



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Ganzheitliche Simulation der Instandhaltung – Auf dem Weg zum Referenzmodell für KMU

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Fraunhofer Austria Research GmbH)

Alexandra Birkmaier, MSc.

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung, Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Moritz Beer

00827848 (660.330)

Wien, im Oktober 2022

Moritz Beer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Oktober 2022

Moritz Beer

Danksagung

Herzlichen Dank an *Alexandra Birkmaier* und *Sebastian Schlund* für die äußerst freundliche und hilfsbereite Betreuung. Danke auch an *Martin Riestler*, für die Tipps zur Diplomprüfung. Des Weiteren danke ich all den lieben Menschen die mich während meines Studiums und während des Verfassens dieser Arbeit unterstützt haben. Danke *Mama* und *Papa*, dass ihr mir diesen Weg ermöglicht habt und danke *Gabriel*, dass du mich während der Coronazeit klaglos bei dir aufgenommen hast. Danke *Helen* für deine geduldige und ausdauernde Hilfe bei der sprachlichen Ausarbeitung. Ich liebe dich! Danke auch *Thommy*, *Lukas* und *Max* für euer äußerst hilfreiches Feedback. Danke auch an die *AnyLogic-User Community* auf *LinkedIn* und *stack overflow*, für die Hilfe zur Interpretation der Fehlermeldungen.

Kurzfassung

Die Instandhaltung eines produzierenden Unternehmens ist ein komplexer Sachverhalt, welcher sich durch Modellierung und Simulation untersuchen lässt. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) weisen bei der Instandhaltung oftmals Verbesserungspotential auf und können von einer Instandhaltungssimulation profitieren. Oftmals besteht in KMU ein Mangel an Ressourcen für Simulationsstudien, welche mit einem erheblichen Zeitaufwand einhergehen. Des Weiteren ist in der Fachliteratur bislang nur wenig Material vorhanden, das sich ganzheitlich mit der Instandhaltungssimulation beschäftigt. Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, Nutzungshemmnisse für die Instandhaltungssimulation abzubauen, sodass KMU ihre eigene Instandhaltung analysieren, planen und verbessern können. Zur Zielerreichung orientiert sich die Arbeit übergeordnet an der Vorgehensweise der *Design Science Research Methodology*. Bei dem dabei zu entwickelnden Artefakt handelt es sich um eine Vorgehensweise zur Instandhaltungssimulation mit besonderem Fokus auf den Anforderungen von KMU. Dazu wird die in der VDI-Richtlinie 3633 vorgeschlagene Vorgehensweise für Simulationen von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen inhaltlich mit den für die Instandhaltungssimulation relevanten Themen ergänzt. Die Artefakterstellung basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche zu bestehenden Lösungsansätzen. Das Artefakt wird vorgestellt und abschließend anhand eines Anwendungsbeispiels demonstriert. Für die Artefakterstellung und Demonstration spielen die Methoden der Modellierung und Simulation eine entscheidende Rolle. Durch die Anwendung der agentenbasierten Methode in Verbindung mit ereignisdiskreter Simulation wird das Modell realitätsnah und nachvollziehbar gestaltet. Das Softwarepaket *AnyLogic* ist für diese integrierte Modellierung geeignet, da es beide Methoden in einer Entwicklungsumgebung bereitstellt. Das zentrale Ergebnis ist die Entwicklung und die erfolgreiche Demonstration einer Vorgehensweise zur Erstellung eines ganzheitlichen Digitalen Modells zur Analyse und Potentialerkundung der Instandhaltung in KMU. Die Gesamtkosten bilden eine aussagekräftige Kennzahl, die auch die Kosten für verspätete Aufträge berücksichtigt. Mit Hilfe des entwickelten Modells können die drei Instandhaltungsstrategien ausfall-, zeit- und zustandsgesteuert in einer fiktiven Fabrik erfolgreich modelliert werden. Als Resultat der durchgeführten Experimente zeigt sich, dass in der fiktiven Fabrik mit einer zustandsgesteuerten Instandhaltung die niedrigsten Gesamtkosten erzielt werden. Die entwickelte Vorgehensweise dient KMU als Anhaltspunkt zur Instandhaltungssimulation und kann als erster Schritt zur Etablierung eines Referenzmodells gesehen werden.

Abstract

The maintenance of a manufacturing company is a complex issue that can be investigated by modeling and simulation. Small and medium-sized enterprises (SMEs) often have potential for maintenance improvement and can benefit from maintenance simulation. Often, there is a lack of resources in SMEs for simulation studies, which are associated with a considerable expenditure of time. Furthermore, there is currently little material in specialist literature that holistically addresses maintenance simulation. Therefore, based on the Design Science Research Methodology approach, this thesis aims to enable SMEs to analyze, plan and improve their own maintenance by reducing barriers to the use of maintenance simulation. Formulated from a comprehensive literature search of existing solutions, the artifact to be developed is a procedure for simulating maintenance with a special focus on the requirements of SMEs. For this purpose, the procedure for simulation of logistics, material handling and production proposed in VDI guideline 3633 is expanded with the relevant topics for maintenance simulation. The artifact is presented using modeling and simulation methods and it is demonstrated using an application example. Applying the agent-based method in conjunction with discrete event simulation, the model is designed realistically and comprehensibly. Additionally, the *AnyLogic* software package used is suitable for this integrated modeling because it provides both methods in one development environment. The main result is the successful development and demonstration of a procedure for creating a holistic digital model that analyzes and explores SME maintenance. With the help of the developed model, the three maintenance strategies (corrective, scheduled and condition-based) can be modeled in a fictitious factory. The experiments carried out show that the lowest total costs is achieved in the fictitious factory with condition-based maintenance. The total cost forms a meaningful key figure that also accounts for the cost of late orders. In summary, the developed procedure serves SMEs as a reference point for simulating their maintenance and can be seen as a first step towards establishing a reference model.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeine Einleitung	1
1.2	Problemstellung und Forschungsfragen	1
1.3	Methoden zur Zielerreichung	2
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit	4
2	Grundlagen	5
2.1	Instandhaltung	5
2.2	Simulation	8
2.3	Auswahl der geeigneten Simulationsmethode	12
3	Stand der Wissenschaft	16
3.1	Grundsätzlicher Forschungsbedarf	16
3.2	Modellierung in verwandten Arbeiten	19
3.3	Fazit und Forschungslücke	30
4	Vorgehensweise zur Instandhaltungssimulation in KMU	34
4.1	Zielbeschreibung und Aufgabendefinition	36
4.2	Systemanalyse	37
4.3	Modellformalisierung	43
4.4	Implementierung in <i>AnyLogic</i>	48
4.5	Datenbeschaffung und –aufbereitung	53
4.6	Experimente	54
5	Simulationsstudie fiktives Unternehmen	57
5.1	Zielbeschreibung und Aufgabendefinition	57
5.2	Systemanalyse	58
5.3	Modellformalisierung (inkl. Daten)	60
5.4	Implementierung	68
5.5	Verifikation und Validierung	84
5.6	Experimente	85
6	Ergebnisse und Ausblick	101
6.1	Resultat in Bezug auf die Forschungsfragen	101
6.2	Grenzen und Einschränkungen des Modells	104

6.3	Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells	105
7	Anhang.....	108
8	Literaturverzeichnis	110
8.1	Fachliteratur	110
8.2	Online Quellen.....	114
8.3	Weitere Literatur	116
9	Abbildungsverzeichnis	118
10	Formelverzeichnis.....	120
11	Tabellenverzeichnis	121
12	Abkürzungsverzeichnis.....	122

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Problemstellung vorgestellt, die Zielsetzung formuliert und der Aufbau sowie die Struktur der Arbeit erläutert. Dazu findet sich eine Übersicht über das methodische Vorgehen zur Zielerreichung.

1.1 Allgemeine Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit der integrativen Simulation auf Werksebene unter stochastischen Einflussgrößen. Die Untersuchung der Instandhaltung bietet sich dabei als passendes Anwendungsgebiet an, da sie als Lösung für die Problematik der stochastischen Ausfälle von Maschinen einen großen Stellenwert einnimmt. Die Instandhaltung kann durch Vermeidung von unnötigen Maschinenausfallzeiten dazu beitragen, Produktionsausfälle und Verspätungen zu verhindern. Gleichzeitig ist es aber nicht erstrebenswert, durch überflüssige Instandhaltungsarbeiten unnötige Kosten zu erzeugen.¹ Die Methode der Simulation bietet Unternehmen ein Entscheidungshilfsmittel, wie die individuell passende Instandhaltungsstrategie zu gestalten ist. In vielen Fällen ist es vorteilhaft, die real existierenden Systeme in Modellen abzubilden und geplante Maßnahmen an diesen Modellen zu simulieren. Auf diese Weise können Maßnahmen getestet, bewertet und verglichen werden, bevor sie im realen System umgesetzt werden.²

1.2 Problemstellung und Forschungsfragen

Die kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) nehmen einen hohen Stellenwert in der europäischen Wirtschaft ein. Sie sind z.B. in Deutschland für 42% der Wertschöpfung und 56% der Arbeitsplätze verantwortlich.³ Nach Definition der EU sind KMU Unternehmen, die weniger als 250 Personen beschäftigen und entweder weniger als 50 Mio. € Jahresumsatz erzielen oder eine kleinere Bilanzsumme als 43 Mio. € aufweisen.⁴ KMU arbeiten im heutigen Marktumfeld oftmals mit geringen Redundanzen. Dieser Umstand mit einer suboptimalen Instandhaltung gepaart, kann zu hohen Gesamtkosten aufgrund von unvorhergesehenen Produktionsausfällen führen.⁵ Die in die Produktion eingebettete Instandhaltung ist ein komplexes System, zu dessen Betrachtung die Methode Simulation geeignet ist. Obwohl ein generelles Interesse unter KMU besteht, Simulationen einzusetzen, werden diese oftmals z.B.

¹ vgl. Gupta, Lawsirirat, 2006, S.307

² vgl. Grigoryev, 2018, S.7

³ vgl. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/_inhalt.html, Zugriff 09.03.2022

⁴ vgl. Europäische Kommission, 2003, S.39

⁵ vgl. Weißenbach, 2021, S.4ff

aufgrund des hohen Aufwands für die Implementierung nicht genutzt.⁶ Es ist ersichtlich, dass diese Unternehmen im Allgemeinen weniger freie Kapazitäten als internationale Großunternehmen haben, um eigene Simulationsabteilungen aufzubauen.⁷ Insofern sind in dieser Arbeit mit KMU alle Unternehmen angesprochen, die ähnlichen Kapazitätsbeschränkungen unterliegen. Obwohl in der Fachliteratur bereits Simulationsstudien zur Instandhaltung beschrieben sind, konnten bislang keine ganzheitlichen Lösungsansätze gefunden werden, mit denen KMU den Handlungsbedarf bezüglich ihrer Instandhaltung bestimmen können. Darum soll die vorliegende Arbeit eine Antwort auf die Frage liefern:

Wie können KMU mit Hilfe der Methoden der Modellierung und Simulation ihre Instandhaltungsstrategien überprüfen und Verbesserungspotentiale identifizieren?

Zur Beantwortung dieser vielschichten Fragestellung sollen unterstützend folgende Unterfragen geklärt werden:

- **Welche Ansätze und Module sind bereits in der Literatur beschrieben und wie können diese verallgemeinert werden?**
- **Wie kann ein verallgemeinertes Referenzmodell aus Sicht eines KMU gestaltet werden?**
- **Welche Ergebnisse liefert das gefundene Modell bei der Anwendung auf ein fiktives Unternehmen?**

Die Nicht-Ziele dieser Arbeit sind:

- Eine reale Datenerhebung - alle verwendeten Daten sind Dummy-Daten
- Eine analytische Betrachtung des Problems
- Eine Optimierung mittels Algorithmus
- Eine Entwicklung eines digitalen Schattens oder digitalen Zwillings

1.3 Methoden zur Zielerreichung

Vorrangig stützt sich die vorliegende Arbeit auf die *Design Science Research Methodology*, deren wesentliche Prozessschritte nach *Peppers et al.* in Abbildung 1 dargestellt sind. Die Entwicklung des sog. Artefakts nimmt darin eine Schlüsselrolle

⁶ vgl. Wiese, 2016, S.185ff

⁷ vgl. Weißenbach, 2021, S.1f

ein.⁸ Das Artefakt ist ein Mittel zur Problemlösung, dessen Form sehr vielfältig sein kann. Es kann sich sowohl um eine Gedankenstruktur (Framework, Referenzmodell), als auch um eine technische Lösung handeln.⁹ Während die Problemstellung hauptsächlich aus der Praxis resultiert, soll die Problemlösung auf vorhandenem Wissen aufbauen und die entwickelte Lösung wiederum das vorhandene Wissen mehrten.¹⁰ Dabei ist zu beachten, dass Artefakte oftmals von aufbauenden Arbeiten weiterentwickelt werden.¹¹

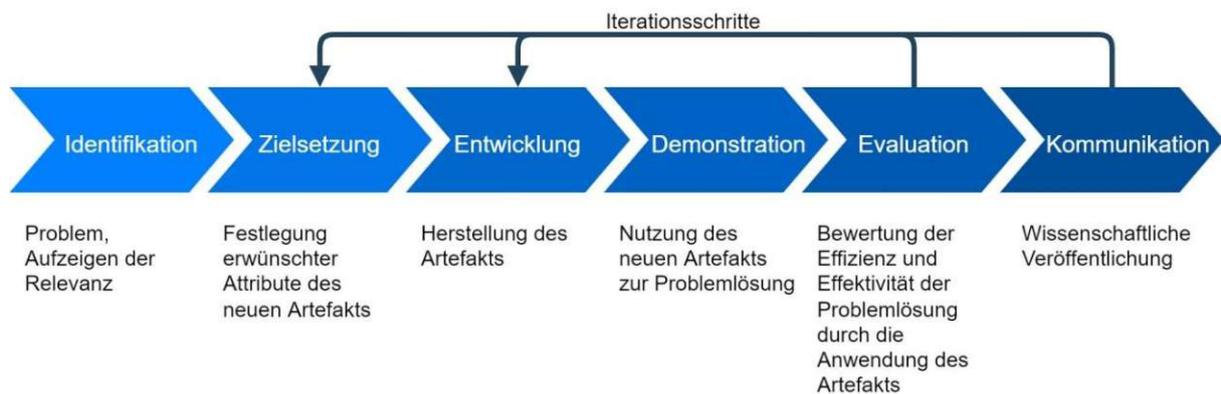


Abbildung 1: *Design Science Research* Prozess, eigene Darstellung angelehnt an Peffers et al.¹²

Bei dem in dieser Arbeit zu entwickelndem Artefakt handelt es sich um eine Vorgehensweise zur Entwicklung eines digitalen Modells der Instandhaltung, die KMU dabei unterstützen soll, ihre eigene Instandhaltung zu modellieren und aus Simulationsstudien Verbesserungspotenziale abzuleiten.¹³ Das Artefakt wird auf Basis einer Literaturrecherche entwickelt; die Eignung zur Problemlösung anhand eines fiktiven Unternehmens demonstriert und das Artefakt anschließend kommuniziert. Es bleibt aufbauenden Arbeiten überlassen, das Artefakt einer Evaluation mit realen Daten zu unterziehen und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Zu diesem Zweck werden abschließend Vorschläge zur Verfeinerung und Erweiterung des Artefakts angeboten. Zur Artefakterstellung werden des Weiteren die Methoden der Modellierung und Simulation verwendet, auf die in Kapitel 2.2 eingegangen wird.

In dieser Arbeit kommen die vier Methoden *Design Science Research*, Literaturrecherche, Modellierung und Simulation zum Einsatz.

⁸ vgl. Hevner et al., 2004, S.77

⁹ vgl. Peffers et al., 2008, S.49, Hevner et al., 2004, S.78f

¹⁰ vgl. Peffers et al., 2008, S.72, Hevner et al., 2004, S.80

¹¹ vgl. Hevner et al., 2004, S.80

¹² vgl. Peffers et al., 2008, S.54

¹³ Erläuterung Modellierung und Simulation s. Kapitel 2

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Im folgenden Kapitel werden Grundlagen erläutert und nötige Begriffe definiert. Anschließend wird der Stand der Wissenschaft zur Simulationstechnik der internen Produktions- und Logistikprozesse und deren Instandhaltung dargestellt. Dabei wird ein Fokus auf die Modellierung der Abnutzung, Ausfälle und Instandhaltung von Maschinen gelegt. Im Hauptteil der Arbeit wird eine Vorgehensweise zur Erstellung eines digitalen Modells entwickelt und dokumentiert, welches die ganzheitliche Instandhaltungssimulation in einem produzierenden Unternehmen abbildet. Der praktische Teil der Arbeit demonstriert die Anwendung des vorher dargestellten Simulationsmodells anhand einer fiktiven Fabrik. Nach der Modellierung werden Experimente zu verschiedenen Instandhaltungsstrategien unter einer manuellen Variation der Parameter durchgeführt. Nach der Beantwortung der Forschungsfragen werden abschließend Vorschläge erbracht, wie das Simulationsmodell in aufbauenden Arbeiten weiterentwickelt werden kann.

2 Grundlagen

In der Einleitung wurde das Ziel der Arbeit beschrieben, KMU eine Möglichkeit zu verschaffen, ihre eigene Instandhaltung durch Modellierung und Simulation zu untersuchen und zu verbessern. Dafür werden im Folgenden wichtige Begriffe aus den primären Themenbereichen Instandhaltung und Simulation erklärt.

2.1 Instandhaltung

Produktions- und Logistiknetzwerke beschreiben allgemein das integrierte Zusammenspiel verschiedener Fertigungsstandorte.¹⁴ Da sich diese Arbeit mit der Instandhaltung der Anlagen von KMU beschäftigt, sind in diesem Zusammenhang die räumlich nahen Netzwerke innerhalb eines Betriebsgeländes, also auf Werksebene, von besonderer Bedeutung. Die Knoten der internen Netzwerke bilden sich z.B. bei Maschinen und Lagerplätzen, also dort, wo die Warenströme innerhalb des Werksgeländes zusammenlaufen.¹⁵ Für die Logistik innerhalb eines Betriebs wurde bereits die Bezeichnung „Intralogistik“ eingeführt.¹⁶ Die Elemente der Intralogistik sind dabei die Verbindungsmittel zwischen den Knoten des werksinternen Logistik- und Produktionsnetzwerks.

Unter dem Begriff **Robustheit** oder **Resilienz** des Produktionsnetzwerkes soll die Fähigkeit verstanden werden, den Betrieb trotz Störungen möglichst verlustarm fortführen zu können oder den Zustand des störungsfreien Betriebes wieder herstellen zu können.¹⁷ In dieser Arbeit werden hauptsächlich ungeplante Ausfälle von Maschinen untersucht. Dies stellt eine typische Störung des Produktionsnetzwerks dar.¹⁸ Auch stochastische Zeiten für wertschöpfende und unterstützende Prozesse führen zu Unsicherheit in der Planung.¹⁹ Als Maßnahme zur Steigerung der Robustheit des Systems wird eine sinnvolle Instandhaltungsstrategie gesucht, die ein passendes Ersatzteilmanagement inkludiert.

Die **Instandhaltung** umfasst alle operativen und administrativen Tätigkeiten, welche die vorgesehene Funktion eines Objekts (hier Maschine) gewährleisten.²⁰ Nach DIN 31051 sind die Grundmaßnahmen der Instandhaltung:

Inspektion: „Prüfung auf Konformität der maßgeblichen Merkmale eines Objekts [...], durch Messung, Beobachtung oder Funktionsprüfung“²¹

¹⁴ vgl. <https://welt-der-bwl.de/Produktionsnetzwerk>, Zugriff 23.06.2021

¹⁵ vgl. Dittes, 2012, S.103f

¹⁶ vgl. Günther, 2006, S.5f

¹⁷ vgl. Scholten et al., 2020, S.1

¹⁸ vgl. Law, 1990, S.314

¹⁹ vgl. Law, McComas, 1997, S.88

²⁰ vgl. DIN 31051, 2019, S.4

Wartung: „Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats [...]“²²

Instandsetzung: „physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion eines fehlerhaften Objekts [...] wiederherzustellen“²³

Verbesserung: „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der immanenten Zuverlässigkeit und/oder Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit eines Objekts [...], ohne seine ursprüngliche Funktion zu ändern“²⁴ Die Verbesserung ist oftmals Bestandteil einer Generalüberholung.²⁵

Die Strategien der Instandhaltung lassen sich in vier verschiedene Kategorien unterteilen.²⁶

Ausfallgesteuerte Instandhaltung (engl. Corrective Maintenance - CM): „Instandhaltung, ausgeführt nach der Fehlererkennung, um ein Objekt wieder in einen Zustand zu bringen, in dem es eine geforderte Funktion erfüllen kann“.²⁷ Diese vermeintlich einfachste Form der Instandhaltung hat den Vorteil, dass Abnutzungsvorräte vollständig aufgebraucht werden; jedoch sind die Nachteile üblicherweise: lange Stillstandzeiten, Schwierigkeiten bei der Ersatzteilbeschaffung oder große Ersatzteillagerbestände, keine Planbarkeit der Ausfälle und gegebenenfalls ein höheres Risiko für Folgeschäden aufgrund abrupter Maschinenschäden.²⁸ Die ausfallgesteuerte Instandhaltung wird heutzutage oftmals durch neue Organisationsstrukturen und Technologien abgelöst.²⁹ Nichtsdestotrotz spielt sie gerade in KMU auch heute noch eine bedeutende Rolle.

Zeitgesteuerte Instandhaltung (engl. Scheduled Maintenance – SM): „Instandhaltung, durchgeführt nach einem festgelegten Zeitplan oder einer festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten“.³⁰ Hierbei wird die zeitlich terminierte Wartung mit einbezogen. Die typischen Aufgaben umfassen das Nachfüllen von Schmierstoffen, die Reinigung der Filteranlagen und gegebenenfalls das Tauschen von Verschleißteilen. Der Vorteil dieser Instandhaltungsform ist die einfache

²¹ DIN 31051, 2019, S.5

²² ebenda

²³ ebenda, S.6

²⁴ ebenda

²⁵ vgl. Strunz, 2012, S.16

²⁶ vgl. Matyas, 2016, S.120ff

²⁷ DIN EN 13306, 2018, S.38

²⁸ vgl. Strunz, 2012, S.297

²⁹ vgl. Matyas, 2016, S.29f

³⁰ DIN EN 13306, 2018, S.38

Planbarkeit und Umsetzung. Ein Nachteil ist, dass dabei oftmals der Abnutzungsvorrat der Teile nicht vollständig ausgenutzt wird.³¹

Zustandsgesteuerte Instandhaltung (engl. Condition Based Maintenance – CBM): „präventive Instandhaltung, die die Beurteilung des physischen Zustand, Analysen und die möglichen, daraus resultierenden Instandhaltungsmaßnahmen beinhaltet“.³² Hierbei wird versucht, die Abnutzungsvorräte bestmöglich auszunutzen und gleichzeitig Maschinenschäden vorzubeugen.³³ Die Voraussetzung dafür ist, dass sich ein aufgebrauchter Abnutzungsvorrat mit ausreichend großem Zeitpuffer messen lässt.³⁴ Der Maschinenzustand kann per Inspektion oder anhand moderner Sensorik überwacht werden. Die Überwachung kann dabei kontinuierlich oder zu diskreten Zeitpunkten, z.B. durch Anschließen eines Diagnosegeräts, erfolgen. Geräusche, Vibrationen, Verunreinigungsgrad, Temperaturentwicklung und elektrische Größen (z.B. Wirbelstromanalyse) sind typische Messwerte, die Auskunft über den Zustand einer Maschine geben.³⁵ In der Vision der Industrie 4.0 sollen Maschinen in Zukunft ihren Zustand überwachen und ihre Wartung selbst steuern. Hierbei nimmt die Cloudtechnologie einen wachsenden Stellenwert ein.³⁶ Die Maschinen zeichnen ihre von der Sensorik bereitgestellten Daten auf und geben sie an die Instandhaltungsplanung weiter. Auf diese Weise kann das Instandhaltungspersonal frühzeitig Probleme erkennen und die nötigen Schritte in die Wege leiten.³⁷

Vorausschauende Instandhaltung (engl. Predictive Maintenance – PM): „zustandsorientierte Instandhaltung, die nach einer Vorhersage, abgeleitet von wiederholter Analyse oder bekannten Eigenschaften und Bestimmung von wichtigen Parametern, welche den Abbau des Objekts kennzeichnen, durchgeführt wird“.³⁸ Hierbei werden lastspielbasierte Berechnungen mit einbezogen, um das Versagen der Komponenten vorherzusagen. Das Ziel ist es, einen günstigen Instandhaltungsplan zu erarbeiten und dynamisch anzupassen. Die Entwicklung dieser Methode ein aktuelles Forschungsthema.³⁹ Um einen sinnvollen Rahmen für die vorliegende Arbeit zu finden, wurde diese Strategie nicht weiter betrachtet. Es ist aber denkbar, sie in einer zukünftigen Iteration des Modells zu integrieren.

Welche Strategie zielführend ist, lässt sich nicht pauschal sagen, sondern muss für jeden Anwendungsfall überprüft werden. Dabei spielen verschiedene Aspekte eine

³¹ vgl. Strunz, 2012, S.297

³² DIN EN 13306, 2018, S.35

³³ vgl. Strunz, 2012, S.299

³⁴ vgl. Matyas, 2016, S.125

³⁵ vgl. ebenda, S.133f

³⁶ vgl. Wabner, 2015, S.1f

³⁷ vgl. ebenda, S.2

³⁸ DIN EN 13306, 2018, S.35

³⁹ vgl. Abdulkarim et al., 2011, S.644

Rolle.⁴⁰ So ist es z.B. wichtig, die Verkettung und die Redundanz der Anlagen zu berücksichtigen: Wenn der Ausfall einer Maschine die Produktion erheblich stört, ist es sinnvoller eine andere Strategie zu wählen, als wenn die Maschine durch eine andere kurzfristig ersetzt werden kann und der Betrieb ansonsten ungestört weiterlaufen kann. Zeitliche Faktoren, wie z.B. Arbeitszeiten des Instandhaltungspersonals, Zeitdauern für Instandsetzung und die Beschaffungszeit für Ersatzteile sind weitere Komponenten, die einen erheblichen Einfluss auf die Instandhaltungsstrategie haben können, da diese sinnvoll aufeinander abgestimmt werden müssen. Die Instandhaltung in die wertschöpfenden Produktionsprozesse zu integrieren ist also eine komplexe Aufgabe, die bestenfalls bereits bei der Betriebsstättenplanung berücksichtigt wird.⁴¹

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Aufgaben der Instandhaltung und die Instandhaltungsstrategien klar definiert sind; die Auswahl der passenden Instandhaltungsstrategie jedoch eine komplexe Aufgabe darstellt.

2.2 Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit soll KMU die Möglichkeit erarbeitet werden, ihre Instandhaltung mit der Methode der Modellierung abzubilden und der Methode der Simulation den aktuellen Stand ihrer Instandhaltung zu beurteilen und Verbesserungspotentiale aufzudecken. Zur Erstellung eines Simulationsmodells ist ein Verständnis der folgenden Begriffe notwendig.

Simulation ist die Methode des Nachbildens eines Systems aus der Wirklichkeit in einem Modell, an dem Experimente durchgeführt werden, mit der Absicht zu Erkenntnissen über das reale System zu gelangen.⁴² Die Simulation ist als angewandte Methode bereits weit verbreitet. Darüber hinaus ist sie ein aktuelles Forschungsgebiet, das aufgrund seiner Vielfältigkeit und Komplexität noch viel Raum für neue Forschung bereithält.⁴³ Die Problemstellung einer Simulationsstudie ist oft sehr individuell und bezogen auf den vorliegenden Anwendungsfall.

Systeme stehen bei Simulationen im Mittelpunkt. In dieser Arbeit ist das betrachtete System das Werk eines KMU, mit besonderem Fokus auf dessen Instandhaltung. Wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht ein System aus einer Systemgrenze gegenüber der Umwelt und aus Elementen, die selbst Subsysteme sein können. Diese weisen eigene Verhaltensregeln und Zustände auf. Auch die

⁴⁰ vgl. Matyas, 2016, S.120

⁴¹ vgl. ebenda, S.7

⁴² vgl. VDI 3633, 2018, S.28

⁴³ vgl. Mourtzis, 2020, S.1927f

Wechselwirkungen der Elemente untereinander und des Gesamtsystems mit der Umwelt sind Systembestandteile.⁴⁴

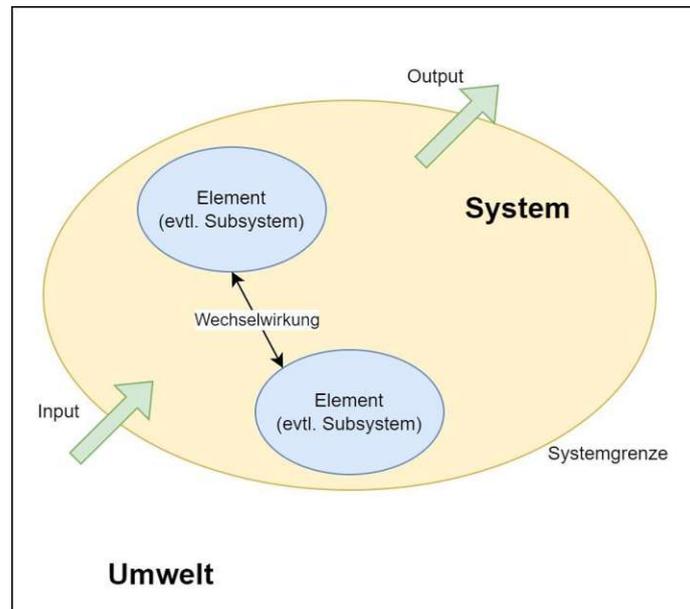


Abbildung 2: Das System und seine Bestandteile, eigene Darstellung nach VDI 3633⁴⁵

Systeme lassen sich mit verschiedenen Attributen beschreiben.⁴⁶

- Dynamisch – Systemverhalten ist nicht nur von den Inputs abhängig, sondern auch vom Zeitverlauf. Im Gegensatz dazu stehen die statischen Systeme, die auf jeden Input einen Output liefern - unabhängig vom Zeitverlauf.⁴⁷
- Stochastisch – Zufall hat Einfluss auf das Systemverhalten. Der Output hängt nicht nur von den Inputs ab, sondern auch von Zufallsprozessen. Dem gegenüber stehen die deterministischen Prozesse, bei welchen der Output unter Kenntnis aller Parameter vorhersagbar ist.⁴⁸
- (Zeit)diskret – Änderungen treten mit ihrem vollen Effekt abrupt ein.⁴⁹
- (Zeit)kontinuierlich – Änderungen treten allmählich mit stetigen Verläufen ein.⁵⁰
- Komplex – Es besteht eine größere Anzahl innerer Wechselwirkungen und Abhängigkeiten.⁵¹ Diese erschweren die Vorhersage des Systemverhaltens

⁴⁴ vgl. VDI 3633, 2018, S.33

⁴⁵ vgl. ebenda

⁴⁶ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Systemeigenschaften>, Zugriff 16.07.2021

⁴⁷ vgl. Wunsch, Schreiber, 2006, S.73f,

https://de.wikibooks.org/wiki/Einf%C3%BChrung_in_die_Systemtheorie/_Dynamische_Systeme, Zugriff 09.07.2021

⁴⁸ vgl. Wunsch, Schreiber, 2006, S.73f, S.80,

⁴⁹ vgl. VDI 3633, 2018, S.10

⁵⁰ vgl. ebenda, S.18

und resultieren, besonders im Bereich der Kapazitätsgrenzen des Systems, in Anfälligkeit gegenüber Störungen in den Knotenpunkten.⁵² Komplexe Systeme können nur ganzheitlich optimiert werden, indem (wechselwirkende) Einzelmaßnahmen aufeinander abgestimmt werden.⁵³

Die Begriffe „diskret“ und „kontinuierlich“ sind üblicherweise in Bezug auf den zeitlichen Ablauf gemeint, aber auch das Wertespektrum kann kontinuierlich oder diskret vorliegen.

Modelle sind Abbildungen der Wirklichkeit bzw. des Systems. Naturgemäß kann es keine perfekte Abbildung geben; es ist die Aufgabe der Modellierer*in, die Wirklichkeit sinnvoll zu abstrahieren. Es gilt dabei der Grundsatz: So abstrakt wie möglich und so vollständig wie nötig. Mit anderen Worten: Das Modell soll ausschließlich die relevanten Aspekte des Systems widerspiegeln.⁵⁴

Referenzmodelle sind Modelle mit dem Zweck, als allgemeine Vorlage zu dienen, aus denen Lösungen für spezifische Anwendungsfälle abgeleitet werden können.⁵⁵ Referenzmodelle besitzen üblicherweise einen Empfehlungscharakter und beinhalten für eine Klasse von Problemen einen allgemeingültigen Lösungsansatz.⁵⁶ Des Weiteren spielt die Akzeptanz der Anwender*innen des Modells für die Bezeichnung Referenzmodell eine wichtige Rolle. Ein vorgeschlagenes Modell wird sinnvollerweise erst als Referenzmodell gesehen, wenn weitere Anwendungsfälle daraus abgeleitet werden.⁵⁷

Parameter sind Systemgrößen vor einem Simulationslauf festgelegt werden und sich üblicherweise währenddessen nicht verändern. Sie beinhalten neben numerischen Größen und stochastischen Verteilungen auch qualitative Größen, wie z.B. Variationen des Fabrik-Layouts. Restriktionen (Beschränkungen) sind ebenfalls Parameter, welche das Systemverhalten in bestimmten Punkten einschränken. Die Parameter sind wesentliche Bestandteile einer Simulation und müssen dokumentiert werden, um ein sinnvolles Simulationsergebnis zu erhalten.⁵⁸

Variablen sind Systemgrößen, die sich über die Laufzeit verändern können. Sie sind geeignet, um den jeweiligen Systemzustand dynamisch festzuhalten.

⁵¹ vgl. Dittes, 2012, S.2f

⁵² vgl. ebenda, S.123

⁵³ vgl. ebenda, S.3

⁵⁴ vgl. VDI 3633, 2018, S.3

⁵⁵ vgl. Thomas, 2006, S.8

⁵⁶ vgl. ebenda, S.12f

⁵⁷ vgl. ebenda, S.16

⁵⁸ vgl. VDA 4811, 2013, S.18

Experimente sind einzelne oder Reihen von Simulationsläufen, die eine bestimmte Konfiguration des Modells benutzen und dazugehörige Ergebnisse liefern.⁵⁹

Visualisierung ist die Aufbereitung und Darstellung der Simulationsergebnisse.⁶⁰ Ohne eine verständliche Darstellung sind die Ergebnisse der Studie schwer zu deuten und die Entscheidungsableitung dementsprechend gehemmt.⁶¹ Im Allgemeinen kann man die Visualisierung von Simulationen in zwei Kategorien einteilen: Monitoring und Animation. Unter Monitoring versteht man die Aufarbeitung der Zustände und Ergebnisse mittels Graphen und numerischen Werten.⁶² Unter Animation versteht man eine (vereinfachte) Abbildung des wirklichen Ablaufs zur Beobachtung der einzelnen Komponenten.⁶³ Die Animation wird oft zur qualitativen Verdeutlichung eingesetzt, während die oftmals aussagekräftigeren Ergebnisse des Monitorings verwendet werden, um mit fachkundigem Publikum zu kommunizieren.

Simulationen können nach Automatisierungsgrad der Datenübertragung in **digitales Modell**, **digitaler Schatten** und **digitaler Zwilling** (engl.: *digital model*, *digital shadow*, *digital twin*) unterschieden werden.⁶⁴ Ein digitales Modell als Grundlage für klassische Simulation hat keine automatisierte Datenübertragung. Ein digitaler Schatten speist sich aus Echtzeitdaten des realen Systems. Ein digitaler Zwilling hat darüber hinaus die Möglichkeit, Daten an das reale System zurückzusenden und dieses zu beeinflussen.⁶⁵ Die Grenze zwischen realem System und virtuellem Modell soll auf diese Weise verkleinert werden und verschwimmen.⁶⁶ Dies wird durch gestiegene Rechenkapazitäten und Geschwindigkeiten ermöglicht.⁶⁷ Die vorliegende Arbeit bewegt sich im Bereich des digitalen Modells und der klassischen Simulation mit manueller Datenübertragung. Das in der Simulationsstudie beschriebene Modell kann in weiterführenden Arbeiten mit Echtzeitdaten bespeist und als digitaler Schatten oder digitaler Zwilling weiterentwickelt werden.⁶⁸ So wäre es im Rahmen des Themengebiets der Instandhaltung beispielsweise denkbar, große Produktionsnetzwerke zu überwachen und die präventive Instandhaltung in Echtzeit zu steuern.

Verifizierung beschreibt den Vorgang, bei dem ein Modell auf seine logische Richtigkeit überprüft wird.⁶⁹ Dies geschieht üblicherweise unter der Einbeziehung

⁵⁹ vgl. VDI 3633, 2018, S.29

⁶⁰ vgl. VDI 3633, Blatt 11, 2009, S.3f

⁶¹ vgl. VDA 4811, 2013, S.12

⁶² vgl. VDI 3633, Blatt3, 1997, S.18

⁶³ vgl. ebenda, S.19

⁶⁴ vgl. Kritzinger et al., 2018, S.1017

⁶⁵ vgl. ebenda, S.1017f

⁶⁶ vgl. Errandonea et al., 2020, S.2f

⁶⁷ vgl. Bresler, 2020, S.324

⁶⁸ vgl. Kritzinger et al., 2018, S.1020

⁶⁹ vgl. VDI 3633, 2018, S.36

weiterer beteiligter Personen, damit sie sich von der logischen Richtigkeit des Modells überzeugen können.⁷⁰

Validierung beschreibt Vorgänge, bei denen unter Anwendung verschiedener Methoden die Güte eines Modells überprüft wird.⁷¹ Dabei werden dem Modell Daten zugeführt, die ein bekanntes Ergebnis provozieren sollen.⁷² Außerdem ist es sehr vorteilhaft, wann immer möglich, die Grundbausteine der Simulationssoftware zu verwenden, da diese bereits einen Verifizierungs- und Validierungsprozess durchlaufen haben.⁷³ So muss sich die Anwender*in der Software nicht mit dem Code-Fundament aufhalten, sondern kann direkt das Modell in die entsprechende Baustein-Sprache übersetzen. Dann muss lediglich die Logik des aus Grundbausteinen zusammengesetzten Modells überprüft werden. Im Praxisteil dieser Arbeit werden allerdings schnell die begrenzten Möglichkeiten der Grundbausteine ersichtlich; die Wirklichkeit kann nur stark vereinfacht oder mit teilweise unübersichtlichen Konstruktionen abgebildet werden. Sind weitere Details oder Umformulierungen nötig, müssen diese selbst programmiert werden.

Die **Datenbeschaffung** spielt eine entscheidende Rolle im Entwicklungsprozess einer Simulationsstudie.⁷⁴ Die Daten beschreiben die Wirklichkeit quantitativ. Ohne ausreichend genaue Daten ist es nicht möglich, zu sinnvollen Aussagen über die Wirklichkeit zu gelangen.⁷⁵ Die Erhebung der Daten kann für manche Simulationsstudien, einen großen Anteil der Gesamtarbeitszeit in Anspruch nehmen. In der vorliegenden Arbeit wird keine Datenerhebung durchgeführt, es werden stattdessen sog. Dummy-Daten verwendet.⁷⁶

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Simulation hauptsächlich aus zwei Schritten besteht. Zunächst wird das System durch die Modellierung abgebildet, dann werden an dem entstandenen Modell Experimente durchgeführt, die zu einem Wissensgewinn beitragen. Die Modellierer*in ist in großem Maße für die Umsetzung der anwendungsspezifischen Gegebenheiten verantwortlich.

2.3 Auswahl der geeigneten Simulationsmethode

Die Methoden, die aktuell für Simulation dynamischer Systeme eingesetzt werden, sind *diskrete Simulation*, *agentenbasierte Simulation* und *System Dynamics*.⁷⁷

⁷⁰ vgl. Law, 2019, S.1403

⁷¹ vgl. VDI 3633, 2018, S.35

⁷² vgl. Law, 2019, S.1413

⁷³ vgl. VDA 4811, 2013, S.15

⁷⁴ vgl. ebenda

⁷⁵ vgl. Mayer et al., 2020, S.5

⁷⁶ vgl. https://en.wikipedia.org/wiki/Dummy_data, Zugriff 13.05.2022

⁷⁷ vgl. Grigoryev, 2018, S.12f

Eine **diskrete Simulation** stellt das System so dar, dass es zu bestimmten Zeitpunkten in einen neuen Zustand kommt. Die Zeiträume dazwischen werden nicht betrachtet.⁷⁸ Dem gegenüber stehen die kontinuierlichen Simulationsmethoden, die das Systemverhalten durchgängig abbilden. Die diskreten Zustandsänderungen bieten den Vorteil, dass stochastische Elemente abgebildet werden können.⁷⁹ Die Methode der diskreten Simulation ist geeignet, um Systeme mit einem niedrigen Abstraktionsgrad zu modellieren.⁸⁰ Sie wird in dieser Arbeit eingesetzt, um die Produktion auf Werksebene und die Instandhaltungsprozesse zu modellieren.

Die **agentenbasierte Simulation** geht davon aus, dass alle am Prozess beteiligten Elemente eigenen Entscheidungsregeln folgen und miteinander, sowie mit der Umwelt, interagieren können.⁸¹ Das Systemverhalten entsteht dabei nicht aus einer vorgegebenen Logik, sondern entwickelt sich natürlich aus der Interaktion der Agenten. Dabei können auch passive Elemente als Agenten modelliert werden; z.B. können einem Straßenabschnitt verschiedene Zustände zugewiesen werden (Verschmutzungsgrad, Alter, Anzahl der Überrollungen durch unterschiedliche Fahrzeuge, etc.).⁸² Es wird erwartet, dass mit dem weiteren Fortschritt der Industrie 4.0 die agentenbasierte Simulation an Bedeutung gewinnt.⁸³ Die agentenbasierte Methode deckt die gesamte Bandbreite der Abstraktionsgrade ab.⁸⁴ Die agentenbasierte Methode nutzt Hierarchien, um die Zugriffsmöglichkeiten der Agenten zu klären. Der sog. *Main-Agent* ist das „Spielfeld“, in dem sich alle anderen Agenten bewegen. Ob der Einsatz der agentenbasierten Methode geeignet ist, lässt sich intuitiv anhand der Frage beantworten: Sind im realen System individuelle Komponenten vorhanden, die sich als Agenten interpretieren lassen?⁸⁵ In dieser Arbeit werden Maschinen untersucht, die jeweils einer individuellen Abnutzung unterliegen, die zu individuellen Zeitpunkten behandelt werden. Somit lässt sich die Frage mit „Ja“ beantworten und der Einsatz der agentenbasierten Methode in dieser Arbeit ist sinnvoll.

