. 2020, 2021) verwiesen, in denen die Metrik zur objektiven Feststellung der Qualität von Simulationsmodellen beschrieben ist.

Tabelle 2.2: V&V-Kriterien für die Simulation in Produktion und Logistik in Anlehnung an RABE et al. (2008, S. 22)

V&V-Kriterien	Beispiele für den Untersuchungsgegenstand mit der betriebsbegleitenden Simulation
Vollständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung des Grades der Übereinstimmung zwischen Anforderungen und Modell
Konsistenz	<ul style="list-style-type: none"> • Schlüssigkeit der Struktur
Genauigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Wahl des angemessenen Detaillierungsgrades • Richtige Granularität der Daten • Richtige Wahl der Zufallsverteilungen
Aktualität	<ul style="list-style-type: none"> • Inhaltliche und zeitliche Gültigkeit der Informationen und Daten im Hinblick auf ihre Verwendung • Gültigkeit des Modells für die Aufgabenstellung
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzbarkeit des Modells für den Verwendungszweck • Angemessenheit in Bezug auf die Aufgabenstellung • Leistungsfähigkeit des Modells • Nutzen für den Anwender
Plausibilität	<ul style="list-style-type: none"> • Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge • Schlüssigkeit der Ergebnisse
Verständlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Nachvollziehbarkeit für den Anwender • Transparenz in der Modellierung
Machbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Erreichbarkeit der geforderten Projektziele
Verfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeit des Zugriffs auf die notwendigen Daten und Dokumente • Glaubwürdigkeit der Informations- und Datenquellen • Aufwand der Beschaffung

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Gemäß dem Vorgehen nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 222) erfolgt in diesem Kapitel die Zusammenfassung des Standes der Wissenschaft und Technik. Der Fokus liegt auf den Kernaussagen der relevanten Veröffentlichungen in den jeweiligen Fachbereichen. Weitere Literaturquellen, die ähnliche Ergebnisse oder nur teilweise relevante Inhalte präsentieren, werden nicht im Detail vorgestellt, jedoch mit einem entsprechenden Verweis im Literaturverzeichnis gelistet. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.4 eine Interpretation und Reflexion der Literatur sowie die Ableitung des Handlungsbedarfes. Im abschließenden Abschnitt 3.4.2 erfolgt die Ableitung der spezifischen Fragestellung dieser Arbeit mit den resultierenden Forschungsfragen.

3.1 Automatisierte Generierung und Synchronisierung von ereignisdiskreten Simulationsmodellen

In Abschnitt 3.1.1 werden die relevanten Ansätze aus dem Themengebiet der automatisierten Generierung von EDS-Modellen zusammengefasst. Der nachfolgende Abschnitt 3.1.2 ist der Synchronisierung von EDS-Modellen gewidmet.

3.1.1 Automatisierte Simulationsmodellgenerierung

Nachfolgend werden die Ansätze zur automatisierten Simulationsmodellgenerierung vorgestellt. Da die Arbeiten größtenteils aufeinander aufbauen, erfolgt die Zusammenfassung chronologisch.

Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung

SELKE (2005) erforschte Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung für die Nutzung der Simulation über kurzfristige Zeithorizonte zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen von Fragestellungen der PPS. Die Methoden fokussieren die

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Modellgenerierung für den betriebsbegleitenden Einsatz, bei der das Simulationsmodell für kurzfristige operative Anwendungsfälle im turbulenten betrieblichen Umfeld angewendet wird. Die abgeleiteten Anforderungen umfassen eine schnelle und effiziente Anpassung des Simulationsmodells an die aktuelle Betriebssituation der Produktion, Integrierbarkeit in die alltäglichen Abläufe der PPS sowie die Forderung nach einem hohen Detaillierungs- und Vertrauensgrad der Simulationsergebnisse. Die entwickelten Methoden zur Simulationsmodellgenerierung enthalten unter anderem die Identifikation von Strategien und Abläufen. Daten aus der BDE werden mit zuvor manuell definierten Arten von Strategien verglichen und mittels einer Mustererkennung einer der definierten Kontrollstrategien zugeordnet. Beispielsweise werden die Abarbeitungsreihenfolgen an Arbeitsstationen mittels des Korrelationsverhaltens zwischen der absoluten Zugangs- und Abgangsreihenfolge detektiert und anhand der Mustererkennung die Art der Reihenbildung klassifiziert. Dieser Ansatz erfordert trotz der automatisierten Prozesse bei der Modellgenerierung immer noch einen hohen manuellen Aufwand bei der Datenerfassung und -aufbereitung.

CMSD-basiertes Framework zur automatischen Simulationsmodellgenerierung

BERGMANN (2014) stellte ein Rahmenwerk zur Automatisierung der Simulationsmodellgenerierung vor. Er unterscheidet zwischen der Modellgenerierung, -initialisierung und Adaption der Simulation. Der Fokus seiner Arbeit liegt auf der Modellgenerierung. Für diese setzte er das von der Simulation Interoperability Standards Organization (SISO) standardisierte *Core-Manufacturing-Simulation-Data* (CMSD)-Informationsmodell für den Datenaustausch ein. CMSD ist ein offener Standard, der computerinterpretierbar einen effizienten Austausch von Fertigungsdaten zur Erstellung und Ausführung von Fertigungssimulationen ermöglicht. Der Standard wurde unter der Schirmherrschaft der SISO entwickelt (YUNG-TSUN LEE et al. 2013). Kern des Frameworks von Bergmann ist die detaillierte Interpretation sowie Erweiterung des CMSD-Informationsmodells um relevante Anwendungsfälle bei der Materialflusssimulation in Produktionssystemen. Mit Hilfe eines UI können Anwender der Simulation, darunter auch Nicht-Simulationsexperten, eine Modellgenerierung starten. Hierzu werden mittels einer Schnittstelle zu MES- und ERP-Systemen die erforderlichen Daten in CMSD-Dateien gespeichert und anschließend im Modellgenerator, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, in ein ausführbares Simulationsmodell überführt.

3.1 Automatisierte Generierung und Synchronisierung von EDS

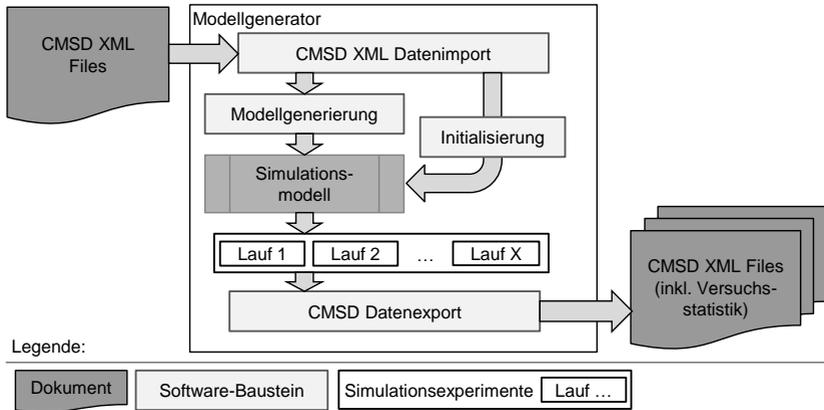


Abbildung 3.1: CMSD-basierter Modellgenerator in Anlehnung an BERGMANN (2014)

Der Ansatz nach BERGMANN (2014) reduziert die Aufwände für die Modellgenerierung und erleichtert die Bedienung für Nicht-Simulationsexperten. Jedoch eignet sich sein Ansatz nicht für die Adaption von Simulationsmodellen, worunter die betriebsbegleitende Parametrisierung fällt (BERGMANN 2014, S. 205 f.).

Ansatz zur automatisierten Entwicklung und Parametrierung von Simulationsmodellen

Aufbauend auf dem CMSD-Ansatz von BERGMANN (2014) und den Methoden nach SELKE (2005) erweiterten MILDE & REINHART (2019) den automatisierten Ansatz, um die manuellen Aufwände bei der Modellgenerierung und Parametrierung weiter zu reduzieren. Unter anderem erweiterten sie die Identifikation von Steuerungsstrategien mittels *Sequential Pattern Mining* (SPM) nach YANG et al. (2003), um die manuellen Aufwände bei der Mustererkennung zu eliminieren. Der Ansatz verlagert die Aufwände hin zur korrekten Erfassung von Tracking-Daten und Fehlerdaten von Anlagen mittels MES. Die weitere Verarbeitung der Daten zur Identifikation des Materialflusses, die individuellen Modellparameter sowie die Steuerungsstrategien werden im Nachgang automatisiert. MILDE & REINHART (2019) beschrieben die Schritte bis zu einem formalisierten Simulationsmodell, gingen dabei aber lediglich auf den Schritt der Modellgenerierung ein.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

MILDE & REINHART (2019) weisen darauf hin, dass noch weitere Forschungsarbeit für die Entwicklung und Erweiterung von Methoden zur Behandlung von Daten geringerer Qualität erforderlich ist. Dies könnte durch die Integration eines Assistenzsystems realisiert werden, um fehlende Informationen durch Expertenwissen mittels manueller Eingabe zu ergänzen. Zudem ist anzumerken, dass der Ansatz von MILDE & REINHART (2019) noch nicht mit Daten eines realen Produktionssystems getestet wurde.

Automatisierte Modellentwicklung für die Simulation von globalen Produktionsnetzwerken

Ihren Ansatz zur automatisierten Entwicklung und Parametrierung aufgreifend, gehen MILDE & REINHART (2022) auf die Modellentwicklung für globale Produktionsnetzwerke (GPN) ein, da die bis dahin der Regel nicht in der notwendigen Ausführlichkeit gegeben. Die fehlende Datenverfügbarkeit lösen MILDE & REINHART (2022) mittels einer Wissensbasis, die als Ontologie umgesetzt werden soll. Zunächst sollen anhand der Ontologie die im GPN entstehenden Daten modelliert sowie ihre Informationsflüsse und Verknüpfungen mit Produktions- und Logistikprozessen abgebildet werden. Zudem werden in der Ontologie die Auftragsabwicklung mit ihren Elementen, die Produktionsplanung und -steuerung, die Informations- und Materialflüsse sowie die Verbindungen zwischen diesen Elementen modelliert. MILDE & REINHART (2022, S. 472) weisen darauf hin, dass eine entsprechende Ontologie bisher nicht zur Verfügung steht und diese im weiteren Verlauf ihrer Forschungsarbeit entwickelt werden soll.

3.1.2 Synchronisierung von Simulationsmodellen

Nachfolgend werden die relevanten Forschungsergebnisse im Bereich der Synchronisierung von Simulationsmodellen vorgestellt. Im Gegensatz zur Modellgenerierung geht die Synchronisierung davon aus, dass bereits ein Modell vorhanden ist, welches an die aktuellen Bedingungen der Realität angepasst wird.

Überwachung und Diagnose mit betriebsparallelen Simulationsmethoden

Der Ansatz von KAIN et al. (2010) nutzt die Simulation in erster Linie, um die reale Produktion zu überwachen und Veränderungen in der Realität zu diagnostizieren. Für diese Arbeit relevant ist vor allem die Architektur der Parallelsimulation, wie sie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, da es sich beim verwendeten Simulationsmodell um eine

3.1 Automatisierte Generierung und Synchronisierung von EDS

Echtzeitsimulation auf Steuerungsebene handelt und nicht um eine ereignisdiskrete Simulation. Für die Erfassung von Abweichungen des spezifizierten Anlagenverhaltens wird kontinuierlich der Betriebszustand der Anlage über Sensoren erfasst und mit dem Zustand der Simulation zu diesem Zeitpunkt verglichen. Dieses Vorgehen ähnelt dem eines Beobachters aus der Regelungstechnik. Vor dem Betrieb der Simulation als Überwachungs- und Diagnosesystem erfolgt die Feinparametrierung des Simulationsmodells mit der in Betrieb genommenen Anlage. Hierfür ist ein Parallellauf der Simulation mit der realen Anlage im fehlerfreien Fall erforderlich, um die Parameter zu bestimmen (KAIN et al. 2010, S. 450).

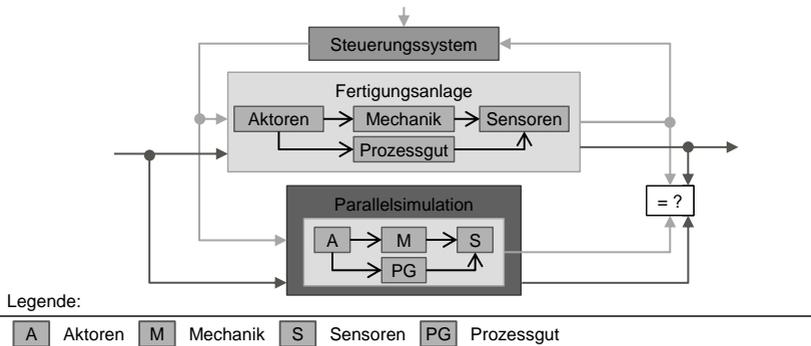


Abbildung 3.2: Architektur der Parallelsimulation von KAIN et al. (2010, S. 448)

Ansatz zur adaptiven Materialflusssimulation

BOHÁCS et al. (2012) stellten einen Ansatz zur Synchronisierung der Materialflusssimulation vor. Der Ansatz, welcher in Abbildung 3.3 zu sehen ist, baut auf überwachende Methoden mittels künstlicher Intelligenz (KI), die folgende Aufgaben übernehmen: Terminierung der Module *Optimierung* und *Adaption*, Steuerung der *Middleware*, Steuerung der Daten des Simulationseingangs sowie der Simulationsergebnisse und Erzeugung von Feedback-Daten für das *Human Machine Interface* (HMI). Hervorzuheben ist der Einsatz der *Middleware*, die eine Reduktion auf die zur Synchronisierung relevanten Daten aus dem realen System durchführt. Bedingung für den Einsatz des Ansatzes ist, dass das Simulationsmodell von außen durch eine andere Anwendung ausführbar und modifizierbar sein muss. BOHÁCS et al. (2012) gehen in ihrer Veröffentlichung nicht weiter auf die Umsetzung oder Implementierung des Konzepts ein.

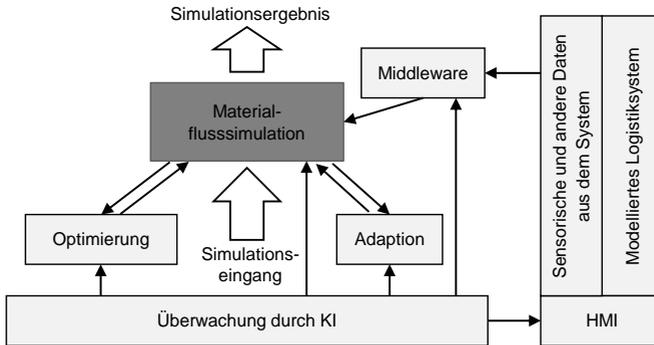


Abbildung 3.3: Konzept einer adaptiven Materialflusssimulation in Anlehnung an BOHÁCS et al. (2012, S. 563)

Einbindung von Maschinendaten in adaptives Simulationsmodell

DENKENA et al. (2017) beschäftigten sich mit der automatisierten Integration von Maschinendaten in adaptive Materialflusssimulationen, um der zeit-, personal- und kostenintensiven Modellpflege entgegenzuwirken. Sie bezeichnen ihr Konzept als digitalen Schatten der Fertigung, der sich dem realen Produktionssystem situativ anpasst. Die Herausforderung sahen DENKENA et al. (2017) in der Auswahl relevanter Informationen und der Zuordnung passender Maschinendaten für die Adaption des Simulationsmodells der Fließfertigungslinie. Die Parameterauswahl erfolgt in vier Schritten. In Schritt eins werden die relevanten Daten zur Durchführung der Simulationsstudie bestimmt. In Schritt zwei folgt eine Filterung nach der Frage, ob sich die erforderlichen Daten aus den Maschinendaten bestimmen lassen. In der anschließenden Klassifizierung in Schritt drei wird die gefilterte Parameterauswahl in deterministische und stochastische Daten unterteilt. Abschließend erfolgt in Schritt vier eine Analyse der Daten hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Modelladaption. Die Relevanz ist durch die Häufigkeit der Ausprägungsänderung bestimmt und hängt vom Anwendungsszenario ab. Von den Autoren genannte Beispiele zu deterministischen Daten umfassen Pufferfüllstände, Bearbeitungs- und Rüstzeiten. Zu stochastischen Parametern werden die Maschinenstördauer und der Störabstand gezählt. Nach der Festlegung der notwendigen Datenbasis erfolgt in Schritt vier eine Auswahl geeigneter Schnittstellen, Übertragungsprotokolle und Speichermöglichkeiten zur Realisierung der automatisierten Datenerfassung. Die Maschinen- und Betriebsdaten werden in eine SQL-Datenbank übertragen. Die Autoren entwickelten eine Applikation, welche die für die Simulationsstudie notwendigen Daten aus der

3.1 Automatisierte Generierung und Synchronisierung von EDS

Datenbank ausliest und in eine durch die Materialflusssimulationssoftware vorgegebene XML-Struktur schreibt. Mithilfe von Auswertungsroutinen im Simulationsmodell wird das im Shopfloor aufgezeichnete Maschinenverhalten auf die Simulationsbausteine übertragen (BRUNNER 2019, S. 69 f.; DENKENA et al. 2017, S. 38 f.). Mit dem Vorgehen von DENKENA et al. (2017) ist die Schaffung eines Simulationsmodells möglich, welches sich auf Basis der vorhandenen Daten an den aktuellen Ist-Zustand des Produktionssystems adaptiert. Hierbei unberücksichtigt bleibt die Ermittlung der Ursache einer Abweichung sowie die zu erwartende zeitliche Veränderung der Abweichung. In den Simulationsexperimenten unberücksichtigt bleiben zukünftige Veränderungen der Abweichungen, bspw. hervorgerufen durch Instandhaltungsmaßnahmen.

Prozessüberwachung zur Erkennung von Änderungen

In einem ähnlichen Ansatz zu KAIN et al. (2010) nutzen ZIPPER & DIEDRICH (2019) das Prinzip eines Beobachters, um Änderungen zwischen Simulation und Realität zu erkennen. Die Erfassung der erforderlichen Daten aus dem Prozess stammt aus einer vorherigen Veröffentlichung (ZIPPER et al. 2018). Der Ansatz unterscheidet sich von den beschriebenen Ansätzen von KAIN et al. (2010) und DENKENA et al. (2017) hinsichtlich der Granularität der Kopplung und Auswertung der Daten. Die Autoren integrieren eine direkte Anbindung der Live-Daten in das Simulationsmodell, wodurch das Modell automatisiert an das reale Verhalten der Anlage angepasst wird. Hierzu ist das exakte physikalische Verhalten der realen Anlage zu modellieren und der mathematische Zusammenhang zu identifizieren, um Anpassungen am Simulationsmodell durchführen zu können. Der Ansatz ist in diesem Zusammenhang nur auf zeit-kontinuierliche Co-Simulationen anwendbar.

Methodik zur Synchronisierung von Modellen

ASHTARI TALKHESTANI (2020) entwickelte die sogenannte Ankerpunktmethodik, um Modelle des digitalen Zwillings (DZ) zu synchronisieren. Die Methodik, welche in seiner Dissertation (ASHTARI TALKHESTANI 2020) veröffentlicht ist, basiert auf folgenden Publikationen: ASHTARI TALKHESTANI & WEYRICH (2017), ASHTARI TALKHESTANI et al. (2018a) und ASHTARI TALKHESTANI et al. (2018b). Die Ankerpunktmethodik detektiert Änderungen zwischen Modellen des digitalen Zwillings, darunter auch Simulationsmodelle, und der Realität. Ein Ankerpunkt ist dabei die kleinste „Granularität einer mechatronischen Komponente, in den unterschiedlichen Domänen innerhalb des Gesamtsystemmodells“, die anhand einer eindeutigen ID referenziert werden kann

(ASHTARI TALKHESTANI 2020, S. 55). Beispiele für Ankerpunkte sind Ein- und Ausgangssignale von Sensoren und Aktoren. Mittels der eindeutigen Zuordnung anhand der ID in einem Systemmodell sowie der Analyse der Daten aus den Ankerpunkten eignet sich die Ankerpunktmethodik sowohl für die Erfassung struktureller Änderungen als auch Änderungen im Prozessverhalten. Erfasste Abweichungen werden durch das System in Form von *Change-Request-Modellen* den Systemingenieuren präsentiert, die Anpassungen auf Basis der erfassten Daten durchführen können. Die vorgestellte Ankerpunktmethodik ist zum einen primär für Neuentwicklungen geeignet, da eine Namenskonvention während der Entwicklung angewendet werden muss (BRAUN et al. 2022). Zum anderen sieht die Methodik keine Nutzung von Expertenwissen bei der Anreicherung von Informationen über eine Abweichung vor.

3.2 Vorgehen zur Optimierung der Datenerhebung und -verarbeitung

Aus den vorgestellten Arbeiten zur Generierung und Synchronisierung von Simulationsmodellen wird ersichtlich, dass die Erfassung und Verarbeitung von Daten aus der Produktion (vgl. Abschnitt 2.3.4) eine zentrale Rolle spielen. Nachfolgend werden daher Arbeiten vorgestellt, die relevante Vorgehen zur Erhebung und Verarbeitung von Produktionsdaten im Simulationskontext erarbeitet haben.

Methodik für die Verwaltung von Input-Daten

SKOOGH et al. (2012) stellten ein automatisiertes Datenmanagement für Eingangsdaten für EDS-Modelle vor. Ihr sogenanntes *Generic Data Management Tool* (GDM-Tool) automatisiert mehrere wichtige und zeitaufwändige Aktivitäten bei der Dateneingabe. Das GDM-Tool besteht dabei aus einem manuellen Konfigurationsmodus und einem automatisierten Betriebsmodus. Während der Konfiguration wird die Datenerhebung und -verarbeitung manuell von Experten durchgeführt, um die erforderlichen Daten für die Simulation im CMSD-Format (vgl. BERGMANN (2014)) zu exportieren. Die manuellen Schritte der Konfiguration werden im GDM-Tool gespeichert und können im weiteren Verlauf wiederkehrend automatisiert ausgeführt werden. Die Zeitersparnis bei der Generierung von Eingangsdaten ergibt sich demnach erst bei wiederholter Ausführung eines Simulationsexperiments, bei dem sich lediglich die Werte der Eingangsdaten verändert haben.

Methodik zur kontinuierlichen Qualitätssicherung von Produktionsdaten

BOKRANTZ et al. (2015) erarbeiteten eine Methodik zur kontinuierlichen Qualitätssicherung von Produktionsdaten durch das Sammeln und Umsetzen von Datenanforderungen verschiedener Nutzer. Die Methodik enthält zudem einen strukturierten Ansatz für das Eingangsdatenmanagement für EDS-Modelle. Die Autoren nutzen dabei das von SKOOGH et al. (2012) vorgestellte GDM-Tool, um Simulationsmodellen aktuelle Daten aus der Produktion bereitzustellen. Der Fokus der Methodik liegt auf der Fragestellung, welche Prozessschritte eingeführt werden müssen, um die Datenqualität für alle Beteiligten im Produktionsumfeld zu verbessern. Die Methodik orientiert sich stark am Anwendungsszenario der Produktion bei der Volvo Car Group in Torslanda (Schweden). Zur Qualitätssicherung der Daten setzen BOKRANTZ et al. (2015) auf regelmäßige Treffen zwischen der zentralen Instandhaltung, die für die Sammlung der Daten verantwortlich ist, und den Nutzern der Daten, die ihre Anforderungen an die Daten aus der Produktion in Textdokumenten spezifizieren. Bei der vorgeschlagenen Methodik handelt es sich in erster Linie um eine konzeptionelle Arbeit, die noch weiter präzisiert werden muss, bevor sie in der Praxis umgesetzt werden kann. In einer Fallstudie erforschten BOKRANTZ et al. (2018) daher detaillierter die Datenqualitätsprobleme bei EDS-Studien von Fertigungsprozessen. Ergebnis der Fallstudie sind praktische Leitlinien zur Verbesserung der Datenqualität in der EDS. Die Leitlinien sind in drei Bereiche gegliedert: Leitlinien für die Verwaltung von Eingangsdaten, Leitlinien für die Rolle von Simulationsanalysten sowie Leitlinien für den Datenproduktionsprozess. Für diese Arbeit ist die Relevanz der Simulationsexperten und die Zusammenarbeit mit anderen Personen aus dem Engineering und der Produktion bei der Erhebung von Daten und den Zusammenhängen mit den Vorkommnissen an der Anlage hervorzuheben, vor allem wenn Daten nicht vorhanden oder nicht in der erforderlichen Qualität verfügbar sind.

3.3 Einsatz von Wissen in der Produktion und Simulation

Wie in Kapitel 1 und Kapitel 2.2 eingeführt, ist Wissen wichtiges Kapital, um als Unternehmen erfolgreich Produkte zu produzieren und zu verkaufen. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ansätze in Bezug auf eine wissensbasierte Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle vorgestellt. In Abschnitt 3.3.1 werden relevante Ansätze des Wissensmanagements in Unternehmen und im speziellen auch in der Produktion zusammengefasst. Anschließend werden in Abschnitt 3.3.2 die wichtigsten Ontologien im Produktions- und Simulationsumfeld beschrieben.

3.3.1 Relevante Ansätze des Wissensmanagements

Wissensspirale nach NONAKA & TAKEUCHI (2012)

Mit ihrem Konzept der Wissensspirale konzentrieren sich NONAKA & TAKEUCHI (2012, S. 89 ff.) hauptsächlich auf die Prozesse der Wissenserzeugung und Wissensweitergabe innerhalb der vier Phasen der Wissenstransformation (vgl. Abschnitt 2.2.3). Das Konzept wird auch SECI-Modell genannt, entsprechend den englischen Anfangsbuchstaben der vier Phasen: Sozialisierung (engl. *Socialization*), Externalisierung (engl. *Externalization*), Kombination (engl. *Combination*) und Internalisierung (engl. *Internalization*). Ausgangspunkt ist immer die Sozialisierung, in der das Bilden von Teams und Arbeitsgruppen zum gegenseitigen Austausch von Erfahrungen und Meinungen führt. Anschließend wird versucht, das implizite Wissen zu externalisieren, indem nach dem iterativen *Trial-and-error*-Prinzip das Wissen präsentiert und dokumentiert wird. Die dynamische Interaktion aller vier Transformationsmodi führt letztlich zur Generierung und Weitergabe von neuem Wissen. Die Wissensspirale mit ihren beidseitigen Pfeilen verdeutlicht, dass sowohl Wissen von einem Individuum mittels des SECI-Modells zu einer Vergrößerung der Wissensbasis eines Unternehmens führt als auch Wissen des Unternehmens auf ein einzelnes Individuum übertragen werden kann (NONAKA 1994, S. 20).

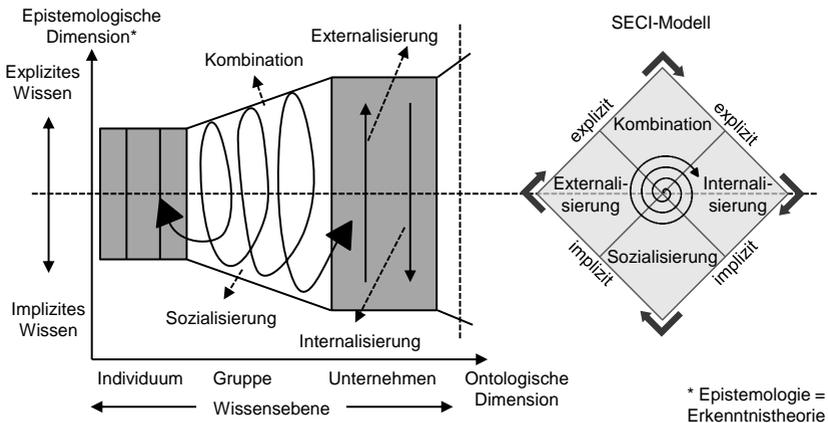


Abbildung 3.4: Wissensspirale (links) und SECI-Modell (rechts) nach NONAKA (1994, S. 20) und NONAKA & TAKEUCHI (2012)

Prozessorientiertes Wissensmanagement

REMUS (2002) entwickelte ein Modell für ein prozessorientiertes Wissensmanagement in Unternehmen. Das Modell, welches in Abbildung 3.5 zu sehen ist, verknüpft unter anderem Konzepte des Wissensmanagements mit Konzepten der Prozessorientierung, um wissensintensive Geschäftsprozesse, Wissensprozesse und Wissensmanagementprozesse stärker zu vernetzen und im Unternehmen einheitlich zu verankern. Die Arbeit fokussiert die strategische Entwicklung eines Wissensmanagements, um eine „Wissensverarbeitung in den operativen wissensintensiven Geschäftsprozessen zu unterstützen, zu verbessern und weiterzuentwickeln, um schließlich zur Kernwertschöpfung des Unternehmens beizutragen“ (REMUS 2002, S. 82).

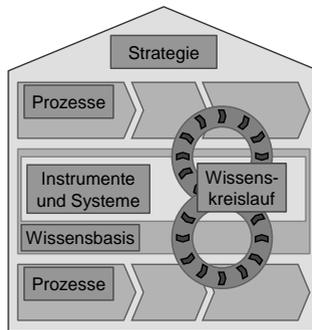


Abbildung 3.5: Modell des prozessorientierten Wissensmanagements nach REMUS (2002, S. 83)

Ansatz des Stuttgarter Wissensmanagement-Modells

WESTKÄMPER & ZAHN (2009, S. 188) stellten das Stuttgarter Wissensmanagement-Modell (SWM) vor, welches zur Identifikation und Speicherung von Wissen und Informationen dient, die zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit beitragen. Das SWM besteht aus drei Dimensionen: Wissenseseigenschaften (aufgeteilt in Kernwissen und Integrationswissen), Wissensobjekte (Wissensträger, Wissensarten und Wissensstellen) und Wissensexplorationsgrad (explizites Wissen und nicht erreichbares, implizites Wissen). Für die Speicherung des Wissens greift das SWM auf Ontologien zurück, um Wissen eindeutig und strukturiert zu speichern. Zudem können Anwender anhand von automatisierten, ontologiebasierten Zugriffen in der Wissensdatenbanken auf das externalisierte Erfahrungswissen zugreifen, um bessere Lösungen zu generieren. Das SWM

3 Stand der Wissenschaft und Technik

dient im unternehmerischen Einsatz zur allgemeinen Speicherung von Wissen. Eine konkrete Einbettung in einen Prozess zur Externalisierung von notwendigem Wissen sieht das Modell nicht vor. Das SWM bildet häufig die Grundlage für weiterführende Forschungsansätze im produktionstechnischen Umfeld, wie bspw. in der nachfolgenden Methodik von PRINZ (2018).

Wissensmanagementmethodik

zur Organisation von Prozesswissen in der Produktion

PRINZ (2018) entwickelte eine Methodik zur Organisation von Prozesswissen. Ziel ist die Erfassung, Bewertung und Steuerung der Wissensbasis der Produktion, die das gesamte Wissen über die Prozesse in der Produktion enthält. Mit Hilfe der Methodik soll zudem das für die Aufrechterhaltung der Wertschöpfung relevante Prozesswissen digitalisiert und anhand von Kompetenzmodellen die Verteilung des Wissens personalisiert werden. Die Aufnahme von Wissen erfolgt in der Methodik mittels eines UI, anhand dessen Wissensträger Prozesse anlegen und das Wissen darüber in vordefinierte Eingabefelder eintragen können. Die Zusammenhänge zwischen Ressourcen, Prozessen und Wissens-elementen sind in der Ontologie abgebildet, die PRINZ (2018) um eine Bewertungsontologie erweitert, um die Wissens-elemente bezüglich ihrer Relevanz für die Wertschöpfung zu kategorisieren. Das Prozesswissen wird hinsichtlich der Relevanz für das Unternehmen und dem aktuellen Risiko eines Verlustes bewertet, um daraus den erforderlichen Handlungsbedarf abzuleiten. Nach PRINZ (2018) bspw. besteht bei einem geringen Verlustrisiko kein Handlungsbedarf, unabhängig davon, ob es sich dabei um geringfügig, mittelmäßig oder hochgradig relevantes Wissen handelt.

3.3.2 Einsatz von Ontologien in der Produktionstechnik

Der Einsatz von Ontologien zur Wissensspeicherung und Verarbeitung findet in der Produktionstechnik immer mehr Verbreitung. Nachfolgend werden die für diese Arbeit relevanten Ansätze, die Ontologien verwenden oder Ontologien für bestimmte Einsatzzwecke modellieren, zusammengefasst.

Discrete-event Modeling Ontology (DeMO)

SILVER et al. (2011) adressieren mit ihrer Ontologie DeMO die fehlende Interoperabilität zwischen Modellen. Vor allem modellbezogene Parameter oder Merkmale, wie

beispielsweise die statische oder dynamische Ausführung sowie die Art des Zustands (kontinuierlich oder diskret) eines Modells, sind bisher nicht ausreichend abgebildet, um Modelle einfach und schnell wiederzuverwenden oder mit anderen Modellen zu koppeln. DeMO enthält entsprechend Klassen und Attribute, um Modelle zu klassifizieren bzw. zu beschreiben.

Ontologie-basiertes Framework für adaptive Simulationsmodelle

In einem Ansatz für adaptive Simulationsmodelle verwenden BOHÁCS & RINKÁCS (2017) eine Ontologie zur Wissensrepräsentation, um Wissen über eine Domäne abzubilden und mit einem in einer Ontologie abgebildeten Simulationsmodell zu vergleichen. Für die Abbildung eines Simulationsmodells in einer Ontologie verwenden die Autoren das selbst entwickelte Jellyfish-Modell, welches in BOHÁCS & RINKÁCS (2016) vorgestellt wurde. Das Ziel ist eine übersichtlichere Darstellung von Simulationsmodellen und besser zu erfassende Adaptionen am Modell. BOHÁCS & RINKÁCS (2017) fokussierten sich in ihrer Arbeit auf die Erfassung von strukturellen Änderungen zwischen realem Produktionssystem und Simulationsmodell. Strukturänderungen werden durch den Abgleich der erfassten Daten mit den in Form von Ontologien gespeicherten Daten erkannt. Das Konzept wurde anhand eines einfachen Simulationsmodells einer Fertigung evaluiert. Dieses Materialflusssystem besteht aus einer Einzelstation, welche durch ein Fahrzeug mit Teilen des Lagers beliefert wird. Mithilfe des entwickelten Konzepts wird die Änderung der Transportroute des Fahrzeugs erfasst (BRUNNER 2019, S. 69).

Framework zur Erkennung von Inkonsistenzen zwischen heterogenen Modellen in der Industrie 4.0

ZOU et al. (2019) entwickelten ein wissensbasiertes Framework zur Erkennung und Vermeidung von Inkonsistenzen zwischen Modellen. Das Framework ist in Abbildung 3.6 zu sehen. In der Abbildung mittig zu erkennen ist die Wissensbasis, die in drei Ebenen aufgeteilt ist. Die oberste Ebene enthält die bereits vorhandenen Ontologien aus den unterschiedlichen Domänen. In den darunterliegenden Ebenen befinden sich die Metamodelle sowie die jeweiligen Modellinstanzen aus der Modellentwicklung. Anhand des Wissensaggregationsprozesses werden Verbindungen zwischen verschiedenen Modellen und der Domänenontologie erstellt. Durch diese Verknüpfungen werden die Modelle miteinander assoziiert und können mit der Domänenontologie abgeglichen werden. Die Erfassung von Inkonsistenzen setzen ZOU et al. (2019) mittels *Reasoning* in der Ontologie um. In der beispielhaften Umsetzung erfasst das Framework eine Inkonsistenz

3 Stand der Wissenschaft und Technik

zwischen dem Systems-Modeling-Language (SysML)-Modell einer Anlage und der Komponentenliste. Dabei erfasst die Ontologie, dass der Typ eines Sensors in der Komponentenliste nicht vom selben Typ des Sensors im SysML-Modell ist. Die verwendete Ontologie zur Abbildung des SysML-Modells basiert auf FERRER et al. (2015). Eine Kopplung des Ansatzes mit der im Betrieb befindlichen Anlage wird nicht betrachtet.

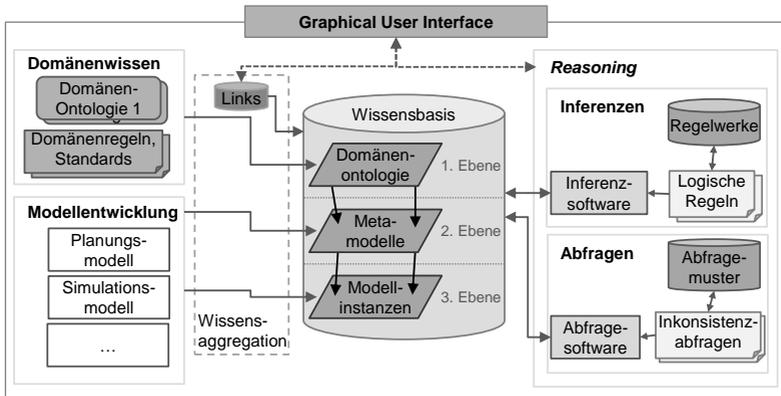


Abbildung 3.6: Wissensbasiertes Framework zur Erkennung und Vermeidung von Inkonsistenzen nach ZOU et al. (2019, S. 29)

Ontologiebasierte Methodik

zur Unterstützung der Nachnutzung von Simulationswissen

STOLIPIN & WENZEL (2019) thematisieren mit ihrer Methodik das Problem des schnellen Wissensverlustes nach einer Simulationsstudie. Mittels einer ontologiebasierten Methodik wird die Durchführung von Simulationsprojekten wissensorientiert organisatorisch und technisch unterstützt. Während einer Simulationsstudie wird Wissen über einen Excel-basierten Software-Prototyp akquiriert und in einer relationalen Datensammlung gespeichert. Das Wissen wird anschließend automatisch in eine Ontologie überführt, anhand derer das Wissen für die Nachnutzung innerhalb des Unternehmens bereitgestellt wird. Die Erstellung der Ontologie, *SimWis* genannt, wird nach dem Vorgehen von NOY & MCGUINNESS (2001) (vgl. Abschnitt 6.2) durchgeführt. *SimWis* berücksichtigt die für die Dokumentation und zur Nachnutzung sinnvollen Bereiche bei Simulationsstudien. *SimWis* enthält bspw. Klassen wie *ModellDokumente*, *Untersuchungsgegenstand* oder *Simulationsergebnisse*, die speziell auf den Anwendungsfall zugeschnitten sind.

3.4 Handlungsbedarf und wissenschaftliche Fragestellung

Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion

Ein für produzierende Unternehmen ganzheitliches Wissensmanagement stellte BRANDMEIER (2020) vor. Ziel seiner Arbeit ist die Unterstützung von produzierenden Unternehmen bei dem Wandel hin zu Wissensunternehmen. Dabei stellt er Methoden zur Verfügung, die alle wissensrelevanten Bereiche eines Unternehmens erfassen und das Wissen in einem ontologiebasierten Wissensmanagement abbilden. Durch die Verknüpfung aller Bereiche sollen „Kommunikationshindernisse abgebaut und Wissensprozesse effektiver gestaltet werden“ (BRANDMEIER 2020, S. 3). Abbildung 3.7 zeigt die betrachteten Bereiche, die gemäß dem Autor für ein ganzheitliches WM abgebildet werden müssen.

Modell des ontologiebasierten Wissensmanagement-Frameworks			
Modellierung der Unternehmensstrategie	Meta-Modellierung der Unternehmensstruktur	Meta-Modellierung der Systeme	Meta-Modellierung des Führungsstils
Ontologisch der Unternehmensstrategie (z. B. Vision, Ziele, Handlungen)	Ontologie der Organisationsstruktur nach REYNOLDS (2014)	Entwurf eines generischen Prozessmodells	Abbildung des Kausalzusammenhangs zwischen Führungserfolg und Führungsstil
Meta-Modellierung der Mitarbeiter	Meta-Modellierung der Fähigkeiten	Meta-Modellierung der Unternehmenskultur	Entwicklung der Meta-Ontologie d. Produktion
Beschreibung der Fähigkeiten, Tätigkeiten, Netzwerk etc.	Detaillierte Beschreibung mit Kompetenzen, Technologiefeldern etc.	Formalisierung der Unternehmenskultur auf Meta-Ebene (z. B. Philosophie, Identität, Firmengeschichte)	Modellierung von Produktionsanlagen und -prozessen. Verknüpfung mit anderen Meta-Modellen

Abbildung 3.7: Modell des ontologiebasierten Wissensmanagement-Frameworks nach BRANDMEIER (2020, S. 129 ff.)

3.4 Handlungsbedarf und wissenschaftliche Fragestellung

Nachfolgend werden in Abschnitt 3.4.1 die Erkenntnisse aus dem Stand der Wissenschaft und Technik zusammengefasst und hinsichtlich der Fragestellung dieser Arbeit bewertet. Der daraus resultierende Handlungsbedarf führt zur in Abschnitt 3.4.2 formulierten zentralen Fragestellung sowie den daraus resultierenden Forschungsfragen dieser Arbeit.

3.4.1 Bewertung des Standes der Wissenschaft und Technik

Die Analyse der vorgestellten Ansätze zeigt, dass in den jeweiligen Bereichen der Simulationsmodellgenerierung und -synchronisierung, der Datenerhebung und -verarbeitung in der Produktion sowie dem Einsatz von Wissen im unternehmerischen und produktionsnahen Umfeld wissenschaftlich anerkannte Ansätze existieren.

