

Disaggregation aggregierter Daten als Key Performance Indicators einer Fertigungslinie durch Data Farming

Fachwissenschaftliche Projektarbeit

Vorgelegt von:	Henning Thum
Matrikelnummer:	179581
Studiengang:	Wirtschaftsingenieurwesen
Ausgabedatum:	10.05.2024
Abgabedatum:	25.11.2024
Erstprüfer:	Florian Hochkamp
Zweitprüfer:	Katharina Langenbach

Technische Universität Dortmund
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet IT in Fertigung und Logistik

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
Formelverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Einführung in die Aggregation und Disaggregation	3
2.1 Aggregation.....	3
2.2 Disaggregation	5
3 Definition, Bewertung und Strukturierung von Fertigungsprozessen	8
3.1 Grundlagen der Fertigungsprozesse	8
3.2 Key Performance Indicators zur Bewertung von Fertigungsprozessen	12
4 Einführung in das Data Farming	21
4.1 Grundlagen des Data Farming	21
4.2 Data Farming-Prozess: Loop of Loops	22
4.2.1 Rapid Scenario Prototyping.....	23
4.2.2 Modellentwicklung.....	23
4.2.3 Design of Experiments	24
4.2.4 High Performance Computing	27
4.2.5 Analyse und Visualisierung	27
5 Vorstellung der Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten	29
6 Entwicklung einer Simulation im Rahmen des Data Farming.....	37
6.1 Präzisierung der Fragestellung und Identifikation der Bedürfnisse.....	37
6.2 Ableiten und Spezifikation von Anforderungen an das Simulationsmodell	38
6.3 Implementierung von Simulationsmodell und DoE.....	43
7 Anwendung der Methode zur Aggregation- und Disaggregation von Daten.....	53
7.1 Vorstellung des Fallbeispiels einer Fertigungslinie	53
7.2 Anwendung des Aggregations- und Disaggregationsprozesses	55
7.3 Vorstellung der Ergebnisse.....	59
7.4 Bewertung und Einordnung der Ergebnisse	61
8 Diskussion und Fazit	64
9 Zusammenfassung und Ausblick	67
Literaturverzeichnis	68
Anhang.....	71
Anhang A: Verfügbarkeit.....	71
Anhang B: Effektivität	72
Anhang C: Qualitätsrate	73

Anhang D: Overall Equipment Effectiveness74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: (Einfaches) Schema eines Aggregations-/Disaggregationsprozesses in Entscheidungsmodellen (nach Leisten 1996)	4
Abbildung 2: Systemmodell einer Fertigung (in Anlehnung an Bauernhansl 2020).....	8
Abbildung 3: Funktionales Hierarchiemodell in Fertigungsunternehmen (in Anlehnung an DIN EN 62264-1:2014)	11
Abbildung 4: Kategorisierung von KPIs (nach Ningxuan et al. 2015)	14
Abbildung 5: Zusammenhang der quantitativen Elemente von KPIs (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015)	16
Abbildung 6: Zusammenhang der zeitbezogenen Elemente von KPIs (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015)	18
Abbildung 7: Data-Farming-Prozess: Loop of Loops (nach Horne und Seichter 2014)	22
Abbildung 8: Graphische Darstellung von zweidimensionalen Hypercubes für die Faktoren X und Y.....	26
Abbildung 9: Vollständiger Prozess zur Aggregation und Disaggregation von Daten.....	30
Abbildung 10: Linearer Data-Farming-Prozess: Loop of Loops.....	32
Abbildung 11: Einordnung des linearen Data-Farming-Prozesses Loop of Loops in den gesamten Aggregations- und Disaggregationsprozess.....	35
Abbildung 12: Benutzeroberfläche der Simulationsteuerung zum Generieren von Daten einer Fertigungslinie.....	44
Abbildung 13: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Schaltfläche zum Starten der Simulation	45
Abbildung 14: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise des Latin-Hypercube-Sampling	46
Abbildung 15: Beispielhaftes Latin-Hypercube-Sampling-Muster für Fertigungszeiten.....	47
Abbildung 16: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Durchführung der Simulation einer Fertigungslinie	49
Abbildung 17: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Berechnung und des Vergleichs der KPIs	51
Abbildung 18: Reihenfertigung (Fallbeispiel)	53
Abbildung 19: Umsetzung der Teilprozesse des Aggregations- und Disaggregationsprozesses	55
Abbildung 20: Doppelt logarithmische graphische Darstellung der Simulationsergebnisse...60	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: KPI-Beschreibung - Begriffserläuterung zum Inhalt und zum Kontext von KPIs (nach ISO 22400-1:2014).....	13
Tabelle 2: Definition von quantitativen Elementen einer Fertigung (nach Ningxuan et al. 2015).....	15
Tabelle 3: Definition von zeitbezogenen Elementen einer Fertigung (nach Ningxuan et al. 2015).....	17
Tabelle 4: Formeln zur Bestimmung der zeitbezogenen Elemente vom Standpunkt der Maschine aus (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015).....	18
Tabelle 5: Definition grundlegender und komplexer KPIs (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015).....	19
Tabelle 6: Designmatrix für das Latin Hypercube Design eines Experiments (in Anlehnung an Law 2017).....	25
Tabelle 7: Zusammenfassung der Anforderungen an das Simulationsmodell.....	43
Tabelle 8: Zusammenfassung der Werte der allgemeinen Simulationsfaktoren.....	57
Tabelle 9: Zusammenfassung der Wertebereiche der Simulationsfaktoren.....	57
Tabelle 10: Tabellarische Darstellung der Simulationsergebnisse.....	59
Tabelle 11: Gegenüberstellung der KPIs der Rohdaten und der generierten Daten der Fertigungslinie.....	61

Abkürzungsverzeichnis

AIZ	Ausfallzeit (Istzeit)
ASZ	Ausfallzeit (Sollzeit)
AVIZ	Analyse und Visualisierung
BEIZ	Bearbeitungszeit (Istzeit)
BIZ	Belegungszeit (Istzeit)
BSZ	Belegungszeit (Sollzeit)
BZ	Betriebszeit
d	Anzahl der Faktoren
D	Distanz
DIN	Deutsches Institut für Normung
DM	Designmatrix
DoE	Design of Experiments
DP	Design Points
E	Effektivität
EN	Europäische Norm
FIZ	Fertigungszeit (Istzeit)
FSZ	Fertigungszeit pro Einheit (Sollzeit)
GQ	Fehlerfreie Produkte
HPC	High Performance Computing
ID	Identifikation
ISO	International Organization for Standardization
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KPI	Key Performance Indicator
LHS	Latin Hypercube Sampling
LIZ	Leerlaufzeit (Istzeit)
m	Mittelpunkt
MOM	Manufacturing Operations Management
n	Anzahl der Design Points
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PAP	Programmablaufplan
PQ	Gesamte gefertigte Produkte
QR	Qualitätsrate
RIZ	Rüstzeit (Istzeit)
RSP	Rapid Scenario Prototyping
SQ	Fehlerbehaftete Produkte
V	Verfügbarkeit

Formelverzeichnis

$\text{BEIZ (Bearbeitungszeit, Istzeit)} =$ $\text{FIZ (Fertigungszeit, Istzeit)} + \text{RIZ (Rüstzeit, Istzeit)}$	<p>Tatsächliche Zeit für die Produktion und das Rüsten einer Maschine für einen Produktionsauftrags (1)</p>
$\text{BIZ (Belegungszeit, Istzeit)} =$ $\text{BEIZ (Bearbeitungszeit, Istzeit)} + \text{AIZ (Ausfallzeit, Istzeit)}$	<p>Tatsächliche Zeit, die eine Maschine für die Ausführung eines Produktionsauftrags genutzt wird (2)</p>
$\text{BSZ (Belegungszeit, Sollzeit)} =$ $\text{BIZ (Belegungszeit, Istzeit)} + \text{LIZ (Leerlaufzeit, Istzeit)}$	<p>Geplante Zeit, in der eine Maschine während eines Auftrages mit der Produktion beschäftigt ist (3)</p>
$\text{BZ (Betriebszeit)} =$ $\text{BSZ (Belegungszeit, Sollzeit)} + \text{ASZ (Ausfallzeit, Sollzeit)}$	<p>Geplante Nutzungszeit einer Maschine pro Auftrag (4)</p>
$\text{PQ (Gesamte gefertigte Produkte)} =$ $\text{GQ (Fehlerfreie Produkte)} + \text{SQ (Fehlerbehaftete Produkte)}$	<p>Produzierte Gesamtmenge einer Maschine pro Auftrag (5)</p>
$V (\text{Verfügbarkeit}) = \frac{\text{FIZ (Fertigungszeit, Istzeit)}}{\text{BSZ (Belegungszeit, Sollzeit)}}$	<p>Prozentualer Anteil der tatsächlichen an der geplanten Zeit, in der eine Maschine wertschöpfend produziert (6)</p>
$E (\text{Effektivität}) =$ $\frac{\text{FSZ (Fertigungszeit, Sollzeit)} \cdot \text{PQ (Gesamte gefertigte Produkte)}}{\text{FIZ (Fertigungszeit, Istzeit)}}$	<p>Maß dafür, wie effektiv eine Maschine während der Produktionszeit ist (7)</p>
$\text{QR (Qualitätsrate)} = \frac{\text{GQ (Fehlerfreie Produkte)}}{\text{PQ (Gesamte gefertigte Produkte)}}$	<p>Gesamtprozentsatz der Teile mit guter Qualität nach Nacharbeit (8)</p>
$\text{OEE (Overall Equipment Effectiveness)} =$ $V (\text{Verfügbarkeit}) \cdot E (\text{Effektivität}) \cdot \text{QR (Qualitätsrate)}$	<p>Bewertungsmaß für die Produktivität einer gesamten Produktion dar, welches sich aus drei grundlegenden KPIs zusammensetzt (9)</p>
$m_k (\text{Mittelpunkt}) = \frac{2k - 1}{2n}, k = 1, 2, \dots, n$	<p>Bestimmung des normierten Mittelpunkts für n gleichmäßig verteilte Intervalle relativ zur Intervallposition k (10)</p>
$D(P1, P2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$	<p>Bestimmung des quadratischen Abstands der zweidimensionalen Punkte P1 und P2 (11)</p>

1 Einleitung

Der schnelle Wandel und das starke Wachstum in der modernen Fertigungsindustrie stellen hohe Anforderungen an die Produktivität, Flexibilität, Qualität und Nachhaltigkeit in Fertigungsunternehmen. Zur Quantifizierung der Anforderungen an die Effektivität und Effizienz der Fertigungsprozesse ist die Verwendung einer Vielzahl von Indikatoren erforderlich (Fukada und Patzke 2010). Ein solcher Indikator der Leistung stellt der Key Performance Indicator (KPI) dar. Unter einem KPI wird eine quantifizierbare und strategische Messgröße verstanden, welche dazu dient, die Leistung eines Prozesses innerhalb einer Fertigungslinie zu überwachen und zu bewerten (ISO 22400-1:2014). Dadurch werden Fehler und mögliche Ursachen für die Fehler identifiziert, um eine Verbesserung der Wertschöpfung des Prozesses und somit der gesamten Wertschöpfungskette zu erzielen (ISO 22400-1:2014; Stricker et al. 2016). Darüber hinaus werden KPIs zur Planung und Entscheidungsfindung in Unternehmen verwendet und nehmen somit wesentlichen Einfluss auf den Erfolg eines Unternehmens (ISO 22400-2:2014; Ningxuan et al. 2015). Aufgrund der Tatsache, dass für die Planung und Entscheidungsfindung auf verschiedenen hierarchischen Ebenen ein unterschiedlich hoher Detaillierungsgrad der Daten erforderlich ist, ist eine Aggregation bzw. Disaggregation der Daten durch geeignete Methoden erforderlich. Dazu müssen entweder die in Form von KPIs bereits aggregierten Daten disaggregiert bzw. die auf der Mikroebene vorliegenden disaggregierten Daten auf der Makroebene durch Aggregation zu KPIs besser zugänglich gemacht werden (Leisten 1996; Braz et al. 2011).

Die Aggregation von Daten wird verwendet, um Fragestellungen, die aufgrund ihrer hohen Komplexität auf Mikroebene nicht behandelt werden können, auf einer Makroebene zugänglicher zu machen (Leisten 1996). Die Disaggregation hingegen dient gemäß Leisten (1996) als Instrument der Komplexitätsreduktion in der Planung einer Fertigung, um zum einen ein großes Gesamtproblem in sukzessiv zu lösende Teilprobleme aufzuteilen. Zur Konstruktion von KPIs werden eine Vielzahl an erforderlichen Daten akkumuliert (Fukada und Patzke 2010). Die Berechnung der KPIs erfolgt durch Aggregation der akkumulierten Daten zu Indikatoren der Leistung (Fukada und Patzke 2010). Diese zusammengefassten Daten geben einen Überblick über die Leistung der gesamten Fertigung, lassen jedoch keine Analyse der einzelnen Elemente der Fertigung zu. Somit ist die Disaggregation von Daten erforderlich, um aggregierten Daten, wie bereits vorliegende KPIs einer Fertigung, in einem höheren Detaillierungsgrad analysieren zu können (Leisten 1996). Data Farming stellt einen Teilprozess des Knowledge Discovery in Databases (KDD) dar, da zur Generierung von Wissen aus Daten eine signifikante Menge an Daten erforderlich ist (Hunker et al. 2021).

Durch Data Farming werden mithilfe eines Simulationsmodells Experimente durchgeführt, um Daten zu generieren und auf diese Weise nahezu alle potenziellen Zustände des Simulationsmodells zu erfassen und zu testen (Brandstein und Horne 1998). Die Generierung von Daten im gewünschten Detaillierungsgrad mittels Data Farming stellt eine komplexe Herausforderung dar. Einerseits müssen geeignete Modelle verwendet werden, um die Anforderungen des spezifischen Anwendungsfalls zu erfüllen (Horne und Meyer 2004). Andererseits erfordert der Prozess eine präzise Steuerung und Feinabstimmung der Parameter des Modells, um sicherzustellen, dass die erzeugten Daten sowohl relevant für das abgebildete System als auch ausreichend detailliert sind (Law 2017).