Unter **System Dynamics** versteht man eine Simulationsmethode, die deterministische Systeme mit komplexen Wechselwirkungen beschreiben kann. Die Wechselwirkungen werden durch mathematische Zusammenhänge ausgedrückt, die voneinander abhängige Differentialgleichungen erster Ordnung sind.⁸⁶ Die Methode der System Dynamics ist geeignet, um Systeme mit einem hohen Abstraktionsgrad

⁷⁸ vgl. VDI 3633, 2018, S.10

⁷⁹ vgl. <https://de.mathworks.com/videos/understanding-discrete-event-simulation-part-3-leveraging-stochastic-processes-1494968826974.html>, Zugriff 29.06.2022

⁸⁰ vgl. Grigoryev, 2018, S.13

⁸¹ vgl. Scholz-Reiter, Höhns, 2012, S.301ff

⁸² vgl. Gallab et al., 2016, S.1213

⁸³ vgl. Bracht et al., 2018, S.133

⁸⁴ vgl. Grigoryev, 2018, S.13

⁸⁵ vgl. Siebers et al, 2010, S.205

⁸⁶ vgl. Borshchev, Grigoryev, 2020, S.8

und kontinuierlichen, deterministischen Veränderungen zu modellieren.⁸⁷ Es ist denkbar, die Zustände der Maschinenkomponenten und deren Abnutzung mit dieser Methode darzustellen.⁸⁸ Da das System an vielen Stellen stochastisch behaftet ist, wird in der vorliegenden Arbeit der Ansatz der System Dynamics nicht weiter verfolgt.

Eine **integrierte Simulation** verbindet zwei oder mehrere Simulationsmethoden mit der Absicht, Zusammenhänge besser zu beleuchten, wenn eine einzige Methode nicht ausreicht. Die wichtigste Voraussetzung für einen integrierten Ansatz sind in der Software vorhandene Schnittstellen. Im besten Fall steht eine komplette Integration der verschiedenen Methoden in einem einzigen Softwarepaket zur Verfügung.

Oftmals wird der Vergleich zwischen analytischen Modellen und Simulationsmodellen gezogen. Die analytischen Methoden finden dabei primär in Form von Tabellenkalkulationen statt, die als Werkzeug sehr weit verbreitet sind.⁸⁹ Die Ergebnisse von Simulationen können eine ähnlich hohe Güte wie die analytischer Modelle erreichen.⁹⁰ Das vorliegende Problem der Instandhaltung von Maschinen mit weiteren Agenten, die miteinander interagieren, ist komplex, dynamisch und stochastisch.⁹¹ Anstatt sich auf die vermeintlichen Unzulänglichkeiten der analytischen Methoden zu konzentrieren, wird folgend die Eignung der agentenbasierten und ereignisdiskreten Simulation zur Lösung des Problems dargestellt. Das dynamisch-komplexe Systemverhalten ergibt sich auf natürliche Weise aus dem Verhalten der Agenten und ihren Wechselwirkungen untereinander.⁹² Für bestimmte Aspekte des Systems eignet sich der *top-down* Ansatz der ereignisdiskreten Simulation (z.B. Produktionsprozess: strikte Abläufe mit oftmals nur wenigen Wechselwirkungen).⁹³ Für andere Aspekte eignet sich ein *bottom-up* Ansatz der agentenbasierten Simulation (z.B. Abnutzungsprozess der Maschinen und ihre Wechselwirkungen mit anderen Systemkomponenten). Die stochastische Natur des Systems kann mit Hilfe der ereignisdiskreten Modellierweise nachgebildet werden.⁹⁴

Heutzutage gibt es auf dem Markt eine Vielzahl an Programmen für unterschiedliche Modellierungs- und Simulationsanwendungen.⁹⁵ Die gewählte Software ist ein wichtiges Element für die Akzeptanz der gesamten Simulationsstudie. Eine weite Verbreitung und eine längere Historie von erfolgreichen Projekten steigert das Vertrauen in die jeweilige Software.⁹⁶ Das Softwarepaket *AnyLogic* kann eine

⁸⁷ vgl. Grigoryev, 2018, S.13

⁸⁸ vgl. Scheffer et al., 2016, S.3351

⁸⁹ vgl. Siebers et al., 2010, S.209

⁹⁰ vgl. Rezg, Chelbi, Xie, 2005, S.233f

⁹¹ vgl. Alabdulkarim et al., 2011, S.637

⁹² vgl. Gallab et al., 2016, S.1371f

⁹³ vgl. Alabdulkarim et al., 2011, S.638

⁹⁴ vgl. Siebers et al., 2010, S.206

⁹⁵ vgl. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_computer_simulation_software, Zugriff 22.05.2020

⁹⁶ vgl. Opp, 2020, S.81

weitreichende Etablierung in der Industrie vorweisen.⁹⁷ Es ist außerdem für die Instandhaltungssimulation geeignet, da es agentenbasierte und diskrete Modellierung in einer einzigen Entwicklungsumgebung mit übersichtlicher Benutzeroberfläche zur Verfügung stellt.⁹⁸ Um die stochastischen Elemente realitätsgetreu abzubilden, steht eine große Auswahl stochastischer Verteilungsfunktionen zur Verfügung.⁹⁹ Wo die vordefinierten Elemente nicht ausreichen, kann das Modell mittels Java-Code angepasst werden.¹⁰⁰ Des Weiteren besteht die Möglichkeit, auf den integrierten *Cloudservice* zum kollaborativen Arbeiten und zur Bewältigung komplexer Modelle mit erweiterten Rechenkapazitäten zuzugreifen.¹⁰¹

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Methode der Integrierten Simulation aus agentenbasierter und ereignisdiskreter Simulation geeignet ist, um ein komplexes Problem, wie die Instandhaltung in einem KMU, zu modellieren und zu untersuchen. Es ist ratsam, eine Softwareumgebung zu verwenden, die beide Modellierungsarten integriert. Dafür wurde hier das Softwarepaket *AnyLogic* als passend identifiziert. Herauszustellen ist, dass auch andere aktuelle und zukünftige Softwareumgebungen auf dem Markt existieren, die zu diesem Zweck angewendet werden können.

⁹⁷ vgl. Mayer et al., 2020, S.5

⁹⁸ vgl. Gallab et al., 2016, S.1216, Siebers et al., 2010, S.209, <https://www.AnyLogic.com/features/>, Zugriff 06.08.2021

⁹⁹ vgl. <https://AnyLogic.help/AnyLogic/stochastic/probability-distributions.html>, Zugriff 27.03.2022

¹⁰⁰ vgl. Gallab et al., 2016, S.1216

¹⁰¹ vgl. <https://cloud.AnyLogic.com/models>, Zugriff 06.08.2021

3 Stand der Wissenschaft

Nachdem im vorhergehenden Kapitel die grundlegenden Begriffe bezüglich Instandhaltung und Simulation geklärt wurden, wird im folgenden Kapitel der Stand der Wissenschaft bezüglich Instandhaltungssimulation dargestellt und die Forschungslücke besonders im Hinblick auf die Bedürfnisse der KMU erarbeitet.¹⁰²

3.1 Grundsätzlicher Forschungsbedarf

Um den grundsätzlichen Forschungsbedarf zu untermauern, wird folgend der Zustand von Simulation und Instandhaltung in KMU sowie dafür relevante Standards beschrieben.

Simulation in KMU

Nach einer Erhebung durch *Wiese* sind lediglich ein Viertel der KMU interessiert, Simulationen in Zukunft einzusetzen.¹⁰³ Als Gründe werden der hohe Zeitaufwand und die hohen Kosten für Lizenzen der entsprechenden Simulationsprogramme genannt. Es besteht in diesem Sinne jedenfalls ein Entwicklungsbedarf für Lösungen, die KMU als Zielgruppe im Blick haben.¹⁰⁴

Mayer et al. bemängeln, dass in Unternehmen Simulation oft als einmalige Aufgabe oder als Nebentätigkeit mit hoher Personalfuktuation durchgeführt wird. Dadurch werden die Modelle oft nicht weiterverwendet und die Einarbeitungszeit wird stark erhöht. Sie plädieren für die Einrichtung von unternehmensweit vernetzten Simulationsarbeitsgruppen, um Wissen zu sichern und die Modelle eng mit den aktuellen Prozessen zu verknüpfen.¹⁰⁵ Die Einrichtung von Abteilungen, die sich ausschließlich mit der Thematik der Simulation beschäftigen, ist für KMU ebenfalls schwieriger als für große Unternehmen.

In der Zukunftsvision der Industrie 4.0 ist die Produktion komplett vernetzt.¹⁰⁶ Dies beinhaltet eine vollständige Überwachung der eingesetzten Maschinen, sodass deren Zustände in Echtzeit gemessen und ausgewertet werden können, um möglichst einen digitalen Schatten oder digitalen Zwilling mit vorausschauender Instandhaltung zu ermöglichen.¹⁰⁷ Diesen Zustand angesichts der oben genannten Zurückhaltung der KMU bezüglich Simulation in kurzer Zeit zu erreichen ist

¹⁰² Vorgehensweise der Recherche s. Anhang

¹⁰³ vgl. *Wiese*, 2016, S.185f

¹⁰⁴ vgl. ebenda, S.187f

¹⁰⁵ vgl. *Mayer et al.*, 2020, S.16

¹⁰⁶ vgl. *Kagermann*, 2020, S.20

¹⁰⁷ vgl. ebenda, S.62

schwierig. Es erscheint daher sinnvoll, kleinschrittig vorzugehen, was ebenfalls Effizienzsteigerungen hervorrufen kann.¹⁰⁸

Instandhaltung in KMU

KMU haben oftmals eine hohe Auslastung ihrer Anlagen; damit sind entsprechend geringe Redundanzen verbunden und die gesamte Produktion im Unternehmen ist vom reibungslosen Betrieb der Engpassressourcen abhängig.¹⁰⁹ Nach wie vor greifen KMU vielfach auf die Methoden ausfall- und zeitgesteuerter Instandhaltung zurück. Daraus lässt sich schließen, dass das Instandhaltungsmanagement in KMU zum aktuellen Stand oftmals ungenutztes Potential beinhaltet.¹¹⁰

Nach *Weißbach* ist es außerdem für kleinere Unternehmen generell schwerer, eine Kombination aus verschiedenen Instandhaltungsstrategien zu betreiben, da sie ein kleineres Instandhaltungsvermögen als größere Unternehmen besitzen.¹¹¹

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass für die Anwendung der Methode der Simulation und die Instandhaltung in KMU noch viel Potential besteht. Es ist also lohnend, durch designorientierte Forschung Lösungen zu entwickeln, die die Zugriffs- und Nutzungsbarrieren der entsprechenden Technologien senken. Die bereitgestellten Lösungen sollten möglichst kostengünstig, leicht umsetzbar und mit einem geringen Investitionsrisiko behaftet sein, um die Voraussetzung für eine gute Akzeptanz unter KMU zu erhalten.

Standardisierung bezüglich Simulation und Instandhaltung

Standards sollen Unternehmen Lösungen für wiederkehrende Aufgaben bereitstellen; dies schließt den Aufgabenbereich der Simulation mit ein. Für KMU sind Standardisierungen besonders hilfreich, da sie die Einarbeitungszeit verkürzen und die Verlässlichkeit der Ergebnisse erhöhen können.¹¹² Es existiert bereits eine Auswahl an Standards und Richtlinien, die sich allgemein mit Simulation beschäftigen. *DIN EN 13306* und *DIN 31051* beschäftigen sich mit den Begriffen der Instandhaltung.¹¹³ *VDA 4811* beschäftigt sich mit den Qualitätskriterien für Simulationsstudien in der Ablaufsimulation. Hier findet sich eine allgemein anerkannte Vorgehensweise und eine Checkliste, die alle relevanten Punkte der Vorgehensweise zur Überprüfung bereithält.¹¹⁴ *VDI 3633* beschäftigt sich mit der Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Hier findet sich

¹⁰⁸ vgl. Kagermann et al., 2020, S.17

¹⁰⁹ vgl. Weißbach, 2012, S.4f

¹¹⁰ vgl. ebenda, S.7

¹¹¹ vgl. ebenda, S.32

¹¹² vgl. https://sbs-sme.eu/sites/default/files/A%20Practical%20Guide%20for%20SMEs_DE.pdf, Zugriff 22.05.2022

¹¹³ vgl. DIN EN 13306, 2018, DIN 31051, 2019

¹¹⁴ vgl. VDA 4811, 2013

besonders im Grundlagenbereich eine umfangreiche Aufstellung der wichtigsten Begriffe.¹¹⁵ In Tabelle 1 sind die untersuchten Vorgehensweisen zur Erstellung von Simulationsstudien zusammengefasst. Es ist erkennbar, dass diese grob die gleichen Schritte beinhalten. Am Anfang steht eine Planungsphase, an welche die Modellierungsphase anschließt. Anschließend legen alle untersuchten Vorgehensweisen den Fokus auf die Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente. Außerdem wird stets ein begleitender Verifikations- und Validierungsprozess (V&V) und ein Datenbeschaffungsprozess benötigt.¹¹⁶

Vorgehensweise aus:	Planung	Modellierung	Experiment Design	V&V	Daten Prozess
<i>VDI 3633 Blatt 1</i> (2014) Ursprung: <i>Rabe et al.</i> (2008) ¹¹⁷	•	• Unterteilt in: Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung	•	•	•
<i>VDA 4811</i> (2013) Ursprung: Projekt <i>AssistSim</i> (2009) ¹¹⁸	•	• Unterteilt in: Analyse und Modellerstellung	•	•	•
<i>Law und Kelton</i> (1991)	•	• Unterteilt in: Modellerstellung und Implementierung	•	•	•

Tabelle 1: Vorgehensweisen für Simulationsstudien in der Literatur¹¹⁹

Die Wahl der Vorgehensweise nach *VDI 3633* erscheint sinnvoll, da die Modellierung mit den Unterschritten: Systemanalyse, Modellformalisierung und Implementierung am detailliertesten Unterschieden wird, was möglicherweise eine Erleichterung darstellt.

Opp sieht die Vorteile der Standardisierung und erwartet von jeder Simulationsexpert*in eine Verantwortung, nachvollziehbar zu arbeiten und möglichst auf vorhandener Arbeit aufzubauen. Er fordert gleichzeitig, sich bei einem so kreativen Prozess wie der Simulation nicht unnötig von vermeintlichen Standards einschränken zu lassen.¹²⁰ Quelloffene (*open source*) Software kann dazu beitragen,

¹¹⁵ vgl. *VDI 3633*, 2018

¹¹⁶ Vgl. *Law, Kelton*, 1991, S.107f; *VDA 4811*, 2013, S.10f; *VDI 3633*, 2018, S.18ff

¹¹⁷ vgl. *Rabe et al.*, 2008, S.5

¹¹⁸ vgl. *Bogon et al.*, 2012, S.2912

¹¹⁹ ○: Phase ist nicht enthalten; ●: Phase ist enthalten

¹²⁰ vgl. *Opp*, 2020, S.72

die Standardisierung voranzutreiben.¹²¹ Es gibt jedoch kaum strukturierte Anlaufstellen, um quelloffene Simulationsmodelle auszutauschen. Es mangelt an Literatur, die sich mit den handwerklichen Fähigkeiten der Instandhaltungsmodellierung oder auch der agentenbasierten Simulation generell befasst.¹²² In der agentenbasierten Modellierung haben sich noch keine Standards durchgesetzt, was hinderlich für den Einsatz in der Unternehmensplanung ist.¹²³ Es besteht genereller Forschungsbedarf zu Referenzmodellen im Umgang mit den Methoden der Industrie 4.0.¹²⁴

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass KMU in besonderer Weise von Standardisierung profitieren. Es existieren bereits einige Standards, die sich mit Simulation und Instandhaltung getrennt auseinandersetzen. Ein Standard oder ein Referenzmodell, das sich mit der Instandhaltungssimulation befasst, konnte nicht gefunden werden. Zur generellen Durchführung einer Simulationsstudie stehen verschiedene akzeptierte Vorgehensweisen zur Auswahl, deren grobe Abläufe sich nur wenig voneinander unterscheiden. Die VDI 3633 bietet mit der Unterscheidung in Systemanalyse, Modellformalisierung und Implementierung die detaillierteste Aufschlüsselung der Modellierungsphase, was möglicherweise die Modellierung erleichtert.

3.2 Modellierung in verwandten Arbeiten

In diesem Abschnitt werden die Modellierungen anderer Arbeiten zum Thema Instandhaltung dargestellt und unter verschiedenen Gesichtspunkten beleuchtet. Die gefundenen Ansätze sollen später gegebenenfalls verallgemeinert und zu einem ganzheitlichen Modell zusammengefügt werden.

Modellierungsziel und eingesetzte Methoden

Bei der Modellierung des Material- und Informationsflusses in einer Fabrik kommen oftmals diskrete Modelle zum Einsatz, die bei Bedarf durch Elemente der *System Dynamics* und durch Agenten unterstützt werden.¹²⁵

Gallab et al. modellieren in ihrer Simulationsstudie die Instandhaltung einer einfachen Fisch-Konservenfabrik. Das Ziel ist es, die Verfügbarkeit zu maximieren, während die zur Instandhaltung eingesetzten Ressourcen minimiert werden sollen.¹²⁶ Die Konservenfabrik besteht aus vier verschiedenen Maschinen, die von Personal

¹²¹ vgl. Kagermann, 2020, S.42

¹²² vgl. Siebers et al., 2010, S.210; Alabdulkarim et al., 2011, S.639

¹²³ vgl. Siebers et al., 2010, S.210

¹²⁴ vgl. Kagermann et al., 2020, S.40

¹²⁵ vgl. Siebers et al., 2010, S.210

¹²⁶ vgl. Gallab et al., 2016, S.1216

unter Zuhilfenahme von Werkzeugen instandgehalten werden.¹²⁷ Die Produktion der Konservenfabrik wird nicht modelliert. Für die Modellierung der verschiedenen Ressourcen wird ein agentenbasierter Ansatz verwendet.¹²⁸ Zur Implementierung kommt das Softwarepaket *AnyLogic* zum Einsatz.¹²⁹

Gupta und Lawsirirat erstellen ein Framework, um die optimale Wartung für ein multi-Element System zu finden, dessen Komponenten kontinuierlich und sprunghaft abgenutzt werden.¹³⁰ Dafür nutzen sie ein kontinuierliches Modell, das in Form von mathematischen Zusammenhängen ausgedrückt wird. Das kontinuierliche Modell wird mit stochastischen Sprüngen überlagert, um extreme Ereignisse im Belastungsprofil darzustellen.¹³¹

Lynch et al. versuchen die Beschaffung und Bevorratung von Ersatzteilen zu optimieren. Sie modellieren dazu in *AnyLogic* eine Produktionslinie in Form von verketteten Maschinen, die jeweils ausfallen können. Ein Produkt, das sich während eines Maschinenausfalls in Bearbeitung befindet, ist gefährdet, als Ausschuss zu enden.¹³² Zur Modellierung der Produktion kommt die diskrete Modellierungsweise der *Process Modeling* Bibliothek zum Einsatz, während die Maschinen als Agenten mit *Statecharts* modelliert werden.¹³³

Muriel et al. modellieren den Ersatzteilkreislauf in der Flugzeugindustrie mit einem besonderen Fokus auf Triebwerke. Dies soll dazu dienen, die Bedarfsvorhersage und das Ersatzteilmanagement zu optimieren.¹³⁴ Dabei kommt eine zeitdiskrete Methode mit wöchentlichen Zeitschritten zum Einsatz. Die Simulation wird außerdem unterstützt von weiteren Programmen, die Sensorsignale in verwertbare Daten umwandeln.¹³⁵

Nagadi et al. modellieren in ihrer Simulationsstudie ein Produktionsunternehmen. Das Ziel ist dabei die Auslastung und Verfügbarkeit der Anlagen aufzuzeichnen und zu optimieren.¹³⁶ Dabei bedienen sie sich eines integrierten Ansatzes (zeitdiskret und agentenbasiert).¹³⁷ Zur Implementierung kommt das Softwarepaket *AnyLogic* zum Einsatz.¹³⁸

¹²⁷ vgl. Gallab et al., 2016, S.1216

¹²⁸ vgl. ebenda, S.1214

¹²⁹ vgl. ebenda, S.1216

¹³⁰ vgl. Gupta, Lawsirirat, 2006, S.306

¹³¹ vgl. ebenda, S.310f

¹³² vgl. Lynch et al., 2013, S.381

¹³³ vgl. ebenda, S.381ff

¹³⁴ vgl. Muriel et al., 2018, S.2309

¹³⁵ vgl. ebenda, S.2312

¹³⁶ vgl. Nagadi et al., 2018, S.124f

¹³⁷ vgl. Nagadi et al., 2018, S.122

¹³⁸ vgl. ebenda, S.121

Prosser und Wijayalath verfolgen in ihrer Simulationsstudie das Ziel, die Kosten für Instandhaltung unter Aufrechterhaltung der Verfügbarkeit zu optimieren.¹³⁹ Sie modellieren eine Fabrik als Ansammlungen von Maschinen, die instandgehalten werden müssen. Ein Waren- und Informationsfluss wird nicht modelliert.¹⁴⁰ Es kommt eine agentenbasierte Modellierungsweise mit *Statecharts* zum Einsatz.¹⁴¹ Zur Implementierung wird das Softwarepaket *AnyLogic* verwendet.¹⁴²

Sahnoun et al. modellieren einen Windpark mit einzelnen Windturbinen als Agenten. Es handelt sich somit um einen agentenbasierten Ansatz. Auf eventuelle weitere Modellierungswerkzeuge wird nicht eingegangen.¹⁴³ Das Ziel ist die Optimierung der Gesamtkosten unter Einbezug der Kosten für den Stillstand der Anlagen. Zur Implementierung kommt das Softwarepaket *NetLogo* zum Einsatz.¹⁴⁴

Zarte et al. versuchen ein generisches Modell zur Untersuchung der vorausschauenden Instandhaltungsstrategie zu entwickeln.¹⁴⁵ Zur Modellierung kommen die agentenbasierte und die ereignisdiskrete Modellierung mit dem Softwarepaket *AnyLogic* zum Einsatz.¹⁴⁶ Den Maschinenagenten werden dabei Produktions- und Wartungsaufträge zugeteilt, welche abgearbeitet werden müssen.¹⁴⁷

Zusammengefasst lässt sich festhalten: Die betrachteten Arbeiten bedienen sich unterschiedlicher Methoden, um sich ihrer jeweiligen Problemstellung anzunähern. Produktionen werden häufig mit diskreten und agentenbasierten Methoden dargestellt, die auch oft als integrierte Modellierung verwendet werden. Oftmals wird die Instandhaltung isoliert ohne Rücksicht auf die Produktion betrachtet. Auf dem Weg zu einem ganzheitlichen Modell müssen die unterschiedlichen Ansätze zusammengefügt werden, um alle relevanten Teilaspekte des komplexen Problems der Instandhaltung abzudecken.

Modellierung: Maschinen, Abnutzung und Ausfälle

Bei *Gallab et al.* bestehen die einzelnen Maschinen nur aus einer Komponente, die nach MTBF (Mean Time between Failures, s. Formel 10) ausfällt.¹⁴⁸ Eine

¹³⁹ vgl. Prosser, Wijayalath, 2018, S.410

¹⁴⁰ vgl. Wijayalath persönlicher Kontakt (LinkedIn.com Januar 2021) und Manuskript

¹⁴¹ vgl. ebenda

¹⁴² vgl. Prosser, Wijayalath, 2018, S.410

¹⁴³ vgl. Sahnoun et al., 2015, S.2984f

¹⁴⁴ vgl. ebenda, S.2982, <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Zugriff 23.06.2022

¹⁴⁵ vgl. Zarte et al., 2017, S.3372

¹⁴⁶ vgl. ebenda, S.3374ff

¹⁴⁷ vgl. ebenda, S.3375

¹⁴⁸ vgl. Gallab et al., 2016, S.1214

stochastische Variation der Ausfallzeiten wird angedeutet, aber nicht näher beschrieben.¹⁴⁹

Gupta und *Lawsirirat* bauen ihre Maschinenmodelle aus ihren jeweiligen anfälligen Komponenten auf. Diese unterliegen jeweils einem Verfall (zeitlich, stochastisch). Ist ein kritisches Niveau einer Komponente erreicht, kann die Maschine jederzeit ausfallen.¹⁵⁰

Bei *Lynch et al.* fallen die Subsysteme der Maschinen stochastisch verteilt nach MTBF aus und müssen dann unter dem Einsatz von Ersatzteilen instandgesetzt werden, wofür eine stochastische Verteilung des MTTR (Mean Time to Repair, s. Formel 11) verwendet wird.¹⁵¹

Muriel et al. modellieren ihre Motoren mit verschiedenen kritischen Elementen, die jeweils eigene Haltbarkeitszeiten besitzen. Außerdem haben ihre Maschinen als Ganzes eine maximale Anzahl an Benutzungszyklen, bis sie verschrottet oder überholt werden.¹⁵² Die Berechnung der Restlebenszeiten erfolgt mit Methoden des maschinellen Lernens.¹⁵³

Nagadi et al. modellieren ihre verketteten Maschinen als Agenten, die einer inneren *Statechart*-Logik (s. Abbildung 4). Den arbeitsbereiten Zustand bilden die beiden *States Working* und *Idle* ab. Mit einer zufallsbehafteten Rate fällt die Maschine aus und muss repariert oder ausgetauscht werden. Wenn eine Maschine repariert wird oder sich im *State Idle* befindet, besteht außerdem eine Gelegenheit zur Wartung. Die Rate der Ausfälle folgt einer stochastischen Streuung, die auf MTBF beruht.¹⁵⁴ Die Maschinen fallen nur als Ganzes aus; eine Aufteilung in Komponenten findet nicht statt.

Prosser und Wijayalath modellieren Maschinen als atomare, nicht reparierbare Einheiten, die einem Abbauprozess unterliegen, für den sie folgenden Zusammenhang angeben:

$$\mathbf{Abnutzung}_t = \mathbf{Abnutzung}_{t-1} * (1 + \mathbf{random}())$$

Formel 1: Abnutzung nach Prosser und Wijayalath¹⁵⁵

Hier ist *random()* eine kontinuierliche Zufallsvariable, die gleichverteilt Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. In Abbildung 3 ist die quantifizierte Abnutzung mit ihrer zugeordneten täglichen Ausfallwahrscheinlichkeit zu sehen. Die Abnutzung

¹⁴⁹ vgl. Gallab et al., 2016, S.1215

¹⁵⁰ vgl. Gupta, Lawsirirat, 2006, S.307

¹⁵¹ vgl. Lynch et al., 2013, S.382

¹⁵² vgl. Muriel et al., 2018, S.2313ff

¹⁵³ vgl. ebenda, S.2314

¹⁵⁴ vgl. Nagadi et al., 2018, S.122

¹⁵⁵ vgl. Prosser, Wijayalath, 2018, S.407f

besitzt Werte von 0 bis 100 und ist jeweils in Zehnerschritten zu Paketen zusammengefasst, denen jeweils eine tägliche Ausfallwahrscheinlichkeit zugeordnet ist. Während es bei geringer Abnutzung unwahrscheinlich ist, dass das System ausfällt, wird es mit zunehmender Abnutzung wahrscheinlicher.

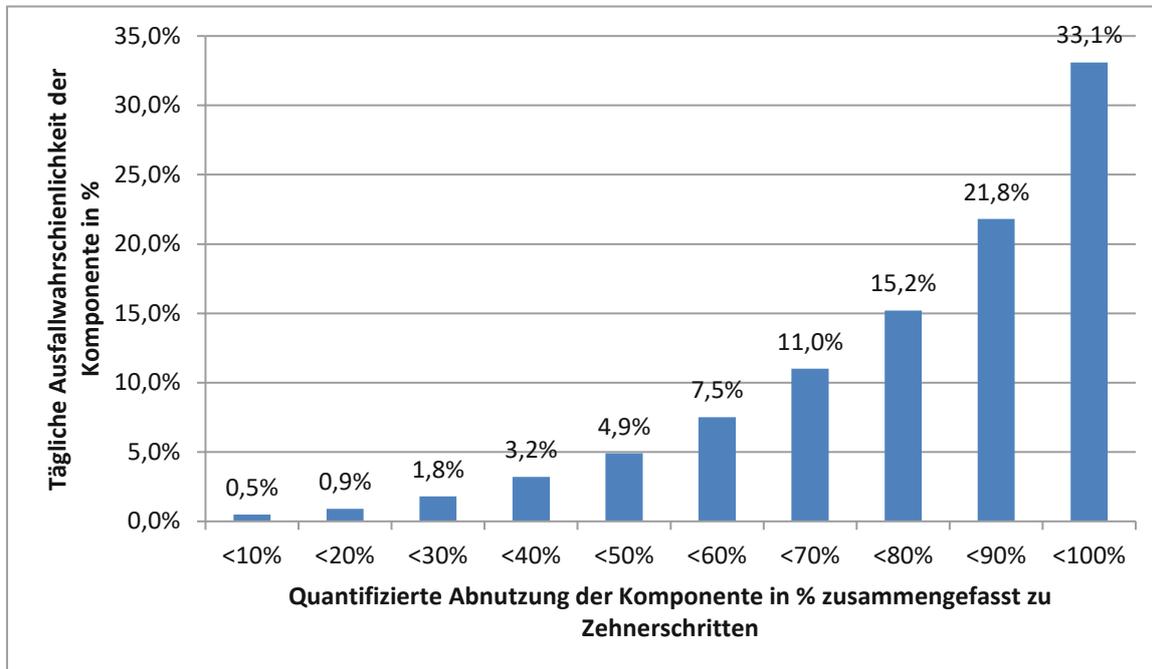


Abbildung 3: Beispielhafter Zusammenhang der Abnutzung mit der Ausfallwahrscheinlichkeit bei Prosser und Wijayalath¹⁵⁶, eigene Darstellung

In Abbildung 4 ist die *Statechart*-Logik einer Maschine nach *Wijayalath* zu sehen. Vom betriebsbereiten Zustand (Normal, grün) ausgehend kann sie zufällig ausfallen (Ausfall, rot). Zudem wird bei Unterschreitung eines Grenzwertes ein Warnsignal abgeben, das eine Maßnahme einleitet (Warnung, gelb). Über den Instandsetzungszustand (Reparatur, grau) wird die Maschine wieder in den betriebsbereiten Zustand zurückversetzt. Dies sind Beispiele für die intuitive Modellierung von Betriebszuständen mittels *Statecharts*.

¹⁵⁶ vgl. Prosser, Wijayalath, 2018, S.405

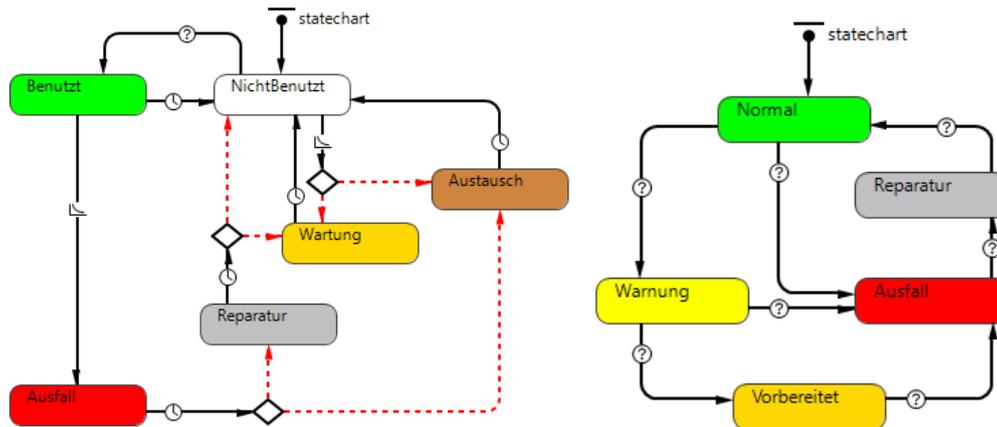


Abbildung 4: Vergleich von *Statechart*-Logiken für Maschinen-Agenten angelehnt an Nagadi et al. (links)¹⁵⁷ und Wijayalath (rechts)¹⁵⁸, eigene Darstellung

Die Maschinen bei *Sahnoun et al.* bestehen aus unterschiedlichen Subkomponenten, die jeweils mehrere Ausfallmöglichkeiten besitzen.¹⁵⁹ Die Abnutzung fassen *Sahnoun et al.* im *Equipment Health Factor* (EHF) zusammen. Dieser beeinflusst die Leistungsfähigkeit der Maschinen und kann zu Zufallsausfällen führen.¹⁶⁰ Der EHF hat einen Wertebereich von 10 (so gut wie neu) bis 0 (ausgefallen) und kann von weiteren Einflussfaktoren wie z.B. starken Winden, Blitzschlag oder hohen Temperaturen zusätzlich beeinflusst werden.¹⁶¹ Die Abnutzung wurde empirisch ermittelt und mit folgendem deterministischen Zusammenhang angegeben:

$$\text{Abnutzung}_{\text{deterministisch}}(k + 1) = \Phi * (\text{EHF}(\text{max}) - \text{EHF}(k))$$

Formel 2: Deterministische Abnutzung nach Sahnoun et al.¹⁶²

Der Abnutzungsfaktor Φ wurde dabei so bestimmt, dass der Abnutzungsvorrat ohne äußere Einflüsse nach maximal zehn Jahren aufgebraucht ist.¹⁶³ Es wird außerdem ein stochastischer Zusammenhang angegeben, der die Spannweite der Möglichkeiten der täglichen Abnutzung abdecken soll:

$$\text{Abnutzung}_{\text{stochastisch}}(k + 1) = \text{uniform}(0, \theta * \text{Abnutzung}_{\text{deterministisch}}(k + 1))$$

Formel 3: Stochastische Abnutzung nach Sahnoun et al.¹⁶⁴

Formel 3 ist eine Gleichverteilung von 0 bis zum maximalen Wert, der ein Produkt aus dem deterministischen Abnutzungswert und dem empirisch ermittelten Wert

¹⁵⁷ vgl. Nagadi et al., 2018, S.124

¹⁵⁸ vgl. Wijayalath, persönlicher Kontakt (LinkedIn.com Januar 2021) und Manuskript

¹⁵⁹ vgl. Sahnoun et al., 2015, S.2984

¹⁶⁰ vgl. ebenda

¹⁶¹ vgl. ebenda, S.2987

¹⁶² vgl. ebenda, S.2986

¹⁶³ vgl. ebenda

¹⁶⁴ vgl. ebenda

$\theta = 10$ darstellt. Der EHF gibt Auskunft über den Zustand der Maschine. Ab $EHF < 1$ gilt die Maschine in jedem Fall als ausgefallen und benötigt eine ausfallgesteuerte Instandsetzung.¹⁶⁵

Zarte et al. modellieren ihre Maschinen als Populationen von Agenten vom Typ Maschine.¹⁶⁶ Genaueres wird nicht preisgegeben. Es deutet allerdings nichts darauf hin, dass diese Maschinenagenten eine aufwändige innere Logik besitzen. *Zarte et al.* modellieren die Abnutzung lediglich nach MTBF, wobei ein zufälliges zustandsabhängiges Versagen nicht berücksichtigt wird.¹⁶⁷ Sie stellen allerdings klar, dass in der praktischen Anwendung eine genaue Kenntnis der Abnutzungsvorgänge als Daten vorliegen muss.¹⁶⁸

Nach *Muriel et al.* ist der ganzheitliche Weg von der Aufnahme eines Sensorsignals, das den Zustand einer Maschine misst, bis zu einem vollständigen Simulationsmodell, das die Wartung und Austausch von Teilen planen kann, generell noch nicht ausreichend beschrieben.¹⁶⁹

Zusammengefasst lässt sich festhalten: Maschinen werden in der Wissenschaft je nach Betrachtungsweise entweder als Einheiten oder als aus Subsystemen zusammengesetzte Objekte dargestellt. Die Datenerhebung bezüglich Abnutzung und Ausfallwahrscheinlichkeit ist keineswegs einheitlich. Die Berechnung der mittleren Zeit zwischen zwei Ausfällen und der mittleren Zeit für die Reparatur sind, aufgrund der Einfachheit und Eindeutigkeit ihrer Erhebung, weit verbreitete Methoden. Um die zustandsgesteuerte Instandhaltung zu untersuchen ist es jedoch nötig, Zustände der Maschinen und gegebenenfalls ihrer Subsysteme korrekt zu modellieren. Dies ist ein Aspekt, der in einer ganzheitlichen Modellierung berücksichtigt werden muss. Mehrfach werden die internen Zustandslogiken der Maschinenagenten mit *Statecharts* modelliert und implementiert, was eine intuitive Nachvollziehbarkeit der Zustandsänderungen ermöglicht.

Modellierung: Instandhaltung und Ersatzteile

Ersatzteile sind in der Instandhaltung eine entscheidende Komponente. Es besteht folgendes Spannungsfeld: Einerseits wäre es wünschenswert, alle Ersatzteile immer parat zu haben. Andererseits will man erhöhte Lager- und Kapitalbindungskosten vermeiden.¹⁷⁰ Es ist nach *Lynch et al.* jedoch ein Trugschluss, anzunehmen, dass sich die aus der Umlaufkapitallagerplanung bekannten Prinzipien auf die

¹⁶⁵ vgl. Sahnoun et al., 2015, S.2987

¹⁶⁶ vgl. Zarte et al., 2017, S.3376

¹⁶⁷ vgl. ebenda

¹⁶⁸ vgl. ebenda, S.3377

¹⁶⁹ vgl. Muriel et al., 2018, S.2310

¹⁷⁰ vgl. Lynch et al., 2013, S.378f

Ersatzteilbevorratung übertragen lassen.¹⁷¹ Die richtige Vorratsstrategie zu finden ist unter anderem abhängig von Wichtigkeit, Spezifität, Frequenz der Bestellung und Kapitalbindung der entsprechenden Ersatzteile.¹⁷²

Bei *Gallab et al.* finden nur ausfallgesteuerte und zeitlich gesteuerte Instandhaltungsaufgaben nach MTTR statt.¹⁷³ Diese benötigen Personal und Werkzeuge, deren Anzahl in unterschiedlichen Szenarien variiert werden kann, um eine optimale Anzahl zu finden.¹⁷⁴ Ersatzteile werden nicht modelliert.

Bei *Gupta* und *Lawsirirat* werden die zustandsgesteuerten Instandhaltungsprozesse lediglich als Kosten modelliert, die einen gewissen Effekt auf den Zustand der Maschine haben.¹⁷⁵

Lynch et al. nutzen eine zeitgesteuerte Instandhaltung.¹⁷⁶ Es sind Ersatzteile notwendig, um bestimmte Subsysteme zu ersetzen. Außerdem tragen die Ersatzteile in ihrer Anschaffung, aber auch in ihrer Lagerung zu den Gesamtkosten bei. Hierbei finden auch die Kosten für jede einzelne Bestellung Berücksichtigung, wobei in reguläre- und Notfallbestellung unterschieden wird.¹⁷⁷ Außerdem schlagen sie vor, dass ihr eigenes Modell durch das Hinzufügen von wartungsrelevanten Teilen zu erweitern ist.¹⁷⁸

Muriel et al. tauschen nach einer gewissen Lebensdauer von Komponenten bevorzugterweise die gesamte Maschine aus. Falls keine (überholte) Maschine zur Verfügung steht, muss sie repariert werden und die Wiederaufnahme des Betriebs verzögert sich.¹⁷⁹ Es wird somit eine zeit- oder zyklusgesteuerte Instandhaltung untersucht. Die ausgebauten Maschinen werden entweder überholt und als Ersatzteile ins Lager gelegt, oder verschrottet.¹⁸⁰

Nagadi et al. modellieren ihre Instandhaltung über Zeiten, die stochastisch variieren. Die Eintreffzeit der Instandhaltungsteams und die Zeiten, die für die Wartung und Reparatur benötigt werden, sind als Daten hinterlegt.¹⁸¹ Es findet keine besondere Modellierung der Ersatzteile statt.

¹⁷¹ vgl. Lynch et al., 2013, S.379

¹⁷² vgl. ebenda

¹⁷³ vgl. Gallab et al., 2016, S.1214

¹⁷⁴ vgl. ebenda, S.1216

¹⁷⁵ vgl. Gupta, Lawsirirat, 2006, S.312f

¹⁷⁶ vgl. Lynch et al., 2013, S.383

¹⁷⁷ vgl. ebenda, S.382

¹⁷⁸ vgl. ebenda, S.386

¹⁷⁹ vgl. Muriel et al., 2018, S.2315

¹⁸⁰ vgl. ebenda

¹⁸¹ vgl. Nagadi et al., 2018, S.122

Prosser und Wijayalath modellieren ausfall-, zeit- und zustandsgesteuerte Instandhaltung.¹⁸² Sie geben ihren Ersatzteilen jeweils eine normalverteilte Zeitspanne für die Beschaffung und für den Austausch.¹⁸³ Instandhaltungspersonal wird nicht berücksichtigt.

Sahnoun et al. modellieren ausfall-, zeit- und zustandsgesteuerte Instandhaltung.¹⁸⁴ Dazu führen sie einen Instandhaltungsagenten ein, der nach Durchführung der Instandhaltung den *Equipment Health Factor* wieder auf *so gut wie neu* setzt. Dies ist eine übliche Annahme in der Instandhaltungsmodellierung.¹⁸⁵ Die Instandhaltungsagenten repräsentieren in diesem Fall technisches Personal. Zudem benötigt der Instandhaltungsprozess Boote, Kräne und Werkzeuge, die ebenfalls als Agenten zur Verfügung stehen.¹⁸⁶

Bei *Strunz* finden sich weiterführende Überlegungen zum Ersatzteilmanagement. So wird ein kaputtes Teil ausgetauscht oder repariert. Ausgetauschte Teile können, je nach Zustand und weiteren teilspezifischen Aspekten, entweder verschrottet oder aufbereitet werden. Die Aufbereitung und Reparatur der Teile führt zu einem Ersatzteilkreislauf.¹⁸⁷ Um die richtige Strategie der Ersatzteilbeschaffung zu finden, stehen laut *Strunz* verschiedene Methoden, wie z.B. die ABC- und die XYZ-Analyse zur Verfügung.¹⁸⁸

Zarte et al. entwickeln ein Framework für den Test von vorausschauender Instandhaltung. Sie modellieren die Produktions- und Instandhaltungsaufgaben als Aufträge, die von den Maschinen abgearbeitet werden.¹⁸⁹ Dabei werden diverse Instandhaltungspläne simuliert, um ein Optimum zu finden. Eine Modellierung der Ersatzteile oder Instandhaltungspersonal findet nicht statt.