Die automatisierte Generierung von Simulationsmodellen ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten und findet stellenweise in der betriebsbegleitenden Simulation Anwendung. Nachteil einer vollständig automatisierten Generierung von Modellen ist der umfangreiche Datenbedarf. Neben aktuellen Daten aus dem realen System müssen alle für den Modellaufbau erforderlichen Daten aufbereitet vorliegen, um eine Modellgenerierung ausführen zu können. Im Ansatz von BERGMANN (2014) wird deutlich, welche Erweiterungen im CMSD-Format notwendig sind, um alle Daten für eine automatisierte Generierung zur Verfügung zu stellen. MILDE & REINHART (2019) weisen ebenfalls darauf hin, dass noch weitere Forschungsarbeit für die Entwicklung und Erweiterung von Methoden zur Behandlung von Daten geringerer Qualität erforderlich ist.

Die betriebsbegleitende Synchronisierung von Simulationsmodellen erfordert i. d. R. weniger Daten, da sie auf bereits existierenden Modellen basiert und nur Informationen über das Systemverhalten benötigt. Ein Beispiel hierfür ist die Ankerpunktmethode von ASHTARI TALKHESTANI (2020), die Abweichungen anhand definierter Ankerpunkte identifiziert, um Modelle miteinander abzugleichen. Die manuellen Aufwände bei der Definition von Ankerpunkten sind jedoch nicht zu unterschätzen und stellen ein Defizit des Ansatzes dar.

Den in Abschnitt 3.1 vorgestellten Ansätzen zur Generierung und Synchronisierung ist gemein, dass sie sich nur auf die vorhandenen Daten aus der Produktion stützen. Hierzu wird entweder vorausgesetzt, dass die Daten verfügbar sind, oder es sind große Aufwände erforderlich, um die relevanten Daten zu identifizieren. Bislang größtenteils unberücksichtigt ist dabei das vorhandene Wissen der Mitarbeitenden über das Verhalten und die Veränderungen in den Systemen, obwohl REINHART (2017, S. 162 f.) bereits auf das Potenzial von Expertenwissen zur Optimierung hingewiesen hat.

Im Bereich des Wissensmanagements zeigt die Literaturanalyse, dass der Einsatz von WM-Systemen bereits in den Unternehmen angekommen ist, wie bspw. NONAKA & TAKEUCHI (2012) darstellten, die Systeme aber selten auf dem Shopfloor zum Einsatz kommen (vgl. PRINZ 2018, S. 79). Mit dem Ansatz von PRINZ (2018) wird

3.4 Handlungsbedarf und wissenschaftliche Fragestellung

erstmal relevantes Wissen für die Durchführung von Geschäftsprozessen der Produktion thematisiert. Der Fokus liegt auf der Identifikation und Klassifizierung des Wissens, um notwendige Schritte für den Erhalt des Wissens im Unternehmen einleiten zu können. Eine operative Nutzung des WMs in der Optimierung der Produktion erfolgt nicht.

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten WM-Ansätze zeigen, dass zur Wissensspeicherung immer öfter Ontologien zum Einsatz kommen. Die Anwendungen im Kontext der Simulation können hierbei in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. Ontologien zur Abbildung des Modells oder der Charakteristik eines Modells, um bspw. mit den *Reasoning*-Mechanismen Modelle vergleichen zu können, wie nach BOHÁCS & RINKÁCS (2017) und ZOU et al. (2019).
2. Ontologien, um Modelle schnell und einfach wiederverwenden zu können, wie nach SILVER et al. (2011).

Die Ontologien aus der ersten und zweiten Kategorie dienen als Repräsentationsmittel für das eigentliche Simulationsmodell, dessen Darstellung maschinell weiterverarbeitet werden kann.

3. Ontologien, um weiteres Wissen zu Simulationsmodellen und -experimenten zu dokumentieren und zu speichern, wie bspw. nach STOLIPIN & WENZEL (2019), wobei die entwickelte Ontologie *SimWis* rein auf den Anwendungsfall der Nachnutzung von Simulationswissen ausgelegt und nicht auf andere Anwendungsfälle übertragbar ist.

Zusammenfassend zeigt die Literaturrecherche, dass im betriebsbegleitenden Einsatz bisher kein Ansatz existiert, der kontinuierlich das vorhandene Wissen aus der Produktion nutzt, um die Parametrisierung von Simulationsmodellen durchzuführen. Die Ansätze von SELKE (2005), BERGMANN (2014) und MILDE & REINHART (2022) zur Modellgenerierung weisen einen engen Bezug zur EDS auf, berücksichtigen aber nicht das vorhandene Wissen über aktuelle Veränderungen am Produktionssystem. Dies trifft auch auf die Ansätze von DENKENA et al. (2017), ASHTARI TALKHESTANI (2020), ZIPPER & DIEDRICH (2019) und DITTLER et al. (2022) zu, die Lösungen für eine betriebsbegleitende Synchronisierung von Modellen vorstellen. Die Ansätze im Bereich des Wissensmanagements, wozu auch der Einsatz von Ontologien zählt, weisen noch Forschungslücken bei der Kopplung von EDS-Modellen mit dem jeweiligen Produktionssystem auf. Für die konkrete Fragestellung der betriebsbegleitenden Parametrisierung existiert aktuell kein anwendbares System.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Bewertung der vorgestellten Ansätze hinsichtlich der relevanten Themenbereiche ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst und verdeutlicht das vorhandene Forschungsdefizit. Zudem werden die literaturbasierten Erkenntnisse aus Beobachtungen im praxisnahen Forschungs- und Industrieumfeld bestätigt. Die Erkenntnisse stützen sich auf die durchgeführte DRM-Methode *Pure Observation*, bei der die Forschenden nicht aktiv am Geschehen teilnehmen, sondern von außen das Geschehen beobachten, sowie die DRM-Methode *Participant Observation*, bei der die Forschenden am Prozess beteiligt sind und dadurch einen tieferen Einblick in die Problemstellung erhalten (vgl. BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 258).

3.4.2 Ableitung der spezifischen Fragestellung

Die Analyse hat gezeigt, dass vor allem in der Weiterverwendung ereignisdiskreter Simulationsmodelle Handlungsbedarf besteht, da Modelle mit der Zeit veralten und für die Anpassung der Modelle das Wissen von Mitarbeitenden aus der Produktion für die Simulationsexperten wichtig, aber bisher nur schwer zugänglich ist. Der Fokus dieser Arbeit liegt deshalb auf der nachfolgend formulierten zentralen Fragestellung:

Wie kann ein Wissensmanagementsystem die Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz unterstützen?

Zur Beantwortung dieser Frage lassen sich vier spezifische Forschungsfragen formulieren, mit deren Lösung die zentrale Fragestellung beantwortet werden kann.

Forschungsfrage 1:

Wie muss die Systemarchitektur zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle mittels eines Wissensmanagements aufgebaut werden?

Forschungsfrage 2:

Wie können Abweichungen zwischen einem realen Produktionssystem und dessen Simulationsmodell betriebsbegleitend identifiziert werden?

Forschungsfrage 3:

Wie kann Wissen bezogen auf die Abweichung des Simulationsmodells generiert und verarbeitet werden?

Forschungsfrage 4:

Wie kann das identifizierte Wissen in den Prozess der Entscheidungsfindung zur Parametrisierung des Simulationsmodells integriert werden?

3.4 Handlungsbedarf und wissenschaftliche Fragestellung

Tabelle 3.1: Abgleich der für diese Arbeit relevanten Ansätze

Ansätze:	Fokus:	Ereignisdiskrete Simulation	Betriebsbegleitender Einsatz	Identifikation von Abw. und Sync. von Modellen	Modellparametrisierung	Wissensbasierte Parametrisierung	Einsatz eines WM	Semantische Speicherung von Wissen	Automatisierte Wissensverteilung
<i>Simulationsmodellgenerierung</i>									
	SELKE (2005)	●	●	◐	◐				
	BERGMANN (2014)	●	●	◐	◐	◐			
	MILDE & REINHART (2019)	●	◐		◐				
	MILDE & REINHART (2022)	●	◐		◐	◐	●	●	◐
<i>Synchronisierung von Simulationsmodellen</i>									
	KAIN et al. (2010)	◐	●	◐	◐				
	BOHÁCS et al. (2012)	●	●	◐	◐				
	DENKENA et al. (2017)	◐	●	●	●				
	ZIPPER & DIEDRICH (2019)		●	●	●				
	ASHTARI TALKHESTANI (2020)	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	
<i>Optimierung der Datenerhebung und -verarbeitung</i>									
	SKOOGH et al. (2012)	●	●	●					
	BOKRANTZ et al. (2015)	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐
	BOKRANTZ et al. (2018)	●	●	◐	◐		◐		
<i>Relevante Ansätze des Wissensmanagements</i>									
	NONAKA & TAKEUCHI (2012)						●	●	◐
	REMUS (2002)						●	◐	◐
	WESTKÄMPER & ZAHN (2009)						●	●	●
	PRINZ (2018)						●	●	●
<i>Ontologien in der Produktionstechnik</i>									
	SILVER et al. (2011)	●			◐	◐	●	●	◐
	BOHÁCS & RINKÁCS (2017)	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
	ZOU et al. (2019)		◐	◐			●	●	
	STOLIPIN & WENZEL (2019)	●					●	●	◐
	BRANDMEIER (2020)						●	●	●

Der vorgestellte Ansatz berücksichtigt den für diese Arbeit relevanten Bereich ...
 nicht. ◐ ansatzweise. ◑ teilweise. ◒ annähernd. ● vollständig.

4 Wissensmanagementsystem zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines WMS zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz. Gemäß dem Vorgehen der DRM wird auf Basis der Erkenntnisse aus den Phasen RC und DS-I (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3) das *Initial Impact Model* (IIM1) entwickelt. Das IIM1 beschreibt den Zielzustand, der zu einer Verbesserung des Ist-Zustandes führen soll (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 35). Die Weiterentwicklung des IIM1 führt schlussendlich zum *Intended Impact Model* (IIM2), welches im Detail die notwendige Unterstützung liefert. In dieser Arbeit ist die in Abschnitt 4.2 beschriebene Systemübersicht das IIM1. Das Gesamtsystem WMS4SimPar ist das Ergebnis aus Phase RC und DS-I nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009). Das daraus abgeleitete IIM2 wird in Abschnitt 4.3 beschrieben und ist das Ergebnis der letzten Phase DS-II nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009). Um den Lesefluss zu fördern und den logischen Aufbau des Systems zu verdeutlichen, folgt die Beschreibung im weiteren Verlauf der Arbeit einem vermeintlich linearen Durchlauf der DRM. An dieser Stelle sei angemerkt, dass dies nicht dem realen Prozess der Ergebnisfindung entspricht. Aus diesem Grund wird an entsprechenden Stellen auf die angewendeten Methoden oder entsprechende Iterationen eingegangen.

In diesem Kapitel wird das Wissensmanagementsystem zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz (WMS4SimPar) beschrieben. In Abschnitt 4.1 werden die Anforderungen hergeleitet. Sie gliedern sich in anwendungsorientierte und spezifische Anforderungen an das Gesamtsystem. Anschließend folgt in Abschnitt 4.2 die Vorstellung der vier Lösungsbausteine von WMS4SimPar.

Der erste Lösungsbaustein, die Anwendungsfallbeschreibung, wird in Abschnitt 4.4 vorgestellt. Für eine Anwendung des Systems in unterschiedlichen Produktionssystemen ist eine individuelle Anpassung erforderlich. In diesem Abschnitt wird neben dem Vorgehen auch der Anwendungsfall exakt beschrieben.

Die detaillierte Beschreibung des Systems folgt in Abschnitt 4.3 und wird im weiteren Verlauf als *Systemarchitektur* bezeichnet.

4.1 Anforderungen an das System *WMS4SimPar*

Die Anforderungen an das System sind in die allgemeinen Anforderungen aus der anwendungsorientierten Wissenschaft (siehe Abschnitt 4.1.1) und in die spezifischen Anforderungen (siehe Abschnitt 4.1.2) aufgeteilt.

4.1.1 Anforderungen aus der anwendungsorientierten Wissenschaft

Die allgemeinen Anforderungen (AA) an das Gesamtsystem sind unabhängig vom speziellen Einsatzzweck und ergeben sich aus der in Abschnitt 1.5 eingeführten Verankerung des Systems in der anwendungsorientierten Wissenschaft, deren Ziel es ist „[...] Regeln, Modelle und Verfahren für praktisches Handeln zu entwickeln“ (H. ULRICH 1982, S. 1).

AA1 **Praxistauglichkeit**

Das Gesamtsystem muss für Personen in der Praxis einfach anzuwenden und verständlich sein. Hierzu muss das System mit einem zunehmenden Aufwand realisiert und betrieben werden können.

AA2 **Allgemeingültigkeit**

Das Gesamtsystem muss innerhalb des Betrachtungsrahmens (vgl. Abschnitt 1.4) auf weitere Problemstellungen anwendbar sein. D. h. der Einsatz des Systems muss auch bei anderen Problemstellungen zu den definierten Zielen führen.

AA3 **Adaptierbarkeit**

Aus Anforderung AA2 ergibt sich die Forderung nach einem System, welches adaptierbar und auf andere Anwendungsfälle übertragbar ist. Hierzu muss das System unabhängig vom Anwendungsfall beschrieben sowie mit Hilfe von generischen Modellierungssprachen formuliert sein. Darüber hinaus muss das System Hilfestellung bei der individuellen Adaption bieten.

AA4 **Skalierbarkeit**

Das Gesamtsystem muss eine Skalierung bzw. Anpassung auf unterschiedlich große Produktionssysteme und Organisationen gewährleisten, um zum einen für

unterschiedliche Unternehmensgrößen anwendbar zu sein und zum anderen über die Dauer der Anwendung mit sich verändernden Unternehmensgrößen umgehen zu können.

AA5 **Wirtschaftlichkeit**

Die Aufwände, sowohl für die einmalige Integration und Inbetriebnahme als auch den langfristigen Betrieb des Systems, müssen sich aus wirtschaftlicher Sicht lohnen. Folglich muss der Nutzen aus der Anwendung des Systems die Kosten für Inbetriebnahme und Betrieb übersteigen.

4.1.2 Spezifische Anforderungen

Die spezifischen Anforderungen dienen, neben der Beschreibung der Zielvorgabe, den Anwendern zur Festlegung der Randbedingungen für das System. Die Anwender können anhand der spezifischen Anforderungen identifizieren, ob ein Einsatz des Systems *WMS4SimPar* sinnvoll und möglich ist. Mit der Überprüfung der Vorgaben aus den Teilbereichen der Simulation und des WM kann geprüft werden, ob der Einsatz des Systems im unternehmerischen Kontext überhaupt realisiert werden kann.

Neben den AA an das Gesamtsystem aus Sicht der anwendungsorientierten Wissenschaft werden spezifische Anforderungen (SA) definiert, die sich aus Sicht der Anwender ergeben. Diese sind aus den relevanten Arbeiten sowie dem Handlungsbedarf (siehe Kapitel 3) abgeleitet. Bezogen auf das Simulationsmodell ergeben sich für den betriebsbegleitenden Einsatz neben den allgemeinen Anforderungen, wie sie in VDI 3633-1, ROSEN et al. (2020, S. 19) sowie in ISO/IEC 25010 definiert sind, spezifische Anforderungen an das Simulationsmodell (SAS) (in Anlehnung an SELKE 2005, S. 22), die in Abschnitt 4.1.2.2 aufgeführt sind. Die spezifischen Anforderungen an das Wissensmanagementsystem werden in Abschnitt 4.1.2.3 vorgestellt. Die Integration eines WMS im produktionstechnischen Umfeld erfordert die Berücksichtigung der Gegebenheiten der Produktion (BRANDMEIER 2020, S. 89). Daraus werden die spezifischen Anforderungen an das Wissensmanagement (SAW) abgeleitet (in Anlehnung an BRANDMEIER (2020, S. 90) und PRINZ (2018, S. 82)).

4.1.2.1 Anforderungen an das Gesamtsystem

SA1 Identifikation von kritischen Abweichungen

Das System muss kritische Abweichungen zwischen dem betriebsbegleitenden Simulationsmodell und dem Produktionssystem selbstständig identifizieren. Aufgrund von nicht relevanten Schwankungen im realen Produktionsbetrieb muss das System in der Lage sein, kritische von nicht-kritischen Abweichungen differenzieren zu können.

SA2 Ermittlung von relevanten Wissensträgern

Für die Weiterverarbeitung von Abweichungen und für die Nutzung des vorhandenen Wissens aus der Produktion muss das System relevante Wissensträger ermitteln und den Abweichungen zuordnen können.

SA3 Unterstützung beim Prozess zur Behebung von Abweichungen

Den Prozess der Abweichungsbehebung soll das System unterstützen, indem er die Wissensträger anleitet und zur Externalisierung von Wissen beiträgt.

SA4 Bereitstellung eines hinreichend genauen Simulationsmodells

Es ist ein entsprechend der konkreten Anforderung des Anwenders hinreichend genaues Simulationsmodell für den betriebsbegleitenden Einsatz bereitzustellen. Hierfür muss das System bei der Festlegung der geforderten Genauigkeit unterstützen sowie die Einhaltung derselben gewährleisten.

4.1.2.2 Anforderungen an das betriebsbegleitende Simulationsmodell

SAS1 Erfüllung der Normen von Simulationsmodellen

Das in WMS4SimPar verwendete Simulationsmodell muss die Anforderungen der Normen und Richtlinien VDI 3633-1 und ISO/IEC 25010 erfüllen.

SAS2 Anpassbarkeit an aktuelle Betriebssituation der Produktion

Das Simulationsmodell muss schnell und effizient an die Situation in der Produktion angepasst werden können (SELKE 2005, S. 22).

SAS3 Direkte Umsetzung der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse aus Simulationsexperimenten müssen direkt umgesetzt werden können. Das setzt voraus, dass ein vorhandenes Simulationsmodell für die entsprechende Fragestellung im betriebsbegleitenden Einsatz geeignet ist.

SAS4 **Integrierbarkeit des Simulationsmodells**

Das Simulationsmodell muss in den prozessualen Ablauf der entsprechenden Fragestellung integrierbar sein.

4.1.2.3 Anforderungen an das Wissensmanagementsystem

SAW1 **Anbindung an die Unternehmenssysteme**

Das WMS muss die Informationsflüsse sowie die Datenflüsse von Maschinen, Anlagen und anderen Systemen im Betrieb koppeln.

SAW2 **Transparenzerhöhung im Unternehmen**

Das WMS muss durch eine eindeutige Zuweisung von Verantwortlichkeiten für Informationsinhalte die Transparenz der Informationsflüsse im Unternehmen erhöhen.

SAW3 **Integration der Mitarbeitenden**

Das WMS muss Mitarbeitende gezielt integrieren, um das vorhandene Wissenspotenzial besser zu nutzen.

SAW4 **Systematisches Vorgehen zur Ermittlung von Prozesswissen**

Das WMS muss durch eine Software-technische Anbindung den Prozess der Ermittlung von Prozesswissen systematisch unterstützen, um die Anwender zu entlasten.

SAW5 **Digitalisierung von Wissen**

Das WMS muss das ermittelte Wissen digital speichern, damit es weiter verarbeitet werden kann und zukünftig für weitere Anwendungszwecke zur Verfügung steht. Das externalisierte Wissen, bezogen auf eine Abweichung, soll dadurch die Wissensbasis des gesamten Unternehmens vergrößern.

Alle beschriebenen Anforderungen an das Gesamtsystem sowie an die Teilsysteme der Simulation und des Wissensmanagements sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Anforderungen

Art der Anforderung	Anforderung
AA1	Praxistauglichkeit
AA2	Allgemeingültigkeit
AA3	Adaptierbarkeit
AA4	Skalierbarkeit
AA5	Wirtschaftlichkeit
SA1	Identifikation von kritischen Abweichungen
SA2	Ermittlung von relevanten Wissensträgern
SA3	Unterstützung beim Prozess zur Behebung von Abweichungen
SA4	Bereitstellung eines hinreichend genauen Simulationsmodells
SAS1	Erfüllung der Normen für Simulationsmodelle
SAS2	Anpassbarkeit an aktuelle Betriebssituation der Produktion
SAS3	Direkte Umsetzung der Simulationsergebnisse
SAS4	Integrierbarkeit des Simulationsmodells
SAW1	Anbindung an die Unternehmenssysteme
SAW2	Transparenzerhöhung im Unternehmen
SAW3	Integration der Mitarbeitenden
SAW4	Systematisches Vorgehen zur Ermittlung von Prozesswissen
SAW5	Digitalisierung von Wissen

4.2 Systemübersicht

Die Grundstruktur von WMS4SimPar ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Das System selbst besteht aus vier Lösungsbausteinen. Der erste Lösungsbaustein zur Anwendungsfallbeschreibung, engl. *Use Case* (UC), stellt zum einen die Zielvorgabe über die notwendige Beschaffenheit und Fähigkeit des Systems dar, zum anderen dient er den Anwendern als Vorgabe hinsichtlich der notwendigen Voraussetzungen für einen Einsatz im Unternehmen. Der Lösungsbaustein I ist in Abschnitt 4.1.2 beschrieben.

Lösungsbaustein II, die Abweichungsidentifikation, beinhaltet die notwendigen Systemkomponenten, um eine Abweichung zwischen dem realen Produktionssystem und dem betriebsbegleitenden Simulationsmodell zu identifizieren. Der Baustein ist in Kapitel 5 beschrieben. Ergebnis des zweiten Lösungsbausteins sind identifizierte Abweichungen des Simulationsmodells vom Produktionssystem, welche den Qualitätsvorgaben an das Simulationsmodell nicht genügen und daher eine Parametrisierung des Simulationsmodells notwendig machen. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, ist eine rein datentechnische Anpassung für betriebsbegleitende Simulationsmodelle nicht ausreichend, da diese nur den Ist-Zustand der Anlage abbildet. Zudem wird das vorhandene Potenzial, welches im Wissen der Mitarbeitenden liegt, bisher unzureichend genutzt. Der dritte Lösungsbaustein soll dieses Defizit mittels einer gezielten Wissensgenerierung und -verarbeitung beheben. Lösungsbaustein III ist in Kapitel 6 beschrieben. Nach Verarbeitung des Wissens erfolgt in Lösungsbaustein IV die Parametrisierung des Simulationsmodells durch die Simulationsexperten. Die Systemkomponenten und Prozessschritte sind in Kapitel 7 beschrieben.

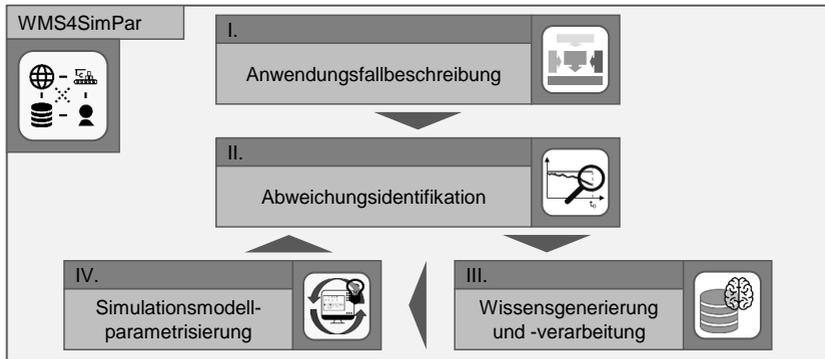


Abbildung 4.1: Systemübersicht (IIMI) von WMS4SimPar

4.3 Systemarchitektur von WMS4SimPar

Die Systemarchitektur von WMS4SimPar basiert auf dem in VERNICKEL & SCHILP (2022) vorgestellten Ansatz. Ausgangspunkt für die Entwicklung der Architektur ist das von ZIPPER et al. (2018) und ZIPPER & DIEDRICH (2019) vorgestellte Konzept (vgl. Ab-

schnitt 3.1.2), in dem ein digitaler Zwilling einer Anlage mittels einer datentechnischen Kopplung aktuell gehalten wird.

Die Abweichungsidentifikation, die Wissensgenerierung und -verarbeitung sowie die Simulationsmodellparametrisierung bilden einen Regelkreis, der an die Regelungstechnik angelehnt ist. Die Systemarchitektur erweitert das Konzept der betriebsbegleitenden Simulation der Richtlinie (VDI 4499-2, S. 15) (vgl. Abbildung 2.18). Dadurch wird sichergestellt, dass das Simulationsmodell in regelmäßigen Abständen an Veränderungen des realen Produktionssystems im Betrieb angepasst wird (VERNICKEL & SCHILP 2022, S. 124).

Vorgabe für das System und Ausgangspunkt ist ein Produktionsplan, der vom Produktionssystem abgearbeitet und betriebsbegleitend vom Simulationsmodell simuliert wird. Das Produktionssystem und die Simulation führen unabhängig voneinander die Vorgaben des Produktionsplans aus. Zwischen dem Simulationsmodell und dem realen Produktionssystem besteht keine datentechnische Abhängigkeit, um die Anforderungen SAS3 und SAS4 zu erfüllen. Das Simulationsmodell muss unabhängig vom Produktionssystem ausführbar bleiben, damit es zu Planungszwecken, bspw. in der PPS, eingesetzt werden kann.

Die Verknüpfung von Produktionssystem und Simulation erfolgt innerhalb der Abweichungsidentifikation (AWI). Anhand von Sensordaten wird die Differenz zwischen der Anlage und der Simulation berechnet und der Fehler zwischen Simulation und Anlage bestimmt.

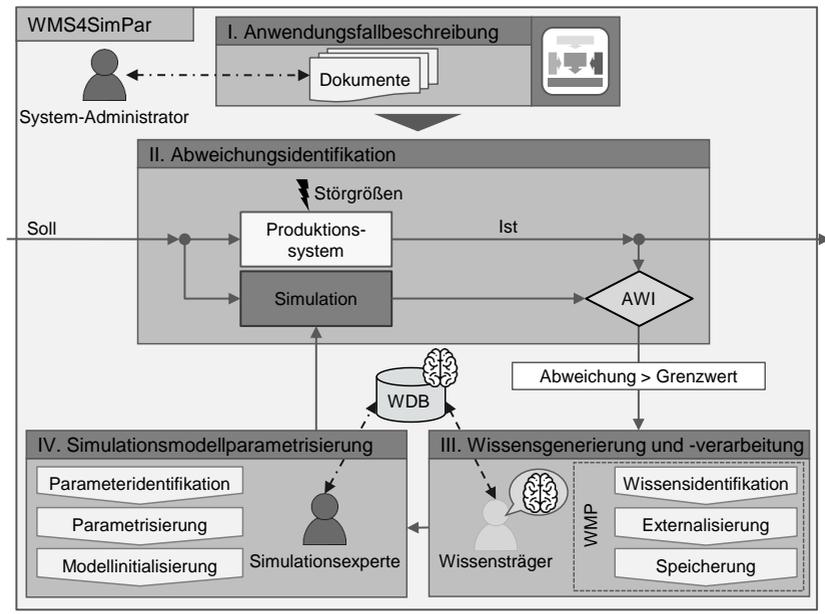
Abweichungen, die einen vorgehenden Grenzwert hinsichtlich der geforderten Güte des Simulationsmodells (siehe Abschnitt 4.4) überschreiten, lösen einen Wissensmanagementprozess (WMP) aus. Für jede erfasste Abweichung identifiziert WMS4SimPar Wissensträger, deren Wissen externalisiert und gespeichert wird. Das auf die Abweichung bezogene externalisierte Wissen wird anhand von Personalisierungsdiensten (vgl. Abbildung 2.11) an die Simulationsexperten übermittelt.

Die Anpassung der Parameter des Simulationsmodells erfolgt durch die Simulationsexperten. In der Wissensdatenbank (WDB) sind zu jeder Abweichung die zugehörigen Daten aus der AWI sowie das externalisierte Wissen aus der Wissensgenerierung und -verarbeitung gespeichert. Den Simulationsexperten steht somit eine umfangreiche Wissensbasis zur Verfügung, die neben den Informationen aus der datenbasierten Ab-

4.3 Systemarchitektur von WMS4SimPar

weichungserkennung auch Informationen zu den aktuellen Umständen in der Produktion enthält. Ursprung, Dauer und Auswirkungen von Abweichungen können dadurch bei der Parametrisierung des Simulationsmodells von den Simulationsexperten berücksichtigt werden.

Durch die Integration der angepassten Parameter in das betriebsbegleitende Simulationsmodell erfolgt eine direkte Berücksichtigung der neuen Parameter im weiteren Planungsbetrieb für das Produktionssystem. Abbildung 4.2 zeigt grafisch den beschriebenen Aufbau der Systemarchitektur von WMS4SimPar.



AWI: Abweichungsidentifikation, WDB: Wissensdatenbank, WMP: Wissensmanagementprozess

Abbildung 4.2: Systemarchitektur (IIM2) von WMS4SimPar in Anlehnung an VERNICKEL & SCHILP (2022, S. 124)

4.4 Anwendungsfallbeschreibung

Der Einsatz von WMS4SimPar erfordert eine genaue Beschreibung des Anwendungsfalls. Gemäß VDI 3633-1 ist hierfür die Phase der Aufgabedefinition durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Ergebnis dieser Phase sind Dokumente mit einer detaillierten Beschreibung der Aufgaben, die „nach Meinung aller Beteiligten das zu lösende Problem beschreiben und zugleich mit den vorgesehenen Mitteln und im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen umsetzbar sind“ (RABE et al. 2008, S. 47).

Die Anwendungsfallbeschreibung ist durch die System-Administratoren von WMS4SimPar durchzuführen. Als System-Administratoren werden Personen bezeichnet, die für das Aufsetzen und die Pflege von WMS4SimPar verantwortlich sind. Initial sind sie für die Durchführung der Anwendungsfallbeschreibung verantwortlich und müssen hinsichtlich des betriebsbegleitenden Einsatzes der Simulation folgende Fragen beantworten (vgl. WENZEL et al. 2008, S. 115 ff.):

- Welche Fragestellung soll durch den Einsatz von WMS4SimPar beantwortet werden?
- Wie lang soll der Betrachtungszeitraum des Simulationsexperiments sein?
- Welcher Detaillierungsgrad des Simulationsmodells ist notwendig?
- Welche Qualitätsansprüche muss das Simulationsmodell erfüllen?

In Zusammenarbeit mit den Simulationsexperten und den Nutzern der Simulationsergebnisse (bspw. die Abteilung der PPS) beantworten die System-Administratoren diese vier Fragen. Hierzu eignen sich Workshops mit den genannten Personengruppen (WENZEL et al. 2008, S. 115 ff.).

Des Weiteren muss von den System-Administratoren analysiert werden, ob der Einsatz eines WMS zur Steigerung der Simulationsmodellqualität führen kann. In Anlehnung an die Richtlinie VDI 5610-1 sind folgende Fragen zu beantworten:

- Können Wissensträger im Unternehmen Aussagen über Abweichungen zwischen Simulation und Realität treffen?
- Besteht die Notwendigkeit eines WMS, um den Wissensaustausch zwischen Simulationsexperten und Wissensträgern aus der Produktion im Unternehmen zu unterstützen?

Für die Beantwortung der Fragen sind ebenfalls Workshops und Befragungen mit dem Personal aus der Produktionsumgebung durchzuführen. Die Erkenntnisse aus den Workshops zu relevanten Wissensträgern legen den Ausgangspunkt für die spätere Implementierung des WMS fest.

Ergebnis der Anwendungsfallbeschreibung ist die Erkenntnis, ob der Einsatz von WMS4SimPar und dementsprechend eine wissensgestützte Parametrisierung zu einer Steigerung der Simulationsmodellqualität im betriebsbegleitenden Einsatz führt. Zudem muss der Mehrwert, der durch den Einsatz von WMS4SimPar entsteht, in der Fragestellung hervorgehen.

Im Falle einer negativen Beurteilung des Mehrwerts sollten die verantwortlichen Personen hinterfragen, ob das System implementiert werden soll. Gegebenenfalls sprechen auch nicht-wirtschaftliche Interessen der Beteiligten oder des Unternehmens für eine Implementierung von WMS4SimPar. Bspw. wenn durch die erste Anwendung eines Wissensmanagementsystems die Belegschaft im Umgang mit WMS geschult werden soll.

5 Abweichungsidentifikation

Die Erfassung von Abweichungen zwischen der Simulation und dem realen Produktionssystem erfolgt anhand der Abweichungsidentifikation (AWI). Bestehend aus einzelnen Software-Services wird betriebsbegleitend der Zustand des realen und das Simulationsmodell überwacht. Bei Abweichungen, die einen Grenzwert über- oder unterschreiten, wird durch WMS4SimPar eine Parametrisierung des Simulationsmodells initiiert. Die Voraussetzungen für die AWI werden in Abschnitt 5.1 beschrieben. In Abschnitt 5.2 folgt die Eingrenzung der relevanten Kennzahlen, die für die prozessspezifische AWI erforderlich sind. Um die Simulation und die Realität datentechnisch verknüpfen zu können, wird in Abschnitt 5.3 ein Datenmodell vorgestellt. In Abschnitt 5.4 und Abschnitt 5.5 wird abschließend auf die Festlegung der Grenzwerte sowie die Identifikation der Abstrakte und des Beobachtungszeitraums eingegangen.

5.1 Voraussetzungen für die Abweichungsidentifikation

Für den Einsatz des Systems müssen bestimmte Voraussetzungen durch das Produktionssystem und dessen Simulationsmodell erfüllt sein, um eine datentechnische Abweichungsidentifikation umsetzen zu können. Das Produktionssystem muss entsprechende Anforderungen erfüllen und das Simulationsmodell muss für den betriebsbegleitenden Einsatz vorbereitet werden. Sind die Voraussetzungen nicht erfüllt, müssen (software-)technische Anpassungen vorgenommen werden.

5.1.1 Voraussetzungen des Produktionssystems

Der Einsatzzweck der EDS fokussiert die Simulation von Produktions- und Logistiksystemen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Darunter fallen Fertigungs- und Montageeinrichtungen sowie deren Prozesse (WENZEL et al. 2008, S. 1). Für eine Abweichungsidentifikation sind deshalb Daten aus Bereichen eines Produktionssystems relevant, die einen Einfluss auf das Verhalten des Systems haben. Aus struktureller Sicht eines Produktionssystems

5 Abweichungsidentifikation

ist daher eine datentechnische Anbindung auf den unteren Ebenen (siehe Abbildung 5.1) erforderlich, da diese Ebenen im Simulationsmodell abgebildet werden. Nach WIENDAHL (2009, S. 34) und WESTKÄMPER (2007, S. 11) entspricht dies den Ebenen *System*, *Zelle* und *Arbeitsstation*. Aus Sicht der vertikalen Integration der Daten innerhalb eines Unternehmens sind die unteren vier Ebenen der Automatisierungspyramide für die Anbindung relevant. Für die Abweichungserkennung muss auf die Daten aus der (*Prozess-*) *Leitebene*, der *Steuerungsebene*, der *Feldebene* sowie der *Prozessebene* zugegriffen werden können.

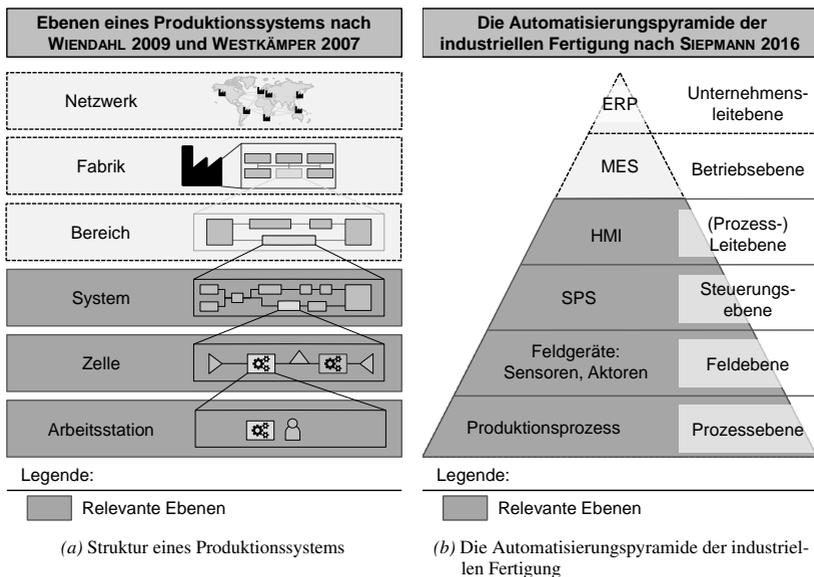


Abbildung 5.1: (a) relevante Ebenen im Modell nach WIENDAHL (2009, S. 34) und WESTKÄMPER (2007, S. 11)
 (b) relevante Ebenen der Automatisierungspyramide nach SIEPMANN (2016, S. 49)

Die Daten müssen während des Betriebs des Produktionssystems erfasst und gespeichert werden. Da sich der Datenzugriff auf die unteren Ebenen der Automatisierungspyramide fokussiert, eignet sich hierfür der plattformunabhängige Standard *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA) (REDELINGHUYS et al. 2019, S. 413; SIEPMANN 2016, S. 60 ff.). In den vergangenen Jahren hat sich OPC UA stark wei-

terentwickelt und ist in Bezug auf Industrie 4.0 sowohl im industriellen Umfeld als auch im Forschungsumfeld eine feste Größe geworden (REINHART 2017, S. 107). In einer Studie des VDMA E. V. (13.04.2021) gaben 90 % der 600 beteiligten Firmen an, dass sie OPC UA bereits implementiert haben oder dies zukünftig planen. Aus diesen Gründen ist für die Anbindung des Produktionssystems an WMS4SimPar der Zugriff über OPC UA realisiert.

5.1.2 Voraussetzungen der Simulation

Das System soll ein vorhandenes Simulationsmodell im betriebsbegleitenden Einsatz parametrisieren. Dementsprechend ist das Vorhandensein eines Simulationsmodells Voraussetzung. Dieses Modell kann beispielsweise aus einer früheren Phase des PLZ des Produktionssystems sein, z. B. aus der Entwicklungsphase (vgl. Abschnitt 2.1.3). Im Vergleich zu Modellen aus der Entwicklungs- oder Planungsphase des Produktionssystems müssen Modelle für den betriebsbegleitenden Einsatz weitere Voraussetzungen hinsichtlich der datentechnischen Anbindung erfüllen. Zum einen muss die Simulation an die betrieblichen IT-Systeme angebunden sein, um Daten aus der Simulation zu extrahieren und auf einer Datenbank zu speichern. Hierzu sind Datenbank-, Socket- oder OPC-Schnittstellen erforderlich (GUTENSCHWAGER et al. 2017, S. 251). Zum anderen müssen in der Simulation Parameter durch die Anwender oder die angebotenen IT-Systeme angepasst werden können. Darüber hinaus muss ein vorhandenes Simulationsmodell für den in Abschnitt 4.4 identifizierten Anwendungsfall geeignet sein. Daten aus der Simulation müssen über das ausgewählte Protokoll entweder in Echtzeit oder in regelmäßigen Abständen als Datenpakete an die Datenbank übertragen werden. Die Simulationsexperten und die Systemadministratoren müssen für die Anbindung sicherstellen, dass bei der Übertragung keine Daten verloren gehen und das Netzwerk nicht überlastet wird.

Sollte kein Simulationsmodell verfügbar sein, ein vorhandenes Modell die beschriebenen Voraussetzungen nicht erfüllen oder nicht für den Anwendungsfall geeignet sein, ist der Aufbau eines neuen Simulationsmodells gemäß dem in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Vorgehen notwendig.

5.2 Identifikation und Eingrenzung der relevanten Kennzahlen zur Abweichungsidentifikation

Eine in der Produktion weit verbreitete Kennzahl zur Messung der Anlagenproduktivität ist die *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) (FOCKE & STEINBECK 2018, S. 1). In einer Befragung im deutschsprachigen Raum aus dem Jahr 2014 gaben 70 % der 300 befragten Unternehmen an, die OEE vollständig oder teilweise zu nutzen. Die OEE erfasst neben technischen Störungen auch alle weiteren Einflussfaktoren, die zu einer Veränderung der Anlagenproduktivität führen. Sie setzt sich aus den drei Teilkennzahlen Verfügbarkeit, Leistungseffizienz und Qualitätsrate zusammen (FOCKE & STEINBECK 2018, S. 3) (siehe Abbildung 5.2). Für die Abweichungsidentifikation in WMS4SimPar ist jedoch nicht die nominelle Kennzahl relevant, sondern die Abweichung zwischen den in der Simulation ermittelten Teilkennzahlen der OEE und den realen Kennzahlen des Produktionssystems.