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, im Rahmen eines Data-Farming-Prozesses eine geeignete Methode zu identifizieren, um die Daten einer Fertigung in ihrer Rohform zu generieren. Die Generierung von Daten, die möglichst identisch zu ihrer ursprünglichen Rohform sind, ermöglicht die Disaggregation bereits vorliegender aggregierter Daten in Form von KPIs. Im nächsten Schritt erfolgt eine Erläuterung der einzelnen Teilziele, welche in einer sukzessiven Abarbeitung zum Erreichen des Hauptziels führen. Die im Folgenden erläuterten Teilziele werden unter Zuhilfenahme der Vorgehensweise eines spezifischen Data Farming-Prozesses erreicht. Die Verwendung eines bereits vorliegenden Prozesses bietet den Vorteil, dass bereits ein

etabliertes und strukturiertes Vorgehen vorliegt, wodurch die Korrektheit der Vorgehensweise gewährleistet ist. Im ersten Teilziel wird ein Modell des abzubildenden Prozesses implementiert, welches die konzipierte Methode in geeigneter Form umsetzt. Dadurch wird sichergestellt, dass die durch das Data Farming generierten Daten hinreichend genau den in der Realität bereits existierenden Daten entsprechen. Anschließend erfolgt die Planung und Durchführung eines Experimentes anhand dieses Modells, um verschiedene Szenarien und Variationen des Modells zu testen und zu analysieren. Im zweiten Teilziel erfolgt die Analyse und Bewertung der Ergebnisse des Experimentes mithilfe eines geeigneten statistischen Werkzeuges. Dadurch wird überprüft, mit welcher Genauigkeit das Data-Farming-Modell in der Lage ist, die Daten der einzelnen Elemente der abzubildenden Fertigung zu generieren. Dies dient der Evaluierung der Korrektheit des Modells. Abschließend wird sich der Diskussion und dem Fazit hinsichtlich der Ergebnisse des Data-Farming-Prozesses gewidmet sowie eine Evaluierung der Erreichung des Hauptziels. Durch diese Schritte wird eine Einordnung in die gewonnenen Erkenntnisse gewonnen.

Zur Umsetzung dieser Arbeit wird nach der modifizierten Vorgehensweise eines Data-Farming-Prozesses vorgegangen. Der iterative Prozess verfeinert eine operative Frage, also die Frage nach der Erreichung des formulierten Hauptziels, von ihrer anfänglichen Rohfassung wissenschaftlich und systematisch zu einer entsprechenden Antwort (Horne und Seichter 2014). Zum Erreichen des ersten Teilziels wird ein Data Farming-Modell zur Charakterisierung der einzelnen Elemente der Fertigungslinie implementiert. Es wird angenommen, dass die Daten einer Fertigungslinie sowohl in ihrer Rohform als auch aggregiert in der Form von KPIs vorliegen. Die Generierung der Rohdaten erfolgt mittels eines einzelnen Simulationsdurchlaufs des Data-Farming-Modells unter möglichst realitätsnaher Parametrisierung. Dies erlaubt eine Evaluierung der Korrektheit der zu einem späteren Zeitpunkt generierten Daten und der daraus resultierenden KPIs im Vergleich zu den Daten und Werten, die der Realität sehr nahekommen. Die Modellierung verfolgt das Ziel, sicherzustellen, dass die durch die Struktur des Modells die generierten Daten den bekannten Rohdaten der Fertigungslinie entsprechen. Außerdem wird ein Konzept für die Durchführung eines Experimentes ermittelt, um verschiedene Szenarien und Variationen des Modells zu testen und zu analysieren. Im Rahmen der Durchführung des Experiments werden für jedes Element des Modells anhand der vorliegenden Methode neue Daten generiert. Das zweite Teilziel wird erreicht, in dem die generierten Daten durch geeignete statistische Methoden analysiert und visualisiert werden. Im Rahmen dieses Teilziels erfolgt anschließend eine Bewertung der analysierten Ergebnisse durch einen Vergleich der generierten Daten mit den Rohdaten der Fertigungslinie. Abschließend erfolgt die Evaluierung der Ergebnisse in Form einer Diskussion und eines Fazits. In der Diskussion werden die Ergebnisse interpretiert und mögliche Verbindungen zu vergleichbaren Arbeiten hergestellt. Das Fazit dient der Herausarbeitung der wichtigsten Ergebnisse und Kernaussagen.

2 Einführung in die Aggregation und Disaggregation

In diesem Kapitel erfolgt eine Auseinandersetzung mit den Begriffen der Aggregation und Disaggregation. Im Folgenden werden zunächst die Begriffe definiert. Anschließend erfolgt eine Einordnung der Methoden der Aggregation und Disaggregation in verschiedene Anwendungsbereiche.

2.1 Aggregation

Der Begriff der Aggregation wird in verschiedenen Bereichen wie beispielsweise der Statistik, dem Internet of Things (IoT), der Modellierung (z. B. in Entscheidungsmodellen in der Wirtschaft oder der Fertigung) sowie im Kontext von Leistungsbewertung von Prozessen verwendet. In den jeweiligen Anwendungsbereichen unterscheiden sich die Definitionen. Aus diesen unterschiedlichen Definitionen lässt sich jedoch eine gleiche Aussage ableiten und auf die Aussagen zur Aggregation von Leisten (1996) beziehen. Der Aggregationsprozess wird von ihm als eine Strategie definiert, durch die eine Reduktion der Komplexität erreicht wird. Bei dieser Komplexitätsreduktion nimmt der Detaillierungsgrad ab. Dies erfolgt durch die Zusammenfassung einer Anzahl von Elementen, wobei diese zu einem oder mehreren konstruierten Elementen in einem spezifischen Zusammenhang zusammengefasst werden (Leisten 1996). Der Umfang der Zusammenfassung hängt vom gewünschten Detaillierungsgrad im Kontext der Aggregation ab (Rogers et al. 1991). Kemper und Finger (2015) zufolge ist ein exemplarischer Fall für ein derart konstruiertes Element die Erzeugung einer Summenstruktur durch Aggregation einer Vielzahl einzelner Elemente. Der Begriff der Summenstruktur bezeichnet die Zusammenfassung verschiedener Elemente mit ähnlicher Struktur auf einer Ebenen (Kemper und Finger 2015). Gemäß den Aussagen von Kemper und Finger (2015) werden unter Elementen der Aggregation in den meisten Fällen die Elemente eines Systems verstanden, die im Kontext der Modellierung betrachtet werden, oder die vorliegenden Daten der Elemente eines Systems. Dieses konstruierte Element als Ergebnis der Aggregation wird als Aggregat bezeichnet (Kemper und Finger 2015).

Der erste große Anwendungsbereich zum Thema Aggregation stellt die Statistik dar. In einem Bericht von Loibl und Orthofer (1995) erfolgt eine Analyse aggregierter Daten in Form von erhobenen Emissionsdaten in Österreich. Weiterhin führen die Autoren aus, dass die erhobenen Daten in der Regel im Rahmen einer statistischen Untersuchung aggregiert werden. Daher sind die zugrundeliegenden Emissionsdaten lediglich in aggregierter Form verfügbar, beispielsweise in Summenstrukturen für die jeweiligen Bundesländer (Loibl und Orthofer 1995). Ein weiterer Anwendungsfall der Aggregation ist die Zusammenfassung der Bevölkerungsdaten von Gemeinden oder Kleinstädten im Umland einer Großstadt zu einem Aggregationsraum (Bopp und Herzog 1987). Sowohl bei der Aggregation von Emissionsdaten als auch bei Bevölkerungsdaten schafft die Aggregation einen besseren Überblick über die Daten und ermöglicht bei standardisierter Bildung der Aggregate eine Vergleichbarkeit.

Ein weiterer großer Anwendungsbereich, in dem Aggregation eine entscheidende Rolle spielt, stellt das IoT dar. Nach den Aussagen von Cicirelli et al. (2019) und Wang et al. (2019) kann das IoT grundlegend als ein Netzwerk definiert werden, welches eine Vielzahl von in der Regel mit Sensoren ausgestatteten Objekten, mithilfe eines übergeordneten Servers verbindet und somit eine Kommunikation zwischen den Objekten ermöglicht. Die Anwendung erfolgt in verschiedenen Bereichen, in denen eine Kommunikation zwischen den Objekten eines Systems erforderlich ist (Cicirelli et al. 2019). Dies umfasst laut Cicirelli et al. (2019) beispielsweise die Smart Factory, die Smart City sowie das Smart Home. Es beschreibt also ein Netzwerk von intelligenten Objekten, welche eine Vielzahl von Daten akkumulieren und miteinander austauschen (Cicirelli et al. 2019). Gemäß den Aussagen von Pourghebleh und Navimipour (2017) stellt die Aggregation eine effiziente Methode zur Verarbeitung einer großen Menge an Daten dar. Weiterhin führen die Autoren aus, dass die Zusammenfassung von Daten eine Reduktion

der Anzahl von Übertragungen zwischen den Objekten ermöglicht. Diese verbesserte Datenverarbeitung führt nach den Aussagen von Pourghebleh und Navimipour (2017) zu einer beschleunigten Kommunikation, einer Verringerung des Energieverbrauchs sowie einer Verlängerung der Netzwerklebensdauer.

Die Aggregation stellt ebenfalls einen Teilprozess innerhalb des Prozesses der Modellierung dar, der in verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen kann. Exemplarische Anwendungsgebiete sind die hierarchische Fertigungsplanung sowie die Analyse von Konsumverhalten. In Abbildung 1 findet sich ein Schema nach Leisten (1996), welches den Prozess der Aggregation und Disaggregation veranschaulicht.

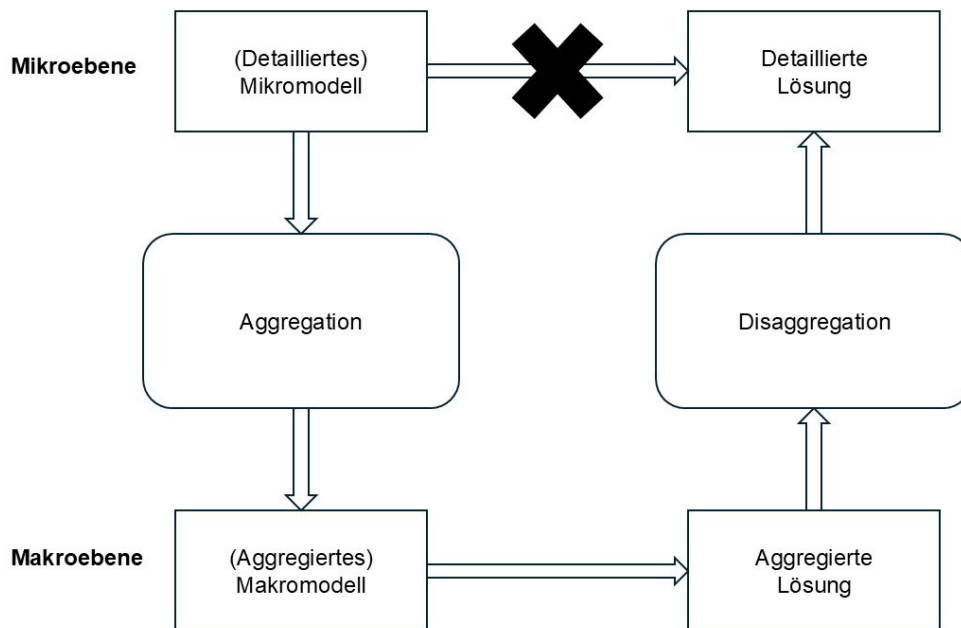


Abbildung 1: (Einfaches) Schema eines Aggregations-/Disaggregationsprozesses in Entscheidungsmodellen (nach Leisten 1996)

Leisten (1996) zufolge wird die Aggregation in Entscheidungsmodellen in der hierarchischen Fertigungsplanung gemäß dem Schema in Abbildung 1 verwendet. Die Elemente oder Eigenschaften des Modells werden auf eine oder mehrere Ausprägungen dieser Eigenschaft oder Elemente abgebildet. Weiterhin beschreibt Leisten (1996) die Abbildung eines detaillierten Mikro-Modells auf ein aggregiertes Makro-Modell unter Bezugnahme auf die Aussagen zur Aggregation von Prozessen von Ijiri (1971). Diese Methode ist in Abbildung 1 dargestellt und ist genau dann notwendig, wenn sich die Lösung des detaillierten Mikro-Modells als zu komplex erweist. Das aggregierte Makro-Modell wird gelöst und durch eine geeignete Methode der Disaggregation, also der Umkehrung der Aggregation, wird versucht einen Rückschluss auf die Lösung des Mikro-Modells schließen zu können (Leisten 1996). Das Ergebnis dieser Methode dient nach den Aussagen von Leisten (1996) zur Unterstützung in der Entscheidungsfindung in der hierarchischen Fertigungsplanung. In ähnlicher Weise wird in der Literatur eine Vorgehensweise im Prozess der Modellierung von van Daal und Merkies (1984) erläutert. Im Rahmen dessen beschreiben sie die Modellierung und Analyse von Entscheidungsfindungen in wirtschaftlichen Kontexten hinsichtlich des Konsumverhaltens einzelner Individuen.

Im Folgenden wird der letzte große Anwendungsbereich der Aggregation, die Leistungsbewertung von Prozessen, erläutert. Die Leistungsbewertung umfasst die Aggregation von Prozessdaten, wie beispielsweise die erfassten Daten eines Prozesses einer Fertigungsmaschine. Meist findet die Erfassung der Daten für eine Vielzahl von zusammenhängenden Prozessen

in einem System statt, sodass die Leistungsfähigkeit des Zusammenwirkens aller Systemelemente analysiert und bewertet werden kann. Kemper und Finger (2015) zufolge ist das Ziel der Aggregation von Daten, Summenstrukturen zu erzeugen, mit deren Hilfe die Leistung in einem betrachteten Kontext analysiert, bewertet und optimiert wird. Diese konstruierten Summenstrukturen werden sowohl einzeln als auch im Verhältnis zu anderen Summenstrukturen betrachtet (Kemper und Finger 2015). Aus diesem Grund ist zur Bestimmung von bestimmten Kennzahlen im Vorhinein die Bestimmung von Summenstrukturen durch Aggregation notwendig. Die Autoren führen weiter aus, dass sich Kennzahlen durch das ins Verhältnis setzen von Summenstrukturen unterschiedlicher Prozesse bestimmen lassen. Dies ermöglicht eine verbesserte Übersicht, einen umfassenderen Vergleich sowie ein vertieftes Verständnis des Zusammenwirkens der Prozesse (Kemper und Finger 2015).