Zusammengefasst lässt sich festhalten: Die überwiegende Anzahl der betrachteten Arbeiten untersuchen die ausfall- und zeitgesteuerten Instandhaltungsstrategien. Dabei werden die Tätigkeiten der Instandhaltungsteams entweder durch Ausfall einer Maschine, zu bestimmten Zeiten oder nach einer Anzahl durchlaufener Arbeitszyklen ausgelöst. Wie bereits zuvor festgestellt, erfordert die Modellierung der zustandsgesteuerten Strategien eine Modellierung der jeweiligen Zustände. Sobald die Zustände implementiert sind, wird die Instandhaltung bei Unterschreiten eines gewissen Grenzwertes ausgelöst. Die Tätigkeiten der Instandhaltungsteams sind ansonsten bei allen Strategien vergleichbar: Reinigung, Wartung oder Reparatur. Es

¹⁸² vgl. Prosser, Wijayalath, 2018, S.407

¹⁸³ vgl. ebenda, S.408

¹⁸⁴ vgl. Sahnoun et al., 2015, S.2988

¹⁸⁵ vgl. ebenda, S.2986

¹⁸⁶ vgl. ebenda, S.2988

¹⁸⁷ vgl. Strunz, 2012, S.577

¹⁸⁸ vgl. ebenda, S.578ff

¹⁸⁹ vgl. Zarte et al., 2017, S.3375

ist eine übliche Annahme, dass nach der Durchführung einer Instandhaltungstätigkeit der korrespondierende Zustand *so gut wie neu* ist. Besonders in agentenbasierten Modellen werden die für die Instandhaltung benötigten Ressourcen (Menschen, Werkzeuge, Ersatzteile) oft als Agenten modelliert, die dann für die jeweiligen Tätigkeiten belegt werden. Es sind einige Arbeiten verfügbar, die sich mit der Beschaffung und Bevorratung von Ersatzteilen beschäftigen. Dabei wird, je nach Anwendungsfall, die Verfügbarkeit und die Beschaffungszeit der Ersatzteile, aber auch deren Kosten in Anschaffung und Lagerhaltung berücksichtigt. Die Modellierung von Ersatzteilen ist jedoch nur relevant, wenn ihre Beschaffung, Lagerung und generelle Verfügbarkeit besonderen Restriktionen unterliegt. Leicht und schnell zu beschaffende Normteile werden also im allgemeinen Modell vernachlässigt.

Kennzahlensystem

Kennzahlen werden genutzt, um Informationen zu verdichten und verständlich aufzubereiten. Die Anforderungen können je nach Anwendungsbereich variieren, wobei jedoch meistens hohe Aussagekraft, Benutzerfreundlichkeit und Nachvollziehbarkeit gefordert sind. Eine erweiterte Auswahl an Kennzahlen zum Thema Instandhaltung findet sich bei *Matyas*.¹⁹⁰ Aussagekräftige Kennzahlen sind die Auslastung und die Verfügbarkeit einer Ressource (s. Formel 4 und Formel 5). Dabei ist die Verfügbarkeit der Anteil an der Betriebszeit, in der die Ressource zur Benutzung bereit ist. Die Auslastung ist der Anteil an der zur Verfügung stehenden Nutzungszeit, in der die Ressource benutzt wird. Beide Kennzahlen sind Bestandteil der Gesamtanlageneffektivität (engl. *Overall Equipment Effectiveness OEE*).¹⁹¹

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{tatsächliche Betriebszeit}}{\text{effektiv zur Verfügung stehende Betriebszeit}}$$

Formel 4: Verfügbarkeit einer Ressource nach Strunz¹⁹²

$$\text{Auslastungsgrad} = \frac{\text{tatsächliche Nutzungszeit}}{\text{effektiv zur Verfügung stehende Nutzungszeit}}$$

Formel 5: Auslastung einer Ressource nach Strunz¹⁹³

Analog zum Auslastungsgrad, der sich üblicherweise auf die produktiven Vorgänge, also die Nutzung, bezieht, können weitere Kennzahlen wie z.B. die Stillstandsquote erzeugt werden.¹⁹⁴

¹⁹⁰ vgl. *Matyas*, 2016, S.100ff

¹⁹¹ vgl. <https://www.oe.com/oe-factors/>, Zugriff 24.08.2022

¹⁹² vgl. *Strunz*, 2012, S.84

¹⁹³ vgl. ebenda

¹⁹⁴ vgl. ebenda

Matyas arbeitet außerdem die Bedeutung von Kennzahlensystemen heraus und stellt fest, dass Kennzahlensysteme mehr als nur die Summe verschiedener Kennzahlen sind. Vielmehr ergänzen sich die Kennzahlen in ihrer Aussagekraft und beschreiben die jeweilige Situation umfassend und übersichtlich. Die korrekte Interpretation der Kennzahlen ist jedoch weiterhin entscheidend.¹⁹⁵

Gallab et al. interessieren sich primär für die Verfügbarkeit der Maschinen. Das Ziel es, die Verfügbarkeit der Maschinen unter möglichst geringem Einsatz von Personal und Werkzeugen zu optimieren.¹⁹⁶ Eine Kostenfunktion wird nicht erwähnt.

Gupta und *Lawsirirat* versuchen in ihrer Optimierung die beste Instandhaltungsstrategie zu finden, indem Instandhaltungskosten und Verfügbarkeit optimiert werden.¹⁹⁷ Eine gesamte Kostenfunktion, die auch entgangene Gewinne berücksichtigt, ist nicht dokumentiert.

Law und McComas stellen fest, dass oftmals Kennzahlen wie Liefertreue, Auslastung der Ressourcen, Lagerbestände und Warteschlangenlängen zur Bewertung der Systemleistung in Simulationen eingesetzt werden.¹⁹⁸

Lynch et al. versuchen ihre Gesamtkosten zu minimieren, wofür sie einen genetischen Algorithmus einsetzen. Dieser versucht die beste Losgröße und Bestellfrequenz für das jeweilige Ersatzteil zu finden. In ihre Kostenfunktion gehen außerdem die Kosten für Produktionsausfälle sowie Wartungs- und Reparaturkosten ein.¹⁹⁹

Muriel et al. bewerten verschiedene Kennzahlen. Neben den Inventarkosten sind für sie auch die Verzögerungen interessant, die durch nicht rechtzeitig zur Verfügung stehende Ersatzteile entstanden sind.²⁰⁰

Nagadi et al. benutzen drei Kennzahlen zur Bewertung ihres Systems: Die Auslastung der Maschinen, die *Work in Progress* (WIP) und den Durchsatz der Produktion.²⁰¹ Auf Kosten jeglicher Art wird nicht eingegangen.

Prosser und Wijayalath benutzen als Hauptbewertungskriterium die Wartungskosten und die Verfügbarkeit der Maschinen. Allerdings findet keine Bewertung der Gesamtkosten statt.²⁰²

¹⁹⁵ vgl. *Matyas*, 2016, S.98

¹⁹⁶ vgl. *Gallab et al.*, 2015ff

¹⁹⁷ vgl. *Gupta, Lawsirirat*, 2006, S.326

¹⁹⁸ vgl. *Law, McComas*, 1997, S.86f

¹⁹⁹ vgl. *Lynch et al.*, 2013, S.383

²⁰⁰ vgl. *Muriel et al.*, 2018, S.2316

²⁰¹ vgl. *Nagadi et al.*, 2018, S.124

²⁰² vgl. *Prosser, Wijayalath*, 2018, S.410

Sahnoun et al. beschreiben außer den Kosten und der produzierten Leistung der Windturbinen keine weiteren Kennzahlen.²⁰³ Sie berücksichtigen in ihrer Kostenfunktion auch die entgangenen Gewinne.²⁰⁴

Zarte et al. beziehen sich hauptsächlich auf Zeiten und Summen von Zeiten. So betrachten sie neben der Gesamtsumme der Verspätung der Aufträge auch die Summe der Zeiten zwischen Auftragsfertigstellung und Auslieferung sowie die Auslastung der Maschinen.²⁰⁵

Zusammengefasst lässt sich festhalten: Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Konfigurationen werden unterschiedliche Kennzahlen erhoben und ausgewertet. Oft genutzte Kennzahlen sind: Auslastung und Verfügbarkeit der Ressourcen, diverse Kosten (für Produktion, Instandhaltung, Lagerung, Bestellung), diverse Zeiten (Durchlaufzeit, Wartezeit, Nutzungszeit) und die Anteile der verspäteten Aufträge. Die Gesamtkosten, die auch die entgangenen Gewinne und Kosten für verspätete Produktionsaufträge einbeziehen, sind in den untersuchten Arbeiten mehrheitlich nicht erfasst. Dies muss auf der Suche nach dem ganzheitlichen Modell integriert werden. Eine sinnvolle Aufbereitung fasst die Kennzahlen zu aussagekräftigen Kennzahlensystemen zusammen, die den Zustand verständlich beschreiben können.

3.3 Fazit und Forschungslücke

In diesem Kapitel wurde zunächst der Forschungsbedarf für designorientierte Arbeit bezüglich Instandhaltungssimulation mit besonderem Fokus auf die Bedürfnisse der KMU herausgearbeitet. Die KMU sind beim Einsatz der Methode der Simulation bislang eher zurückhaltend, obwohl die Simulation als Werkzeug geeignet ist das komplexe System Instandhaltung zu untersuchen und so die Instandhaltungskosten zu senken. Als Gründe werden oftmals hohe Kosten und hoher Zeitaufwand für Simulationsstudien genannt. Gleichzeitig ist das Instandhaltungsmanagement in KMU oftmals weniger ausgeprägt als in großen Unternehmen. Zur Potenzialerkundung der Instandhaltungsstrategie stellt die Methode der Simulation wiederum eine risikoarme Möglichkeit dar. Daher ergibt sich Bedarf für designorientierte Arbeit, um die Nutzungsbarrieren für Simulation in der Instandhaltung der KMU zu senken.

Aufgrund der untersuchten Arbeiten lässt sich eine Vereinigungsmenge aus wiederkehrenden und relevanten Aspekten identifizieren, die eine ganzheitliche Modellierung der Instandhaltung ausmacht. Mit ganzheitlich ist in diesem

²⁰³ vgl. Sahnoun et al., 2015, S.2994

²⁰⁴ vgl. ebenda, S.2989

²⁰⁵ vgl. Zarte et al., 2017, S.3375

Zusammenhang gemeint, dass jeder der vier folgenden Aspekte ausreichend beleuchtet wird.

- **Modellierung der Produktion**

Die Produktion besteht aus Produktionsprozessen, die unter der Zuhilfenahme verschiedener Ressourcen zu verschiedenen Zeiten bewältigt werden. Falls nötig, ist dabei auch auf die Intra-logistik und sonstige Komponenten einzugehen, die für die Betrachtung der Instandhaltung eine Rolle spielen können.

- **Modellierung der Instandhaltung**

Die Instandhaltung ist der hauptsächliche Betrachtungsgegenstand. Sie ist in der Produktion eingebettet und sollte im Rahmen dessen sehr detailliert modelliert werden. Jedenfalls sollten die untersuchten Instandhaltungsstrategien (ausfall-, zeit- und zustandsgesteuert) mit ihren jeweiligen Unterschieden modelliert werden. In vielen Fällen spielt dabei auch die Modellierung des Instandhaltungspersonals und des Ersatzteilmanagements eine Rolle.

- **Modellierung von Maschinen als Agenten**

Die Maschinen sind für die Produktion einerseits unerlässlich, andererseits sind sie durch ihre Ausfallbehaftung für die Robustheit des Systems ein kritischer Faktor. Dabei ist zu beachten, dass diese selbst oftmals aus kritischen Subkomponenten aufgebaut sind. Maschinen aus Subkomponenten und ihre stochastische Abnutzung zu modellieren, ist in vielen Fällen eine realitätsnahe Betrachtungsweise. Es sollte dabei berücksichtigt werden, dass die Maschinen während eines Ausfalls oder wartungsbedingter Stillstände nicht für die Produktion zur Verfügung stehen.

- **Erstellung eines aussagekräftigen Kennzahlensystems**

Das Kennzahlensystem soll einen differenzierten und aussagekräftigen Überblick der Situation vermitteln. Dafür sollten die Gesamtkosten (inkl. Kosten für verspätete Aufträge), die Auslastung und Nutzungszeiten der Maschinen und die Auslastung des Instandhaltungspersonals enthalten sein.

Viele der untersuchten Arbeiten, die Simulationsstudien zum Thema Instandhaltung beinhalten, haben paarweise gemeinsame Schnittmengen. Jedoch sind ganzheitliche Simulationsmodelle, die alle relevanten Aspekte der Instandhaltung für KMU abdecken und somit in der Lage sind, das komplexe Problem der Instandhaltung ganzheitlich zu optimieren, unter den untersuchten Arbeiten nicht zu finden. Dies ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Punktebewertung bezieht sich auf die Ganzheitlichkeit der jeweiligen Studie nach den zuvor genannten Kriterien.

Studie	Produktion	Instandhaltung	Maschine als Agent	Kennzahlensystem
Vorliegende Arbeit	●●● Vollständige Modellierung der Produktion mit mehreren Maschinen; Modellierung der Betriebszeiten	●●● Ausfall-, zeit- und zustandsgesteuerte Instandhaltung möglich unter Berücksichtigung der Ersatzteile, Prozesse und Personal	●●● Maschinen aus Subsystemen; Ausfall stochastisch aufgrund MTBF oder Zustände;	●●● Optimierung der Gesamtkosten; Verfügbarkeit, Auslastung und Lagerstände für ein aussagekräftiges Kennzahlensystem
Gallab et al. (2016)	●○○ Agentenbasierte Modellierung von Ressourcen; keine Modellierung der Produktion	●○○ Ausfall- und zeitgesteuerte Instandhaltung unter Ressourceneinsatz nach MTTR; keine Ersatzteile	●○○ Maschinen nicht aus Subsystemen; Ausfall nur nach MTBF; keine stochastischen Einflüsse	●●○ Konzentration auf Auslastung und Verfügbarkeit; keine Modellierung der Kosten
Gupta, Lawsirirat (2006)	●○○ Modellierung eines Systems mit Subkomponenten; keine Modellierung einer Produktion	●○○ Zustandsorientierte Optimierung der Instandhaltung; Strategien als Kosten ausgedrückt; keine Prozesse oder Ersatzteile; kein Personal	●●● Maschinen aus Subsystemen; stochastische Abnutzung und Ausfälle aufgrund der Zustände	●●○ Optimierung der Instandhaltungskosten und der Verfügbarkeit. Keine Modellierung der Gesamtkosten
Lynch et al. (2013)	●●● Vollständige Modellierung einer verketteten Produktion mit mehreren Maschinen	●○○ Ausfall- und zeitgesteuerte Instandhaltung nach MTTR und unter Nutzung von Ersatzteilen; keine Zustände oder Personal	●●○ Maschinen aus Subsystemen; Ausfall stochastisch nach MTBF	●●○ Optimierung der Gesamtkosten (inkl. Kosten für Ersatzteile); keine Modellierung weiterer Kennzahlen
Muriel et al. (2018)	○○○ Modellierung von Flugzeugtriebwerken; keine Produktion	●○○ Zeit- und zyklusgesteuerte Instandhaltung; Ersatzteil(-aufbereitung) thematisiert	●○○ Maschinen aus Subsystemen; keine zufälligen Ausfälle	●●○ Berücksichtigung der Inventarkosten und der Verzögerungszeiten durch fehlende Ersatzteile; keine Produktionskosten
Nagadi et al. (2018)	●●● Vollständige Modellierung einer verketteten Produktion mit mehreren Maschinen.	●○○ Zeitgesteuerte Instandhaltung über MTTR. Modellierung über Stillstandzeiten. Keine Modellierung des Personals oder Ersatzteile.	●○○ elementare Maschinen; Zustände nicht berücksichtigt; Ausfälle über stochastisches MTBF.	●●○ Konzentration auf Auslastung, Work in Progress und Durchsatz; keine Modellierung der Kosten
Prosser, Wijayalath (2018)	●○○ Agentenbasierte Modellierung von Maschinen; keine Modellierung der Produktion	●●○ Ausfall-, zeit- und zustandsgesteuerte Instandhaltung mit Berücksichtigung der Ersatzteile; keine Berücksichtigung von Prozessen oder Personal	●●○ elementare Maschinen; Zustände detailliert modelliert. Stochastische Elemente berücksichtigt.	●●○ Konzentration auf Wartungskosten und Verfügbarkeit; keine Modellierung der Ausfallkosten
Sahnoun et al. (2015)	●○○ Agentenbasierte Modellierung von Windkraftwerken; Produktion beschränkt auf abgegebene Leistung	●●○ Ausfall-, zeit- und zustandsgesteuerte Instandhaltung unter Einbeziehung diverser Ressourcen; keine Modellierung von Ersatzteilen	●●● Maschinen aus Subgruppen; Zustände stochastisch modelliert.	●●○ Starker Fokus auf Gesamtkosten und Output; Weitere Kennzahlen nicht dokumentiert.
Zarte et al. (2017)	●●○ Produktion als Eingabe von Aufträgen in Maschinen modelliert; kein Hinweis auf Modellierung der Betriebszeiten	●○○ Vorausschauende Instandhaltung; Instandhaltungsprozesse als Aufträge die von Maschinen abgearbeitet werden; Optimierung verschiedener Instandhaltungspläne; kein Personal oder Ersatzteile	●○○ elementare Maschinen; Ausfall nach MTBF ohne stochastische Komponenten	●●○ Konzentration auf Zeiten und Auslastung; keine Modellierung der Kosten

Tabelle 2: Relevanteste untersuchte Arbeiten und ihre Abdeckung relevanter Aspekte, eigene Darstellung²⁰⁶

²⁰⁶ ○○○: Kriterien der Ganzheitlichkeit gar nicht erfüllt; ●●●: Kriterien vollständig erfüllt

In vielen betrachteten Simulationsstudien steht die simulationshandwerkliche Komponente nicht im Vordergrund, was eine Weiterentwicklung der jeweiligen Modelle und den Transfer der Modelle auf andere Anwendungsfälle erschwert. Im Folgenden wird die Entwicklung eines ganzheitlichen Simulationsmodells der Instandhaltung skizziert und dokumentiert, sodass es von KMU schnell zur Anwendung gebracht werden kann. Das Modell soll außerdem mittels eines integrierten Ansatzes (ereignisdiskret und agentenbasiert) implementiert werden. Das Softwarepaket *AnyLogic* wurde hierzu als geeignet identifiziert.

Aufgrund des zuvor zusammengefassten Standes der Wissenschaft, lassen sich die Anforderungen an das zu erstellende Artefakt folgendermaßen ausdrücken. Gesucht wird eine Vorgehensweise der ganzheitlichen Instandhaltung, die den Fokus auf die Bedürfnisse von KMU hat. Die Vorgehensweise soll also leicht umsetzbar sein und zu einem leicht zu bedienenden digitalen Modell führen. Dieses digitale Modell soll in der Lage sein, ausfall- zeit- und zustandsgesteuerte werksinterne Instandhaltung mit einem zugehörigen Ersatzteilmanagement abzubilden. Die Implementierung soll mit dem Softwarepaket *AnyLogic* demonstriert werden.

Um dem Umfang für eine Diplomarbeit nicht zu überschreiten, fokussiert sich die Arbeit auf Unternehmen mit diskreter Fertigung (z.B. spanabhebende Fertigung). Der Schritt der Datenbeschaffung wird zunächst ausgeklammert und auf jegliche Form der automatisierten Optimierung wird nicht eingegangen.

4 Vorgehensweise zur Instandhaltungssimulation in KMU

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Bedarf designorientierter Studien im Bereich Instandhaltung in KMU herausgearbeitet und Modellierungsansätze aus der Literatur gefunden und dargestellt. In diesem Kapitel soll eine verallgemeinerte Vorgehensweise entwickelt und vorgestellt werden, wie ein digitales Modell für Instandhaltungssimulation in KMU erstellt werden kann. Dazu sollen die wesentlichen Komponenten des Systems und ihre Verbindung untereinander dargestellt werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die hier entwickelte Vorgehensweise zur Demonstration auf ein fiktives KMU angewandt. Zu den jeweiligen Modellkomponenten wird eine beispielhafte Modellierung in der Simulationssprache *AnyLogic* angehängt, die der schnelleren Implementierung in der Praxis dienen soll. Die Komponenten lassen sich in anderen Simulationssprachen auf ähnliche Weise darstellen. Für weiterführende Informationen zur Implementierung in *AnyLogic* sei auf die umfangreiche Dokumentation sowie auf das Tutorial-Handbuch *AnyLogic in Three Days* verwiesen.²⁰⁷

Ablauf einer Simulationsstudie

Für die Vorgehensweise bei der Durchführung einer Simulationsstudie wird empfohlen, sich an den Richtlinien VDI 3633 und VDA 4811 zu orientieren. In Abbildung 5 sind alle Phasen der Entwicklung einer Simulationsstudie nach diesen Richtlinien abgebildet, dabei soll jede Phase von einem Verifikations- und Validierungsprozess begleitet werden.²⁰⁸ Der Aufbau der folgenden Kapitel spiegelt die dargestellten Phasen wider, was der Übersichtlichkeit dienen und den praktischen Einstieg erleichtern soll. Das erarbeitete Artefakt nutzt die VDI-Richtlinie 3633 als Gerüst und ergänzt dieses durch die zur Erstellung einer Instandhaltungssimulation nötigen Aspekte. In Abbildung 5 sind die dazu relevanten Fragestellungen in rot formuliert. Die Beantwortung der Fragestellungen findet im folgenden Kapitel statt.

²⁰⁷ vgl. Grigoryev, 2018, <https://ANYLOGIC.help/>, Zugriff 30.07.2021

²⁰⁸ vgl. VDI 3633 (Blatt 1), 2014, S.18f, VDA 4811, 2013, S.9

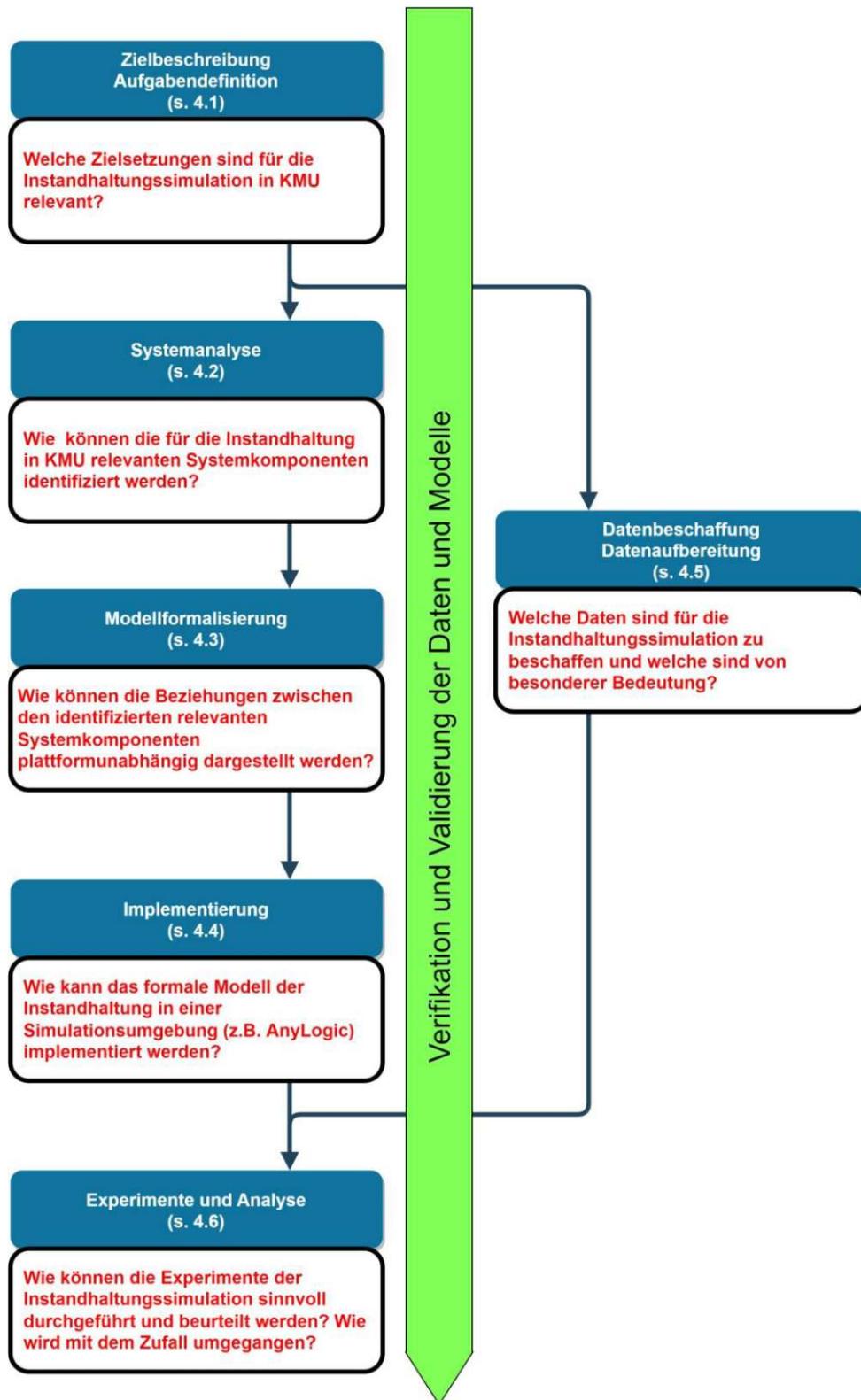


Abbildung 5: Ablauf Simulationsstudie, eigene Darstellung angelehnt an VDI 3633²⁰⁹ mit spezifischer Ausgestaltung für Instandhaltungssimulation (rot)

Es handelt sich um sechs Phasen, die aufeinander aufbauen, mit Ausnahme des Datenbeschaffungsprozesses, der die anderen Phasen begleitet. Die Zielbeschreibung ist der Ausgangspunkt der Simulationsstudie. Darin ist festgelegt,

²⁰⁹ vgl. VDI 3633 (Blatt 1), 2004, S.19

zu welchem Zweck die Studie durchgeführt wird. Nach der Aufgabendefinition folgt die Systemanalyse, bei der die relevanten Systemkomponenten identifiziert werden müssen. Dies geschieht im Wesentlichen über die Fragestellung: Verursachen diese Komponenten Kosten im Zusammenhang mit Ausfällen oder Instandhaltung von Maschinen? Die Festlegung des endgültigen Abstraktionsniveaus vor der Modellierung ist hilfreich, um sich weder im Detail zu verlieren, noch wichtige Einzelheiten wegzulassen.²¹⁰ Daran schließt die Modellierung an, wobei zunächst ein formales Modell erstellt wird, um die anschließende Implementierung eines digitalen Modells vorzubereiten und zu unterstützen. Ist das implementierte Modell verifiziert und validiert, können die Experimente durchgeführt werden. Es sei an dieser Stelle erneut ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Modellierung und Simulation sehr anwendungsspezifisch sind und auf die jeweiligen Unternehmen individuell abgestimmt werden müssen. Die in diesem Kapitel vorgestellte Herangehensweise soll Modellierer*innen in KMU unterstützen, aber nicht limitieren.

Im Folgenden sind die einzelnen Phasen aus Abbildung 5 detailliert beschrieben. Für allgemeine Informationen zu den jeweiligen Schritten ist auf die *Richtlinie VDI 3633 (Blatt 2)* verwiesen.²¹¹ In der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich Information ergänzt, die spezifisch zur Erstellung einer Instandhaltungssimulation führt.

4.1 Zielbeschreibung und Aufgabendefinition

Die Zielbeschreibung steht am Anfang und beinhaltet die Anforderungen der Auftraggebenden. In der Aufgabendefinition werden dann die Ziele und Methoden festgelegt.²¹² Es ist naheliegend, dass der Output dieser Prozesse in Form eines Lasten- und eines Pflichtenhefts festgehalten wird. Es kann dabei vorkommen, dass sich bei Simulationsprojekten durch den Prozess der Erstellung bereits Erkenntnisse ergeben, die eine Änderung der Ziele oder Vorgehensweise sinnvoll machen.²¹³ Für weitere Informationen zur Erstellung von Lasten- und Pflichtenheften für Simulationsstudien bietet die VDI 3633 (Blatt 2) einen übersichtlichen Leitfaden. In der Zielbeschreibung werden die Ziele der Simulation festgelegt. Diese Ziele sollten SMART formuliert werden – spezifisch, messbar, attraktiv, realistisch und terminiert.²¹⁴ So wird sichergestellt, dass das gesamte Projekt stets zielorientiert ist. Für die Instandhaltung sind in der Regel zwei grundlegende Fragestellungen entscheidend, die in unterschiedlicher Ausprägung formuliert werden können:

- Wie kann die Robustheit des Produktions- und Logistiknetzwerks gegenüber Maschinenausfällen gesteigert werden?

²¹⁰ vgl. VDA 4811, 2013, S.18

²¹¹ vgl. VDI 3633 (Blatt 2), 1997

²¹² vgl. VDI 3633 (Blatt 1), 2014, S.21

²¹³ vgl. VDI 3633 (Blatt 2), 1997, S.2

²¹⁴ vgl. <https://www.bwl-lexikon.de/wiki/smart-ziele/>, Zugriff 07.07.2022

- Wie können die kombinierten Gesamtkosten von Ausfällen und Instandhaltung gesenkt werden?

Sind die Ziele ausreichend formuliert, wird im nächsten Schritt das zu betrachtende System identifiziert und analysiert. Wie in Kapitel 3 erläutert, können für die ganzheitliche Instandhaltungssimulation vier hauptsächliche und wiederkehrende Aspekte identifiziert werden: Produktion, Instandhaltung, Kennzahlensystem und die Betrachtung der Maschinen als Agenten. Diese sind in Abbildung 6 dargestellt und dienen in den folgenden Abschnitten als Orientierungshilfe.

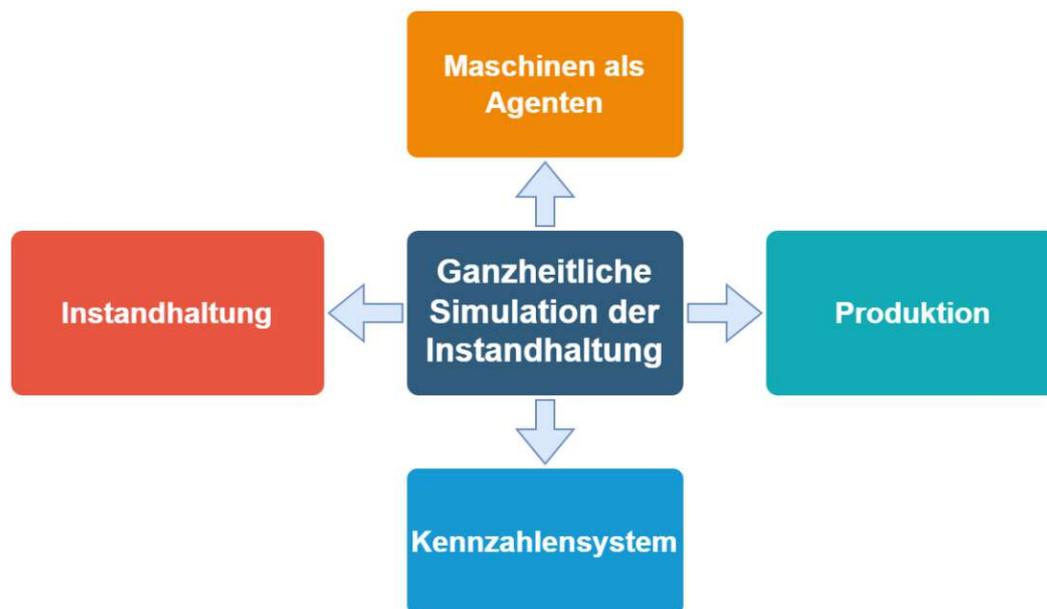


Abbildung 6: Vier Aspekte der ganzheitlichen Instandhaltungssimulation, eigene Darstellung

Die drei folgenden Abschnitte (4.2 Systemanalyse, 4.3 Modellierung und 4.4 Implementierung) werden in die in Abbildung 6 dargestellten Aspekte unterteilt.

4.2 Systemanalyse

In diesem Schritt werden die für das zuvor formulierte Simulationsziel relevanten Systemkomponenten identifiziert und Vereinfachungen soweit möglich durchgeführt.²¹⁵ Dabei ist zu beachten, dass die Sinnhaftigkeit jeder Vereinfachung geprüft werden muss, da es sonst zu einer Übervereinfachung kommen kann, die das Ergebnis der Simulationsstudie entwertet. Die Systemanalyse legt fest, welche Parameter eine Rolle spielen werden und bildet somit die Grundlage für die daran anschließende Modellierung.

Am Anfang der Systemanalyse steht die Festlegung des Betrachtungshorizonts. Dies ergibt sich meistens aus den Anforderungen der Aufgabendefinition. Wenn sich die Untersuchung auf die Instandhaltung innerhalb eines Werksgeländes bezieht, dann

²¹⁵ vgl. VDI 3633 (Blatt 1), 2014, S.24

bietet es sich an, dieses Werksgelände als Betrachtungshorizont zu wählen. Die Inputs in dieses System sind z.B. Aufträge, Materialien Ersatzteile und die Outputs sind z.B. fertige Produkte. Im Folgenden liegt der Fokus auf einer Modellierung auf Werksebene, da dies einen für KMU typischen Betrachtungshorizont ergibt. Wichtig ist auch bei der Systemanalyse der Produktion darauf zu achten, die für die Instandhaltung relevanten Aspekte zu identifizieren. Möglicherweise sind im individuellen Fall weitere Aspekte relevant, die von dieser Arbeit nicht abgedeckt werden. Es ist jedenfalls empfohlen bei der Systemanalyse eng mit dem mit der Instandhaltung des KMU betrauten Personal zusammenzuarbeiten. Es soll hier aber ein möglichst umfassender Überblick erarbeitet werden, der für KMU möglichst viel Relevanz beinhaltet.

Systemanalyse – Produktion

Die Modellierung des Fabriklayouts inklusive der Bewegungsrouten der Komponenten erhöht nicht nur die Genauigkeit des Modells, sondern führt auch dank der damit verbundenen Visualisierung zu einer wesentlich vereinfachten Verifikation und Validierung. Es ist daher ratsam, das Fabriklayout mindestens mit einfachen Abmessungen zu modellieren.

Die Betrachtung der Produktionsprozesse ist relevant, da es sich hierbei oft um komplexe Systeme handelt, deren Verhalten ohne eine realitätsnahe Modellierung schwerer nachvollzogen werden kann. Für die Produktionsprozesse ist es relevant, die Bearbeitungs- und Rüstzeiten festzustellen. Ob hierbei eine stochastische Streuung zu berücksichtigen ist, muss im individuellen Fall festgestellt werden. In einer Fertigung mit individuellen Aufträgen, ist eher davon auszugehen, dass die Bearbeitungszeiten schwanken. In einer verketteten Fließbandfertigung mit geringer Individualität der Aufträge ist davon eher nicht auszugehen. Schlussendlich sollte die Instandhaltungssimulation als Ziel im Auge behalten werden, daher können kleine Schwankungen tendenziell vernachlässigt werden.

Das Bedienpersonal der Maschinen ist im Allgemeinen für die Betrachtung der Instandhaltung weniger relevant, wenn Bedienpersonal während der Betriebszeit nicht in Instandhaltungsaufgaben involviert ist. Eine Vereinfachung, die in vielen Fällen zielführend ist, vernachlässigt die explizite Modellierung des Personals und stellt es lediglich als zusätzliche Kosten beim Betrieb der Maschinen dar.

Die Betrachtung des Transportsystems ist möglicherweise relevant, wenn Förder- und Hebezeuge ebenfalls Gegenstand der Instandhaltungsbetrachtung sind. Ob die Förder- und Hebeanlagen auch für die Modellierung relevant sind, muss im individuellen Fall entschieden werden. Wenn sie nicht in redundanter Weise vorhanden sind, sodass ein Ausfall leicht kompensiert werden kann, sollten diese Komponenten und ihre Instandhaltung jedenfalls berücksichtigt werden. Sie sollten

dann, wie die Maschinen auch, auf ihre Instandhaltungsstrategie modelliert und untersucht werden. Wenn Förderzeuge in ausreichender Menge vorhanden sind und erfahrungsgemäß im jeweiligen Unternehmen kein Engpass bei Transportressourcen bekannt ist, kann auf die Modellierung dieser Komponente verzichtet werden.

Es muss unterschieden werden, ob eine Maschine während oder außerhalb der operativen Betriebszeit der Fabrik stillsteht. Daher ist es besonders relevant, Arbeitszeiten und Schichten realitätsnah zu modellieren. Geplante Instandhaltungsarbeiten werden bevorzugt außerhalb der operativen Zeiten einer Fabrik durchgeführt, während ungeplante Stillstände jederzeit auftreten können. Daher ist eine allgemeine Uhr zu modellieren und die Betriebszeiten der jeweiligen Systemkomponenten daran realistisch auszurichten.

Die Aufträge durchlaufen die Produktions- und Transportprozesse. Es ist oftmals zielführend, die Aufträge als eigene Agenten einzuführen, da dort wertvolle Informationen gespeichert werden können. Dies beinhaltet die Art des Auftrags, das erwartete Fertigstellungsdatum, ein eventuelles Verfallsdatum oder die individuellen Durchlauf-, Lager- und Bearbeitungszeiten. Falls das erwartete Fertigstellungsdatum relevant ist, z.B. in Form einer maximalen Durchlaufzeit, ist dieses ebenfalls zu berücksichtigen.

Materialien verursachen Kosten, wenn sie im Lager liegen. Insofern verursachen Produktionsausfälle weitere Kosten, wenn die benötigten Materialien nicht wie geplant Eingang in Produkte finden. Anstatt diese Materialien und ihre Kosten eigens zu modellieren, kann man sie alternativ in einer Verspätungspauschale zusammen mit den Konventionalstrafen und weiteren Kosten verspäteter Aufträge verrechnen.

Zusammengefasst lässt sich für die Systemanalyse der Produktion festhalten, dass die genannten Aspekte auf Relevanz für die Instandhaltungssimulation geprüft werden sollten. Das Produktionsnetzwerk sollte mindestens als Produktionsprozess modelliert werden, den die Aufträge durchlaufen. Eine realitätsnähere Modellierung wird erreicht, wenn das grobe Layout der Fabrik mit den Transportwegen berücksichtigt wird. Das Bedienpersonal kann aufgrund seiner beschränkten Relevanz für die Instandhaltung in vielen Fällen vernachlässigt werden.

Systemanalyse - Maschinen als Agenten

Für die Modellierung der Maschinen ist primär festzustellen, aus welchen relevanten Subkomponenten diese aufgebaut sind. Relevant sind in diesem Zusammenhang alle Teile, die mit einer Abnutzung behaftet sind und innerhalb einer nennenswerten Wahrscheinlichkeit zu einem Ausfall der Maschine führen können. Dies schließt nicht nur Festkörper ein, sondern bezieht sich auch auf z.B. den Verschmutzungsgrad der Schmiermittel.

Ein entscheidender Schritt, der einen großen Einfluss auf die weitere Modellierung hat, ist die Ermittlung der Abnutzungs- und Ausfalllogik. Dieser Schritt hängt bereits eng mit der Datenbeschaffung zusammen, denn oftmals ist zu Beginn der Simulationsstudie noch unklar, welche Daten mit einem rechtfertigbaren Aufwand beschafft werden können. Ob die Zustände der jeweiligen Komponenten überhaupt modelliert werden können oder eine Ausfallmodellierung nach MTBF erfolgt, ist dafür bedeutend, wie Ausfälle im Modell zustande kommen.

Die Stillstandzeiten der Maschine sind zu berücksichtigen. Damit ist gemeint, dass eine Maschine aus unterschiedlichen Gründen nicht am Produktionsprozess teilnehmen kann und sich dies später in der Modellierung widerspiegeln muss. Typische Stillstandzeiten werden durch Reinigungs-, Wartungs- und Reparaturzeiten verursacht. Der Stillstand von Maschinen belastet die Produktion und verursacht Kosten.

Zusammengefasst für die Systemanalyse der Maschinen als Agenten lässt sich festhalten, dass Maschinen als eigene Subsysteme des Produktionssystems verstanden werden, die wiederum aus Subsystemen - den abnutzungs- und ausfallbehafteten Teilen - aufgebaut sind. Die Logik dieser Abnutzung und Ausfälle zu identifizieren ist im Rahmen des Datenbeschaffungsprozesses von zentraler Bedeutung.

Systemanalyse - Instandhaltung

Die detaillierte Beschreibung der zu untersuchenden Instandhaltungsstrategien spielt bei der Instandhaltungssimulation eine wichtige Rolle. Vor allem die Identifikation der Auslöser für die jeweiligen Instandhaltungsprozesse hat einen großen Einfluss auf die Modellierung und Implementierung.

Die Analyse der Instandhaltungsprozesse ist relevant, wenn diese nicht nur eine Variation von Zeiten darstellen, sondern eine Aneinanderreihung verschiedener Tätigkeiten unter der Zuhilfenahme von unterschiedlichem Personal, Ersatzteilen, Werkzeugen und sonstiger Hilfsmittel.

Die Modellierung des Instandhaltungspersonals ist relevant, da auf diese Weise ein großer Kostenfaktor in der Instandhaltung berücksichtigt wird. Es kann außerdem erstrebenswert sein, die Robustheit des Systems unter verändertem Personal zu testen. Es ist von Bedeutung, ob es sich um reines Instandhaltungspersonal oder um Bedienpersonal, das zusätzlich noch Instandhaltungsaufgaben übernimmt, handelt. Im ersten Fall wird das Instandhaltungspersonal als eigene Ressource modelliert. Auf eine Modellierung des Bedienpersonals kann in den meisten Fällen verzichtet werden, da dieses für die Instandhaltung keine Relevanz hat. Im zweiten Fall ist zu unterscheiden, ob die Instandhaltungsarbeiten während der regulären Betriebszeit der Fabrik oder z.B. nach oder zwischen den Schichten stattfinden. Auch im zweiten

Fall sollte das Bedienpersonal vernachlässigt werden, da nur die entsprechenden Zeiten, die für die Instandhaltung vorgesehen sind, für die Modellierung relevant sind. Für den Fall, dass das Bedienpersonal zusätzlich Instandhaltungsarbeiten während der operativen Betriebszeit durchführt, sind die spezifischen Prioritäten und Regelungen des Unternehmens in relevanter Weise abzubilden.

Ersatzteile sind Einheiten, die den Instandhaltungsprozessen zugeführt werden. Anders als für die Ausführung benötigte Hilfsmittel werden die Ersatzteile verbraucht und stehen nach einer Benutzung nicht für weitere Einsätze zur Verfügung. Relevant sind Ersatzteile dann, wenn die Beschaffung oder Lagerung mit besonderen Restriktionen verbunden ist. Nicht relevant sind z.B. Normteile, da diese jederzeit in beliebiger Menge beschafft werden können. Relevante Ersatzteile müssen nach einer bestimmten Bestelllogik beschafft werden. Die Bestellpunkte und die Bestellmengen der jeweiligen Ersatzteile müssen modelliert werden. Falls die Beschaffungs- oder Lieferzeit nennenswerten stochastischen Schwankungen (z.B. schwankende Verfügbarkeit, lange Lieferzeit aus dem Ausland) unterworfen ist, sollten auch diese Aspekte berücksichtigt werden.