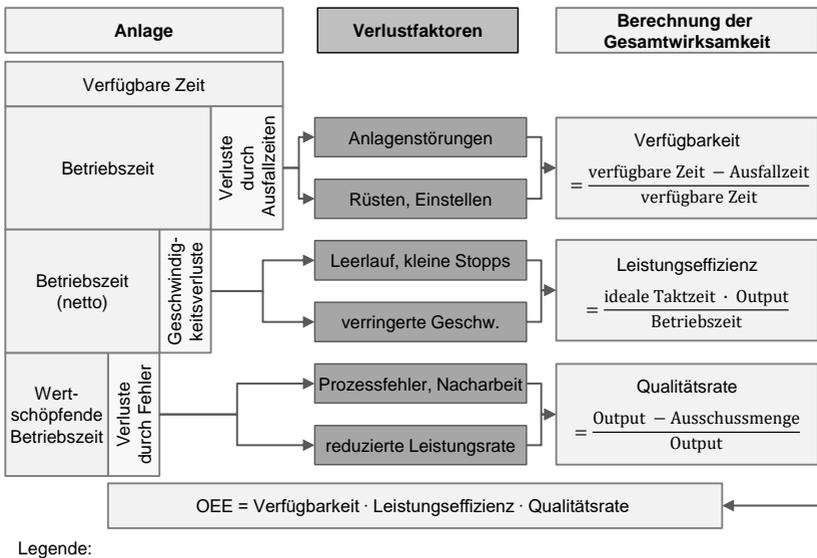


Abbildung 5.2: Relevante Faktoren der OEE für die AWI in Anlehnung an NAKAJIMA (1988, S. 25)

5.2 Identifikation und Eingrenzung der relevanten Kennzahlen

In der Materialflusssimulation stellen Arbeitsstationen, bestehend aus einer Einzelstation mit oder ohne manuellem Arbeitsplatz, die kleinsten Modelleinheiten zur Produktion oder Bearbeitung von Produkten innerhalb eines Produktionssystems dar. Sie bilden die feinste Granularität für wertschöpfende Tätigkeiten. Für die Logistik bilden die unterschiedlichen Transportmittel und Lagermodule, wie bspw. Förderbänder, Umsetzer oder fahrerlose Transportfahrzeuge (FTFs), die kleinsten Einheiten. Die Abbildung von Produktionsprozessen erfolgt über die Verknüpfung und Steuerung aller Bausteine innerhalb des Modells. Dabei bildet vor allem die individuelle Parametrisierung der Modellbausteine mit den zugehörigen Daten das Verhalten der realen Anlage ab (DENKENA et al. 2017). Gemäß den Daten für die Simulation (vgl. Abbildung 2.15) aus der Richtlinie VDI 3633-1 entspricht dies den Fertigungsdaten sowie den Stördaten, die demnach für die Parametrisierung relevant sind.

Die Verlustfaktoren (siehe Abbildung 5.2) aus den Teilkennzahlen der OEE einer Produktionsanlage sowie das Wissen über die relevanten Daten für die Simulation legen die Kennzahlen für das System WMS4SimPar fest. Die Bestimmung erfolgt anhand von Sensoren innerhalb der Anlage und dem Zugriff auf die Parameter innerhalb der Simulation. Seitens des Produktionssystems werden zwei Arten von Sensoren unterschieden. Zum einen erfolgt die Erfassung über Sensoren, die Daten mit einem Zeitbezug (auch Zeitstempel genannt) zurückmelden. Bspw. erfasst eine Lichtschranke vor und nach einer Einzelstation das Ein- und Austreten des Produkts, wodurch die Verweildauer innerhalb der Anlage bestimmt werden kann. Zum anderen greift das System auch auf Parameter oder Variablen aus dem SPS-Code zu, um Zeitstempel aus dem Prozess zu erhalten. Dies wird weitläufig auch als Soft-Sensor bezeichnet. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dies jedoch nicht weiter unterschieden und ebenfalls als Sensor bzw. Datenquelle betrachtet. Die Bestimmung der Qualitätsrate erfolgt über die Zählung der Ausschussmenge. Dieses Verfahren erfordert eine Datenaufnahme über eine repräsentative Zeitspanne und muss entsprechend im Baustein der AWI durch die System-Administratoren implementiert werden.

Die Anbindung der Sensoren sowie der Simulationsparameter erfolgt im System WMS4SimPar über die OPC UA-Schnittstelle zwischen der SPS bzw. dem Simulationsmodell und dem übergeordneten System der Abweichungsidentifikation.

In WMS4SimPar ist eine lückenlose Erfassung der Prozessschritte erforderlich, um Abweichungen identifizieren zu können. Ein Zeitstempel bei einem Prozessende ist zugleich der Startzeitpunkt für einen nachfolgenden Prozess. Anhand einer lückenlosen

5 Abweichungsidentifikation

Erfassung der Prozesse ist sichergestellt, dass auf Basis der erfassten Abweichungen in den jeweiligen Prozessen die Abweichung des gesamten Systems erfasst werden kann. Bei Bestandsanlagen mit einem geringen Digitalisierungsgrad kann es vorkommen, dass Daten zu einzelnen Prozessen nicht vorliegen. In diesem Fall haben die System-Administratoren die Möglichkeit, die betroffenen Prozesse bis zu einem Abstraktionsgrad zusammenzufassen, bei denen Daten über Start- und Endzeitpunkte vorliegen. Im Vergleich zu rein datentechnischen Systemen zur Modellsynchronisierung kann der nachgelagerte Wissensansatz die fehlende Datenbasis kompensieren (vgl. Abschnitt 6.4).

5.3 Verknüpfung der Datenpunkte anhand eines Datenmodells

Die Ermittlung von Abweichungen erfolgt anhand eines Vergleichs zwischen den ermittelten Sensorwerten des Produktionssystems und den Parametern aus der Simulation (siehe Abschnitt 5.1.2). Hierzu ist ein Mapping zwischen den Datenpunkten aus dem Produktionssystem und den Parametern der Simulation erforderlich. Durch das Mapping von mehreren Datenpunkten entsteht ein gesamtes Datenmodell, welches die Zusammenhänge zwischen dem Produktionssystem und dem Simulationsmodell abbildet (KATTNER et al. 2019, S. 3665). Die Erstellung des Datenmodells ist Aufgabe der System-Administratoren und ist in der Initialisierung sowie der Pflege von WMS4SimPar durchzuführen.

Ein in der Softwareentwicklung weit verbreitetes und mittlerweile auch in der Produktionstechnik angewandtes Vorgehen zur Beschreibung von Datenmodellen ist die *Unified Modeling Language* (UML) (VDI 4499-3, S. 16; S. FELDMANN et al. 2016, S. 1120). Sie ist eine grafische Beschreibungssprache, um (Software-) Systeme zu modellieren (VDI 4499-3, S. 16; RUPP & QUEINS 2012, S. 3). Anhand von verschiedenen Diagrammen wird sowohl die Struktur als auch das Verhalten des Systems beschrieben. Nachfolgend werden verschiedene Diagrammtypen der UML für die Beschreibung des Datenmodells des Systems WMS4SimPar verwendet. Für mehr Informationen zur UML sei an dieser Stelle auf das Werk von RUPP & QUEINS (2012) und die offizielle Website der Object Management Group® (OMG®)¹ verwiesen.

¹<https://www.omg.org>

5.3 Verknüpfung der Datenpunkte anhand eines Datenmodells

Wie im vorherigen Abschnitt 5.2 beschrieben, basiert die Abweichungsidentifikation auf einem Abgleich der Sensorwerte aus dem Produktionssystem mit den Parametern der Simulation. Das Mapping findet auf Basis der verfügbaren Daten aus dem Produktionssystem statt und verknüpft die jeweiligen Prozesse. Darüber hinaus bietet die Prozessebene mehr Flexibilität in der Abbildung des Produktionssystems. Zum einen kann, wie in den Verlustfaktoren der OEE zu sehen ist, eine Anlage in mehrere Prozesse unterteilt werden und somit eine Untergliederung in die unterschiedlichen Teilprozesse einer Anlage erfolgen. Falls bspw. eine ausreichende sensortechnische Erfassung der Anlage vorhanden ist, kann die Durchlaufzeit in die Prozesse *Rüsten* und *Bearbeiten* unterteilt werden. Zum anderen ermöglicht die Prozesssicht, mehrere Arbeitsstationen zu einem übergeordneten Prozessschritt zusammenzufassen und in der AWI zu überwachen.

Das UML-Klassendiagramm in Abbildung 5.3 zeigt die Zusammenhänge zwischen der AWI, dem realen Produktionssystem und dem Simulationsmodell. Ein *Produktionssystem* besteht dabei immer aus mindestens einem *Prozess* und einer *Arbeitsstation*, dargestellt durch eine Kompositionsverbindung. *Sensoren* sind immer Teil einer Station und für die Realisierung einer AWI ist mindestens ein Sensor notwendig, der Daten über den Prozess liefert. Die Assoziationsverbindung zwischen *Arbeitsstation* und *Prozess* gibt mit ihrer Multiplizität an, dass sowohl eine Arbeitsstation aus einem oder mehreren Prozessen, aber auch ein Prozess aus einer oder mehreren Arbeitsstationen bestehen kann. Das Simulationsmodell ist analog zum Produktionssystem modelliert, mit der Ausnahme, dass die Simulation Daten anhand von *Parametern* liefert. Die Daten der Sensoren und der Parameter werden an die individuelle AWI übermittelt, um die jeweils überwachte Kennzahl des Prozesses zu bilden und zu überwachen. In einem AWI-Baustein kann immer nur ein Prozess überwacht werden. Besteht ein System aus mehreren Prozessen, sind mehrere AWIs notwendig. Bei AWI-Bausteinen kann zwischen einer qualitätsbasierten und einer zeitbasierten AWI unterschieden werden. Im UML-Diagramm ist dies anhand der Generalisierung dargestellt (siehe Abschnitt 5.5).

Abbildung 5.4 zeigt einen beispielhaften Auszug aus einem Datenmodell in Form eines UML-Objektdiagramms². Ein Objektdiagramm (OD) stellt ein System in einer instanziierten Form dar und verwendet überwiegend Instanzen von Klassen (RUPP

²Aus Darstellungsgründen werden die vorhandenen Kompositionsverbindung zwischen den Prozessbausteinen und den beiden Instanzen „Batterieproduktion“ in Abbildung 5.4 nicht dargestellt.

5 Abweichungsidentifikation

& QUEINS 2012, S. 184). Im Diagramm abgebildet ist ein Produktionssystem für die Montage von Batteriemodulen in der Automobilindustrie. Der Diagrammauszug besteht aus einem Transportmodul und einem Montagemodul. Das Transportmodul wird im Beispiel durch den Prozess *Module fördern* beschrieben und wird von der zeitbasierten AWI-Klasse *AWI Module fördern* überwacht. Der Baustein enthält die Methode *AW-Berechnung*, anhand derer die Abweichung zwischen dem Prozess des Produktionssystems und dem Prozess innerhalb der Simulation berechnet wird. Die Arbeitsstation *Montage 1* wird durch zwei Prozesse beschrieben: Zum einen, analog zu *Transport 1*, eine zeitbasierte AWI für die Erfassung der Bearbeitungszeiten und zum anderen ein Prozess zur Qualitätsprüfung, welcher anhand der qualitätsbasierten AWI-Klasse überwacht wird.

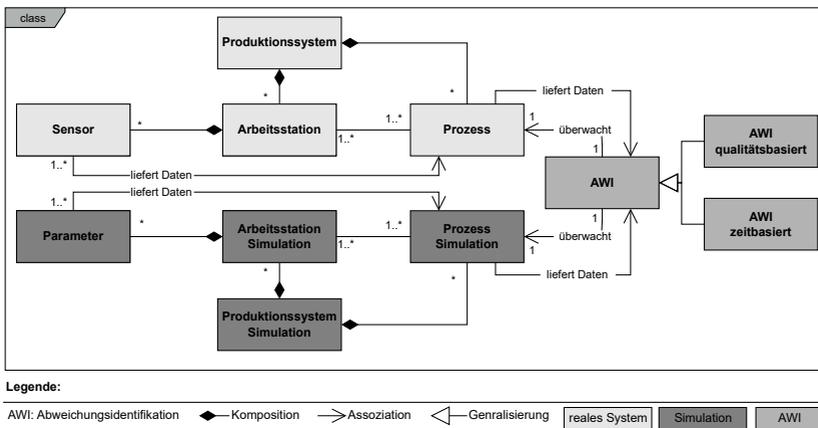


Abbildung 5.3: UML-Klassendiagramm des Datenmodells zur Verknüpfung der Datenpunkte

5.4 Festlegung der Abweichungsgrenzwerte

Die Festlegung der Abweichungsgrenzwerte hinsichtlich der erforderlichen Simulationsmodellgüte ist eine wichtige Einstellgröße für das System WMS4SimPar. Die Abweichungsgrenzwerte legen fest, bis zu welchem Maß eine Abweichung des Simulationsmodells vom realen Produktionssystem zulässig ist. Über- oder unterschreitet eine Abweichung die Grenzwerte, reicht die Güte des Simulationsmodells nicht mehr aus,

5.4 Festlegung der Abweichungsgrenzwerte

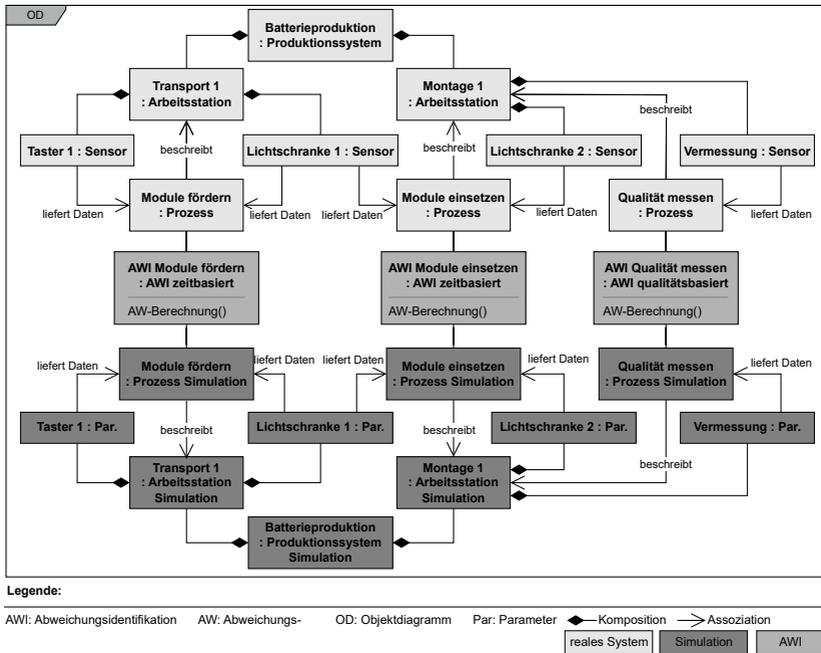


Abbildung 5.4: Beispielhaftes UML-Objektdiagramm für die Verknüpfung der Datenpunkte

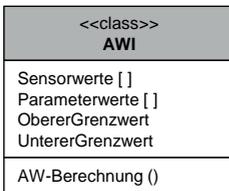
um die Fragestellung gemäß dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen Anwendungsfall mit ausreichender Genauigkeit zu beantworten. In diesem Fall folgt die Parametrisierung des Simulationsmodells anhand der weiteren Lösungsbauteile des Systems WMS4SimPar. Werden die Grenzwerte eingehalten, ist die Genauigkeit des Simulationsmodells ausreichend und es müssen keine Änderungen durchgeführt werden.

Die Festlegung der Grenzwerte erfolgt auf Prozessebene in den jeweiligen AWIs der Prozessbausteine. Hierzu wird die in Abschnitt 5.3 eingeführte Klasse der AWI um die Attribute *ObererGrenzwert* und *UntererGrenzwert* erweitert (siehe Abbildung 5.5a). Die Entscheidung über die geforderte Qualität des Modells liegt jedoch im Ermessen der Anwender und muss daher erfahrungsgeleitet sowie anwendungsspezifisch durchgeführt werden. Anhaltspunkte für die Definition der Qualität geben die in Abschnitt 2.3.7 vorgestellten V&V-Kriterien sowie die Metrik von BARTH et al. (2020). Vorteilhaft für die Anwender ist der Umstand, dass bei der Implementierung des Systems WMS4SimPar

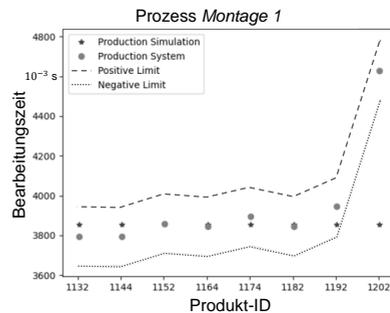
5 Abweichungsidentifikation

das betriebsbegleitende Simulationsmodell i. d. R. existiert und anhand von Vorversuchen die geforderte Modellqualität in den Prozessbausteinen ermittelt werden kann.

Je nach Art der Modellierung des Simulationsmodells und nach Art des Produktionssystems unterliegen beide Systeme stochastischen Einflüssen, die in der Festlegung der Grenzwerte berücksichtigt werden müssen (WENZEL et al. 2008, S. 86). Das bedeutet, dass der Grenzwertkorridor die stochastischen Abweichungen des Simulationsmodells und der Realität berücksichtigen bzw. diese kompensieren muss. Wie beispielsweise in Abbildung 5.5b dargestellt, befindet sich die Abweichung der Bearbeitungszeit in sieben von acht Montagevorgängen an *Montage 1* innerhalb des Grenzkorridors, auch wenn der Prozess gewissen Schwankungen unterliegt. Im letzten Produkt mit der Produkt-ID 1132 ist die Abweichung größer als der erlaubte untere Grenzwert. In diesem Fall wird der Prozess zur Wissensgenerierung gestartet, um zu identifizieren, ob und wie das Simulationsmodell parametrisiert werden muss.



(a)



(b)

Abbildung 5.5: (a) UML-Klasse für die Grenzwerte der AWI

(b) Darstellung der Grenzwerte im Beispielmodul Montage 1

5.5 Bestimmung der Abtastezeit und des Beobachtungszeitraums

Die Abtastezeit und der Beobachtungszeitraum sind zwei Parameter innerhalb jeder AWI, die in der Initialisierung durch die System-Administratoren, auch in Zusammenarbeit mit den Simulationsexperten, festgelegt werden müssen. Die Abtastezeit legt fest, in welchem Zyklus Daten aus den jeweiligen Prozessen gespeichert und verarbeitet werden.

5.5 Bestimmung der Abtastezeit und des Beobachtungszeitraums

Gemäß den individuellen Zyklen der überwachten Prozesse (k) erfolgt zum Zeitpunkt t_i die Übertragung der Daten aus dem Produktionssystem (P) und dem Simulationsmodell (S). Die Abweichung eines einzelnen Prozesses $a_k(t_i)$ ergibt sich aus der Subtraktion der beiden erfassten Zustände des Produktionssystems $s_k^P(t_i)$ und des Simulationsmodells $s_k^S(t_i)$ (siehe Gleichung 5.2). Die Überwachung aller Prozesse wird anhand der Matrixschreibweise, wie in Gleichung 5.1 dargestellt, zusammengefasst. Zur Vereinfachung wird die Notation $\mathbf{A}(t_i) \equiv \mathbf{A}_i$ verwendet (VERNICKEL & SCHILP 2022, S. 124).

Die Berechnung der Zustände $\mathbf{S}_i^{P,S}$ unterscheidet sich hinsichtlich des Verhaltens des überwachten Prozesses. Qualitätsbasierte Kennzahlen beschreiben ein Verhältnis aus dem Gut-Anteil zu der Gesamtzahl an produzierten Produkten. Für die Bildung dieser Kennzahl ist entsprechend eine Mindestanzahl an produzierten Teilen notwendig, die das aktuelle Verhalten der Anlage widerspiegelt.

Anhand des Beobachtungszeitraums wird der Zeitraum in der AWI festgelegt, der zur Bestimmung der Kennzahl dient. Anhand des Beobachtungszeitraums werden entsprechend der in der Vergangenheit liegende Zeitpunkt t_h und dessen Zustände $s_k^{P,S}(t_h)$ sowie für alle zwischen t_h und t_i liegenden Zeitpunkte die jeweiligen Zustände verwendet, um daraus den Mittelwert $\bar{s}_k^{P,S}(t_i)$ zu berechnen (siehe Gleichung 5.3 und Gleichung 5.4). Selbiges Vorgehen gilt für die Bestimmung von Abweichungen bei Kennzahlen mit stochastischen Schwankungen. Anhand der Mittelwertbildung sinkt die Sensitivität, wodurch eine Überschreitung der Grenzwerte aufgrund von natürlichen Schwankungen reduziert wird. Dadurch verringert sich die Anzahl an unnötigen Aufforderungen des Systems zur Anpassung von Simulationsparametern mittels des WMS, wodurch die Arbeitsbelastung der Wissensträger reduziert wird. Bei der Festlegung der Grenzwerte in Abschnitt 5.4 und der Bestimmung des Beobachtungszeitraums besteht demnach eine enge Abhängigkeit, die auf der einen Seite berücksichtigt werden muss und auf der anderen Seite Flexibilität zur Feineinstellung des Gesamtsystems bietet.

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{S}_i^P - \mathbf{S}_i^S \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} a_1(t_i) &= s_1^P(t_i) - s_1^S(t_i) \\ a_2(t_i) &= s_2^P(t_i) - s_2^S(t_i) \\ &\vdots \\ a_k(t_i) &= s_k^P(t_i) - s_k^S(t_i) \end{aligned} \quad (5.2)$$

5 Abweichungsidentifikation

$$a_k(t_i) = \begin{cases} \bar{s}_k^P(t_i) - \bar{s}_k^S(t_i), & \text{für qualitative Abweichungen} \\ & \text{oder stochastische Schwankungen} \\ s_k^P(t_i) - s_k^S(t_i), & \text{für Werte mit direktem Zeitbezug zu } t_i \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\bar{s}_k^{P,S}(t_i) = \frac{1}{i-h} \sum_{l=h}^{l=i} s_k^{P,S}(t_l) \quad (5.4)$$

Solange sich eine Abweichung a_k eines Prozesses innerhalb des Korridors zwischen unterem und oberem Grenzwert befindet (vgl. Gleichung 5.5), erfüllt der Prozess im Simulationsmodell die Qualitätsansprüche. Über- oder unterschreitet eine Abweichung jedoch einen der beiden Grenzwerte, löst dies in der AWI ein Event aus, wodurch der Prozess zur wissenschaftsgestützten Parametrisierung des Simulationsmodells gestartet wird.

Die UML-Klasse der AWI aus Abbildung 5.5a wird entsprechend um die Parameter *Abtaste* und *Beobachtungszeitraum* sowie um die Methode *Parametrisierung(Event)* erweitert (siehe Abbildung 5.6)

$$\varepsilon_k^{UG} \leq a_k \leq \varepsilon_k^{OG} \quad (5.5)$$



Abbildung 5.6: Erweiterung der UML-Klasse

6 Wissensgenerierung und -verarbeitung

In diesem Kapitel wird der dritte Baustein des Systems WMS4SimPar, die Wissensgenerierung und -verarbeitung, beschrieben. Ziel ist die Externalisierung von personengebundenem Wissen (siehe Abschnitt 2.2.3) zu aktuellen Vorkommnissen am Produktionssystem, die zu Abweichungen zwischen Simulation und Realität geführt haben. Die Auswahl einer geeigneten Wissensrepräsentation für das System wird in Abschnitt 6.1 beschrieben. Der Aufbau der WDB mit ihren spezifischen Anforderungen wird in Abschnitt 6.2 ausgeführt. In der WDB wird Wissen über das System und auftretende Abweichungen gespeichert. Für letzteres ist ein Aufruf an potenzielle Wissensträger erforderlich. In Abschnitt 6.3 wird der entwickelte Personalisierungsdienst (vgl. Abbildung 2.11) vorgestellt, der automatisiert die relevanten Wissensträger identifiziert und ihnen die aktuellen Abweichungen zuweist. Der Ablauf der Wissensgenerierung im betriebsbegleitenden Einsatz wird in Abschnitt 6.4 beschrieben. Die Erläuterung der Speicherung des Wissens in der Ontologie folgt in Abschnitt 6.5. Die Erfassung des Wissens wird anhand eines UI durchgeführt, was abschließend in Abschnitt 6.6 vorgestellt wird.

6.1 Auswahl einer geeigneten Wissensrepräsentation

Wissen kann (vgl. Abbildung 2.7) auf verschiedene Arten repräsentiert werden, um Wissensdatenbanken und ein WMS innerhalb eines Unternehmens aufzubauen. Die Festlegung einer geeigneten Wissensrepräsentation für das System WMS4SimPar basiert auf dem von BRANDMEIER (2020, S. 91) vorgestellten Navigator, welcher in Abbildung 6.1 zu sehen ist. Aufgrund der höheren Expressivität und der Vorteile der logischen Wissensverarbeitung sowie des Reasonings fällt die Wahl auf eine Ontologie. Zudem bieten die größere semantische Ausdrucksstärke sowie die Einteilung in Levels (siehe Abbildung 2.8) weitere Vorteile, da dadurch Ontologien wiederverwendet und kombiniert werden können. Darüber hinaus wird es in Zukunft auch möglich sein, verschiedene Ontologien zusammenzuführen, wie in OCKER et al. (2022) vorgestellt wird. Gegenüber anderen Wissensrepräsentationsmethoden bietet eine Ontologie weitere

6 Wissensgenerierung und -verarbeitung

Vorteile (NOY & MCGUINNESS 2001, S. 1):

- Gemeinsames Verständnis der Struktur von Informationen zwischen Menschen oder Software-Agenten
- Wiederverwendung von Fachwissen
- Explizite Darstellung von Domänenannahmen
- Trennung von Domänenwissen und operativem Wissen

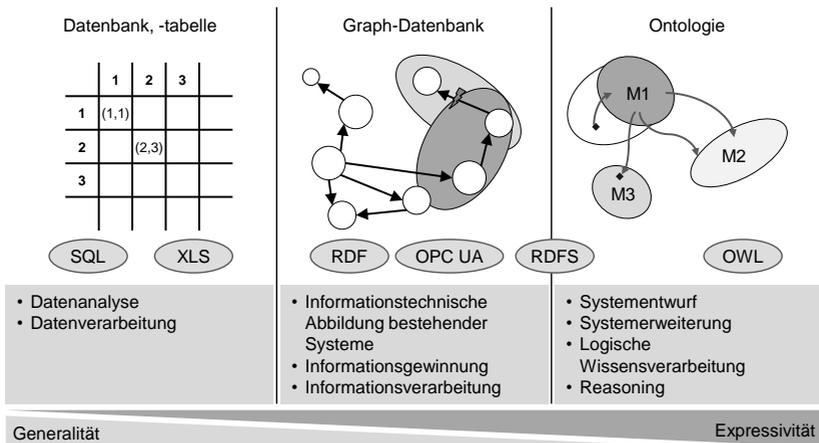


Abbildung 6.1: Bestimmung der idealen Repräsentationsform in Anlehnung an BRANDMEIER (2020, S. 91)

6.2 Aufbau einer Wissensdatenbank

Der Aufbau einer Wissensdatenbank folgt dem in Abbildung 6.2 dargestellten Vorgehen. Der Ablauf ist an die Vorgehen nach BRANDMEIER (2020, S. 118), NOY & MCGUINNESS (2001) und USCHOLD & GRUNINGER (1996) angelehnt und für den Einsatz in WMS4SimPar angepasst. Ergebnis des nachfolgend dargestellten Aufbaus einer WDB ist die sogenannte *Simulation Model and Automated Production System Synchronization* (SMAPSS)-Ontologie, die bereits von VERNICKEL et al. (2022) präsentiert und im Anschluss weiterentwickelt wurde. SMAPSS ist eine für das System WMS4SimPar entwickelte allgemeingültige Ontologie, die allgemein anwendbar und von Anwendern

spezifisch auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden kann. Der Aufbau einer Wissensdatenbank ist durch die System-Administratoren durchzuführen.

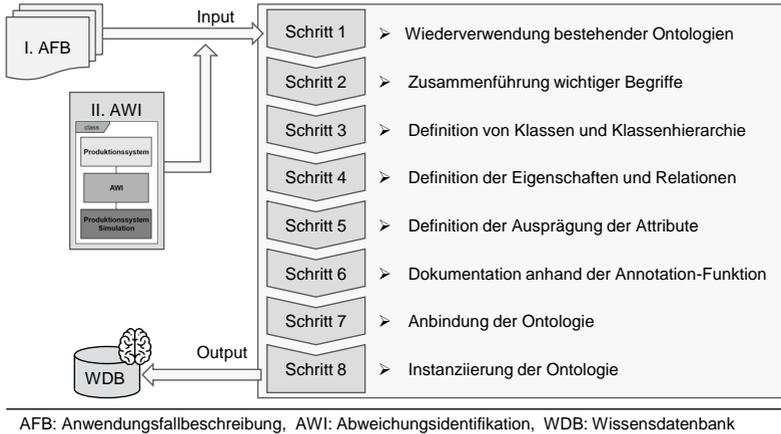


Abbildung 6.2: Vorgehen für den Aufbau einer Ontologie für WMS4SimPar

Input

Ausgangspunkt bzw. Informationsquelle für den Aufbau der Wissensdatenbank sind die Dokumente der Anwendungsfallbeschreibung sowie die UML-Diagramme aus der Abweichungsidentifikation. Darauf aufbauend wird in den nächsten Schritten die Ontologie entwickelt. Im Rahmen des Systems WMS4SimPar legen die allgemeinen und spezifischen Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.1) sowie die Beschreibung des Anwendungsfalls (vgl. Abschnitt 4.4) den Anwendungsbereich fest. Konkret für WMS4SimPar bedeutet dies, dass anhand der Ontologie eine semantische und maschinen-interpretierbare Verknüpfung zwischen den stattfindenden Prozessen im Produktionssystem, dem Simulationsmodell sowie den beteiligten Personen der Organisation geschaffen werden muss. Das in Abschnitt 5.3 vorgestellte Datenmodell muss um den organisatorischen Bereich, der sich aus der Anwendungsfallbeschreibung ergibt, erweitert werden.

Schritt 1: Wiederverwendung bestehender Ontologien

Die Wiederverwendung von Ontologien bietet mehrere Vorteile. Zum einen reduziert sich der Aufwand für die Erstellung, wenn auf bestehende Konzepte zurückgegriffen werden kann. Zum anderen lassen sich Fehler in der Modellierung vermeiden, wenn

mehrfach geprüfte oder standardisierte Ontologien verwendet werden. Des Weiteren können anwendungsbezogene Domänen-Ontologien, die auf denselben Mid-Level- und Upper-Level-Ontologien basieren, fusioniert und kombiniert werden.

Der konkrete Anwendungsbezug des Systems WMS4SimPar bedingt, dass es sich um eine Ontologie auf Domänen-Level handelt. Demnach wird zuerst überprüft, ob bereits eine entsprechende Domänen-Level-Ontologie für den Anwendungsbereich existiert, die an den spezifischen Anwendungsfall angepasst werden kann. Sollte keine Domänen-Level-Ontologie vorhanden sein, können Konzepte aus anderen Domänen-Level-Ontologien sowie Mid-Level- und Upper-Level-Ontologien wiederverwendet werden.

Vorteilhaft für den Aufbau einer Ontologie ist der aktuelle zunehmende Einsatz von Ontologien in der Industrie, was die Anzahl an verfügbaren und potenziell passenden Ontologien erhöht (OLIVARES-ALARCOS et al. 2022, S. 1). Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Vorstellung der verschiedenen Ontologien verzichtet, es sei an dieser Stelle aber auf die Arbeiten von NAGY et al. (2021, S. 9) und CAO et al. (2019, S. 68) verwiesen, die einen Überblick über die aktuellen Ontologien im Bereich der Fertigungstechnologien bieten.

Die Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 3.3) ergab, dass keine direkt verwendbare Ontologie vorhanden ist, aber einige übertragbare Konzepte auf Domänen-Level, Mid-Level und Upper-Level vorhanden sind. Außerdem wurde deutlich, dass im Bereich der Fertigungstechnologien ein Großteil der Domänen-Ontologien auf die Mid-Level-Ontologie *Common Core Ontologies (CCO)*¹ und deren Upper-Level-Ontologie *Basic Formal Ontology (BFO)*² zurückgreift. Zudem ist die BFO als ISO Standard ISO/IEC 21838-2 verfügbar und garantiert einen Austausch und die einheitliche Verarbeitung unterschiedlicher Modelle (STUCKENSCHMIDT 2009, S. 98). Die Basis für die SMAPSS-Ontologie von WMS4SimPar bilden die Konzepte der *ROMAIN*-Ontologie von KARRAY et al. (2019), die die industrielle Instandhaltung abbildet, sowie die *PLC ontology* von OTTE et al. (2019), die den Produktlebenszyklus darstellt. Im Umfeld dieser Arbeit entstand bereits im Vorfeld eine Domänen-Ontologie für die Abbildung von Produktionsumgebungen. Die sogenannte *Manufacturing-Ontologie* von Thomas Bjarsch baut bereits auf

¹Die CCO können über folgenden Link abgerufen werden:

<https://github.com/CommonCoreOntology/CommonCoreOntologies>

²Die BFO kann über folgenden Link abgerufen werden: <https://basic-formal-ontology.org/>

den CCO- und BFO-Ontologien auf. Zur Sicherstellung einer einheitlichen Modellierung und zur möglichen Zusammenführung der unterschiedlichen Domänen erfolgt der Aufbau der SMAPSS-Ontologie für das System WMS4SimPar auf der *Manufacturing Ontologie* nach Bjarsch.

Schritt 2: Zusammenführung wichtiger Begriffe

Aus dem festgelegten Anwendungsbereich ergeben sich die wichtigsten Begriffe, die identifiziert und aufgelistet werden müssen, um daraus die Ontologie zu bilden. Zu Beginn sollte die kontextbezogene Ebene untersucht werden, um alle relevanten Begriffe zu sammeln. Zunächst ist es wichtig, eine umfassende Liste von Begriffen zu erstellen, ohne sich Gedanken über Überschneidungen zwischen den Konzepten, die sie repräsentieren, über Beziehungen zwischen den Begriffen oder über Eigenschaften der Konzepte zu machen (NOY & MCGUINNESS 2001, S. 6). Tabellen mit Begriffsfamilien (siehe Tabelle 6.1) unterstützen bei einer strukturierten Erstellung der Liste.

Die Dokumente der Anwendungsfallbeschreibung sowie das Datenmodell aus der AWI sind Informationsquellen für die relevanten Begriffe der SMAPSS-Ontologie. Die Organisationsstruktur und die Zusammenhänge zwischen den beteiligten Personen sind aus der Anwendungsfallbeschreibung zu entnehmen. Das Datenmodell aus Abschnitt 5.3 liefert die Struktur des Produktionssystems und die Zusammenhänge mit der AWI, die in der Ontologie abgebildet werden müssen.

Die in Tabelle 6.1 dargestellten Begriffe sind zu Beginn nicht vollständig, werden aber im weiteren Verlauf iterativ durch die Schritte 4 bis 7 vervollständigt. Für eine verbesserte Wiederverwendbarkeit der Ontologie wird diese in englischer Sprache erfasst und aufgebaut.

Schritt 3: Definition von Klassen und Klassenhierarchie

Die gesammelten Begriffe aus Schritt 3 sind bisher ungeordnet und bilden keine logischen Hierarchien ab. In Schritt 5 werden aus den Begriffen Klassen sowie deren Subklassen definiert. Dabei ist zu beachten, dass Subklassen stets alle Merkmale der Superklasse teilen und zusätzlich durch mindestens ein weiteres Attribut genauer spezifiziert werden (BRANDMEIER 2020, S. 120).

In SMAPSS ergibt sich die Struktur in erster Linie aus der vorgegebenen Struktur der drei wiederverwendeten Ontologien *Manufacturing*, CCO und BFO. In diese Klassenstruktur sind die Klassen, die bisher nicht in den bestehenden Ontologien enthalten, aber

Tabelle 6.1: Wichtige Begriffe für den Aufbau der SMAPSS-Ontologie

Produktion	Simulation	Organisation	Abweichungen
Production System	Simulation Parameter	Organization Departments	Deviation DeviationType
Production Line	Process Simulation	Person	DeviationReason
Process Date	Device Simulation	ShopFloorExpert	Deviation Detector
Device	Product Simulation	SimulationExpert	Provided Knowledge
Process		Project	Knowledge Confidence
Product		Location	equation
Sensor			Lower Boundary
Order			Upper Boundary
			Process Deviation

für das WMS des Systems WMS4SimPar notwendig sind, eingeordnet. Eine wichtige Klasse zur genaueren Beschreibung einer Abweichung (Klasse *Deviation*) stellt der Grund der Abweichung (engl. *Deviation Reason*) dar. Anhand eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs soll der Ursprung für eine Abweichung genauer klassifiziert und in der Ontologie abgebildet werden. Hierzu wurde die Klasse *Deviation Reason* eingeführt, die insgesamt sechs weitere Subklassen enthält (siehe Abbildung 6.3). Fünf der sechs Subklassen beziehen sich auf die sogenannte 5-M-Methode, die fünf grundsätzliche Ursachen für Abweichungen in einem Produktionssystem definiert (vgl. GALASKE et al. 2015, MEYER et al. 2013 und KAMISKE & BRAUER 2011). Die fünf grundsätzlichen Ursachen *Man Power*, *Material*, *Method*, *Milieu* und *Machine* sind im Ishikawa-Diagramm in Abbildung 6.3 dargestellt. Darüber hinaus enthält das Ishikawa-Diagramm eine weitere Klasse, die im Rahmen von SMAPSS eingeführt wird. Die Klasse *Unknown Reason* wird als Klasse für alle Abweichungen verwendet, bei denen entweder bislang keine eindeutige Klassifizierung getroffen werden konnte oder bisher noch keine Klassifizierung durch einen Wissensträger stattgefunden hat.

Bei der Anwendung in einem spezifischen Use Case kann jede Subklasse der 5-Ms noch weiter unterteilt werden, um eine detailliertere Klassenhierarchie aufzubauen, wie die Beispiele in Abbildung 6.3 zeigen.

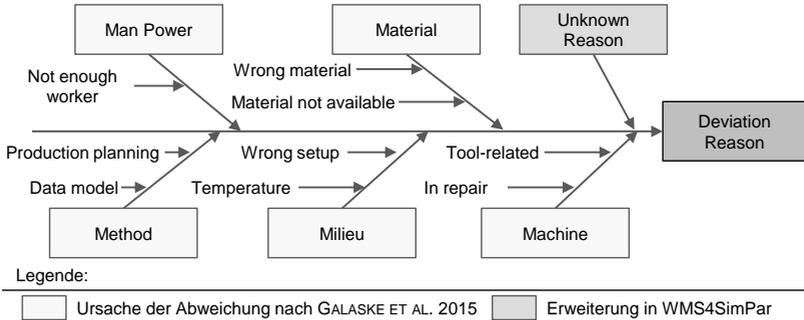


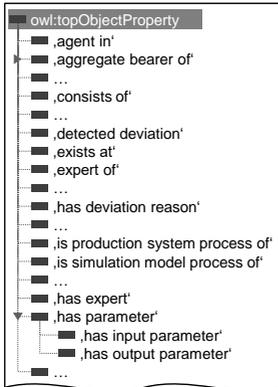
Abbildung 6.3: Ishikawa-Diagramm zur Ermittlung der Ursachen von Abweichungen in Anlehnung an GALASKE et al. (2015)

Schritt 4: Definition der Eigenschaften und Relationen

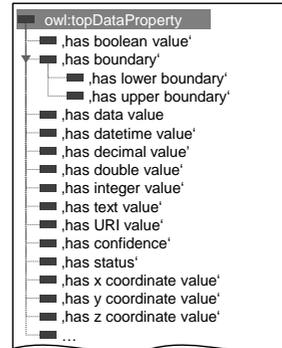
Anhand von Eigenschaften und Relationen werden Klassen genauer beschrieben und miteinander verknüpft. In Ontologien erfolgt die Modellierung der Eigenschaften mittels sogenannter *Properties*, die in diesem Schritt definiert werden. Dabei wird zwischen zwei Arten von *Properties* unterschieden. *Object-Properties* dienen der Verknüpfung von Klassen, während *Data-Properties* Klassen bzw. Instanzen von Klassen mit konkreten Werten oder Eigenschaften genauer beschreiben können. In Abbildung 6.4a ist ein Auszug der wichtigsten *Object-Properties*, die für die Verknüpfung der neuen Klassen ergänzt wurden, hervorgehoben dargestellt. Mittels der Object-Property *consists_of* wird der Aufbau des Simulationsmodells abgebildet. Eine beispielhafte Abbildung als Ontologie-Tupel zwischen einem Simulationsmodell und einer Station würde lauten: *Simulation Model 'consists_of' Testing-Station-Sim*. Die Object-Property *detected deviation* dient zur Verknüpfung von identifizierten Abweichungen mit der zugehörigen AWI. Relevante Wissensträger, die als Experten zu einem konkreten Prozess oder einem bestimmten Bereich des Produktionssystems bekannt sind, werden mittels der Verknüpfung *expert_of* abgebildet. Die inverse Verbindung *has_expert* wird automatisch anhand der Reasoning-Funktion in der Ontologie ergänzt. Die in Schritt 3 beschriebene Klasse *Deviation Reason* ist über die Object-Property *has deviation reason* mit der jeweiligen Abweichung verknüpft. Die Object-Properties *has_input_parameter* und *has_output_parameter* dienen zur Abbildung der Zusammenhänge zwischen den Mess- und Einstellparametern in der Simulation. Die Notwendigkeit der Abbildung dieses Zusammenhangs ist in Abschnitt 7.1 beschrieben. Bei den *Data-Properties* in Abbildung 6.4b sind alle Properties von SMAPSS abgebildet. Die in der Abbildung

6 Wissensgenerierung und -verarbeitung

fettgedruckten *Data-Properties* wurden ergänzt, da diese für das System WMS4SimPar notwendig sind. Mittels der Data-Properties *has lower boundary* und *has upper boundary* sind die definierten Grenzwerte (vgl. Abschnitt 5.4) in der Ontologie abgebildet. Die Data-Property *has_confidence* wird zur Bewertung des Wissens genutzt (siehe Abschnitt 6.4). Die ergänzte Data-Property *has_status* speichert in der Ontologie den aktuellen Zustand bei der Behebung einer Abweichung im System WMS4SimPar.