Es darf jedoch nicht vernachlässigt werden, dass die Aggregation zu einer Verzerrung der Daten führen kann, da wichtige Details verloren gehen oder Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen übersehen werden. Darüber hinaus kann die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Aggregaten durch eine unsachgemäße oder nicht standardisierte Aggregation beeinträchtigt werden. Unterschiedliche Aggregationsmethoden führen zu Verzerrungen, die den Vergleich erschweren. Obwohl die Aggregation die Analyse vereinfacht, geschieht dies oft auf Kosten der Genauigkeit und des Detaillierungsgrads. Im Folgenden wird der Begriff der Disaggregation erörtert, welcher als eine Umkehrung der Aggregation verstanden wird.

2.2 Disaggregation

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, nimmt der Detaillierungsgrad der einzelnen Elemente der Aggregation ab. Es handelt sich somit um eine Form der Zusammenfassung. Der Umfang der Aggregation bzw. Zusammenfassung hängt von dem im betrachteten Kontext gewünschten Detaillierungsgrad ab. Es treten jedoch Situationen auf, in denen bestimmte Elemente nur in aggregiertem, zusammengefasstem Zustand vorliegen oder die Aggregation rückgängig gemacht werden soll. In beiden Fällen ist somit ein höherer Detaillierungsgrad erwünscht. Die durch die Aggregation zusammengefassten Elemente werden daher häufig wieder in ihre einzelnen Elemente zerlegt. Die Aggregation wird somit rückgängig gemacht und es wird von Disaggregation gesprochen. Es besteht daher oft ein starker Zusammenhang zwischen der Aggregation und Disaggregation je nach Anwendungsbereich.

Aus dem Grund, dass auf eine Aggregation häufig eine Disaggregation folgt, findet die Disaggregation in den gleichen Anwendungsbereichen wie die Aggregation statt. In diesem Abschnitt erfolgt daher eine erneute Betrachtung der in Abschnitt 2.1 dargestellten exemplarischen Bereiche, nämlich der Statistik, des IoT, der Modellierung von Entscheidungsmodellen sowie der Leistungsbewertung von Prozessen. Aufgrund der verschiedenen Anwendungsbereiche unterscheiden sich die genauen Definitionen von Disaggregation. Im Kern wird die Disaggregation häufig als Umkehrung der Aggregation beschrieben. Leisten (1996) zufolge stellt Disaggregation eine Umkehrfunktion des betrachteten Prozesses dar, in der die aggregierte Lösung dekomponiert, also in ihre ursprünglichen Elemente aufgeteilt wird. Nach den Aussagen von (Rogers et al. 1991) entspricht die Disaggregation ebenfalls der Umkehrung der Aggregation, da die bei der Aggregation zusammengefassten Elemente eines Modells, wieder in ihre ursprüngliche Form überführt werden.

Die Betrachtung des zu Beginn des Abschnitts 2.1 erwähnten Beispiels über die Aggregation von Emissionsdaten in Österreich erlaubt eine Veranschaulichung der Funktionsweise der Disaggregation in der Statistik. Gemäß den Aussagen von Loibl und Orthofer (1995) liegen die erhobenen Emissionsdaten lediglich für die jeweiligen Bundesländer vor und lassen keine Rückschlüsse auf die Gemeinden, Bezirke und Siedlungen innerhalb der Bundesländer zu. Daher wird eine flächenbezogene Disaggregation der Emissionsdaten durchgeführt, in dem der Detaillierungsgrad sukzessive von der Ebene der Bundesländer über die Ebene der Gemeinden und Bezirke bis hin zur Ebene der Siedlungen erhöht wird (Loibl und Orthofer 1995). Das Prinzip der Disaggregation lässt sich auf identische Weise auf das ebenfalls zu Beginn des Abschnitts 2.1 erläuterte Beispiel der erhobenen Bevölkerungsdaten in

der Schweiz anwenden. In diesem Beispiel werden Bevölkerungsdaten für eine Vielzahl von Gemeinden im Raum Zürich zusammengefasst, obwohl das Verhältnis der größten zur kleinsten Stadt sehr groß ist (Bopp und Herzog 1987). In beiden Beispielen ist es mithilfe von geeigneten Disaggregationsprozessen möglich, diese aggregierten Daten mit einer gewissen Gewichtung in ihre einzelnen Elemente zu zerlegen, um den gewünschten Detaillierungsgrad zu erhalten.

Auch im Anwendungsbereich des IoT lässt sich eine Form der Disaggregation identifizieren. Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, ermöglicht das IoT die Kommunikation einer großen Menge von Objekten innerhalb eines Systems, indem sie es mithilfe eines Servers im gleichen Netzwerk verbindet. Gemäß Wang et al. (2019) werden die akkumulierten Daten zur besseren Verarbeitung aggregiert und an den Server weitergeleitet. Kurz bevor sie auf dem Server eintreffen, werden sie disaggregiert, also in ihre ursprünglichen Elemente zerlegt, um eine verbesserte Verarbeitung im Server zu gewährleisten (Wang et al. 2019).

Ein weiterer Anwendungsbereich bezieht sich auf die Aussagen von Leisten (1996) zur Aggregation und Disaggregation in Entscheidungsmodellen in der hierarchischen Fertigungsplanung. Wie bereits in Abschnitt 2.1 angemerkt, wird die in Abbildung 1 dargestellte Methode zur Entscheidungsfindung angewendet, sofern sich die Lösung des detaillierten Mikro-Modells als zu komplex erweist. Dabei wird das detaillierte Mikro-Modell durch Aggregation zu einem Makro-Modell zusammengefasst, wodurch die Lösung des vereinfachten Makro-Modells ermöglicht wird (Leisten 1996). Im nächsten Schritt wird gemäß den Aussagen von (Leisten 1996) versucht, aus der aggregierten Lösung des Makro-Modells durch eine geeignete Methode der Disaggregation auf die detaillierte Lösung des Mikro-Modells zu schließen. Der Autor führt weiter aus, dass die Kenntnis der einzelnen Elemente, aus denen das aggregierte Modell zusammengesetzt ist, in gewisser Weise eine Wiederholung der Aggregationsschritte in umgekehrter Reihenfolge erlaubt. Die Lösung des aggregierten Modells wird in der Vorgehensweise von Leisten (1996) dekomponiert, d.h. in ihre ursprünglichen Elemente aufgeteilt, um sie in eine Form zu transformieren, die in Bezug auf das ursprüngliche Problem interpretierbar ist. Eine Zerlegung in sogenannte Disaggregate erfolgt mittels einer (gewichtungs-) proportionalen Aufteilung (Leisten 1996). Aus der dargelegten Vorgehensweise lässt sich ableiten, dass sie eine Möglichkeit zur Lösung komplexer Mikro-Modelle durch Komplexitätsreduktion mittels Aggregation und nachfolgender Umkehrung der Aggregation durch Disaggregation bietet.

Der letzte exemplarische Bereich, in dem Disaggregation erfolgt, ist im Kontext der Leistungsbewertung von Prozessen durch Kennzahlen wie KPIs (siehe Abschnitt 2.1). In den verschiedenen hierarchischen Ebenen eines Unternehmens sind Daten, oft auch in Form von Kennzahlen, in unterschiedlichem Detaillierungsgrad erforderlich (Braz et al. 2011). Ningxuan et al. (2015) zufolge werden innerhalb der Unternehmensführung ausschließlich Kennzahlen mit dem geringsten Detaillierungsgrad benötigt, um auf einen Blick eine Übersicht über alle Prozesse im Unternehmen zu erlangen und schneller Entscheidungen zu treffen. In den darunterliegenden Ebenen werden Kennzahlen in einem höheren Detaillierungsgrad benötigt, um die zugrundeliegenden Prozesse genauer analysieren und bewerten zu können (Ningxuan et al. 2015). Die als KPIs in höheren hierarchischen Ebenen vorliegenden Kennzahlen lassen häufig keine Rückschlüsse auf den Ursprung des durch sie aufgezeigten Problems zu (Patole 2018). In Situationen, in denen Daten lediglich als aggregierte Kennzahlen vorliegen, ist es somit erforderlich, die Aggregation dieser Kennzahlen umzukehren, um die ursprünglichen Daten der Elemente des betrachteten Systems in einem höheren Detaillierungsgrad analysieren zu können.

Die Disaggregation stellt ein geeignetes Werkzeug zur Erhöhung des Detaillierungsgrads aggregierter Daten oder Modelle dar, wobei diese in ihre ursprünglichen Elemente zerlegt werden. Dadurch werden präzisere Analysen und eine bessere Entscheidungsfindung ermöglicht. Allerdings ist der Disaggregationsprozess häufig sehr komplex und ressourcenintensiv, wenn neben den aggregierten Daten oder Modellen lediglich wenig Informationen über das betrachtete System vorliegen. Die Rekonstruktion der ursprünglichen Elemente kann zu Qualitätsver-

lusten führen, wodurch nachfolgende Analysen und Bewertungen verfälscht werden. Die Aggregation und Disaggregation von Daten spielt im Kontext von Fertigungsunternehmen eine entscheidende Rolle. Daher werden im nächsten Kapitel zunächst Fertigungsprozesse definiert, strukturiert und anschließend bewertet.

3 Definition, Bewertung und Strukturierung von Fertigungsprozessen

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Erläuterung des Fertigungsprozesses anhand einer allgemeinen Definition. Im Anschluss folgt eine Einordnung des Prozesses in den Kontext des Ablaufs einer gesamten Fertigung, unter Zuhilfenahme eines Systemmodells. Der Fokus liegt hierbei auf der grundlegenden Struktur eines Fertigungsprozesses, des Systemmodells der Fertigung sowie dem Zusammenwirken einzelner Teilsysteme innerhalb des Systemmodells. Aufgrund der zentralen Bedeutung des Teilsystems des Informationsaustausches erfolgt eine verstärkte Fokussierung auf dieses System. Anschließend erfolgt eine Einordnung und Strukturierung einzelner Fertigungsprozesse in verschiedene Fertigungsarten und -formen. Im letzten Schritt wird die Bewertung von Fertigungsprozessen erläutert. Dazu erfolgt zunächst eine Einordnung sowie die allgemeine Definition, Struktur und Anwendung von KPIs als Kennzahlen zur Bewertung einer gesamten Fertigung. Abschließend wird die Definition, Struktur und Anwendung quantitativer und zeitbezogener KPIs thematisiert.

3.1 Grundlagen der Fertigungsprozesse

Unter einem Fertigungsprozess innerhalb einer Fertigung wird ein wertschöpfender Prozess verstanden, bei dem als Input Materialien, Halbzeuge und Bauteile in Output in Form von Produkten und Fertigteilen transformiert werden (Westkämper 2006). Die Planung und Steuerung von Prozessen erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl von Faktoren, die in Wechselwirkung miteinander stehen. Dazu zählen Ressourcen wie Raum, Energie und Informationen sowie Betriebsmittel wie Werkzeuge, Hilfsstoffe und Vorrichtungen sowie Möglichkeiten zur Lagerung und zum Transport, die unmittelbar am Fertigungsprozess beteiligt sind (Westkämper 2006). In Abbildung 2 wird in Anlehnung an Bauernhansl (2020) das Systemmodell einer Fertigung dargestellt.

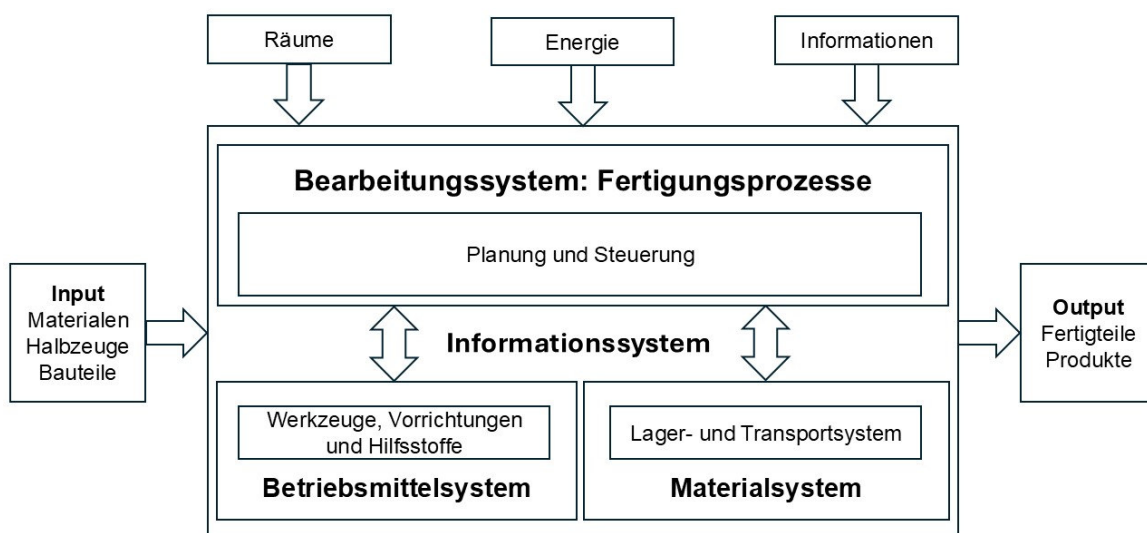


Abbildung 2: Systemmodell einer Fertigung (in Anlehnung an Bauernhansl 2020)

In Anlehnung an die Darstellung von Bauernhansl (2020), welche eine Erweiterung des von Westkämper (2006) beschriebenen und visualisierten Prozesses darstellt, wird in Abbildung 2 das Zusammenwirken aller genannten Elemente anhand eines Systemmodells einer Fertigung vereinfacht dargestellt. Das Gesamtsystem der Fertigung setzt sich aus verschiedenen Teilsystemen zusammen. Zu den Teilsystemen zählen das Bearbeitungssystem, Materialsystem,

Lager- und Transportsystem, Betriebsmittelsystem und das Informationssystem. Diese sind ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt und werden im Folgenden den zu Beginn des Abschnittes aufgezählten Elementen des Systemmodells zugeordnet und die Funktion dieser Teilsysteme in Anlehnung an die Aussagen von Bauernhansl (2020) erläutert.