Zusammengefasst für die Systemanalyse der Instandhaltung lässt sich festhalten, dass das Instandhaltungssystem hauptsächlich aus den relevanten Bestandteilen Instandhaltungsprozesse, Instandhaltungspersonal und Ersatzteilen besteht.

Systemanalyse - Kennzahlensystem

An dieser Stelle soll herausgearbeitet werden, welche Kennzahlen zur Interpretation des Simulationsergebnisses nötig sind. Die hier vorgeschlagene Auswahl ist eine Zusammenführung aus der Literatur und stellt den Zustand des Produktionssystems und seiner Instandhaltung dar, ohne die Übersichtlichkeit durch viele Details zu beeinträchtigen.

Kosten sind als Kennzahl allgemein relevant, da sie in vielen Fällen eine Größe sind, die optimiert werden soll. Es ist dabei zu beurteilen, welche Kosten von der Instandhaltung beeinflusst werden und welche Kosten einen nennenswerten Anteil an den (instandhaltungsrelevanten) Gesamtkosten verursachen. Die Anteile der Kosten für den Betrieb von Maschinen sind auf ihre Relevanz hin genau zu untersuchen. Diese Anteile sind Abschreibungen für die Anschaffung, Energie und Kosten für das Bedienpersonal. Oftmals fallen diese Kosten an, egal ob die Maschinen in Betrieb sind oder nicht. Anteile der Kosten, die zu jedem Zeitpunkt anfallen, durch Ausfall und Instandhaltung also nicht beeinflusst werden, sollten vernachlässigt werden. Gleiches gilt für die Kosten des logistischen Personals: Falls die Anzahl der Flurförderzeuge nicht variiert wird, fallen die Kosten ohnehin an und sind für die Gesamtbetrachtung somit irrelevant. Die Kosten für Ersatzteile sind unterteilt in die Anteile Anschaffungs-, Lagerungs- und Kapitalbindungskosten.

Anschaffungskosten entstehen bei der Anschaffung und beinhalten die Stückkosten sowie die Kosten für eine gesamte Bestellaufgabe. Es kann auch zu diesem Zeitpunkt bereits eine Entsorgungsgebühr mit einberechnet werden. Die Anschaffungskosten sind üblicherweise einmalige Kosten für jedes Ersatzteil. Lagerungskosten entstehen durch die Platzbedarfe und die Kosten für die Lagerlogistik. Kapitalbindungskosten entstehen durch die sog. Opportunitätskosten, da das Kapital in den Ersatzteilen gespeichert ist, also keiner anderen Verwendung zugeführt werden kann. Lager- und Kapitalbindungskosten entstehen kontinuierlich, solange das Ersatzteil nicht eingesetzt und vorrätig gehalten wird. Diese Kosten für Ersatzteile sind relevant, da sie sich mit der Bevorratungsstrategie der Ersatzteile verändern. Die Kosten für das Instandhaltungspersonal sind dann relevant, wenn verschiedene Strategien untersucht werden sollen, die einen Einfluss auf die Größe oder die Arbeitszeiten des Instandhaltungspersonals haben. Ebenso relevant sind die Kosten, die für verspätete oder ausgefallene Aufträge entstehen. Diese beinhalten z.B. Kosten für Überstunden/Sonderschichten, Sonderfahrten, Vertragsstrafen und auch Imageverluste, die möglichst quantifiziert werden sollten. Die Kosten für verspätete Aufträge sind für die Betrachtung deshalb so relevant, da sie die Forderung nach einer hohen Verfügbarkeit des Systems in ein realistisches Verhältnis setzen.

Oft genutzte Kennzahlen sind die Auslastung und die Verfügbarkeit der Maschinen. Ebenso kann eine differenzierte Aufzeichnung über die Verweildauer der Systemkomponenten in bestimmten Zuständen lohnend sein. So können redundante und Engpassressourcen leichter identifiziert werden. Dabei ist es besonders relevant, wie oft eine Maschine während der Betriebszeit regulär verfügbar ist (Verfügbarkeit), im Einsatz ist (Auslastung) oder auch nicht verfügbar ist und warum sie dies nicht ist (geplanter oder ungeplanter Stillstand). Diese Informationen sind wertvoll, da die Stillstandzeiten während der Betriebszeit einen großen Einfluss auf die Produktivität des Unternehmens und damit auf die Kosten haben können. Falls die Qualitätsverluste (Ausschuss) in erheblichem Maße durch den Zustand der Maschinen beeinflusst werden, sollten diese nach dem Modell der Gesamtanlageneffektivität ebenfalls berücksichtigt werden.²¹⁶ In ähnlicher Weise kann die Auslastung des Personals aufgezeichnet werden, um eventuelle Überauslastung und Redundanzen herauszuarbeiten.

Die Lagerstände der Ersatzteile sind zur Untersuchung der Ersatzteillagerhaltung relevant. So können z.B. Perioden mit Fehlbeständen oder Überbevorratung identifiziert werden. Die Zahl der Aufträge, die sich in Bearbeitung befinden (*Work in Progress*) ist vor allem in Bezug auf die Anteile an verspäteten und nicht verspäteten

²¹⁶ vgl. <https://www.oeo.com/oeo-factors/>, Zugriff 24.08.2022

Aufträgen relevant, um den Einfluss der Ausfälle und Maßnahmen auf die Produktivität der Fabrik zu beurteilen.

Zusammengefasst für die Systemanalyse des Kennzahlensystems lässt sich festhalten: Das Kennzahlensystem soll alle relevanten Informationen bereitstellen, ohne durch zu viele Details den Überblick zu erschweren. Relevante Aspekte sind: Die Kosten, die Zeitanteile bezüglich der Zustände der Komponenten und die Lagerstände (Ersatzteile, *Work in Progress*).

Nachdem die Systemanalyse abgeschlossen ist und alle relevanten Aspekte des Systems identifiziert worden sind, können diese im nächsten Schritt als formales Modell beschrieben werden.

4.3 Modellformalisierung

Das folgende Kapitel orientiert sich wie das vorherige an den vier wesentlichen Aspekten aus Abbildung 6 (Produktion, Instandhaltung, Maschinen als Agenten und Kennzahlensystem). Ist das System mit seinen relevanten Komponenten beschrieben, werden diese im Modell abgebildet. Dafür sollten die im vorhergehenden Kapitel als relevant identifizierten Komponenten in einer übersichtlichen und nachvollziehbaren Form dargestellt werden, sodass sie später mit Hilfe einer Simulationsplattform korrekt implementiert werden können. Es bietet sich an, *vom Groben zum Feinen* zu modellieren. Das bedeutet, dass jede Funktion zuerst auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau abgebildet wird, und anschließend an den nötigen Stellen verfeinert wird.²¹⁷ Für die Instandhaltungssimulation ist es generell sinnvoll, ein mittleres Abstraktionsniveau anzustreben, bezogen auf die Gesamtheit der möglichen Modelle.²¹⁸ Die Modellformalisierung ist der direkte Vorprozess zur Implementierung, wo das gefundene Modell in eine Programmiersprache übersetzt wird. Es bietet sich für die Modellformalisierung an, die Datenbeschaffung parallel zu betreiben und die Daten direkt in das formale Modell aufzunehmen.

Modellformalisierung - Produktion

Das Fabriklayout kann in dieser Phase mit einfachen Abmessungen skizziert werden. Die Skizze dient später als Grundlage der Visualisierung. Falls die Instandhaltung eines größeren Produktionsnetzwerks untersucht werden soll, ist es zur Visualisierung eher zielführend, die geografische Lage der unterschiedlichen Standorte zu modellieren.

²¹⁷ vgl. Grigoryev, 2018, S.12

²¹⁸ vgl. ebenda, S.11f

Die Betriebszeiten müssen für alle relevanten Systemkomponenten ermittelt und dem Modell zur Verfügung gestellt werden. Ebenso sollte Rücksicht auf eventuelle Regelungen, wie z.B. Überstunden und Sonderschichten genommen werden. Falls eine Variation der Betriebszeiten oder Arbeitszeiten des Instandhaltungspersonals stattfinden soll, ist auch dieser Umstand zu modellieren.

Die Produktionsprozesse bestehen aus verschiedenen wertschöpfenden Transport- und Bearbeitungsschritten, die von den einzelnen Aufträgen durchlaufen werden. Die Maschinen werden für die Aufgaben der Produktion belegt und stehen währenddessen üblicherweise nicht für andere Aufgaben zur Verfügung (s. Abbildung 7). Dies sollte jedenfalls in der Modellierung Berücksichtigung finden, da sonst die Realität stark verzerrt abgebildet wird. Es bilden sich vor den Maschinen üblicherweise Warteschlangen von Aufträgen, die abgearbeitet werden müssen. Hierbei sollte die Warteschlangenlogik untersucht werden. Falls diese nicht durch *First in First out (FIFO)* angenähert werden kann, sollte dies auch berücksichtigt werden.

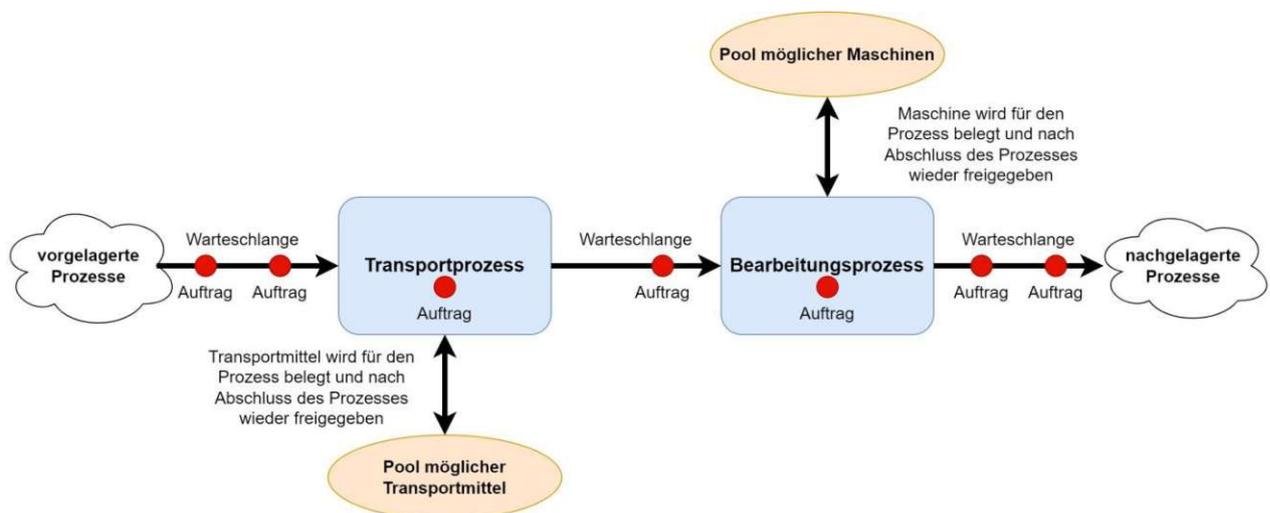


Abbildung 7: Modellierung der Prozesse, eigene Darstellung

Wie in Abbildung 7 zu sehen, sind die Aufträge die Einheiten, welche das Produktions- und Logistiksystem durchlaufen. Sie selbst können als Agenten modelliert werden und einige relevante Informationen beinhalten, wie z.B. die Art des Auftrages und das erwünschte Fertigstellungsdatum.

Modellformalisierung - Maschinen als Agenten

Maschinen und Transportmittel werden als Agenten modelliert, die den jeweiligen Tätigkeiten des Produktionsprozesses zugeordnet werden. Sie sind ausfallbehaftet und müssen instandgehalten werden.

Die Maschinen können aus einer oder mehreren kritischen Subkomponenten bestehen. Für die Instandhaltungssimulation ist in erster Linie der Zustand und die

daraus abgeleitete Ausfallwahrscheinlichkeit der Subkomponenten von Interesse. Daher ist es in den meisten Fällen ausreichend, den Zustand der Subkomponenten als Variable innerhalb des Maschinenagenten zu modellieren und die Ausfallwahrscheinlichkeit als stochastische Funktion zu hinterlegen.

Abnutzungen von Komponenten und Subkomponenten können nur sinnvoll modelliert werden, wenn verlässliche Daten und eine präzise Kenntnis über deren Abnutzungs- und Ausfalllogik vorliegen. In der Realität sind diese Zusammenhänge schwer zu erheben, es wird vermutlich immer eine gewisse Ungenauigkeit mitwirken. Sind Kenntnisse über den Zustand der kritischen Komponenten vorhanden, können die Zustände als Prozentzahl im Vergleich zum Ausgangszustand angegeben werden. Das Ziel ist dabei, die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen Zustand und Ausfallwahrscheinlichkeit, welche letztendlich die Ausfälle im Simulationsmodell erzeugt. In Formel 6 ist der generische Zusammenhang zwischen dem Zustand einer Komponente im folgenden Zeitabschnitt aufgrund ihres bisherigen Zustandes und einer Zufallsfunktion $g()$ beschrieben.

$$\text{Zustand der Komponente}_{k+1} = f(\text{Zustand der Komponente}_k, g())$$

Formel 6: Zustand und stochastische Abnutzung einer Komponente

In Formel 7 ist der generische Zusammenhang zwischen dem Zustand einer Komponente und seiner Ausfallwahrscheinlichkeit gezeigt. Es ist anzunehmen, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit von mehreren Faktoren abhängt. Die Bewertung der Zweckmäßigkeit, diese weiteren Faktoren aufzudecken und zu berücksichtigen, liegt im Urteil der Simulationsexpert*in.

$$p_{\text{AusfallKomponente}} = h(\text{zustandKomponente})$$

Formel 7: Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente in Abhängigkeit des Zustands

Die Stillstandzeiten sind Modellzeiträume, in denen die entsprechenden Maschinen nicht für den Produktionsprozess genutzt werden können. Diese sind nötig, um Ausfälle, Instandhaltungs- und Reinigungsarbeiten sinnvoll zu modellieren. Diese Zeiträume werden einerseits ausgelöst, wenn eine Maschine einen ungeplanten Ausfall hat, andererseits wenn geplante Arbeiten durchgeführt werden. Die Stillstände enden in den meisten Fällen, wenn die entsprechenden Arbeiten abgeschlossen sind und die Maschine wieder einsatzfähig ist.

Modellformalisierung - Instandhaltung

Abhängig von der zu modellierenden Instandhaltungsstrategie müssen in diesem Schritt die Logiken, welche zu einer Auslösung eines Instandhaltungsprozesses führen, definiert werden. Bei der ausfallgesteuerten Strategie ist der Komponentenausfall der Auslöser für eine Reparatur. Bei der zeitgesteuerten

Strategie ist das Ablaufen eines bestimmten Zeit- oder Zyklusintervalls und bei der zustandsorientierten Strategie das Erreichen eines bestimmten Grenzwertes der Auslöser für einen Instandhaltungsprozess. Bei der zustandsorientierten Strategie ist es außerdem relevant zu wissen, ob die Erhebung der Zustände datengestützt oder in bestimmten Intervallen bei Inspektionen erhalten werden.

Wenn die Instandhaltungsprozesse vorhersehbar und kurzzeitig sind, kann auf eine detaillierte Modellierung verzichtet werden. Dann bietet es sich an, die Instandhaltung als eine gegebenenfalls mit Schwankungen behaftete Arbeitszeit zu sehen, in der die Maschine stillsteht und das Instandhaltungspersonal beansprucht wird. Bei komplizierten Maschinen mit vielen unterschiedlichen Ausfallarten kann es jedoch vorkommen, dass die Arbeitszeiten der einzelnen Arbeitsschritte größeren Schwankungen unterworfen sind. Dann empfiehlt sich eine Ausmodellierung der jeweiligen Arbeitsschritte. Für die Instandhaltungsprozesse werden üblicherweise Instandhaltungspersonal, Werkzeuge und sonstige Hilfsmittel benötigt. Daher ist es sinnvoll, bei längeren Instandhaltungsprozessen Aufgabenpakete zu definieren, nach deren Abschluss das eingesetzte Personal und Material in anderen Prozessen eingesetzt werden kann. Dies erlaubt z.B. das Personal für weitere Tätigkeiten einzusetzen, während auf ein Ersatzteil gewartet wird.

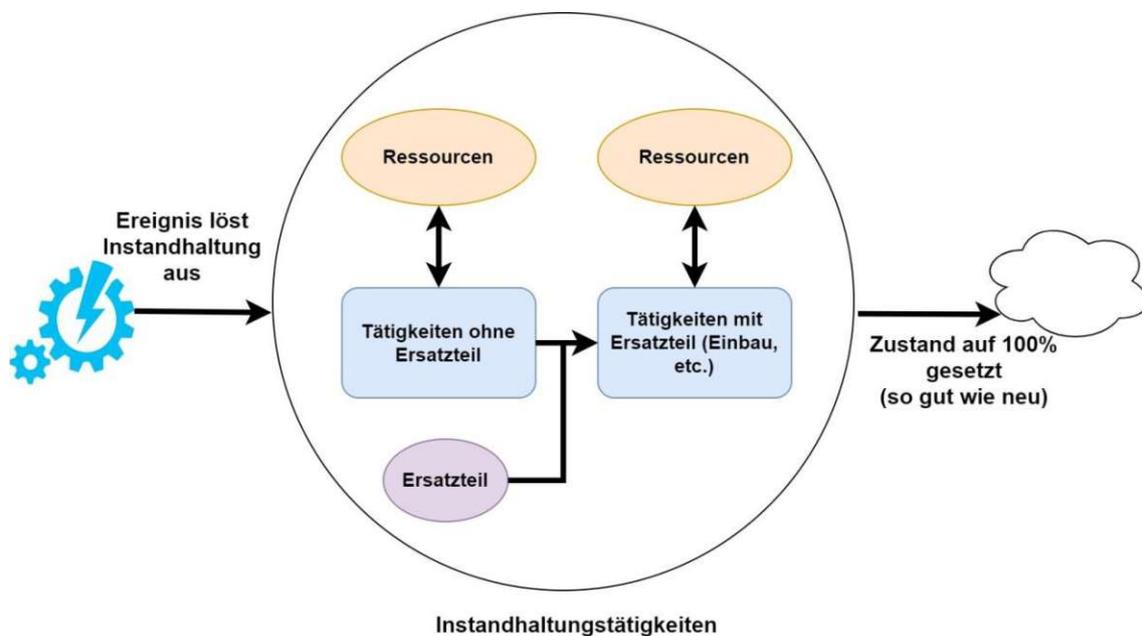


Abbildung 8: Mögliche Einteilung für Instandhaltungsprozesse unter Benützung eines Ersatzteils, eigene Darstellung

In Abbildung 8 ist eine mögliche Aufteilung der Instandhaltungstätigkeiten unter Benützung diverser Ressourcen und eines Ersatzteils dargestellt. Die Instandhaltung wird durch ein Ereignis ausgelöst. Nach Abschluss der Instandhaltung ist der Ausgangszustand der jeweiligen Komponente wiederhergestellt.

Das Instandhaltungspersonal wird ebenfalls als Agenten modelliert. Diese Agenten werden als Ressourcen den Instandhaltungsprozessen zugewiesen.

Die relevanten Ersatzteile sind Agenten, die bestellt und geliefert werden müssen. Dann befinden sie sich bis zu ihrem Einsatz in einem Instandhaltungsprozess im Ersatzteillager. Falls diese Ersatzteile ein Ablaufdatum, z.B. in Form eines technischen Überprüfungstermins besitzen, ist auf dieses bei der Modellierung gegebenenfalls Rücksicht zu nehmen. Sobald die Ersatzteile sich im Lager befinden und somit innerhalb des Unternehmens existieren, fallen Kosten an. Die entsprechende Kostenfunktion sollte innerhalb der Ersatzteilagenten eingerichtet werden. Wenn das Ersatzteil verbaut wird, kann der Ersatzteilagent vernichtet werden und es entfallen Lager- und Kapitalbindungskosten.

Modellformalisierung - Kennzahlensystem

Die folgende Auswahl an Kennzahlen sollte in das Modell aufgenommen werden. Sie bietet eine Übersicht über den Zustand des Systems und lässt sich von menschlichen Betrachtern leicht interpretieren. Es ist dabei herauszuarbeiten, an welchen Punkten die jeweiligen Werte gemessen und abgespeichert werden.

Die Anzahl und der Anteil der pünktlichen und verspäteten Aufträge sollten als absolute Zahlen und als prozentuale Anteile von der Gesamtmenge der Aufträge (Liefertreue) dargestellt werden. Beispielsweise könnte bei Verlassen des Auftrages aus dem Produktionsprozess gemessen werden, ob die Bedingung für Pünktlichkeit bei Fertigstellung eingehalten wurde.

Die Auslastungs- und Verfügbarkeitskennzahlen der Maschinen sind in Formel 4 und Formel 5 dargestellt. Eine Aufschlüsselung der Zeitanteile, wie lange sich die Maschinen in welchen Zuständen befunden haben, liefern zudem weitere Details. Dabei ist primär der Anteil an der Betriebszeit interessant, da so Rückschlüsse gezogen werden können, ob das Instandhaltungspersonal die Arbeiten rechtzeitig abschließen kann (s. Formel 8). Relevante Zustände sind: betriebsbereit (benutzt/unbenutzt), in Reinigung, in Wartung, in Reparatur.

Zeitanteil der Maschine in Zustand X

$$= \frac{\text{Betriebszeit in Zustand X}}{\text{Gesamte Betriebszeit der Maschine}} * 100\%$$

Formel 8: Zeitanteile der Betriebszeit, die in Zustand X verbracht wurden in Prozent

Die Auslastung der Instandhaltungsteams ist in Formel 9 dargestellt. Es bietet sich an, die Auslastung analog zu den zuvor beschriebenen Zeiten der Maschinen in die einzelnen Instandhaltungstätigkeiten zu unterteilen.

Auslastung Instandhaltungsteam

$$= \frac{\text{Zeit beschäftigt mit Instandhaltungstätigkeit}}{\text{Gesamte Arbeitszeit}} * 100\%$$

Formel 9: Auslastung der Instandhaltungsteams in Prozent

Die Füllstände der Lager (Eingangs-, Zwischen-, Ausgangslager der Aufträge und Ersatzteillager) sollten als absolute Zahlen dargestellt werden. Falls die Lager relevante Auslastungsbegrenzungen haben, sind auch davon prozentuale Werte darzustellen. Die Lagerstände sollten in kurzen regelmäßigen Abständen gemessen werden, um einen nachvollziehbaren Verlauf zu erhalten.

Die Kosten sollten als absolute Zahlen und als prozentuale Anteile der Gesamtkosten dargestellt werden. Die Kosten sollten als Variablen modelliert werden, die von den jeweiligen Agenten nachvollziehbar erhöht werden.

Nachdem alle relevanten Aspekte des Systems übersichtlich und vollständig beschrieben sind und die dafür notwendigen Daten beschafft wurden, liegt ein formales Modell vor, das in eine Simulationssprache übersetzt werden kann. Für diese Implementierung wurde im Folgenden das Softwarepaket *AnyLogic* gewählt.

4.4 Implementierung in *AnyLogic*

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Modellformalisierung beschrieben. Sobald ein nach dieser Vorgehensweise erstelltes Modell verifiziert wurde, kann es auf einer Plattform implementiert werden. In der vorliegenden Arbeit wurde dafür *AnyLogic* ausgewählt. Dieses Programmpaket bietet viele unterschiedliche Bibliotheken, die für diverse Anwendungsfelder erdacht wurden und bereits die nötigen Werkzeuge beinhalten. Für die Modellierung der Instandhaltung hat sich die in Tabelle 3 dargestellte Auswahl im Rahmen der Artefakterstellung als zielführend erwiesen.

Bibliotheksname	Anwendung für:
Agent	Modellierung der Maschinen, Instandhaltungsteams, Aufträge und Ersatzteile
Analysis	Grafische Aufbereitung der Ergebnisse in Benutzeroberfläche
Controls	Bedienelemente der Parametervariation in Benutzeroberfläche
Presentation	Optische Elemente zur verbesserten Übersicht
Process Modeling	Modellierung der Produktions- und Instandhaltungsprozesse

Tabelle 3: Relevante Bibliotheken für die Instandhaltungssimulation in AnyLogic

Falls ein besonders aufwändiges Produktions- und Logistiknetzwerk vorliegt und dessen detaillierte Modellierung für die Instandhaltung relevant ist, kann auch auf die Bibliothek *Material Handling* zurückgegriffen werden.²¹⁹ Dieses Kapitel orientiert sich erneut an den vier wesentlichen Aspekten aus Abbildung 6 (Produktion, Instandhaltung, Maschinen als Agenten und Kennzahlensystem).

Implementierung – Produktion

Um das Fabriklayout in *AnyLogic* einzuarbeiten, besteht die Möglichkeit, eine Bilddatei einzulesen und einen gewünschten Maßstab anzulegen.²²⁰ Dies sollte genutzt werden, um die zuvor erstellte Skizze des Unternehmens einzulesen und so einen visuellen Realitätsbezug herzustellen.

Um die Betriebszeiten zu implementieren, kann auf die in *AnyLogic* hinterlegte Uhr der Simulationszeit mit diversen Funktionen zugegriffen werden. So können eigene Terminlogiken erschaffen werden.²²¹ Zudem können in *AnyLogic* bestimmte Zeitpunkte oder Abschnitte durch die Benutzung der vorgefertigten *Schedule*-Blöcke definiert werden.²²² Dabei gilt zu beachten, dass eine Ressource, die gerade aufgrund eines *Schedule*-Blocks inaktiv ist, nicht gleichzeitig in einen *Downtime*-Block, z.B. für eine Wartung, wechseln kann. Dadurch ist die Nutzung der *Schedule*-Blöcke für die Modellierung der Instandhaltung beschränkt.

²¹⁹ weitere Informationen: <https://AnyLogic.help/library-reference-guides/material-handling-library/index.html>, Zugriff 09.05.2022

²²⁰ weitere Informationen: Grigoryev, 2018, S.134ff

²²¹ weitere Informationen: <https://AnyLogic.help/advanced/functions/time-functions.html>, Zugriff 01.06.2022

²²² weitere Informationen: <https://AnyLogic.help/AnyLogic/data/schedule.html>, Zugriff 01.06.2022

Für die Implementierung des Produktions- und Logistiknetzwerkes eignet sich die Benutzung der in *AnyLogic* integrierten Bibliothek *Process Modeling*. Diese bietet einerseits die Möglichkeit, die Prozesse durch die Funktionsblöcke der diskreten Modellierungsweise als *Flowcharts* abzubilden. Andererseits ermöglicht sie auch Bewegungsnetzwerke zu erstellen, um die Bewegungen der einzelnen Komponenten auf der Skizze der Fabrik maßstabsgetreu abzubilden.

Flowcharts werden dazu genutzt, prozedurale Abläufe abzubilden, die dann von Agenten durchlaufen werden. Die entsprechenden Blöcke zur Erzeugung von *Flowcharts* finden sich in der Bibliothek *Process Modeling*. Es stehen viele Blöcke zur Verfügung, die teilweise Lösungen für wiederkehrende komplizierte Strukturen bieten.²²³

Bewegungsnetzwerke (*Space Markups*) bestehen im Wesentlichen aus Knoten (*Nodes*) und Wegen (*Paths*) und sind Bestandteile der Bibliothek *Process Modeling*. Sie werden verwendet, um die räumlichen Standorte und Bewegungspfade von Agenten zu modellieren. Mit Hilfe eines Maßstabes ist es problemlos möglich, Bewegungsnetzwerke mit realistischen Abmessungen über einer Grafik zu erstellen.²²⁴

Ressourcen (*resources*) sind in *AnyLogic* Agenten (*agents*), die von Ressourcenblöcken (*resource pools*) erzeugt und verwaltet werden. Unter Zuhilfenahme von Ressourcen können bestimmte Prozesse durchgeführt werden. Sie werden mit den entsprechenden Blöcken vor der Tätigkeit beansprucht (*seize*) und nach der Tätigkeit freigegeben (*release*). Auf diese Weise können z.B. Maschinen, Personal oder Werkzeuge im Wertschöpfungsprozess implementiert werden. Warteschlangen, die sich eventuell vor Prozessschritten bilden, werden mit *Queue-Blöcken* behandelt.²²⁵

Die Aufträge sind die Agenten, die die *Flowcharts* der Produktionsprozesse durchlaufen. Zur Erzeugung eines Auftrages, bevor dieser in den *Flowchart* seines Produktionsprozesses übergeben wird, gibt es mehrere Möglichkeiten. Gelangen die Aufträge kontinuierlich in die Produktion, wie es z.B. in der Massenproduktion üblich ist, können diese direkt im ersten Quellenblock (*source*) des Produktionsauftrages erzeugt werden. Gelangen die Aufträge weniger kontinuierlich in die Produktion, wie es bei kleiner werdenden Losgrößen öfter der Fall ist, können in *AnyLogic* sog. Ereignisblöcke (*events*) genutzt werden.²²⁶ Diese sind in der Lage, im Quellenblock eines *Flowcharts* Agenten zu bestimmten Zeitpunkten zu erzeugen.

²²³ weitere Informationen: Grigoryev, 2018, S.141ff

²²⁴ weitere Informationen: ebenda, S.137ff

²²⁵ weitere Informationen: Grigoryev, 2018, S.148ff

²²⁶ weitere Informationen: <https://AnyLogic.help/AnyLogic/statecharts/events.html>, Zugriff 22.06.2022

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass sich die meisten Produktions- und Logistiknetzwerke unter Verwendung von *Flowcharts*, Ressourcen und Bewegungsnetzwerken realitätsnah implementieren lassen. Diese sind allesamt in der Bibliothek *Process Modeling* zu finden. Da die Vielzahl der möglichen Konfigurationen und ihrer auf den Anwendungsfall bezogenen Implementierungen hier nicht vollständig wiedergegeben werden können, sei für weitere Anhaltspunkte ausdrücklich auf das Anwendungsbeispiel in Kapitel 5 verwiesen.

Implementierung - Maschinen als Agenten

Maschinen werden als Agenten implementiert. Die Bibliothek *Agent* in *AnyLogic* ermöglicht es, *Statecharts* zu erzeugen. Dabei handelt es sich um logische Zusammenhänge, die über sog. *Transitions* miteinander verknüpft sind. Die *Transitions* können z.B. zeitgesteuert oder auch durch eine bestimmte Bedingung ausgelöst werden. Sie können auch genutzt werden, um wiederkehrende Ereignisse innerhalb eines *States* zu modellieren.²²⁷

Innerhalb des Maschinenagenten ist es möglich, für die relevanten Subkomponenten weitere Agenten anzulegen. Da diese jedoch meist nur wenige Werte repräsentieren (primär den jeweiligen Zustand), ist es zumeist sinnvoller, diese Werte direkt als Parameter und Variablen im Maschinenagenten zu hinterlegen.

Die Abnutzung wird als Funktion hinterlegt, die auf die Zustandsvariable der jeweiligen Subkomponente einwirkt. Die Abnutzungsfunktion wird dann durch eine wiederkehrende *Transition* gerufen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird ebenfalls als Variable angelegt, die von einer Funktion regelmäßig auf Basis des Zustandes überprüft und angepasst wird. Diese Wahrscheinlichkeit ist der Eingabewert für eine *Transition*, die aufgrund einer Rate ausgelöst wird. So wird beispielsweise die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Zeitintervall als Rate definiert (Anwendungsbeispiel s. Abbildung 17).

AnyLogic bietet mit den *Downtime*-Blöcken eine Möglichkeit, Stillstandzeiten (Ausfälle und Wartungsarbeiten) zu modellieren. Die in diesen Blöcken vorausgelegten Möglichkeiten zur Anpassung (Abhängigkeit von Laufzeiten und durchlaufenen Zyklen) reichen für eine Modellierung zeitgesteuerter Instandhaltung aus. Des Weiteren kann mit *Downtime*-Blöcken eine Ausfalllogik nach *MTBF* einfach modelliert werden. Eine zustandsgesteuerte Instandhaltung ergibt hingegen nur dann Sinn, wenn der Zustand der jeweiligen Komponenten modelliert werden kann. Deshalb wird in dieser Arbeit folgender Weg beschritten: Die Abnutzungs- und Ausfalllogik werden innerhalb der Maschinenagenten als *Statecharts* modelliert. Wird ein bestimmter Zustand erreicht, wird mittels des Ausdrucks

²²⁷ weitere Informationen: Grigoryev, 2018, S.43ff

`main.dt_downtimeX.startTask(this)`; der entsprechende *Downtime*-Block im Main-Agenten ausgelöst. Mit dem Schlüsselwort *this* wird in *Java* und *AnyLogic* das aktuelle Objekt referenziert (Anwendungsbeispiel s. Abbildung 20).

Implementierung - Instandhaltung

Bei der Implementierung muss in besonderer Weise auf die unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien Rücksicht genommen werden, da dabei die Instandhaltungstätigkeiten auf unterschiedliche Weise ausgelöst werden. Die Implementierung dafür kann sehr individuell ausfallen; als Anhaltspunkt für die Implementierung in *AnyLogic* wird die folgende Logik vorgeschlagen. Die zeitgesteuerten Tätigkeiten werden im Maschinenagenten durch eine *Transition* in die jeweiligen *States* mit zeitlich ausgelösten Bedingungen implementiert. Die zustandsgesteuerten Tätigkeiten werden im Maschinenagenten durch eine *Transition* in die jeweiligen *States* mit zustandsabhängig ausgelösten Bedingungen implementiert. Das Erreichen der jeweiligen *States* löst analog zu den Ausfällen wiederum entsprechende *Downtime*-Blöcke im Main-Agenten aus (Anwendungsbeispiel s. Abbildung 20).

Die Auslösung eines *Downtime*-Blocks löst wiederum einen *Flowchart* aus, der den entsprechenden Instandhaltungsprozess widerspiegelt.²²⁸ Nach Abschluss der Tätigkeit, also bei Erreichen des *Flowchart*-Endes wird eine Nachricht an den *Statechart* des Maschinenagenten gesendet, sodass er wieder in den betriebsbereiten *State* versetzt wird (Anwendungsbeispiel s. Abbildung 22).

In *AnyLogic* wird das Instandhaltungspersonal ebenfalls mit Ressourcenblöcken implementiert. Die von den Ressourcenblöcken erzeugten Agenten können dann von den *Flowcharts* der Instandhaltung beansprucht werden können.

Die Ersatzteile werden als Agenten implementiert, sie werden bei Ihrer Bestellung oder Ankunft erzeugt und in die entsprechenden *Flowcharts* der Instandhaltung zur Verwendung eingefügt. Dies lässt sich in vielen Fällen mit einem *Combine*-Block realisieren (Anwendungsbeispiel s. Abbildung 21).

Implementierung - Kennzahlensystem

Es ist eine wesentliche Aufgabe der Simulationsexpert*in, das richtige Mittel der Kommunikation zu wählen, um die Ergebnisse zu vermitteln. Die von *AnyLogic* vorgegebenen Möglichkeiten, Kennzahlen direkt auszulesen, sind begrenzt. Um eine aussagekräftige Kennzahlenaufstellung zu erhalten, lohnt es sich, die Kennzahlen mit der Nutzung von Variablen selbst zu erstellen. Dazu werden die entsprechenden Variablen, z.B. Auslastungs- und Nutzungszeiten oder Kosten, als Variablen im Main-

²²⁸ vgl. <https://cloud.AnyLogic.com/model/45f7ada4-7542-4975-a6ec-843183e9c715?mode=SETTINGS>, Zugriff 06.08.2021

Agenten angelegt und durch die übrigen Agenten verändert. Die auf diese Weise abgespeicherten Kennzahlen können anschließend durch das Monitoring der Kennzahlen wiedergegeben werden. Hierzu bietet *AnyLogic* eine große Auswahl an Diagrammen und sonstigen Ausgabefunktionen an, die sich in der Bibliothek *Analysis* finden.²²⁹

Sobald das formale Modell mit den nötigen Daten in der Simulationssprache implementiert ist und dieses Simulationsmodell verifiziert und validiert ist, ist die Implementierung abgeschlossen. Das Simulationsmodell kann nun für die ersten Experimente genutzt werden. Es ist möglich, dass durch den Wissenszuwachs der Experimente das Simulationsmodell iterativ weiter angepasst werden muss.

4.5 Datenbeschaffung und –aufbereitung

Eine bedeutende Aufgabe bezüglich der Instandhaltung ist die korrekte Einschätzung der Zustände der Maschinen. Die Wirkungszusammenhänge zu bestimmen und in einem Datensystem abzulegen, ist die Grundlage für planmäßige Instandhaltung und deren Simulation.²³⁰ Im Idealfall stehen präzise stochastische Verteilungen zur Verfügung, welche es erlauben, die Abnutzung und die zufälligen Ausfälle der Systeme zu modellieren. Die Beschaffung dieser Daten kann sich schwierig gestalten, da es oftmals unklar ist, wie ein Zustand zu quantifizieren ist und wie die Ausfallwahrscheinlichkeit damit zusammenhängt. Zur Einführung einer zustandsorientierten Instandhaltung ist der Aufbau einer Wissensbasis bezüglich der Zustände und Ausfallwahrscheinlichkeiten essenziell. Generell wird dazu ein *Data-Mining* Prozess nötig. Dieser versucht, aus den Daten der Sensorik Zusammenhänge über den Zustand des Teils herzustellen.²³¹ Falls derart aufwändige Verfahren nicht zur Verfügung stehen, kann versucht werden, das *Enterprise Resource Planning-System* oder die Maschinendatenerfassung zu befragen. Außerdem liefern die eventuell vorhandenen SMEA/FMEA Hinweise auf kritische Komponenten.²³² Die Durchschnittszeit zwischen zwei Ausfällen (engl.: *Mean time between failures* MTBF) und die durchschnittliche Reparaturzeit (engl.: *Mean time to repair* MTTR) sind aussagekräftige Daten, die leicht zu beschaffen sind. Für den Fall, dass keine Daten zur Verfügung stehen, gibt es Methoden die Zeiten zu schätzen; dies ist allerdings keine bevorzugte Vorgehensweise.²³³

²²⁹ weitere Informationen: <https://AnyLogic.help/AnyLogic/ui/AnyLogic-palettes.html#analysis>, Zugriff 22.06.2022

²³⁰ vgl. Strunz, 2012, S.13

²³¹ vgl. Matyas, 2016, S.143

²³² vgl. Matyas, 2016, S.149ff, Gupta, Lawsirirat, 2006, S.309

²³³ vgl. Law, 1990, S.315f

$$\text{mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen} = \frac{\text{Summe der betriebsbereiten Zeiten}}{\text{Anzahl der Ausfälle}}$$

Formel 10: Mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen²³⁴

$$\text{mittlere Zeit für eine Reparatur} = \frac{\text{Summe der Reparaturzeiten}}{\text{Anzahl der Ausfälle/Raparaturen}}$$

Formel 11: Mittlere Zeit für eine Reparatur²³⁵

4.6 Experimente

Ist das Modell mit den nötigen Daten implementiert, können die Experimente durchgeführt werden. Bevor die Parameterwahl für das erste Experiment erfolgt, wird festgelegt, ob die Anlaufphase des Systems (*transient state*) und/oder der eingeschwungene Zustand (*steady state*) untersucht werden soll. Wenn das Unternehmen mit vielen Anlaufphasen operiert, z.B. ein sich ständig änderndes Produktionssystem besitzt, kann es sinnvoll sein, zusätzlich zum eingeschwungenen Zustand die Anlaufphase zu untersuchen. In den meisten Fällen hat der Betrieb in einem Produktionsunternehmen jedoch eine gewisse Konstanz, dann sollte der Fokus jedenfalls auf dem eingeschwungenen Zustand liegen.²³⁶ Dementsprechend ist der Beobachtungszeitraum für die Ergebnisse zu wählen. Es ist auch möglich, eine sog. Vorbesetzung zur Initialisierung zu erstellen.²³⁷ Das bedeutet, dass ein beispielhafter Zustand des Systems übergeben wird, um die Einschwingphase zu verkürzen.

Die Parameter der Experimente sind vor einem Simulationslauf festzulegen. In diesem Zusammenhang kann auch festgehalten werden, welche Ergebnisse erwartet werden. Für KMU, die ihre Instandhaltung mit einer Variation von mehreren Parametern untersuchen möchten, sollte mit iterativen Experimenten eine manuelle Optimierung durchgeführt werden. Dies ist sinnvoll, da oftmals nicht im Vorhinein klar ist, welche Parametermanipulation welchen Einfluss auf das Modell hat. Aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten der Parametermanipulation ist es wichtig, zielgerichtet vorzugehen. So sollten pro Experiment möglichst wenige Parameter variiert werden, um den Ursache-Wirkung-Zusammenhang leichter nachzuvollziehen. Welche Experimente durchgeführt werden, ist anwendungsspezifisch auszuwählen. Im Rahmen der jeweiligen zu untersuchenden Strategie sollten die zu manipulierenden Parameter vor der Durchführung der Experimente festgelegt werden. Für die Instandhaltungssimulation sinnvoll manipulierbare Parameter sind beispielsweise in Tabelle 4 dargestellt. Es sind darin die möglichen unmittelbaren Effekte einer

²³⁴ vgl. Gallab et al., 2016, S.1214ff

²³⁵ vgl. ebenda

²³⁶ vgl. Law, McComas, 1997, S.89

²³⁷ vgl. Helmig et al., 2012, S.220

Parameteränderung angegeben. Dabei ist zu beachten, dass bei komplexen Systemen aufgrund der inneren Wechselwirkungen das gesamte Modell durch eine Parameteränderung betroffen sein kann.