(a) Object-Properties von SMAPSS



(b) Data-Properties von SMAPSS

Abbildung 6.4: Object- und Data-Properties der SMAPSS-Ontologie

Schritt 5: Definition der Ausprägung der Attribute

Neben den Eigenschaften und Relationen können in einer Ontologie zusätzlich Restriktionen definiert werden, um den Geltungsbereich von Klassen oder Eigenschaften genauer zu spezifizieren. Auf der einen Seite werden dadurch fehlerhafte Restriktionen verhindert, auf der anderen Seite muss bei der Modellierung beachtet werden, dass die Eingrenzung für alle möglichen Geltungsbereiche gültig ist (BRANDMEIER 2020, S. 120; WELLER 2013). Aufgrund der bereits ausgeprägten und vordefinierten Struktur der verwendeten Ontologien BFO, CCO und *Manufacturing* sind in SMAPSS keine weiteren Attribute zu definieren, da diese den Superklassen der übergeordneten Ontologien vererbt werden.

Schritt 6: Dokumentation anhand der Annotation-Funktion

Neben der Darstellung als UML-Diagramm, die bereits eine erste Art der Dokumen-

tation darstellt, soll bei der Ontologieentwicklung die Annotation-Funktion innerhalb des Editors genutzt werden. Insbesondere für die Wiederverwendung, Weiterentwicklung und spätere Anwendung in unterschiedlichen Use Cases ist eine ausführliche Dokumentation eine wichtige Grundlage, um die eindeutige Anwendung der Ontologie sicherzustellen. Im Rahmen von SMAPSS findet die Dokumentation direkt im Editor *Protégé* statt.

Schritt 7: Anbindung der Ontologie

Die SMAPSS-Ontologie und später die jeweils auf einem spezifischen Anwendungsfall aufbauende instanziierte Ontologie muss an mehrere Systeme angebunden werden, da sie als WDB sowohl mit technischen Systemen interagieren als auch für Personen und organisatorische Bereiche zugänglich sein muss. Letzteres erfolgt anhand eines UI, wodurch Personen das gespeicherte Wissen abfragen oder neues Wissen einbringen und somit externalisieren können.

Dementsprechend ist eine Schnittstelle zwischen der SMAPSS-Ontologie und den Daten aus der AWI erforderlich, um die datentechnisch erfassten Abweichungen in die Ontologie zu übertragen und im weiteren Verlauf die Wissensgenerierung durchführen zu können. Im System von WMS4SimPar erfolgt die Verbindung der AWI und der Ontologie anhand einer REST API³. Die Verbindung mit den Personalisierungsdiensten, die im nachfolgenden Abschnitt 6.3 vorgestellt werden, ist anhand von SPARQL-Abfragen realisiert. Für die Speicherung von neuem Wissen aus den Wissensabfragen über das UI greift ein Python-Programm auf die Ontologie zu. Hierzu wird das Python-Paket OWLReady2⁴ verwendet.

Schritt 8: Instanziierung der Ontologie

Die Instanziierung einer Ontologie ist die Anwendung auf einen konkreten Anwendungsfall. Im Falle des Systems WMS4SimPar führt letztendlich die Verwendung des Gesamtsystems in einem betriebsbegleitenden Simulationseinsatz zur Instanziierung der

³ *Representational State Transfer (REST) Application Programming Interface (API)* ist eine Programmierschnittstelle, die eine Kommunikation zwischen Client und Server in Netzwerken ermöglicht (RICHARDSON 2007).

⁴ OWLReady2 ist ein Paket für ontologieorientierte Programmierung in der Programmiersprache Python. OWLReady2 kann OWL 2.0 Ontologien als Python-Objekte laden, modifizieren, speichern und über Hermit (enthalten) schlussfolgern. OWLReady2 ermöglicht einen transparenten Zugriff auf OWL Ontologien (LAMY 2022).

SMAPSS-Ontologie. Bestimmte Instanzen, wie beispielsweise individuelle Wissensträger oder die Abbildung des Produktionssystems, müssen in der Implementierungsphase des Systems durch die System-Administratoren gebildet werden. Im laufenden Betrieb erfolgt die Instanziierung von erkannten Abweichungen automatisch im System. Eine konkrete Anwendung wird in Kapitel 8 ausführlich beschrieben.

6.3 Integration eines Personalisierungsdienstes

Personalisierungsdienste dienen der individualisierten Verteilung und Anwendung von Wissen (vgl. Abbildung 2.11). Im Rahmen des Systems WMS4SimPar werden Personalisierungsdienste eingesetzt, um Wissensträger darüber zu informieren, dass eine Abweichung vorliegt, zu der sie über Wissen verfügen könnten.

Die Personalisierungsdienste nutzen die Daten und Beziehungen aus der SMAPSS-Ontologie, um mittels der kollaborativen und der inhaltsbasierten Filterung Vorschläge zu erzeugen. Der ontologiebasierte Ansatz basiert auf sechs Logiken, die für alle Wissensträger abgefragt werden. Die nachfolgend gelisteten Abfragen wurden in VER-NICKEL et al. (2022) vorgestellt.

Abfrage 1: Vorhandene Experten

Die erste Logik stellt den direkten Zusammenhang zu einer Person, die als Experte für einen bestimmten Prozess in der Ontologie hinterlegt ist, her. Tritt eine Abweichung in diesem Prozess auf, erfasst die Abfrage die direkt verknüpfte Person zu diesem Prozess und schlägt sie als potenziellen Wissensträger vor. Die jeweiligen Personen erhalten über das UI die Information über die vorliegende Abweichung.

Abfrage 2: Vorgeschlagene Experten

Die zweite Logik basiert auf dem Wissen von Personen über die Expertise ihrer Kollegenschaft. Verfügt ein potenzieller Wissensträger nicht über das erforderliche Wissen zur Behebung der Abweichung, kann diese Person über das UI eine andere Person vorschlagen, die zur Behebung der Abweichung angefragt wird. Diese vorgeschlagene Person wird anhand der zweiten Abfrage als potenzieller Wissensträger gefragt, ob sie Wissen zur vorliegenden Abweichung beisteuern kann.

Abfrage 3: Historische Wissensabgabe

Den Vorteil der sich über die Zeit verstärkenden Vernetzung zwischen Wissensträgern und Prozessen nutzt die dritte Abfragelogik. Hierbei werden Personen identifiziert, die in der Vergangenheit bereits Abweichungen dieses Prozesses gelöst bzw. Wissen darüber abgegeben haben. Die Abfragelogik nutzt somit unter anderem die in Abfrage zwei entstandene Verknüpfung in der Ontologie.

Abfrage 4: Fachwissen

Logik 4 nutzt die Klassenhierarchien und Typen von Prozessen. Existieren mehrere Prozesse vom selben Prozesstyp, so schlägt die vierte Logik Personen vor, die bereits Abweichungen vom selben Typ einer anderen Instanz gelöst haben. Eine einheitliche Modellierung der Ontologie innerhalb einer Organisation kann zu einem Wissenstransfer über Anlagen oder Standorte hinweg beitragen.

Abfrage 5: Projektzugehörigkeit

Logik 5 dient der Verringerung des sogenannten Kaltstartproblems. Das Problem liegt in den Anfangs zu geringen Verknüpfungen bei den kollaborativen Filterungslogiken. Logik 5 greift deshalb die Verknüpfung zwischen Personen, deren Projekten und den Prozessen in Projekten auf. Eine Person wird vorgeschlagen, wenn sie bereits eine Abweichung gelöst hat und über ein Projekt eine Verbindung zum Prozess hat. Dadurch reduziert sich der Aufwand der personellen Zuordnung von einzelnen Personen zu Prozessen und dennoch kann über die Personalisierungsdienste eine Abweichung für eine bestimmte Personengruppe zugeordnet werden.

Abfrage 6: Expertise von Teams

Die sechste Logik greift Zusammenhänge in Personengruppen auf. Eine Person wird als möglicher Wissensträger für eine Abweichung vorgeschlagen, wenn eine andere Person bereits als Experte für diese Art von Prozessen bekannt ist. Diese Logik zielt auf die Ähnlichkeit von Prozessen und dem damit verbundenen Wissen, welches zur Behebung der Abweichung notwendig ist, ab.

Die Logiken der Personalisierungsdienste bilden ein Grundgerüst für spätere Anwendungsfälle. Durch den Anwender sind diese Logiken ggf. noch an individuelle Besonderheiten im Unternehmen oder die Prozesse anzupassen. Bspw. können die Abfragen noch verfeinert werden, um den vorgeschlagenen Personenkreis zu reduzieren. Im lau-

6 Wissensgenerierung und -verarbeitung

fenden Betrieb werden immer alle Abfragen gleichzeitig ausgeführt. Die identifizierten Personen werden über das UI dargestellt. Die Wissensträger erkennen über das UI, auf Basis welcher Abfrage sie identifiziert wurden. Um eine Mehrfachnennung bei der Auflistung zu verhindern, sind die Abfragen hierarchisch angeordnet. Abfrage 1 hat die höchste und Abfrage 6 die geringste Priorität. Führen mehrere Abfragen zu einem Treffer, wird dem Wissensträger der Treffer mit der höheren Priorität angezeigt.

6.4 Ablauf der Wissensgenerierung

Gemäß den in VDI 5610-1 definierten Kernaktivitäten eines Wissensmanagements (vgl. Abschnitt 2.2.7) sind in einem Unternehmen Schritte notwendig, um Wissen zu generieren, zu verteilen, zu speichern und anzuwenden. Der Ablauf zur Wissensgenerierung in WMS4SimPar (siehe Abbildung 6.5) wurde in VERNICKEL et al. (2022) vorgestellt und wird nachfolgend detailliert beschrieben.

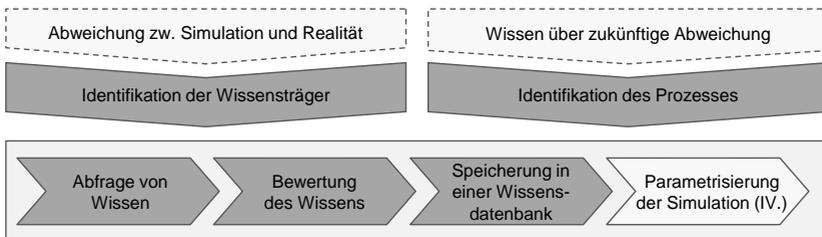


Abbildung 6.5: Ablauf der Externalisierung von Wissen in WMS4SimPar in Anlehnung an VERNICKEL & SCHILP (2022)

Identifikation der Wissensträger:

Das Ergebnis der Personalisierungsdienste ist für den Ablauf der Wissensgenerierung von zentraler Bedeutung, da die Zuordnung von Abweichungen zu bestimmten Personen den ersten Schritt der Wissensgenerierung nach einer datentechnisch erfassten Abweichung darstellt. Nach erfolgter Zuordnung von vorliegenden Abweichungen kann anschließend der eigentliche Prozess zur Externalisierung von notwendigem und relevantem Wissen erfolgen.

Abfrage von Wissen:

Wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, ist das Treffen von Annahmen in Zusammenarbeit mit Experten oft der einzig sinnvolle Weg, um fehlende Daten für Simulationsstudien zu erzeugen. Die Wissensabfrage in WMS4SimPar nutzt daher die vorhandenen Daten aus der AWI, weshalb die Art der Datenerhebung als *Sekundärerhebung* nach GUTENSCHWAGER et al. (2017, S. 165) einzustufen ist. Das bedeutet, dass bereits existierende Daten, wie sie in der AWI erzeugt wurden, verwendet werden. Zur weiteren Aufbereitung der sekundären Daten werden alle vorhandenen Daten und Informationen zu einer vorliegenden Abweichung den identifizierten Wissensträgern aus der Produktion präsentiert, um die Daten mit Hilfe des Expertenwissens zu interpretieren, zu analysieren und zu ergänzen. Eingesetzte *Befragungsmethoden*, wie bspw. die Klassifizierung nach der Ursache (vgl. Abschnitt 6.2) und die Abfrage konkreter Werte, fördern das Formulieren des impliziten Wissens.

Bewertung des Wissens:

Bei dem generierten Wissen bezüglich einer Abweichung und deren Auswirkungen handelt es sich i. d. R. um Annahmen oder Erfahrungswissen aus vergangenen Ereignissen der Experten. Deshalb erfolgt in diesem Schritt die *Bewertung des Wissens*. Hierbei geben die Experten eine Selbsteinschätzung hinsichtlich ihrer Aussage ab, um die Güte des Wissens zu erfassen und unterschiedliche Aussagen gegeneinander abwägen zu können. Im Rahmen der Nutzung des Systems zur Wissensgenerierung muss die Bewertung des eigenen Wissens schnell und sicher erfolgen. Im betrieblichen Alltag der Produktion darf die Abfrage und Bewertung von Wissen nicht viel Zeit brauchen, weshalb eine Bewertung anhand einer vordefinierten Skala sinnvoll ist. Eine in der Wissenschaft häufig angewendete Skala ist die Likert-Skala (JOSHI et al. 2015; SOUTH et al. 2022). Für die Einschätzung von Wissen schlagen TIMUR & FATIH TASAR (2011, S. 19) eine 5-Punkte-Skala nach Likert vor. Mit Hilfe der Aussagen *not confident at all*, *slightly confident*, *somewhat confident*, *fairly confident* und *completely confident* können Experten ihre eigenen Aussagen bewerten. Diese Information wird in der Ontologie in der Data-Property *has_confidence* gespeichert. Teilen mehrere Wissensträger ihr Wissen zu einer Abweichung, existieren mehrere Einträge zu einer Abweichung in der Ontologie. In der nachgelagerten Behebung der Abweichung (siehe Kapitel 7) können die Simulationsexperten das gesamte Wissen nutzen. Widersprechen sich die Aussagen der Wissensträger, müssen die Simulationsexperten Rücksprache mit den jeweiligen Personen halten. WMS4SimPar fördert dadurch die interne Kommunikation

und den Aufbau einer einheitlichen Wissensbasis im Unternehmen. Eine automatisierte Prüfung der Aussagen findet zum aktuellen Zeitpunkt nicht statt, da hierzu bislang keine Vorgehen existieren (PAUSE 2017, S. 49).

Speicherung des Wissens:

Ein wichtiger Faktor des Bausteins der Wissensgenerierung und -verarbeitung ist die Speicherung des Wissens in einer wiederverwendbaren und verarbeitbaren Form. In WMS4SimPar erfolgt dies in der jeweils instanziierten SMAPSS-Ontologie. Dabei wird das Wissen mittels eines UI (siehe Abschnitt 6.6) aufgenommen, digitalisiert und über die software-technische Verknüpfung zwischen dem UI und der Ontologie direkt als Element gespeichert.

Parametrisierung der Simulation:

Der letzte Schritt ist die Anwendung des Wissens durch die Simulationsexperten auf das Simulationsmodell. Die Parametrisierung der Simulation reduziert die Abweichung zwischen Simulation und Realität und führt zu einer, im Rahmen der Grenzwerte tolerierbaren, Abweichung. Das genaue Vorgehen wird im letzten Lösungsbaustein, im nachfolgenden Kapitel 7, des Systems WMS4SimPar detailliert beschrieben.

Identifikation des Prozesses:

Eine Sonderform der Wissensgenerierung stellt die Externalisierung von Wissen über zukünftige Abweichungen dar. Neben der Wissensabfrage zu datentechnisch erfassten Abweichungen ermöglicht WMS4SimPar auch die Eingabe von zukünftigen, geplanten Änderungen, die zu einer Abweichung zwischen Simulation und realem Produktionssystem führen. Nach der proaktiven Auswahl des betroffenen Prozesses durch die Experten erfolgt die Wissensgenerierung analog zum Prozess mit erkannter Abweichung, wie in Abbildung 6.5 dargestellt. Dadurch kann das betriebsbegleitende Simulationsmodell proaktiv zukünftige Veränderungen berücksichtigen und bietet eine höhere Modellgüte für Simulationsexperimente in der PPS.

6.5 Speicherung des Wissens in der Datenbank

Das externalisierte Wissen wird in der Ontologie der entsprechenden Abweichung zugeordnet und gespeichert. Hierzu wird das Wissenselement als Instanz der Klasse

Process_Knowledge in der Ontologie erstellt und mittels *Object Properties* sowohl mit der Person, die das Wissen erstellt hat, als auch mit der Abweichung selbst verknüpft. Neben den datentechnisch erfassten Informationen wie bspw. der Startzeit ist das erfasste Wissen eindeutig einer Abweichung zuordenbar. Das zugängliche Wissen (vgl. Abschnitt 2.2.5) wurde mit der Speicherung des Wissens vergrößert. Nicht nur das erfasste Wissensselement selbst stellt einen Mehrwert in der Wissensbasis dar, sondern auch die Erfassung der Zusammenhänge zwischen den Personen, den Prozessen und den Abweichungen. Die in der Ontologie entstandenen Verbindungen führen zu einer stärkeren Vernetzung in der Ontologie und zu einer größeren WDB, die für den weiteren Betrieb im Unternehmen nützlich ist. Gemäß den Kernaktivitäten eines WMs ist in diesem Schritt Wissen erzeugt und gespeichert worden (vgl. Abbildung 2.10).

6.6 Entwicklung eines User Interfaces

Damit das System WMS4SimPar eine hohe Benutzerfreundlichkeit (engl. *Usability*) aufweist, benötigt es ein *User Interface* (UI), um effizient und zielorientiert im Betrieb durch die Anwender eingesetzt werden zu können (RICHTER 2018, S. 2).

Der Aufbau des UI erfolgt in Anlehnung an die modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau nach RICHTER (2018).

Zu Beginn sind die Benutzerrollen zu identifizieren, die anhand des UI mit dem System in Interaktion treten werden. In WMS4SimPar handelt es sich vorrangig um zwei aktive Rollen: Zum einen die Wissensträger aus dem Shopfloor und zum anderen die Simulationsexperten des Simulationsmodells. Mittels des UI müssen Personen aus beiden Benutzergruppen in der Ontologie angelegt werden können und als Anwender mit dem System interagieren können, um Wissen in der WDB abzulegen sowie von dort zu erhalten. Die Grundfunktionalität eines UI in WMS4SimPar muss folgende User Stories aus Sicht der Shopfloor-Experten berücksichtigen.

- «Als Shopfloor-Experte möchte ich Informationen über für mich relevante Abweichungen erhalten, um mein Wissen über vorliegende Abweichungen weitergeben zu können.»
- «Als Shopfloor-Experte möchte ich klar definierte Felder zum Ausfüllen haben, um wenig Zeit bei der Eingabe von Wissen zu benötigen.»

6 Wissensgenerierung und -verarbeitung

- «Als Shopfloor-Expert möchte ich eine Selbsteinschätzung hinsichtlich meines Wissens über eine Abweichung abgeben können, um Kolleginnen und Kollegen eine Wertung hinsichtlich der Wissensgüte geben zu können. »

Für die Simulationsexperten lassen sich folgende User Stories hinsichtlich der Grundfunktionalität des UI formulieren:

- «Als Simulationsexperte möchte ich sehen, zu welchen Abweichungen bereits Wissen von den Shopfloor-Experten vorliegt, um diese zeitnah im Simulationsmodell berücksichtigen zu können. »
- «Als Simulationsexperte möchte ich eine Aussage über den Beginn und das zu erwartende Ende einer Abweichung erhalten, um den Zeitraum in der Simulation vorsehen zu können. »
- «Als Simulationsexperte möchte ich sehen, wer Wissen zu vorliegenden Abweichungen externalisiert hat, damit ich mit der Person ggf. weitere Details besprechen kann. »
- «Als Simulationsexperte möchte ich sehen, wie sicher sich die Experten bei ihren Aussagen sind, damit ich die Informationen vergleichen und entsprechend werten kann. »

Auf Basis der User Stories werden erste Benutzeroberflächen entwickelt. Die gelisteten User Stories stellen einen ersten Ansatzpunkt für spätere Anwendungen dar, für die das UI weiterentwickelt werden kann. Hierfür empfiehlt sich, das Konzept der User Stories in Workshops fortzuführen, um die Anforderungen der Nutzer im jeweiligen Anwendungsfall zu erfassen.

Das UI ist für die Nutzer über eine Web-Applikation in HTML realisiert, um im Betrieb mit einer Vielzahl an Endgeräten benutzt werden zu können. HTML bietet den Vorteil, dass sie von jedem Browser unterstützt wird und somit das UI an jedem PC, Smartphone oder Tablet bedient werden kann. Die Oberfläche besteht dabei aus den in Abbildung 6.6 dargestellten Seiten, über die Nutzer sowohl Informationen abrufen als auch Wissen eingeben können.

Auf der ersten Seite werden Nutzer angelegt (siehe Abbildung A.2). Hierzu werden relevante Informationen in der Eingabemaske eingegeben, um eine Instanz des Klassenobjekts *Person* in der Ontologie zu erzeugen. Über die Eingabemaske werden die Eigenschaften der Instanz, bspw. die Projektzugehörigkeit oder das Expertenwissen zu Prozessen und Anlagen, abgelegt und können so vom Personalisierungsdienst berücksichtigt werden.

Eine weitere Seite gibt einen Überblick über alle aktuellen Abweichungen. Jede Abweichung kann individuell angewählt werden, wodurch die Detailansicht der Abweichung in einem weiteren Fenster geöffnet wird. In der Detailansicht werden die weiteren Informationen aus der datentechnischen AWI aufbereitet dargestellt, beispielsweise der historische Verlauf der Abweichung.

Auf der personalisierten Nutzersicht werden den Shopfloor-Experten die sie betreffenden Abweichungen aufgelistet. Die Shopfloor-Experten können anhand der Auflistung sehen, welche Abweichung aufgrund welcher der sechs Abfragen des Personalisierungsdienstes vorgeschlagen wird. Über die direkte Anwahl einer Abweichung wird der Shopfloor-Experte zur Eingabemaske für die Wissensabfrage geleitet. Diese Maske führt den Experten durch den Prozess der Wissensgenerierung. Die Experten können über die Maske Aussagen zur vorliegenden Abweichung machen. Zuerst wählen die Experten aus, ob sie über Wissen zur vorliegenden Abweichung verfügen. Falls dies verneint wird, kann eine weitere Person vorgeschlagen werden, die möglicherweise über relevantes Wissen zur Lösung der Abweichung verfügt. Im nächsten Schritt wird anhand der 5-M-Methode die vorliegende Abweichung klassifiziert, um die mögliche Ursache der Abweichung einzugrenzen. Darüber hinaus kann über die Eigenschaft *planned* oder *unplanned* angegeben werden, ob die Abweichung über eine geplante Maßnahme zustande gekommen ist oder die Abweichung ungeplant entstanden ist. Im anschließenden Freitextfeld können die Experten ihr Wissen zur Abweichung formulieren, um den Simulationsexperten die Sachlage anhand der Beschreibung zu erklären. Über die Datumsfelder können die Experten das zu erwartende Zeitfenster für die Abweichung eingeben, um bspw. eine geplante Behebung der Abweichung mit Hilfe einer Instandhaltungsmaßnahme zu beenden. Über das Abschicken des Formulars werden diese Informationen in der Ontologie gespeichert und stehen dem Unternehmen als formalisiertes Wissen zur Verfügung.

Für die proaktive Eingabe von zukünftigen Abweichungen bietet das UI eine eigene Eingabemaske, um nach Auswahl des betroffenen Prozesses das Wissen einzugeben.

6 Wissensgenerierung und -verarbeitung

Die Abfrage des Wissens verläuft analog zu einer existierenden Abweichung und nutzt dieselbe Oberfläche in der Web-Applikation.

Den Simulationsexperten werden Abweichungen mit Wissen aus dem Shopfloor angezeigt, deren Wissensgüte mit *fairly confident* oder *completely confident* bewertet ist. Wissenseinträge mit einem geringeren Wert (*not confident at all*, *slightly confident* oder *somewhat confident*) bleiben in der Ansicht der offenen Abweichungen, um weiteres Wissen abfragen zu können. Für die Simulationsexperten steht die Detailansicht einer Abweichung ebenfalls wieder über die Anwahl einer individuellen Abweichung zur Verfügung. In der Detailansicht werden den Simulationsexperten neben dem erfassten Wissen der Shopfloor-Experten weitere Details aus der datentechnischen Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe der hinterlegten Formeln (siehe Abschnitt 7.3) über die Zusammenhänge zwischen Simulationsparametern und den Sensorwerten des Produktionssystems berechnet WMS4SimPar die erforderliche Anpassung der Simulationsparameter. Die Simulationsexperten können diese Werte übernehmen, können mit Hilfe des erfassten Wissens aber auch andere Anpassungen vornehmen, falls es sich bspw. um einen lokalen Ausreißer oder eine Störung handelt, die nur kurzzeitig aufgetreten ist oder ggf. zeitnah behoben wird (siehe Kapitel 7).

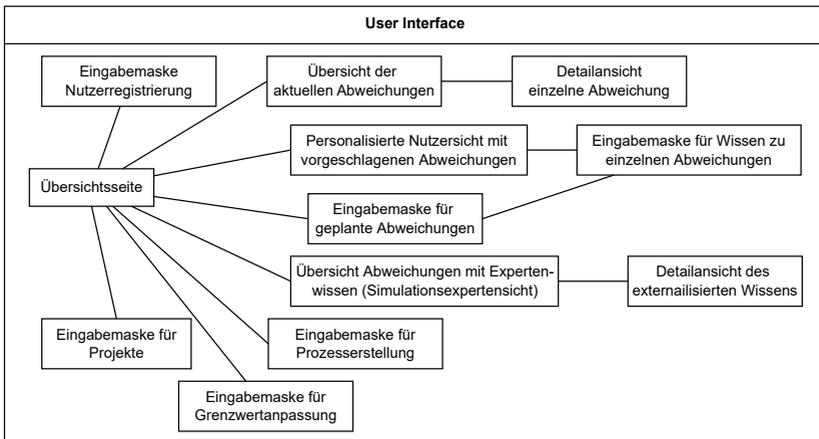


Abbildung 6.6: Aufbau der Web-Applikation des UI von WMS4SimPar

7 Simulationsmodellparametrisierung

Das personengebundene Wissen aus der Produktion wird anhand des in Kapitel 6 beschriebenen Lösungsbausteins externalisiert und in der ontologiebasierten WDB gespeichert.

Im abschließenden Prozessschritt des Systems WMS4SimPar muss dieses Wissen den Simulationsexperten aufbereitet zur Verfügung gestellt werden, um die Parametrisierung des Simulationsmodells durchführen zu können. Mit der Wissensverarbeitung eng verknüpft ist die Ermittlung der Simulationsparameter, die in Abschnitt 7.1 beschrieben wird. Die Zusammenhänge zwischen Abweichungen und den zugehörigen Simulationsparametern müssen in die Ontologie integriert werden (siehe Abschnitt 7.2). Anschließend wird in Abschnitt 7.3 das UI für die Simulationsexperten vorgestellt. In den Abschnitten 7.4 bis 7.6 wird das Vorgehen der Anpassung der Simulationsparameter während des Betriebs im Detail beschrieben. Abschließend folgt die Initialisierung des Simulationsmodells (siehe Abschnitt 7.7), die den Regelkreis zur Simulationsmodellparametrisierung schließt.

Das Vorgehen kann, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, in zwei Bereiche unterteilt werden. Der erste Teil beinhaltet die (1) Ermittlung der Simulationsparameter, (2) die Erweiterung der Ontologie sowie (3) die Erweiterung des User Interfaces und muss bei der Initialisierung von WMS4SimPar durch die Systemadministratoren und die Simulationsexperten durchgeführt werden. Der zweite Teil des Vorgehens läuft betriebsbegleitend ab und stellt die Aufgaben der Simulationsexperten dar, die für die Parametrisierung des Simulationsmodells erforderlich sind. Der Ablauf wird für jede Abweichung von links nach rechts durchlaufen und erfolgt im Betrieb für jede erfasste Abweichung. Teile des Vorgehens, wie bspw. die Modellinitialisierung, können zudem automatisiert werden, um die manuellen Aufwände während des Betriebs zu reduzieren.

7 Simulationsmodellparametrisierung

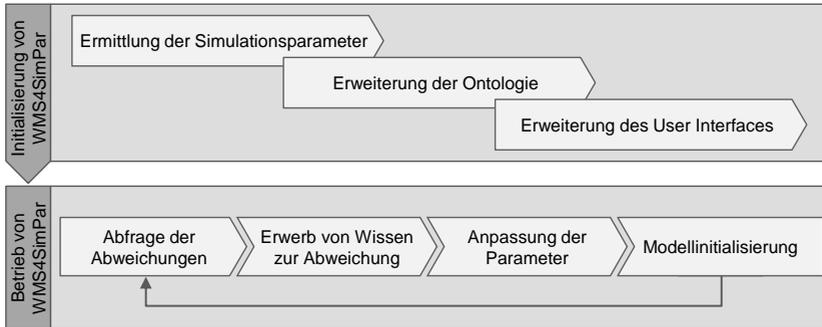


Abbildung 7.1: Vorgehen bei der Simulationsmodellparametrisierung

7.1 Ermittlung der Simulationsparameter

Die Erfassung von Abweichungen basiert auf den identifizierten Prozessen in der Realität sowie den zugehörigen Prozessen in der Simulation, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben. Die in der AWI verwendeten Parameter in der Simulation dienen zur Messung bzw. Bestimmung von Abweichungen. Diese Messparameter sind im Simulationsmodell i. d. R. nicht die Einstellparameter, die das Verhalten der Simulation beeinflussen und bei Anpassungen verändert werden müssen. Bspw. wird die Transportzeit auf einem Förderband anhand des Eintritts- und des Austrittszeitpunktes ermittelt. Der zugehörige Einstellparameter am Simulationsbaustein ist die Geschwindigkeit des Förderbandes, die entsprechend im Modell angepasst werden muss. Aus diesem Grund ist eine Verknüpfung zwischen den Messparametern der Abweichung und den Einstellparametern des Prozesses erforderlich. In WMS4SimPar werden grundsätzlich drei Arten von Zusammenhängen zwischen Mess- und Einstellparametern unterschieden.

Die erste Art der Identifikation von Einstellparametern ist der 1 : 1-Zusammenhang, bei dem der Messparameter zugleich der Einstellparameter in der Simulation ist. Ein Beispiel hierfür ist die Qualitätsrate einer Anlage, die als direkter Einstellparameter im Simulationsmodell hinterlegt werden kann.

Die zweite Art ist ein linearer Zusammenhang zwischen einem gemessenen Simulationsparameter und dem zugehörigen Einstellparameter eines Prozesses in der Simulation. Für die Bestimmung des Einstellparameters auf Basis der erfassten Abweichung ist der mathematische lineare Zusammenhang mittels der Funktionsgleichung $f(x) = mx + t$

7.1 Ermittlung der Simulationsparameter

und dem dazugehörigen Steigungsparameter m sowie der Verschiebungskonstante t zu bestimmen. Die Ermittlung der Funktionsgleichung kann, wie in Abbildung 7.2 dargestellt, sowohl theoretisch anhand einer Analyse des Simulationsmodells oder mittels einer experimentellen Datenerhebung erfolgen.

Die dritte Art ist ein nicht-linearer Zusammenhang, bei dem sich Messparameter und zugehöriger Einstellparameter in der Simulation anhand von Polynomen höheren Grades beschreiben lassen. Beispiel für einen nicht-linearen Zusammenhang sind die oben erwähnte Überwachung und Parametrisierung eines Transportbandes. In der AWI wird die Transportzeit eines Produkts überwacht. Verlängert sich der Prozess in der Realität, bspw. aufgrund von Verschleiß, muss die Prozesszeit in der Simulation durch den Simulationsexperten angepasst und entsprechend verlängert werden. Eine Verlängerung der Prozesszeit für den Transport ist demnach über eine Reduktion der Geschwindigkeit zu erreichen. Der Zusammenhang zwischen der Prozesszeit und der Geschwindigkeit des Förderbandes lässt sich anhand einer Hyperbel beschreiben, deren Funktionsgleichung experimentell oder theoretisch ermittelt werden muss.

Für die experimentelle Ermittlung wird in Kapitel 8 in Abschnitt 8.1.5.2 auf ein Vorgehen anhand einer datenbasierten Bestimmung der Funktion eingegangen. Dieses Vorgehen lässt sich auf andere Anwendungsfälle übertragen und ermöglicht eine effiziente Ermittlung der Simulationsparameter.

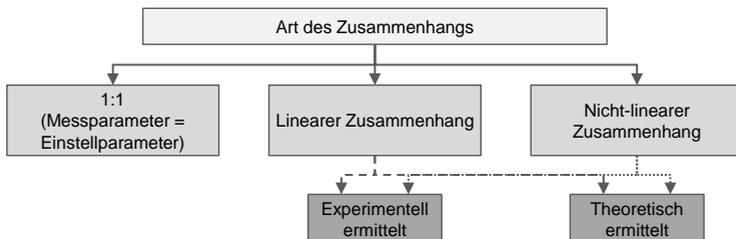


Abbildung 7.2: Art der Zusammenhänge zwischen Mess- und Einstellparameter in der Simulation

7.2 Erweiterung der Ontologie zur Parametrisierung

Die Zusammenhänge zwischen den gemessenen Parametern in der AWI sowie den zugehörigen Einstellparametern in der Simulation müssen in der Ontologie abgebildet werden. Mit der vollständigen Abbildung der Einstellparameter in der Ontologie kann das System WMS4SimPar die Zusammenhänge verwenden, um den Simulationsexperten Handlungsempfehlungen für die Parametrisierung des Simulationsmodells geben zu können. Die Erweiterung der Ontologie ist durch die Systemadministratoren durchzuführen, die in enger Zusammenarbeit mit den Simulationsexperten die identifizierten Zusammenhänge in der Ontologie abbilden. Jeder überwachte Prozess enthält demnach ein Wissenselement, in dem der Zusammenhang zwischen den Einstell- und Messparametern abgelegt ist. In Abbildung 7.3 ist beispielhaft eine instanziierte Verknüpfung zwischen den Einstell- und Messparametern zu sehen. Für den Prozess *Inserting_Sim* wird in der Ontologie ein sogenanntes *Information Content Entity* (ICE) für die Formel des Zusammenhangs erstellt. Ein ICE-Objekt beschreibt und umfasst die Inhalte eines bestimmten Objekts und entstammt dem Modellierungsvorgehen der BFO bzw. CCO (mehr Details in ARP et al. 2015). Das ICE-Objekt verknüpft den Prozess *Inserting_Sim* selbst mit dem zugehörigen Messwert *Inserting_Sim_Process_Duration* und dem Einstellparameter *Gripper_Speed_Sim*. Die Formel ist wiederum im Objekt *Inserting_Sim_Equation_IBE* gekapselt gespeichert.

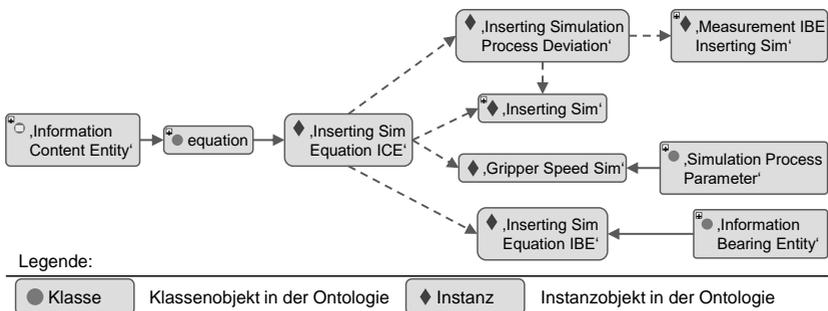


Abbildung 7.3: Anwendungsbeispiel einer instanziierten Einbindung des Zusammenhangs zwischen Einstell- und Messparametern in der Ontologie

7.3 User Interface für die Simulationsexperten

Die Verteilung von Wissen gemäß VDI 5610-1 ist eine der vier Kernaktivitäten eines WM und beinhaltet sowohl die Übertragung von Wissen von einer Person auf eine andere als auch die Bereitstellung materieller Wissensträger (z. B. Dokumente), um Personen Wissen zur Verfügung zu stellen. Das UI von WMS4SimPar fördert beide Wege der Wissensverteilung, wobei in erster Linie die Bereitstellung des gespeicherten Wissens im Vordergrund steht. Das UI für die Simulationsexperten enthält eine Ansicht, in der Details zu vorliegenden Abweichungen eingesehen werden können. Im Hintergrund des Systems führen SPARQL-Abfragen das vorhandene Wissen zusammen und stellen es den Simulationsexperten zur Verfügung. Reicht das abgefragte Wissen der Mitarbeitenden aus der Produktion nicht aus, um eine Anpassung des Simulationsmodells durchzuführen, werden über das UI die relevanten Wissensträger angezeigt und die Simulationsexperten können anhand einer direkten Kontaktaufnahme mit den jeweiligen Personen das Wissen gemäß der oben genannten direkten Übertragung von Person zu Person erlangen. Ein Auszug des UI für die Simulationsexperten ist in Abbildung 7.4 zu sehen. In der linken Ansicht werden alle Abweichungen angezeigt, zu denen Wissen von Experten eingetragen wurde. Durch klicken auf eine der Abweichungen öffnet sich die Detailansicht, anhand der die Simulation angepasst werden kann. Im dargestellten Beispiel wurde von einer Person aus dem Shopfloor angegeben, dass die Abweichung für zehn Tage aktiv ist. Zudem berechnet das System im Hintergrund den zugehörigen Einstellparameter, der sich aufgrund der aktuellen Abweichung ergibt und dessen Wert sich aus dem in Abschnitt 7.1 ermittelten Zusammenhang ergibt.

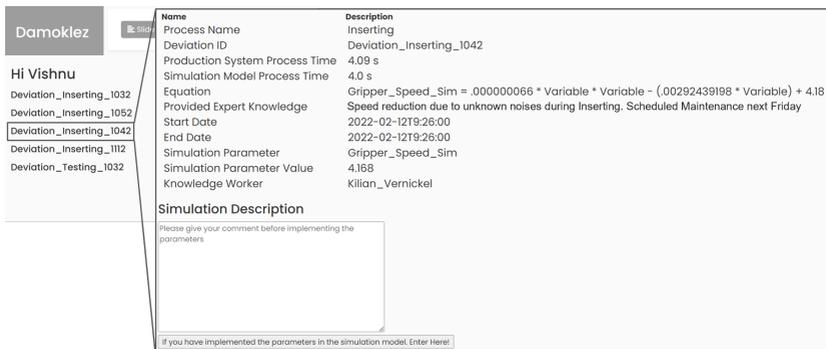


Abbildung 7.4: Auszug aus dem UI der Simulationsexperten

7.4 Abfrage aktueller Abweichungen

Im Betrieb von WMS4SimPar müssen die Simulationsexperten die detektierten Abweichungen lösen. Über das UI können sie die Abweichungen abfragen, zu denen Wissensträger bereits Wissen geteilt und mit *fairly confident* oder *completely confident* bewertet haben.

In der aktuellen Ausführung von WMS4SimPar in Abschnitt 8.1 müssen die Simulationsexperten die Abfragen eigenständig am UI ausführen. In weiteren Entwicklungsstufen wäre es möglich, eine automatisierte Benachrichtigung zu integrieren, um im Falle einer vorliegenden Abweichung mit externalisiertem Wissen die Simulationsexperten zu informieren, damit sie den Prozess der Parametrisierung starten.

7.5 Erwerb von Wissen zur aktuellen Abweichung

Nach der Abfrage und Auswahl einer aktuellen Abweichung wird den Simulationsexperten das externalisierte Wissen über das UI präsentiert. Wie in Abbildung 7.4 zu sehen ist, werden alle vorhandenen Informationen aus der WDB präsentiert, damit die Simulationsexperten das Wissen erwerben und im Nachgang anwenden können.

Sollte die vorhandene Information nicht ausreichen, um das Simulationsmodell zu parametrisieren, können die Simulationsexperten direkt in den Dialog mit den Wissensträgern treten. Im UI sind hierzu die hinterlegten Wissensträger gelistet, um die Kontaktaufnahme im Unternehmen zu vereinfachen. Zudem kann es im Einsatz vorkommen, dass mehrere Wissensträger ein Wissensselement zu einer Abweichung erzeugt haben. Für den Fall, dass sich ein Widerspruch in den Wissensselementen ergibt, muss der Simulationsexperte den Dialog mit den Wissensträgern suchen, um den Widerspruch zu lösen.

7.6 Parametrisierung des Simulationsmodells

Die Parametrisierung stellt den wichtigsten Schritt des Systems dar, um ein aktuelles Simulationsmodell für den betriebsbegleitenden Einsatz zu erhalten. Die Anpassung der Parameter im Simulationsmodell wird in WMS4SimPar durch die Simulationsexperten durchgeführt. Um die Experten im laufenden Betrieb zielgerichtet unterstützen zu

können, muss vorab das Simulationsmodell angepasst bzw. erweitert werden, da die kontinuierliche Anpassung von Parametern i. d. R. nicht in Simulationsmodellen vorgesehen ist. Die Erweiterung im Simulationsmodell bildet alle überwachten Prozesse der AWI ab und ermöglicht die direkte Eingabe der Einstellparameter des jeweiligen Prozesses. Zudem ist es möglich, mehrere Parametersets mit unterschiedlichen Gültigkeitsdaten zu hinterlegen, um das Verhalten von Prozessen für bestimmte Zeiträume einzuplanen. Mit Hilfe des gespeicherten Wissens zu einer vorliegenden Abweichung passt ein Simulationsexperte den Einstellparameter im Simulationsmodell an. Die Hintergrundinformationen in der WDB verbessern die Entscheidungsgrundlage und führen zu einer präziseren Anpassung. Dieser Schritt ist im System WMS4SimPar nicht automatisiert, da die Entscheidung über die Anpassung weiterhin bei den Simulationsexperten liegen soll, um das Wissen über das Produktionssystem sowie den Austausch zwischen den Simulationsexperten und den Wissensträgern in der Produktion zu fördern.