Im Kern des Systemmodells von Bauernhansl (2020) steht das Bearbeitungssystem, welches aus Arbeitsplätzen und Maschinen zur Durchführung des Fertigungsauftrages besteht. Der Aufgabenbereich umfasst Tätigkeiten wie vor- und nachbereitende Tätigkeiten, beispielsweise das Rüsten der Maschinen im Vorfeld oder Nachgang des Prozesses, die Durchführung der Bearbeitung des Materials, Halbzeugs oder Bauteils sowie die Reparatur der Maschine im Störfall (Bauernhansl 2020). Des Weiteren führt der Autor aus, dass das Materialsystem, welches die Lager- und Transportsysteme umfasst, die Aufgabe hat, das Bearbeitungssystem mit Material zu versorgen und zu entsorgen. Darüber hinaus hat das Teilsystem die Aufgabe, Produkte im halbfertigen Zustand aus dem laufenden Prozess abzuführen, sie dem nachfolgenden Prozess zuzuführen und, sobald der Zustand des Endprodukts erreicht ist, sie zu dem Ort zu transportieren, an dem die fertigen Produkte gelagert werden (Bauernhansl 2020). Das Betriebsmittelsystem hat laut Bauernhansl (2020) die unterstützende Aufgabe, das Bearbeitungssystem mit den erforderlichen Werkzeugen, Vorrichtungen und Hilfsstoffen, wie Kühlschmierstoff, Druckluft oder Ähnlichem zu versorgen. Das letzte Teilsystem stellt das Informationssystem dar, welches die Weitergabe von Informationen und die Kommunikation zwischen den einzelnen Teilsystemen gewährleistet (Bauernhansl 2020). Die Unterteilung in Teilsysteme erfolgt gemäß den Aussagen des Autors mit dem Ziel der systematischen Gestaltung, der Fehlersuche mit dem Ziel der Prozessverbesserung sowie der Vergleichbarkeit der Produktivität mit anderen Fertigungsprozessen. Das Zusammenwirken aller Teilsysteme bestimmt die Produktivität des Gesamtsystems und ist somit ein wesentlicher Faktor für den Erfolg eines Unternehmens. Zur Koordinierung aller Teilsysteme ist es entscheidend, den Überblick über alle Systeme zu behalten. Aus diesem Grund stellt das Informationssystem ein sehr wichtiges Element im gesamten System dar.

Das Informationssystem ist in Abbildung 2 in der Mitte aller Teilsysteme positioniert, da es in allen Teilsystemen von Relevanz ist und das Ziel verfolgt, das reibungslose Zusammenwirken aller Teilsysteme zu gewährleisten (Bauernhansl 2020). Es dient Bauernhansl (2020) zufolge zum einen zur technischen und logistischen Steuerung der Prozesse einer Fertigung und zum anderen stellt es übergeordneten Koordinationsebenen Zustandsdaten und Informationen über alle beteiligten Elemente des gesamten Fertigungsprozesses zur Verfügung. Die innerhalb des Informationssystems erfassten Informationen und Zustandsdaten geben Aufschluss über den Bearbeitungsstand der Aufträge sowie den Zustand der Maschinen, Vorrichtungen und der entstehenden Produkte (Bauernhansl 2020). Das System liefert nach den Aussagen von Bauernhansl (2020) somit Rückmeldung und verschafft einen Überblick über den gesamten Prozess, wodurch die Bewertung der Teilprozesse erleichtert wird. Die technische und logistische Planung und Steuerung sowie die Bewertung der Fertigungsprozesse werden durch dieses System unterstützt, wodurch die Unternehmensleitung bei der Entscheidungsfindung unterstützt wird (Bauernhansl 2020). Ausgangspunkt der Kontrolle und Bewertung einer Fertigung stellt somit die Prozessdatenerfassung von Input- und Outputgrößen der Fertigungsprozesse dar (Spur 2008). Um dies zu ermöglichen, erfasst und verarbeitet das Informationssystem eine Vielzahl an Prozessdaten der einzelnen Elemente der Fertigung (Fukada und Patzke 2010). Im nächsten Schritt werden nach den Aussagen von Leisten (1996) die erfassten Prozessdaten mittels geeigneter Methoden automatisiert aggregiert. Auf diese Weise wird ein besserer Überblick über die Prozesse hinter den erfassten Daten erlangt, wodurch eine Analyse und Bewertung der Fertigungsprozesse ermöglicht wird (Leisten 1996). Weiterhin führt der Autor aus, dass beispielsweise die auf Mikroebene vorliegenden Prozessdaten zu Kennzahlen auf Makroebene, den sogenannten KPIs, aggregiert werden.

Nachfolgend werden die soeben erläuterten Fertigungsprozesse in eine strukturierte Form überführt. Es wird zunächst der Unterschied zwischen Fertigungsart und Fertigungsform erläutert. Dabei liegt der Fokus auf den jeweiligen strukturellen Unterschieden der einzelnen

Fertigungsformen, wobei insbesondere auf die Linien- bzw. Reihenfertigung sowie die Fließfertigung als mögliche Ausprägungen der Fertigungsform eingegangen wird. Nach den Aussagen von Westkämper (2006) lassen sich Fertigungssysteme anhand zweier grundlegender Beschreibungsformen unterscheiden. Einerseits erfolgt eine Differenzierung anhand der Fertigungsart, welche Westkämper (2006) zufolge durch die herzustellende Menge charakterisiert wird. Hierbei unterscheidet der Autor zwischen der Einzel- und der Mehrfachfertigung. Die Mehrfachfertigung lässt sich in Abhängigkeit der Stückzahl in Wiederhol-, Varianten-, Serien- und Massenfertigung unterteilen (Westkämper 2006). Eine weitere vom Autor erläuterte Differenzierungsmöglichkeit stellt die Fertigungsform dar. Diese lässt sich nach der räumlichen und organisatorischen Struktur unterscheiden (Westkämper 2006). Zudem spielt der Aspekt der Zeit in der Strukturierung eine entscheidende Rolle (Helbing 2010). Nach diesen strukturellen Unterschieden können die Fertigungsformen in typische Grundformen unterteilt werden.

Im Folgenden werden einige Grundformen der Fertigung ebenfalls gemäß den Aussagen von Westkämper (2006) erläutert. Anschließend wird in Anlehnung an die Aussagen von Helbing (2010) die Linien- bzw. Reihenfertigung und darauf aufbauend die Fließfertigung als Fertigungsform vorgestellt. Westkämper (2006) nennt als erste Fertigungsform die Baustellenfertigung, in dessen Mittelpunkt ein einzelnes Produkt steht. Weiterhin führt der Autor aus, das Produkt den Fertigungsprozess an einem festgelegten Ort durchläuft, wobei alle erforderlichen Ressourcen ebenfalls an diesen Ort transportiert werden. Unter Umständen erfolgt eine Vorverarbeitung der Ressourcen ebenfalls am selben Ort (Westkämper 2006). Die nächste Fertigungsform stellt Westkämper (2006) zufolge die Fertigung nach dem Werkstättenprinzip dar. Bei der vorliegenden Fertigungsform erfolgt eine örtliche Zusammenfassung von Maschinen mit ähnlicher Funktionsweise zu technologisch orientierten Bereichen (Westkämper 2006). Die Anordnung der Maschinen und Arbeitsplätze in den Werkstätten erfolgt dem laut dem Autor nicht in Abhängigkeit vom zeitlichen Ablauf der Fertigung, sondern orientiert sich an einer optimalen Nutzung der räumlichen Gegebenheiten. Die Fertigungszelle stellt nach den Aussagen von Westkämper (2006) eine besondere Form der Fertigung dar, bei der mehrere Maschinen zu einer Zelle zusammengefasst werden. Dies erfolgt mit dem Ziel einer optimierten Arbeitsteilung oder einer vollständigen Bearbeitung einzelner Werkstückgruppen innerhalb einer Zelle (Westkämper 2006).

In der Praxis werden die in Abschnitt 3.1 dargestellten einzelnen Prozesse häufig zu Prozessketten zusammengefasst. Die daraus resultierende Struktur werden als Linien bzw. Reihen sowie Fließfertigung bezeichnet. Für beide Fertigungsformen wird eine Fördertechnik benötigt (Helbing 2010). Linienfertigung bzw. linienförmige Fertigungen werden von Helbing (2010) als eine Anordnung von Wirk- und Arbeitssystemen nach der technologischen Arbeitsvorgangsfolge entsprechend der Fertigungstechnologien beschrieben, die im Rahmen der Produktentstehung benötigt werden. Aufgrund der Anordnung der Systeme in eine Reihe wird diese Fertigungsform laut Helbing (2010) ebenfalls als Reihenfertigung bezeichnet. Des Weiteren führt der Autor einen weiteren Aspekt als Begründung für die Bezeichnung an, wobei er das Durchlaufprinzip des Reihenverlaufs als zeitlichen Aspekt betont. Bei diesem Durchlaufprinzip werden alle Fertigungsschritte nacheinander und ohne zeitliche Taktung mehrerer paralleler Fertigungsschritte durchgeführt (Helbing 2010).

Gemäß den Aussagen von Helbing (2010) entsteht auf Basis der Linien- bzw. Reihenfertigung unter Einbeziehung spezieller zeitlicher Strukturelemente die als Fließfertigung bezeichnete Form der Fertigung. Die Fließfertigung wird definiert als eine örtlich fortschreitende, zeitlich bestimmte und lückenlose Folge von technologischen Vorgängen im Rahmen der Fertigung von Produkten (Helbing 2010). Wie bei der Linien- bzw. Reihenfertigung werden dem Autor zufolge Wirk- und Arbeitssysteme entsprechend der Arbeitsvorgangsfolge angeordnet, jedoch unterscheiden sich beide Fertigungsformen im zeitlichen Durchlaufprinzip. Im Gegensatz zur Linien- bzw. Reihenfertigung folgt die Fließfertigung dem Parallel- und nicht dem Reihenverlauf als Durchlaufprinzip (Helbing 2010). Bei Parallelverlauf können nach den Aussagen von

Helbing (2010) mehrere parallele Anordnungen von Wirk- und Arbeitssystemen vorliegen, welche in Zusammenhang für den nächsten Fertigungsschritt stehen. Der nachfolgende Fertigungsschritt ist nur durchführbar, wenn beide vorherigen Schritte abgeschlossen sind, wodurch eine zeitliche Taktung erforderlich ist (Helbing 2010). Somit stellt die zeitliche Taktung mehrerer paralleler Wirk- und Arbeitssysteme den wesentlichen strukturellen Unterschied zwischen Linien- bzw. Reihenfertigung und Fließfertigung dar.

Im nächsten Schritt erfolgt eine Einordnung des gerade erläuterten Systemmodells für Fertigungsprozesse in den Kontext eines produzierenden Unternehmens. Hierbei ist die Rolle und der Einfluss des Informationssystems innerhalb der unterschiedlichen hierarchischen Ebenen eines Unternehmens von essenzieller Bedeutung. Zu diesem Zweck wird das in Abbildung 3 dargestellte funktionale Hierarchiemodell verwendet. Die Integration und Effizienz von Informationssystemen zwischen den verschiedenen Ebenen innerhalb eines Fertigungsunternehmens sind entscheidend für die Optimierung von Fertigungsprozessen und die gesamte Unternehmensperformance.

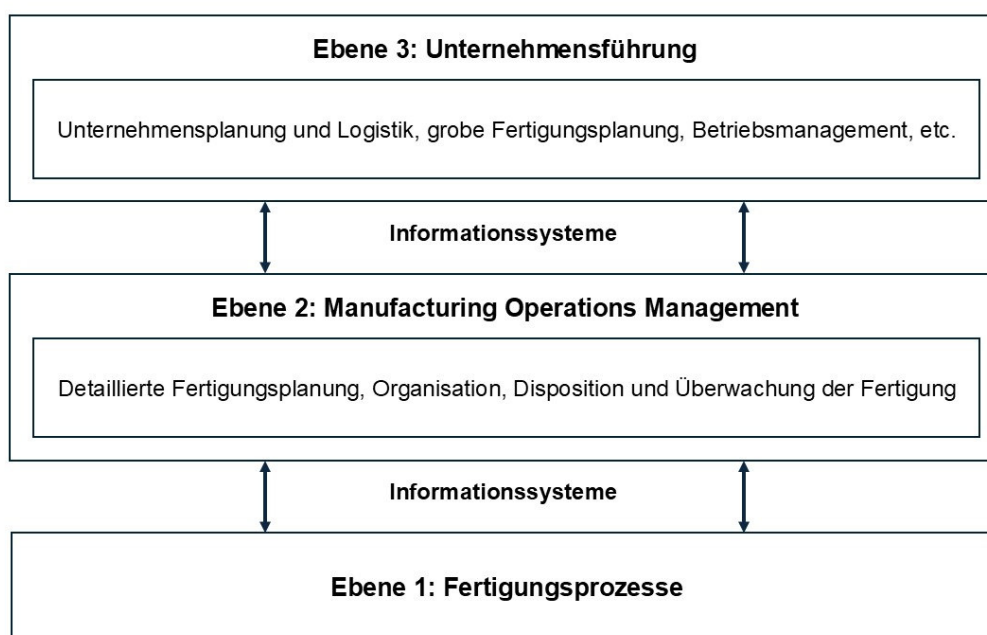


Abbildung 3: Funktionales Hierarchiemodell in Fertigungsunternehmen (in Anlehnung an DIN EN 62264-1:2014)