Manipulierbare (ausfallgesteuert)	Parameter	mögliche unmittelbare Effekte auf:
Anzahl der Maschinen		<ul style="list-style-type: none"> • Maschinenauslastung • Liefertreue • Maschinenkosten • Ersatzteilbedarf
Anzahl der Instandhaltungsteams		<ul style="list-style-type: none"> • Personalauslastung • Personalkosten • Ausfallzeiten der Maschinen
Bestellpunkte und Bestellmenge der Ersatzteile		<ul style="list-style-type: none"> • Ersatzteilversorgung • Bestell- und Lagerkosten • Ausfallzeiten der Maschinen
Anzahl der Aufträge		<ul style="list-style-type: none"> • Maschinenauslastung • Liefertreue
Weitere manipulierbare (zeitgesteuert)	Parameter	mögliche unmittelbare Effekte auf:
Instandhaltungsintervalle		<ul style="list-style-type: none"> • Maschinenverfügbarkeit • Personalauslastung • Ersatzteilverbrauch
Weitere manipulierbare (zustandsgesteuert)	Parameter	mögliche unmittelbare Effekte auf:
Grenzzustände für Instandhaltung		<ul style="list-style-type: none"> • Maschinenverfügbarkeit • Personalauslastung • Ersatzteilverbrauch

Tabelle 4: Für Instandhaltung sinnvoll manipulierbare Parameter (beispielsweise)

Ein Simulationslauf stellt immer nur ein mögliches Ergebnis von unendlichen Möglichkeiten dar. Aufgrund der stochastischen Natur des Systems ist es keinesfalls sinnvoll, nach nur einem Simulationslauf das Ergebnis als endgültig anzusehen.²³⁸ Für stochastisch behaftete Systeme sollten mindestens drei bis fünf Simulationsläufe für jedes individuelle Setup durchgeführt werden, um die Varianz zu reduzieren. Um tatsächlich unabhängige Ergebnisse zu erhalten, muss in *AnyLogic* die Einstellung im Reiter *Simulation* von der vorgegebenen *Fixed Seed* auf *Random Seed* geschaltet werden. Dadurch wird jeder Simulationslauf mit unabhängigen Startwerten des Zufallsgenerators durchgeführt. Es ist ratsam, in einer realen Simulationsstudie wesentlich mehr Läufe pro Parameter-Setup durchzuführen, um ein statistisch aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten; zumal das Modell durch das Hinzufügen weiterer Komponenten schnell an Komplexität gewinnt.²³⁹ Es kann sinnvoll sein, Abbruchkriterien festzulegen. In diesem Fall würde ein Experiment oder die gesamte Simulation z.B. enden, wenn ein bestimmter Wert sich im Vergleich zum vorherigen

²³⁸ vgl. VDA 4811, 2013, S.16

²³⁹ vgl. Strunz, 2012, S.435

Experiment nur noch wenig verändert, was auf die Nähe zu einem lokalen Optimum hinweist.

Nach Durchführung der Experimente müssen die Ergebnisse bewertet und aufbereitet werden, um sie zu präsentieren. Es ist ratsam, auf eine gute Dokumentation zu achten, damit das geschaffene Modell weiterentwickelt werden kann und für zukünftige Fragestellungen zur Verfügung steht.

5 Simulationsstudie fiktives Unternehmen

In diesem Kapitel wird zur Veranschaulichung der zuvor beschriebenen Vorgehensweise eine beispielhafte Anwendung beschrieben. Dies soll einerseits die Fähigkeit des Modells demonstrieren, zur Untersuchung und Verbesserung der Instandhaltung eines KMU beizutragen; andererseits die Einarbeitungszeit in eine ähnliche Simulationsstudie in KMU reduzieren.

5.1 Zielbeschreibung und Aufgabendefinition

Die Ziele und Aufgaben der Simulationsstudie werden üblicherweise in Form eines Lasten- und Pflichtenheftes festgehalten. Um im angemessenen Umfang dieser Arbeit zu bleiben, wird auf diesen umfangreichen Schritt verzichtet und im Folgenden stattdessen die Ziele und Aufgaben in kurzer Form zusammengefasst.

Im Rahmen einer Simulationsstudie sollen die Auswirkungen drei unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien (ausfall-, zeit- und zustandsgesteuert) auf eine fiktive Fabrik simuliert und bewertet werden. Die wichtigste Optimierungsgröße sind die Gesamtkosten. Ausgangspunkt ist der aktuelle Zustand der fiktiven Fabrik, der im Detail in den folgenden Unterkapiteln beschrieben wird.

Die zeitgesteuerte Strategie soll es ermöglichen, unter Einbezug sog. Wartungskits in regelmäßigen Intervallen Wartungsarbeiten durchzuführen. Dies soll zu einer besseren Planbarkeit der Ausfälle führen und die verringerten Ausfallkosten des Produktionssystems sollen die eventuell höheren Instandhaltungskosten überkompensieren.

Die zustandsgesteuerte Strategie sieht vor, mittels an den Maschinen angebrachter Sensorik den Zustand der Maschinen zu überwachen. Damit soll erreicht werden, dass der Wartungsbedarf der einzelnen Komponenten besser eingeschätzt werden kann und gegebenenfalls entweder der Wartungsaufwand reduziert oder die Zuverlässigkeit der Produktion weiter gesteigert werden kann. So soll der Mehraufwand für die Investition überkompensiert werden.

Zur Erstellung der Simulationsstudie sollen die in Abbildung 5 dargestellten Prozessschritte durchlaufen werden. Es liegen bereits detaillierte Daten über das Abnutzungs- und Ausfallverhalten der kritischen Komponenten der Maschinen vor. Im Rahmen der Experimente werden die drei Instandhaltungsstrategien untersucht und miteinander verglichen. Dazu wird zu jeder Strategie eine iterative manuelle Optimierung durchgeführt, wobei die Parameter jeweils auf Basis der vorangegangenen Experimente angepasst werden sollen. Es wird davon

ausgegangen, dass eine gewisse Robustheit gegen Maschinenausfälle ein unterstützender Faktor für die Optimierung der Gesamtkosten ist. Für die Bewertung und zum Vergleich der verschiedenen Konfigurationen soll deshalb ein ausführliches Kennzahlensystem erstellt werden.

Sind die Ziele und Aufgaben eindeutig formuliert und sich alle Beteiligten einig, kann mit der Durchführung der Simulationsstudie gestartet werden. Im ersten Schritt wird das System analysiert und die relevanten Aspekte des Systems identifiziert.

5.2 Systemanalyse

In diesem Kapitel wird die fiktive Fabrik grob beschrieben und beurteilt, welche Systemkomponenten relevant sind. Dabei ist das Hauptbewertungskriterium, ob von den Komponenten ein Einfluss auf die Produktivität, bzw. die Gesamtkosten erwartet wird. Da es sich hierbei um ein Beispiel zur Veranschaulichung handelt, werden Aspekte mit unklarer Relevanz im Zweifelsfall als relevant eingestuft, um möglichst viele dieser Aspekte vorzuführen. Die Fabrik ist in der metallverarbeiteten Branche und produziert Wellen und Gehäuse für große Motoren. Dieses Kapitel orientiert sich erneut an den vier wesentlichen Aspekten aus Abbildung 6 (Produktion, Instandhaltung, Maschinen als Agenten und Kennzahlensystem).

Systemanalyse - Produktion

Die Produktionsplanung speist zum Schichtbeginn Aufträge in die Produktion, die über eine Schicht abgearbeitet werden sollen. Die Modellierung der Betriebs- und Instandhaltungszeiten ist relevant, da die Instandhaltungsaufgaben zur Schließzeit der Fabrik durchgeführt werden. Die Fabrik ist am Wochenende geschlossen. Weitere Schließzeiten, wie z.B. Betriebsferien und Feiertagen, werden in dieser Iteration der Modellierung vernachlässigt.

Die Fabrik ist nicht außergewöhnlich groß, daher sind die Transportzeiten im Vergleich zu den Arbeitszeiten eher vernachlässigbar. Zur erleichterten Verifikation und Validierung soll dennoch das Fabriklayout mit überschlägigen Abmessungen als Modellierungsgrundlage dienen und eine aussagekräftige Visualisierung erzeugt werden.

Die Produktionsprozesse bedienen sich der Maschinen, die ausfallbehaftet sind und sind somit relevant. Die Parameter der stochastischen Schwankung der Bearbeitungszeiten für jeden Arbeitsschritt sind bekannt. Die Modellierung des Bedienpersonals wird vernachlässigt, da es keine nennenswerten Berührungspunkte mit der Instandhaltung hat.

Das Transportsystem der Fabrik besteht aus Gabelstaplern, welche die großen Teile einzeln durch die Fabrik transportieren. Transportgefäße, wie z.B. Sammelboxen werden nicht verwendet. Die Instandhaltung der Transportfahrzeuge wird vernachlässigt, sie dienen lediglich als Hilfsmittel für den Produktionsprozess und die Reinigung. Der Einfluss der Transportmittel auf die Instandhaltung ist damit begrenzt und seine Relevanz zweifelhaft, daher wird in diesem Fall für eine Modellierung der Transportmittel entschieden.

Die Aufträge kommen in Form von Rohteilen aus der Gießerei im Eingangslager an und durchlaufen anschließend die Produktions- und Logistikprozesse. Sie speichern ihr erwartetes Fertigstellungsdatum und ihren Typ, anhand dessen der Weg durch den Produktionsprozess gesteuert wird. Eine Montage ist nicht im Betrachtungshorizont enthalten.

Systemanalyse - Maschinen als Agenten

Die Maschinen bestehen aus zwei relevanten Subkomponenten (Motor und Linearführung), die ausfallbehaftet sind. Außerdem spielen die Verschmutzung und Reinigung eine zentrale Rolle für die Lebensdauer der Komponenten. Daher werden insgesamt drei relevante abnutzungsbehaftete Aspekte betrachtet.

Die (stochastischen) Abnutzungsfunktionen und zustandsabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeiten der kritischen Komponenten sind bekannt. Eine zustandsbasierte Strategie soll untersucht werden, daher sind die Zustände, Abnutzungs- und Ausfalllogiken der Subkomponenten zu modellieren.

Die Stillstandzeiten ergeben sich aus den zur Behebung nötigen Instandhaltungstätigkeiten. Diese finden unter Einsatz verschiedener Hilfsmittel und Ersatzteile statt und sind sehr aufwändig. Daher ist ihre detaillierte Modellierung relevant.

Systemanalyse - Instandhaltung

Bislang arbeitet die Instandhaltung nach einer hauptsächlich ausfallgesteuerten Instandhaltungsstrategie mit zeitgesteuerter Reinigung. Es sollen die Möglichkeiten von zeit- und zustandsgesteuerter Instandhaltung ebenfalls untersucht und modelliert werden.

Die Instandhaltungsprozesse spiegeln diverse Aufgaben wider, die sinnvoll abstrahiert abgebildet werden sollen. Es wird angenommen, dass durch Reinigung, Wartung und Reparatur ein so gut wie neuer Zustand der Subkomponente erreicht werden kann.

Das Instandhaltungspersonal arbeitet stets in Zweierteams, die sich aus Sicherheitsgründen nicht aufteilen dürfen. Die Arbeitszeit des Instandhaltungspersonals ist vertraglich auf die Abendstunden und das Wochenende beschränkt. Im Rahmen dieser Zeiten soll die Anzahl der Instandhaltungsteams variiert werden. Auf Urlaub, Krankheit oder sonstige Ausfälle des Instandhaltungspersonals wird nicht eingegangen.

Für alle Maschinentypen kommen die gleichen Ersatzteile (Motoren, Linearführungen und Wartungskits) zum Einsatz. Die Wartungskits bestehen aus Lagern, Schmiermittel und Filtern.

Systemanalyse - Kennzahlensystem

Neben den Kosten für den Betrieb des Produktionssystems und der Instandhaltung sind auch die Kosten für verspätete Aufträge erheblich und relevant.

Es sollen die Auslastungen und Verfügbarkeiten der Maschinen und Instandhaltungsteams aufgezeichnet werden, um Redundanzen und Engpässe beurteilen zu können. Dabei ist relevant, in welchen *States* sich die Maschinen während der Betriebszeit befinden. Die *States* der Maschinen, während der Schließzeiten spielen hingegen keine Rolle.

Um das Bild abzurunden, sollen auch die Lagerstände der Eingangs-, Zwischen- und Ausgangslager sowie die Lagerstände des Ersatzteillagers aufgezeichnet werden.

In diesem Kapitel wurde die Systemanalyse der fiktiven Fabrik beschrieben. Dabei wurden alle relevanten Komponenten des Gesamtsystems identifiziert. Auf Basis der als relevant eingestuften Komponenten wird im folgenden Kapitel das Modell formal beschrieben.

5.3 Modellformalisierung (inkl. Daten)

Nachdem die relevanten Komponenten identifiziert wurden, wird das formalisierte Modell der fiktiven Fabrik inkl. Daten erstellt. Die stochastischen Verteilungen der Zeiten für die Produktions- und Instandhaltungstätigkeiten, für die Lieferungen von Ersatzteilen und für die Auftragseingänge sind bekannt. Im Folgenden werden die verwendeten Verteilungsfunktionen in ihrer in *AnyLogic* üblichen Notation verwendet:²⁴⁰

random() gibt einen zufälligen kontinuierlichen Wert zwischen 0 und 1 zurück, wobei jeder Wert gleich wahrscheinlich ist

²⁴⁰ weitere Informationen: <https://anylogic.help/anylogic/stochastic/probability-distributions.html#probability-distributions>, Zugriff 08.07.2022

triangular(min, max, mode) gibt eine Dreiecksverteilung zurück, die von *min* bis *max* geht und den wahrscheinlichsten Wert bei *mode* erreicht

uniform_discr(min, max) gibt eine auf ganze Zahlen diskrete Gleichverteilung zurück, die allen Werten von *min* bis *max* die gleiche Wahrscheinlichkeit zuordnet

Dieses Kapitel orientiert sich erneut an den vier wesentlichen Aspekten aus Abbildung 6 (Produktion, Instandhaltung, Maschinen als Agenten und Kennzahlensystem).

Modellformalisierung - Produktion

Die Fabrik stellt Gehäuse und Wellen für Motoren her. Momentan werden jeden Tag zu Schichtbeginn um 07:00 Uhr gleichverteilt nach *uniform_discr(13,15)* Aufträge für jeweils Gehäuse und Wellen in die Produktion eingespeist. Jeden Tag werden die gefertigten Teile um 16:00 Uhr von einem termingebundenen Lastwagen abgeholt.

Das Gelände ist etwa 1800 Quadratmeter groß und besitzt die in Abbildung 9 dargestellten relevanten Abmessungen der Arbeitsbereiche.



Abbildung 9: Layout der Fabrik mit wichtigsten Abmessungen, eigene Darstellung

Für die Abarbeitung der Aufträge stehen aktuell jeweils zwei Bohr-, Fräs- und Drehmaschinen zur Verfügung. Die Aufträge werden von Gabelstaplern durch die Fabrik bewegt, die jeweils einen Auftrag gleichzeitig befördern können und eine Geschwindigkeit von 10km/h besitzen. Der Betrieb jeder Maschine kostet pro Stunde aufgrund von Abschreibung, Personalkosten und Energie 60 Geldeinheiten. Die Aufträge müssen nacheinander verschiedene Fertigungsschritte durchlaufen. Aufgrund der individuellen Natur jedes Auftrages wird der Zeitaufwand pro Fertigungsschritt einer zeitlichen Dreiecksverteilung *triangular(30, 40, 35) Min* angenähert. Die Prozessschritte mit ihren jeweils benötigten Ressourcen sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Warteschlangen vor den Maschinen werden nach dem *FIFO* Prinzip (*First in - First out*) abgehandelt.

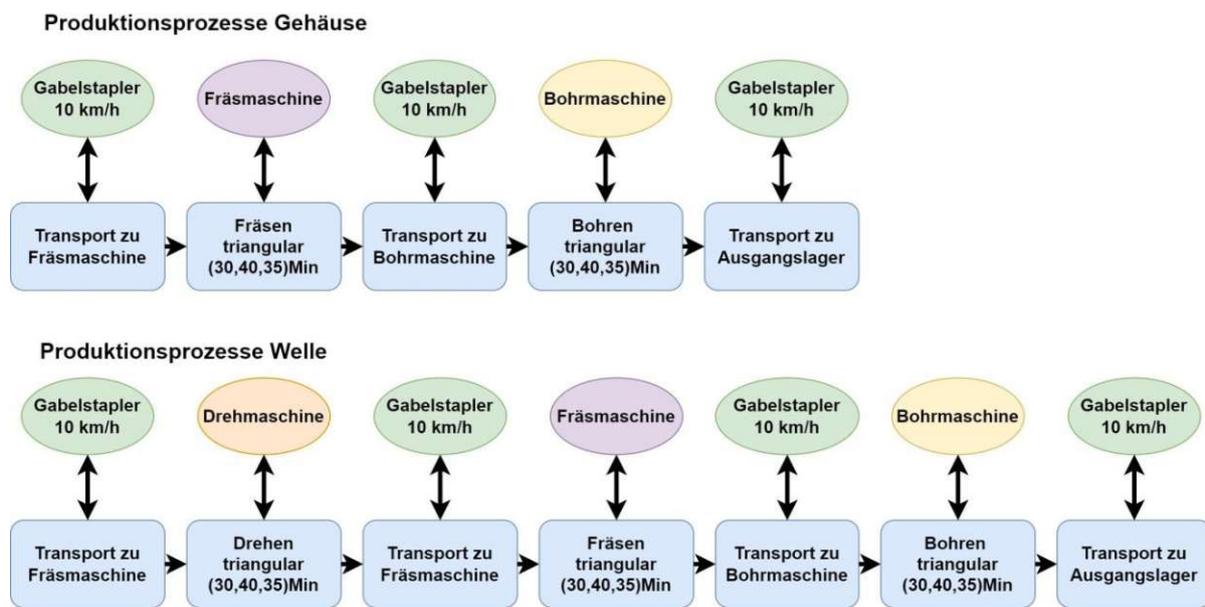


Abbildung 10: Prozessschritte für die Produktion von Gehäuse und Welle, eigene Darstellung

Verspätete Aufträge bedeuten Zusatzschichten, Vertragsstrafen und Imageverluste, die je verspätetem Fertigungsauftrag pauschal auf 1.000 Geldeinheiten quantifiziert werden. Ein Auftrag gilt ab dem Moment als verspätet, indem er nicht um 16:00 Uhr das Ausgangslager erreicht hat. Auch die verspäteten Aufträge müssen noch schnellstmöglich fertiggestellt werden, um weiteren Imageschaden vom Unternehmen abzuwenden.

Modellformalisierung - Maschinen als Agenten

Jede Maschine besteht aus drei kritischen Aspekten, die einen Einfluss auf das Ausfallverhalten und damit auf die Instandhaltung haben – Der Zustand des Motors, der Zustand der Linearführung und die Verschmutzung der Maschine, vor allem durch Späne. Die Zustände werden durch eine Prozentzahl repräsentiert, wobei 100% den bestmöglichen Zustand (*so gut wie neu*) darstellt. Die Abnutzung der

kritischen Aspekte ist aufgrund vorangegangener Erfahrungen der Hersteller und aus den Betriebsdaten der Maschinen auf folgende Zusammenhänge zu beziffern. Der Zustand der jeweiligen Komponente wird dabei von 0% bis 100% angegeben.

$$zustandMotor_{t+1min} = zustandMotor_t - \frac{random() * 100.1 - zustandMotor_t}{10000}$$

Formel 12: Zustand und stochastische Abnutzung der Komponente Motor

$$\begin{aligned} zustandF\u00fchrung_{t+1min} \\ = zustandF\u00fchrung_t - \frac{random() * 100.1 - zustandF\u00fchrung_t}{4000} \end{aligned}$$

Formel 13: Zustand und stochastische Abnutzung der Komponente Linearf\u00fchrung

$$zustandVerschmutzung_{t+1min} = zustandVerschmutzung_t - \frac{random() * 5}{60}$$

Formel 14: Verschmutzungsgrad und seine stochastische Zunahme

Aus dem Zustand leitet sich die t\u00e4gliche Ausfallwahrscheinlichkeit ab. Die Werte aus der folgenden Tabelle 5 wurden direkt aus der Abbildung 3 \u00fcbernommen. So gilt f\u00fcr alle drei Zust\u00e4nde die gleiche dargestellte Verteilung h():

Zustand der Komponente	Wahrscheinlichkeit f\u00fcr Ausfall der Komponente an jedem einzelnen Werktag h(Zustand)
100-90%	0,5%
90-80%	0,9%
80-70%	1,8%
70-60%	3,2%
60-50%	4,9%
50-40%	7,5%
40-30%	11,0%
30-20%	15,2%
20-10%	21,8%
10-0%	33,1%

Tabelle 5: Wahrscheinlichkeit h(Zustand) f\u00fcr Ausfall

Um schlussendlich die t\u00e4gliche Ausfallwahrscheinlichkeit der kritischen Komponenten zu erhalten, wurden folgende Zusammenh\u00e4nge ermittelt. Dabei ist besonders zu beachten, dass f\u00fcr die Ausfallwahrscheinlichkeit des Motors nur der Zustand des

Motors entscheidend ist (s. Formel 15), wobei für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Linearführung auch der Verschmutzungsgrad eine Rolle spielt (s. Formel 16):

$$p_{\text{AusfallMotor}} = h(\text{zustandMotor})$$

Formel 15: Ausfallwahrscheinlichkeit des Motors in Abhängigkeit des Zustands

$$p_{\text{AusfallFührung}} = h(\text{zustandFührung}) + h(\text{zustandVerschmutzung})$$

Formel 16: Ausfallwahrscheinlichkeit der Linearführung in Abhängigkeit des Zustands und der Verschmutzung

Die Ausfälle und Instandhaltungstätigkeiten führen zu **Stillstandzeiten**, in denen die Maschinen nicht für den Produktionsprozess zur Verfügung stehen. Dabei ist zu beachten, dass die zur Reinigung oder Wartung in die Warteschlange eingereihten Maschinen nicht vor Beendigung der Tätigkeit wieder in Betrieb genommen werden.

Modellformalisierung - Instandhaltung

Die Instandhaltungsstrategien sind ausfall-, zeit- und zustandsgesteuert. Zu jeder Strategie ist anzumerken, dass die Instandhaltungstätigkeiten (inkl. Reinigung) ausschließlich während der Arbeitszeiten des Instandhaltungspersonals erfolgen kann. Im vorliegenden Fall sind die Logiken wie folgt:

Bei der ausfallgesteuerten Strategie werden nur zyklische Reinigungsarbeiten durchgeführt. Auf eine Wartung der Maschinen wird verzichtet und kaputte Komponenten werden bei Ausfall durch Ersatzteile ausgetauscht.

Bei der zeitgesteuerten Strategie werden zyklische Reinigungs- und Wartungsarbeiten durchgeführt. Zudem werden kaputte Komponenten bei Ausfall durch Ersatzteile ausgetauscht.

Bei der zustandsbasierten Strategie werden Maschinen bei Unterschreiten eines Grenzwertes für einen Zustand einer kritischen Komponente zur Wartung oder Reinigung angemeldet. Bis die Tätigkeit bei der nächsten Möglichkeit durchgeführt wird, nimmt die Maschine weiterhin am Produktionsprozess teil.

Für die Reinigung, Wartung und Reparatur der Maschinen steht aktuell ein Instandhaltungsteam zur Verfügung. Die Arbeitszeiten sind vertraglich für die nächsten zwei Jahre geregelt (Mo.-Fr.: 20:00-24:00, Sa.-So.: 08:00-16:00). Inklusive aller Nebenkosten betragen die Kosten für das Instandhaltungsteam jeweils 8.000 Geldeinheiten pro Monat. Innerhalb der Arbeitszeiten können den Teams beliebige Aufgaben zugewiesen werden.

Erleidet ein kritisches Teil einen Schaden, ist für die Reparatur ein Ersatzteil nötig. Um einen Wartungsprozess durchzuführen ist ein Wartungskit notwendig, das direkt

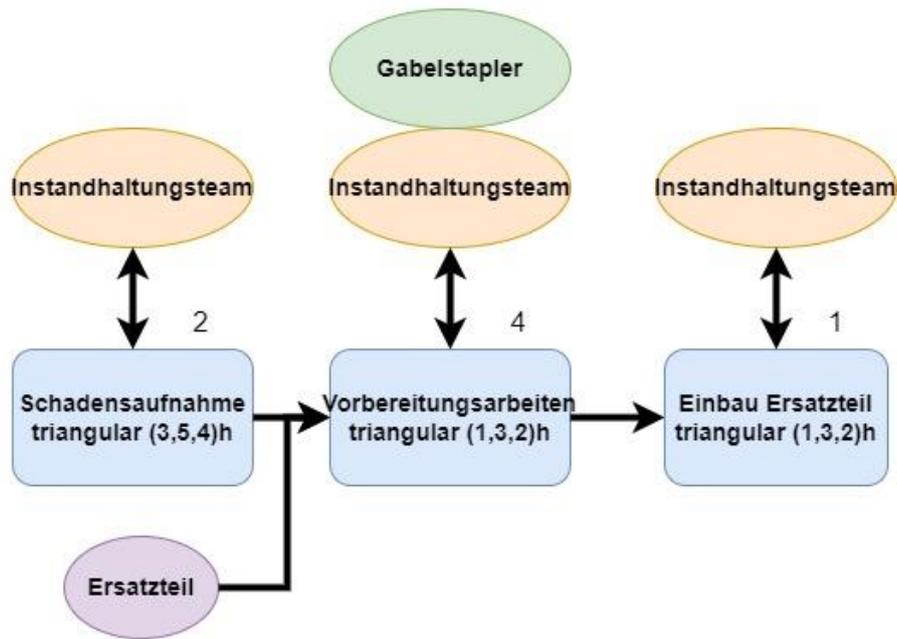
vom Hersteller der Maschinen bezogen werden kann. Die Lieferzeiten für Bestellungen der Ersatzteile und Wartungskits können Tabelle 6 entnommen werden. Eine Ersatzteil- und Wartungskitbestellung wird stets ausgelöst, wenn ein bestimmter Lagerwert (Bestellpunkt) unterschritten wird.

Teil	Lieferzeitverteilung	Kosten je Teil (Einkauf und Lagerung samt Kapitalbindung)
Ersatzmotor	<i>triangular(5, 20, 18) Tage</i>	Einkauf: 5.000 GE Lagerung: 5 GE / Tag
Ersatzführung	<i>triangular(5, 20, 18) Tage</i>	Einkauf: 10.000 GE Lagerung: 5 GE / Tag
Wartungskits	<i>triangular(1,7,5) Tage</i>	Einkauf: 500 GE Lagerung: 1 GE / Tag

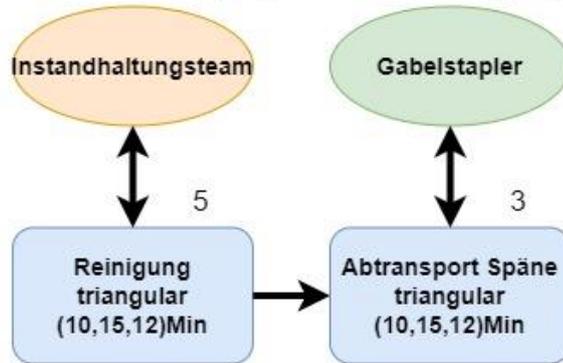
Tabelle 6: Lieferzeiten für Ersatzteile und Wartungskits

Im Schadensfall muss zunächst eine Schadensaufnahme durchgeführt werden. Diese beinhaltet alle Tätigkeiten, die bereits ohne ein vorliegendes Ersatzteil durchgeführt werden können. Ist ein Ersatzteil vorhanden, wird die Vorbereitungsphase eingeleitet; diese benötigt neben einem Instandhaltungsteam außerdem einen Gabelstapler. Nach der Vorbereitung kann das Instandhaltungsteam das Ersatzteil einbauen. Der Zustand des ausgetauschten Teils wird im Anschluss wieder mit 100% (*so gut wie neu*) angenommen. Die Reinigung besteht aus zwei Schritten; zunächst muss das Instandhaltungsteam die eigentliche Reinigung durchführen, dann muss ein Gabelstapler die Späne entsorgen. Im Anschluss an die Reinigung wird der Zustand der Verschmutzung wieder mit 100% angenommen. Die Wartung besteht aus zwei Teilen. Die Inspektion benötigt noch kein Wartungskit, dieses wird dann zur Durchführung der eigentlichen Wartung benötigt. Nach der Wartung werden die Zustände von Motor und Führung wieder mit 100% angenommen. Die benötigten Zeiten und Ressourcen lassen sich aus Abbildung 11 ablesen. Außerdem ist die jeweilige Priorität als schwarze Ziffer angegeben, wobei ein höherer Wert eine höhere Priorität bedeutet. Die Reinigung wird hoch priorisiert, damit die betriebsbereiten Maschinen zur nächsten Schicht wieder zur Verfügung stehen. Die Manipulation der Prioritäten ist kein Untersuchungsgegenstand der Experimente, hier sind bei komplexen Systemen weitere Optimierungspotentiale vorhanden.

Instandhaltungsprozess Reparatur



Instandhaltungsprozess Reinigung



Instandhaltungsprozess Wartung

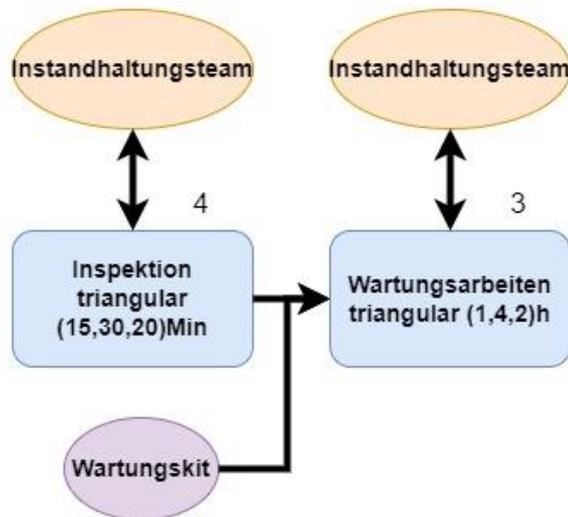


Abbildung 11: Prozessschritte für die Instandhaltung mit Prioritätsreihenfolge, eigene Darstellung

Modellformalisierung - Kennzahlensystem

Zur Beschreibung des Systems werden die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Kennzahlen verwendet. Niedrige Gesamtkosten aufgrund eines geringen Anteils verspäteter Aufträge, eine geringe Auslastung des Instandhaltungspersonals und eine hohe Bereitschaft der Maschinen werden dabei als Indizien für eine gute Robustheit gegen Maschinenausfälle gewertet.

Kosten sollen in den jeweiligen Kostenpunkten gesammelt werden und als absolute Zahlen und als Kuchendiagramm (Anteil an Gesamtkosten) ausgegeben werden (s. Formel 18).

Gesamtkosten

$$= \text{Maschinenkosten} + \text{Personalkosten (Instandhaltung)} \\ + \text{Verspätungskosten} + \text{Transportkosten} + \text{Ersatzteilkosten}$$

Formel 17: Kennzahl Gesamtkosten der Kostenpunkte in GE

$$\text{Gesamtkostenanteil} = \frac{\text{Kostenpunkt } X}{\text{Gesamtkosten}} * 100\%$$

Formel 18: Gesamtkostenanteil eines Kostenpunkts in Prozent

Maschinenkosten

$$= \text{Energiekosten} + \text{Personalkosten (Fertigung)} \\ + \text{Abschreibung Maschinen} + \text{Versicherungskosten}$$

Formel 19: Kostenpunkt Maschinenkosten in GE

Transportkosten

$$= \text{Personalkosten (Transport)} + \text{Abschreibung Gabelstapler} \\ + \text{Energiekosten} + \text{Versicherungskosten}$$

Formel 20: Kostenpunkt Transportkosten in GE

Personalkosten (Fertigung, Instandhaltung, Transport)

$$= \text{Lohnkosten} + \text{Lohnnebenkosten}$$

Formel 21: Kostenpunkt Personalkosten in GE

Verspätungskosten

$$= \text{Vertragsstrafen} + \text{Kosten Überstunden} + \text{Kosten Sonderfahrten} \\ + \text{Kosten Imageverluste}$$

Formel 22: Kostenpunkt Verspätungskosten in GE

Ersatzteilkosten (*Motor, Führung, Wartungskit*)

$$= \text{Bestellkosten} + \text{Lagerhaltungskosten} + \text{Kapitalbindungskosten}$$

Formel 23: Kostenpunkt Ersatzteilkosten in GE

Es sollen die Zeiten aufgezeichnet werden, wie lange sich die Maschinen während der Betriebszeit in den *States* befunden haben: Betriebsbereit – benutzt, betriebsbereit – nicht benutzt, in Reinigung, in Wartung, in Reparatur (ausgefallen). Um die Anteile in der Betriebszeit zu erhalten, wird folgender Zusammenhang verwendet:

Zeitanteil an Betriebszeit

$$= \frac{\text{Zeit verbraucht in State während der Betriebszeit}}{\text{gesamte Betriebszeit}} * 100\%$$

Formel 24: Zeitanteil an Betriebszeit in Prozent

Es sollen zu jedem Zeitpunkt die Lagerstände der Ersatzteile und Wartungskits aufgezeichnet werden; ebenso die Anzahl der gesamten im System vorhandenen Aufträge und die Gesamtanteile an verspäteten und pünktlichen Aufträgen (Liefertreue, s. ...). Die Überprüfung auf Pünktlichkeit der Aufträge erfolgt bei Abschluss des jeweiligen Auftrags.

$$\text{Liefertreue} = \frac{\sum \text{pünktliche Aufträge}}{\sum \text{gesamte Aufträge}} * 100\%$$

Formel 25: Liefertreue in Prozent

In diesem Kapitel wurde das Modell formal unter Einbezug aller bisher bekannten Daten beschrieben. Die formale Beschreibung ist die Grundlage für die im folgenden Abschnitt beschriebene Implementierung.

5.4 Implementierung

In diesem Abschnitt wird, unter Zuhilfenahme der in Kapitel 4 vorgestellten Implementierungsvorschläge, das zuvor beschriebene formalisierte Modell in einem digitalen Modell umgesetzt. Dazu wird das Softwarepaket *AnyLogic* verwendet. Der Main-Agent repräsentiert die Fabrik. Auf dieser Ebene findet der Produktions- und Intralogistikprozess statt, sowie die Instandhaltung der Maschinen. Im Rahmen des Main-Agenten agieren die Maschinen-, Instandhaltungspersonal-, Auftrags- und Ersatzteilagenten (s. Abbildung 12).

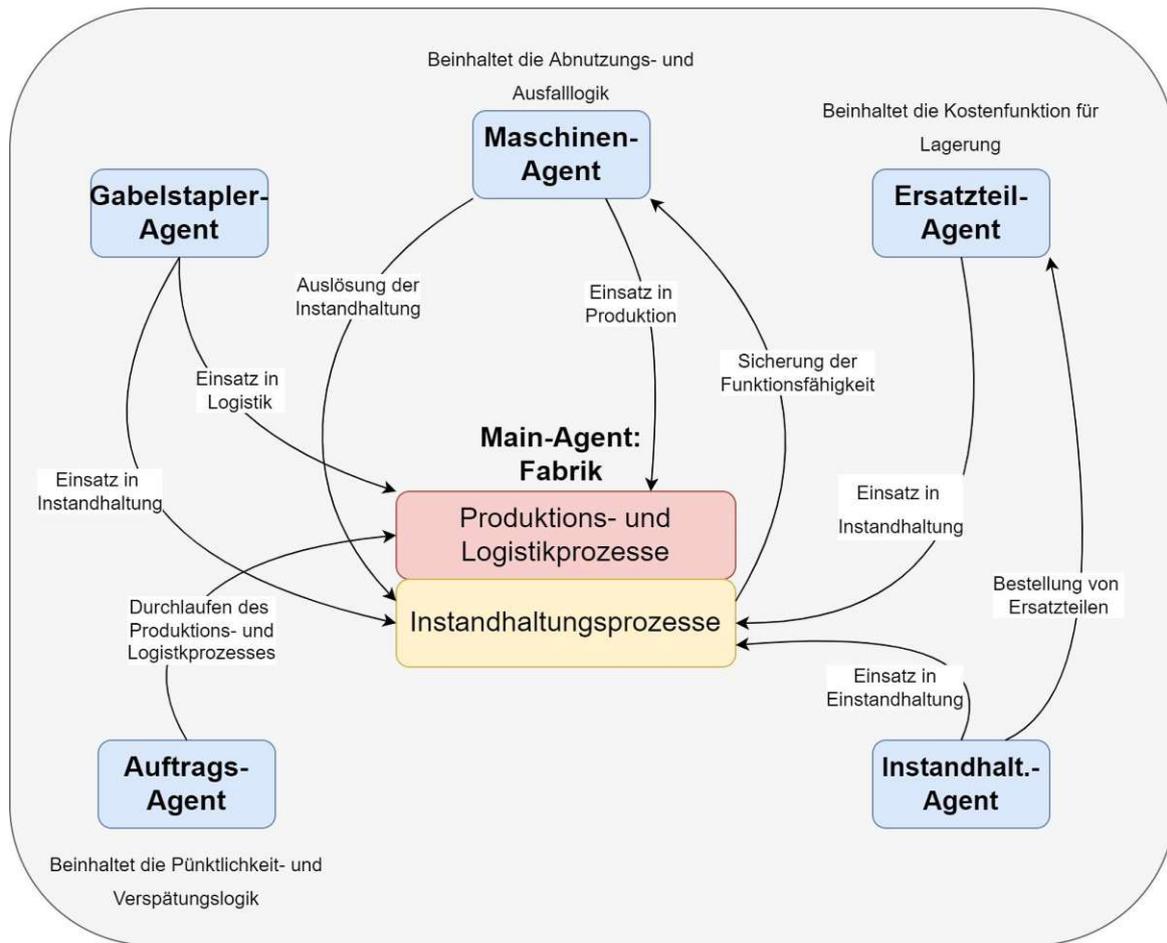


Abbildung 12: Beteiligte Agenten mit wichtigsten Beziehungen, eigene Darstellung

Dieses Kapitel orientiert sich erneut an den vier wesentlichen Aspekten aus Abbildung 6 (Produktion, Instandhaltung, Maschinen als Agenten und Kennzahlensystem).

Implementierung - Produktion

Die Betriebszeiten werden durch zwei Funktionen im Mainagenten festgelegt: $f_{istSchicht}$ und $f_{istWerktag}$ (s. Abbildung 13).

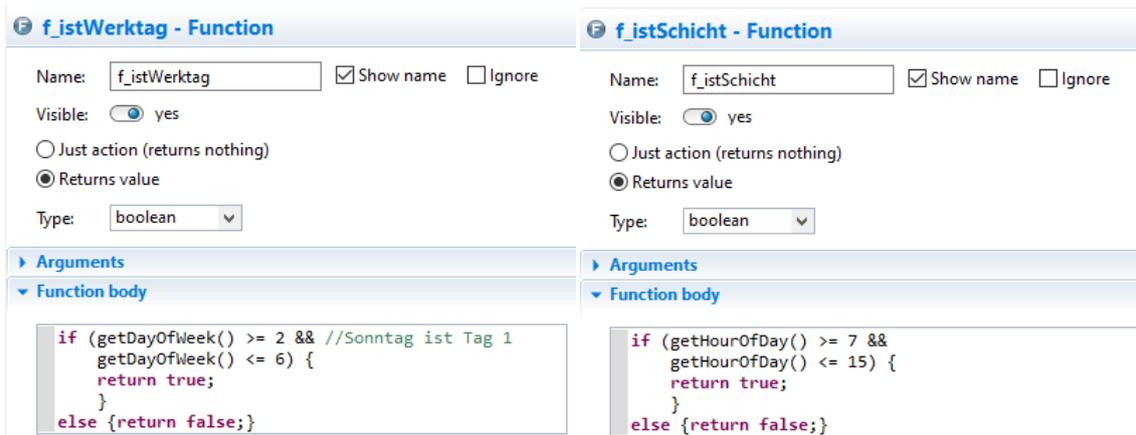


Abbildung 13: Funktionen zur Ermittlung der Betriebszeiten, eigener Screenshot

Abbildung 14 zeigt das Fabriklayout, das als grafische Grundlage für die Modellierung des Produktions- und Logistiknetzwerks mittels Knoten und Wegen (blaue Linien) dient. Zu sehen sind die einzelnen Fertigungsbereiche sowie die verschiedenen Lager. Rechts vor der Fabrik ist ein Bereich mit *bestellt* beschriftet, der später die bestellten aber noch nicht gelieferten Ersatzteile und Wartungskits enthält. Das Ereignis *Auftragsfreigabe* wird genutzt, um jeden Werktag um 07:00 Uhr die Aufträge in die tägliche Produktion einzuspeisen. Mit dem Ereignis *ET-Start* wird ein Anfangszustand für das Ersatzteillager hergestellt und jeweils ein Ersatzmotor und eine Ersatzführung in das Lager gelegt. Falls eine Instandhaltungsstrategie mit Wartung gewählt wird, werden außerdem sechs Wartungskits in das Lager gelegt. Diese Startbedingungen sollen verhindern, dass das System gleich zu Beginn aufgrund mangelnder Teile ausfällt und so die Einschwingzeit verkürzen.

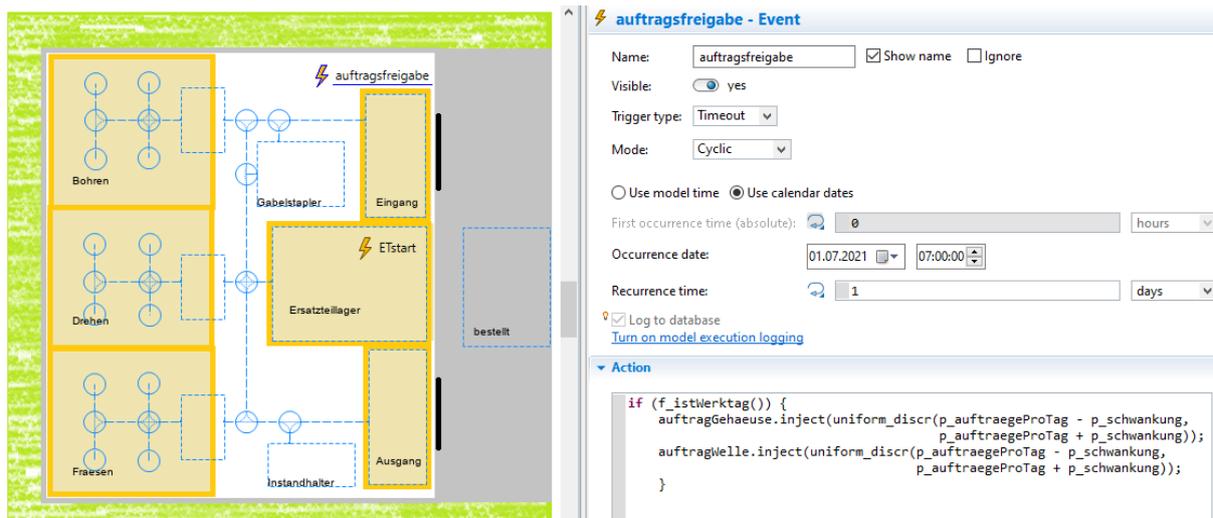


Abbildung 14: Fabriklayout mit Bewegungsnetzwerk der Intralogistik und täglicher Auftragsfreigabe als Ereignis, eigener Screenshot

In Abbildung 15 ist die Logik der Produktions- und Logistikprozesse der unterschiedlichen Produkte durch das Produktionsnetzwerk mittels *Flowcharts*

implementiert. Die unterschiedlichen Aufträge werden aufgrund ihres vorher festgelegten Typs *p_typ* unterschieden und können so mit Eingangs- (*enter*) und Ausgangsblöcken (*exit*) an unterschiedliche Bearbeitungsstationen gesendet werden. Im Schritt *Abfertigung* werden die fertigen Produkte ins Ausgangslager transportiert. Dort werden sie auf ihre Pünktlichkeit hin überprüft und in unterschiedliche Senkenblöcke (*sink*) gesendet, um die entsprechende Statistik zu sammeln. Der Einsatz von Maschinenagenten für Produktionsprozesse und Gabelstapleragenten für Transportprozesse wird mit *Seize*- und *Release*-Blöcken implementiert.²⁴¹

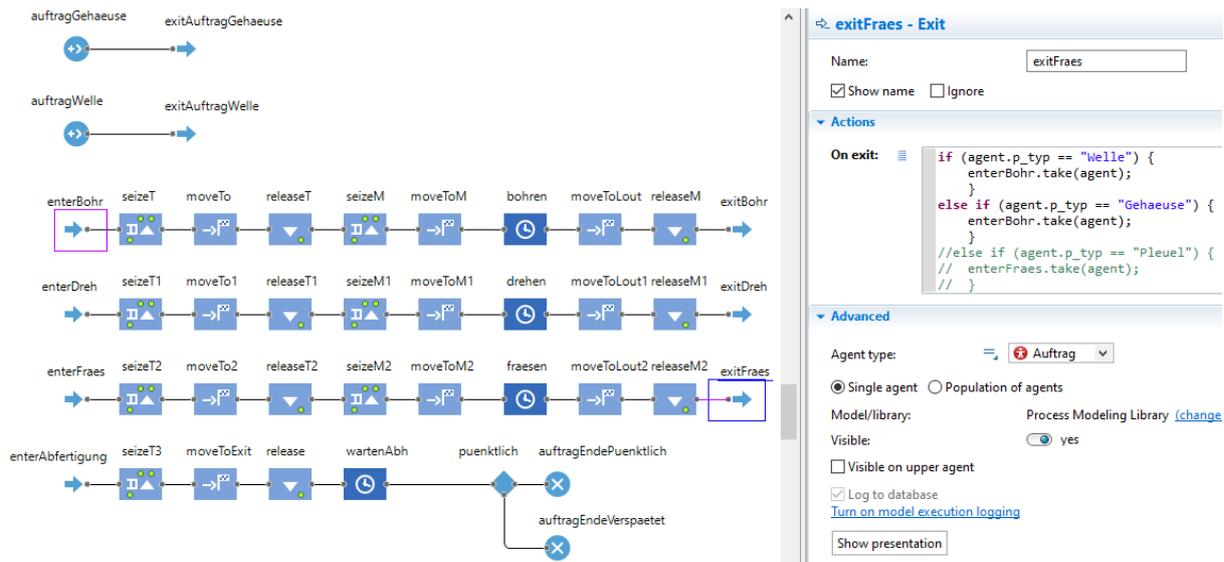


Abbildung 15: Produktionslogik mit unterschiedlichen Wegen durch die Produktionsstationen, eigener Screenshot

Die Tabelle 7 zeigt die verschiedenen Variablen, Parameter und Funktionen des Main-Agenten. Die Parameter speichern die Konfiguration zu Beginn eines Experiments. Die Variablen werden im Main-Agenten hauptsächlich dafür genutzt, die dynamischen Kosten und Zeiten für die spätere Auswertung zu speichern.