7.7 Initialisierung des Simulationsmodells

Die Initialisierung des Simulationsmodells ist der finale Schritt, um das betriebsbegleitende Simulationsmodell auf den aktuellen Stand des realen Produktionssystems zu bringen. Mit der durchgeführten Parametrisierung spiegelt das Verhalten des Simulationsmodells die Realität wider und kann darüber hinaus auch zukünftige Veränderungen berücksichtigen. Jedoch kann der aktuelle Zustand des Simulationsmodells von der Realität divergieren. Diese Problematik besteht unabhängig von der wissensbasierten Anpassung mittels des Systems WMS4SimPar, da der Zustand von betriebsbegleitenden Simulationsmodellen ohne kontinuierliche Synchronisationspunkte aufgrund von unvermeidbaren Modellabweichungen vom realen Zustand der Produktionsanlage divergiert. Aufgabe der Initialisierung ist daher, den gegenwärtigen Zustand des realen Systems in das Simulationsmodell zu überführen (BERGMANN 2014, S. 35; HOTZ 2007, S. 78). Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Initialisierung auf die Ergebnisse von BERGMANN (2014, S. 139) zurückgegriffen, der in seiner Dissertation das Thema der Initialisierung für betriebsbegleitende Anwendungen detailliert beschreibt. Im Zuge der Initialisierung werden die Zustände aller relevanten Entitäten, wie bspw. Arbeitsstationen oder Werker, anhand der BDE gespeichert und entsprechend im Simulationsmodell hinterlegt (vgl. Abschnitt 2.3.5). Im Anwendungsfall in Kapitel 8 wird nachfolgend eine Möglichkeit der Initialisierung im betriebsbegleitenden Einsatz vorgestellt.

7 Simulationsmodellparametrisierung

Abschließend steht den Anwendern der Simulation ein auf den aktuellen Zustand des realen Produktionssystems synchronisiertes Simulationsmodell zur Verfügung, in dem mit Hilfe der wissensbasierten Parametrisierung aktuelle und zukünftige Verhaltensveränderungen berücksichtigt sind.

8 Anwendung und Bewertung des Systems

Nach Vorstellung des Systems in den Kapiteln 4 bis 7, das zur Verbesserung der Ausgangssituation führen soll, erfolgt abschließend die Evaluationsphase (DS-II) in der DRM nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 181). Ziel der DS-II ist die Überprüfung, ob die geplante Unterstützung durch das System eintritt und die Zielstellung der Arbeit erfüllt ist. Das System WMS4SimPar wird an einem Demonstrator umgesetzt. Die Beschreibung des Demonstrators erfolgt in Abschnitt 8.1. Anschließend folgt in Abschnitt 8.2 die Beschreibung einer partiellen Umsetzung des Systems bei einem Industrieunternehmen. Es folgt in Abschnitt 8.3 eine Bewertung der Zielerreichung anhand eines Abgleichs mit den in Abschnitt 4.1 gestellten Anforderungen. Abschließend folgt in Abschnitt 8.4 eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Systems.

8.1 Evaluierung mittels eines Demonstrators

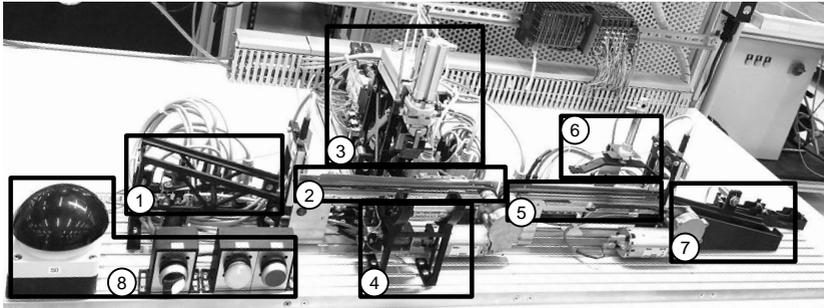
8.1.1 Aufbau des Demonstrators

Das System WMS4SimPar soll am Demonstrator umgesetzt werden, um daran die Funktionsfähigkeit zu evaluieren, die Zielerreichung abzusichern und die Vorteile von WMS4SimPar aufzuzeigen. In Anlehnung an eine reale Produktionsanlage des Industriepartners im Forschungsprojekt DAMOKLEZ, produziert die Demonstrationsanlage Pakete aus Akkumulatoren¹ für ein elektrisch betriebenes Modellauto. Das Produktionssystem ist in Abbildung 8.1 abgebildet. Die Rampe ① führt einen leeren Behälter in das Produktionssystem ein. Dieser wird über ein erstes Förderband ② zur Einsetzstation für die Akkus transportiert. Je nach Auftrag setzt ein pneumatischer Greifer ③ zwei oder vier Akkus aus dem Lager ④ in den Behälter ein. Anschließend transportiert das zweite Förderband ⑤ das Akkupack zu einer Teststation ⑥, an der die Spannung des Packs

¹Im weiteren Verlauf wird die verbreitete umgangssprachliche Kurzform *Akku* für einen Akkumulator sowie *Akkupack* bzw. *Pack* für ein Paket aus Akkumulatoren verwendet.

8 Anwendung und Bewertung des Systems

gemessen wird, bevor das Pack das Produktionssystem über eine Rampe ⑦ verlässt. Über die Bedienelemente ⑧ kann das System aktiviert und deaktiviert werden oder für Demonstrationszwecke die Produktion eines einzelnen Akkupacks ausgelöst werden.



Legende:

- | | | | |
|----------------|------------------|----------------|------------------|
| ① Einlauframpe | ③ Einsetzgreifer | ⑤ Förderband 2 | ⑦ Auslauframpe |
| ② Förderband 1 | ④ Akku-Lager | ⑥ Teststation | ⑧ Bedienelemente |

Abbildung 8.1: Überblick über die Demonstratoranlage zur Akkupack-Montage

Die Produktion eines Akkupacks sowie die gesamte Auftragsabwicklung werden über die *Industrial Internet of Things* (IIoT)-Plattform *ThingWorx* der Firma Parametric Technology GmbH (ptc) realisiert. Individuelle Software-Bausteine (sogenannte *Services*), die auf ThingWorx ausgeführt werden, bilden die Fertigungsleitebene mit ihren Sub-Systemen, wie bspw. einem MES zur Produktionsplanung und -steuerung und einem BDE zur Datenerfassung, aus dem operativen Betrieb ab. Auf der Plattform ist eine Liste mit geplanten Fertigungsaufträgen hinterlegt. Über einen Service werden zu den geplanten Zeitpunkten die Aufträge am Produktionssystem gestartet und anhand der Datenerfassung verfolgt. Hierzu ist eine datentechnische Verbindung zwischen dem Produktionssystem, das mittels einer SPS gesteuert wird, und ThingWorx erforderlich, die anhand des Kommunikationsprotokolls OPC UA realisiert ist. Wie in Abbildung 8.2 dargestellt, ist das ereignisdiskrete Simulationsmodell des Produktionssystems ebenfalls über eine OPC-UA-Schnittstelle mit ThingWorx verbunden. Das Simulationsmodell bildet den automatisierten Montage- und Prüfprozess der realen Anlage nach, anhand dessen in Simulationsexperimenten Aussagen über Fertigstellungszeitpunkte oder ausgetragene Stückzahlen getroffen werden können.

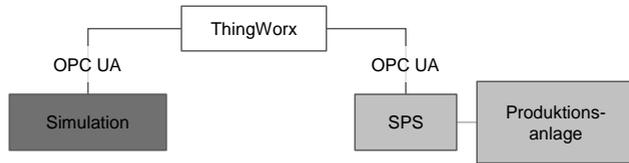


Abbildung 8.2: Datenverbindung des Demonstrators am Fraunhofer IGCV

Neben der Evaluierung des Systems WMS4SimPar anhand des Demonstrators hat das System bereits im Laufe des Forschungsprojekts bei der Identifikation von Abweichungen unterstützt, da das Produktionssystem kontinuierlich verbessert, angepasst und optimiert wurde.

8.1.2 Anwendungsfallbeschreibung

Im Anwendungsfall des Demonstrators soll für eine neue Kundenanfrage ein Akkupack produziert werden. Die Anfrage hat im Produktionsbetrieb eine höhere Priorität als das geplante Produktionsprogramm und soll deshalb in Form eines Eilauftrags schnellstmöglich produziert werden. Aufgabe des betriebsbegleitenden Simulationsmodells ist die möglichst genaue Vorhersage des Fertigstellungszeitpunktes des Akkupacks. Der Kundschaft soll noch vor Kaufabschluss der Fertigstellungszeitpunkt mitgeteilt werden, um das Kaufverhalten positiv zu beeinflussen. Hierzu muss das Simulationsmodell den aktuellen Zustand des realen Produktionssystems abbilden. Zudem muss das Simulationsmodell zukünftige Veränderungen des Produktionssystems, die im Rahmen des Betrachtungszeitraums liegen, berücksichtigen, um eine möglichst genaue Vorhersage treffen zu können. Der Betrachtungszeitraum eines Simulationsexperiments hat im Anwendungsfall keinen festgelegten zeitlichen Horizont, sondern ergibt sich aus dem Zeitpunkt des neu eingeplanten Akkupacks im aktuellen Produktionsplan. Zu Demonstrationszwecken wurde eine spätestmögliche Einplanung des Kundenauftrages am Produktionssystem festgelegt, um die Wartezeit bis zur realen Produktion des Akkupacks gering zu halten. Aus diesem Grund beinhaltet der Betrachtungszeitraum von Simulationsexperimenten maximal 30 Akkupacks.

Aufgrund von kontinuierlichen Anpassungen des Demonstrators ist eine Abweichungserkennung mit anschließender Bewertung durch die Projektmitarbeitenden erforderlich. Das notwendige Wissen über Auswirkungen von Veränderungen sowie deren zu er-

wartender Verlauf ist bei den Mitarbeitenden, die für den Aufbau des Demonstrators verantwortlich sind, vorhanden. Ein WMS soll die Arbeiten am Demonstrator unterstützen und den Austausch zwischen den Personen, die das Simulationsmodell aufbauen und pflegen oder damit betriebsbegleitende Experimente ausüben, und den Personen, die an der Hardware arbeiten, fördern.

8.1.3 Abweichungsidentifikation

Die Abweichungserkennung bestimmt im laufenden Betrieb das zeitliche Verhalten des Simulationsmodells sowie der Produktionsanlage und berechnet daraus vorliegende Abweichungen in den überwachten Prozessen.

8.1.3.1 Anbindung der Produktionsanlage

Über die OPC-UA-Anbindung der Produktionsanlage werden die relevanten Daten aus dem Betrieb von der SPS an die IIoT-Plattform übertragen. Für die Umsetzung von WMS4SimPar überträgt die SPS exakte Zeitstempel aus den Produktionsabläufen an die Plattform, die sowohl durch Sensoren an der Anlage als auch Fortschritte im Software-Ablauf des Produktionsprozesses ermittelt werden. Die Zeitstempel werden im Nachgang auf der IIoT-Plattform weiterverarbeitet, um Durchlaufzeiten, Transportzeiten sowie Bearbeitungszeiten zu berechnen. Nach der Fertigstellung eines Akkupacks berechnet ein Service die resultierenden Zeiten an den jeweiligen Fertigungs- und Transportprozessen.

8.1.3.2 Anbindung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell aus der Entwicklung ist um die Abweichungserkennung erweitert, um ebenfalls Zeitstempel zu jedem virtuell produzierten Akkupack an die IIoT-Plattform übertragen zu können. Die Übertragung der Daten erfolgt jeweils nach der Fertigstellung eines Akkupacks in der Simulation. Die nachfolgend festgelegten Kennzahlen für die Abweichungserkennung werden mit der Erweiterung des Simulationsmodells automatisch anhand der OPC-UA-Schnittstelle an die IIoT-Plattform übertragen.

8.1.3.3 Festlegung der Kennzahlen und Verknüpfung der Datenpunkte anhand eines Datenmodells

Das Simulationsmodell bildet die in Abbildung 8.1 dargestellten Stationen ab. Jede Station führt einen Produktions- oder Transportprozess aus und ist damit ein Teil in der gesamten Produktionskette. Die Parametrisierung dieser Produktions- und Transportprozesse ist für die Vorhersage des Fertigstellungszeitpunktes aus dem Anwendungsfall relevant und muss mittels geeigneter Datenpunkte überwacht werden. An den Prozessen des Demonstrators ist die jeweilige Durchlaufzeit entscheidend für die Ermittlung des Fertigstellungszeitpunktes. Aus diesem Grund wird die Durchlaufzeit in jedem Prozess mittels einer eigenen AWI überwacht. Die Implementierung der Services zur Abweichungserkennung werden die notwendigen Zeitstempel aus der SPS und dem Simulationsmodell an die IIoT-Plattform übertragen und dort verarbeitet. Ein Auszug aus den Daten der Simulation ist in Abbildung 8.3 zu sehen.

string 1	datetime 2	datetime 3	datetime 4	
BatteryContainerID	Conveyor1Entrance	Conveyor1Stop	InsertionEnd	
1114.0	2022/03/07 16:12:58.8857	2022/03/07 16:13:01.3882	2022/03/07 16:13:42.1155	2022/03/07 16:13:42.1155
1122.0	2022/03/07 16:13:55.9882	2022/03/07 16:13:58.4907	2022/03/07 16:14:18.7012	2022/03/07 16:14:18.7012

Abbildung 8.3: Auszug aus einer Tabelle mit Zeitstempeln aus der Simulation

Das Datenmodell in Abbildung 8.4 zeigt die Zusammenhänge zwischen den Sensoren an der Anlage und den Parametern der Simulation für die ersten beiden Stationen *Förderband 1* und *Einsetzgreifer* des Demonstrators.

8.1.3.4 Festlegung der Abweichungsgrenzwerte

Die Abweichungsgrenzwerte werden über das UI in der Ontologie gespeichert und anschließend an die IIoT-Plattform übertragen, um von den Services der Abweichungserkennung zum Abgleich verwendet werden zu können. Am Demonstrator sind zu Beginn der Implementierung und zur Überprüfung der Funktionalität der Abweichungserkennung der obere und der untere Grenzwert auf bspw. ± 2 Sekunden festgelegt. Diese Grenzwerte stellen zum einen sicher, dass Veränderungen erfasst werden, und zum anderen, dass prozessbedingte Abweichungen nicht in jedem Durchlauf eine Abweichungserkennung auslösen.

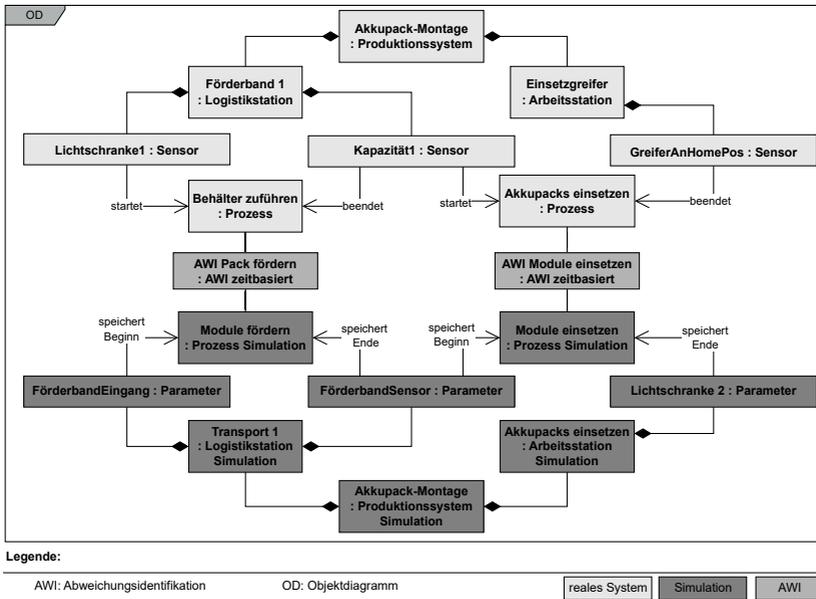


Abbildung 8.4: UML-Objektdiagramm des Datenmodells zur Verknüpfung der Datenpunkte von Station Transport1 und Einsatzgreifer

8.1.3.5 Implementierung der datenbasierten Abweichungserkennung

Die datenbasierte Abweichungserkennung ist vollständig auf der IIoT-Plattform mit Hilfe von Services realisiert. Gemäß dem Datenmodell aus Abschnitt 8.1.3.3 berechnen die Services die aktuell vorliegende Abweichung zwischen der Simulation und dem Produktionssystem. Die SPS erfasst in Millisekunden Signale vom Produktionssystem. Die Zeitstempel für die jeweiligen Start- und Endzeitpunkte der beobachteten Prozesse werden in der SPS zwischengespeichert. Nach jedem produzierten Akkupack werden die Daten aus dem Produktionsprozess an die IIoT-Plattform übertragen. Zeitgleich sendet die Simulation ebenfalls die gespeicherten Daten aus dem simulierten Produktionsablauf an die Plattform.

Der Beobachtungszeitraum erfasst am Demonstrator jeweils die Produktion eines einzelnen Akkupacks. Abweichungen können entsprechend auf einzelne Akkupacks zurückverfolgt werden.

Nach Erhalt der Daten erfolgt anhand der Services der AWI die Berechnung der aktuellen Abweichungen. Liegt die berechnete Abweichung außerhalb der Grenzwerte, erfolgt eine Übertragung an das Teilsystem zur Wissensgenerierung und -verarbeitung, um den Prozess der Abweichungsbehebung zu starten.

8.1.4 Wissensgenerierung und -verarbeitung

Das Teilsystem zur Wissensgenerierung und -verarbeitung am Demonstrator ist als eigenständiges Softwaremodul in der Programmiersprache Python umgesetzt. Über eine Anbindung an die IIoT-Plattform ThingWorx erhält das Modul die relevanten Daten aus der Produktion und dem Simulationsmodell. Innerhalb des Moduls werden diese Daten weiterverarbeitet und wie in Abbildung 8.5 dargestellt in der WDB gespeichert. Für die Umsetzung der Wissensabfragen enthält das Modul zudem das UI, über das die Wissensträger Wissen teilen und abrufen können. Die automatisierte Verteilung des Wissens ist über die beschriebenen Personalisierungsdienste realisiert, die ebenfalls in das Python-Modul integriert sind.

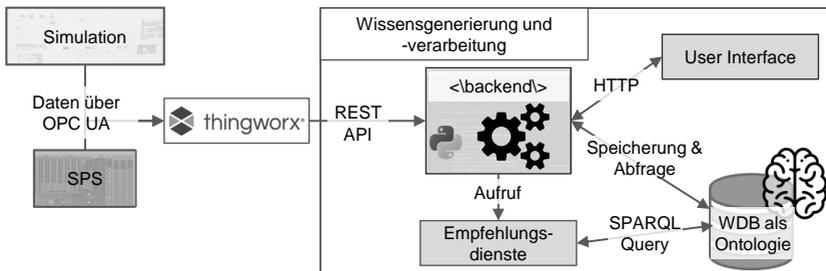


Abbildung 8.5: Architekturschaubild zur Wissensgenerierung und -verarbeitung am Demonstrator

8.1.4.1 Implementierung der Wissensdatenbank

Wie in Abschnitt 6.1 eingeführt, eignen sich Ontologien für die Wissensrepräsentation und können mit einfachen Mitteln wiederverwendet werden. Gemäß dem vorgestellten Vorgehen aus Abbildung 6.2 zum Aufbau von Ontologien erfolgt in Schritt 9 die Instanzierung der in Abschnitt 6.2 entwickelten SMAPSS-Ontologie (vgl. VERNICKEL

8 Anwendung und Bewertung des Systems

et al. 2022). Die Ontologie des Demonstrators verwendet entsprechend Ontologien aus höheren Levels, wie in Abbildung 8.6 dargestellt.

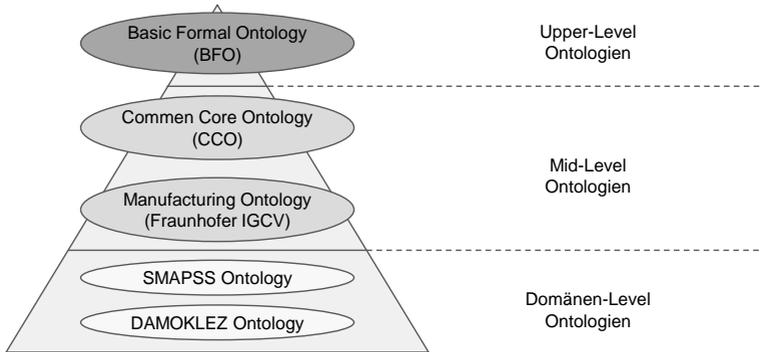


Abbildung 8.6: Wiederverwendung von Mid-Level- und Upper-Level-Ontologien in der Domänen-Level-Ontologie des Demonstrators

Durch die Instanziierung der SMAPSS-Ontologie entsteht eine Ontologie auf Domänen-Level, die den Demonstrator und dessen Umgebung mit seinen spezifischen Entitäten und Beziehungen abbildet. Darin enthalten sind die zur Lösung notwendigen Zusammenhänge zwischen den Prozessen an der Anlage, dem Simulationsmodell und den beteiligten Wissensträgern. Ein grafischer Auszug der instanziierten Ontologie für den Einsatzvorgang (engl. *Inserting*) der Akkus ist in Anhang A.1 zu sehen.

Die Domänen-Ontologie des Demonstrators ist initial durch Projektmitarbeitende in der Software Protégé umgesetzt. Sie bildet den Grundstock der WDB. Für eine weitere Nutzung und Erweiterung ist die Ontologie über das Owlready2-Paket² in das Python-Modul integriert. Anhand des in Abschnitt 8.1.4.3 vorgestellten UI wird weiteres Wissen in der Ontologie gespeichert und verarbeitet. Die instanziierte Ontologie steht unter folgendem Link zur Verfügung:

<https://zenodo.org/record/7770143>

²Für mehr Informationen zum Owlready2-Paket sei auf die Dokumentation unter <https://owlready2.readthedocs.io/en/latest/> verwiesen.

8.1.4.2 Integration der Personalisierungsdienste

Die Personalisierungsdienste dienen zur Unterstützung der Kernaktivitäten *Wissen verteilen* und *Wissen erzeugen* der VDI 5610-1. Die in Abschnitt 6.3 vorgestellten Abfragen sind in den Baustein zur Wissensgenerierung und -verarbeitung eingebunden. Sie greifen zur Erstellung von Empfehlungen auf das vorhandene Wissen in der instanziierten Ontologie des Demonstrators zu. Die in Abschnitt 6.3 beschriebenen Personalisierungsdienste sind als SPARQL-Abfragen in das Python-Modul integriert. Die Implementierung ist im veröffentlichten Source-Code³ des Anwendungsfalls im Ordnerpfad *SMAPSS_Application/recommendation_system/utills.py* zu finden. Mit zunehmender Nutzung des Systems WMS4SimPar und damit wachsender Wissensbasis ermöglichen die Personalisierungsdienste eine spezifische Identifikation von relevanten Abweichungen am Demonstrator.

8.1.4.3 Ablauf der Wissensgenerierung anhand des User Interfaces

Die Externalisierung von Wissen erfolgt über das *User Interface* (UI), anhand dessen den Wissensträgern vorhandene Informationen über eine Abweichung dargestellt werden. Zugleich geben die Wissensträger über Eingabefelder des UI relevantes Wissen bezüglich einer vorliegenden Abweichung ein, damit es in der WDB gespeichert werden kann. Vor der Nutzung der verschiedenen Funktionalitäten müssen sich die Mitarbeitenden über das UI am System anmelden (vgl. Abbildung A.2 im Anhang). Anschließend können die Mitarbeitenden über das UI auf die Vorschläge aus den Personalisierungsdiensten zugreifen. Die in Abbildung 8.7 dargestellte Seite des UI aktualisiert bei jedem Aufruf die aktuell vorgeschlagenen Abweichungen.

Im nächsten Schritt erfolgt die Abfrage von Wissen durch die in Abbildung 8.8 dargestellte Seite. Gemäß dem in Abschnitt 6.4 entwickelten Vorgehen zur Wissensgenerierung können Wissensträger ihr Wissen externalisieren. Die Aufbereitung der vorhandenen Information über eine vorliegende Abweichung in Form von Diagrammen verdeutlicht den Wissensträgern das Ausmaß der vorliegenden Abweichung sowie die vergangene Entwicklung. Verfügt die angefragte Person nicht über zur Beseitigung der Abweichung relevantes Wissen, kann sie stattdessen eine weitere Person vorschlagen,

³Zenodo-Link von VERNICKEL & SINGH (Vernickel & Singh 2022): <https://zenodo.org/record/7770143>

8 Anwendung und Bewertung des Systems

die potenziell relevantes Wissen besitzt. Kann die angefragte Person Wissen beisteuern, unterstützen die 5-M-Methode (vgl. Abschnitt 6.6) und Auswahlfelder zur Klassifizierung der Abweichung bei der Externalisierung des Wissens. Über das freie Textfeld kann die Person weiteres Wissen externalisieren. Anschließend erfolgt eine Bewertung des Wissens, um zum einen unterschiedliche Aussagen miteinander vergleichen zu können und zum anderen den Prozess der Wissensgenerierung abzuschließen. Relevante Information bezüglich des Start- und Enddatums einer Abweichung können die Wissensträger über die darunter liegenden Eingabefelder eingeben.

The screenshot shows a web interface with a header bar containing the name 'Damoklez' and a 'Slide for Options' button. Below the header, a personalized greeting reads 'Hi Kilian_Vernickel Deviations for you which might be relevant for you!'. The main content area is divided into several sections of filtered deviations:

- All Deviations which are open**
 - Deviation_Inserting_1012
 - Deviation_Inserting_1022
 - Deviation_Inserting_1032
 - Deviation_Inserting_1112
 - Deviation_Testing_1032
 - Deviation_Testing_1042
 - Deviation_Testing_1052
 - Deviation_Inserting_1042
- Deviation which are on the same process where the employee solved the deviation earlier**
 - Deviation_Testing_1052
 - Deviation_Inserting_1012
 - Deviation_Inserting_1022
 - Deviation_Testing_1042
 - Deviation_Inserting_1112
 - Deviation_Inserting_1042
 - Deviation_Inserting_1032
- Deviation which are on the same project where the employee solved the deviation earlier**
- Deviation which are on the similar process where the employee solved the deviation earlier**
- Deviation which occurred in the processes where the similar expert like you has solved the deviation**
- Deviation which are suggested by other experts**

Abbildung 8.7: Ansicht der durch die Personalisierungsdienste gefilterten Abweichungen für eine bestimmte Person

8.1 Evaluierung mittels eines Demonstrators

Damoklez Slide for Options

Hi Kilian_Vernickel, you have selected Deviation_Testing_1052 deviation in Testing Process

Do you have knowledge about the deviation?

Yes
 No

If you do not have any knowledge, can you suggest someone who has the knowledge (Ignore if no Knowledge about expert)

(Name of suggested expert)

How confident are you that your suggested expert is suitable for solving the provided deviation

Select your option

Cause Of Deviation
Select your option

Deviation Type
Select your option

Deviation Description
Please share your expert knowledge

How confident are you with the knowledge you are providing for the deviation

Select your option

Deviation starts from

Deviation will stay until

Submit

ProductID	Production Simulation (ms)	Production System (ms)	Positive Limit (ms)	Negative Limit (ms)
1002	1105	1115	1205	1205
1032	1120	1130	1215	1215
1042	1135	1145	1225	1225
1052	1150	1160	1235	1235

Abbildung 8.8: Ansicht einer Abweichung für die Abfrage von Wissen

8.1.5 Wissenstransformation und Parametrisierung des Simulationsmodells

Die abschließende Wissenstransformation und Parametrisierung des Simulationsmodells erfolgt sowohl anhand des UI der Wissensgenerierung und -verarbeitung als auch direkt im Simulationsmodell in Plant Simulation.

8.1.5.1 Verarbeitung des generierten Wissens

Alle generierten Informationen werden durch das System in der Ontologie gespeichert, wodurch sich mit jeder Wissenseingabe die verfügbare Wissensbasis sukzessive vergrößert. Durch die direkte Verbindung zwischen den Wissensträgern, die Wissen geteilt haben, und deren Verknüpfung mit den Prozessen oder anderen Mitarbeitenden können die Personalisierungsdienste im weiteren Verlauf bessere Vorschläge liefern. Ein Beispiel aus dem Demonstrator ist in Abbildung 8.9 zu sehen, bei dem der Mitarbeiter

8 Anwendung und Bewertung des Systems

Kilian den Mitarbeiter *Mayank* als Wissensträger bezüglich der Abweichung im Prozess *Inserting* vorgeschlagen hat. Diese neu erstellte Verknüpfung zwischen dem Wissensträger *Mayank* und der Abweichung im Prozess *Inserting* wird durch Abfrage 2 (vgl. Abschnitt 6.3) der Personalisierungsdienste erfasst. Führt der Vorschlag zu einer erfolgreichen Wissensgenerierung in der spezifischen Abweichung *Deviation_Inserting_1112*, wird in der WDB eine weitere Verbindung zwischen dem eigentlichen Prozess *Inserting* und dem Wissensträger *Mayank* erstellt. Dadurch wird der Wissensträger *Mayank* bei zukünftig auftretenden Abweichungen im Prozess *Inserting* anhand der Abfrage 4 als potenzieller Wissensträger identifiziert, ohne dass zuvor eine Empfehlung durch einen anderen Wissensträger stattfinden muss.

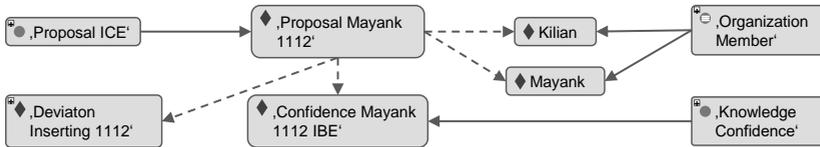


Abbildung 8.9: Grafische Darstellung der Ontologie in Protégé zum Vorschlag eines Wissensträgers für eine Abweichung im Prozess *Inserting*

8.1.5.2 Ermittlung der Simulationsparameter am Demonstrator

Wie in Abschnitt 7.1 beschrieben, kann es sich bei den Messparametern direkt um die Einstellparameter im Simulationsmodell handeln. Im Falle des Demonstrators ist dies für keinen der überwachten Prozesse der Fall, weshalb der Zusammenhang zwischen den gemessenen Prozesszeiten und den entsprechenden Simulationsparametern identifiziert werden muss. Im Simulationsmodell wurden hierfür Versuchsläufe mit variierenden Einstellparametern durchgeführt und die resultierenden Prozesszeiten gespeichert. Anhand einer Datenanalyse in Python wurden mit Hilfe eines automatischen Fitting-Algorithmus die Koeffizienten für die Bildung der Funktion ermittelt. Aus der Python-Bibliothek *Scikit-learn* kam das Modell *LinearRegression* zum Einsatz. Abbildung 8.10 zeigt für den Greifprozess und den zweiten Transportprozess die Messpunkte sowie die passende Funktion. In Abbildung 8.10a ist zu erkennen, dass beim Greifprozess ein nicht-linearer Zusammenhang besteht, der durch ein Polynom zweiten Grades ausreichend genau angenähert werden kann. Im Transportprozess in Abbildung 8.10b liegt hingegen ein linearer Zusammenhang vor, der anhand des Steigungskoeffizienten $m = 2,56409717 * 10^{-3}$ sowie dem Ordinatenabschnitt $t = -6,53$ mathematisch

beschrieben werden kann. Der ermittelte Zusammenhang wird in der WDB gespeichert und kann im weiteren Verlauf für die Parametrisierung durch das System weiterverarbeitet oder von den Simulationsexperten verwendet werden.

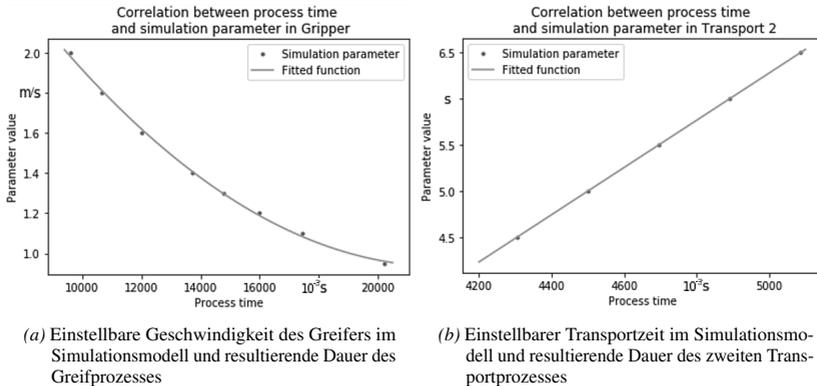


Abbildung 8.10: Experimentelle Ermittlung der veränderlichen Simulationsparameter (Ordinatenachse) und der resultierenden Dauer der Prozesse (Abszissenachse)

8.1.5.3 Parametrisierung des Modells

Die Parametrisierung des Modells erfolgt am Demonstrator durch die Simulationsexperten. Über das UI werden den Simulationsexperten alle Abweichungen mit generiertem Wissen zur Verfügung gestellt. Durch Anwählen einer Abweichung wird das generierte Wissen, wie in Abbildung 7.4 dargestellt, präsentiert. Den Simulationsexperten wird das externalisierte Wissen zur Verfügung gestellt. Dies beinhaltet neben den Informationen aus der datenbasierten Abweichungserkennung auch den ermittelten Zusammenhang zwischen dem Einstellparameter in der Simulation und den Prozessparametern. Zudem berechnet das Softwaremodul den theoretischen Einstellparameter für die aktuell vorliegende Abweichung zwischen dem realen Produktionsprozess und dem Simulationsmodell anhand der in Abschnitt 8.1.5.2 ermittelten Formeln. Den Simulationsexperten steht eine umfangreiche Informationsquelle zur Verfügung, die für die betriebsbegleitende Parametrisierung des Modells genutzt werden kann.

8 Anwendung und Bewertung des Systems

Im Simulationsmodell können die Simulationsexperten für jeden der überwachten Prozesse einzelne Parametersätze hinterlegen, in denen die angepassten Parameter für jede Variante der Akkupacks sowie Start- und Endzeit hinterlegt sind. Nach erfolgter Parametrisierung bestätigen die Simulationsexperten über das UI die Bearbeitung der Abweichung und können ggf. zu Dokumentationszwecken noch einen Kommentar verfassen.

8.1.5.4 Initialisierung des Simulationsmodells

Die Initialisierung des Simulationsmodells erfolgt am Demonstrator automatisiert zu festgelegten Zeitpunkten. Nach jedem produzierten Akkupack erfolgt ein Abgleich des Simulationsmodells mit dem realen Produktionssystem anhand der OPC-UA-Schnittstelle. Während der Produktion eines Akkupacks findet aufgrund der geringen Produktionsdauer am Demonstrator keine Initialisierung statt, jedoch prüft eine Methode vor Eintritt eines Akkupacks an jeder Station, ob ein neuer Parametersatz für den aktuellen Zeitpunkt im Simulationsmodell vorhanden ist, und übernimmt die Zeiten aus den in Abschnitt 8.1.5.3 erstellten Parametersätzen.

8.1.6 Evaluierung im Rahmen eines Forschungsprojekts

Nach der erfolgten Umsetzung des Systems WMS4SimPar folgt abschließend in der DS-II Phase der DRM die Untersuchung, ob sich durch die Einführung des entwickelten Systems eine Verbesserung der Ausgangssituation eingestellt hat (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 189). Personen mit unterschiedlichen fachlichen Hintergründen bekamen den Gesamt Ablauf des Demonstrators gezeigt und konnten die unterschiedlichen Komponenten des Systems WMS4SimPar betrachten sowie eigenständig ausprobieren. Um einen Vergleich zwischen der Ausgangssituation ohne unterstützendes System und dem Zustand nach der Einführung von WMS4SimPar zu verdeutlichen, wurde der Ablauf des Demonstrators den Probandinnen und Probanden einmal mit deaktiviertem und einmal mit aktiviertem Wissensmanagementsystem präsentiert. Das Feedback der Personen wurde im Anschluss anhand eines Fragebogens erfasst. Die Ergebnisse wurden ebenso in VERNICKEL et al. (2022) publiziert.

Der Fragebogen besteht aus insgesamt 40 Fragen. Inhaltliche Themen können anhand einer 5-Punkte-Skala nach Likert (vgl. JOSHI et al. 2015) beantwortet werden. Bei einer Zustimmung zur gestellten Frage kann eine Person mit *Yes* oder *Definitely Yes*

8.2 Partielle Umsetzung an einem industriellen Produktionssystem

antworten. Mit *Not at all* oder *No* kann eine Frage verneint bzw. einer Aussage widersprochen werden. Bei Unentschlossenheit kann mit *Some-what* geantwortet werden. Möchte die Person keine spezifische Antwort liefern, kann dies mit der zusätzlichen Antwortmöglichkeit *No Statement* erfolgen.

An der Evaluierung nahmen insgesamt 16 Personen teil, davon sind drei in der Beratung tätig, zwei arbeiten überwiegend im Maschinen- und Anlagenbau und die restlichen Teilnehmer sind in der Forschung tätig. Bezogen auf das gesamte System WMS4SimPar gaben 75 % an, dass das System die Identifikation von Abweichungen zwischen der Simulation und dem Produktionssystem unterstützt. Mit einer *Definitely Yes*-Stimme mehr und ebenfalls mit 75 % Zustimmung gaben die Teilnehmer und Teilnehmerinnen an, dass das System die Aufwände für die Behebung von Abweichungen unterstützt. Mit 81,25 % Zustimmung (50 % *Yes* und 31,25 % *Definitely Yes*) unterstützt das System die Extraktion von Wissen. 81,25 % der Befragten sind der Meinung, dass durch die Wissensextraktion die Qualität des Simulationsmodells gesteigert wird, da die Simulationsexperten beim Prozess der Abweichungsidentifikation und Aktualisierung unterstützt werden. Zudem gaben 81,25 % an, dass darüber hinaus in dem gespeicherten Wissen Potenzial für weitere Anwendungsfälle in der Produktions- bzw. Unternehmensumgebung liegt.

Der gesamte Fragebogen ist in Anhang A.3 abgebildet. Die Ergebnisse der Befragung sind in Balkendiagrammen in Anhang A.4 zusammengefasst.

8.2 Partielle Umsetzung an einem industriellen Produktionssystem

Im Rahmen des Forschungsprojekts DAMOKLEZ konnte ein Teil von WMS4SimPar an Daten aus einem realen Produktionssystem und dem zugehörigen Simulationsmodell aus dem Engineering getestet werden. Die Erkenntnisse aus der Industrieapplikation haben maßgeblich zur Erarbeitung des Gesamtsystems beigetragen. Im betrachteten Fallbeispiel konnte die datentechnische Anpassung des Simulationsmodells nur an historischen Daten durchgeführt werden, da eine Anbindung an die Unternehmens-IT im Rahmen des Forschungsprojekts nicht in der Beantragung des Projekts vorgesehen war und daher keine finanziellen Mittel und personellen Kapazitäten zur Verfügung standen. Aus diesem Grund erfolgte die Umsetzung in einer virtuellen Umgebung, in der das Simulationsmodell ohne eines WMS rein anhand einer datentechnischen Abweichungserkennung parametrisiert wurde. Gemäß dem Vorgehen zur Ermittlung der

8 Anwendung und Bewertung des Systems

Simulationsparameter aus Abschnitt 7.1 wurde in einem Softwaremodul der Zusammenhang zwischen Prozesszeiten und den Einstellparametern identifiziert. Im Fallbeispiel wurden die Produktionszeiten von mehreren Produkten in der Abweichungserkennung zusammengefasst, weshalb Prozesszeiten Schwankungen unterliegen, wie in Formel 5.3 in Abschnitt 5.5 beschrieben.

Aus der realen Produktion lagen Datensätze über vier Tage mit insgesamt 864 produzierten Produkten vor. Das Simulationsmodell aus der Entwicklungsphase lag vor, wurde zum derzeitigen Zeitpunkt aber nicht verwendet, da die Abweichungen zwischen dem realen Produktionssystem und dem Simulationsmodell zu groß waren. Wie in Abbildung 8.12 zu sehen ist, betrug die Abweichung in einer 8-Stunden-Schicht zum Teil 60%. In Absprache mit den Experten aus der Produktion des Forschungspartners wurde ein Beobachtungszeitraum von acht Stunden festgelegt, da Veränderungen auf eine Schicht zurückverfolgt werden sollen. Die Berechnung der Abweichung wurde anhand von Gleichung 5.3 (vgl. Abschnitt 5.5) für stochastische Schwankungen durchgeführt. Die Daten aus dem Produktionssystem wurden anhand eines Python-Programms analysiert und die resultierende mathematische Funktion identifiziert. Die Analyse ergab, dass eine logarithmische Normalverteilung die Prozesszeiten, wie sie in Abbildung 8.11 zu sehen sind, mit der höchsten Genauigkeit abbildet.