In Abbildung 3 ist die funktionale Hierarchie eines Unternehmens in Anlehnung an die Norm DIN EN 62264-1:2014 dargestellt. Zu Beginn dieses Abschnittes wird ein Systemmodell einer Fertigung erläutert, in dessen Zentrum das Bearbeitungssystem steht, welches mehrere Fertigungsprozesse beinhaltet. Dieses Systemmodell der Fertigungsprozesse findet sich auf der untersten Ebene, in dem in Abbildung 3 dargestellten funktionalen Hierarchiemodell eines Unternehmens, wieder. Das im Systemmodell beschriebene Gesamtsystem setzt sich aus verschiedenen Teilsystemen zusammen, welche das Zusammenwirken der einzelnen Elemente des Systemmodells beschreiben. Das dort erläuterte Informationssystem stellt nicht nur Verbindungen innerhalb des Systems der Fertigungsprozesse her, sondern auch zwischen der untersten Ebene des funktionalen Hierarchiemodells und den beiden darüber liegenden Ebenen. Durch das Informationssystem werden der DIN EN 62264-1:2014 zufolge auf Ebene eins eine Vielzahl an Daten akkumuliert, welche anschließend in aggregierter Form an die beiden darüber liegenden Ebenen weitergeleitet werden. Dort werden sie zur Analyse und Bewertung des Fertigungsprozesses im Manufacturing Operations Management (MOM) sowie zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in der Unternehmensführung verwendet (DIN EN 62264-1:2014). Das MOM in Ebene zwei stellt die Verbindung zwischen den Ebenen

der Fertigungsprozesse und der Ebene der Unternehmensführung her und steht mit beiden in direktem Austausch. Das MOM fungiert als Schnittstelle zwischen der Unternehmensführung und der Fertigung (DIN EN 62264-1:2014). Nach den Ausführungen in der Norm DIN EN 62264-1:2014 setzt das MOM die von der Unternehmensführung an die Fertigung gestellten Anforderungen um und informiert die Unternehmensführung über den aktuellen Zustand der Fertigungsprozesse. Dies beinhaltet unter anderem die detaillierte Fertigungsplanung, die Organisation, Disposition und Überwachung der Fertigungsprozesse. Die Tätigkeiten in der obersten Ebene, der Unternehmensführung, umfassen Aufgaben wie die Unternehmensplanung und Logistik, die grobe Fertigungsplanung sowie das Betriebsmanagement (DIN EN 62264-1:2014). Auf diese Art und Weise lassen sich die Fertigungsprozesse in die funktionale Hierarchie eines produzierenden Unternehmens einordnen. Im Anschluss an die Definition, Strukturierung und Einordnung von Fertigungsprozessen in produzierenden Unternehmen erfolgt im nächsten Kapitel eine Auseinandersetzung mit der Bewertung von Fertigungsprozessen mittels unterschiedlicher Kennzahlen.

3.2 Key Performance Indicators zur Bewertung von Fertigungsprozessen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Bewertung von Fertigungsprozessen. Zunächst wird der Zusammenhang zwischen der in Abschnitt 2.1 erläuterten Aggregation und Leistungskennzahlen wie KPIs hergestellt. Anschließend wird die Notwendigkeit erläutert, Indikatoren für die Leistung einer Fertigung in den Bewertungsprozess einzubeziehen. Dies geschieht mithilfe der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Modelle. Anschließend erfolgt eine Definition und Kategorisierung von spezifischen Leistungskennzahlen in Form von grundlegenden und komplexeren KPIs. Die genannten Leistungskennzahlen basieren auf Daten, welche im Zuge einer Fertigung hinsichtlich der von einer Maschine produzierten Menge sowie der dafür benötigten Zeit erhoben wurden.

Die Aggregation von Daten dient, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, der Komplexitätsreduktion durch das Zusammenfassen mehrerer Elemente zu einem (oder mehreren) konstruierten Element(en) in einem bestimmten Kontext. In diesem Abschnitt wird auf die Aggregation von Maschinendaten zu konstruierten Leistungskennzahlen in Form von KPIs im Kontext der Fertigung eingegangen. In der Norm ISO 22400-1:2014 werden KPIs als Leistungsindikatoren zur Analyse und Bewertung eines einzelnen oder einer Vielzahl von miteinander verknüpften Prozessen im Zusammenhang mit der Fertigung eines Unternehmens verwendet. Des Weiteren stellen sie einen internationalen Standard dar, der es ermöglicht, Aktivitäten über einen längeren Zeitraum oder ähnliche Aktivitäten von Unternehmen innerhalb einer Branche zu vergleichen (ISO 22400-1:2014). Die Norm führt weiterhin aus, dass die Analyse und Bewertung nicht allein anhand von KPIs erfolgt. Zur Überwachung von Indikatoren werden Grenzwerte definiert, bei deren Über- oder Unterschreiten Maßnahmen durchgeführt werden (ISO 22400-2:2014). Die Schwellenwerte werden gemäß ISO 22400-2:2014 in Form von Warnungs- und Handlungsgrenzen vorgegeben. Warnungsgrenzen dienen der Erkennung eines Trends und ermöglichen eine zeitnahe Reaktion, bevor Handlungsgrenzen überschritten werden und größere Konsequenzen folgen (ISO 22400-2:2014). Die Darstellung und Bewertung von Fertigungsprozessen stellt eine Kernaktivität in der Planung, Steuerung und Überwachung der Wertschöpfung innerhalb von produzierenden Unternehmen dar (Fukada und Patzke 2010; Braz et al. 2011; Ramis Ferrer et al. 2018).

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, findet die gesamte Wertschöpfung eines Unternehmens auf der Ebene der Fertigungsprozesse statt. Auf dieser Ebene werden mithilfe von geeigneter Sensorik eine Vielzahl an Prozessdaten aller Wertschöpfungsprozesse in einem Unternehmen erfasst und verarbeitet (siehe Abschnitt 3.1). Die erfassten Prozessdaten werden in ihrer Rohform auf Mikroebene zu aggregierten Daten auf Makroebene zusammengefasst, um die Komplexität des durch die Daten abgebildeten Prozesses zu reduzieren und damit die Entscheidungsfindung sowie die Analyse und Bewertung des Wertschöpfungsprozesses zu erleichtern (ISO 22400-1:2014). Die zusammengefassten, aggregierten Informationen werden

ISO 22400-1:2014 zufolge von allen funktionalen Ebenen in Form von Kennzahlen wie beispielsweise KPIs verwendet. Dazu gehören neben der soeben erläuterten Ebene der Fertigungsprozesse auch die, ebenfalls in Abschnitt 3.1 erläuterte, mittlere Ebene des MOM und die oberste Ebene der Unternehmensführung. Im nächsten Schritt werden mithilfe von Tabelle 1 KPIs bezüglich ihres Inhalts und Kontexts strukturiert erläutert.

Tabelle 1: KPI-Beschreibung - Begriffserläuterung zum Inhalt und zum Kontext von KPIs (nach ISO 22400-1:2014)

	Begriff	Beschreibung
	Name	Name des KPI
	ID	Eindeutige Identifikation des KPI
	Beschreibung	Beschreibung des KPI
Inhalt	Anwendungsbereich	Bereich, in dem die Kennzahl Nutzen generieren soll
	Formel	Mathematische Formel bestehend aus den einzelnen Elementen des betrachteten Systems
	Maßeinheit	Dimension der gemessenen Größe der Elemente des betrachteten Systems
	Wertebereich	Logische obere und untere Grenze der Maßeinheit
Kontext	Messzeitpunkte	Echtzeit, periodisch oder zu bestimmten Zeitpunkten
	Nutzung	Nutzungsmöglichkeiten des KPI
	Beschränkung	Beschränkungen bei der Nutzung des KPI
	Zielgruppe	Gruppe der Nutzer im funktionalen Hierarchiemodell: Fertigungsprozesse, MOM, Unternehmensführung
	Fertigungsmethodik	Diskret, kontinuierlich, losweise
	Anmerkungen	Beispielsweise Kommentare zur korrekten Interpretation des KPI

Im Folgenden wird anhand der ISO 22400-1:2014 auf die Definition und Kategorisierung von KPIs eingegangen. Nach der ISO 22400-1:2014 unterscheidet sich die Definition von KPIs hinsichtlich der Informationen über den Inhalt und den betrachteten Kontext. Nachfolgend werden beide Aspekte erläutert und mithilfe von Tabelle 1 strukturiert dargestellt.

In diesem Paragraphen wird die Definition eines KPI bezüglich der Informationen auf Basis der Norm ISO 22400-1:2014 beschrieben. Nachfolgende Ausführungen beziehen sich auf die Norm ISO 22400-1:2014. Im Zuge der Definition eines KPI ist es gemäß der ISO 22400-1:2014 erforderlich, dass die betreffende Definition Informationen über die jeweiligen Inhalte enthält. Diese sind in strukturierter Form im oberen Teil von Tabelle 1 dargestellt und werden in An-

lehnung an die Norm ISO 22400-1:2014 in diesem Abschnitt erläutert. Zu den gängigen Informationen zählen der Name, eine Kennung in Form einer ID, die Beschreibung, der Anwendungsbereich, die Berechnungsformel, die Maßeinheit, der Wertebereich sowie Informationen über die Entwicklung. Die ID dient der eindeutigen Identifikation des KPIs in dessen Anwendungsbereich. Der Anwendungsbereich entspricht dem Bereich, in dem die Kennzahl den größten Nutzen generiert. Die Berechnungsformel entspricht einer mathematischen Formel, die aus den einzelnen Elementen des betrachteten Systems besteht. Die Maßeinheit beschreibt die Dimension der gemessenen Elemente des Systems. Der Wertebereich definiert die obere und untere logische Grenze für die vom KPI akzeptierten Werte für die jeweilige Maßeinheit (ISO 22400-1:2014).

Im folgenden Paragraphen wird die Definition eines KPI bezüglich des Kontexts auf Basis der Norm ISO 22400-1:2014 beschrieben. Nachfolgende Ausführungen beziehen sich auf die Norm ISO 22400-1:2014. GleichermäÙen ist es im Rahmen der Definition eines KPI in der Norm erforderlich, die dazugehörigen Informationen über den Kontext zu beschreiben. Die sind im unteren Teil von Tabelle 1 dargestellt und werden in diesem Abschnitt ebenfalls in Anlehnung an die Norm ISO 22400-1:2014 erläutert. Der Kontext umfasst beispielsweise Informationen bezüglich der Messzeitpunkte, der Nutzung, Beschränkungen, der Zielgruppe, der Fertigungsmethodik sowie Anmerkungen. Die Anzahl der Messzeitpunkte eines KPI kann sich zwischen Messungen in Echtzeit, periodischen Messungen oder Messungen zu bestimmten Zeitpunkten unterscheiden. Der beiden nachfolgende Punkt beinhaltet Informationen über die Nutzung des KPI sowie mögliche Beschränkungen bei der Nutzung. Die Zielgruppe soll die Gruppe der Nutzer, welche die Kennzahl verwendet, spezifizieren. Es wird zwischen zuständigen Mitarbeitern in den verschiedenen funktionalen Hierarchieebenen unterschieden. Die Fertigungsmethodik beschreibt das Verfahren, dass innerhalb der Fertigung im Kontext eines Fertigungsauftrages verwendet wird. In Bezug auf die Fertigungsverfahren kann zwischen kontinuierlicher und diskreter Fertigung sowie loseweiser Fertigung unterschieden werden. Anmerkungen umfassen Kommentare zur korrekten Interpretation verschiedener Werte des KPI. Dies beinhaltet auch die Festlegung von Kriterien, anhand derer die Werte als gut, annehmbar oder schlecht kategorisiert werden (ISO 22400-1:2014). Nachfolgend werden KPIs mithilfe von Abbildung 4 in strukturierter Form kategorisiert.

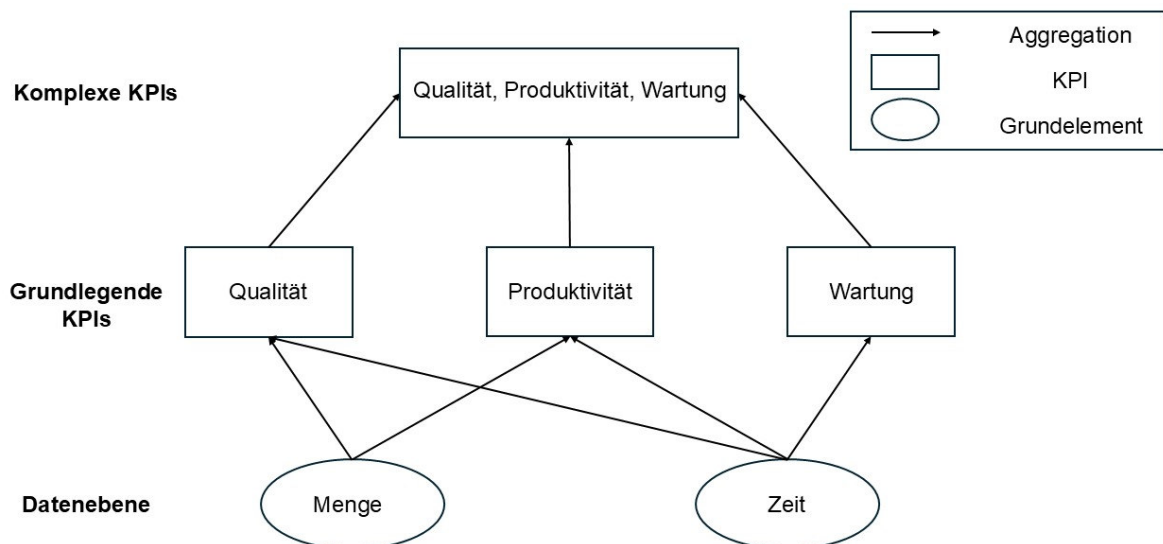


Abbildung 4: Kategorisierung von KPIs (nach Ningxuan et al. 2015)

In diesem Paragraphen wird die Kategorisierung von KPIs auf Grundlage der Ausführungen von Ningxuan et al. (2015) beschrieben. Nachfolgende Ausführungen beziehen sich auf die Aussagen von Ningxuan et al. (2015). Im folgenden Abschnitt wird die Kategorisierung der KPIs

anhand von Abbildung 4 gemäß den Aussagen von Ningxuan et al. (2015) erläutert. Die Datenebene stellt die unterste Ebene der Abbildung dar. Auf dieser Ebene befinden sich die Daten der Grundelemente in Ausprägungen bezüglich der Menge und der Zeit. Hier werden eine Vielzahl von Zeit- und Mengendaten der operativen Prozesse erfasst. Im nächsten Schritt werden die Prozessdaten zu grundlegenden KPIs durch Aggregation zusammengefasst. Grundlegende KPIs lassen sich in drei Kategorien bezüglich Qualität, Produktivität und Wartung einteilen. Sie sind dadurch charakterisiert, dass sie in den meisten Fällen eine der drei genannten Kategorien der Leistung des durch die Daten abgebildeten Systems aufzeigen können. In wenigen Fällen werden mehr als eine der drei Kategorien der Leistung abgebildet. Die Einordnung dieser grundlegenden KPIs erfolgt in Abbildung 4 der zweiten Ebene. In der obersten Ebene der Abbildung lassen sich komplexe KPIs einordnen. Diese geben einen Überblick über die gesamte Leistung des Systems. Ihre Konstruktion basiert auf der Aggregation und dem Zusammenführen mehrerer grundlegender KPIs unter Verwendung standardisierter Berechnungsvorschriften. Folglich ist es möglich, mit ihrer Hilfe die Leistung aller drei Kategorien hinsichtlich Qualität, Produktivität und Wartung zu erfassen (Ningxuan et al. 2015).