²⁴¹ weitere Informationen: <https://AnyLogic.help/search.html?seize>, <https://AnyLogic.help/library-reference-guides/process-modeling-library/release.html#release>, Zugriff 28.06.2022

Parametername	Beschreibung	(Einheiten) Anmerkungen
<i>p_auftraegeProTag</i>	Mittlere Aufträge pro Tag	(1)
<i>p_schwankung</i>	Oberer und unterer Ausschlag der Gleichverteilung der Aufträge	(1)
<i>p_anzahlInstandhalter</i>	Anzahl der Instandhaltungsteams	(1)
<i>p_anzahlGabelstapler</i>	Anzahl der Gabelstapler	(1)
<i>p_anzahlXMaschine</i>	Anzahl Maschine X	(1)
<i>p_losgroesseY</i>	Anzahl der Teile Y pro Bestellung	(1)
<i>p_bestellpunktY</i>	Lagerstand, bei dessen Erreichen nachbestellt wird	(1)
<i>p_preisY</i>	Preis eines Teils Y bei Kauf	(1)
<i>p_auswahlStrategie</i>	Schalter für die Instandhaltungsstrategie	(1) 0 - ausfallbehebend 1 - zeitgesteuert 2 - zustandsgesteuert
<i>p_ZGrenz</i>	Grenzwert für die zustandsgesteuerte Instandhaltung für den Zustand Z	(1)
Variablenname	Beschreibung	
<i>v_zeitA</i>	Summiert die Zeiten, in denen die Maschinen sich im Zustand A befinden	(1)
<i>v_kostenB</i>	Summiert die Kosten für B (Personal, Teile, Maschinen)	(1)
<i>v_Ybestellt</i>	Speichert, ob Teile Y bereits bestellt sind oder nicht	(boolean)
Funktionsname	Beschreibung	
<i>f_istWerktag</i>	Prüft, ob es sich um einen Werktag handelt (Mo.-Fr.)	
<i>f_istSchicht</i>	Prüft, ob die Fabrik geöffnet ist (07:00-16:00)	

Tabelle 7: Parameter, Variablen und Funktionen des Main-Agenten

Die Auftragsagenten durchlaufen die Produktionsprozesse. Ihre innere Logik besteht aus dem Parameter *p_typ*, der die Art des Auftrages speichert (Gehäuse oder Welle) und einem *Statechart*, der um 16:00 den Auftrag als verspätet einstuft (s. Abbildung 16).

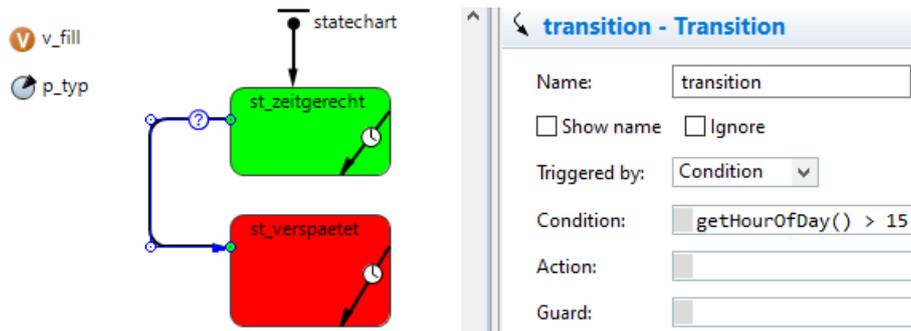


Abbildung 16: Statechart-Logik der Auftragsagenten, eigener Screenshot

Implementierung - Maschinen als Agenten

Die Maschinen bestehen aus drei kritischen Subkomponenten, welche die Ausfallwahrscheinlichkeit der Maschine beeinflussen: Motor, Linearführung und Verschmutzung. Deren Zustandsindikatoren sind als Zahlenwerte in Variablen innerhalb der Maschinenagenten abgespeichert. In Tabelle 8 sind die Parameter, Variablen und Funktionen der Maschinenagenten aufgelistet und beschrieben. Ihre Implementierung ist auch im Maschinenagenten zu sehen (s. Abbildung 17).

Parametername	Beschreibung	Wert(e)
<i>p_kostenSatzMinute</i>	Kostensatz pro Minute einer Maschine, während der Betriebszeit der Fabrik. Eingerechnet wird die Abschreibung auf die Anschaffungskosten und die Kosten für Energie und Personal.	1 GE
<i>p_typ</i>	Speichert den Typ der Maschine	„bohr“, „dreh“ oder „fraes“
Variablenname	Beschreibung	Wert(e)
<i>v_fill</i>	Speichert die Farbe, in der die Maschine in der Visualisierung erscheint und ist abhängig vom Status	Grün - betriebsbereit Rot – ausgefallen oder in Reparatur Gelb - in Reinigung Orange - in Wartung
<i>v_zustandX</i>	Speichert den Zustand der jeweiligen Komponente X	0-100
<i>v_wahrschX</i>	Speichert die Wahrscheinlichkeit eines täglichen Ausfalls der Komponente X	0-100%

Funktionsname	Beschreibung	
<i>f_abnutzung()</i>	Lässt Abnutzung der Komponenten voranschreiten	
<i>f_wahrschAusfall(v_zustandX)</i>	Ermittelt aufgrund des Zustands einer Komponente X die Ausfallwahrscheinlichkeit für die Komponente X	
<i>f_checkRein</i>	Überprüft, ob Reinigungsgrenzwert unterschritten	
<i>f_checkWart</i>	Überprüft, ob der Grenzwert eines kritischen Teils unterschritten	

Tabelle 8: Parameter, Variablen und Funktionen der Maschinenagenten

Abbildung 17 zeigt den Aufbau des Maschinenagenten als *Statechart*. Rot eingefärbt sind die beiden Schadensmodi *Motorschaden* und *Führungsschaden*. Die beiden Transitions, die zu den Schaden-States führen, werden durch eine stochastisch beeinflusste Rate ausgelöst. Die von den Schaden-States ausgehenden *Transitions* werden ausgelöst, sobald der Agent eine Nachricht über eine erfolgreiche Reparatur erhält. Die Maschine kann vom betriebsbereiten *State* an jedem Werktag ausfallen. Die *States st_reinigung* und *st_wartung* werden bei der zeitgesteuerten Instandhaltung zu bestimmten Zeiten erreicht. Bei der zustandsgesteuerten Instandhaltung werden, bei Unterschreitung eines bestimmten Grenzwertes, die Variablen *v_meldRein=true* oder *v_meldWart=true* gesetzt. Sobald die Arbeitszeit der Instandhaltungsteams beginnt, werden die zugehörigen *Transitions* ausgelöst.

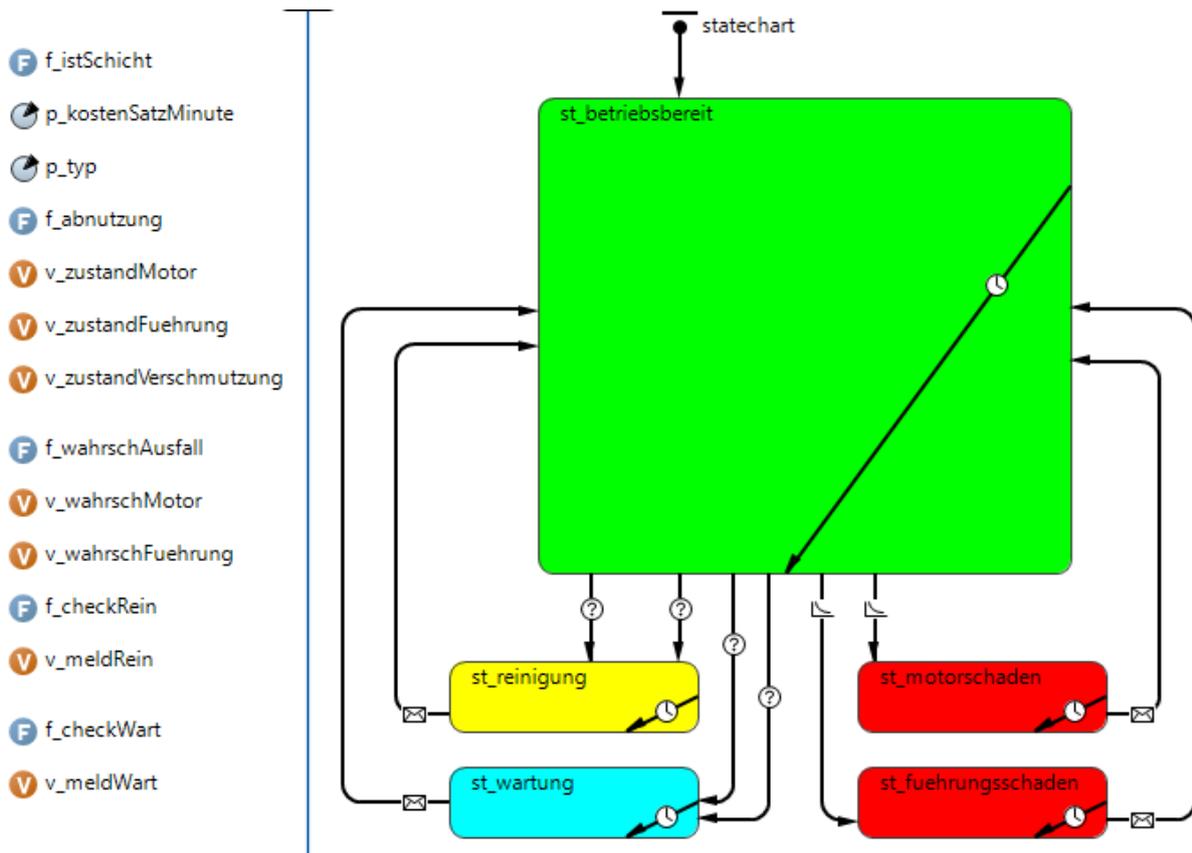


Abbildung 17: Statechart-Logik, Funktionen, Parameter und Variablen der Maschinenagenten, eigener Screenshot

In Abbildung 18 ist die Bedingung zu sehen, die zur Erreichung des States *st_wartung* in der zustandsgesteuerten Instandhaltung führt. Die erste Bedingung *main.p_auswahlStrategie==2* bedeutet, dass in der Benutzeroberfläche die zustandsgesteuerte Instandhaltungsstrategie ausgewählt ist. *v_meldWart=true* muss gegeben sein, da sonst der Grenzwert noch nicht erreicht wurde. Zuletzt wird geklärt, wann die Wartung durchgeführt werden soll. Dafür stehen zwei in Abbildung 18 dargestellte Modi zur Verfügung:

- Mit *getHourOfDay()>19* wird die Wartung am gleichen Abend ab 20:00 Uhr ausgeführt.
- Mit der auskommentierten (grün) Möglichkeit *main.f_istWerktag()==false* wird die Wartungsarbeit am folgenden Wochenende durchgeführt.

Auf analoge Weise sind die Logiken aller anderen Instandhaltungs-Transitions im Maschinenagenten ebenfalls festgelegt.

Condition:

```
main.p_auswahlStrategie == 2 &&
v_meldWart &&
getHourOfDay() > 19 //tägl. möglich
//main.f_istWerktag() == false // Wochenende. möglich
```

Abbildung 18: Bedingung für Erreichen des States *st_wartung* in der zustandsgesteuerten Instandhaltungsstrategie, eigener Screenshot

Zur Implementierung der Abnutzungs- und Ausfalllogik werden die in Abbildung 19 dargestellten Funktionen $f_wahrschAusfall(v_zustandX)$ und $f_abnutzung()$ verwendet. Die Funktion $f_abnutzung()$ ist die Implementierung der Formel 12, Formel 13 und Formel 14. Die Funktion $f_wahrschAusfall(v_zustandX)$ liefert auf Basis des Zustandes eines Teils seine Ausfallwahrscheinlichkeit pro Tag. Sie stellt die Implementierung des Zusammenhangs aus Tabelle 5 dar. Der Ausgabewert wird in der entsprechenden Variable $v_wahrschX$ abgespeichert.

f_abnutzung - Funktion

Name: Show name Ignore

Visible: yes

Just action (returns nothing)
 Returns value

▶ Arguments

▼ Function body

```
v_zustandMotor -= (random()*(100.1-v_zustandMotor)/(10000.0));
v_zustandFuehrung -= (random()*(100.1-v_zustandFuehrung)/(4000.0));
v_zustandVerschmutzung -= (random()*(5.0/60));
```

▶ Advanced

▶ Description

f_wahrschAusfall - Funktion

Name: Show name Ignore

Visible: yes

Just action (returns nothing)
 Returns value

Type: ▼

▶ Arguments

▼ Function body

```
if (zustand < 10) {return 0.331;}
else if (zustand < 20) {return 0.218;}
else if (zustand < 30) {return 0.152;}
else if (zustand < 40) {return 0.110;}
else if (zustand < 50) {return 0.075;}
else if (zustand < 60) {return 0.049;}
else if (zustand < 70) {return 0.032;}
else if (zustand < 80) {return 0.018;}
else if (zustand < 90) {return 0.009;}
else {return 0.005;}
```

Abbildung 19: Funktionen *f_wahrschAusfall(v_zustandX)* und *f_abnutzung()* zur Implementierung der Abnutzungs- und Ausfalllogik, eigener Screenshot

Fällt die Maschine aus oder wird eine Instandhaltungstätigkeit ausgelöst, geht die Maschine in den entsprechenden *State* und löst einen *Downtime*-Block der Ressource im Main-Agenten aus (s. Abbildung 20).

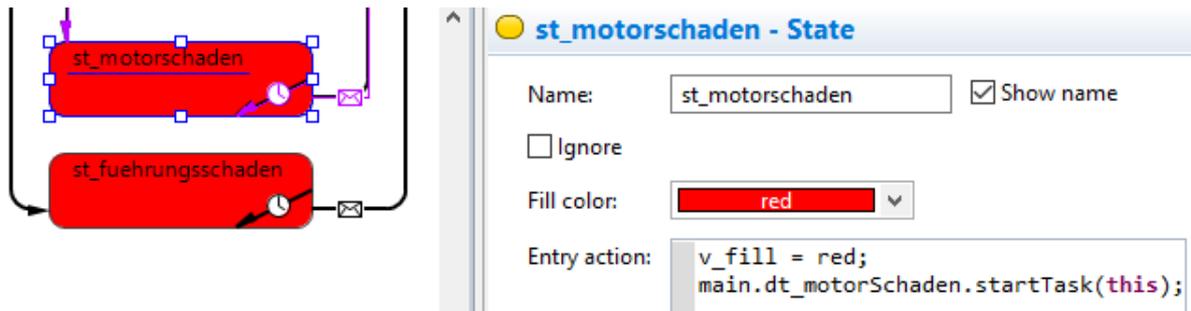


Abbildung 20: Das Erreichen eines Schaden-State startet die *Downtime* der Ressource im Main-Agenten, eigener Screenshot

Implementierung - Instandhaltung

Im Main-Agenten ist die Instandhaltungsstrategie als Parameter hinterlegt (s. Tabelle 7). Die Implementierung der verschiedenen Instandhaltungsstrategien erfolgt hauptsächlich in den Maschinenagenten. Dort werden mit *if*-Bedingungen je nach Strategie die *Transitions* freigeschaltet, die zu Reinigung und Wartung führen und somit die entsprechenden Instandhaltungsprozesse auslösen. So ist z.B. in Abbildung 18 zu sehen, dass die *Transition* ausgeführt wird, wenn die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie (Strategie Nummer 2) gewählt ist.

Die Instandhaltungsprozesse aus Abbildung 11 werden mit der Bibliothek *Process Modeling* direkt in *Flowcharts* übersetzt (s. Abbildung 21).

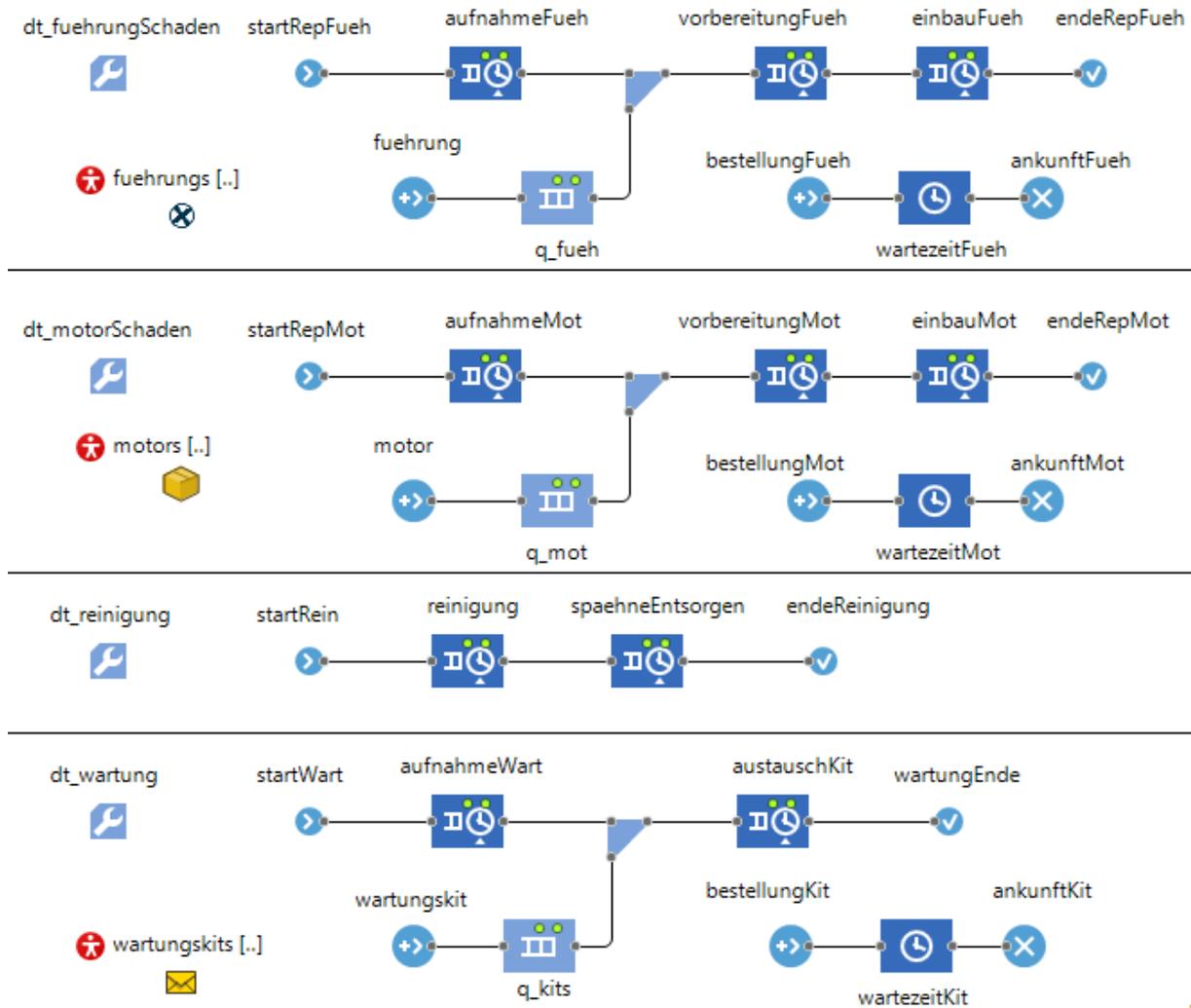


Abbildung 21: Instandhaltung als Flowcharts implementiert, eigener Screenshot

Diese Flowcharts werden bei Auslösung des entsprechenden Downtime-Blocks gestartet und senden bei Abschluss eine Nachricht an den Maschinenagenten, der dort eine Transition in den betriebsbereiten State auslöst (s. Abbildung 22).

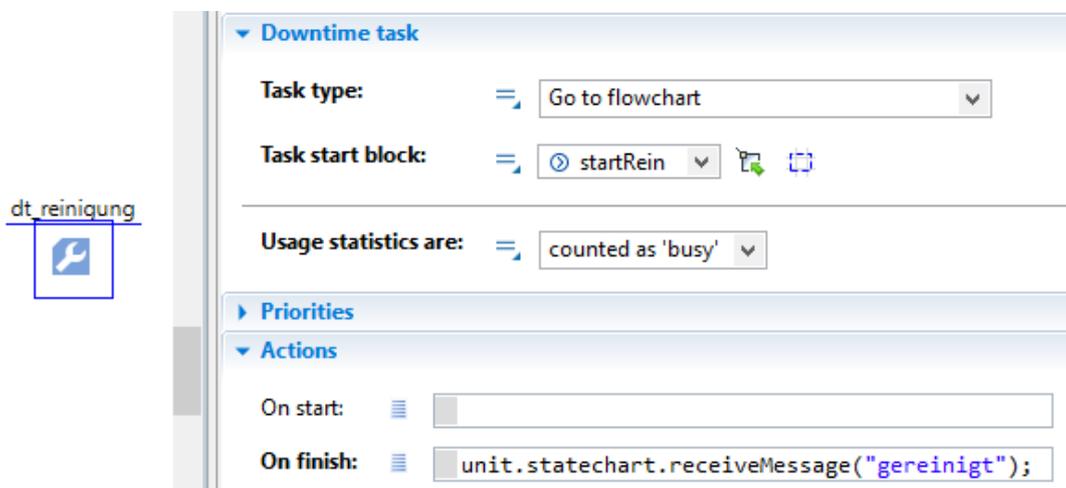


Abbildung 22: Downtime-Blöcke starten die Instandhaltung-Flowcharts, eigener Screenshot

Die Instandhaltungsteams werden durch Ressourcenblöcke erzeugt und stehen für die Reinigungs-, Wartungs- und Reparaturaufgaben zur Verfügung. Da für das Instandhaltungspersonal keine spontanen Ausfälle mit *Downtime*-Blöcken vorgesehen sind, findet die Modellierung der Arbeitszeiten mit einem *Schedule*-Block statt (s. Abbildung 23).

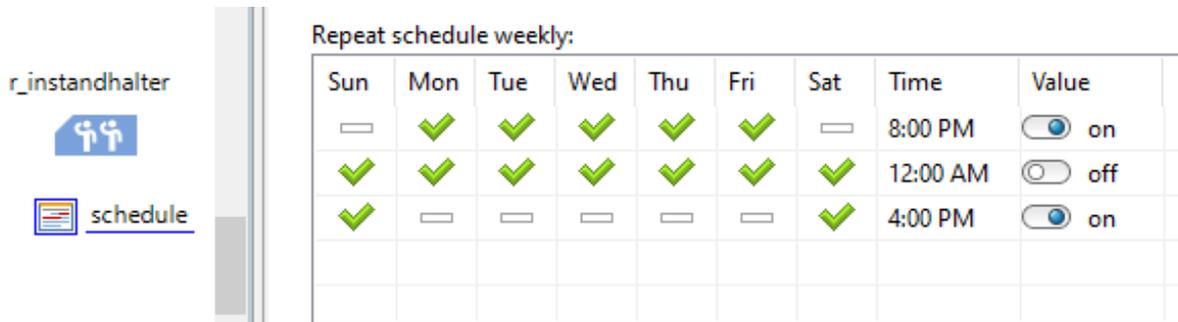


Abbildung 23: Ressourcenblock der Instandhaltungsteams mit Arbeitszeiten im *Schedule*-Block, eigener Screenshot

Die Instandhaltungsteams werden ebenfalls als Agenten mit *Statechart* implementiert (s. Abbildung 24). In dieser Iteration des Modells besteht der *Statechart* aus einem einzigen *State* *st_arbeitet*, der es ermöglicht, die Ersatzteilbestände zyklisch abzufragen und gegebenenfalls eine Nachbestellung in die Wege zu leiten. Außerdem ist zu sehen, dass die Wartungskits nur überprüft und bestellt werden, wenn die Instandhaltungsstrategie nicht ausfallgesteuert (ungleich 0) ist.

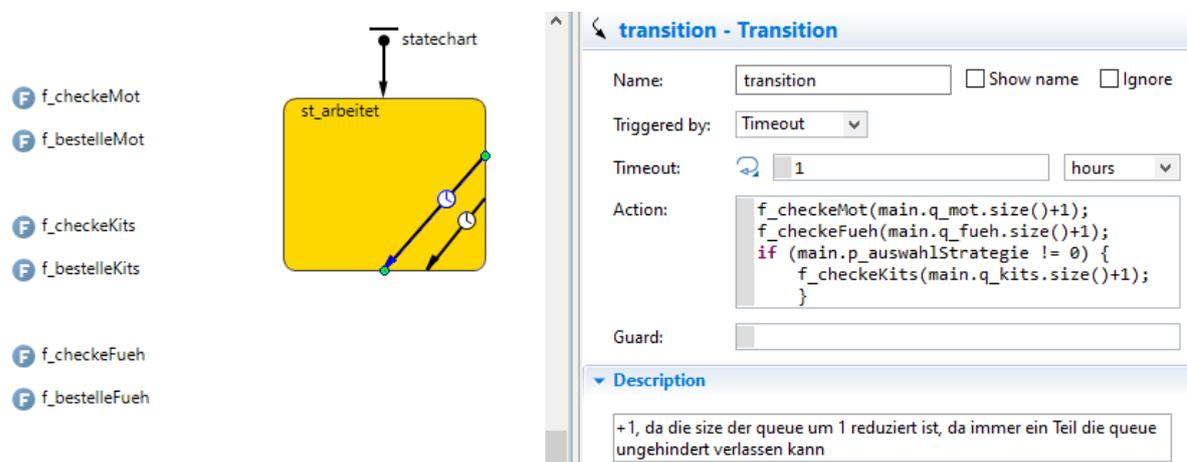


Abbildung 24: *Statechart* der Instandhaltungsagenten, eigener Screenshot

In der gezeigten Transition werden die Funktionen $f_checkeX()$ und $f_bestelleX()$ benutzt. $f_checkeX()$ prüft zunächst, ob der kritische Lagerstand erreicht wurde und ob das entsprechende Teil bereits nachbestellt ist. Ist dies nicht der Fall, wird die Funktion $f_bestelleX()$ gerufen und die Variable $v_XBestellt=true$ gesetzt. Kommt eine Bestellung im weiteren Ablauf im Werk an, wird wieder $v_XBestellt=false$ gesetzt und es kann eine neue Bestellung aufgegeben werden. Abbildung 25 zeigt die

Check- und Bestellfunktionen der Instandhaltungsagenten für das Ersatzteil Motor. Die gerufene Bestellfunktion gibt eine Bestellung in den entsprechenden *Flowchart* und erhöht die Kostenvariable $v_kostenMot$ um den Preis der jeweiligen Teile.

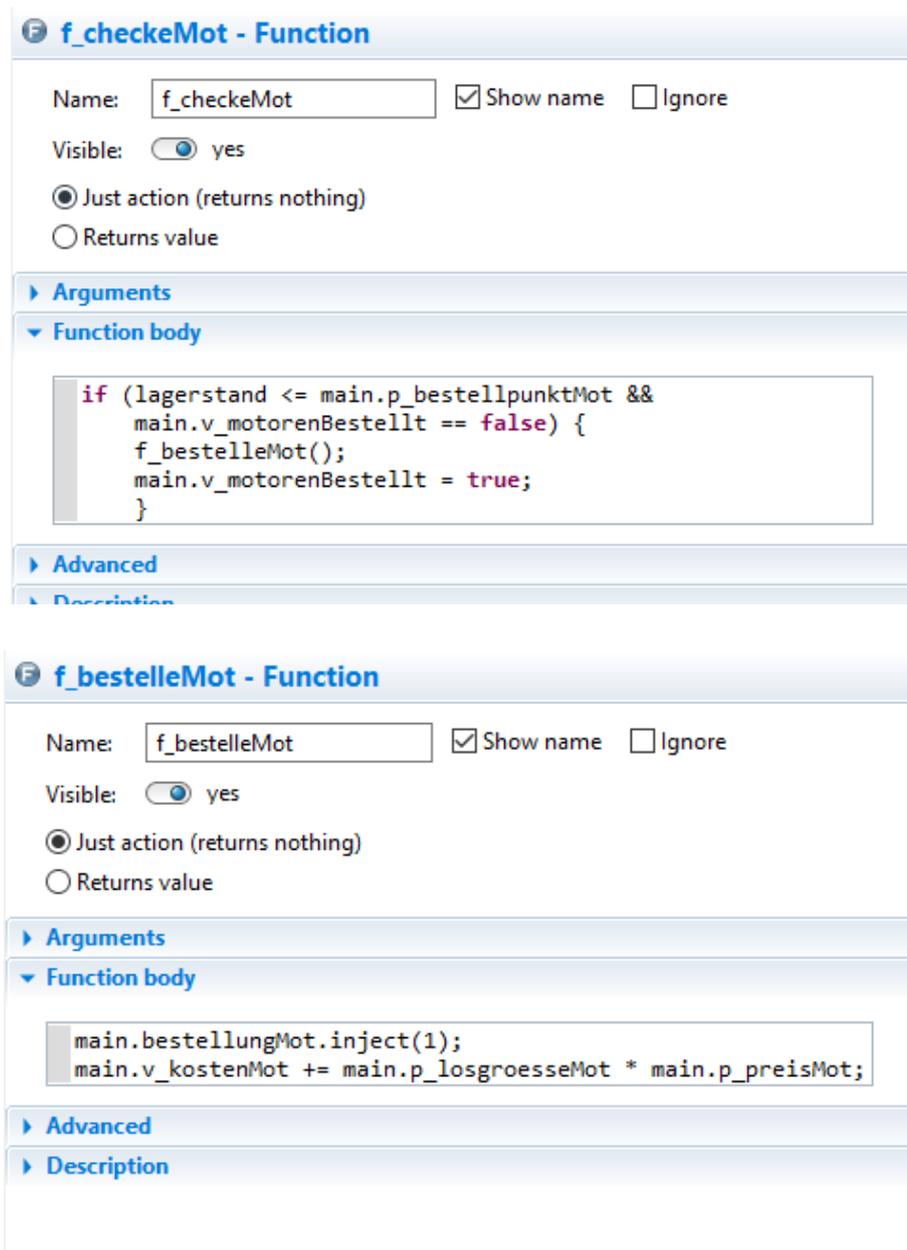


Abbildung 25: Implementierung der Überprüfungs- und Bestellfunktionen für Ersatzteile, eigene Screenshots

In Abbildung 26 ist die Modellierung der Bestellungen zu sehen. Wenn die Lieferzeit abgelaufen ist und der Agent den Senkenblock erreicht, werden die Ersatzteile mittels $x.inject(LosgrößeX)$ im *Flowchart* erzeugt, wo sie später zum Einbau benötigt werden (s. Abbildung 21). Der Motor und der Reparaturprozess warten an der Zusammenführung auf den jeweils anderen und erst wenn beides vorhanden ist, wird der Prozess fortgeführt. Die Bestellung der Wartungskits funktioniert analog zu der Bestellung der Ersatzteile.

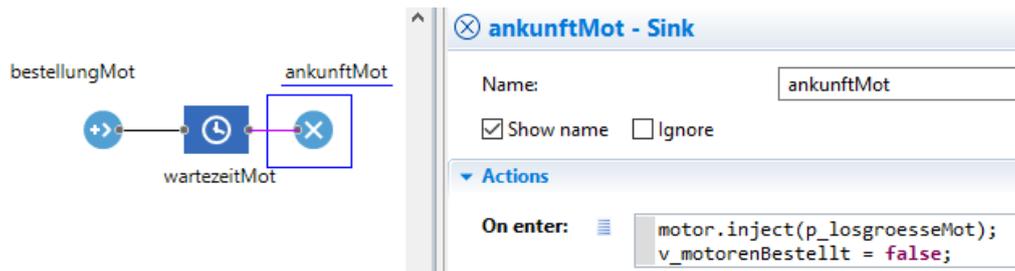


Abbildung 26: Ersatzteilbestellung als Flowchart, eigener Screenshot

Die Ersatzteile werden zum mengenabhängigen Bestellpunkt in der festgelegten Losgröße zu den festgelegten Stückkosten bestellt. Sobald die jeweiligen Teile geliefert werden, beginnt sich die Kapitalbindung und Lagerung in den Kosten niederzuschlagen. Dies ist durch eine tägliche Erhöhung der Kostenvariable im Main-Agenten implementiert (s. Abbildung 27).

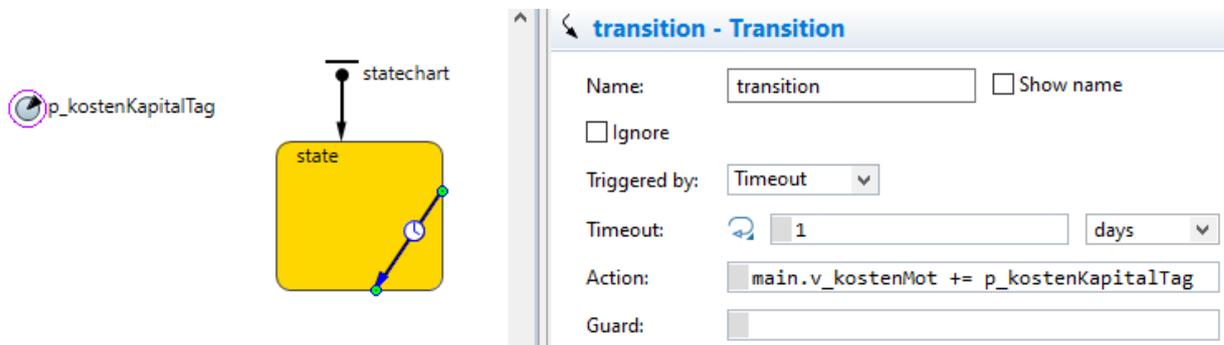


Abbildung 27: Statechart der Ersatzteile und Wartungskits, eigener Screenshot

Implementierung - Kennzahlensystem

Die Implementierung der Kosten wurde bei der Beschreibung der einzelnen Agenten bereits thematisiert. Die einzelnen Agenten erhöhen zyklisch die Kostenvariablen, die im Main-Agenten hinterlegt sind (s. Abbildung 28).

- V v_kostenIH
- V v_zeitIdle
- V v_kostenMaschinen
- V v_zeitWartung
- V v_kostenVerspaetung
- V v_zeitUtil
- V v_kostenTransporter
- V v_zeitReinigung
- V v_kostenKit
- V v_zeitSchaden
- V v_kostenMot
- V v_kostenFueh

Abbildung 28: Variablen des Main-Agenten zur Aufzeichnung der Kosten und Auslastungskennzahlen, eigener Screenshot

Die Variablen der kumulativen Zeiten, in denen sich die Maschinen in den jeweiligen *States* (Benutzt, Unbenutzt, in Wartung, in Reinigung, Ausfall) befinden, sind ebenfalls in Abbildung 28 dargestellt. Sie werden genutzt, um die in Formel 8 beschriebenen Zusammenhänge zu implementieren.

Die Anteile der pünktlichen und verspäteten Aufträge werden bestimmt, indem die fertigen Aufträge gezählt werden, die entweder in der Senke *auftragEndePuenktlich*- oder in der Senke *auftragEndeVerspaetet* in Abbildung 15 landen.

Die Kosten, Zeiten und die Anteile der pünktlichen und verspäteten Bestellungen werden als Kuchendiagramme ausgegeben (s. Abbildung 29).

Die Lagerstände des Ersatzteillagers und die Anzahl der aktiven Aufträge im System werden über *Plots* dargestellt, welche die Anzahl der Elemente in den jeweiligen *Flowcharts* messen. So wird z.B. mit dem Befehl *q_mot.size()* die Länge der Warteschlange, also die Anzahl der Motoren im Ersatzteillager gemessen und aufgezeichnet.

Aufgrund der Implementierung der Instandhaltungsteams mit *Schedule*-Block wird ihre in Formel 9 beschriebene Auslastung von *AnyLogic* automatisch korrekt erhoben und kann dort ausgelesen werden.

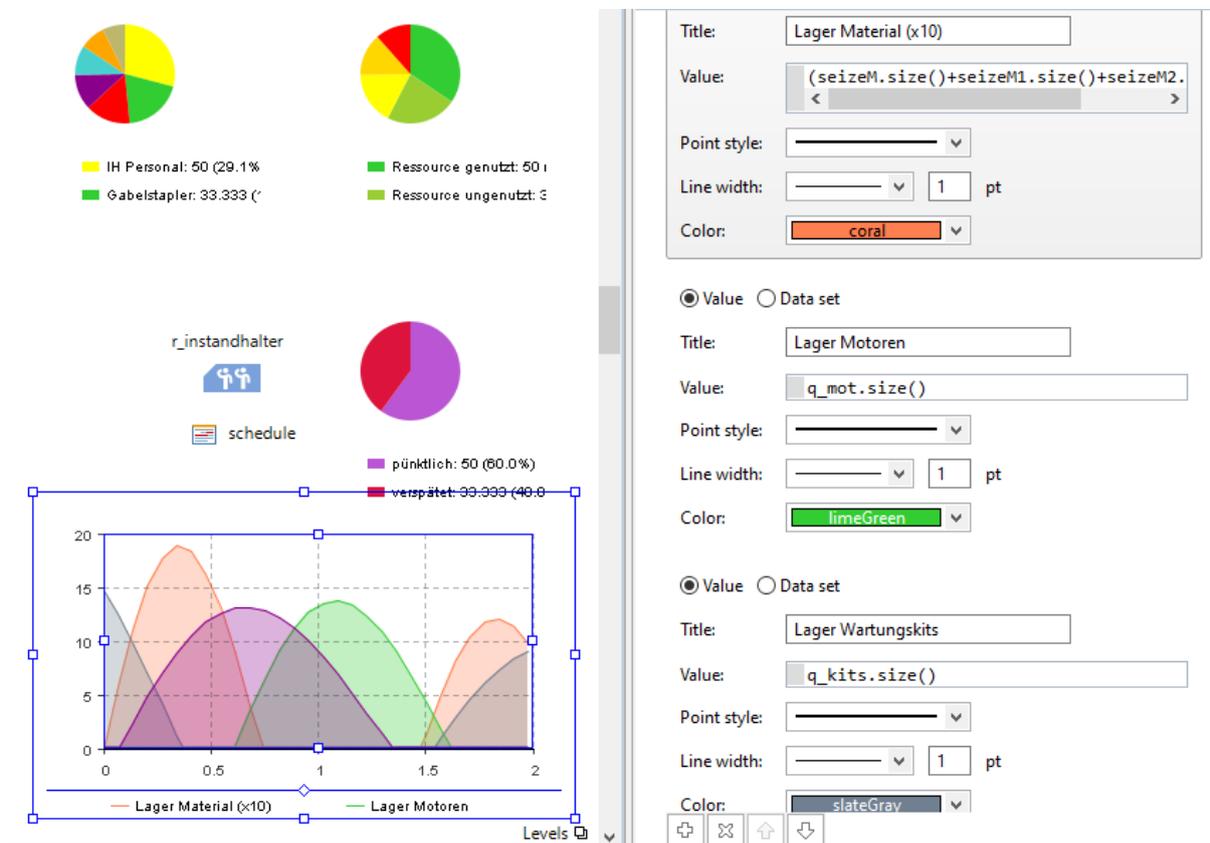


Abbildung 29: Aufbau Interface zum Monitoring der Kennzahlen, eigener Screenshot

In diesem Kapitel wurde die Implementierung des Modells der fiktiven Fabrik mit dem Softwarepaket *AnyLogic* beschrieben. Das erstellte Modell steht auf der AnyLogic Cloud frei zur Verfügung und kann mit dem folgenden QR-Code erreicht werden.



Abbildung 30: Lesen des QR-Codes führt zum Modell der fiktiven Fabrik in der AnyLogic Cloud²⁴²

Sobald die Verifikation und Validierung des Modells abgeschlossen ist, können anschließend die Experimente definiert und durchgeführt werden.