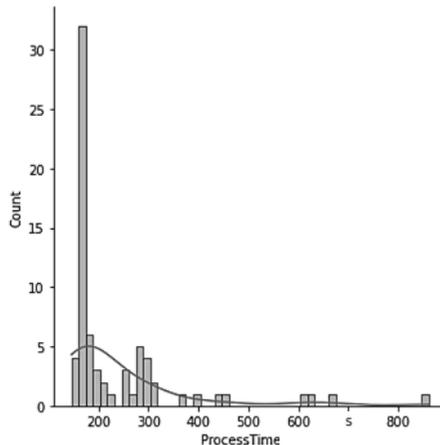


Abbildung 8.11: Ergebnis der Datenanalyse zur Bestimmung der Prozesszeit an einer Station im Produktionssystem

8.2 Partielle Umsetzung an einem industriellen Produktionssystem

Wie in Abbildung 8.12 zu sehen ist, verbessert sich die Genauigkeit des Simulationsmodells erheblich. Zudem spiegelt das Verhalten des Simulationsmodells das reale Verhalten des Produktionssystems besser wider, wodurch Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Prozessen genauer simuliert und untersucht werden können. Die Abweichung zwischen dem realen Produktionssystem und dem Simulationsmodell konnte im Fallbeispiel von 60% auf 15% reduziert werden, siehe Tabelle 8.1.

Tabelle 8.1: Gegenüberstellung der produzierten Produkte vor und nach der Parametrisierung

	Produzierte Stück in 8 Stunden	Prozentuale Abweichung
Reales Produktionssystem	80	
Simulationsmodell vor der Parametrisierung	128	60 %
Simulationsmodell nach der Parametrisierung	92	15 %

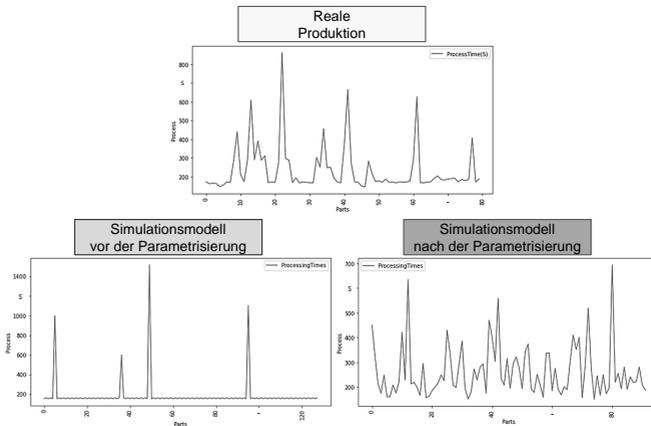


Abbildung 8.12: Vergleich der Prozesszeiten der realen Produktion mit dem Simulationsmodell vor und nach der Parametrisierung

Die Besprechung der Ergebnisse aus der Datenanalyse musste in mehreren Zyklen mit den Simulationsexperten beim Forschungspartner und den dortigen Prozessexperten aus dem Shopfloor besprochen werden, um die Ergebnisse zu verifizieren. Der Prozess hat offen gelegt, dass ein WMS zielführend ist, um Zeit und Aufwände für die

Zielerreichung zu sparen. Die Diskussion und Bewertung der partiellen Umsetzung fand im Rahmen eines Workshops zusammen mit einem Simulationsexperten und einem Entwickler aus dem Sondermaschinenbau des Projektpartners statt. Aufgrund der signifikanten Verbesserung der Modellqualität im betrachteten Prozess möchte der Projektpartner das Vorgehen auf das gesamte Produktionssystem ausweiten, um ein vollständiges Simulationsmodell für den betriebsbegleitenden Einsatz zur Verfügung stellen zu können. Im Rahmen des Workshops wurde zudem der Ansatz von WMS4SimPar diskutiert, da das Thema Wissensspeicherung und -verteilung beim Projektpartner eine wichtige Zukunftsrolle spielt. Parallel zu den Arbeiten im Forschungsprojekt wurde in einem anderen Kontext beim Projektpartner eine WDB für die Produktion aufgebaut. Der vorgestellte hybride Ansatz aus WMS4SimPar traf deshalb auf großes Interesse auf Seiten der Projektpartner, die im Nachgang an diese Arbeit das Thema weiter verfolgen möchten.

8.3 Bewertung der Anforderungserfüllung

Neben der Evaluierung des Systems anhand der Nutzerinnen und Nutzer stellt die Überprüfung des Gesamtsystems hinsichtlich der gestellten Anforderungen aus Abschnitt 4.1 einen wichtigen Teil der Validierung des Gesamtsystems dar (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 182). Nachfolgend wird in umgekehrter Reihenfolge, beginnend mit den spezifischen Anforderungen und endend mit den Anforderungen aus der anwendungsorientierten Wissenschaft, die Erfüllung zusammengefasst.

8.3.1 Anforderungserfüllung der betriebsbegleitenden Simulation

SAS1 Erfüllung der Normen von Simulationsmodellen

Mit der in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Untersuchung hinsichtlich der Voraussetzungen eines Simulationsmodells stellt WMS4SimPar sicher, dass die erwähnten Normen und Vorgehen bei der Erstellung und Nutzung von Simulation nach Abbildung 2.14 eingehalten werden. Bei der Anwendung durch weitere Personen müssen diese prüfen, ob ein vorhandenes Simulationsmodell den Anforderungen aus den Normen gerecht wird.

SAS2 **Anpassbarkeit an aktuelle Betriebssituation der Produktion**

Die Anforderung hinsichtlich der Anpassbarkeit an die aktuelle Betriebssituation berücksichtigt das Gesamtsystem in mehreren Lösungsbausteinen. Zum einen führen die Eingrenzung der relevanten Kennzahlen sowie die anschließende Erstellung eines Datenmodells zu einer übersichtlichen Darstellung der relevanten Parameter, die an die aktuelle Betriebssituation angepasst werden müssen. Darüber hinaus stellt die datenbasierte Abweichungserkennung sicher, dass automatisiert eine Veränderung in der Produktion erfasst und mit Hilfe des Wissensmanagementprozesses gelöst wird. Die Speicherung der Zusammenhänge zwischen den Simulationsparametern und den Prozessdaten unterstützt zudem die Simulationsexperten bei der schnellen und effizienten Anpassung.

SAS3 **Direkte Umsetzung der Simulationsergebnisse**

Die Sicherstellung der direkten Umsetzbarkeit der Simulationsergebnisse ist durch eine exakte Anwendungsfallbeschreibung (vgl. Abschnitt 4.4) und die resultierenden individuellen Anforderungen an das System gegeben.

SAS4 **Integrierbarkeit des Simulationsmodells**

Mit Verwendung der IIoT-Plattform im System WMS4SimPar, die den Datenaustausch und die Steuerung der Simulation ermöglicht, hat die Umsetzung gezeigt, wie das Simulationsmodell für einen spezifischen Anwendungsfall in das Gesamtsystem integriert werden kann.

8.3.2 Anforderungserfüllung des Wissensmanagementsystems

SAW1 **Anbindung an die Unternehmenssysteme**

Die Anbindung des WMS ist in WMS4SimPar über das Python-Modul, wie in Abbildung 8.5 dargestellt, erfüllt. Mit Hilfe der Wiederverwendung von Top-Level- und Mid-Level-Ontologien ist zudem der Aufwand für die Abbildung der organisatorischen Zusammenhänge im Unternehmen, der Prozesse und der Anlagen in der WDB reduziert. Durch den vorgeschlagenen Einsatz von offenen Schnittstellen, wie bspw. im Anwendungsfall mittels OPC UA realisiert, kann das System auch an weitere Unternehmenssysteme angebunden werden.

SAW2 **Transparenzerhöhung im Unternehmen**

Die Nutzung von Personalisierungsdiensten und die individuelle Aufbereitung der Informationen im UI führen zu einer hohen Transparenz für die Anwende-

rinnen und Anwender von WMS4SimPar. Zudem ermöglicht die Ontologie eine eindeutige Zuordnung von Personen und dem externalisierten Wissen, wodurch Informationsflüsse rekonstruiert und nutzbar gemacht werden können.

SAW3 **Integration der Mitarbeitenden**

Die Integration der Mitarbeitenden in den gesamten Prozess der betriebsbegleitenden Parametrisierung des Simulationsmodells ist über den Lösungsbaustein zur Wissensgenerierung und -verarbeitung sichergestellt.

SAW4 **Systematisches Vorgehen zur Ermittlung von Prozesswissen**

Die Anforderung nach einem systematischen Vorgehen zur Ermittlung von Prozesswissen ist in WMS4SimPar anhand des entwickelten und in der Software umgesetzten Vorgehens zur Externalisierung von Wissen (vgl. Abbildung 6.5) berücksichtigt und in Abschnitt 8.1.6 evaluiert worden.

SAW5 **Digitalisierung von Wissen**

Die Nutzung einer Ontologie als Wissensspeicher bietet über das System WMS4SimPar hinaus die Möglichkeit, das Wissen zu verarbeiten und mit anderen Wissensspeichern zu koppeln. Die Verwendung der *BFO*-, *CCO*- und *Manufacturing*-Ontologien ermöglicht eine einfache Fusion mit anderen Unternehmensontologien, die auf denselben Top- und Mid-Level-Ontologien aufbauen.

8.3.3 Anforderungserfüllung des Gesamtsystems

SA1 **Identifikation von kritischen Abweichungen**

Kritische Abweichungen werden im System mit Hilfe der individuellen Abweichungsgrenzwerte (vgl. Abschnitt 5.4) identifiziert. Dies ist in WMS4SimPar anhand der Verknüpfung der Simulation mit dem Produktionssystem über die IIoT-Plattform realisiert. Die auftretenden Schwankungen im Prozess werden über die Festlegung der Abtastrate und des Beobachtungszeitraums im Gesamtsystem berücksichtigt. Zudem können zukünftig auftretende Abweichungen ebenfalls berücksichtigt werden, wodurch proaktiv eine Abweichung zwischen Simulation und realem Produktionssystem verhindert wird.

SA2 **Ermittlung von relevanten Wissensträgern**

Mit der Einführung der Personalisierungsdienste unterstützt das System die Ermittlung von relevanten Wissensträgern. Zudem führt die kontinuierliche Erweiterung der Ontologie zu einer präziseren Ermittlung der relevanten Personen. Die

Nutzung der neu entstehenden Verbindungen zwischen Personen und Prozessen mit Hilfe der Empfehlungen unterstützt ebenfalls die Ermittlung der relevanten Personen mit Wissen zu bestimmten Prozessen und Abweichungen.

SA3 **Unterstützung beim Prozess zur Behebung von Abweichungen**

Das in Abschnitt 6.6 vorgestellte UI von WMS4SimPar unterstützt den gesamten Prozess der Externalisierung von Wissen, angefangen mit der Ermittlung von relevanten Wissensträgern bis zur Parametrisierung des Simulationsmodells durch die Simulationsexperten.

SA4 **Bereitstellung eines hinreichend genauen Simulationsmodells**

Anhand der Einstellparameter in der AWI können die erforderliche Genauigkeit des Simulationsmodells und die damit verbundene Häufigkeit der Parametrisierung des Simulationsmodells eingestellt werden. Das Gesamtsystem verfolgt das primäre Ziel, ein für einen Anwendungsfall spezifisches Simulationsmodell mit einer hinreichenden Genauigkeit zur Verfügung zu stellen.

8.3.4 Anforderungserfüllung aus Sicht der anwendungsorientierten Wissenschaft

AA1 **Praxistauglichkeit**

Die Praxistauglichkeit sichert das System WMS4SimPar über den Einsatz von standardisierten und allgemein verfügbaren Systemen, wie bspw. der Ontologien und der Wiederverwendung von Simulationsmodellen, ab. Für den Aufbau der WDB können Anwenderinnen und Anwender auf die in diesem Rahmen entwickelte SMAPSS-Ontologie zurückgreifen, wodurch sich der Implementierungsaufwand signifikant reduziert. Zudem kann das vorgestellte UI über das GitHub-Projekt heruntergeladen und an die eigenen Bedürfnisse angepasst werden. Die SMAPSS-Ontologie steht zudem über die Veröffentlichung von VERNICKEL et al. (2022) oder über folgenden Link zur Verfügung: <https://zenodo.org/record/7770143>, VERNICKEL & SINGH (Vernickel & Singh 2022).

AA2 **Allgemeingültigkeit**

Die Allgemeingültigkeit wird in WMS4SimPar über die individuellen Anpassungsmöglichkeiten sichergestellt, die in Abhängigkeit vom Anwendungsfall angepasst werden müssen. Die Umsetzung am Demonstrator sowie die partielle

Umsetzung an einem industriellen Praxisbeispiel haben gezeigt, dass das System auf unterschiedliche Ausgangssituationen angewendet werden kann.

AA3 **Adaptierbarkeit**

Die Adaptierbarkeit ist, wie bereits beschrieben, über die individuellen Anpassungsmöglichkeiten erfüllt. Die Verwendung von generischen Modellierungssprachen, wie in den Kapiteln 5 bis 7 zu sehen, vereinfacht zudem die Adaption für weitere Anwendungsfälle.

AA4 **Skalierbarkeit**

Die Fokussierung auf einzelne Prozesse, die von jeweiligen AWIs überwacht werden, macht das System mit denselben Aufwänden auf mehrere Prozesse skalierbar. Die Ontologie ist ebenfalls auf Prozessebene und das entsprechende Umfeld fokussiert, wodurch das Gesamtsystem in der Theorie beliebig groß skaliert werden kann. Eine praktische Validierung der Skalierbarkeit auf große Produktionssysteme und Organisationen war im Rahmen der Arbeit jedoch nicht möglich.

AA5 **Wirtschaftlichkeit**

Um die monetären Aufwände gering zu halten, setzt das System WMS4SimPar auf eine größtmögliche Wiederverwendung und möglichst geringe Aufwände bei der Anpassung in weiteren Anwendungsfällen. Eine detaillierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit folgt in Abschnitt 8.4.

8.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Eine wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems kann nur bedingt allgemeingültig durchgeführt werden, da der jeweilige Anwendungsfall und die unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen die Wirtschaftlichkeitsrechnung beeinflussen. Nachfolgend wird beispielhaft der entstandene Aufwand für die Implementierung sowie den Betrieb des Systems (Abschnitt 8.4.1) dem zu erwartenden Nutzen (Abschnitt 8.4.2) gegenübergestellt. Abschließend folgt in Abschnitt 8.4.3 eine Verallgemeinerung der Wirtschaftlichkeit. Weitere Faktoren, die einen positiven Einfluss auf das Unternehmen haben, werden in Abschnitt 8.4.4 dargelegt. Eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist gemäß der DRM erforderlich, um nach dem Nachweis der Benutzbarkeit und Anwendbarkeit auch die Nützlichkeit bei der Erfolgsevaluation (vgl. Abschnitt 1.5) vorweisen zu können.

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit wird das Modell der Amortisationsrechnung verwendet. Die Amortisationszeit ist „der Zeitraum, in dem das eingesetzte Kapital aus den durchschnittlichen Rückflüssen oder Einzahlungsüberschüssen des Objektes wiedergewonnen wird“ (GÖTZE 2014, S. 70).

8.4.1 Aufwand

Der Aufwand, WMS4SimPar umzusetzen, lässt sich in die einzelnen Lösungsbausteine zur Datenmodellerstellung, Wissensgenerierung und -verarbeitung und Simulationsmodellparametrisierung sowie in die Anwendungsfallbeschreibung mit der Gesamtsystem-Integration kategorisieren.

Initial entstehen bei der Umsetzung die in Tabelle 8.2 gelisteten Kosten. Für den Aufbau der IT-Infrastruktur sind ca. 8 Wochen notwendig, um die IIoT-Plattform mit der Simulationssoftware und der SPS zu verbinden. Zudem muss das *User Interface* für die spätere Nutzung initial aufgebaut oder das über GitHub heruntergeladene UI angepasst werden. Für das Simulationsmodell ist eine Lizenz erforderlich. Darüber hinaus muss das Simulationsmodell initial aufgebaut oder, falls vorhanden, ein existierendes Modell kann für den betriebsbegleitenden Einsatz modifiziert werden. Die initiale Datenmodellerstellung benötigt ca. 4 Wochen, während bei der Instanziierung der Ontologie, um die WDB aufzubauen, mit 8 Wochen zu rechnen ist.

Tabelle 8.2: Einmalige Kosten zur Umsetzung von WMS4SimPar (Expertenschätzung)

Beschreibung	Kostensatz	Anzahl	Kosten
Aufbau der IT-Infrastruktur	120.000 €/PJ	0,2 PJ	24.000 €
Anschaffung einer Softwarelizenz	5.000 €	1	5.000 €
Aufbau des Simulationsmodells	120.000 €/PJ	0,2 PJ	24.000 €
Initiale Datenmodellerstellung	120.000 €/PJ	0,1 PJ	12.000 €
Instanziierung der SMAPSS-Ontologie	120.000 €/PJ	0,2 PJ	24.000 €
Summe			89.000 €

PJ: Personenjahr

In Tabelle 8.3 sind die geschätzten jährlichen Betriebskosten von WMS4SimPar gelistet. Darin enthalten sind die Wartungskosten für das Gesamtsystem, da die Software kontinu-

8 Anwendung und Bewertung des Systems

ierlich an die Veränderungen im Unternehmen angepasst und aktualisiert werden muss. Die Parametrisierung durch die Simulationsexperten ist bei einem regelmäßigen Einsatz mit 4 Wochen pro Jahr veranschlagt. Ebenso ist die Zeit für die Externalisierung von Expertenwissen mit 4 Wochen pro Jahr kalkuliert. Die Lizenz für eine IIoT-Plattform beläuft sich auf ca. 4.500 € pro Jahr. Darüber hinaus muss auch die WDB gepflegt und gewartet werden. Der letzte jährliche Kostenpunkt ist die Schulung aller Nutzerinnen und Nutzer, die mit dem System WMS4SimPar arbeiten.

Tabelle 8.3: Jährliche Kosten für den Betrieb von WMS4SimPar (Expertenschätzung)

Beschreibung	Kostensatz	Anzahl	Kosten
Wartung des Gesamtsystems	120.000 €/PJ	0,05 PJ	6.000 €
Parametrisierung des Modells	120.000 €/PJ	0,1 PJ	12.000 €
Externalisierung von Wissen	90.000 €/PJ	0,1 PJ	9.000 €
Lizenz für die IIoT-Plattform	4.500 €/J	1 /J	4.500 €
Wartung der Wissensdatenbank	120.000 €/PJ	0,05 PJ	6.000 €
Schulung der Anwender	120.000 €/PJ	0,1 PJ	12.000 €
Summe			49.500 €

J: Jahr PJ: Personenjahr

8.4.2 Nutzen

Der Nutzen wird nachfolgend anhand des industriellen Anwendungsbeispiels aus Abschnitt 8.2 dargestellt. Im vorgestellten Fall konnte die Prognose der produzierten Produkte um 36 Stück innerhalb einer Achtstundenschicht verbessert werden. Bei einem Dreischichtbetrieb verbessert sich die Prognose um 108 Stück pro Tag. Durch die gestiegene Genauigkeit der Prognose wird weniger Lagerplatz für das Ausgangsmaterial benötigt, was zu einem finanziellen Nutzen führt. Jedes Produkt im Anwendungsbeispiel besteht aus mehreren Komponenten, die eine geschätzte Lagerfläche von $6,4 m^2$ benötigen. Dadurch ergibt sich ein Lagerbedarf von $691,2 m^2$, der mit Hilfe des Systems WMS4SimPar eingespart werden kann. Mit einem Quadratmeterpreis von 8,20 €

8.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

pro Monat⁴ ergibt sich ein wie in Tabelle 8.4 dargestellter finanzieller Nutzen von ca. 68 Tsd. € pro Jahr. Hinzu kommt die zeitliche Einsparung bei der Anpassung des Simulationsmodells im betriebsbegleitenden Einsatz. Mit WMS4SimPar kann davon ausgegangen werden, dass sich die Aufwände um ca. 50% reduzieren, was zu Einsparungen von ca. 12 Tsd. € pro Jahr führt. Insgesamt ergeben sich dadurch gesparte Kosten von ca. 80 Tsd. € pro Jahr.

Tabelle 8.4: Nutzen durch die Anwendung von WMS4SimPar (Expertenschätzung)

Beschreibung	Kostensatz	Anzahl	Nutzen
Reduzierte Simulationsabweichung		108 Prod/T	
Eingesparte Lagerfläche	6,4 m ² /Prod	691,2 m ²	
Kosten pro Quadratmeter Lagerfläche	8,2 €/m ² /M		
Eingesparte Lagerkosten pro Jahr			68.014 €/J
Zeitersparnis für Modellanpassung	120.000 €/PJ	0,1 PJ	12.000 €/J
Eingesparte Kosten pro Jahr			80.014 €/J

J: Jahr M: Monat T: Tag PJ: Personenjahr Prod: Produkte

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit ergibt sich aus der Gegenüberstellung des Aufwands und des Nutzens. Wie in Abbildung 8.13 zu sehen ist, amortisieren sich die Aufwände für die anfänglichen Investitionskosten sowie die jährlich anfallenden Betriebskosten für das System bereits nach ca. 2,9 Jahren. In der Industrie wird i. d. R. mit Amortisationszeiten von 3-4 Jahren gerechnet (GÖTZE 2014; KUBE et al. 2017, S. 6). Die Investition ist demnach vorteilhaft für das Unternehmen.

8.4.3 Verallgemeinerung der Wirtschaftlichkeit

Die allgemeine Berechnung der Amortisationszeit ist Gleichung 8.1 zu entnehmen. Das eingesetzte Kapital entspricht den Anschaffungskosten für das System. Der durchschnittliche Rückfluss ergibt sich aus dem zu erwartenden Nutzen dividiert durch das eingesetzte Kapital abzüglich der jährlichen Betriebskosten.

⁴Quelle für Lagerflächenkosten: GERMAN PROPERTY PARTNERS (2022)

8 Anwendung und Bewertung des Systems

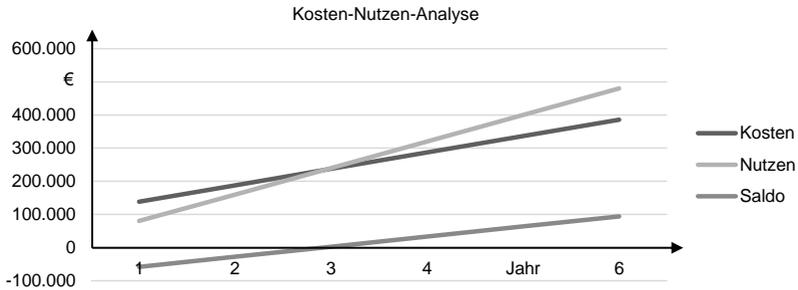


Abbildung 8.13: Diagramm der Kosten-Nutzen-Analyse für den Einsatz von WMS4SimPar im industriellen Anwendungsbeispiel

$$\text{Amortisationszeit in Jahren} = \frac{\text{eingesetztes Kapital}}{\text{durchschnittliche Rückflüsse pro Jahr}} \quad (8.1)$$

Der Nutzen steigt überproportional vor allem bei großen, komplexen Systemen, bei denen die Wissensträger örtlich getrennt oder viele Personen am Gesamtprozess beteiligt sind. Beim Aufwand für die Installation hingegen handelt es sich zum Teil um einmalige Kosten, die stark unterproportional oder maximal proportional mit der Größe des Systems steigen. Bspw. besteht bei der IT-Infrastruktur ein hoher initialer Aufwand, der sich aus einem Fixanteil und einem größenabhängigen Teil zusammensetzt. Dementsprechend lohnt sich der Einsatz des Systems vor allem bei größeren Produktionssystemen. Eine allgemeine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sollte in jedem Projekt vorab durchgeführt und als Abbruchkriterium anhand einer festgelegten Amortisationszeit definiert werden.

8.4.4 Qualitative Kriterien der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung aus dem industriellen Anwendungsfall zeigt, ab wann der Einsatz des Wissensmanagementsystems zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz bei der Betrachtung des Nutzens aus den eingesparten Lagerkosten Sinn ergibt. Neben dem dargestellten Nutzen ergeben sich weitere Vorteile, auf die nachfolgend eingegangen wird.

Simulationsexperten sind einen Großteil ihrer Zeit mit der Datenbeschaffung

und -aufbereitung beschäftigt, um Simulationsmodelle zu parametrisieren. In der Datenaufbereitung ist auch das Datenverständnis enthalten, was in der Praxis oftmals mit zeitaufwändigen Analysen und Abstimmungen mit Personen aus dem Maschinenumfeld verbunden ist. Das System WMS4SimPar setzt hier an und reduziert sowohl die Aufwände für die Datenbeschaffung als auch die Zeit für das Datenverständnis.

Der Prozess der Wissensgenerierung führt zum einen zu einem besseren Prozessverständnis bei den Wissensträgern und zum anderen zu mehr Informationen für die Simulationsexperten. Darüber hinaus erstellt die WDB Verknüpfungen zwischen den beteiligten Personen, wodurch die Vernetzung und der unternehmensinterne Wissensaustausch unterstützt werden.

Der Einsatz von WMS4SimPar führt zudem zu einem besseren Verständnis des Produktionssystems, da Simulationsexperten und Wissensträger aus dem Shopfloor detailliertere Informationen über Veränderungen am System erhalten und über den Wissensaustausch besser verstehen können.

Je größer ein Unternehmen bzw. je größer die personelle oder auch örtliche Distanz zwischen dem Simulationsteam und den Wissensträgern ist, desto höher ist der Nutzen durch das System WMS4SimPar einzuschätzen.

Neben dem Nutzen aus Sicht der Simulationsexperten ist vor allem der Nutzen durch das qualitativ hochwertigere Simulationsergebnis der Simulationsanwender zu nennen. In der PPS bspw. führt ein genaueres Simulationsmodell zu genaueren Produktionsplänen, was im späteren Betrieb die Notwendigkeit von kurzfristigen Änderungen im Produktionsablauf reduziert und Kosten spart.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel folgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus werden in Abschnitt 9.2 die weiteren Potenziale für Forschungstätigkeiten im Kontext der wissensbasierten Simulationsmodellparametrisierung aufgezeigt.

9.1 Zusammenfassung

Die zunehmende Vernetzung und Digitalisierung führt zu einer steigenden Komplexität von Produktionssystemen. Für die beteiligten Personen erschwert dies die Durchführung von Planungs- und Optimierungsprozessen. Aus diesem Grund setzen Unternehmen vermehrt auf den Einsatz digitaler Methoden, wie beispielsweise einer EDS für die Abbildung des Materialflusses innerhalb eines Produktionssystems (GREASLEY & EDWARDS 2021, S. 1; GLATT et al. 2018; VDI 3633-1; BERGMANN 2014, S. 11).

Aus dem betriebsbegleitenden Einsatz einer Materialflusssimulation ergeben sich spezielle Anforderungen hinsichtlich der Aktualität und Genauigkeit des Simulationsmodells, um valide Simulationsexperimente durchführen zu können, deren Ergebnisse bspw. in der PPS Anwendung finden. Die Analyse der aktuellen Ansätze zur automatisierten Generierung oder Synchronisierung von Simulationsmodellen mit Hilfe vorhandener Daten aus der Produktion hat gezeigt, dass hohe Aufwände für die Datengewinnung und -verarbeitung erforderlich sind. Neben der zum Teil nicht vorhandenen Datenbasis für ein rein datenbasiertes Vorgehen bleibt das vorhandene Wissen der Mitarbeitenden gänzlich ungenutzt, obwohl viel Potenzial im vorhandenen Expertenwissen enthalten ist und eine geringe Datenbasis damit zielführend erweitert werden kann.

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Wissensmanagementsystem zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz schließt die Lücke zwischen den datenbasierten Ansätzen zur Parametrisierung von EDS-Modellen und den generischen Ansätzen von WMS in Unternehmen. Das Gesamtsystem mit dem

9 Zusammenfassung und Ausblick

Akronym WMS4SimPar unterstützt den gesamten Prozess, angefangen mit der Erfassung von Abweichungen über die Externalisierung von Wissen bis zur Parametrisierung des Simulationsmodells. Das System besteht dabei aus insgesamt vier Lösungsbausteinen.

Der erste Lösungsbaustein dient der Spezifizierung des Anwendungsfalls, um den Betrachtungsrahmen einzuschränken und zu definieren. Mit Hilfe der vorgestellten Fragetechniken soll vorab untersucht werden, ob ein Einsatz von WMS4SimPar im vorliegenden Fall zielführend ist.

Der zweite Lösungsbaustein betrachtet die datenbasierte Abweichungsidentifikation. Mittels einer Fokussierung auf in der Simulation abgebildete Prozesse am realen Produktionssystem ergibt sich das Teilsystem zur Abweichungsidentifikation, welches anhand eines Vergleichs der Echtzeitdaten aus der Produktion mit dem aktuellen Verhalten des Simulationsmodells entsprechende Abweichungen in den überwachten Prozessen identifiziert. Bei einer Überschreitung vorgegebener Grenzwerte erfolgt im Nachgang die Wissensgenerierung.

Der dritte Lösungsbaustein zeigt auf, wie das WMS in WMS4SimPar aufgebaut sein muss. Dabei wurde im Rahmen der Arbeit die wiederverwendbare SMAPSS-Ontologie entwickelt, die auf weitere Anwendungsfälle übertragbar ist und mit geringem Zeitaufwand instanziiert werden kann. Zur Unterstützung der Identifikation relevanter Wissensträger wurden Personalisierungsdienste entwickelt, die die Aufwände für die Zuordnung von vorhandenen Abweichungen zu potenziellen Wissensträgern reduzieren. Der eigentliche Prozess der Wissensgenerierung und -verarbeitung ist anhand eines eigens entwickelten Ablaufes in das System integriert. Der Prozess strukturiert den gesamten Ablauf von der Identifikation einer Abweichung bis hin zur Anpassung der Simulationsmodellparameter.

Die eigentliche Anpassung der Simulationsmodellparameter findet im vierten Lösungsbaustein statt. Anhand der identifizierten und in der WDB gespeicherten Zusammenhänge zwischen Messparametern und einstellbaren Simulationsparametern werden die Simulationsexperten bei der Anpassung des Simulationsmodells unterstützt.

Mit WMS4SimPar können Unternehmen erstmals sicherstellen, dass die Parametrisierung eines betriebsbegleitenden Simulationsmodells datentechnisch und wissensbasiert erfolgt. Die Nachteile der rein datentechnischen Synchronisierung, bei der mehr Aufwände für die Datenbeschaffung und -aufbereitung notwendig sind, werden durch die

Integration eines WMS in WMS4SimPar behoben. Darüber hinaus ist die Anbindung von WMS4SimPar an ein unternehmensweites WMS anhand der Ontologie möglich. Dadurch wächst die verfügbare Wissensbasis des Unternehmens und weitere Unternehmensbereiche können das Wissen nutzen.

Die Anwendung des Systems an einem Demonstrator und einer partiellen Umsetzung an einem industriellen Anwendungsfall haben gezeigt, dass der Einsatz von WMS4SimPar die an das System gestellten Anforderungen erfüllt und eine Investition in Abhängigkeit vom Anwendungsfall auch wirtschaftlich vorteilhaft ist.

9.2 Ausblick

An die Ergebnisse dieser Arbeit anknüpfend, ergeben sich Potenziale für weitere Forschungstätigkeiten, die zu einer weiteren Optimierung der drei Leistungsziele *Kosten*, *Qualität* und *Zeit* der Produktion (WESTKÄMPER 2006, S. 69) führen können.

In der vorliegenden Umsetzung des Systems WMS4SimPar wird das externalisierte Wissen bezüglich der aufgetretenen Abweichungen einmal für die Anpassung des Simulationsmodells verwendet. Durch die Speicherung in der WDB steht das Wissen jedoch auch weiteren Bereichen des Unternehmens zur Verfügung und kann weiter genutzt werden. Beispielsweise kann die Instandhaltung bei vermehrt auftretenden Abweichungen ihre Instandhaltungsmaßnahmen anpassen, um zukünftig Abweichungen zwischen Produktion und Simulation zu reduzieren.

Das gesammelte Wissen führt zu einem verbesserten und umfangreich dokumentierten Prozessverständnis. Dieses Wissen kann im weiteren Verlauf für die Einarbeitung von neuen Mitarbeitenden genutzt werden. In einer weiterführenden Arbeit wäre die Integration der WDB sowohl in ein Schulungsszenario also auch als aufbereitetes Wiki für ein Eigenstudium möglich.

Über ein weiteres Modul im System WMS4SimPar kann zudem eine Nachverfolgung des externalisierten Wissens und ein Abgleich der Prognosen mit den in Zukunft eintreffenden Ereignissen erfolgen. Über ein Feedback an die Wissensträger könnte der Lerneffekt bei den Wissensträgern gefördert werden, der langfristig zu besseren Prognosen und einem gestiegenen Expertenwissen führt.

Neben der direkten Nutzung des Wissens aus WMS4SimPar lässt sich die WDB aufgrund der Wiederverwendung der BFO, CCO und Manufacturing Ontology mit weiteren

9 Zusammenfassung und Ausblick

Ontologien koppeln, die auf den selben Top- und Mid-Level-Ontologien aufbauen. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten zur Wissensverarbeitung und Identifikation von bisher unbekanntem Wissen.

Überzeugt von der durch diese Arbeit entstandenen Basis zur wissensbasierten Parametrisierung von EDS, bietet sich weiteres Potenzial zur Erweiterung des Systems. Bspw. führt eine Erweiterung um die Thematik der Mitarbeitermotivation bei der Nutzung des Systems WMS4SimPar zur Absicherung eines langfristigen Betriebs und zur Akzeptanz im Unternehmen.

Literaturverzeichnis

AGGARWAL 2016

Aggarwal, C. C.: *Recommender systems. The textbook.* eng. Cham u. a.: Springer. 2016. 498 S. ISBN: 978-3-319-29657-9. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6310810>.

AMELINGMEYER 2004

Amelingmeyer, J.: *Wissensmanagement. Analyse und Gestaltung der Wissensbasis von Unternehmen.* ger. Auflage. Strategisches Kompetenz-Management. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 2004. ISBN: 9783824480777. DOI: 10.1007/978-3-322-81730-3.

ARP et al. 2015

Arp, R.; B. Smith; A. D. Spear: *Building Ontologies with Basic Formal Ontology.* The MIT Press. 2015. ISBN: 9780262329583. DOI: 10.7551/mitpress/9780262527811.001.0001.

ASHTARI TALKHESTANI 2020

Ashtari Talkhestani, B.: *Methodik zur Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings automatisierter Systeme.* Bd. 2020, Band 1. IAS-Forschungsberichte. Düren: Shaker Verlag GmbH. 2020. 128 S. ISBN: 978-3-8440-7572-4. DOI: 10.2370/9783844075724.

ASHTARI TALKHESTANI & WEYRICH 2017

Ashtari Talkhestani, B.; M. Weyrich: Synchronisierung von digitalen Modellen mit realen Fertigungszellen auf Basis einer Ankerpunktmethod am Beispiel der Automobilindustrie. *AUTOMATION 2017 Technology networks Processes* (2017).

ASHTARI TALKHESTANI et al. 2018a

Ashtari Talkhestani, B.; N. Jazdi; W. Schlögl; M. Weyrich: A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method.

Procedia CIRP 67 (2018), S. 13–17. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.168.

ASHTARI TALKHESTANI et al. 2018b

Ashtari Talkhestani, B.; N. Jazdi; W. Schloegl; M. Weyrich: Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 159–164. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.166.

ASIM 1997

ASIM: *Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik*. ger. Bd. 58. ASIM-Mitteilungen aus den Arbeitskreisen. S.l.: ASIM. 1997. 28 S.

BARTH et al. 2020

Barth, M.; K. Kübler; T. Heinzerling; R. Rosen; J. Jäkel: Eine systematische Bewertung der Qualität von Simulationsmodellen. Identifikation und Clustering von Qualitätskriterien. *atp magazin* 62 (2020) 6-7, S. 68–75. ISSN: 2190-4111. DOI: 10.17560/atp.v62i6-7.2487.

BARTH et al. 2021

Barth, M.; R. Rosen; K. Kübler; J. Jäkel; M. Ristić; T. Heinzerling; C. Scheifele: Eine systematische Bewertung der Qualität von Simulationsmodellen. Teil 2: Bewertungsmetrik und Validierung. *atp magazin* 63 (2021) 04, S. 56–63. ISSN: 2190-4111. DOI: 10.17560/atp.v63i04.2537.

C. BERGER et al. 2019

Berger, C.; J. Klöber-Koch; M. Schreiber; K. Vernickel; A. Zipfel: *OpenServ4P - Offene, intelligente Services für die Produktion. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt OpenServ4P*. ger. Augsburg: Fraunhofer-Institut für Gießerei- Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV. 2019. 117 S. DOI: 10.2314/KXP:1735955663.

D. BERGER 2018

Berger, D.: *Konzeptionierung eines automatisierten Input-Daten-Managements für ereignisdiskrete Simulationen*. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Masterarbeit. München: Technische Universität München. 2018.

BERGMANN et al. 2014

Bergmann, S.; S. Stelzer; S. Strassburger: On the use of artificial neural networks in

simulation-based manufacturing control. *Journal of Simulation* 8 (2014) 1, S. 76–90.
ISSN: 1747-7778. DOI: 10.1057/jos.2013.6.

BERGMANN 2014

Bergmann, S.: *Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen*. Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2013. ger. Ilmenau: Univ.-Verl. Ilmenau. 2014. 221 S. ISBN: 978-3-86360-084-6.

BERNERS-LEE & FISCHETTI 1999

Berners-Lee, T.; M. Fischetti: *Weaving the Web. The original design and ultimate destiny of the World Wide Web by its inventor*. eng. 1. ed. San Francisco, Calif.: HarperSanFrancisco. 1999. 226 S. ISBN: 0062515861. URL: <http://www.loc.gov/catdir/description/hc044/99027665.html>.

BERNERS-LEE et al. 2001

Berners-Lee, T.; J. Hendler; O. Lassila: The Semantic Web: A New Form of Web Content That is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities. A New Form of Web Content That is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities. *ScientificAmerican.com* (2001).

BERNHARD & WENZEL 2005

Bernhard, J.; S. Wenzel: Information Acquisition for Model Based Analysis of Large Logistics Networks. In: *Simulation in wider Europe. 19th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2005 ; Juni 1st - 4th, 2005, Riga, Latvia*. Hrsg. von Merkurjev, J. Riga. 2005, S. 37–42. ISBN: 1-84233-112-4.

BERNHARD et al. 2007

Bernhard, J.; K. Hömberg; D. Jodin; S. Kuhnt; C. Schürmann; S. Wenzel: Vorgehensmodell zur Informationsgewinnung – Prozessschritte und Methodennutzung -. DOI: 10.17877/DE290R-465.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.; A. Chakrabarti: *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London. 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4. DOI: 10.1007/978-1-84882-587-1.

BODENDORF 2006

Bodendorf, F.: *Daten- und Wissensmanagement*. ger. Zweite, aktualisierte und erwei-

terte Auflage. SpringerLink Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2006. 219 S. ISBN: 9783540286820. DOI: 10.1007/3-540-28682-9.

BOHÁCS et al. 2012

Bohács, G.; D. Gaspar; A. Rinkács: Adaptive simulation techniques for modeling material flow systems. In: *IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2012. 20 - 22 Sept. 2012, Subotica, Serbia*. 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY) (Subotica, Serbia). Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics & SISY. Piscataway, NJ: IEEE. 2012, S. 559–564. ISBN: 978-1-4673-4750-1. DOI: 10.1109/SISY.2012.6339480.

BOHÁCS & RINKÁCS 2016

Bohács, G.; A. Rinkács: Development of a novel material flow simulation model for the integration of spatial and process relevant information. en. DOI: 10.2195/1j_NotRev_bohacs_en_201604_01.

BOHÁCS & RINKÁCS 2017

Bohács, G.; A. Rinkács: Development of an ontology-driven, component based framework for the implementation of adaptiveness in a Jellyfish-type simulation model. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments* 9 (2017) 3, S. 361–374. ISSN: 18761364. DOI: 10.3233/AIS-170437.

BÖHL 2001

Böhl, J.: *Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2000. ger. Bd. Bd. 150. Forschungsberichte / IWB. München: Utz. 2001. 179 S. ISBN: 3831600201.

BOKRANTZ et al. 2015

Bokrantz, J.; A. Skoogh; J. Andersson; J. Ruda; D. Lamkull: A methodology for continuous quality assurance of production data. In: *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*. 2015 Winter Simulation Conference (WSC) (Huntington Beach, CA, USA). Hrsg. von Yilmaz, L. Winter Simulation Conference & WSC. Piscataway, NJ: IEEE. 2015, S. 2088–2099. ISBN: 978-1-4673-9743-8. DOI: 10.1109/WSC.2015.7408323.

BOKRANTZ et al. 2018

Bokrantz, J.; A. Skoogh; D. Lämkuill; A. Hanna; T. Perera: Data quality problems in discrete event simulation of manufacturing operations. *SIMULATION* 94 (2018) 11, S. 1009–1025. ISSN: 0037-5497. DOI: 10.1177/0037549717742954.