Nach den Aussagen von Ningxuan et al. (2015) lassen sich diese Daten aus den Perspektiven der Maschine, des Fertigungsauftrages oder des Bedieners der Maschine betrachten. In den nachfolgenden Erläuterungen wird der Fokus auf die Perspektive der Maschine gelegt. Die Zusammenführung der einzelnen Daten aus maschineller Perspektive erlaubt die Generierung von Aussagen bezüglich der gefertigten Produkte sowie des zugrunde liegenden Fertigungsauftrags. Eine Art von Daten, die während eines Prozesses erfasst werden, sind Ningxuan et al. (2015) zufolge die Wartungsdaten. Diese beziehen sich auf die Wartung oder Reparatur von Maschinen. Dazu zählen beispielsweise die Zeit, die für eine Reparatur benötigt wird oder die Häufigkeit der Funktionsbeeinträchtigung innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Ningxuan et al. 2015). Im nächsten Schritt werden quantitative Daten im Zusammenhang mit den produzierten Mengen einer Maschine mithilfe von Tabelle 2 erläutert.

Tabelle 2: Definition von quantitativen Elementen einer Fertigung (nach Ningxuan et al. 2015)

Name	Definition
Gesamte gefertigte Produkte (PQ)	Produzierte Gesamtmenge einer Maschine pro Auftrag
Fehlerfreie Produkte (GQ)	Produzierte Menge einer Maschine pro Auftrag, die den Qualitätsanforderungen entsprechen
Fehlerbehaftete Produkte (SQ)	Produzierte Menge einer Maschine pro Auftrag, die fehlerbehaftet ist

In den Ausführungen von Ningxuan et al. (2015) wird die nächste Form von Daten, die in der Datenebene erfasst werden, als quantitative Daten bezeichnet, welche in Tabelle 2 dargestellt sind. Diese quantitativen Daten beziehen sich auf verschiedene Mengen die eine Maschine pro Fertigungsauftrag fertigt. Die folgenden Aussagen basieren auf der vereinfachenden Annahme, dass die Nacharbeit von Produkten stets erfolgreich ist und die Menge dieser Produkte somit bereits in der Menge der fehlerfreien Produkte inkludiert ist. Als fehlerbehaftete Produkte werden laut dem Autor solche Produkte definiert, bei denen eine Nachbearbeitung aufgrund eines zu großen Defekts nicht möglich ist. Quantitative Daten beziehen sich auf die Menge der Elemente, die von den Maschinen während der Fertigungsprozesse im Rahmen eines Fertigungsauftrages erzeugt werden (Ningxuan et al. 2015). Beispiele hierfür sind nach den Aussagen von Ningxuan et al. (2015) die produzierte Gesamtmenge der Produkte, die produzierte Menge der fehlerfreien Produkte, die Ausschussmenge fehlerbehafteter Produkte. Mithilfe von Abbildung 5 wird im Folgenden der Zusammenhang quantitativer Daten detailliert erläutert.

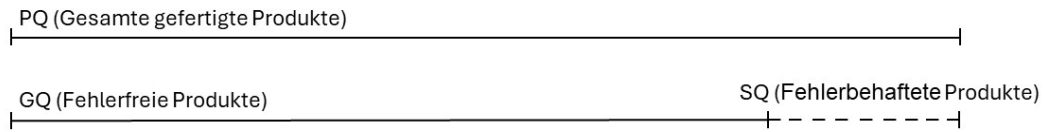


Abbildung 5: Zusammenhang der quantitativen Elemente von KPIs (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015)

Die Zusammenhänge der quantitativen Elemente sind in Abbildung 5 strukturiert dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht, dass sich die Gesamtheit der von einer Maschine gefertigten Produkte aus fehlerfreien und fehlerbehafteten Produkten im Kontext eines Fertigungsauftrages zusammensetzt. Somit repräsentieren alle drei Elemente quantitativer Daten die tatsächlich während eines Auftrags produzierten Mengen und entsprechen somit realen und nicht im Vorhinein geplanten bzw. vorgegebenen Mengen. Die daraus resultierende Berechnungsvorschrift zur Bestimmung der insgesamt gefertigten Produkte einer Maschine pro Auftrag entspricht nach Ningxuan et al. (2015) somit der folgenden Formel:

$$\begin{aligned}
 & \text{PQ (Gesamte gefertigte Produkte)} = \\
 & \text{GQ (Fehlerfreie Produkte)} + \text{SQ (Fehlerbehaftete Produkte)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Innerhalb des Kontextes der quantitativen Elemente ist lediglich eine Art von Elementen vorzufinden. In diesem Kontext sind diejenigen Elemente zu nennen, die unmittelbar während des Fertigungsprozesses erfasst werden. Im Folgenden werden diese unmittelbar während des Prozesses erfassten Elemente als grundlegende Elemente bezeichnet. Die durch den Fertigungsauftrag vorgegebenen Elemente werden als vorgegebene Elemente bezeichnet. Diese unmittelbar während des Prozesses erfassten, grundlegenden Elemente entsprechen den insgesamt gefertigten, fehlerfreien und fehlerbehafteten Produkten. Im Folgenden werden verschiedene Elemente zeitbezogener Daten von Maschinen erläutert. Mithilfe von Tabelle 3 erfolgt eine strukturierte Darstellung der Elemente zeitbezogener Daten.

Tabelle 3: Definition von zeitbezogenen Elementen einer Fertigung (nach Ningxuan et al. 2015)

Name	Definition
Sollzeit	
Betriebszeit (BZ)	Geplante Nutzungszeit einer Maschine pro Auftrag
Belegungszeit (BSZ)	Geplante Zeit, in der eine Maschine während eines Auftrages mit der Fertigung beschäftigt ist
Ausfallzeit (ASZ)	Geplante Zeit, in der eine Maschine während eines Auftrages nicht produzieren kann, beispielsweise durch Pausen, Besprechungen oder Wartungen
Fertigungszeit pro Einheit (FSZ)	Geplante Zeit der Fertigung pro Werkstück oder Teil
Istzeit	
Belegungszeit (BIZ)	Tatsächliche Zeit, die eine Maschine für die Ausführung eines Fertigungsauftrags genutzt wird
Leerlaufzeit (LIZ)	Tatsächliche Zeit, in der die Maschine keinen Fertigungsauftrag ausführt, obwohl sie verfügbar ist
Bearbeitungszeit (BEIZ)	Tatsächliche Zeit für die Fertigung und das Rüsten einer Maschine für einen Fertigungsauftrags
Ausfallzeit (AIZ)	Tatsächliche Zeit, in der der Fertigungsprozess während eines Auftrages durch störungsbedingte Unterbrechungen, kleinere Stillstände und andere ungeplante Ereignisse verzögert wird
Fertigungszeit (FIZ)	Tatsächliche Zeit, in der die Maschine für einen Auftrag produziert (schließt nur die wertschöpfenden Funktionen ein)
Rüstzeit (RIZ)	Tatsächliche Zeit, für das Rüsten einer Maschine für einen Fertigungsauftrags

Eine weitere mögliche Ausprägung der in der Datenebene erfassten Daten stellt der Faktor Zeit dar. Die Definition der einzelnen Elemente zu den jeweiligen Zeiträumen innerhalb einer Fertigung kann Tabelle 3 entnommen werden. Diese zeitbezogenen Daten beziehen sich entweder auf Zeiten die eine Maschine für einen einzelnen Fertigungsprozess oder pro Fertigungsauftrag benötigt. Nach den Aussagen von Ningxuan et al. (2015) beziehen sich diese zeitbezogenen Daten auf Zeiträume in Fertigungssystemen, die mit Tätigkeiten wie der Fertigung, dem Rüsten, der Wartung oder der Wartezeit bei Störungen einer Maschine verbunden

sind. Die genannten Zeiträume können in eine im Vorhinein geplante Sollzeit und die tatsächlich während des Prozesses erfasste Istzeit unterteilt werden (Ningxuan et al. 2015). Nachfolgend werden mithilfe von Abbildung 6 die Zusammenhänge zwischen den Elementen zeitbezogener Daten strukturiert dargestellt und anschließend erläutert.

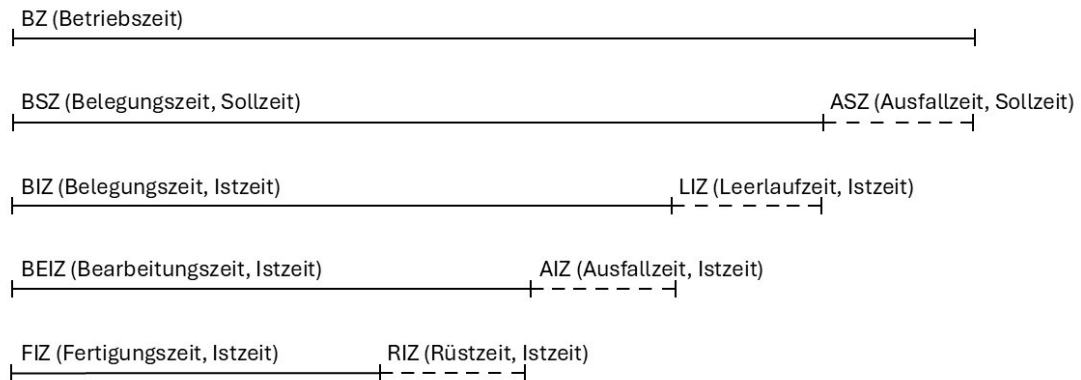


Abbildung 6: Zusammenhang der zeitbezogenen Elemente von KPIs (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015)

Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Zeitelementen einer Fertigung werden in Abbildung 6 veranschaulicht. Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die Betriebszeit einer Maschine aus der Summe der Sollzeiten für die Belegungs- und Ausfallzeit ergibt. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass die Sollzeit der Belegung durch die Addition der Istzeiten der Belegung und des Leerlaufs einer Maschine gebildet wird. Die Sollzeit der Bearbeitung einer Maschine wird durch die Addition der Istzeiten für die Bearbeitung und den Ausfall einer Maschine ermittelt. Ebenso lässt sich aus der Abbildung entnehmen, dass die Istzeit der Bearbeitung einer Maschine durch die Addition der Istzeiten für die Fertigung und das Rüsten einer Maschine gebildet wird. Diese Berechnungsvorschriften werden mithilfe von

Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt und im Folgenden erläutert.

Tabelle 4: Formeln zur Bestimmung der zeitbezogenen Elemente vom Standpunkt der Maschine aus (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015)

Formeln: Zeitelemente einer Maschine	Nummer
$\text{BEIZ (Bearbeitungszeit, Istzeit)} = \text{FIZ (Fertigungszeit, Istzeit)} + \text{RIZ (Rüstzeit, Istzeit)}$	(2)
$\text{BIZ (Belegungszeit, Istzeit)} = \text{BEIZ (Bearbeitungszeit, Istzeit)} + \text{AIZ (Ausfallzeit, Istzeit)}$	(3)
$\text{BSZ (Belegungszeit, Sollzeit)} = \text{BIZ (Belegungszeit, Istzeit)} + \text{LIZ (Leerlaufzeit, Istzeit)}$	(4)
$\text{BZ (Betriebszeit)} = \text{BSZ (Belegungszeit, Sollzeit)} + \text{ASZ (Ausfallzeit, Sollzeit)}$	(5)

Aus Abbildung 6 lassen sich diverse Berechnungsvorschriften zur Ermittlung diverser zeitbezogener Größen ableiten, welche in Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt werden. Die in der Tabelle dargestellten Elemente der Berechnungsvorschriften lassen sich im Gegensatz zu den quantitativen Elementen in drei verschiedene Arten von Elementen untergliedern. In Bezug auf die zeitbezogenen Elemente ist zwischen unmittelbar während des Fertigungsprozesses erfassten Elementen und durch den Fertigungsauftrag vorgegebenen Elementen zu differenzieren. Diese stellen die ersten beiden Arten der zeitbezogenen Elemente dar. Analog zu den quantitativen Elementen werden die unmittelbar während des Prozesses erfassten Elemente im Folgenden als grundlegende Elemente bezeichnet. Diejenigen Elemente, welche durch den Fertigungsauftrag vorgegeben werden, werden als vorgegebene Elemente bezeichnet. Die vorgegebenen Elemente umfassen die Sollzeiten der Betriebszeit, Belegungszeit, Ausfallzeit sowie der Fertigungszeit pro Einheit. Die grundlegenden Elemente, welche unmittelbar während des Prozesses erfasst werden, umfassen die Istzeiten der Bearbeitungszeit, Rüstzeit, Ausfallzeit und Leerlaufzeit. Die dritte Art zeitbezogener Elemente wird sowohl aus durch den Fertigungsauftrag vorgegebenen Elementen als auch aus während des Fertigungsprozesses erfassten Elementen durch die in Tabelle 4 dargestellten Berechnungsvorschriften ermittelt. Diese werden im Folgenden als weitere Elemente bezeichnet. Dazu zählen die Istzeiten der Bearbeitungszeit, Belegungszeit sowie die Sollzeit der Belegungszeit und der Betriebszeit.