5.5 Verifikation und Validierung

Zur Verifikation und Validierung wird nach der Empfehlung der VDA 4811 vorgegangen.²⁴³ Jeder Entwicklungsschritt des Modells wird nach dem Vieraugenprinzip verifiziert. Da es sich um eine fiktive Fabrik handelt, wird das Modell nur qualitativ validiert. Dazu werden folgende Punkte augenscheinlich geprüft:

- Eine Heraufsetzung der Bestellmenge und des Bestellpunktes der Ersatzteile bewirkt eine Reduzierung der Ausfallzeit aufgrund von Ersatzteilfehlzeit sowie einen deutlichen Anstieg der Ersatzteilkosten
- Eine Erhöhung der Anzahl der Maschinen bewirkt eine Reduzierung der verspäteten Teile, sowie eine deutliche Steigerung der Maschinenkosten
- Eine Erhöhung der Aufträge pro Tag zeigt eine deutlich höhere Auslastung der Ressourcen und eine Zunahme an verspäteten Aufträgen
- Der Wechsel zwischen den Instandhaltungsstrategien spiegelt sich in der Animation wie erwartet wider (Instandhaltungsteams bewegen sich, Bestellungen von Ersatzteilen und Wartungskits funktionieren, etc.).

²⁴² alternativ: <https://cloud.anylogic.com/model/0900a4d5-aa95-4974-ae08-d56b98dc0191?mode=SETTINGS>, Zugriff: 10.08.2022

²⁴³ vgl. VDA 4811, 2013, S.16

Ist das Simulationsmodell zur Zufriedenheit aller Beteiligten validiert, kann mit den in der Zielsetzung definierten Experimenten fortgefahren werden.

5.6 Experimente

Zuvor wurde die Implementierung, dann die Verifikation und Validierung des Modells beschrieben. Daran anschließend werden Experimente in Form von Simulationsläufen unter verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Nacheinander werden die ausfall-, zeit- und zustandsgesteuerten Instandhaltungsstrategien untersucht, um Konfigurationen mit maximaler Robustheit gegen Maschinenausfälle unter dem Hauptziel der Gesamtkostenminimierung zu finden. Die Parametermanipulation findet manuell statt. Für große Modelle mit hoher Komplexität wird eventuell die Unterstützung durch einen Optimierungsalgorithmus notwendig.²⁴⁴ In der vorliegenden Arbeit werden die Experimente aufgrund ihrer geringen Größe lokal auf dem eigenen Rechner durchgeführt. Der Simulationszeitraum startet am 01.07.2021 und endet am 30.06.2023. Unter Zuhilfenahme der folgenden Spezifikationen sind etwa 10-20 Sekunden Laufzeit pro Simulationslauf zu erwarten. Ein Abbruchkriterium wird nicht festgelegt, es sollen aber pro Instandhaltungsstrategie fünf bis sechs Iterationsschritte der Strategie-Konfigurationen dargestellt und dokumentiert werden.

Verwendete Hardware

- Intel i5-6200U CPU, 2,4Ghz, 64 Bit Architektur
- 8GB RAM (4GB der Simulation zugewiesen)

Verwendete Software

- 64Bit Windows 10 Betriebssystem (maximale Leistungseinstellungen)
- *AnyLogic* 8 Personal Learning Edition 8.6.0.202008201438 x64
- Zufallszahlengenerator: *Random Seed*

Es werden für jede Konfiguration fünf einzelne Läufe durchgeführt und die jeweiligen Mittelwerte der Ergebnisse gebildet. Für jeden Lauf der Experimente wird ein zufälliger Startwert im Zufallszahlengenerator verwendet (*Random Seed*).

Experiment 1: Ausfallbehebung

²⁴⁴ vgl. VDI 3633, Blatt 3, 1997, S.5

Die Strategie der Ausfallbehebung sieht vor, dass die Maschinen jeden Abend von den Instandhaltungsteams gereinigt werden. Zudem findet eine Reparatur statt, sobald die Maschinen einen der beiden Schäden (Führungsschaden oder Motorschaden) erleiden. Dabei nimmt das Instandhaltungsteam den Schaden auf, bestellt gegebenenfalls die Ersatzteile und setzt die Maschine daraufhin wieder in Gang. Das Experiment 1.1 bildet den Ist-Zustand der Fabrik ab und dient somit gleichzeitig als Vergleichswert für zukünftige Variationen (s. Tabelle 9). Es gibt von jedem Maschinentyp jeweils zwei Exemplare. Die Ersatzteile werden jeweils bestellt, wenn nur noch eines im Lager ist und es kümmert sich ein Instandhaltungsteam um die Reinigung und die Ausfallbehebung der Maschinen.

Experiment 1.1		Durchschnitt 1.1		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 2	IH Personal	208.000	3,59%
Anzahl IH Teams	1	Gabelstapler	104.000	1,79%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	3.154.200	54,38%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	133.989	2,31%
Bestellpunkt Führungen	1	Führungen	511.852	8,82%
Bestellmenge Führungen	5	Wartungskits	0	0,00%
Bestellpunkt Motoren	1	Maschinen	1.688.000	29,10%
Bestellmenge Motoren	5	Summe	5.800.041	100,00%

State Ressource	Zeit in Min ²⁴⁵	Anteil
Ressource genutzt	1.204.400	71,36%
Ressource ungenutzt	405.233	24,01%
Reinigung	0	0,00%
Wartung	0	0,00%
Ausfall	78.164	4,63%
Summe	1.687.796	100,00%

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	9.236,6	79,1%
verspätet	2.443	20,9%
Summe	11.679,6	100,0%
Auslastung IH-Personal		30%

Tabelle 9: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.1

Im Schnitt werden 5,8 Mio. Geldeinheiten für die Gesamtkosten verursacht, wobei der mit Abstand größte Anteil auf verspätete Produkte entfällt. Außerdem ist in Abbildung 31 zu beobachten, dass die Ersatzteile zwar oftmals überflüssig vorhanden sind, aber so spät bestellt werden, dass Perioden auftreten, in denen

²⁴⁵ Gemeint ist hier und in allen folgenden Tabellen, die Zeit, die die Maschinen während der Öffnungszeit der Fabrik in dem jeweiligen *State* verbringen.

längere Zeit kein Ersatzteil vorhanden ist. Außerdem ist zu erkennen, dass der Materialstrom in der Produktion mehrfach nicht aufrecht erhalten werden kann.

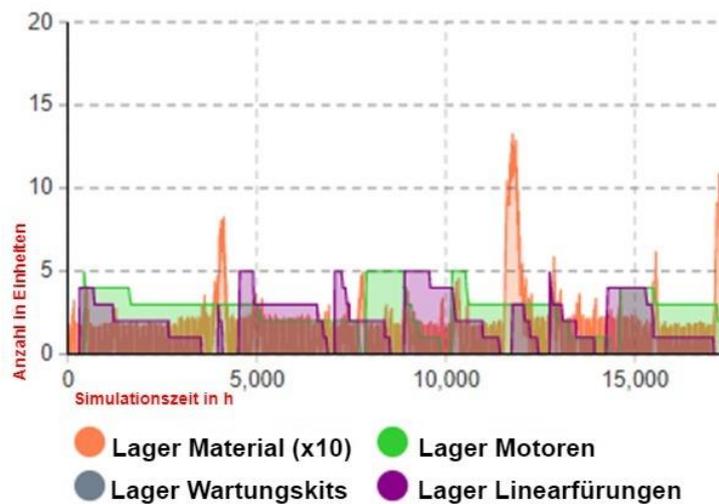


Abbildung 31: Lagerstände eines Laufs des Experiments 1.1: Material(WIP), Wartungskits, Ersatzteile (Motoren und Führungen), eigener Screenshot

Experiment 1.2		Durchschnitt 1.2		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 2	IH Personal	208.000	4,04%
Anzahl IH Teams	1	Gabelstapler	104.000	2,02%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	2.544.200	49,40%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	129.305	2,51%
Bestellpunkt Führungen	2	Führungen	476.951	9,26%
Bestellmenge Führungen	3	Wartungskits	0	0,00%
Bestellpunkt Motoren	2	Maschinen	1.688.000	32,77%
Bestellmenge Motoren	3	Summe	5.150.456	100,00%

State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Ressource genutzt	1.217.400	72,11%
Ressource ungenutzt	406.818,6	24,10%
Reinigung	0	0,00%
Wartung	0	0,00%
Ausfall	63.981	3,79%
Summe	1.688.199,6	100,00%

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	9.540	81,82%
verspätet	2.120	18,18%
Summe	11.660	100,00%
Auslastung IH-Personal		28%

Tabelle 10: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.2

In Experiment 1.2 wird der Bestellpunkt für die Ersatzteile jeweils auf 2 gesetzt und die Bestelllosgröße jeweils auf 3. In Tabelle 10 ist zu sehen, dass durch diese beiden Maßnahmen die Gesamtkosten bereits auf 5,15 Mio. Geldeinheiten gesenkt werden können. Die Perioden, in denen auf Ersatzteile gewartet wird, sind etwas geglättet. Dennoch zeigen sich in Abbildung 32 besonders bei den Führungen weiterhin Perioden, in denen keine passenden Ersatzteile verfügbar sind. Ein Ausfall einer Maschine innerhalb dieser Zeit verursacht unnötige Wartezeiten. Auf diese Beobachtung wird in Experiment 1.4 eingegangen.

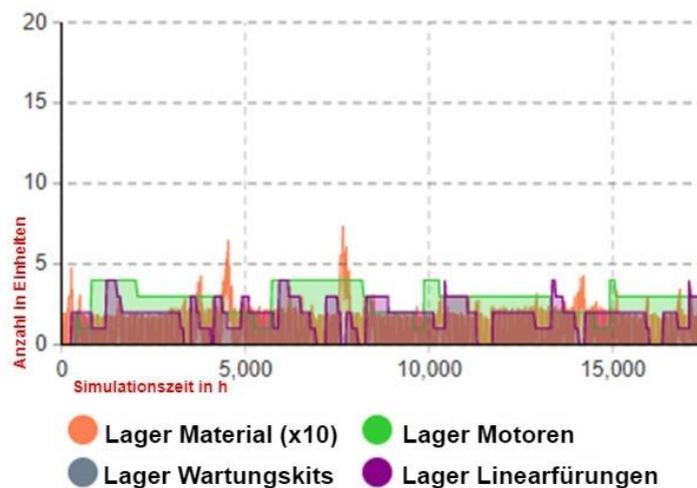


Abbildung 32: Lagerstände eines Laufs des Experiments 1.2: Material(WIP), Wartungskits, Ersatzteile (Motoren und Führungen), eigener Screenshot

Experiment 1.3		Durchschnitt 1.3		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 2	IH Personal	416.000	7,97%
Anzahl IH Teams	2	Gabelstapler	104.000	1,99%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	2.356.600	45,13%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	125.823	2,41%
Bestellpunkt Führungen	2	Führungen	531.710	10,18%
Bestellmenge Führungen	3	Wartungskits	0	0,00%
Bestellpunkt Motoren	2	Maschinen	1.688.000	32,32%
Bestellmenge Motoren	3	Summe	5.222.133	100,00%

State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Ressource genutzt	1.223.600	72,49%
Ressource ungenutzt	403.374,6	23,90%
Reinigung	0	0,00%
Wartung	0	0,00%
Ausfall	61.085,8	3,62%
Summe	1.688.060,4	100,00%

Aufträge	Anzahl	Anteil

pünktlich	9.818	84,05%
verspätet	1.863	15,95%
Summe	11.681	100,00%
Auslastung IH-Personal		15%

Tabelle 11: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.3

Auffallend ist, dass die Instandhaltungsteams im Experiment 1.2 eine durchschnittliche Auslastung von 28% aufweisen, was intuitiv nicht wie ein hoher Wert erscheint. Da es aber in Zeiten, in denen Maschinen ausfallen, zu erheblich größeren Auslastungen kommen kann und die durchschnittliche Ausfallzeit an der Schichtzeit einen Anteil von 3,8% besitzt, wird im nächsten Experiment 1.3 (s. Tabelle 11) die Anzahl der Instandhaltungsteams erhöht. Die Anzahl der verspäteten Produkte und die damit verbundenen Mehrkosten sinken stark, während die Kosten für die Instandhaltung nun einen größeren Anteil an den Gesamtkosten einnehmen. Die durchschnittliche Auslastung der Instandhaltungsteams ist nun sehr niedrig. Diese Überkapazität könnte genutzt werden, um sich mit der Verbesserung der Maschinen auseinandersetzen und somit die Ausfallrate weiter zu reduzieren.

Experiment 1.4		Durchschnitt 1.4		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 2	IH Personal	624.000	12,03%
Anzahl IH Teams	3	Gabelstapler	208.000	4,01%
Anzahl Transportfahrzeuge	2	Strafe Verspätung	2.037.800	39,29%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	139.931	2,70%
Bestellpunkt Führungen	3	Führungen	489.389	9,43%
Bestellmenge Führungen	5	Wartungskits	0	0,00%
Bestellpunkt Motoren	3	Maschinen	1.688.000	32,54%
Bestellmenge Motoren	4	Summe	5.187.120	100,00%

State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Ressource genutzt	1.226.400	72,66%
Ressource ungenutzt	407.257,2	24,13%
Reinigung	0	0,00%
Wartung	0	0,00%
Ausfall	54.257	3,21%
Summe	1.687.914,2	100,00%

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	9.957,2	85,38%
verspätet	1.705,4	14,62%
Summe	11.662,6	100,00%
Auslastung IH-Personal		9%

Tabelle 12: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.4

In Experiment 1.4 wird die Anzahl der bestellten Ersatzteile, der Instandhaltungsteams und der Gabelstapler erneut erhöht. In Abbildung 33 ist zu sehen, dass die früheren Bestellpunkte in Kombination mit größeren Bestelllosen zu einer robusteren Ersatzteilbevorratung führen. Aufgrund der hohen Umsatzgeschwindigkeit bleiben die Kosten für Ersatzteile im Rahmen (s. Tabelle 12).

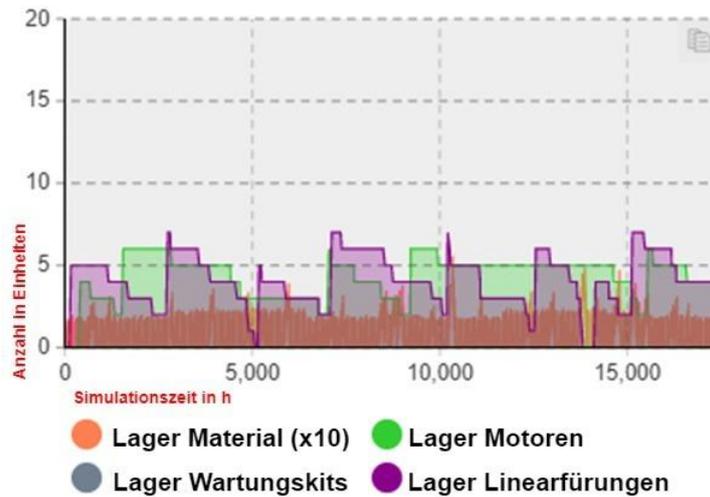


Abbildung 33: Lagerstände eines Laufs des Experiments 1.4: Material(WIP), Wartungskits, Ersatzteile (Motoren und Führungen), eigener Screenshot

Experiment 1.5		Durchschnitt 1.5		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 3	IH Personal	624.000	15,10%
Anzahl IH Teams	3	Gabelstapler	104.000	2,52%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	109.600	2,65%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	155.635	3,77%
Bestellpunkt Führungen	3	Führungen	608.411	14,72%
Bestellmenge Führungen	5	Wartungskits	0	0,00%
Bestellpunkt Motoren	3	Maschinen	2.532.000	61,25%
Bestellmenge Motoren	4	Summe	4.133.646	100,00%

State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Ressource genutzt	1.277.200	50,45%
Ressource ungenutzt	1.182.400	46,70%
Reinigung	0	0,00%
Wartung	0	0,00%
Ausfall	72.264,4	2,85%
Summe	2.531.864,4	100,00%

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	11.576,2	99,20%
verspätet	93,6	0,80%
Summe	11.669,8	100,00%

Auslastung IH-Personal		13%

Tabelle 13: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.5

In Experiment 1.5 wird die Anzahl der Maschinen erhöht. Dies ist eine kostenintensive Maßnahme, die viele überschüssige Kapazitäten im System erzeugt. Es kann aber erwartet werden, dass die ausfallenden Ressourcen durch andere freie Ressourcen aufgefangen werden können. Wie in Tabelle 13 zu sehen ist, kann so die Liefertreue stark erhöht und die gestiegenen Kosten für die zusätzlichen Maschinen überkompensiert werden.

Experiment 1.6		Durchschnitt 1.6		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Bohrmaschinen	3	IH Personal	208.000	5,88%
Anzahl Drehmaschinen	2	Gabelstapler	104.000	2,94%
Anzahl Fräsmaschinen	3	Strafe Verspätung	241.400	6,82%
Anzahl IH Teams	1	Motoren	144.874	4,10%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Führungen	588.474	16,63%
Aufträge pro Werktag	14±1	Wartungskits	0	0,00%
Bestellpunkt Führungen	3	Maschinen	2.251.000	63,63%
Bestellmenge Führungen	5	Summe	3.537.748	100,00%
Bestellpunkt Motoren	3			
Bestellmenge Motoren	5			

State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Ressource genutzt	1.274.600	56,63%
Ressource ungenutzt	888.415	39,47%
Reinigung	0	0,00%
Wartung	0	0,00%
Ausfall	87.680,6	3,90%
Summe	2.250.695,6	100,00%

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	14.355,8	98,35%
verspätet	241,4	1,65%
Summe	14.597,2	100,00%
Auslastung IH-Personal		36%

Tabelle 14: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.6

In Experiment 1.6 werden die Anzahl der Drehmaschinen und die Instandhaltungsteams reduziert (s. Tabelle 14). Der Drehprozess spielt für die Gehäuse keine Rolle; so wird versucht an dieser Stelle Kosten zu sparen. Eine weitere Reduktion der Kosten ist zu beobachten. Die Instandhaltungsteams sind mit durchschnittlich 36% stark ausgelastet. Da die Ausfallzeit der Ressourcen mit 4% im Rahmen liegt und redundante Maschinen zur Verfügung stehen, bleiben die verspäteten Aufträge dennoch auf einem niedrigen Niveau.

In diesem Abschnitt wurden die iterativen Experimente bezüglich der ausfallgesteuerten Instandhaltung beschrieben. Es zeigt sich, dass die Ausfallzeit der Maschinen während des Betriebs mit der ausfallgesteuerten Instandhaltungsstrategie stets etwa 3% beträgt. Ohne redundante Maschinen führt dies zu hohen Kosten für verspätete Produkte. Mit einer Variation der Anzahl der Maschinen, der Anzahl der Instandhaltungsteams und der Bestellpunkte und -menge der Ersatzteile, konnte ein minimaler Wert von 3,54 Mio. Geldeinheiten Gesamtkosten ermittelt werden. Mit weiteren Iterationsschritten werden möglicherweise weitere Kostensenkungen gefunden. Da diese Simulationsstudie hauptsächlich der Demonstration dienen soll, wurde das Experiment nach sechs Konfigurationen beendet. Es stellt sich nun die Frage, ob durch eine präventive Instandhaltungsstrategie eine ähnliche Liefertreue mit weniger Maschinen erreicht werden kann.

Experiment 2: Zeitgesteuerte Instandhaltung

Um Ausfälle zu reduzieren, wird eine zeitgesteuerte Instandhaltung eingeführt. Dabei werden die Maschinen regelmäßig nach Abschluss der Tagesproduktion gereinigt. Dazu werden alle Maschinen am Wochenende gewartet. Das bedeutet, dass die Instandhaltungsteams die Maschinen inspizieren, Betriebsmittel auffüllen und gegebenenfalls die Verschleißteile tauschen. Dazu sind sog. Wartungskits nötig, die analog zu den Ersatzteilen zum Bestellpunkt bestellt werden.

Experiment 2.1		Durchschnitt 2.1		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 2	IH Personal	208.000	4,10%
Anzahl IH Teams	1	Gabelstapler	104.000	2,05%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	2.240.800	44,13%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	112.147	2,21%
Bestellpunkt Führungen	3	Führungen	419.504	8,26%
Bestellmenge Führungen	5	Wartungskits	305.008,2	6,01%
Bestellpunkt Motoren	2	Maschinen	1.688.000	33,24%
Bestellmenge Motoren	5	Summe	5.077.459,2	100,00%
Bestellpunkt Wartungskits	5			
Bestellmenge Wartungskits	10	State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Reinigungsintervall	1 Tag	Ressource genutzt	1.228.800	72,79%
Wartungsintervall	1 Wo.	Ressource ungenutzt	402.887,6	23,87%
		Reinigung	0	0,00%
		Wartung	0	0,00%
		Ausfall	56.501,2	3,35%
		Summe	1.688.188,8	100,00%

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	9.896,8	84,69%
verspätet	1.789,6	15,31%

Summe	11.686,4	100,00%
Auslastung IH-Personal		52%

Tabelle 15: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.1

Auch die Experimente der zeitgesteuerten Instandhaltung starten mit jeweils zwei Maschinen und einem Instandhaltungsteam. Allerdings wird auf den Erfahrungen der vorangegangenen Experimente aufgebaut und gleich die Bestellpunkte der Ersatzteile nach vorne gezogen (s. Tabelle 15). Zudem werden jeweils bei einem Bestand von fünf oder weniger Wartungskits eine Bestellung mit Losgröße zehn aufgegeben. Es ist ersichtlich, dass die relevante Ausfallzeit der Maschinen zwar niedrig ist, die Anzahl der verspäteten Aufträge allerdings immer noch zu hoch, was zu hohen Strafen führt. Wie sich in den vorangegangenen Experimenten der ausfallorientierten Instandhaltungsstrategie bereits gezeigt hat, ist das System mit jeweils zwei Maschinen eines Typs nahe an der Belastbarkeitsgrenze, sodass es empfindlich auf die Ausfälle reagiert. Die Instandhaltungsteams sind mit 52% Gesamtauslastung zu den Stoßzeiten überlastet. Folglich wird die Anzahl der Teams erhöht.

Experiment 2.2		Durchschnitt 2.2		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 2	IH Personal	416.000	8,66%
Anzahl IH Teams	2	Gabelstapler	104.000	2,17%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	1.773.600	36,93%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	111.417	2,32%
Bestellpunkt Führungen	3	Führungen	399.412	8,32%
Bestellmenge Führungen	5	Wartungskits	309.882,4	6,45%
Bestellpunkt Motoren	2	Maschinen	1.688.000	35,15%
Bestellmenge Motoren	5	Summe	4.802.311,4	100,00%
Bestellpunkt Wartungskits	5			
Bestellmenge Wartungskits	10	<i>State</i> Ressource	Zeit in Min	Anteil
Reinigungsintervall	1 Tag	Ressource genutzt	1.234.400	73,13%
Wartungsintervall	1 Wo.	Ressource ungenutzt	407.525,8	24,14%
		Reinigung	0	0,00%
		Wartung	0	0,00%
		Ausfall	46.014	2,73%
		Summe	1.687.939,8	100,00%
		Aufträge	Anzahl	Anteil
		pünktlich	10.395,8	89,09%
		verspätet	1.272,6	10,91%
		Summe	11.668,4	100,00%
		Auslastung IH-Personal		31%

Tabelle 16: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.2

Nachdem in Experiment 2.2 die Anzahl der Instandhaltungsteams erhöht wird, können die Gesamtkosten weiter gesenkt werden. Die stark entlasteten Teams können ihre Aufgaben zeitgerechter erledigen und so den Anteil der verspäteten Lieferungen auf 11% reduzieren (s. Tabelle 16).

Experiment 2.3		Durchschnitt 2.3		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 2	IH Personal	416.000	8,93%
Anzahl IH Teams	2	Gabelstapler	104.000	2,23%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	1.852.400	39,74%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	116.429	2,50%
Bestellpunkt Führungen	3	Führungen	399.190	8,56%
Bestellmenge Führungen	5	Wartungskits	84.912,4	1,82%
Bestellpunkt Motoren	2	Maschinen	1.688.000	36,22%
Bestellmenge Motoren	5	Summe	4.660.931,4	100,00%
Bestellpunkt Wartungskits	5			
Bestellmenge Wartungskits	10	State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Reinigungsintervall	1 Tag	Ressource genutzt	1.236.200	73,24%
Wartungsintervall	4 Wo.	Ressource ungenutzt	405.130,2	24,00%
		Reinigung	0	0,00%
		Wartung	0	0,00%
		Ausfall	46.524	2,76%
		Summe	1.687.854,2	100,00%
		Aufträge	Anzahl	Anteil
		pünktlich	10.132,2	86,81%
		verspätet	1.539	13,19%
		Summe	11.671,2	100,00%
		Auslastung IH-Personal		18%

Tabelle 17: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.3

Eventuell ist die wöchentliche Wartung nicht zwingend notwendig, da sich die Maschinen zum Wartungszeitpunkt oftmals noch in einem guten Zustand befinden. Darum wird in Experiment 2.3 das Wartungsintervall auf vier Wochen verlängert. Die Kosten können weiter gesenkt werden. Einer leichten Erhöhung der verspäteten Aufträge kommt eine starke Senkung der Kosten bei den Wartungskits entgegen (s. Tabelle 17).

Experiment 2.4		Durchschnitt 2.4		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Maschinen	Je 3	IH Personal	416.000	9,69%
Anzahl IH Teams	2	Gabelstapler	104.000	2,42%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Strafe Verspätung	447.800	10,43%
Aufträge pro Werktag	14±1	Motoren	136.681	3,18%
Bestellpunkt Führungen	3	Führungen	538.948	12,55%
Bestellmenge Führungen	5	Wartungskits	119.434,4	2,78%
Bestellpunkt Motoren	2	Maschinen	2.532.000	58,95%
Bestellmenge Motoren	5	Summe	4.294.863,4	100,00%
Bestellpunkt Wartungskits	5			
Bestellmenge Wartungskits	10	State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Reinigungsintervall	1 Tag	Ressource genutzt	1.269.000	50,11%
Wartungsintervall	4 Wo.	Ressource ungenutzt	1.157.800	45,72%
		Reinigung	216	0,01%
		Wartung	38.249,4	1,51%
		Ausfall	67.282,2	2,66%
		Summe	2.532.547,6	100,00%
		Aufträge	Anzahl	Anteil
		pünktlich	11.336,8	97,08%
		verspätet	341,2	2,92%
		Summe	11.678	100,00%
		Auslastung IH-Personal		32%

Tabelle 18: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.4

Da die verspäteten Aufträge noch immer einen beträchtlichen Anteil der Gesamtkosten ausmachen (s. Tabelle 18), wird im nächsten Schritt die Anzahl der Maschinen erhöht. Die Anzahl der verspäteten Aufträge sinkt schlagartig. Es fällt jedoch auf, dass die Maschinen nun nicht nur während der Schichten aufgrund von Ausfällen nicht zur Verfügung stehen, sondern dass die Instandhaltungsteams es oftmals nicht schaffen ihre Wartungsarbeiten rechtzeitig abzuschließen. Obwohl die Auslastung der Instandhaltungsteams mit durchschnittlich 32% niedrig erscheint, droht zu den Stoßzeiten Überlastung.

Experiment 2.5		Durchschnitt 2.5		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Bohrmaschinen	3	IH Personal	416.000	11,31%
Anzahl Drehmaschinen	2	Gabelstapler	104.000	2,83%
Anzahl Fräsmaschinen	3	Strafe Verspätung	155.200	4,22%
Anzahl IH Teams	2	Motoren	136.638	3,72%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Führungen	508.977	13,84%
Aufträge pro Werktag	14±1	Wartungskits	105.743	2,88%
Bestellpunkt Führungen	3	Maschinen	2.251.000	61,21%

Bestellmenge Führungen	5	Summe	3.677.558	100,00%
Bestellpunkt Motoren	2			
Bestellmenge Motoren	5	<i>State</i> Ressource	Zeit in Min	Anteil
Bestellpunkt Wartungskits	5	Ressource genutzt	1.273.000	56,56%
Bestellmenge Wartungskits	10	Ressource ungenutzt	904.478,2	40,19%
Reinigungsintervall	1 Tag	Reinigung	0	0,00%
Wartungsintervall	4 Wo.	Wartung	7.630,8	0,34%
		Ausfall	65.408,2	2,91%
		Summe	2.250.517,2	100,00%
		Aufträge	Anzahl	Anteil
		pünktlich	11.537	99,11%
		verspätet	103,6	0,89%
		Summe	11.640,6	100,00%
		Auslastung IH-Personal		25%

Tabelle 19: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.5

Die Drehmaschinen werden für den Fertigungsprozess der Gehäuse nicht benötigt; die Bohr- und Fräsmaschinen hingegen für beide Prozesse. Darum wird im Experiment 2.5 die Anzahl der Drehmaschinen erneut um eins reduziert (s. Tabelle 19). Der Anteil an verspäteten Aufträgen kann weiter gesenkt werden. Zusammen mit der Einsparung einer Drehmaschine kann eine Senkung der Gesamtkosten auf 3,68 Mio. Geldeinheiten erzielt werden.

In diesem Abschnitt wurden die iterativen Experimente bezüglich der zeitgesteuerten Instandhaltung beschrieben. Mit einer Variation der Reinigungs- und Wartungszeitpunkte konnte ein minimaler Wert von 3,68 Mio. € Gesamtkosten ermittelt werden. Mit weiteren Iterationsschritten werden möglicherweise weitere Kostensenkungen gefunden.

Experiment 3: Zustandsgesteuerte Instandhaltung

Es werden Sensoren und digitale Schnittstellen an den Maschinen angebracht, die ihren Zustand überwachen. Dadurch können die Maschinen ihre Instandhaltung selbst zu steuern. Die Instandhaltungsteams werden bei Bedarf herangezogen, um zielgenau Tätigkeiten durchzuführen. Im Maschinenmodell werden bei der Auswahl der zustandsgesteuerten Instandhaltungsstrategie mit *main.p_auswahlStrategie=2* die entsprechenden Routen freigeschaltet. Im vorliegenden Modell ist die Maschine bis zum Ende des Arbeitstages weiter im Betrieb und wird am darauffolgenden Abend durch das Instandhaltungsteam gereinigt. Eventuell nötige Wartungsarbeiten werden am darauffolgenden Wochenende durchgeführt. Es soll auch untersucht werden, ob es sinnvoll ist, die Wartungsarbeiten direkt am folgenden Abend durchzuführen.

Experiment 3.1		Durchschnitt 3.1		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Bohrmaschinen	2	IH Personal	208.000	4,14%
Anzahl Drehmaschinen	2	Gabelstapler	104.000	2,07%
Anzahl Fräsmaschinen	2	Strafe Verspätung	2.326.000	46,35%
Anzahl IH Teams	1	Motoren	116.976	2,33%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Führungen	558.769	11,13%
Aufträge pro Werktag	14±1	Wartungskits	17.002,6	0,34%
Bestellpunkt Führungen	3	Maschinen	1.688.000	33,63%
Bestellmenge Führungen	5	Summe	5.018.747,6	100,00%
Bestellpunkt Motoren	2			
Bestellmenge Motoren	5	State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Bestellpunkt Wartungskits	5	Ressource genutzt	1.221.000	72,33%
Bestellmenge Wartungskits	10	Ressource ungenutzt	404.149,4	23,94%
Reinigung möglich	tägl.	Reinigung	0	0,00%
Wartung möglich	WE	Wartung	0	0,00%
Grenze Verschmutzung	80	Ausfall	63.027,6	3,73%
Grenze Motor	80	Summe	1.688.177	100,00%
Grenze Führung	80			
		Aufträge	Anzahl	Anteil
		pünktlich	9.762	83,57%
		verspätet	1.919	16,43%
		Summe	11.681	100,00%
		Auslastung IH-Personal		24%

Tabelle 20: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.1

Im Ausgangspunkt Experiment 3.1 werden abermals jeweils zwei Maschinen jedes Typs eingesetzt. Die Wartung wird immer am Wochenende durchgeführt. Die Grenzzustände werden jeweils auf 80% gesetzt. Das daraus resultierende Ergebnis ist nicht zufriedenstellend. Die verspäteten Aufträge in Folge von Maschinenausfällen und die daraus resultierenden Strafzahlungen sind hoch (s. Tabelle 20).

Experiment 3.2		Durchschnitt 3.2		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Bohrmaschinen	3	IH Personal	416.000	11,73%
Anzahl Drehmaschinen	2	Gabelstapler	104.000	2,93%
Anzahl Fräsmaschinen	3	Strafe Verspätung	119.400	3,37%
Anzahl IH Teams	2	Motoren	122.091	3,44%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Führungen	508.695	14,34%
Aufträge pro Werktag	14±1	Wartungskits	25.138,2	0,71%
Bestellpunkt Führungen	3	Maschinen	2.251.000	63,47%
Bestellmenge Führungen	5	Summe	3.546.324,2	100,00%
Bestellpunkt Motoren	2			
Bestellmenge Motoren	5	State Ressource	Zeit in Min	Anteil

Bestellpunkt Wartungskits	5	Ressource genutzt	1.276.000	56,70%
Bestellmenge Wartungskits	10	Ressource ungenutzt	917.402,4	40,76%
Reinigung möglich	tägl.	Reinigung	0	0,00%
Wartung möglich	WE	Wartung	0	0,00%
Grenze Verschmutzung	96	Ausfall	57.209,2	2,54%
Grenze Motor	96	Summe	2.250.611,6	100,00%
Grenze Führung	96			

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	11.583,8	99,22%
verspätet	91,4	0,78%
Summe	11.675,2	100,00%
Auslastung IH-Personal		18%

Tabelle 21: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.2

In Experiment 3.2 werden abermals die Anzahl der Bohr- und Fräsmaschinen und der Instandhaltungsteams erhöht. Außerdem wird die Grenze für die Zustände angehoben. Wie erwartet, sinkt die Anzahl der verspäteten Aufträge deutlich, was zu einer Reduktion der Gesamtkosten führt (s. Tabelle 21).

Experiment 3.3		Durchschnitt 3.3		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Bohrmaschinen	3	IH Personal	416.000	11,60%
Anzahl Drehmaschinen	2	Gabelstapler	104.000	2,90%
Anzahl Fräsmaschinen	3	Strafe Verspätung	149.600	4,17%
Anzahl IH Teams	2	Motoren	141.134	3,94%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Führungen	498.954	13,92%
Aufträge pro Werktag	14±1	Wartungskits	24.145,6	0,67%
Bestellpunkt Führungen	3	Maschinen	2.251.000	62,79%
Bestellmenge Führungen	5	Summe	3.584.833,6	100,00%
Bestellpunkt Motoren	2			
Bestellmenge Motoren	5	State Ressource	Zeit in Min	Anteil
Bestellpunkt Wartungskits	5	Ressource genutzt	1.275.000	56,65%
Bestellmenge Wartungskits	10	Ressource ungenutzt	912.416,2	40,54%
Reinigung möglich	tägl.	Reinigung	0	0,00%
Wartung möglich	tägl.	Wartung	0	0,00%
Grenze Verschmutzung	96	Ausfall	63.123,4	2,80%
Grenze Motor	96	Summe	2.250.539,6	100,00%
Grenze Führung	96			

Aufträge	Anzahl	Anteil
pünktlich	11.550,4	98,94%
verspätet	123,4	1,06%
Summe	11.673,8	100,00%
Auslastung IH-Personal		18%

Tabelle 22: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.3

In Experiment 3.3 wird das Wartungssystem auf täglich mögliche Wartung umgestellt. Dementsprechend können jeden Abend nötige Wartungen durchgeführt werden, anstatt auf das folgende Wochenende zu warten. Im Vergleich zum vorhergehenden Lauf ist keine merkliche Veränderung festzustellen (s. Tabelle 22).

Experiment 3.4		Durchschnitt 3.4		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Bohrmaschinen	3	IH Personal	208.000	6,16%
Anzahl Drehmaschinen	2	Gabelstapler	104.000	3,08%
Anzahl Fräsmaschinen	3	Strafe Verspätung	150.600	4,46%
Anzahl IH Teams	1	Motoren	132.457	3,92%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Führungen	508.232	15,04%
Aufträge pro Werktag	14±1	Wartungskits	25.030,8	0,74%
Bestellpunkt Führungen	3	Maschinen	2.251.000	66,61%
Bestellmenge Führungen	5	Summe	3.379.319,8	100,00%
Bestellpunkt Motoren	2			
Bestellmenge Motoren	5	<i>State</i> Ressource	Zeit in Min	Anteil
Bestellpunkt Wartungskits	5	Ressource genutzt	1.273.800	56,59%
Bestellmenge Wartungskits	10	Ressource ungenutzt	906.424,6	40,27%
Reinigung möglich	tägl.	Reinigung	0	0,00%
Wartung möglich	tägl.	Wartung	0	0,00%
Grenze Verschmutzung	96	Ausfall	70.525,6	3,13%
Grenze Motor	96	Summe	2.250.750,2	100,00%
Grenze Führung	96			
		Aufträge	Anzahl	Anteil
		pünktlich	11.517,8	98,85%
		verspätet	133,6	1,15%
		Summe	11.651,4	100,00%
		Auslastung IH-Personal		36%

Tabelle 23: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.4

Durch die Wartungsvorgänge unter der Woche ist der Aufgabenplan für die Instandhaltungsteams entzerrt und es ist denkbar, dass die Aufgaben von einem einzigen Team erledigt werden können; darum wird im Experiment 3.4 die Zahl der Instandhaltungsteams reduziert. Die leichte Reduzierung der Gesamtkosten wird hauptsächlich durch die eingesparten Personalkosten verursacht. Die Arbeitsbelastung für die Instandhaltungsteams steigt hingegen deutlich an und könnte zu Stoßzeiten eine Belastung darstellen (s. Tabelle 23).

Experiment 3.5		Durchschnitt 3.5		
Parameter	Wert	Posten	Kosten in GE	Anteil
Anzahl Bohrmaschinen	3	IH Personal	208.000	5,86%
Anzahl Drehmaschinen	2	Gabelstapler	104.000	2,93%
Anzahl Fräsmaschinen	3	Strafe Verspätung	329.600	9,28%

Anzahl IH Teams	1	Motoren	107.851	3,04%
Anzahl Transportfahrzeuge	1	Führungen	537.652	15,14%
Aufträge pro Werktag	14±1	Wartungskits	12.208,8	0,34%
Bestellpunkt Führungen	2	Maschinen	2.251.000	63,40%
Bestellmenge Führungen	3	Summe	3.550.311,8	100,00%
Bestellpunkt Motoren	1			
Bestellmenge Motoren	2	<i>State</i> Ressource	Zeit in Min	Anteil
Bestellpunkt Wartungskits	2	Ressource genutzt	1.269.600	56,41%
Bestellmenge Wartungskits	3	Ressource ungenutzt	894.548,2	39,75%
Reinigung möglich	tägl.	Reinigung	0	0,00%
Wartung möglich	tägl.	Wartung	0	0,00%
Grenze Verschmutzung	98	Ausfall	86.335,8	3,84%
Grenze Motor	90	Summe	2.250.484	100,00%
Grenze Führung	90			
		Aufträge	Anzahl	Anteil
		pünktlich	14.253,8	97,74%
		verspätet	329,6	2,26%
		Summe	14.583,4	100,00%
		Auslastung IH-Personal		36%

Tabelle 24: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.5

In Experiment 3.5 werden mehrere Parameter verändert. Die schnell voranschreitende Verschmutzung wird früher bereinigt, die langsamer voranschreitenden Abnutzungen der kritischen Teile werden später gewartet. Durch die weniger wartungsintensive Strategie werden die Bestellpunkte und Losgrößen der Wartungskits und Ersatzteile reduziert. In Tabelle 24 ist zu sehen, dass diese Strategie keine Verbesserung gegenüber Experiment 3.4 bringt.

In diesem Abschnitt wurden die iterativen Experimente bezüglich der zustandsgesteuerten Instandhaltung beschrieben. Mit einer Variation der Zustandsgrenzen für Reinigung und Wartung konnte ein Minimum von 3,37 Mio. € Gesamtkosten ermittelt werden. Mit weiteren Iterationsschritten werden möglicherweise weitere Kostensenkungen gefunden.

6 Ergebnisse und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse vorgestellt und bewertet. Es soll außerdem ein Ausblick erarbeitet werden, wie weitere Forschung die Ergebnisse dieser Arbeit aufgreifen und weiterentwickeln kann.

6.1 Resultat in Bezug auf die Forschungsfragen

Wie können KMU mit Hilfe der Methoden der Modellierung und Simulation ihre Instandhaltungsstrategien überprüfen und Verbesserungspotentiale identifizieren?

Grundlegend lässt sich ein Bedarf bei KMU feststellen, die eigene Instandhaltung zu untersuchen und zu verbessern. Die Methoden der Modellierung und Simulation stellen dafür passende Werkzeuge dar. Da es sich bei der Instandhaltung im Rahmen eines Produktionsbetriebes um ein dynamisches System mit stochastischen Komponenten handelt, ist eine integrierte Simulation aus diskretem und agentenbasiertem Ansatz zielführend. Zur Implementierung dieses integrierten Ansatzes ist das Softwarepaket *AnyLogic* hilfreich, da es beide Ansätze in einer Benutzeroberfläche verbindet. Die vorliegende Arbeit bietet KMU eine Anleitung, um beschleunigt die eigene Instandhaltung gemäß dem aktuellen Stand der Wissenschaft zu modellieren und Simulationsexperimente durchzuführen. Die vorgestellte Vorgehensweise soll KMU befähigen zu qualitativ hochwertigen Instandhaltungssimulationsstudien zu gelangen, während die Simulationsstudie der fiktiven Fabrik zur Demonstration und als Anschauungsbeispiel für die konkrete Umsetzung dient.

Zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage wurden unterstützende Unterfragen aufgestellt, die im Folgenden detailliert beantwortet werden.

Welche Ansätze und Module sind bereits in der Literatur beschrieben und wie können diese verallgemeinert werden?

Die ausführliche Antwort auf diese Frage wird in Kapitel 3 erarbeitet. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Möglichkeiten der Modellierung der Systeme sehr vielfältig sind. Es zeigen sich jedoch wiederkehrende Muster, die zu einem ganzheitlichen Simulationsansatz für die Instandhaltung in KMU zusammengeführt werden können. Durch Betrachtung ähnlicher Simulationsstudien mit dem Thema Instandhaltung lassen sich vier wesentliche Aspekte einer ganzheitlichen Instandhaltungssimulation identifizieren: Produktion, Maschinen als Agenten, Instandhaltung und das Kennzahlensystem. Die Produktion wird in vielen

Fällen mit ereignisdiskreter Modellierung abgebildet. Diese eignet sich besonders für stochastisch dynamische Systeme, deren Verhalten als *Flowchart* dargestellt werden kann. Die Maschinen werden in den meisten Arbeiten als Agenten herausgearbeitet, die einer Abnutzungs- und Ausfalllogik folgen. Diese kann in einfachen Fällen durch die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (MTBF) bestimmt werden. Dies ist besonders dann üblich, wenn nur ausfallgesteuerte und zeitgesteuerte Strategien zur Anwendung kommen. Die Modellierung der Zustände und einer mit den jeweiligen Zuständen korrelierenden Ausfallwahrscheinlichkeit ist hingegen wesentlich aufwändiger – auch in Bezug auf die Datenbeschaffung. Die Instandhaltung wird in einfachen Fällen mit der mittleren Zeit für eine Reparatur (MTTR) bestimmt. Für komplexere Instandhaltungstätigkeiten, unter Anwendung unterschiedlicher Hilfsmittel, wird oftmals eine Ausmodellierung der Instandhaltungstätigkeiten mittels ereignisdiskreter *Flowcharts* genutzt. Das Kennzahlensystem dient als Mittel zur Bewertung eines Simulationslaufs. Oft genutzte Kennzahlen sind Kosten, Auslastungs- und Verfügbarkeitskennzahlen, Lagerstände und die Anteile an pünktlichen und verspäteten Aufträgen. Viele Arbeiten konzentrieren sich auf die Optimierung einer bestimmten Kennzahl. Es ist jedoch wichtig, einen Überblick zu behalten, um komplexe Systeme ganzheitlich zu optimieren.