BORGO & LEITÃO 2004

Borgo, S.; P. Leitão: The Role of Foundational Ontologies in Manufacturing Domain Applications. In: *On the Move to Meaningful Internet Systems 2004: CoopIS, DOA, and ODBASE. OTM Confederated International Conferences, CoopIS, DOA, and ODBASE 2004, Agia Napa, Cyprus, October 25-29, 2004. Proceedings. Part I.* Hrsg. von Meersman, R.; Tari, Z. Bd. 3290. SpringerLink Bücher 3290. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2004, S. 670–688. ISBN: 978-3-540-23663-4. DOI: 10.1007/978-3-540-30468-5_43.

BRACHT et al. 2018

Bracht, U.; D. Geckler; S. Wenzel: *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele - Basis für Industrie 4.0.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2018. ISBN: 978-3-662-55782-2. DOI: 10.1007/978-3-662-55783-9.

BRANDMEIER 2020

Brandmeier, M.: Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion. ger. Dissertation. Erlangen: FAU University Press & FAU University Press ein Imprint der Universität Erlangen-Nürnberg. 2020.

BRANDMEIER et al. 2016

Brandmeier, M.; E. Bogner; M. Brossog; J. Franke: Product Design Improvement Through Knowledge Feedback of Cyber-physical Systems. *Procedia CIRP* 50 (2016), S. 186–191. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.026.

BRAUN et al. 2022

Braun, D.; T. Muller; N. Sahlab; N. Jazdi; W. Schlogl; M. Weyrich: A graph-based knowledge representation and pattern mining supporting the Digital Twin creation of existing manufacturing systems. In: *2022 27th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 6-9 Sept. 2022.* 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Stuttgart, Germany). IEEE Industrial Electronics Society & Institute of

Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE. 2022, S. 1–4. ISBN: 978-1-6654-9996-5. DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921707.

BRUNNER 2019

Brunner, L.: Synchronisierung der Materialflusssimulation des digitalen Zwillings mithilfe Methoden des maschinellen Lernens. iwb. Masterarbeit. München: Technische Universität München. 2019.

BURGER 2020

Burger, K.: Procedure Model for Agile Change Management to Iteratively Improve Existing Products Through the Development of MVPs Based on Digital Twins. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb). Masterarbeit. München: Technische Universität München. 2020.

CAO et al. 2019

Cao, Q.; C. Zanni-Merk; C. Reich: Ontologies for Manufacturing Process Modeling: A Survey. In: *Sustainable Design and Manufacturing 2018. Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM-18)*. Hrsg. von Dao, D.; Howlett, R. J.; Setchi, R.; Vlacic, L. Bd. 130. Smart Innovation, Systems and Technologies 130. Cham: Springer International Publishing. 2019, S. 61–70. ISBN: 978-3-030-04289-9. DOI: 10.1007/978-3-030-04290-5_7.

CASSANDRAS & LAFORTUNE 2010

Cassandras, C. G.; S. Lafortune: *Introduction to Discrete Event Systems*. eng. Second edition. New York, NY: Springer. 2010. 769 S. ISBN: 9780387686127.

CLAUS et al. 2015

Claus, T.; F. Herrmann; M. Manitz, Hrsg. (2015): *Produktionsplanung und -steuerung. Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen*. ger. Berlin: Springer Gabler. 2015. 273 S. ISBN: 978-3-662-43541-0.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschkralinen?* ger. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009. ISBN: 978-3-642-00632-6.

DENGEL 2012

Dengel, A.: *Semantische Technologien. Grundlagen - Konzepte - Anwendungen*. ger. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 2012. 460 S. ISBN: 9783827426642. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=3067327>.

DENKENA et al. 2017

Denkena, B.; S. Wilmsmeier; S. Hauck: Adaptive Simulationsmodelle. Integration von Maschinendaten in Materialflusssimulationen. *productivity* (2017), S. 37–39. (Besucht am 19. 10. 2018).

DIN EN ISO 9001:2015

Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. (2015): Qualitätsmanagementsysteme. DIN EN ISO. Version 2015-11. Berlin: Beuth, 1. Nov. 2015.

DITTLER et al. 2022

Dittler, D.; T. Müller; V. Stegmaier; N. Jazdi; M. Weyrich: Anwendungsoptimierte Modelladaption des Digitalen Zwillings eines modularen Produktionssystems während der Betriebsphase. In: *Automation 2022. 23. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik : automation creates sustainability : Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2022*. VDI-Berichte 2399. Düsseldorf: VDI Verlag. 2022, S. 545–560. ISBN: 9783181023990. DOI: 10.51202/9783181023990-545.

DOMSCHKE et al. 2015

Domschke, W.; A. Drexler; R. Klein; A. Scholl: *Einführung in Operations Research*. ger. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015. Berlin & Heidelberg: Springer Gabler. 2015. 276 S. ISBN: 9783662482162. DOI: 10.1007/978-3-662-48216-2.

EIGNER & STELZER 2009

Eigner, M.; R. Stelzer: *Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. ger. 2., neu bearb. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer. 2009. 434 S. ISBN: 9783540684015.

ERPENBECK et al. 2017

Erpenbeck, J.; L. Rosenstiel; S. Grote; W. Sauter: *Handbuch Kompetenzmessung. Erkennen, verstehen und bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädago-*

gischen und psychologischen Praxis. 3. Auflage 2017. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. 2017. 734 S. ISBN: 9783791035123. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:24-epflicht-1229116>.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Produktionstechnik und -verfahren. In: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Hrsg. von Kern, W. 2., völlig neu gestaltete Aufl. Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre Bd. 7. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. 1996, S. 1534–1544. ISBN: 379108044X.

K. FELDMANN & REINHART 2000

Feldmann, K.; G. Reinhart: *Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2000. ISBN: 978-3-662-42588-6. DOI: 10.1007/978-3-662-42587-9.

S. FELDMANN et al. 2016

Feldmann, S.; M. Wimmer; K. Kernschmidt; B. Vogel-Heuser: A comprehensive approach for managing inter-model inconsistencies in automated production systems engineering. In: *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. 21-25 Aug. 2016. 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (Fort Worth, TX, USA). IEEE International Conference on Automation Science and Engineering u. a. Piscataway, NJ: IEEE. 2016, S. 1120–1127. ISBN: 978-1-5090-2409-4. DOI: 10.1109/COASE.2016.7743530.

FERRER et al. 2015

Ferrer, B. R.; B. Ahmad; A. Lobov; D. A. Vera; J. L. Martinez Lastra; R. Harrison: An approach for knowledge-driven product, process and resource mappings for assembly automation. In: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (Gothenburg). IEEE. 2015, S. 1104–1109. ISBN: 978-1-4673-8183-3. DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294245.

FISCHBACH & PUTZKE 2019

Fischbach, K.; J. Putzke: Wissensarbeiter. In: *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik. Online-Lexikon*. Hrsg. von Gronau, N.; Becker, J.; Kliewer, N.; Leimeister, J. M.; Overhage, S. 11. Auflage. Berlin: GITO. 2019. URL: <http://>

www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/ (besucht am 13.04.2022).

FOCKE & STEINBECK 2018

Focke, M.; J. Steinbeck: *Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2018. ISBN: 978-3-658-21455-5. DOI: 10.1007/978-3-658-21456-2.

FUCHS 2008

Fuchs, F.: *Semantische Modellierung und Reasoning für Kontextinformationen in Infrastrukturnetzen*. ger. Zugl.: München, Univ., Diss., 2008. Göttingen: Cuvillier. 2008.

FURMANS et al. 2008

Furmans, K.; A. Kuhn; A. Scholl; S. Wenzel: Modellierung logistischer Systeme. In: *Handbuch Logistik*. Hrsg. von Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2008, S. 35–94. ISBN: 978-3-540-72928-0. DOI: 10.1007/978-3-540-72929-7_2.

GALASKE et al. 2015

Galaske, N.; D. Strang; R. Anderl: Process Deviations in Cyber-Physical Production Systems. In: *World Congress on Engineering and Computer Science. WCECS 2015 : San Francisco, USA, 21-23 October, 2015*. Hrsg. von Ao, S. I.; Douglas, C. C.; Grundfest, W. S.; Burgstone, J. M. Lecture notes in engineering and computer science. Hong Kong: IAENG International Association of Engineers. 2015, S. 1035–1040.

GASEVIC et al. 2006

Gasevic, D.; D. Djuric; V. Devedzic: *Model Driven Architecture and Ontology Development*. Springer Berlin Heidelberg. 2006. ISBN: 978-3-540-32180-4. DOI: 10.1007/3-540-32182-9.

GEIGER 2015

Geiger, F.: *System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten*. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebs-

wissenschaften. ger. Dissertation. München: Technische Universität München & Herbert Utz Verlag GmbH. 2015.

GERMAN PROPERTY PARTNERS 2022

German Property Partners: Mietpreis für Industrie- und Logistikflächen in München von 2016 bis 2021. Hrsg. von Statista. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/536672/umfrage/mietpreis-fuer-lager-und-logistikflaechen-in-muenchen/> (besucht am 10. 11. 2022).

GLATT et al. 2018

Glatt, M.; G. Kasakow; J. C. Aurich: Combining physical simulation and discrete-event material flow simulation. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 420–425. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.054.

GLATZ 2022

Glatz, S.: Automatische Generierung von adaptiven Referenzmodellen zur Simulation von Produktionssystemen. In: *Industrie 4.0 bei Hidden Champions*. Hrsg. von Breyer-Mayländer, T. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2022, S. 95–119. ISBN: 978-3-658-36200-3. DOI: 10.1007/978-3-658-36201-0_5.

GOOCH 2018

Gooch, J.: *5 Engineering Technologies to Focus on in the Next 5 Years*. Digital Engineering. URL: <https://www.digitalengineering247.com/article/forward-thinking/> (besucht am 25. 06. 2021).

GÖTZE 2014

Götze, U.: *Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2014. ISBN: 978-3-642-54621-1. DOI: 10.1007/978-3-642-54622-8.

GREASLEY & EDWARDS 2021

Greasley, A.; J. S. Edwards: Enhancing discrete-event simulation with big data analytics: A review. *Journal of the Operational Research Society* 72 (2021) 2, S. 247–267. ISSN: 0160-5682. DOI: 10.1080/01605682.2019.1678406.

T. R. GRUBER 1993

Gruber, T. R.: A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge*

Acquisition 5 (1993) 2, S. 199–220. ISSN: 10428143. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.

T. GRUBER 2016

Gruber, T.: Ontology. In: *Encyclopedia of Database Systems*. Hrsg. von Liu, L.; Özsu, M. T. New York, NY: Springer New York. 2016, S. 1–3. ISBN: 978-1-4899-7993-3. DOI: 10.1007/978-1-4899-7993-3_1318-2. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7993-3_1318-2.

GUARINO 1998

Guarino, N.: Formal Ontologies and Information Systems. In: *Formal ontology in information systems. Proceedings of the first international conference (FOIS '98), June 6 - 8, Trento, Italy*. Hrsg. von Guarino, N. Frontiers in artificial intelligence and applications 46. Amsterdam: IOS-Press. 1998, S. 3–15. ISBN: 9051993994.

GUTENBERG 1971

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 1971. ISBN: 978-3-642-61990-8. DOI: 10.1007/978-3-642-61989-2.

GUTENSCHWAGER et al. 2017

Gutenschwager, K.; M. Rabe; S. Spieckermann; S. Wenzel: *Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2017. ISBN: 978-3-662-55744-0. DOI: 10.1007/978-3-662-55745-7.

HAARMANN 2014

Haarmann, B.: *Ontology On Demand. Vollautomatische Ontologierstellung aus deutschen Texten mithilfe moderner Textmining-Prozesse*. Zugl.: Bochum, Univ., Fak. für Philologie, ger. Berlin: epubli. 2014. 335 S. ISBN: 3844296840.

HAHN et al. 2004

Hahn, A.; S. Abels; L. Haak, Hrsg. (2004): *Web Intelligence. Veröffentlichungen zum Seminar*. ger. 2004. 220 S. ISBN: 3814209478. URL: <http://docserver.bis.uni-oldenburg.de/publikationen/bisverlag/2005/hahweb04/hahweb04.html>.

HÄRLE et al. 2021

Härle, C.; M. Barth; A. Fay: Betriebsparallele Adaption einer Co-Simulation für

diskrete Fertigungsanlagen. In: *Automation 2021*. VDI Verlag. 2021, S. 517–534. ISBN: 9783181023921. DOI: 10.51202/9783181023921-517.

HEISIG 2009

Heisig, P.: *GPO-WM®-Analyseleitfaden. Nutzen Sie Ihr Wissen effektiver!* ger. 1. Aufl. Buchholz in der Nordheide: EuReKi. 2009. 28 S. ISBN: 978-3000241284.

HEISIG & ORT 2005

Heisig, P.; R. Ort: *Wissensmanagement Frameworks aus Forschung und Praxis. Eine inhaltliche Analyse*. ger. Berlin: EuReKi. 2005. 124 S. ISBN: 3-00-015865-0.

HELBIG 2008

Helbig, H.: *Wissensverarbeitung und die Semantik der Natürlichen Sprache. Wissensrepräsentation mit MultiNet*. ger. 2. überarbeitete Auflage. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. ISBN: 9783540762768. DOI: 10.1007/978-3-540-76278-2.

HITZLER et al. 2008

Hitzler, P.; M. Krötzsch; S. Rudolph; Y. Sure-Vetter: *Semantic Web. Grundlagen*. ger. SpringerLink Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2008. 277 S. ISBN: 978-3-540-33993-9. DOI: 10.1007/978-3-540-33994-6.

HOELLTHALER et al. 2019

Hoellthaler, G.; M. Schreiber; K. Vernickel; J. b. Isa; J. Fischer; N. Weinert; R. Rosen; S. Braunreuther: Reconfiguration of production systems using optimization and material flow simulation. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 133–138. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.024.

HOMPEL et al. 2018

Hompel, M. ten; T. Schmidt; J. Dregger: *Materialflusssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2018. ISBN: 978-3-662-56180-5. DOI: 10.1007/978-3-662-56181-2.

HOTZ 2007

Hotz, I.: *Simulationsbasierte Frühwarnsysteme zur Unterstützung der operativen Produktionssteuerung und -planung in der Automobilindustrie*. ger. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität. 2007. URL: 10.25673/4826.

ISO/IEC 25010

IEC Internationale Elektrotechnische Kommission, Hrsg. (2011): Software-Engineering. ISO/IEC. Genova: ISO copyright office, 1. März 2011.

ISO/IEC 21838-2

ISO/IEC 21838-2:2021, Hrsg. (2021): Information technology — Top-level ontologies (TLO). ISO/IEC. Version 2021. Vernier: ISO copyright office.

ISO/IEC 25010

ISO/IEC 25010, Hrsg. (2011): Systems and software engineering. ISO/IEC.

JOSHI et al. 2015

Joshi, A.; S. Kale; S. Chandel; D. Pal: Likert Scale: Explored and Explained. *British Journal of Applied Science & Technology* 7 (2015) 4, S. 396–403. DOI: 10.9734/BJAST/2015/14975.

JURASKY et al. 2021

Jurasky, W.; P. Moder; M. Milde; H. Ehm; G. Reinhart: Transformation of semantic knowledge into simulation-based decision support. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 71 (2021), S. 102174. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102174.

KAIN et al. 2010

Kain, S.; F. Schiller; T. Trenner: Überwachung und Diagnose mit betriebsparallelen Simulationsmethoden. In: *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel; Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010*. Hrsg. von Zülch, G.; Stock, P. ASIM-Mitteilung AM 131. Karlsruhe: KIT Scientific Publ. 2010. ISBN: 9783866445581.

KAMISKE & BRAUER 2011

Kamiske, G. F.; J.-P. Brauer: *Qualitätsmanagement von A bis Z. Wichtige Begriffe des Qualitätsmanagements und ihre Bedeutung*. ger. 7., aktualisierte und erw. Aufl. München & Wien: Hanser. 2011. 402 S. ISBN: 978-3-446-42812-6.

KARRAY et al. 2019

Karray, M. H.; F. Ameri; M. Hodkiewicz; T. Louge: ROMAIN: Towards a BFO compliant reference ontology for industrial maintenance. *Applied Ontology* 14 (2019) 2, S. 155–177. ISSN: 15705838. DOI: 10.3233/AO-190208.

KATTNER et al. 2019

Kattner, N.; H. Bauer; M. R. Basirati; M. Zou; F. Brandl; B. Vogel-Heuser; M. Böhm; H. Kremer; G. Reinhart; U. Lindemann: Inconsistency Management in Heterogeneous Models - An Approach for the Identification of Model Dependencies and Potential Inconsistencies. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1* (2019) 1, S. 3661–3670. DOI: 10.1017/dsi.2019.373.

KELLER 2018

Keller, F. K.: Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung. ger. Dissertation. München: Techn. Univ & Herbert Utz Verlag GmbH. 2018.

KIFER & BOLEY 2013

Kifer, M.; H. Boley: *RIF Overview (Second Edition)*. URL: <https://www.w3.org/TR/rif-overview/> (besucht am 11.04.2022).

P. KLEIN et al. 2019

Klein, P.; L. Malburg; R. Bergmann: FTOnto: A Domain Ontology for a Fischer-technik Simulation Production Factory by Reusing Existing Ontologies. In: 2019.

R. KLEIN & SCHOLL 2012

Klein, R.; A. Scholl: *Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. ger. 2. Aufl. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Franz Vahlen. 2012. 557 S. ISBN: 1306941709. URL: <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=625421>.

KLETTI & SCHUMACHER 2014

Kletti, J.; J. Schumacher: *Die perfekte Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2014. ISBN: 978-3-662-45440-4. DOI: 10.1007/978-3-662-45441-1.

KNOLL et al. 2019

Knoll, D.; J. Waldmann; G. Reinhart: Developing an internal logistics ontology for process mining. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 427–432. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.116.

KOHL 2016

Kohl, J.: Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik. ger. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. 2016. 190 S. (Besucht am 14.01.2019).

KORNAS 2021

Kornas, T.: *Qualitätssicherungssystem für die Anlaufphase und den Serienbetrieb einer Batteriezellenproduktion*. ger. 1. Auflage. Schriftenreihe des IWF. Essen: Vulkan-Verlag. 2021. 199 Seiten. ISBN: 3802783638.

KRÖNING 2014

Kröning, S.: Integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung mittels Simulationstechnik. Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover. 2014.

KUBE et al. 2017

Kube, M.; M. Schimmel; J.-M. Rhiemeier; A. Barckhausen; J. Fehr; S. Büttner; M. Unger; F. Bottner; A. Piegsa: Marktverfügbare Innovationen mit hoher Relevanz für die Energieeffizienz in der Industrie. Hrsg. von BMWi. Berlin. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/marktverfuegbare-innovationen-mit-hoher-relevanz-fuer-energieeffizienz-in-der-industrie.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D14 (besucht am 10.11.2022).

KURBEL 2016

Kurbel, K.: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. Von MRP bis Industrie 4.0*. 8., vollst. überarb. und erw. Auflage. De Gruyter Studium. Berlin & Boston: De Gruyter Oldenbourg. 2016. ISBN: 3110433346. URL: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1243253>.

LAMY 2022

Lamy, J.-B.: *Welcome to Owlready2's documentation! Owlready2 0.36 documentation*. URL: <https://owlready2.readthedocs.io/en/v0.37/> (besucht am 10.06.2022).

LANDGRAF 2021

Landgraf, T.: Identifikation von Abweichungen zwischen digitalen Artefakten und deren Realität. iwb. Semesterarbeit. München: Technische Universität München. 2021.

LAW 2015

Law, A. M.: *Simulation modeling and analysis*. eng. 5. ed. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. New York, NY: McGraw-Hill Education. 2015. XVIII, 776, [2] S. ISBN: 0073401323.

LEITÃO 2004

Leitão, P.: An agile and adaptive holonic architecture for manufacturing control. Faculty of Engineering. Dissertation. University of Porto: Porto. 2004. URL: <https://search.proquest.com/openview/8220132d01d017f82b5b7f72c37f52a3/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>.

LEITÃO & RESTIVO 2006

Leitão, P.; F. Restivo: ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry* 57 (2006) 2, S. 121–130. ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2005.05.005.

LEMAIGNAN et al. 2006

Lemaignan, S.; A. Siadat; J.-Y. Dantan; A. Semenenko: MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain. In: *IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and its Applications. DIS 2006 ; 15 - 16 June 2006, Prague, Czech Republic*. IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06) (Prague, Czech Republic, 2006). Hrsg. von Marik, V. Institute of Electrical and Electronics Engineers & IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society. Piscataway, NJ: IEEE. 2006, S. 195–200. ISBN: 0-7695-2589-X. DOI: 10.1109/DIS.2006.48.

LIU 2020

Liu, S.: Modelling of a Digital Twin using Knowledge-based Techniques for a Change-intensive Component Development in the Electro-mobility Sector. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Master's Thesis. München: Technische Universität München. 2020.

MAIER 2007

Maier, R.: *Knowledge Management Systems. Information and Communication Technologies for Knowledge Management*. eng. 3. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. 720 S. ISBN: 978-3-540-71408-8. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1575237>.

MAROOF 2021

Maroof, W.: Wissensmanagementsystem zur Anpassung von digitalen Artefakten und digitalen Zwillingen. iwb. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München. 2021.

MASCARDI et al. 2007

Mascardi, V.; V. Cordi; P. Rosso: A Comparison of Upper Ontologies. In: *WOA*. 2007.

MAY et al. 2022

May, M. C.; L. Kiefer; A. Kuhnle; G. Lanza: Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (2022) 3, S. 1608. DOI: 10.3390/app12031608.

MEIER et al. 2021

Meier, A.; S. Carroccio; R. Dornberger; T. Hanne: Discussing the Reality Gap by Comparing Physics Engines in Kilobot Simulations. *Journal of Robotics and Control (JRC)* 2 (2021) 5. ISSN: 27155056. DOI: 10.18196/jrc.25120.

MEYER et al. 2013

Meyer, G.; K. Knüppel; J. Busch; M. Jakob; P. Nyhuis: Effizientes Störgrößenmanagement. Ansatz zur Kategorisierung von Störgrößen in der Produktion. *PRODUCTIVITY Management* 18 (2013) 5, S. 49–52. ISSN: 1868-8519. URL: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/tema%3ATEMA20131200087>.

MICHL 2013

Michl, M.: *Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose*. Dissertation. ger. Bd. 242. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bamberg: Meisenbach. 2013. 182 S. ISBN: 9783875253566.

MIDDLETON et al. 2004

Middleton, S. E.; D. de Roure; N. R. Shadbolt: Ontology-based Recommender

Systems. In: *Handbook on Ontologies*. Hrsg. von Staab, S.; Studer, R. Bd. 6. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 477–498. ISBN: 978-3-662-11957-0. DOI: 10.1007/978-3-540-24750-0_24.

MILDE & REINHART 2019

Milde, M.; G. Reinhart: Automated Model Development and Parametrization of Material Flow Simulations. In: *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*. 2019 Winter Simulation Conference (WSC) (National Harbor, MD, USA, 2019). Hrsg. von Mustafee, N. Piscataway, NJ: IEEE, 2019, S. 2166–2177. ISBN: 978-1-7281-3283-9. DOI: 10.1109/WSC40007.2019.9004702.

MILDE & REINHART 2022

Milde, M.; G. Reinhart: Automated Model Development for the Simulation of Global Production Networks. In: *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*. Hrsg. von Andersen, A.-L.; Andersen, R.; Brunoe, T. D.; Larsen, M. S. S.; Nielsen, K.; Napoleone, A.; Kjeldgaard, S. 1st. Springer eBook Collection. Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 467–474. ISBN: 978-3-030-90699-3. DOI: 10.1007/978-3-030-90700-6_53.

MOHD ALI et al. 2021

Mohd Ali, M.; R. Yang; B. Zhang; F. Furini; R. Rai; J. N. Otte; B. Smith: Enriching the functionally graded materials (FGM) ontology for digital manufacturing. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 18, S. 5540–5557. ISSN: 0020-7543. DOI: 10.1080/00207543.2020.1787534.

MUSEN 2015

Musen, M. A.: The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward. eng. *AI matters* 1 (2015) 4, S. 4–12. ISSN: 2372-3483. DOI: 10.1145/2757001.2757003. eprint: 27239556.

NAGY et al. 2021

Nagy, L.; T. Ruppert; J. Abonyi: Ontology-Based Analysis of Manufacturing Processes: Lessons Learned from the Case Study of Wire Harness Production. *Complexity* 2021 (2021), S. 1–21. ISSN: 1076-2787. DOI: 10.1155/2021/8603515.

NAKAJIMA 1988

Nakajima, S.: *Introduction to TPM. Total Productive Maintenance*. 5.print. Cambridge, Mass. [u.a.]: Productivity Pr. 1988. XX, 129 S. ISBN: 9780915299232.

NEGAHBAN & SMITH 2014

Negahban, A.; J. S. Smith: Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 33 (2014) 2, S. 241–261. ISSN: 02786125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.12.007.

NONAKA 1994

Nonaka, I.: A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation. *Organization Science* (1994) Vol. 5, S. 14–37.

NONAKA & TAKEUCHI 2012

Nonaka, I.; H. Takeuchi: *Die Organisation des Wissens. Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*. 2. um ein Vorwort erw. Aufl. Frankfurt am Main: Campus. 2012. 320 S. ISBN: 9783593396316. URL: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783593416625.

NORTH 2016

North, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2016. 336 S. ISBN: 978-3-658-11642-2. DOI: 10.1007/978-3-658-11643-9.

NOY & MCGUINNESS 2001

Noy, N. F.; D. L. Mcguinness: *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford Knowledge Systems Laboratory. Stanford (USA): Stanford University. 2001.

NYHUIS 2008

Nyhuis, P.: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2008. ISBN: 978-3-540-75641-5. DOI: 10.1007/978-3-540-75642-2.

NYHUIS 2009

Nyhuis, P.: *Fundamentals of production logistics. Theory, tools and applications*.

eng. Softcover re-print of the hardcover 1st edition 2009. Berlin & Heidelberg: Springer. 2009. 312 S. ISBN: 3642424120.

OCKER et al. 2019a

Ocker, F.; C. J. J. Paredis; B. Vogel-Heuser: Applying knowledge bases to make factories smarter. *at - Automatisierungstechnik* 67 (2019) 6, S. 504–517. ISSN: 0178-2312. DOI: 10.1515/auto-2018-0138.

OCKER et al. 2019b

Ocker, F.; B. Vogel-Heuser; C. J. J. Paredis: Applying Semantic Web Technologies to Provide Feasibility Feedback in Early Design Phases. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 19 (2019) 4, S. 041016. ISSN: 0177-0667. DOI: 10.1115/1.4043795.

OCKER et al. 2022

Ocker, F.; B. Vogel-Heuser; C. J. Paredis: A framework for merging ontologies in the context of smart factories. *Computers in Industry* 135 (2022), S. 103571. ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103571.

OLIVARES-ALARCOS et al. 2022

Olivares-Alarcos, A.; S. Foix; S. Borgo; G. Alenyà: OCRA – An ontology for collaborative robotics and adaptation. *Computers in Industry* 138 (2022) 5, S. 103627. ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103627.

OTTE et al. 2019

Otte, J. N.; D. Kiritsi; M. M. Ali; R. Yang; B. Zhang; R. Rudnicki; R. Rai; B. Smith: An ontological approach to representing the product life cycle. *Applied Ontology* 14 (2019) 2, S. 179–197. ISSN: 15705838. DOI: 10.3233/AO-190210.

OWL WORKING GROUP 2004

OWL Working Group: *OWL - Semantic Web Standards*. URL: <https://www.w3.org/OWL/> (besucht am 11.04.2022).

PAUSE 2017

Pause, J.: Bewertung der Wissensqualität von Kostenelementen für Kalkulationen am Beispiel der Automobilproduktion. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb). ger. Dissertation. München: Technische Universität München & Herbert Utz Verlag GmbH. 2017.

PAUTZKE 1989

Pautzke, G.: *Die Evolution der organisatorischen Wissensbasis. Bausteine zu einer Theorie des organisatorischen Lernens.* ger. Bd. 58. Münchener Schriften zur angewandten Führungslehre. München: Kirsch. 1989. 299 S. ISBN: 9783882320589.

PRINZ 2018

Prinz, C.: Wissensmanagementmethodik zur Organisation von Prozesswissen in der Produktion. ger. Dissertation. Shaker Verlag GmbH. 2018.

PROBST et al. 2012

Probst, G.; S. Raub; K. Romhardt: *Wissen managen.* Wiesbaden: Gabler Verlag. 2012. ISBN: 978-3-8349-4562-4. DOI: 10.1007/978-3-8349-4563-1.

RABE et al. 2008

Rabe, M.; S. Spiekermann; S. Wenzel: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken.* ger. VDI-Buch. Berlin & Heidelberg: Springer. 2008. ISBN: 978-3-540-35281-5.

REDELINGHUYS et al. 2019

Redelinghuys, A.; A. Basson; K. Kruger: A Six-Layer Digital Twin Architecture for a Manufacturing Cell. In: *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing.* Hrsg. von Borangiu, T.; Trentesaux, D.; Thomas, A.; Cavalieri, S. Bd. 803. Studies in computational intelligence. Cham: Springer International Publishing. 2019, S. 412–423. ISBN: 978-3-030-03002-5. DOI: 10.1007/978-3-030-03003-2_32.

REINHARDT 2004

Reinhardt, R.: *Wissenskommunikation in Organisationen. Methoden - Instrumente - Theorien.* Unter Mitarb. von Eppler, M. J. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg. 2004. 433 S. ISBN: 9783642171307. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6302811>.

REINHART 2017

Reinhart, G.: *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik.* München: Hanser. 2017. 1774 S. ISBN: 9783446446427. DOI: 10.3139/9783446449893.

REMUS 2002

Remus, U.: Prozeßorientiertes Wissensmanagement. Konzepte und Modellierung. Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät. Dissertation. Regensburg: Universität Regensburg, 2002.

RICHARDSON 2007

Richardson, L.: *RESTful web services*. eng. Unter Mitarb. von Ruby, S. Sebastopol, Calif. & Boston, Mass.: O'Reilly & Safari Books Online. 2007. ISBN: 9780596529260. URL: <https://learning.oreilly.com/library/view/-/9780596529260/?ar>.

RICHTER 2018

Richter, C.: Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau. ger. Dissertation. München: Technische Universität München. 2018. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:91-diss-20181023-1432662-1-4>.

ROSEN et al. 2020

Rosen, R.; J. Jäkel; M. Barth; O. Stern; R. Schmidt; T. Heinzerling; P. Hoffmann; C. Richter; P. Puntel Schmidt; C. Scheifele; Kübler Karl; M. Röhler: Simulation und digitaler Zwilling im Anlagenlebenszyklus. VDI-Statusreport 2020. Hrsg. von VDI Verein Deutscher Ingenieure. URL: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/simulation-und-digitaler-zwilling-im-anlagenlebenszyklus>.

RUPP & QUEINS 2012

Rupp, C.; S. Queins: *UML 2 glasklar. Praxiswissen für die UML-Modellierung*. ger. 4., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser. 2012. 560 S. ISBN: 9783446430570.

SANFILIPPO et al. 2019

Sanfilippo, E. M.; Y. Kitamura; R. I. Young: Formal ontologies in manufacturing. *Applied Ontology* 14 (2019) 2, S. 119–125. ISSN: 15705838. DOI: 10.3233/AO-190209.

SCHREIBER et al. 2019

Schreiber, M.; K. Vernickel; C. Richter; G. Reinhart: Integrated production and

maintenance planning in cyber-physical production systems. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 534–539. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.095.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; V. Stich: *Produktionsplanung und -steuerung I*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-642-25422-2. DOI: 10.1007/978-3-642-25423-9.

SELKE 2005

Selke, C.: Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb). ger. Dissertation. München: Technische Universität München & Herbert Utz Verlag GmbH, 2005. 137 S.

SEMY et al. 2004

Semy, S. K.; L. J. Obrst; M. K. Pulvermacher: Toward the Use of an Upper Ontology for U.S. Government and U.S. Military Domains: An Evaluation. (2004).

SIEPMANN 2016

Siepmann, D.: Industrie 4.0 – Technologische Komponenten. In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. Hrsg. von Roth, A. Berlin & Heidelberg: Springer Gabler, 2016, S. 47–72. ISBN: 9783662485040.

SILVER et al. 2011

Silver, G. A.; J. A. Miller; M. Hybinette; G. Baramidze; W. S. York: DeMO: An Ontology for Discrete-event Modeling and Simulation. eng. *SIMULATION* 87 (2011) 9, S. 747–773. ISSN: 0037-5497. DOI: 10.1177/0037549710386843. eprint: 22919114.

SINGH 2022

Singh, M.: Synchronizing the Shopfloor and Its Simulation Models in Automated Production System. An Ontology-Based Recommender System. Masterarbeit. Koblenz: Universität Koblenz Landau, 2022.

SKOOGH et al. 2012

Skoogh, A.; B. Johansson; J. Stahre: Automated input data management: eva-

luation of a concept for reduced time consumption in discrete event simulation. *SIMULATION* 88 (2012) 11, S. 1279–1293. ISSN: 0037-5497. DOI: 10.1177/0037549712443404.

SMITH 2003

Smith, J. S.: Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of Manufacturing Systems* 22 (2003) 2, S. 157–171. ISSN: 02786125. DOI: 10.1016/S0278-6125(03)90013-6.

SOCHOR et al. 2020

Sochor, R.; T. S. Schick; L. Merkel; S. Braunreuther; G. Reinhart: Current Knowledge Management in Manual Assembly – Further Development by the Analytical Hierarchy Process, Incentive and Cognitive Assistance Systems. DOI: 10.15488/9662.

SOCHOR et al. 2021a

Sochor, R.; F. Greiter; M. König; J. Berger; J. Schilp: Auswahl und Weiterentwicklung von Anreizsystemen/Selection and further development of incentive systems - Current research into incentive systems in industry and digital advancement of manual assembly considering employment law. *wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 03, S. 142–146. ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2021-03-50.

SOCHOR et al. 2021b

Sochor, R.; J. Schenk; K. Fink; J. Berger: Gamification in industrial shopfloor – development of a method for classification and selection of suitable game elements in diverse production and logistics environments. *Procedia CIRP* 100 (2021), S. 157–162. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.024.

SONNTAG 1996

Sonntag, K.: *Lernen im Unternehmen. Effiziente Organisation durch Lernkultur*. dt. Bd. 7. Innovatives Personalmanagement. München: Beck. 1996. 223 S. ISBN: 978 3 406 40105 3.

SORENSEN et al. 2018

Sorensen, D. G.; T. D. Brunoe; K. Nielsen: A classification scheme for production system processes. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 609–614. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.021.

SOUTH et al. 2022

South, L.; D. Saffo; O. Vitek; C. Dunne; M. A. Borkin: Effective Use of Likert Scales in Visualization Evaluations: A Systematic Review. *Computer Graphics Forum* 41 (2022) 3, S. 43–55. ISSN: 0167-7055. DOI: 10.1111/cgf.14521.

STANFORD CENTER FOR BIOMEDICAL INFORMATICS RESEARCH 2022

Stanford Center for Biomedical Informatics Research, Hrsg. (2022): *Protégé Website*. URL: <https://protege.stanford.edu/> (besucht am 11.04.2022).

W. G. STOCK & M. STOCK 2008

Stock, W. G.; M. Stock: *Wissensrepräsentation*. OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG. 2008. ISBN: 978-3-486-58439-4. DOI: 10.1524/9783486844900.

STOLIPIN & WENZEL 2019

Stolipin, J.; S. Wenzel: *Ontologiebasierte Methodik zur Unterstützung der Nachnutzung von Simulationswissen*. (2019).

STUCKENSCHMIDT 2009

Stuckenschmidt, H.: *Ontologien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009. ISBN: 978-3-540-79330-4. DOI: 10.1007/978-3-540-79333-5.

TANDEMPLOY 2019

Tandemploy: *Studie zum Wissenstransfer in Unternehmen: Mitarbeitende wollen!* URL: <https://www.tandemploy.com/de/blog/umfrage-wissenstransfer-in-unternehmen/> (besucht am 31.03.2021).

TARUS et al. 2018

Tarus, J. K.; Z. Niu; G. Mustafa: Knowledge-based recommendation: A review of ontology-based recommender systems for e-learning. *Artificial Intelligence Review* 50 (2018) 1, S. 21–48. ISSN: 0269-2821. DOI: 10.1007/s10462-017-9539-5.

TIMUR & FATIHA TASAR 2011

Timur, B.; M. Fatih Tasar: In-Service Science Teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge Confidences and Views about Technology-Rich Environments. *Center for Educational Policy Studies Journal* 1 (2011) 4, S. 11–25. ISSN: 1855-9719. DOI: 10.26529/cepsj.403.

TROJAN 2006

Trojan, J.: *Strategien zur Bewahrung von Wissen. Zur Sicherung nachhaltiger Wettbewerbsvorteile*. ger. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: DUV. 2006. ISBN: 978-3-8350-0133-6. DOI: 10.1007/978-3-8350-9021-7.

H. ULRICH 1982

Ulrich, H.: Anwendungsorientierte Wissenschaft. *Die Unternehmung* (1982) 36, No. 1, S. 1–10. URL: <https://www.jstor.org/stable/24178507>.

P. ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; W. Hill: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Teil 1. *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Studium und Forschung* 5 (1976) 7, S. 304–309.

USCHOLD & GRUNINGER 1996

Uschold, M.; M. Gruninger: Ontologies: principles, methods and applications. *The Knowledge Engineering Review* 11 (1996) 2, S. 93–136. ISSN: 0269-8889. DOI: 10.1017/S0269888900007797.

VDI 1992

VDI, Hrsg. (1992): *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen*. ger. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1992. 204 S. ISBN: 3184010066.

VDI 2018

VDI Wissensforum GmbH, Hrsg. (2018): *Automation 2018: 19. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik / Seamless Convergence of Automation & IT* (Düsseldorf). Bd. 2330. VDI-Berichte. VDI Verlag. 2018. ISBN: 978-3-18-102330-3. DOI: 10.51202/9783181023303.

VDI 3633-1

VDI-Richtlinie 3633-1, Hrsg. (2014): *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 3699-1

VDI-Richtlinie 3699, Hrsg. (2015): *Prozessführung mit Bildschirmen*. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 4499-1

VDI-Richtlinie 4499-1, Hrsg. (2008): Digitale Fabrik. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 4499-2

VDI-Richtlinie 4499-2, Hrsg. (2011): Digitale Fabrik. ger. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 4499-3

VDI-Richtlinie 4499-3, Hrsg. (2016): Digitale Fabrik. ger. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 5600-1

VDI-Richtlinie 5600-1, Hrsg. (2016): Fertigungsmanagementsysteme. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 5610-1

VDI-Richtlinie 5610-1, Hrsg. (2009): Wissensmanagement im Ingenieurwesen. Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDMA 66412-1

VDMA 66412-1, Hrsg. (2009): Manufacturing Executions Systems (MES). VDMA-Einheitsblatt. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDMA E.V. 13.04.2021

VDMA e.V.: OPC UA: Erfolgsfaktor Interoperabilität. VDMA-Studie. Hrsg. von VDMA e.V. wirautomatisierer.de: Konradin Mediengruppe. URL: <https://wirautomatisierer.industrie.de/opc-ua/opc-ua-erfolgsfaktor-interoperabilitaet/#> (besucht am 04.03.2023).

VERNICKEL et al. 2019

Vernickel, K.; J. Weber; X. Li; J. Berg; G. Reinhart: A Revised KDD Procedure for the Modeling of Continuous Production in Powder Processing. In: *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEM2019 : 15-18 Dec, Macau*. 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (Macao, China). Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE. 2019, S. 340–344. ISBN: 978-1-7281-3804-6. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978828.

VERNICKEL et al. 2022

Vernickel, K.; M. Singh; M. Konersmann; J. Jurjens: Ontology-based Synchronization of Automated Production Systems and Their Simulation Models. In: *IEEM2022. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) : Kuala Lumpur, Malaysia, 07-10 December 2022*. 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (Kuala Lumpur, Malaysia). Institute of Electrical and Electronics Engineers & IEEE Technology and Engineering Management Society. Piscataway, NJ: IEEE. 2022, S. 0660–0664. ISBN: 978-1-6654-8687-3. DOI: 10.1109/IEEM55944.2022.9989593.

VERNICKEL & BURGER 2021

Vernickel, K.; K. Burger: Agile Weiterentwicklung durch Produktinkremente. Vorgehensmodell zur kontinuierlichen Weiterentwicklung mechatronischer Produkte. Agile Further Development through Product Increments. *wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 06, S. 469–473. ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2021-06-113.

VERNICKEL & SCHILP 2022

Vernickel, K.; J. Schilp: Wissensgestützte Parametrierung von Simulationen. Betriebsbegleitender Einsatz von Materialflusssimulationen in der Produktion. *wt Werkstattstechnik online* (2022) 03, S. 122–126. ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2021-3-20.

Vernickel & Singh 2022

Vernickel, K.; M. Singh: WMS4SimPar. Zenodo. DOI: 10.5281/ZENODO.7770143. URL: <https://zenodo.org/record/7770143#.ZB8fQ3bMKUk>.

VERNICKEL et al. 2020

Vernickel, K.; L. Brunner; G. Hoellthaler; G. Sansivieri; C. Härdtlein; L. Trauner; L. Bank; J. Fischer; J. Berg: Machine-Learning-Based Approach for Parameterizing Material Flow Simulation Models. *Procedia CIRP* 93 (2020), S. 407–412. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.018.