Mithilfe der zuvor erläuterten quantitativen und zeitbezogenen Elemente werden im nächsten Schritt grundlegende sowie darauf aufbauend auch komplexe KPIs gebildet. Diese werden im Folgenden in strukturierter Form definiert und sind in Tabelle 5 dargestellt. In den Ebenen eins und zwei des in Abschnitt 3.1 vorgestellten funktionalen Hierarchiemodells findet in den meisten Fällen die Verwendung grundlegender KPIs statt. Diese schaffen Ningxuan et al. (2015) zufolge einen Überblick über einzelne Elemente der Fertigung und erleichtern die Fehleranalyse innerhalb eines Unternehmens. In der Ebene drei des Hierarchiemodells werden komplexere KPIs verwendet, welche einen Überblick über die gesamte Leistung der Fertigung eines Unternehmens geben und die Unternehmensführung in der Entscheidungsfindung unterstützt (Ningxuan et al. 2015).

Tabelle 5: Definition grundlegender und komplexer KPIs (in Anlehnung an Ningxuan et al. 2015)

Name	Beschreibung	Formel	Nummer
Verfügbarkeit (V)	Prozentualer Anteil der tatsächlichen an der geplanten Zeit, in der eine Maschine wertschöpfend produziert	$V = \frac{FIZ}{BSZ}$	(6)
Effektivität (E)	Maß dafür, wie effektiv eine Maschine während der Fertigungszeit ist	$E = \frac{FSZ \cdot PQ}{FIZ}$	(7)
Qualitätsrate (QR)	Gesamtprozentsatz der Teile mit guter Qualität nach Nacharbeit	$QR = \frac{GQ}{PQ}$	(8)
Overall Equipment Effectiveness (OEE)	Bewertungsmaß für die Produktivität einer gesamten Fertigung dar, welches sich aus drei grundlegenden KPIs zusammensetzt	$OEE = V \cdot E \cdot QR$	(9)

Die in Tabelle 5 dargestellten und erläuterten grundlegenden und komplexen KPIs befassen sich entsprechend den Aussagen von Ningxuan et al. (2015) mit der Aggregation von Daten einer Fertigung. Dabei kann die Aggregation entweder auf Basis der Zeit oder der Menge oder einer Kombination beider Datenausprägungen erfolgen (Ningxuan et al. 2015). Im Folgenden

werden zunächst drei grundlegende KPIs erläutert und darauf aufbauend ein komplexer KPI. Zu den grundlegenden KPIs zählen laut Ningxuan et al. (2015) unter anderem die Verfügbarkeit, die Effektivität und die Qualitätsrate einer Fertigung. Der Wert der Verfügbarkeit gibt den Prozentsatz der Zeit an, in der eine Maschine zum Einsatz verfügbar ist (Ningxuan et al. 2015). Die Effektivität hingegen gibt dem Autor zufolge an, wie effektiv eine Maschine während der Fertigungszeit arbeitet. Die Qualitätsrate entspricht dem Anteil der qualitativ hochwertig produzierten Güter nach Nacharbeit an den insgesamt hergestellten Gütern (Ningxuan et al. 2015). Basierend auf den grundlegenden KPIs werden KPIs mit komplexer Struktur gebildet. Diese schaffen eine weitere Verbindung zwischen quantitativen und zeitbezogenen KPIs und geben einen Überblick über die gesamte Leistung einer Fertigung (Ningxuan et al. 2015). Ein Beispiel für einen solchen komplexen KPI ist Ningxuan et al. (2015) zufolge die Overall Equipment Effectiveness (OEE), auch als Gesamtanlageneffektivität bezeichnet. Diese wird ebenfalls in Tabelle 6 definiert. Sie verbindet nach den Ausführungen des Autors die Verfügbarkeit, Effektivität und die Qualität in Bezug auf eine Fertigung in einer Kennzahl. Diese Kennzahl erlaubt somit Aussagen über die Effektivität und Effizienz der Nutzung der Fertigungsressourcen (Ningxuan et al. 2015). Der Wertebereich des OEE erstreckt sich Dobra (2022) zufolge über die Werte 0 und 1 bzw. über den Bereich von 0 bis 100 %. Ein OEE-Wert von 100% entspricht einer perfekten Fertigung, d. h. die Fertigung aller Produkte erfolgt mit höchstmöglicher Effizienz, also ohne jegliche Stillstände oder Fehler (Dobra 2022). Der Autor bezeichnet weiterhin einen Wert von über 85 % als exzellent. Werte zwischen 60 und 85 % werden im Rahmen dieses Beitrags als akzeptabel erachtet (Dobra 2022). Folglich kann ein Wert unter 60 % als kritisch eingestuft werden, was einen Bedarf zur Optimierung der Fertigung indiziert (Dobra 2022). Sowohl quantitative als auch zeitbezogene Daten spielen in der Anwendung zur Analyse und Bewertung einer Fertigung eine entscheidende Rolle. Der Begriff des Data Farming findet somit auch in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche im Kontext einer Fertigung statt. Aus diesem Grund wird im nachfolgenden Kapitel der Begriff des Data-Farming detailliert erörtert.

4 Einführung in das Data Farming

In diesem Abschnitt erfolgt eine Erläuterung der Grundlagen des Data Farming sowie eine Einordnung des Prozesses in verschiedene Anwendungsbereiche. Im Anschluss an die grundlegenden Erläuterungen wird ein besonderer Fokus auf einen speziellen Data-Farming-Prozess gelegt. Die einzelnen Schritte dieses iterativen Prozesses werden sukzessive vorgestellt.

4.1 Grundlagen des Data Farming

Der Begriff Data Farming wird erstmals im Rahmen von militärischen Untersuchungen verwendet. Brandstein und Horne (1998) zufolge beschreibt Data Farming eine automatische und wissenschaftliche Methode zur Generierung einer großen Menge Daten durch Simulation einer Vielzahl von Szenarien. Gemäß Horne und Meyer (2004) erlaubt diese Methode die Analyse einer Vielzahl potenzieller Ergebnisse, da sie die Verarbeitung eines breiten Spektrums an Parametern im verwendeten Simulationsmodell ermöglicht. Dadurch wird das Experimentieren mit unterschiedlichen Methoden realisiert, um Einsicht in eine spezifische Fragestellung zu erlangen (Horne und Meyer 2004). Horne und Seichter (2014) beschreiben den Prozess als fragestellungszentriert, da er wissenschaftlich und systematisch eine operative Frage aus seiner ursprünglichen Rohform in eine entsprechende Antwort verfeinert. Weiterhin führen die Autoren aus, dass der Prozess eine Verfeinerung der Ausgangsfragestellung sowie die Gewinnung von Antworten liefert. Gleichmaßen wird nach den Aussagen der Autoren mit Data Farming nach unbekanntem Effekten und Wechselbeziehungen innerhalb eines Systems gesucht. Des Weiteren wird Data Farming als ein Prozess beschrieben, der Entscheidungsträger bei der Beantwortung von Fragen unterstützen soll, die mit herkömmlichen Modellierungs- und Simulationsverfahren nicht beantwortet werden können (Horne und Seichter 2014).

Ein weiterer Anwendungsbereich des Data Farming stellt die Fertigung in Unternehmen dar. Rabe und Scheidler (2015) thematisieren die Fragestellung, inwiefern sich Simulationen im Kontext des Supply Chain Managements und des Data Farming im Rahmen des KDD nutzen lassen. Die Autoren legen dar, dass KDD häufig zur Unterstützung von Entscheidungen in Bezug auf Supply Chains zum Einsatz kommt. Um eine Datenbasis für das KDD zu erlangen, wird der Prozess des Data Farming verwendet, um durch die Simulation der Supply Chain eine Vielzahl von Daten zu generieren (Rabe und Scheidler 2015). Die den Autoren zufolge verfolgte Vorgehensweise zielt darauf ab, mithilfe einer vergrößerten Datenbasis eine umfassendere Informationsbasis für den KDD zu generieren, um dadurch die Qualität der Entscheidungsfindung zu optimieren. Hunker (2021) zufolge wird der Data-Farming-Prozess ebenfalls häufig in Kombination mit dem Data Mining im Rahmen des KDD genutzt. Der Autor stellt Data Mining als einen Kernprozess im KDD dar und dient der Generierung von Wissen aus einer Menge an vorliegenden Daten. Diese Daten können entweder aus operativen Daten oder durch Data Farming mit Hilfe von Simulation generiert werden (Hunker 2021). Des Weiteren erläutert der Autor, dass im Kontext produzierender Unternehmen KDD zum Einsatz kommt, um aus den operativen Daten komplexer Supply Chains Wissen zu generieren und somit die Entscheidungsfindung im Supply Chain Management zu unterstützen.

Nach den Aussagen von Hunker et al. (2021) findet Data Farming ebenfalls Anwendung zur Prognose des Bedarfs an Wartungsarbeiten an Fertigungsmaschinen, bevor diese tatsächlich erforderlich werden. Die Autoren führen aus, dass durch kontinuierliche Erfassung von Daten der Maschinen die sogenannte zustandsorientierte Wartung ermöglicht wird. Ein wesentlicher Aspekt der zustandsorientierten Wartung ist die Zustandsüberwachung, welche darauf abzielt, Fehler zu erkennen und eine detaillierte Analyse für gezielte Wartungsmaßnahmen zu liefern (Hunker et al. 2021). Die Ansätze der Zustandsüberwachung basieren den Autoren zufolge entweder auf analytischen Berechnungen oder auf Machine Learning. Allerdings erweisen sich analytische Berechnungen für komplexe Maschinen oft als nicht realisierbar (Hunker et al. 2021). Ebenso erfordert gemäß den Aussagen von Hunker et al. (2021) Machine Learning eine Vielzahl an Daten, zu denen idealerweise auch Daten zu Fehlern zählen, die

eigentlich nicht auftreten sollten. Aus diesem Grund erfolgt die Generierung der für das Machine Learning benötigten Daten durch Data Farming, um Prozessparameter der Maschinen zu schätzen und somit eine Vorhersage des Zustandes der Maschine zu ermöglichen (Hunker et al. 2021). Im folgenden Abschnitt wird ein spezifischer Data-Farming-Prozess detailliert erläutert.

4.2 Data Farming-Prozess: Loop of Loops

Loop of Loops entspricht einem Data-Farming-Prozess und wird im Folgenden als Data-Farming Prozess bezeichnet. Wie in Abschnitt 4.1 kurz erläutert, stellt Data Farming einen iterativen Prozess dar, der Antworten auf eine operative Frage liefert und somit die Entscheidungsfindung unterstützen kann. Dazu werden eine Reihe von Basistechnologien und -prozessen in strukturierter Form miteinander verknüpft. In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt eine sukzessive Erläuterung der einzelnen Teilprozesse eines spezifischen Data-Farming-Prozesses. Des Weiteren werden Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilprozessen hergestellt und erläutert.

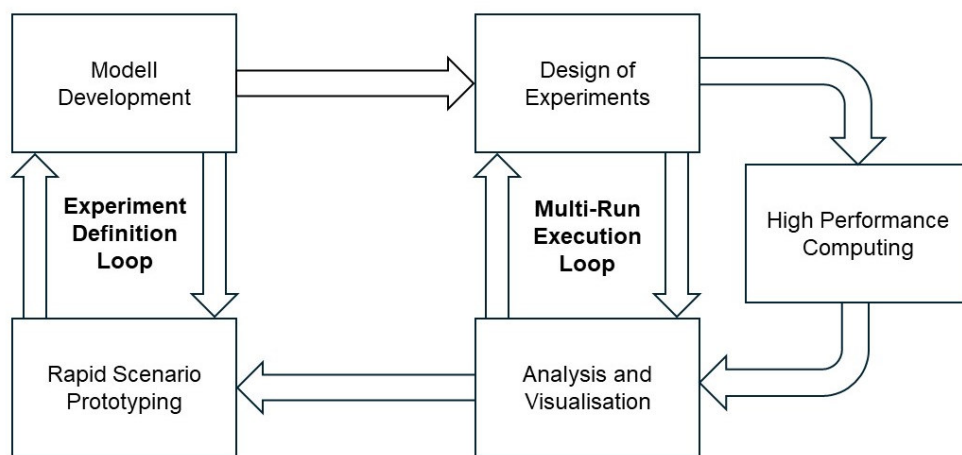


Abbildung 7: Data-Farming-Prozess: Loop of Loops (nach Horne und Seichter 2014)

Der Data-Farming-Prozess ist in Abbildung 7 dargestellt. Die einzelnen Schritte eines Data-Farming-Prozesses umfassen Rapid Scenario Prototyping (RSP), Modellentwicklung (ME), Design of Experiments (DoE), High Performance Computing (HPC) sowie Analyse und Visualisierung (AVIZ) der Ergebnisse. Die genannten Schritte werden iterativ abgearbeitet, wodurch ein Wechsel zwischen den einzelnen Schritten des Data-Farming-Prozesses ermöglicht wird (Horne und Seichter 2014). Nach den Aussagen von Horne und Seichter (2014) zielt RSP darauf ab, alle relevanten Aspekte eines abgebildeten Systems in Kombination mit der ME in ein geeignetes Simulationsmodell zu überführen. Das DoE dient zur Planung einer strukturierten Kombination und Variation der Vielzahl von Eingabeparametern des Simulationsmodells (Horne und Seichter 2014). Weiterhin führen die Autoren aus, dass der Einsatz von HPC, bestehend aus Hard- und Softwareelemente, die Generierung und Auswertung einer signifikanten Menge an Daten erlaubt, wodurch eine reibungslose Durchführung des Data-Farming-Prozesses gewährleistet wird. Die AVIZ der Ergebnisse des Experiments stellt den Autoren zufolge den letzten Schritt im Data-Farming-Prozess dar. Das Ziel ist die Hervorhebung nützlicher Informationen, um auf dieser Grundlage die Entscheidungsfindung zu unterstützen (Horne und Seichter 2014).