Wie kann ein verallgemeinertes Referenzmodell aus Sicht eines KMU gestaltet werden?

Die ausführliche Antwort auf diese Frage ist in Kapitel 4 dargestellt. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die diversen Ansätze aus der Wissenschaft auf vielfältige Weise in ganzheitliche Modelle zur Betrachtung des Einflusses der Instandhaltung auf Produktionsunternehmen zusammengeführt werden können. Zur konkreten Beantwortung der Frage wird eine Vorgehensweise zur eigenen Entwicklung eines digitalen Modells der Instandhaltung entworfen und vorgestellt, die sich an der allgemeinen Vorgehensweise zu Erstellung einer Simulationsstudie der VDI Richtlinie 3633 orientiert. Das bereits existierende Gerüst der VDI 3633 wird um die relevanten Aspekte zur Instandhaltungssimulation ergänzt und ausgestaltet. Das zu entwickelnde Modell berücksichtigt die Produktion in einem für KMU angemessenem Detail, was eine ganzheitliche Sicht auf die Instandhaltung ermöglicht. Dadurch entsteht als Artefakt eine Vorgehensweise zur Entwicklung einer Instandhaltungssimulation mit besonderem Fokus auf die Bedürfnisse von KMU. Die stochastische Natur realer Systeme kann mittels diskreter Modellierung realitätsnah eingefangen werden.

Zur Auswertung der Simulationsläufe werden diverse Kennzahlen implementiert. Als hauptsächliche Optimierungsgröße werden die Gesamtkosten identifiziert. Diese enthalten neben den Kosten für Betrieb und Instandhaltung auch die Kosten für Produktionsausfälle aufgrund von Maschinenstillständen. Diese aussagekräftige

Kennzahl erlaubt es, aufwändigere Instandhaltung oder Redundanzen in der Produktion in ein sinnvolles Verhältnis zur hinzugewonnenen Robustheit des Unternehmens zu setzen. Um das Kennzahlensystem zu vervollständigen und einen detaillierten Blick auf den Einfluss der Instandhaltung auf das Unternehmen zu erhalten, kommen weitere Kennzahlen zum Einsatz. Diese sind Zeiten in denen sich die Ressourcen in bestimmten Zuständen befinden, Lagerbestände und die Anzahl der pünktlichen und verspäteten Aufträge.

Welche Ergebnisse liefert das gefundene Modell bei der Anwendung auf ein fiktives Unternehmen?

Das Anwendungsbeispiel in Kapitel 5 soll Simulationsexpert*innen einerseits die zuvor beschriebene Vorgehensweise demonstrieren. Andererseits soll beispielhaft veranschaulicht werden, wie die Instandhaltungssimulation in KMU konkret umgesetzt werden kann. Die agentenbasierte Simulation hat sich als effektive Methode bewährt, um die realen Prozesse ohne übermäßige Abstrahierungen abzubilden. Somit lässt sich ein realitätsnahes Modell erstellen und der Verifizierungs- und Validierungsprozess beschleunigen.

Die Experimente beschreiben Maßnahmen an einer fiktiven Fabrik mit fiktiven Parametern. Die Gültigkeit der Ergebnisse ist somit für einen allgemeinen Fall nicht gegeben. Die Fabrik ist darauf ausgelegt, bei störungsfreiem Betrieb die täglichen Auftragseingänge abzuarbeiten. Bei der spezifischen Abnutzungs- und Ausfallcharakteristik der kritischen Teile ist die Realisierung eines störungsfreien Betriebs schwierig. Im Verlauf der Experimente zeigt sich, dass die modellierte Fabrik drei Bohr- und Fräsmaschinen sowie zwei Drehmaschinen benötigt. Eventuell entstehende Überkapazitäten könnten durch passende Aufträge mit niedriger Priorität aufgefüllt werden. In der durchgeführten Simulationsstudie werden durch manuelle Optimierung für die Instandhaltungsstrategien die folgenden Optima gefunden:

Instandhaltungsstrategie (Experiment)	ausfallgesteuert (1.6)	zeitgesteuert (2.5)	zustandsgesteuert (3.4)
Anzahl Bohrmaschinen	3	3	3
Anzahl Drehmaschinen	2	2	2
Anzahl Fräsmaschinen	3	3	3
Anzahl IH Teams	1	2	1
Anzahl Transportfahrzeuge	1	1	1
Aufträge pro Werktag	14±1	14±1	14±1
Bestellpunkt Führungen	3	3	3
Bestellmenge Führungen	5	5	5
Bestellpunkt Motoren	3	2	2
Bestellmenge Motoren	5	5	5

Bestellpunkt Wartungskits	-	5	5
Bestellmenge Wartungskits	-	10	10
Reinigung	-	tägl.	tägl. mögl.
Wartung	-	monatl.	tägl. mögl.
Grenze Verschmutzung	-	-	96
Grenze Motor	-	-	96
Grenze Führung	-	-	96
Gesamtkosten	3.537.748	3.677.558	3.379.319,8
Anteil Strafen an Kosten	6,82%	4,22%	4,46%
Anteil verspäteter Aufträge	1,65%	0,89%	1,15%
Auslastung IH-Teams	36%	25%	36%

Tabelle 25: Übersicht Ergebnisse Experimente

Die zustandsgesteuerte Instandhaltung bietet Chancen. Jedoch ist herauszustellen, dass zusätzlich die Investitionskosten zu berücksichtigen sind, bevor eine endgültige Empfehlung abgegeben werden kann. Die Priorisierung der Instandhaltungsaufgaben wird während der Experimente nicht verändert. Auch hier besteht noch Optimierungspotential. Festzuhalten ist außerdem, dass eine suboptimal eingestellte präventive Instandhaltung (zeitgesteuert oder zustandsgesteuert) zu schlechteren Ergebnissen führen kann als eine ausfallbehebende Strategie mit höheren Redundanzen. Zur Weiterentwicklung des Modells kann es über den folgenden QR-Code heruntergeladen werden.

Abbildung 34: Lesen des QR-Codes führt zum Modell der fiktiven Fabrik in der AnyLogic Cloud²⁴⁶

6.2 Grenzen und Einschränkungen des Modells

Damit die vorgeschlagene Vorgehensweise in Zukunft als Referenzmodell gelten kann, muss sie zunächst in realen Unternehmen zur Anwendung kommen und ihre Fähigkeit zur Problemlösung allgemein akzeptiert werden. Dennoch kann sie im aktuellen Stadium KMU einen Anhaltspunkt bieten, ihre eigene Instandhaltung zu

²⁴⁶ alternativ: <https://cloud.anylogic.com/model/0900a4d5-aa95-4974-ae08-d56b98dc0191?mode=SETTINGS>, Zugriff: 10.08.2022

modellieren und zu untersuchen. Die Abläufe in Unternehmen und deren Modellierung sind sehr individuell und vielzählig. Die vorliegende Arbeit kann diese Vielzahl der Aspekte nicht vollständig erfassen. Daher bleibt es die Aufgabe der Simulationsexpert*in, die spezifischen Herausforderungen jedes Unternehmens zu beurteilen und gegebenenfalls in das Modell einzuarbeiten. Die Datenbeschaffung ist ein weiterer Schlüssel zu einer aussagekräftigen Simulation. Um einen sinnvollen Rahmen für die vorliegende Arbeit zu finden, konnte dieser Aspekt nicht berücksichtigt werden. Es gestaltet sich oftmals schwierig, die präzisen Zusammenhänge zwischen Zuständen diverser Aspekte und den Ausfallwahrscheinlichkeiten herzustellen. Beispielsweise können der Abnutzung und dem Ausfall eines Motors mehrere interagierende Ursachen zu Grunde liegen: verstopfende Filter, ungewöhnliche Belastungsprofile, die eigene Abnutzung, etc. Es ist außerdem festzuhalten, dass sich die vorliegende Arbeit auf die Abläufe innerhalb lediglich eines Werkes konzentriert. Allerdings betreiben manche KMU Produktionsnetzwerke mit mehreren Standorten, die sich eine gemeinsame Instandhaltung teilen. Ebenso wurde die Möglichkeit der externen Instandhaltung und der vorausschauenden Instandhaltungsstrategie nicht berücksichtigt.

6.3 Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells

Im Sinne der Ganzheitlichkeit kann die erarbeitete Vorgehensweise und die resultierenden Modelle auf vielfältige Weise weiterentwickelt werden. Hier folgen einige Vorschläge.

Entwicklungsmöglichkeiten des Instandhaltung-Modells

Eine Priorisierungslogik für Wartungsarbeiten kann eingeführt werden, um die Reihenfolge festzulegen, in der die Wartungs- und sonstigen Instandhaltungsarbeiten abgearbeitet werden. Dabei sollte auf eine sinnvolle Planung Wert gelegt werden, die außerdem die Möglichkeit beinhaltet, Eilaufträge einzuschieben, um auf Notfälle schnell reagieren zu können. Außerdem wäre es denkbar, dass unterschiedliche Ressourcen mit unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien behandelt werden. So könnte z.B. ein Fokus auf die Instandhaltung von Engpassressourcen gerichtet werden, da deren Ausfall zu weitreichenden Problemen führen kann. Eine sinnvolle Entwicklungsmöglichkeit kann auch sein, auf die ausgelagerte oder zentralisierte Instandhaltung einzugehen, wo z.B. Instandhaltungs- und sonstige *After-Sales* Verträge mit den Maschinenlieferantenunternehmen geschlossen werden. Die Betrachtung der vorausschauenden Instandhaltungsstrategie kann ebenfalls relevant sein, da diese in zunehmender Zahl zur Anwendung kommt.

Entwicklungsmöglichkeiten des Ersatzteilmanagement-Modells

Um ein realitätsgetreueres Modell zu erhalten ist es wichtig, alle kritischen Komponenten der Maschinen zu identifizieren und auf eine sinnvolle Diversifizierung der Ersatzteile zu achten. Hier ist primär zu klären, in welcher Detailtiefe Daten über die Zustände der einzelnen Teile beschafft werden können, um zu entscheiden, ob es sinnvoller ist nach MTBF oder mit der Modellierung der Zustände vorzugehen. In dem zuvor erarbeiteten Beispiel erhalten alle Maschinen die gleichen Motoren und die gleichen Linearführungen als Ersatzteile, was lediglich zu Anschauungszwecken dient. Im realen Anwendungsfall ist eine genaue Abbildung der Varianten wichtig, um die Bestellung und Bevorratung korrekt zu modellieren. Falls es für den realen Anwendungsfall eine Rolle spielt, kann es auch zielführend sein, einen Beschaffungsmarkt für Ersatzteile oder eine Ersatzteilaufbereitung zu modellieren. Dies gewinnt vor allem dann an Bedeutung, wenn es sich bei den Teilen um Spezialanfertigungen handelt, die nicht ohne weiteres beschafft werden können.

Entwicklungsmöglichkeiten des Produktions- und Logistikmodells

Das Produktions- und Logistikmodell bietet weitere vielschichtige Möglichkeiten der Anpassung und Entwicklung. Für viele Unternehmen ist die Ergänzung einer Montageabteilung relevant, wo verschiedene Methoden eine Rolle spielen können (z.B. Reihenfolgebildung, *KANBAN* System, Pull-Strategie, *JIT*, *JIS*, etc.). Diese müssen in den meisten Fällen im Modell nachgebildet werden, um ein realistisches Modell der Produktion zu erhalten. Die Ergänzung von Rüstzeiten und damit verbundenen Losgrößenlogiken können die Modellierung stark beeinflussen. Zudem sind in vielen Unternehmen Zwischenlager und Pufferbestände vorhanden, um die Liefertreue zu erhöhen und die Leerlaufzeiten der Maschinen zu reduzieren. Je nach Relevanz für die Instandhaltung ist es auch möglich, diverse Behälter, Hebezeuge oder Transportfahrzeuge zu modellieren. So müssen z.B. auch Gabelstapler und Kräne instandgehalten werden, die den gesamten komplexen Warenfluss beeinflussen. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell beschränkt sich auf diskrete Fertigungsprozesse. Eine Erweiterung zur Behandlung von kontinuierlichen Produktionsverfahren kann für KMU (z.B. chemische Industrie) relevant sein.

Entwicklungsmöglichkeiten des Personal-Modells

Im erarbeiteten Modell wird das Personal, welches die Maschinen bedient, zunächst als nicht relevant betrachtet, da die personelle Produktionsplanung vordergründig keine Schnittmenge mit der Instandhaltung hat. Es ist aber vorstellbar, dass dem Bedienpersonal schrittweise mehr Verantwortung in der Instandhaltung übertragen wird. Des Weiteren sind Arbeitszeitenregelungen (Mehrschichtbetrieb, Überstunden, Zeitarbeit, flexible Arbeitszeit) ebenso wie Betriebsferien, krankheitsbedingte Ausfälle

und Urlaubszeiten auf ihre Relevanz für die Instandhaltung zu überprüfen und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Weitere Ansätze zur Entwicklung

Indem das Kennzahlensystem weiterentwickelt wird, kann die Aussagekraft der Experimente erhöht werden. Beispielsweise ermöglichen genauere Auslastungskennzahlen des Instandhaltungspersonals die Identifizierung neuer Arbeitszeitmodelle. Des Weiteren können Qualitätsverluste (Ausschuss) durch den Zustand der Maschinen beeinflusst werden, was eine genauere Betrachtung dieser Thematik rechtfertigt. Die erarbeitete Vorgehensweise führt zur Erstellung eines digitalen Modells, das sich durch eine manuelle Datenübertragung und eine Offline-Simulation auszeichnet. Mit automatisierten Echtzeit-Datenschnittstellen ist es möglich, das Modell in Richtung digitaler Schatten oder digitaler Zwilling weiterzuentwickeln. Besonders für den digitalen Zwilling, der als Prognose- und Planungswerkzeug eingesetzt wird, ist die Implementierung eines Optimierungswerkzeugs notwendig. Dieses führt eine automatische Kostenoptimierung oder die Optimierung eines Fit-Wertes durch, um eine Entscheidungshilfe in Echtzeit zu bieten.

7 Anhang

In der folgenden Tabelle sind die Suchbegriffe der Schlagwortsuche der Literaturrecherche für das 3. Kapitel (Stand der Wissenschaft) aufgeführt. Zu jedem Suchergebnis wurden jeweils die ersten 20 Treffer untersucht und zumindest die Zusammenfassung überprüft. Die Suchbegriffe wurden im Katalog der TU Wien Bibliothek²⁴⁷ hauptsächlich auf Deutsch in Google Scholar²⁴⁸ und Science Direct²⁴⁹ hauptsächlich auf Englisch eingegeben.

Im ersten Durchgang wurde durch eine Einzel-Schlagwortsuche eine Übersicht über das Themenfeld gewonnen (verwendete Suchmaschinen: TU Wien Bibliothek Katalog, Google Scholar, Science Direct, frühestes Erscheinungsjahr: 2010)

- anpassbares modell (adaptable model)
- AnyLogic
- advanced planning and scheduling
- agentenbasiert (agent based)
- integrative modellierung (integrative modelling)
- integrative simulation (integrative simulation)
- Multimethodenmodellierung/-simulation
- Intralogistik
- Kapazitätsplanung/ -steuerung, Capacity planning/ -controlling
- Losgröße*, lot size, Batch size, Losgrößenoptimierung, dynamische Losgrößen, stochastische Losgrößen
- Modellierung, modeling, modell*
- Produktionsnetzwerk, production network, facility and production network level, internes Netzwerk, Werks- und Produktionsnetzwerkebene
- Planung unter Unsicherheit*/Schwankung*, Planning under uncertainties
- Simulation
- Smart Factory
- Smart Logistics
- Virtuelles Unternehmen, Digital Twin
- Zeitdiskret, discrete, ereignisbasiert, event based

Im zweiten Durchgang wurden relevante Schlagwörter kombiniert, um einen zielspezifischen Stand der Wissenschaft zu finden (verwendete Suchmaschinen: TU Wien Bibliothek Katalog, Google Scholar, Science Direct, frühestes Erscheinungsjahr: 2005)

- AnyLogic UND industry 4.0 ODER industrie 4.0
- Hybrid simulation UND Instandhaltung
- Hybrid simulation UND industry 4.0 ODER industrie 4.0
- IKT UND Produktion*
- IKT UND Logistik*
- Flexibilitätsmaßnahme UND Logistik*
- Simulationsgestützte Optimierung
- Maintenance ODER Instandhaltung UND Simulation

²⁴⁷ <https://www.tuwien.at/bibliothek/>, Zugriff 10.06.2022

²⁴⁸ <https://scholar.google.com/>, Zugriff 10.06.2022

²⁴⁹ <https://www.sciencedirect.com/>, Zugriff 10.06.2022

- diskret* UND Simulation UND Losgröße*
- diskret* UND Simulation UND Produktion*
- diskret* UND Simulation UND Logistik*
- Kapazitätsplanung UND Simulation
- Produktionsplanung UND Simulation
- Produktionsplanung UND Simulation UND Digitalisierung
- Flexibilisierung* UND digital* UND Produktion
- Maßnahme UND digital* UND Logistik
- Produktionsnetzwerk ODER Logistiknetzwerk UND Digitalisierung
- Produktionsnetzwerk ODER Logistiknetzwerk UND Digitalisierung UND interne*
- Informationsfluss UND Logistik*
- Smart Logistics UND Maßnahme NICHT City NICHT Energy
- Industrie 4.0 UND KMU UND Intralogistik
- Lagerbestand UND Simulation
- Dynamic Lot Size UND IoT
- Dynamische Losgröße UND IoT
- KMU UND Simulation
- KMU UND Instandhaltung

Tabelle 26: Dokumentation Literaturrecherche, eigene Darstellung

8 Literaturverzeichnis

8.1 Fachliteratur

Alabdulkarim, A., Ball, P., Tiwari, A.: Rapid Modelling of Field Maintenance Using Discrete Event Simulation, in: Jain, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, S.637-646

Bogon, T., Timm, I., Lattner, A., Paraskevopoulos, D., Jessen, U., Schmitz, M., Wenzel, S., Spieckermann, S.: Towards Assisted Input and Output Data Analysis in Manufacturing Simulation: The EdaSim Approach, in: Laroque, C., Himmelspach, J., Pasupathy, R., Uhrmacher, A.M. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 2012

Borshchev, A., Grigoryev, I.: The Big Book of Simulation Modeling, Multimethod Modeling with ANYLOGIC 8, 2020

Bracht, U., Geckler, D., Wenzel, S.: Digitale Fabrik, Methoden und Praxisbeispiele, Basis für Industrie 4.0, 2. Auflage, Springer, Berlin, 2018

Bresler, A., Derwich, W., Schmitz-Rixen, T.: Digitalisierung und digitale Zwillinge in der Gefäßchirurgie, in: Gefäßchirurgie 25, Springer, 2020, S.324–331

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung, Beuth, Berlin, 2019

DIN EN 13306 Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung, Beuth, Berlin 2018

Dittes, F.: Komplexität, Warum die Bahn nie pünktlich ist, Springer, Berlin, 2012

Errandonea, I., Beltrán, S., Arrizabalaga, S.: Digital Twin for maintenance: A literature review, in: Computers in Industry 123, San Sebastián, 2020

Europäische Kommission: Empfehlung der Kommission 2003/361/EG betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen, in: Amtsblatt der Europäischen Union 20.05.2003, 2003, S.36-41

Gallab, M., Bouloiz, H., Chater, Y., Tkiouat, M.: Towards a Simulation Model to Ensure the Availability of Machines in Maintenance Activities, in: International Journal of Computer and Information Engineering Vol.10 No.7, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2016, S.1371-1375

Grigoryev, I.: ANYLOGIC in three days, A quick course in simulation modeling, 5.Auflage, 2018

Günther, P.: Intralogistik - eine starke Branche stellt sich vor, in: Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik, Potentiale, Perspektiven, Prognosen, Springer, Berlin, 2006, S.5-16

Gupta, A., Lawsiritat, C.: Strategically optimum maintenance of monitoring-enabled multi-component systems using continuous-time jump deterioration models, in: Journal of Quality in Maintenance Engineering, 12:3, 2006, S.306-329

Helmig, J., Schmidt, C., Kompa, S.: Zeitdynamische Simulation in der Produktion, in: Schuh, G., Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 2, Die Evolution der PPS, 4.Auflage, Springer, Berlin, 2012, S.195-231

Hevner, A., March, T., Park, J., Ram S.: Design Science in Information Systems Research, in: MIS Quarterly, Vol.28, 2004, S.75-105

Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J.: Arbeitskreis Industrie 4.0, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Berlin, 2012

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, in: IFAC PapersOnLine 51-11, 2018, S.1016-1022

Lattner, A., Timm, I., Pitsch, H., Spieckermann, S.: AssistSim – Towards Automation of Simulation Studies in Logistics, in: SNE Simulation Notes Europe, December, 2011

Law, A.: How to build valid and credible simulation models, in: N. Mustafee et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference, 2019, S.1402-1414

Law, A.: Models of Random Machine Downtimes for Simulation, in: Balci, O., et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference, USA, 1990, S.314-316

Law, A., Kelton, D.: Simulation Modeling & Analysis, 2. Auflage, McGraw-Hill, New York, 1991

Law, A., McComas, M.: Simulation of Manufacturing Systems, in: Andradottir et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, USA, 1997, S.86-89

Lynch, P., Adendorff, K., Yadavalli, V., Adetunji, O.: Optimal spares and preventive maintenance frequencies for constrained industrial systems, in: Computers & Industrial Engineering 65, 2013, S.378-387

Matyas, K., Instandhaltungslogistik, Qualität und Produktivität steigern, Hanser, München, 2016

Mayer, G., Pöge, C., Spiekermann, S., Wenzel, S.: Einleitung, in: Mayer, G., Pöge, C., Spiekermann, S., Wenzel, S. (Hrsg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie, Springer, Berlin, 2020, S.1-19

Mourtzis, D.: Simulation in the design and operation of manufacturing systems, state of the art and new trends, in: International Journal of Production Research, 58:7, 2020, S.1927-1949

Muriel, A., Prokle, M., Tomastik, R.: Life-Cycle Engine Fleet Simulation for Spare Part Inventory Management with Advanced Condition Information, in: Rabe et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, 2018, S.2309-2320

Nagadi, K., Rabelo, L., Basingab, R., Sarmiento, A., Jones, A., Rahal, A.: A hybrid simulation-based assessment framework of smartmanufacturing systems, in: International Journal of Computer Integrated Manufacturing Vol.31 No.2, 2018, S.115-128

Opp, J.: Ablaufsimulation in der Fahrzeugendmontageplanung – Eine einheitliche und transparente Simulationsmethodik fördert die Nachvollziehbarkeit und das Vertrauen, in: Mayer, G., Pöge, C., Spiekermann, S., Wenzel, S. (Hrsg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie, Springer, Berlin, 2020, S.69-82

Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M., Chatterjee, S.: A Design Science Research Methodology for Information Systems Research, in: Journal of Management Information Systems, Vol.24 No.3, 2008, S.45-77

Prosser, A., Wijayalath, L.: Simulation-Based Analysis of Device Availability under three aintenance Strategies, in: Hintea, C. (Hrsg.): Transylvanian International Conference in Public Administration, Accent, Cluj-Napoca, 2018, S.403-412

Rabe, M., Spieckermann, S., Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Vorgehensmodelle und Techniken, Springer, Heidelberg, 2008

Rezg, N., Chelbi, A., Xie, X.: Modeling and optimizing a joint inventory control and preventive maintenance strategy for a randomly failing production unit: Analytical and

simulation approaches, in: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Ausgabe 18:2-3, 2005, S.225-235

Sahnoun, M., Baudry, D., Mustafee, N., Louis, A., Smart, P., Godsiff, P., Mazari, B.: Modelling and simulation of operation and maintenance strategy for offshore wind farms based on multi-agent system in: Journal of Intelligent Manufacturing, Ausgabe 30, 2015, S.2981-2997

Scheffer, M., Mattern, H., Conrads, A., Thewes, M., König, M.: Simulation of Maintenance Strategies in Mechanized Tunneling, in: Roeder, T. Et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, 2016, S.3345-3356

Scholten, K., Stevenson, M., van Donk, D.: Dealing with the unpredictable: supply chain resilience, in: International Journal of Operations & Production Management, Vol. 40 No. 1, 2020, S.1-10

Scholz-Reiter, B., Höhns, H.: Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen, in: Schuh, G., Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 2, Die Evolution der PPS, 4.Auflage, Springer, Berlin, 2012, S.294-335

Siebers, P., Macal, C., Garnett, J., Buxton, D., Pidd, M.: Discrete-event simulation is dead, long live Agent-based simulation!, in: Journal of Simulation 4:3, Operational Research Society, 2010, S.204-210

Strunz, M.: Instandhaltung, Grundlagen – Strategien – Werkstätten, Springer, Berlin, 2012

Thomas, O.: Das Referenzmodellverständnis in der Wirtschaftsinformatik: Historie, Literaturanalyse und Begriffsexplikation, in: Loos, P. (Hrsg.): Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik im Deutschen Forschungszentrum für künstliche Intelligenz, Heft 187, Saarbrücken, 2006

VDA 4811: Qualitätskriterien für Simulationsstudien der Ablaufsimulation, Berlin, 2013

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Begriffe, Düsseldorf, 2018

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 1 Grundlagen, Düsseldorf, 2014

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 2 Lastenheft, Pflichtenheft und Leistungsbeschreibung für die Simulationsstudie, Düsseldorf, 1997

VDI 3633, Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Blatt 3 Experimentplanung und –auswertung, Düsseldorf, 1997

VDI 3633, Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Blatt 11 Simulation und Visualisierung, Düsseldorf, 2009

Wabner, M.: Die twitternde Produktionsmaschine, Fraunhofer IWU, Chemnitz, 2015

Weißbach, A.: Verbundinstandhaltung bei Kleinstunternehmen, kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) – Ein Konzept für neue Organisationsformen der Instandhaltung, Universitätsverlag Ilmenau, 2012

Wiese, J.: Simulationen in KMU : Eine erste Bestandsaufnahme, in: Sucky, E., Werner, J., Kolke, R., Biethahn, N. (Hrsg.): Logistik & Supply Chain Management, Band 14, Bamberg, 2016, S.183-189

Wunsch, G., Schreiber, H.: Stochastische Systeme, 4.Auflage, Springer, Berlin, 2006

Zarte, M., Wunder, U., Pechmann, A.: Concept and First Case Study for a Generic Predictive Maintenance Simulation in ANYLOGIC™, in: IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, 2017, S. 3372-3377

8.2 Online Quellen

Features des Softwarepakets *AnyLogic*: <https://www.AnyLogic.com/features/>, Zugriff 06.08.2021

Startseite der *AnyLogic* -Hilfe, <https://ANYLOGIC.help/>, Zugriff 30.07.2021

Zeit-Funktionen in *AnyLogic*, <https://AnyLogic.help/advanced/functions/time-functions.html>, Zugriff 01.06.2022

Schedule Block in *AnyLogic*, <https://AnyLogic.help/AnyLogic/data/schedule.html> , Zugriff 01.06.2022

Events in *AnyLogic*, <https://AnyLogic.help/AnyLogic/statecharts/events.html>, Zugriff 22.06.2022

Zufallsverteilungen in *AnyLogic*, <https://AnyLogic.help/AnyLogic/stochastic/probability-distributions.html>, Zugriff 08.07.2022

Analysis Bibliothek in AnyLogic, <https://AnyLogic.help/AnyLogic/ui/AnyLogic-palettes.html#analysis> , Zugriff 22.06.2022

Material Handling Bibliothek in AnyLogic, <https://AnyLogic.help/library-reference-guides/material-handling-library/index.html> , Zugriff 09.05.2022

Release Block in AnyLogic, <https://AnyLogic.help/library-reference-guides/process-modeling-library/release.html#release>, Zugriff 28.06.2022

Seize-Block in AnyLogic, <https://AnyLogic.help/search.html?seize>, Zugriff 28.06.2022

NetLogo, <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Zugriff 23.06.2022

Modell der fiktiven Fabrik, <https://cloud.anylogic.com/model/0900a4d5-aa95-4974-ae08-d56b98dc0191?mode=SETTINGS>, Zugriff 10.08.2022

Kaffeemaschinen Modell, <https://cloud.AnyLogic.com/model/45f7ada4-7542-4975-a6ec-843183e9c715?mode=SETTINGS>, Zugriff 06.08.2021

Modelle in der AnyLogic -Cloud, <https://cloud.AnyLogic.com/models>, Zugriff 06.08.2021

Stochastik in diskreter Simulation, <https://de.mathworks.com/videos/understanding-discrete-event-simulation-part-3-leveraging-stochastic-processes-1494968826974.html>, Zugriff 29.06.2022

Wikipedia: Systemeigenschaften, <https://de.wikipedia.org/wiki/Systemeigenschaften>, Zugriff 16.07.2021

Wikibooks: Einführung in die Systemtheorie/ Dynamische Systeme, https://de.wikibooks.org/wiki/Einf%C3%BChrung_in_die_Systemtheorie/_Dynamische_Systeme, Zugriff 09.07.2021

Wikipedia: Dummy Data, https://en.wikipedia.org/wiki/Dummy_data, Zugriff 13.05.2022

Wikipedia: List of Computer Simulation Software, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_computer_simulation_software, Zugriff 22.05.2020

Gesamtanlageneffektivität, <https://www.oeo.com/oeo-factors/>, Zugriff 24.08.2022

Small Business Standards (Hrsg.): Ein Praxisleitfaden für KMU, Warum Normen wichtig sind und Möglichkeiten der Beteiligung: https://sbs-sme.eu/sites/default/files/A%20Practical%20Guide%20for%20SMEs_DE.pdf, Zugriff 22.05.2022

Science Direct, <https://www.sciencedirect.com/>, Zugriff 10.06.2022

Google Scholar, <https://scholar.google.com/>, Zugriff 10.06.2022

Ziele SMART definieren, <https://www.bwl-lexikon.de/wiki/smart-ziele/>, Zugriff 07.07.2022

CatalogPlus TU Wien: <https://www.tuwien.at/bibliothek/>, Zugriff 10.06.2022

Welt der BWL: Produktionsnetzwerk, <https://welt-der-bwl.de/Produktionsnetzwerk/>, Zugriff 23.06.2021

Statistisches Bundesamt: KMU, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/inhalt.html>, Zugriff 09.03.2022

8.3 Weitere Literatur

Alrabghi, A., Tiwari, A.: State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems, in: Computers & Industrial Engineering 82, 2015, S.167-182²⁵⁰

Duan, D., Deng, C., Gharaei, A., Wu, J., Wang, B.: Selective maintenance scheduling under stochastic maintenance quality with multiple maintenance actions, in: International Journal of Production Research Vol.56 No.23, 2018, S.7160-7178²⁵¹

Gudehus, T.: Dynamische Disposition, Strategien zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition, 2. Auflage, Springer, Berlin, 2006²⁵²

Guner, H., Chinnam, R., Murat, A.: Simulationplatform for anticipative plant-level maintenance decision support system, in: International Journal of Production Research, 54:6, 2016, S.1785-1803²⁵³

Mayer, Pöge, Spieckermann, Wenzel (Hrsg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie, Springer, Berlin, 2020²⁵⁴

Neubacher, M.: Simulation-based optimization methods for operative production control and scheduling, using discrete digital factory models, Wien, 2011²⁵⁵

²⁵⁰ State of the Art - Optimierung in der Instandhaltungssimulation

²⁵¹ Instandhaltungsqualität selbst ist stochastisch verteilt

²⁵² Kosten der Disposition werden mit einbezogen

²⁵³ Einführung einer Reihenfolgelogik aufgrund von Engpässen

²⁵⁴ Diverse Modellierungsbeispiele für komplizierte Produktionssysteme

²⁵⁵ Ausführliche Optimierungsstudie

VDI 4499: Digitale Fabrik, Blatt1, Grundlagen, Düsseldorf, 2008²⁵⁶

²⁵⁶ Methoden der digitalen Fabrik eventuell für Entwicklung eines digitalen Zwillings relevant

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>Design Science Research</i> Prozess, eigene Darstellung angelehnt an Peffers et al.	3
Abbildung 2: Das System und seine Bestandteile, eigene Darstellung nach VDI 3633	9
Abbildung 3: Beispielhafter Zusammenhang der Abnutzung mit der Ausfallwahrscheinlichkeit bei Prosser und Wijayalath, eigene Darstellung	23
Abbildung 4: Vergleich von <i>Statechart</i> -Logiken für Maschinen-Agenten angelehnt an Nagadi et al. (links) und Wijayalath (rechts), eigene Darstellung.....	24
Abbildung 5: Ablauf Simulationsstudie, eigene Darstellung angelehnt an VDI 3633 mit spezifischer Ausgestaltung für Instandhaltungssimulation (rot)	35
Abbildung 6: Vier Aspekte der ganzheitlichen Instandhaltungssimulation, eigene Darstellung	37
Abbildung 7: Modellierung der Prozesse, eigene Darstellung	44
Abbildung 8: Mögliche Einteilung für Instandhaltungsprozesse unter Benutzung eines Ersatzteils, eigene Darstellung	46
Abbildung 9: Layout der Fabrik mit wichtigsten Abmessungen, eigene Darstellung..	61
Abbildung 10: Prozessschritte für die Produktion von Gehäuse und Welle, eigene Darstellung	62
Abbildung 11: Prozessschritte für die Instandhaltung mit Prioritätsreihenfolge, eigene Darstellung	66
Abbildung 12: Beteiligte Agenten mit wichtigsten Beziehungen, eigene Darstellung.	69
Abbildung 13: Funktionen zur Ermittlung der Betriebszeiten, eigener Screenshot	70
Abbildung 14: Fabriklayout mit Bewegungsnetzwerk der Intralogistik und täglicher Auftragsfreigabe als Ereignis, eigener Screenshot.....	70
Abbildung 15: Produktionslogik mit unterschiedlichen Wegen durch die Produktionsstationen, eigener Screenshot	71
Abbildung 16: <i>Statechart</i> -Logik der Auftragsagenten, eigener Screenshot	73
Abbildung 17: <i>Statechart</i> -Logik, Funktionen, Parameter und Variablen der Maschinenagenten, eigener Screenshot	75
Abbildung 18: Bedingung für Erreichen des States <i>st_wartung</i> in der zustandsgesteuerten Instandhaltungsstrategie, eigener Screenshot	76
Abbildung 19: Funktionen <i>f_wahrschAusfall(v_zustandX)</i> und <i>f_abnutzung()</i> zur Implementierung der Abnutzungs- und Ausfalllogik, eigener Screenshot.....	77
Abbildung 20: Das Erreichen eines Schaden-State startet die <i>Downtime</i> der Ressource im Main-Agenten, eigener Screenshot	78
Abbildung 21: Instandhaltung als <i>Flowcharts</i> implementiert, eigener Screenshot.....	79
Abbildung 22: <i>Downtime</i> -Blöcke starten die Instandhaltung- <i>Flowcharts</i> , eigener Screenshot	79

Abbildung 23: Ressourcenblock der Instandhaltungsteams mit Arbeitszeiten im <i>Schedule</i> -Block, eigener Screenshot.....	80
Abbildung 24: <i>Statechart</i> der Instandhaltungsagenten, eigener Screenshot	80
Abbildung 25: Implementierung der Überprüfungs- und Bestellfunktionen für Ersatzteile, eigene Screenshots	81
Abbildung 26: Ersatzteilbestellung als <i>Flowchart</i> , eigener Screenshot.....	82
Abbildung 27: <i>Statechart</i> der Ersatzteile und Wartungskits, eigener Screenshot	82
Abbildung 28: Variablen des Main-Agenten zur Aufzeichnung der Kosten und Auslastungskennzahlen, eigener Screenshot.....	82
Abbildung 29: Aufbau <i>Interface</i> zum <i>Monitoring</i> der Kennzahlen, eigener Screenshot	83
Abbildung 30: Lesen des QR-Codes führt zum Modell der fiktiven Fabrik in der AnyLogic Cloud	84
Abbildung 31: Lagerstände eines Laufs des Experiments 1.1: Material(WIP), Wartungskits, Ersatzteile (Motoren und Führungen), eigener Screenshot	87
Abbildung 32: Lagerstände eines Laufs des Experiments 1.2: Material(WIP), Wartungskits, Ersatzteile (Motoren und Führungen), eigener Screenshot	88
Abbildung 33: Lagerstände eines Laufs des Experiments 1.4: Material(WIP), Wartungskits, Ersatzteile (Motoren und Führungen), eigener Screenshot	90
Abbildung 34: Lesen des QR-Codes führt zum Modell der fiktiven Fabrik in der AnyLogic Cloud	104

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Abnutzung nach Prosser und Wijayalath.....	22
Formel 2: Deterministische Abnutzung nach Sahnoun et al.	24
Formel 3: Stochastische Abnutzung nach Sahnoun et al.	24
Formel 4: Verfügbarkeit einer Ressource nach Strunz	28
Formel 5: Auslastung einer Ressource nach Strunz.....	28
Formel 6: Zustand und stochastische Abnutzung einer Komponente.....	45
Formel 7: Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente in Abhängigkeit des Zustands	45
Formel 8: Zeitanteile der Betriebszeit, die in Zustand X verbracht wurden in Prozent	47
Formel 9: Auslastung der Instandhaltungsteams in Prozent	48
Formel 10: Mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen	54
Formel 11: Mittlere Zeit für eine Reparatur	54
Formel 12: Zustand und stochastische Abnutzung der Komponente Motor	63
Formel 13: Zustand und stochastische Abnutzung der Komponente Linearführung .	63
Formel 14: Verschmutzungsgrad und seine stochastische Zunahme	63
Formel 15: Ausfallwahrscheinlichkeit des Motors in Abhängigkeit des Zustands	64
Formel 16: Ausfallwahrscheinlichkeit der Linearführung in Abhängigkeit des Zustands und der Verschmutzung	64
Formel 17: Kennzahl Gesamtkosten der Kostenpunkte in GE.....	67
Formel 18: Gesamtkostenanteil eines Kostenpunkts in Prozent.....	67
Formel 19: Kostenpunkt Maschinenkosten in GE.....	67
Formel 20: Kostenpunkt Transportkosten in GE.....	67
Formel 21: Kostenpunkt Personalkosten in GE.....	67
Formel 22: Kostenpunkt Verspätungskosten in GE	67
Formel 23: Kostenpunkt Ersatzteilkosten in GE	68
Formel 24: Zeitanteil an Betriebszeit in Prozent	68
Formel 25: Liefertreue in Prozent	68

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorgehensweisen für Simulationsstudien in der Literatur	18
Tabelle 2: Relevanteste untersuchte Arbeiten und ihre Abdeckung relevanter Aspekte, eigene Darstellung	32
Tabelle 3: Relevante Bibliotheken für die Instandhaltungssimulation in AnyLogic.....	49
Tabelle 4: Für Instandhaltung sinnvoll manipulierbare Parameter (beispielsweise) ..	55
Tabelle 5: Wahrscheinlichkeit $h(\text{Zustand})$ für Ausfall	63
Tabelle 6: Lieferzeiten für Ersatzteile und Wartungskits	65
Tabelle 7: Parameter, Variablen und Funktionen des Main-Agenten	72
Tabelle 8: Parameter, Variablen und Funktionen der Maschinenagenten	74
Tabelle 9: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.1	86
Tabelle 10: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.2	87
Tabelle 11: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.3	89
Tabelle 12: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.4	89
Tabelle 13: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.5	91
Tabelle 14: Parameter und Ergebnisse Experiment 1.6	91
Tabelle 15: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.1	93
Tabelle 16: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.2	93
Tabelle 17: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.3	94
Tabelle 18: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.4	95
Tabelle 19: Parameter und Ergebnisse Experiment 2.5	96
Tabelle 20: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.1	97
Tabelle 21: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.2	98
Tabelle 22: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.3	98
Tabelle 23: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.4	99
Tabelle 24: Parameter und Ergebnisse Experiment 3.5	100
Tabelle 25: Übersicht Ergebnisse Experimente	104
Tabelle 26: Dokumentation Literaturrecherche, eigene Darstellung	109

12 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
CBM	Condition Based Maintenance
CM	Corrective Maintenance
CPU	Central Processing Unit
DIN	Deutsches Institut für Normung
€	Euro
EG	Europäische Gemeinschaft
EHF	Equipment Health Factor
EN	Europäische Norm
engl.	Englisch
&	et (und)
ET	Ersatzteil
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und weitere)
EU	Europäische Union
f	folgend
ff	fortfolgend
FIFO	First In First Out
FMEA	Fehler Möglichkeits- und Einflussanalyse
Fr.	Freitag
GE	Geldeinheiten
GB	Gigabyte
Ghz	Gigahertz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde
Hrsg.	Herausgeber*in
https	Hypertext Transfer Protocol Secure

IECON	Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFAC	International Federation of Automatic Control
IH	Instandhaltung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
inkl.	inklusive
IoT	Internet of Things
IWU	Institut für Werkzeugtechnik und Umformtechnik
JIS	Just in Sequence
JIT	Just in Time
km	Kilometer
KMU	kleine- und mittlere Unternehmen
LIFO	Last In First Out
max	maximal
MES	Manufacturing Execution System
m	Meter
max	maximal
min	minimal
Min	Minute
Mio.	Millionen
MIS	Management Information Systems
Mo.	Montag
monatl.	monatlich
MTBF	Mean Time between Failures
MTTR	Mean Time to Repair
No.	Number
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PM	Predictive Maintenance
PPS	Produktionsplanung- und Steuerung

%	Prozent
QR	Quick Response
RAM	Random-Access Memory
Σ	Sigma (Summe)
s	Sekunde
s.	siehe
S.	Seite
Sa.	Samstag
SM	Scheduled Maintenance
SMEA	Störungsmöglichkeit und Einflussanalyse
SMEs	Small and medium Enterprises
SNE	Simulation Notes Europe
So.	Sonntag
sog.	so genannt
tägl.	täglich
TM	Trade Mark
TU	Technische Universität
USA	United States of America
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
Vol.	Volume
V&V	Verifikation und Validierung
WE	Wochenende
WIP	Work in Progress
Wo.	Woche(n)
www	World Wide Web
z.B.	zum Beispiel