Vogel-Heuser et al. 2014

Vogel-Heuser, B.; C. Diedrich; D. Pantförder; P. Göhner: Coupling heterogeneous

production systems by a multi-agent based cyber-physical production system. In: *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 27 - 30 July 2014, Central Campus of the Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN) (Porto Alegre, Brazil). Hrsg. von Pereira, C. E. Institute of Electrical and Electronics Engineers & IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ: IEEE. 2014, S. 713–719. ISBN: 978-1-4799-4905-2. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945601.

VOGEL-HEUSER et al. 2021

Vogel-Heuser, B.; F. Ocker; I. Weiß; R. Mieth; F. Mann: Potential for combining semantics and data analysis in the context of digital twins. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 379 (2021) 2207. DOI: 10.1098/rsta.2020.0368.

WEBER et al. 2018

Weber, W.; R. Kabst; M. Baum: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*. ger. 10., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. 2018. 508 S. ISBN: 9783658182526. DOI: 10.1007/978-3-658-18252-6.

WELLER 2013

Weller, K.: Ontologien. In: *Grundlagen der praktischen Information und Dokumentation*. Hrsg. von Kuhlen, R.; Semar, W.; Strauch, D. DE GRUYTER SAUR. 2013, S. 207–218. ISBN: 978-3-11-025822-6. DOI: 10.1515/9783110258264.207. URL: <http://dx.doi.org/10.1515/9783110258264.207>.

WELTER 2005

Welter, M.: Die organisationale Wissensbasis von Dienstleistungsunternehmen: Besonderheiten, Strukturmodell und der Bezug zu Wissensmanagement und organisatorischem Lernen. *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung* 16 (2005) 1, S. 73–90. ISSN: 1613-8392. DOI: 10.1007/BF03401271.

WENZEL & PETER 2017

Wenzel, S.; T. Peter, Hrsg. (2017): *Simulation in Produktion und Logistik 2017. Kassel, 20.-22. September 2017*. ger;eng. Bd. Nr. AM 164. ASIM-Mitteilung. Kassel: Kassel University Press. 2017. 503 S. ISBN: 9783737601931.

WENZEL et al. 2008

Wenzel, S.; S. Collisi-Böhmer; H. Pitsch; O. Rose; M. Weiß: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien.* ger. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. ISBN: 978-3-540-35272-3.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion.* Unter Mitarb. von Decker, M.; Jendoubi, L. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. 2006. ISBN: 3-540-26039-0. DOI: 10.1007/3-540-30764-8.

WESTKÄMPER 2007

Westkämper, E.: Digital Manufacturing In The Global Era. In: *Digital Enterprise Technology.* Hrsg. von Cunha, P. F.; Maropoulos, P. G. Boston, MA: Springer US. 2007, S. 3–14. ISBN: 978-0-387-49863-8. DOI: 10.1007/978-0-387-49864-5_1.

WESTKÄMPER & ZAHN 2009

Westkämper, E.; E. Zahn: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009. ISBN: 978-3-540-21889-0. DOI: 10.1007/978-3-540-68890-7.

WESTKÄMPER et al. 2013

Westkämper, E.; D. Spath; C. Constantinescu; J. Lentjes, Hrsg. (2013): *Digitale Produktion.* ger. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2013. ISBN: 978-3-642-20258-2. DOI: 10.1007/978-3-642-20259-9.

WIENDAHL 2009

Wiendahl, H.-P.: Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009) 1-2, S. 32–37. ISSN: 0947-0085. DOI: 10.3139/104.110002.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure.* 7. aktualisierte Aufl. München: Hanser. 2010. ISBN: 3446418784. DOI: 10.3139/9783446422889.

YANG et al. 2003

Yang, J.; W. Wang; P. S. Yu: Mining asynchronous periodic patterns in time series

data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 15 (2003) 3, S. 613–628. ISSN: 1041-4347. DOI: 10.1109/TKDE.2003.1198394.

YU 2015

Yu, L.: *A developer's guide to the semantic web*. eng. 2. ed., corrected 3. printing. Berlin: Springer. 2015. 829 S. ISBN: 9783662437964.

YUNG-TSUN LEE et al. 2013

Yung-Tsun Lee; Frank Riddick; Bjoern Johansson: CMSD - A Manufacturing Simulation Integration Standard. Overview and Case Studies. en. (2013). URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=908209 (besucht am 30.07.2022).

ZAPP 2014

Zapp, M.: *Semantische Wiki-Systeme in der wandlungsfähigen Produktion*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013. ger. Bd. 30. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2014. 218 S. ISBN: 9783839606780.

ZARRI 2010

Zarri, G. P.: RDF and OWL for Knowledge Management. In: *Encyclopedia of knowledge management*. Hrsg. von Schwartz, D. G.; Te'eni, D. 2nd ed. Hershey, Pa.: IGI Global. 2010, S. 1355–1373. ISBN: 9781599049328. DOI: 10.4018/978-1-59904-931-1.ch130.

ZIPPER & DIEDRICH 2019

Zipper, H.; C. Diedrich: Synchronization of Industrial Plant and Digital Twin. In: *Proceedings, 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Paraninfo Building, University of Zaragoza, Zaragoza, Spain, 10-13 September, 2019. 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Zaragoza, Spain). Piscataway, NJ: IEEE. 2019, S. 1678–1681. ISBN: 978-1-7281-0303-7. DOI: 10.1109/ETFA.2019.8868994.

ZIPPER et al. 2018

Zipper, H.; F. Auris; A. Strahilov; M. Paul: Keeping the digital twin up-to-date — Process monitoring to identify changes in a plant. In: *Proceedings 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Lyon Congress Center,

Lyon, France, 19 - 22 February, 2018. 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (Lyon). IEEE International Conference on Industrial Technology u. a. Piscataway, NJ: IEEE. 2018, S. 1592–1597. ISBN: 978-1-5090-5949-2. DOI: 10.1109/ICIT.2018.8352419.

ZOU et al. 2019

Zou, M.; H. Li; B. Vogel-Heuser: A Framework for Inconsistency Detection Across Heterogeneous Models in Industry 4.0. In: *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEM2019 : 15-18 Dec, Macau.* 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (Macao, China). Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE. 2019, S. 29–34. ISBN: 978-1-7281-3804-6. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978930.

Abkürzungsverzeichnis

AA	Allgemeine Anforderung
Abw.	Abweichungen
API	<i>Application Programming Interface</i>
AWI	Abweichungsidentifikation
BDE	Betriebsdatenerfassung
BFO	<i>Basic Formal Ontology</i>
BMIR	Stanford Center for Biomedical Informatics Research
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CAM	<i>Computer-aided Manufacturing</i>
CAP	<i>Computer-aided Planning</i>
CCO	<i>Common Core Ontologies</i>
CMSD	<i>Core-Manufacturing-Simulation-Data</i>
DAML	<i>DARPA Agent Markup Language</i>
DAMOKLEZ	Durchgängig agile und modellbasierte Komponentenentwicklung für die Elektromobilität mit digitalen Zwillingen
DeMO	<i>Discrete-event Modeling Ontology</i>
DES	discrete-event simulation
DRM	<i>Design Research Methodology</i>
DS-I	<i>Descriptive Study I</i>
DS-II	<i>Descriptive Study II</i>
DZ	Digitaler Zwilling (engl. <i>Digital Twin</i>)
EDS	ereignisdiskrete Simulation
engl.	englisch
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
GDM-Tool	<i>Generic Data Management Tool</i>
GPN	globale Produktionsnetzwerke
HMI	<i>Human Machine Interface</i> (Mensch-Maschine-Schnittstellen)
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i>

Abkürzungsverzeichnis

ICE	<i>Information Content Entity</i>
IIM1	<i>Initial Impact Model</i>
IIM2	<i>Intended Impact Model</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (industrielle Anwendung des Internets der Dinge)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet der Dinge)
IRI	<i>Internationalized Resource Identifier</i>
KI	künstliche Intelligenz
KMS	<i>knowledge management system</i> (Wissensmanagementsystem)
lat.	lateinisch
LVS	Lagerverwaltungssystem
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> (Produktionsleitsystem)
OD	Objektdiagramm (Strukturdiagramm der UML)
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> Gesamtanlageneffektivität
OG	Oberer Grenzwert
OIL	<i>Ontology Interchange Language</i>
OMG[®]	Object Management Group [®]
OPC UA	<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>
OWL	<i>Web Ontology Language</i>
PLZ	Produktlebenszyklus
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PS	<i>Prescriptive Study</i>
ptc	Parametric Technology GmbH
RC	<i>Research Clarification</i>
RIF	<i>Rule Interchange Format</i>
RDF	<i>Resource Description Framework</i>
RDFS	<i>Resource Description Framework Schema</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
SA	Spezifische Anforderung
SAS	Spezifische Anforderung an das Simulationsmodell
SAW	Spezifische Anforderung an das Wissensmanagementsystem
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (Überwachung, Steuerung und Datenerfassung)
SGML	<i>Standard Generalized Markup Language</i>

SISO	Simulation Interoperability Standards Organization
SMAPSS	<i>Simulation Model and Automated Production System Synchronization</i>
SPARQL	<i>SPARQL Protocol And RDF Query Language</i>
SPM	<i>Sequential Pattern Mining</i>
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Datenbanksprache zur Definition von Datenstrukturen in relationalen Datenbanken)
SWM	Stuttgarter Wissensmanagement-Modell
Sync.	Synchronisierung
SysML	<i>Systems Modeling Language</i>
Tsd.	Tausend
UC	<i>Use Case</i> (Anwendungsfall)
UG	Unterer Grenzwert
UI	<i>User Interface</i> (Benutzeroberfläche)
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
URI	<i>Uniform Resource Identifier</i>
V&V	Verifikation und Validierung
W3C	World Wide Web Consortium
WDB	Wissensdatenbank (engl. <i>Knowledge base</i>)
WM	Wissensmanagement
WMP	Wissensmanagementprozess
WMS	Wissensmanagementsystem
WMS4SimPar	Wissensmanagementsystem zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im betriebsbegleitenden Einsatz
WRM	Wissensrepräsentationsmethoden
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

Anmerkung zum Abkürzungsverzeichnis

Das Abkürzungsverzeichnis führt alle vorkommenden, aber nicht im allgemeinen deutschen Sprachgebrauch üblichen Abkürzungen dieser Arbeit auf. Englische Fachbegriffe werden verwendet, wenn eine entsprechende deutsche Bezeichnung nicht existiert oder unüblich ist. Diese sind kursiv dargestellt, z. B. „*Internet of Things*“.

Verzeichnis der Formelzeichen

Variable	Einheit	Bedeutung
\mathbf{A}_i		Matrix aller Abweichungen zwischen Produktionssystem und Simulationsmodell zum Zeitpunkt t_i
$a_k(t_i)$		Abweichung im Prozess k zwischen Produktionssystem und Simulationsmodell zum Zeitpunkt t_i
ε_k^{OG}		Oberer Grenzwert (OG) k der AWI von Prozess k
ε_k^{UG}		Unterer Grenzwert (UG) k der AWI von Prozess k
$\mathbf{S}_i^{P,S}$		Matrix aller Zustände des Produktionssystems (P) bzw. des Simulationsmodells (S) zum Zeitpunkt t_i
$s_k^{P,S}(t_i)$		Zustand im Prozess k des Produktionssystems (P) bzw. des Simulationsmodells (S) zum Zeitpunkt t_i
$\bar{s}_k^{P,S}(t_i)$		Mittelwert der Zustände über einen bestimmten Zeitraum im Prozess k des Produktionssystems (P) bzw. des Simulationsmodells (S) zum Zeitpunkt t_i

Abbildungsverzeichnis

1.1	Realitätsnähe des Simulationsmodells im Lebenszyklus in Anlehnung an DITTLER et al. (2022, S. 2)	2
1.2	Hemmnisse bei der Weitergabe von Wissen nach TANDEMPLOY (2019)	3
1.3	Einordnung des forschungsmethodischen Vorgehens in die <i>Design Research Methodology</i> nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 15) sowie Aufbau der Arbeit	8
2.1	Zielsystem der Produktion in Anlehnung an VDI 3633-1	10
2.2	Von der modernen Produktion zur perfekten Produktion in Anlehnung an KLETTI & SCHUMACHER (2014, S. 4 ff.)	10
2.3	Zusammenhang zwischen Produkt- und Produktionsentwicklung sowie Produktentstehung und Produktherstellung im PLZ in Anlehnung an EIGNER & STELZER (2009, S. 2)	11
2.4	Wissenstreppe nach NORTH (2016, S. 40)	13
2.5	Wissenstransformation nach NONAKA & TAKEUCHI (2012, S. 79)	14
2.6	Fünf Schichten der Wissensbasis einer Organisation in Anlehnung an PAUTZKE (1989, S. 79)	17
2.7	Methoden der Wissensrepräsentation in Anlehnung an HELBIG (2008) und BRANDMEIER (2020, S. 47)	18
2.8	Hierarchische Einteilung von Ontologien hinsichtlich ihres Grades der Spezifität in Anlehnung an BRANDMEIER (2020, S. 57) und GASEVIC et al. (2006, S. 74)	20
2.9	Inhaltlicher Aufbau von Repräsentationssprachen und Struktur des Semantic Web Layer Cakes	22
2.10	Kernaktivitäten eines WMs nach VDI 5610-1, PROBST et al. (2012, S. 30) und HEISIG & ORT (2005, S. 28)	23
2.11	Architektur eines WMS in Anlehnung an BRANDMEIER (2020, S. 44) und MAIER (2007, S. 319)	25

2.12	Vergleich der Kostenverläufe mit und ohne Simulationseinsatz über den PLZ von Produktionssystemen in Anlehnung an K. FELDMANN & REINHART (2000, S. 2)	26
2.13	Einordnung des Einsatzes der EDS in den PLZ (vgl. Abschnitt 2.1.3)	28
2.14	Vorgehen bei Simulationsstudien in Anlehnung an ASIM (1997) und VDI 3633-1	30
2.15	Daten für die Simulation in Anlehnung an VDI 3633-1	32
2.16	Auswahl an möglichen Datenquellen für die EDS sowie Einteilung in die Leitebenen eines Unternehmens in Anlehnung an VDI 5600-1, VDMA 66412-1 und GUTENSWAGER et al. (2017, S. 161 ff.)	34
2.17	Abweichung zwischen der Simulation und dem realem System in Anlehnung an BOHÁCS et al. (2012, S. 559) und NYHUIS (2009, S. 53)	36
2.18	Komponenten einer betriebsbegleitenden Simulation in Anlehnung an VDI 4499-2	36
3.1	CMSD-basierter Modellgenerator in Anlehnung an BERGMANN (2014)	41
3.2	Architektur der Parallelsimulation von KAIN et al. (2010, S. 448)	43
3.3	Konzept einer adaptiven Materialflusssimulation in Anlehnung an BOHÁCS et al. (2012, S. 563)	44
3.4	Wissensspirale (links) und SECI-Modell (rechts) nach NONAKA (1994, S. 20) und NONAKA & TAKEUCHI (2012)	48
3.5	Modell des prozessorientierten Wissensmanagements nach REMUS (2002, S. 83)	49
3.6	Wissensbasiertes Framework zur Erkennung und Vermeidung von Inkonsistenzen nach ZOU et al. (2019, S. 29)	52
3.7	Modell des ontologiebasierten Wissensmanagement-Frameworks nach BRANDMEIER (2020, S. 129 ff.)	53
4.1	Systemübersicht (IIM1) von WMS4SimPar	65
4.2	Systemarchitektur (IIM2) von WMS4SimPar in Anlehnung an VERNICKEL & SCHILP (2022, S. 124)	67
5.1	(a) relevante Ebenen im Modell nach WIENDAHL (2009, S. 34) und WESTKÄMPER (2007, S. 11) (b) relevante Ebenen der Automatisierungspyramide nach SIEPMANN (2016, S. 49)	72

5.2	Relevante Faktoren der OEE für die AWI in Anlehnung an NAKAJIMA (1988, S. 25)	74
5.3	UML-Klassendiagramm des Datenmodells zur Verknüpfung der Datenpunkte	78
5.4	Beispielhaftes UML-Objektdiagramm für die Verknüpfung der Datenpunkte	79
5.5	(a) UML-Klasse für die Grenzwerte der AWI (b) Darstellung der Grenzwerte im Beispielmodul <i>Montage 1</i>	80
5.6	Erweiterung der UML-Klasse	82
6.1	Bestimmung der idealen Repräsentationsform in Anlehnung an BRANDMEIER (2020, S. 91)	84
6.2	Vorgehen für den Aufbau einer Ontologie für WMS4SimPar	85
6.3	Ishikawa-Diagramm zur Ermittlung der Ursachen von Abweichungen in Anlehnung an GALASKE et al. (2015)	89
6.4	<i>Object-</i> und <i>Data-Properties</i> der SMAPSS-Ontologie	90
6.5	Ablauf der Externalisierung von Wissen in WMS4SimPar in Anlehnung an VERNICKEL & SCHILP (2022)	94
6.6	Aufbau der Web-Applikation des UI von WMS4SimPar	100
7.1	Vorgehen bei der Simulationsmodellparametrisierung	102
7.2	Art der Zusammenhänge zwischen Mess- und Einstellparameter in der Simulation	103
7.3	Anwendungsbeispiel einer instanziierten Einbindung des Zusammenhangs zwischen Einstell- und Messparametern in der Ontologie	104
7.4	Auszug aus dem UI der Simulationsexperten	105
8.1	Überblick über die Demonstratoranlage zur Akkupack-Montage	110
8.2	Datenverbindung des Demonstrators am Fraunhofer IGCV	111
8.3	Auszug aus einer Tabelle mit Zeitstempeln aus der Simulation	113
8.4	UML-Objektdiagramm des Datenmodells zur Verknüpfung der Datenpunkte von Station <i>Transport1</i> und <i>Einsetzgreifer</i>	114
8.5	Architekturschaubild zur Wissensgenerierung und -verarbeitung am Demonstrator	115
8.6	Wiederverwendung von Mid-Level- und Upper-Level-Ontologien in der Domänen-Level-Ontologie des Demonstrators	116

8.7	Ansicht der durch die Personalisierungsdienste gefilterten Abweichungen für eine bestimmte Person	118
8.8	Ansicht einer Abweichung für die Abfrage von Wissen	119
8.9	Grafische Darstellung der Ontologie in Protégé zum Vorschlag eines Wissensträgers für eine Abweichung im Prozess <i>Inserting</i>	120
8.10	Experimentelle Ermittlung der veränderlichen Simulationsparameter (Ordinatenachse) und der resultierenden Dauer der Prozesse (Abszissenachse)	121
8.11	Ergebnis der Datenanalyse zur Bestimmung der Prozesszeit an einer Station im Produktionssystem	124
8.12	Vergleich der Prozesszeiten der realen Produktion mit dem Simulationsmodell vor und nach der Parametrisierung	125
8.13	Diagramm der Kosten-Nutzen-Analyse für den Einsatz von WMS4SimPar im industriellen Anwendungsbeispiel	134
A.1	Grafische Aufbereitung der instanziierten DAMOKLEZ-Ontologie	183
A.2	UI-Seite für das Anlegen eines neuen Users in WMS4SimPar	184
A.3	UI-Seite für die Eingabe einer geplanten Abweichung mit Start- und Endzeit	185
A.4	Balkendiagramm der Antworten auf den Fragebogen Seite 1 von 3	195
A.5	Balkendiagramm der Antworten auf den Fragebogen Seite 2 von 3	196
A.6	Balkendiagramm der Antworten auf den Fragebogen Seite 3 von 3	197

Tabellenverzeichnis

2.1	Anwendungsfelder der Simulation in Anlehnung an (KOHL 2016, S. 29), SMITH (2003) und NEGAHBAN & SMITH (2014, S. 243)	29
2.2	V&V-Kriterien für die Simulation in Produktion und Logistik in Anlehnung an RABE et al. (2008, S. 22)	38
3.1	Abgleich der für diese Arbeit relevanten Ansätze	57
4.1	Zusammenfassung der Anforderungen	64
6.1	Wichtige Begriffe für den Aufbau der SMAPSS-Ontologie	88
8.1	Gegenüberstellung der produzierten Produkte vor und nach der Parametrisierung	125
8.2	Einmalige Kosten zur Umsetzung von WMS4SimPar (Expertenschätzung)	131
8.3	Jährliche Kosten für den Betrieb von WMS4SimPar (Expertenschätzung)	132
8.4	Nutzen durch die Anwendung von WMS4SimPar (Expertenschätzung)	133

A.2 User Interface der Umsetzung von WMS4SimPar

Damoklez

Select your option

Expert Registration

Process History Visualization

All Organization's Deviation

Personalized View

Planned Deviation

Simulation Expert Section

Slide for Options

Expert Name
Name of expert

Organization Name
Name of Organization

Project Name
Name of Project

Choose the Department
Select your option

Choose the position
Select your option

Name the process which the expert is proficient
Select your option

Submit

Abbildung A.2: UI-Seite für das Anlegen eines neuen Users in WMS4SimPar

A.2 User Interface der Umsetzung von WMS4SimPar

The screenshot shows a web application interface for entering a planned deviation. On the left is a dark sidebar with the logo 'Damoklez' and a list of navigation items: 'Select your option', 'Expert Registration', 'Process History Visualization', 'All Organization's Deviation', 'Personalized_View', 'Planned Deviation', and 'Simulation Expert Section'. The main content area has a light background and contains the following elements:

- A button labeled 'Slide for Options' at the top left.
- A section titled 'Expert Name' with a text input field labeled 'Name of expert'.
- A grey bar with the text 'DeviationID is ProcessName and current date'.
- A section titled 'The Process where the deviation will occur' with a dropdown menu labeled 'Select your option'.
- A section titled 'Cause Of Deviation' with a dropdown menu labeled 'Select your option'.
- A section titled 'Deviation Type' with a dropdown menu labeled 'Select your option'.
- A section titled 'Deviation Description' with a large text area containing the prompt 'Please share your expert knowledge'.
- A text input field labeled 'Deviation starts from' with a calendar icon on the right.
- A text input field labeled 'Deviation stays until' with a calendar icon on the right.
- A 'Submit' button at the bottom center.

Abbildung A.3: UI-Seite für die Eingabe einer geplanten Abweichung mit Start- und Endzeit

A.3 Fragebogen für die Evaluation

Validation Workshop, 30.03.2022


**Validation of the knowledge management system
for the parameterization of discrete-event simulation models
in operational use**

Introduction

As part of Mayank Singh's master's thesis and Kilian Vernickel's doctoral project, a knowledge management system for parameterizing discrete-event simulation models in operational use was researched and developed at Fraunhofer IGC. The system is to ensure that a simulation model always represents the real production system and can be used for predictive experiments. In this context, a corresponding system should record the changes between simulation and reality as well as support the process of adapting the simulation model through targeted knowledge acquisition.

Aim of the questionnaire

The questionnaire aims to validate the knowledge management system for parameterization of discrete-event simulation models in operational use.

Notes on editing: There are no wrong answers to the questions asked.

The questionnaire contains three different types of questions:

- Multiple Choice:** For these questions, several answer options can be ticked and the free text field can be filled in.

Beispiel: Als plangetriebene Vorgehensmodelle verwenden wir ...

 - ...the V-Model.
 - ...the V-Model XT.
 - ...the Waterfall-Model.
 - ...Six Sigma.
 - ... a proprietary approach: Adapted V-model
 - ...another procedure: _____
- Tabular questions:** Please answer these questions with the degree of agreement
Example: In the future ...

	Not at all	No	Some-what	Yes	Definitely Yes	No state ment
... a stronger customer focus will become necessary.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... services around the product are becoming increasingly important.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
- Open questions:** Please answer this question in your own words.

Validation Workshop, 30.03.2022



1. Your background

1.1. In which industry is your company mainly active?

- Automotive/ motor vehicle manufacturers
- Mechanical and plant engineering
- Supply industry
- Consulting
- Research
- Other:

1.2. What is your experience with the tools/activities mentioned below?

	Not at all	No	Some what	Yes	Definitely yes	No statement
Are you involved in engineering tasks?	<input type="checkbox"/>					
Do you have experiences in production systems?	<input type="checkbox"/>					
Do you work with simulation models?	<input type="checkbox"/>					
Do you work with data from production systems?	<input type="checkbox"/>					
Do you know how to program a PLC?	<input type="checkbox"/>					
Have you used a Knowledge Management System before?	<input type="checkbox"/>					

Validation Workshop, 30.03.2022



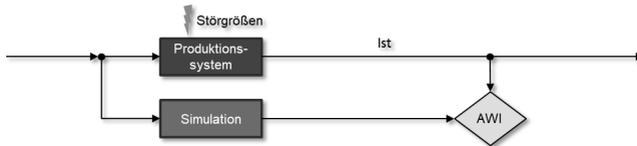
2. Explaining the different parts in the demonstrator (production line, simulation model, etc.)

	Not at all	No	Some-what	Yes	Definitely Yes	No statement
How confident are you that there is a deviation between the real production system and the simulation model?	<input type="checkbox"/>					
If you think there is a deviation: Do you think you can specify it (e.g., location, origin, size, ...)	<input type="checkbox"/>					
Imagine working with larger or more systems: Do you think you can find out multiple deviations in various systems you are part of?	<input type="checkbox"/>					

Validation Workshop, 30.03.2022

3. Presentation of all deviations between the real production system and its simulation model.

System architecture:



- AWI: Deviation detection (Abweichungsidentifikation), based on live data from the production system and the simulation model
- Mapping of sensor data from the production line with parameters from the simulation model

	Not at all	No	Some-what	Yes	Definitely Yes	No statement
Imagine you are working at the production system: Do you think you can find the relevant deviation where you have knowledge?	<input type="checkbox"/>					

Validation Workshop, 30.03.2022



4. Presentation of deviations between the real production system and its simulation model

Imagine you are a worker within the project DAMOKLEZ and work on the station "Transport_1".

	Not at all	No	Some-what	Yes	Definitly Yes	No state ment
The deviations recommended to me are relatable to me	<input type="checkbox"/>					
The Recommender System helped me discover new deviations.	<input type="checkbox"/>					
The recommender system recommended me diverse deviations.	<input type="checkbox"/>					
I understand why the recommended items are suggested to me.	<input type="checkbox"/>					
The deviation labels (titles) of the recommender system are adequate	<input type="checkbox"/>					
The recommender system explains why the recommendation items are recommended to me.	<input type="checkbox"/>					
The recommendation system can be trusted.	<input type="checkbox"/>					
Do you think randomness in the recommendation list is justified?	<input type="checkbox"/>					
Given a list of multiple deviations, will you look into deviations that are not part of your project?	<input type="checkbox"/>					
Given a list of multiple deviations, will you look into deviations that are not the type of processes you are familiar with?	<input type="checkbox"/>					

Validation Workshop, 30.03.2022



5. Presentation of details of the deviations (Historical Chart, dates, ...)

Example of a deviation in station *Transport_1* for the worker *Kilian_Vernickel*.

Hi Kilian_Vernickel

Do you have knowledge about the deviation?

Yes
 No

If you do not have any knowledge, can you suggest someone who has the knowledge (ignore if no knowledge about expert)

Cause Of Deviation
Machine

Deviation Type
Internal

Deviation Description
Machine got corrupted

Deviation starts from: 01/26/2022 9:40 AM

Deviation will stop until: 01/26/2022 9:40 AM

Submit

	Not at all	No	Some-what	Yes	Definitely Yes	No state ment
The information provided to me is sufficient for me to share my knowledge about the deviation.	<input type="checkbox"/>					
I found it easy to tell between what I know and what I don't know about a deviation.	<input type="checkbox"/>					
The deviation-field should provide more information	<input type="checkbox"/>					
If yes : The following information is missing/ could be added: (please describe)						

6. Parameterization of the simulation model after the knowledge extraction process for a deviation

Consider that you are the simulation expert, you have control of the parameters in the simulation, and you are responsible for providing an accurate simulation model.

	Not at all	No	Some-what	Yes	Definitely Yes	No statement
Do you think you are able to parameterize the simulation model correctly if you don't have the information from the shop floor workers?	<input type="checkbox"/>					
Do you think you can update the simulation model based on the received knowledge for a deviation that occurred?	<input type="checkbox"/>					

Validation Workshop, 30.03.2022



7. General evaluation of the whole system

	Not at all	No	Some-what	Yes	Definitely Yes	No statement
I quickly became familiar with the Knowledge Management System (KMS).	<input type="checkbox"/>					
The KMS can be trusted.	<input type="checkbox"/>					
The Recommender System helped me to discover new deviations	<input type="checkbox"/>					
Does the system reduce the effort to identify deviations between the real production system and the simulation model?	<input type="checkbox"/>					
Does the system reduce the effort to solve deviations between the real production system and the simulation model?	<input type="checkbox"/>					
Does the system support the process of extracting knowledge from shop floor experts?	<input type="checkbox"/>					
In your opinion, does the KMS increase the quality of the simulation model?	<input type="checkbox"/>					
As a shop floor worker: Would you use the system to share knowledge and help improve the quality of the simulation model?	<input type="checkbox"/>					
As a simulation expert: Does the system support you to keep the simulation models up-to-date?	<input type="checkbox"/>					
As a simulation expert: Does the combination of the data-based approach of a deviation with the knowledge from the shop floor lead to more precise adjustments in the simulation model?	<input type="checkbox"/>					
Does the system help focus on the correct data needed according to a deviation?	<input type="checkbox"/>					
Please answer the statement: With the KMS, future behavior of the real production	<input type="checkbox"/>					

Validation Workshop, 30.03.2022



system, which can't be seen in the historical data, can be taken into account in the simulation model.						
Please answer the statement: The system fastens the process to interpret failures of the real production system.	<input type="checkbox"/>					
Do you think there is more potential in the stored knowledge for other use cases in the production/ companies environment?	<input type="checkbox"/>					
Do you have any further comments/ ideas?						

Thank you very much for your participation!

A.4 Zusammenfassung der Antworten aus der Befragung

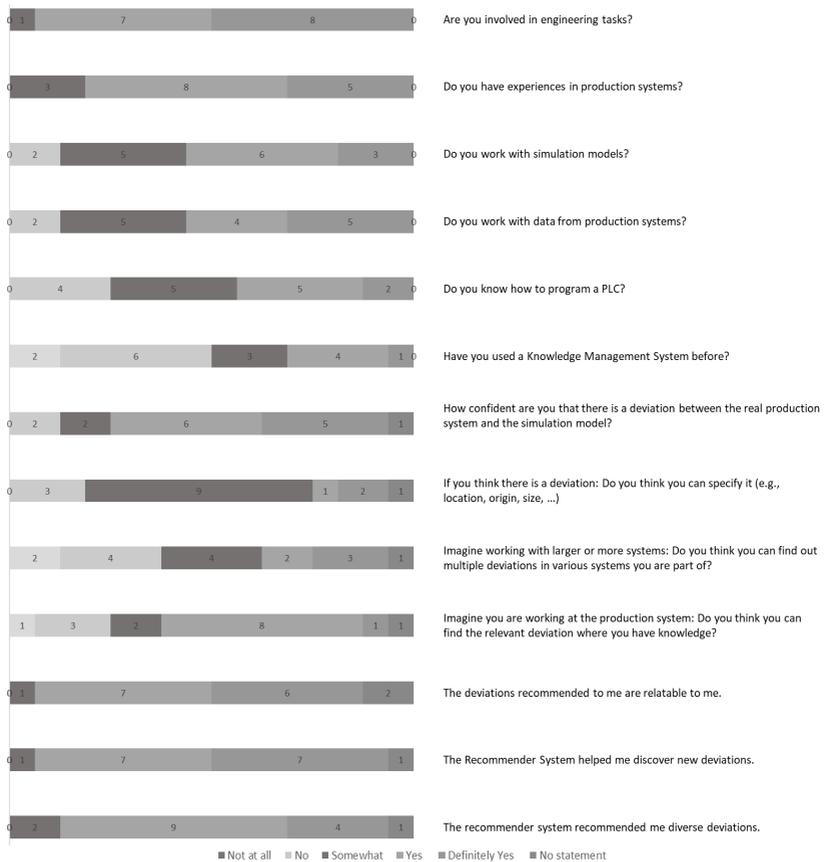


Abbildung A.4: Balkendiagramm der Antworten auf den Fragebogen Seite 1 von 3

A Ontologie in WMS4SimPar

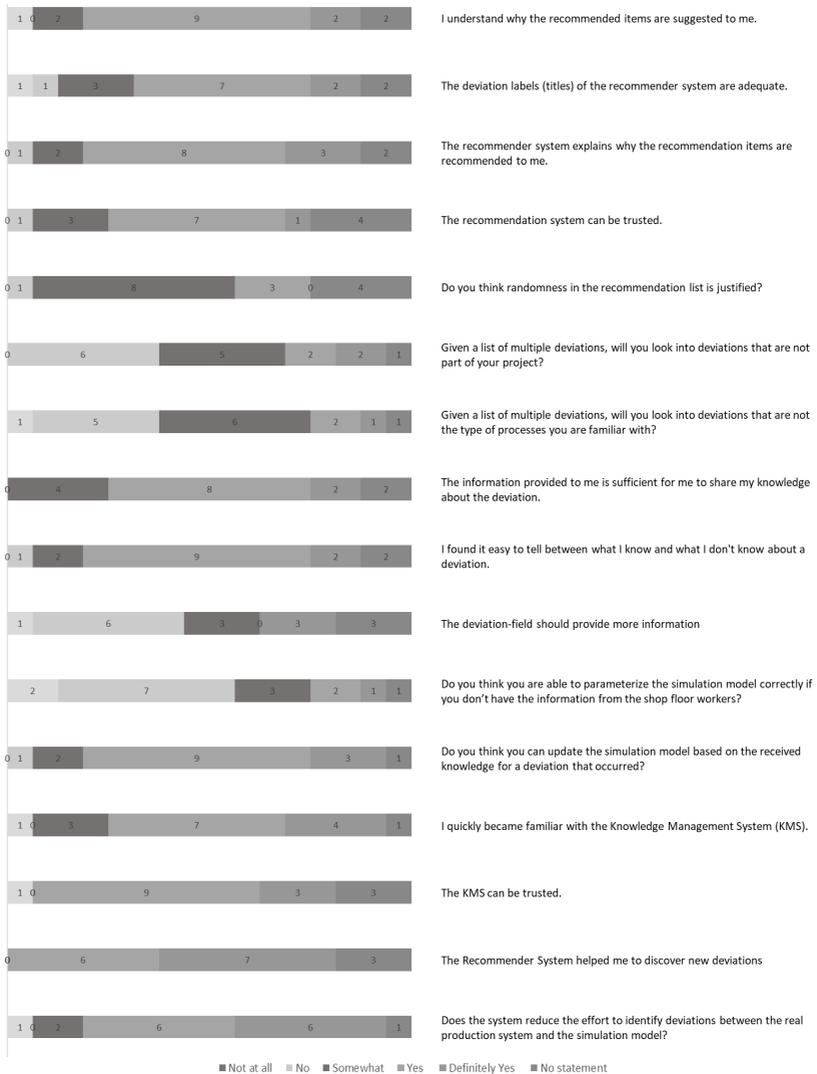


Abbildung A.5: Balkendiagramm der Antworten auf den Fragebogen Seite 2 von 3

A.4 Zusammenfassung der Antworten aus der Befragung

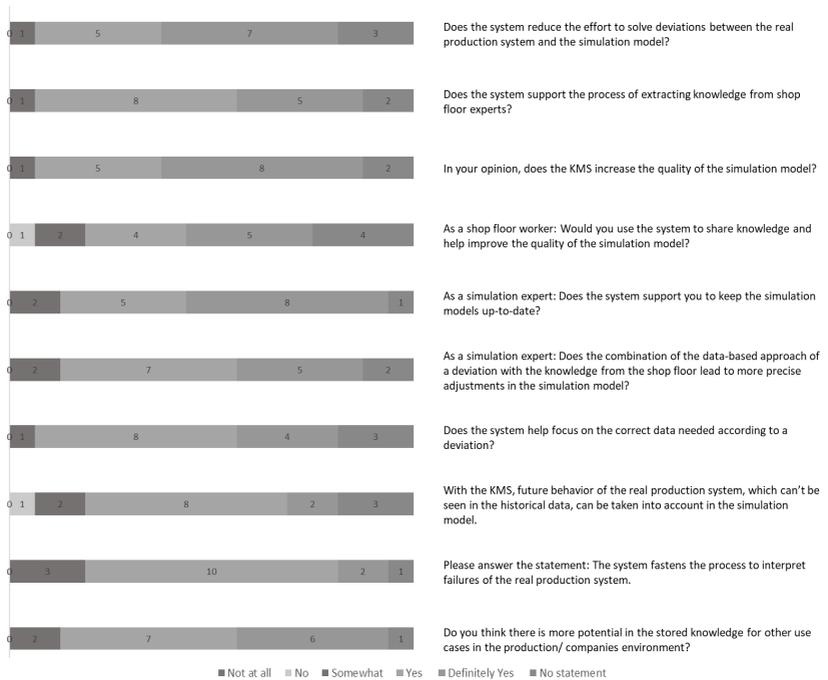


Abbildung A.6: Balkendiagramm der Antworten auf den Fragebogen Seite 3 von 3

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden in den Jahren von 2018 bis 2022 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen hinsichtlich eines Wissensmanagementsystems zur Parametrisierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle untersucht wurden. Deren Ergebnisse sind in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Nachfolgend sind die Studienarbeiten chronologisch aufgelistet:

BRUNNER (2019)

Synchronisierung der Materialflusssimulation des digitalen Zwillings mithilfe Methoden des maschinellen Lernens; Masterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 01.10.2019)
Teile der Arbeit sind in Abschnitt 3.1 eingeflossen.

LIU (2020)

Modelling of a Digital Twin using Knowledge-based Techniques for a Change-intensive Component Development in the Electro-mobility Sector; Masterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 15.06.2020)

BURGER (2020)

Procedure Model for Agile Change Management to Iteratively Improve Existing Products Through the Development of MVPs Based on Digital Twins; Masterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 31.08.2020)

LANDGRAF (2021)

Identifikation von Abweichungen zwischen digitalen Artefakten und deren Realität; Semesterarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 01.01.2021)

Teile der Arbeit sind in Abschnitt 4.3 eingeflossen.

MAROOF (2021)

Wissensmanagementsystem zur Anpassung von digitalen Artefakten und digitalen Zwillingen; Bachelorarbeit (Abgegeben an der Technischen Universität München am 01.01.2021)

Teile der Arbeit sind in Abschnitt 2.2, Abschnitt 3.3 und Kapitel 6 eingeflossen.

SINGH (2022)

Synchronizing the Shopfloor and Its Simulation Models in Automated Production System – An Ontology-Based Recommender System; Masterarbeit (Abgegeben an der Universität Koblenz-Landau am 05.05.2022)

Teile der Arbeit sind in Kapitel 6 und Kapitel 8 eingeflossen.

Publikationsliste

Publikationen des Autors, die im Rahmen dieser Dissertation erarbeitet wurden, sind im Folgenden in chronologischer Reihenfolge aufgeführt.

SCHREIBER ET AL. (2019)

Schreiber, M.; K. Vernickel; C. Richter; G. Reinhart: Integrated production and maintenance planning in cyber-physical production systems. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 534?539. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.095.

C. BERGER ET AL. (2019)

Berger, C.; J. Klöber-Koch; M. Schreiber; K. Vernickel; A. Zipfel: OpenServ4P - Offene, intelligente Services für die Produktion. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt OpenServ4P. ger. Augsburg: Fraunhofer-Institut für Gießerei-Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV. 2019. 117 S. DOI: 10.2314/KXP:1735955663.

HOELLTHALER ET AL. (2019)

Hoellthaler, G.; M. Schreiber; K. Vernickel; J. b. Isa; J. Fischer; N. Weinert; R. Rosen; S. Braunreuther: Reconfiguration of production systems using optimization and material flow simulation. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 133?138. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.024.

VERNICKEL ET AL. (2019)

Vernickel, K.; J. Weber; X. Li; J. Berg; G. Reinhart: A Revised KDD Procedure for the Modeling of Continuous Production in Powder Processing. In: 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEM2019 : 15-18 Dec, Macau, China. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: S. 340?344. ISBN: 978-1-7281-3804-6. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978828.

VERNICKEL ET AL. (2020)

Vernickel, K.; L. Brunner; G. Hoellthaler; G. Sansivieri; C. Härdtlein; L. Trauner; L. Bank; J. Fischer; J. Berg: Machine-Learning-Based Approach for Parameterizing Material Flow Simulation Models. *Procedia CIRP* 93 (2020), S. 407?412. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.018.

VERNICKEL & BURGER (2021)

Vernickel, K.; K. Burger: Agile Weiterentwicklung durch Produktinkremente. Vorgehensmodell zur kontinuierlichen Weiterentwicklung mechatronischer Produkte. *Agile Further Development through Product Increments. wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 06, S. 469?473. ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2021-06-113.

VERNICKEL & SCHILP (2022)

Vernickel, K.; J. Schilp: Wissensgestützte Parametrierung von Simulationen. Betriebsbegleitender Einsatz von Materialflusssimulationen in der Produktion. *wt Werkstattstechnik online* (2022) 03, S. 122-126. ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2021-3-20.

VERNICKEL ET AL. (2022)

Vernickel, K.; M. Singh; M. Konersmann; J. Jurjens: Ontology-based Synchronization of Automated Production Systems and Their Simulation Models. In: *IEEM2022. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM): Kuala Lumpur, Malaysia, 07-10 December 2022*. S. 0660-0664. ISBN: 978-1-6654-8687-3. DOI: 10.1109/IEEM55944.2022.9989593.