In Abbildung 7 sind darüber hinaus mehrere eingebettete Schleifen zu erkennen, welche alle zuvor genannten Basistechnologien und -prozesse umfassen. Zum einen ist dies der Experiment Definition Loop, welcher die ME und das RSP verknüpft. Diese Schleife wird laut Horne

und Seichter (2014) im Vorfeld des Data Farming durchlaufen, aber auch zur Anpassung des Modells nach Durchführung des Experiments. Des Weiteren nennen die Autoren den Multi-Run Execution Loop, welcher eine Verbindung zwischen dem DoE, dem HPC und der AVIZ der Ergebnisse herstellt. Diese Schleife wird in erster Linie zur ein- oder mehrfachen Durchführung des Data Farming verwendet (Horne und Seichter 2014). Allerdings besteht den Autoren zufolge die Möglichkeit, während des Prozesses in den Experiment-Definition-Loop zurückzuspringen, um Anpassungen am Simulationsmodell vorzunehmen. Im Folgenden werden die einzelnen Elemente des Prozesses detailliert erläutert.

4.2.1 Rapid Scenario Prototyping

Im Rahmen des RSP erweist sich nach den Aussagen von Horne und Seichter (2014) die Betrachtung verschiedener Szenarien als von zentraler Bedeutung, um die Ausgangsfrage hinreichend genau beantworten zu können. Die Autoren definieren das Ziel des RSP als die Überführung aller relevanten Aspekte eines Szenarios in ein geeignetes Simulationsmodell. Weiterhin erläutern sie aus, dass die Auswahl der für das Simulationsmodell relevanten Parameter sowie die zugrunde liegenden Annahmen das Ergebnis der Simulation sowie die daraus resultierenden Entscheidungen beeinflussen. Das zu entwickelnde Modell für das Data Farming basiert auf einem getesteten und dokumentierten Basisszenario und wird in Kombination mit der ME in ein geeignetes Simulationsmodell überführt (Horne und Seichter 2014).

4.2.2 Modellentwicklung

Die ME stellt den nächsten Teilprozess des Data-Farming-Prozesses Loop of Loops von Horne und Seichter (2014) dar. Der Data-Farming-Prozess wird in Abschnitt 4.1 als ein fragezentrierter Prozess beschrieben. Die ME erfordert daher zunächst die Identifikation der Bedürfnisse und Fragestellungen der Adressaten des Data-Farming-Prozesses, um diese anschließend in ein geeignetes Modell zu überführen (Horne und Seichter 2014). Darüber hinaus ist den Autoren zufolge ein korrektes Verständnis des abzubildenden Systems von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen der Erstellung eines Simulationsmodells ist es gemäß den Aussagen von Horne und Seichter (2014) ebenfalls erforderlich, die Anforderungen, welche aus den Bedürfnissen und Fragestellungen der Adressaten resultieren, zu identifizieren. Dies entspricht einem iterativen Prozess basierend auf den Modellergebnissen und dem Feedback des Adressaten des Data-Farming-Prozesses (Horne und Seichter 2014). Das Zusammenspiel zwischen den Teilprozessen der ME und des RSP stellt der in Abbildung 7 dargestellte Experiment Definition Loop dar. Das in dieser Schleife erstellte Simulationsmodell für das Data Farming soll auf diese Art und Weise einem möglichst realistischen Modell entsprechen, welches die Analyse der Ausgangsfrage ermöglicht (Horne und Seichter 2014).

Im Folgenden wird zunächst der Systembegriff definiert, darauf aufbauend die Modellierung von Prozessen sowie der Begriff der Simulationsexperimente erläutert. Ein System wird in der Norm DIN EN 62264-1:2014 als eine Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen und in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes betrachtet und von ihrer Umgebung abgegrenzt werden definiert. Ein Prozess umfasst gemäß der VDI-Richtlinie 3633-2014 die Gesamtheit aufeinander wirkender Vorgänge, durch die Materie, Energie und Informationen in einem System umgeformt, transportiert oder gespeichert werden. Das Konzept der Simulation bildet der VDI-Richtlinie 3633-2014 zufolge die dynamischen Prozesse eines Systems in einem experimentierfähigen Modell ab. Die systematische Planung und Durchführung von Experimenten mit diesem Simulationsmodell erlaubt die Gewinnung von Erkenntnissen, die auf die Realität übertragbar sind (VDI-Richtlinie 3633-2014). Ein Simulationsexperiment beschreibt laut der VDI-Richtlinie die gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- und Strukturvariation. Nachfolgend wird die Planung und Durchführung solcher Simulationsexperimente im Rahmen des DoE detailliert erörtert.

Eine Herausforderungen in der Modellierung besteht nach Horne und Seichter (2014) in der Vereinfachung der Verhaltensweise des abzubildenden Systems. Vereinfachungen und Annahmen führen in der Regel zu Ungenauigkeiten im Modell, wodurch das Verständnis, die Vorhersage und die Kontrolle des Verhaltens eines Systems beeinträchtigt werden (Horne und Seichter 2014). Die Herausforderungen einer Simulation besteht den Autoren zufolge ebenfalls darin, dass das Ergebnis der Simulation sich nur auf ein einziges Ereignis bezieht und somit keine Schlussfolgerungen auf verschiedene Szenarien zulässt. Die Methode des Data Farming dient zur simulationsbasierten und iterativen Analyse komplexer Systeme, um eine Vielzahl an Szenarien abzudecken und somit Schlussfolgerungen zu ermöglichen (Horne und Seichter 2014).

4.2.3 Design of Experiments

In diesem Abschnitt erfolgt eine Vorstellung des DoE als nächster Teilprozess des Data-Farming-Prozesses. Nach den Aussagen von Law (2017) besteht das Hauptziel dieses Teilprozesses in der Bestimmung wichtiger Parameter mit einem möglichst geringen Simulationsaufwand. Im Folgenden wird die Terminologie in der Planung von Experimenten werden im Kontext des DoE erläutert. Die Eingangsparameter und strukturellen Annahmen des Simulationsmodells werden Law (2017) zufolge als Faktoren und die leistungsbezogenen Messungen der Ausgangsparameter als Reaktionen bezeichnet. Die Werte der Faktoren oder Reaktionen können nach den Aussagen des Autors quantitativ oder qualitativ ausgeprägt sein. Quantitative Faktoren nehmen numerische Werte an, während qualitative Faktoren strukturelle Annahmen darstellen, welche nicht quantifiziert werden können (Law 2017). Beispielsweise stellen die Anzahl von Maschinen eine quantitative Größe und der Zustand von Maschine eine qualitative Größe dar. Im Folgenden wird gemäß den Aussagen von Law (2017) jede mögliche Faktorkombination als Design Point (DP) bezeichnet.

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, beschreibt Data Farming eine wissenschaftliche Methode zur Generierung großer Datenmengen durch die Simulation einer Vielzahl von Szenarien. Dies wird durch die Verarbeitung eines breiten Spektrums von Faktoren ermöglicht. Horne und Seichter (2014) beschreiben im Rahmen des DoE ein geplantes Experiment als ein sorgfältig ausgewählter Satz von DPs. Weiterhin führen die Autoren aus, dass die sorgfältige Auswahl notwendig ist, da komplexe Simulationsmodelle von einer Vielzahl von Faktoren abhängen und möglichst viele verschiedene Szenarien des dargestellten Systems abgedeckt werden sollen. Des Weiteren wird ein Experiment als eine Reihe von Tests definiert, bei denen durch die systematische Änderung der Faktoren eines Systems die Änderungen der Reaktionen des Systems beobachtet und ermittelt werden (Horne und Seichter 2014). Gemäß den Aussagen von Horne und Seichter (2014) schränkt Variation aller Faktoren oder die Variation einzelner Faktoren die Aussagekraft ein, da bei diesen Ansätzen keine Zusammenhänge erkannt werden und die Ursache von Veränderungen nicht eindeutig identifiziert werden kann. Die Berücksichtigung aller möglichen Kombinationen aller Faktoren ist nach den Aussagen der Autoren derzeit technisch nicht realisierbar. Diese Problemstellung wird als Fluch der Dimensionalität bezeichnet. Laut Horne und Seichter (2014) hilft das DoE, diesen Fluch der Dimensionalität zu überwinden und gleichzeitig eine Vielzahl von Erkenntnissen zu gewinnen und die Leistungsfähigkeit des betrachteten Simulationsmodells zu erhöhen. Das DoE bietet intelligente Möglichkeiten für den Aufbau eines Experiments und bestimmt somit die Daten, die durch das Simulationsexperiment generiert werden (Horne und Seichter 2014).

Es existieren eine Vielzahl von Möglichkeiten, welche für die Gestaltung oder den Entwurf von Experimenten geeignet sind. In diesem Kontext nennen Horne und Seichter (2014) einfache Methoden wie das voll- und teilfaktorielle Design sowie komplexere Gestaltungsmöglichkeiten wie beispielsweise das Latin-Hypercube-basierte-, sequenzielle Screening- oder Metamodellierungsmethoden. Den Autoren zufolge stellt der vollfaktorielle Entwurf die einfachste Form des DoE dar, da die Evaluierung jedes Faktors in zwei Stufen erfolgt. Zur Erweiterung des Entwurfes ist es gemäß den Aussagen von Horne und Seichter (2014) möglich, mehr als zwei Stufen für jeden Faktor zu betrachten. Der vollfaktorielle Entwurf wird jedoch häufig verwendet, da es intuitiv sinnvoll erscheint, alle möglichen Kombinationen hoher und niedriger Werte der

Faktoren zu untersuchen (Horne und Seichter 2014). Die Betrachtung aller möglichen Faktorkombinationen in Form von DPs stellt jedoch eine große Herausforderung bei der Umsetzung des Experiments dar. Die Autoren beschreiben das exponentielle Wachstum der Anzahl der DPs, also der möglichen Faktorkombinationen, mit steigender Anzahl der Faktoren als das größte Problem des vollfaktoriellen Entwurfs. In Übereinstimmung mit den Ausführungen von Horne und Seichter (2014) besteht die Notwendigkeit, weitere Methoden für das DoE einzusetzen, wie beispielsweise den teilfaktoriellen Entwurf. Bei diesem Entwurf wird der Umfang der DPs durch eine Reduzierung der Anzahl der Faktoren begrenzt, um das exponentielle Wachstum der DPs zu kontrollieren (Horne und Seichter 2014). Eine weitere effizientere Möglichkeit für einen Entwurf eines Simulationsexperiments stellt die Methode des sogenannten Latin-Hypercube-Sampling (LHS) dar. Im Folgenden wird in Anlehnung an die Aussagen von Law (2017) und Dean et al. (2017) die Vorgehensweise beim Design eines Experiments in Form des LHS strukturiert erläutert. Das Ziel des DoE ist es, ein möglichst breites Spektrum der Ausprägungen aller Faktoren für das Modell abzudecken, das im vorangegangenen Teilprozess der ME implementiert wurde (siehe Abschnitt 4.2.2). Um ein möglichst breites Spektrum abzudecken und gleichzeitig das Wachstum der DPs zu kontrollieren, verfolgt das LHS ebenfalls das Ziel, die Werte eines Faktors gleichmäßig über den gesamten Wertebereich des betrachteten Faktors zu verteilen (Law 2017). Dabei wird nach den Aussagen von Law (2017) davon ausgegangen, dass die Faktoren stetige oder diskrete Variablen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Niveaus darstellen. Das Ergebnis des LHS ist somit ein Muster, welches den soeben genannten Eigenschaften entspricht. In Anlehnung an die Ausführungen von Law (2017) ist in Tabelle 6 eine Designmatrix (DM) zur Visualisierung potenzieller DPs dargestellt.

Tabelle 6: Designmatrix für das Latin Hypercube Design eines Experiments (in Anlehnung an Law 2017)

Faktorkombination (Design Points)	Faktor 1	Faktor 2
1	20	50
2	10	30
3	40	60

Die in Tabelle 6 dargestellte DM für das LHS kann als Matrix charakterisiert werden, in der jede Spalte einem Faktor und jede Zeile einer potenziellen Faktorkombination bzw. DP entspricht (Law 2017). Im ersten Schritt erfolgt gemäß Law (2017) eine gleichmäßige Verteilung der Ausprägungen des Faktors über den gesamten Wertebereich, wobei der untere und der obere Endpunkt des Wertebereichs jeweils berücksichtigt werden. Anschließend werden für jede Spalte die Werte zufallsbasiert randomisiert, um eine möglichst optimale Füllung des Faktorraums zu gewährleisten (Law 2017). Eine ähnliche Vorgehensweise wird in den Ausführungen von Dean et al. (2017) beschrieben, welche im Folgenden detailliert erläutert wird.

In diesem Paragraphen wird die Konstruktion einer DM für das LHS auf Grundlage der Quelle Dean et al. (2017). Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf die Ausführungen von Dean et al. (2017). Zunächst werden die für die Konstruktion der DM benötigten Elemente definiert und entsprechende Bedingungen erläutert. Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur sukzessiven Konstruktion einer DM vorgestellt, welche den zuvor präsentierten Elementen und Bedingungen entspricht. Sei d die Anzahl der Faktoren und n die Anzahl der Intervalle, in die jeder einzelne Faktor unterteilt werden soll. Zu Beginn wird der Wertebereich jedes Faktors in n gleich große Intervalle unterteilt. Die Unterteilung der Intervalle erfolgt gleichmäßig im Bereich von $0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, \frac{n-1}{n}, 1$. Jedes dieser n Intervalle besitzt einen Mittelpunkt m_k . Dieser Mittelpunkt bezieht sich auf die Intervallposition k und lässt sich mit folgender Formel bestimmen:

$$m_k = \frac{2k - 1}{2n}, k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Beispielsweise entsprechen die Mittelpunkte der Intervalle für $n = 3$ für jeden Faktor:

$$m_1 = \frac{2 - 1}{6} = \frac{1}{6}, \quad m_2 = \frac{4 - 1}{6} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}, \quad m_3 = \frac{6 - 1}{6} = \frac{5}{6}$$

Für d unterschiedliche Faktoren mit n Intervalle lassen sich dadurch die n^d mögliche d -dimensionale Zellen bestimmen. Diese Zellen werden als Hypercubes bezeichnet und entsprechen Sätzen von Intervall-Mittelpunkten für die d Faktoren. Ein Hypercube entspricht somit einem mehrdimensionalen Raum, welcher durch die Unterteilung eines Wertebereichs jedes Faktors in Intervalle entsteht. Jeder dieser Hypercubes repräsentiert eine Kombination von Werten, die durch die Intervalle jedes Faktors bestimmt wird. Eine beispielhafte Darstellung von zweidimensionalen Hypercubes für zwei Faktoren ist in Abbildung 8 umgesetzt.

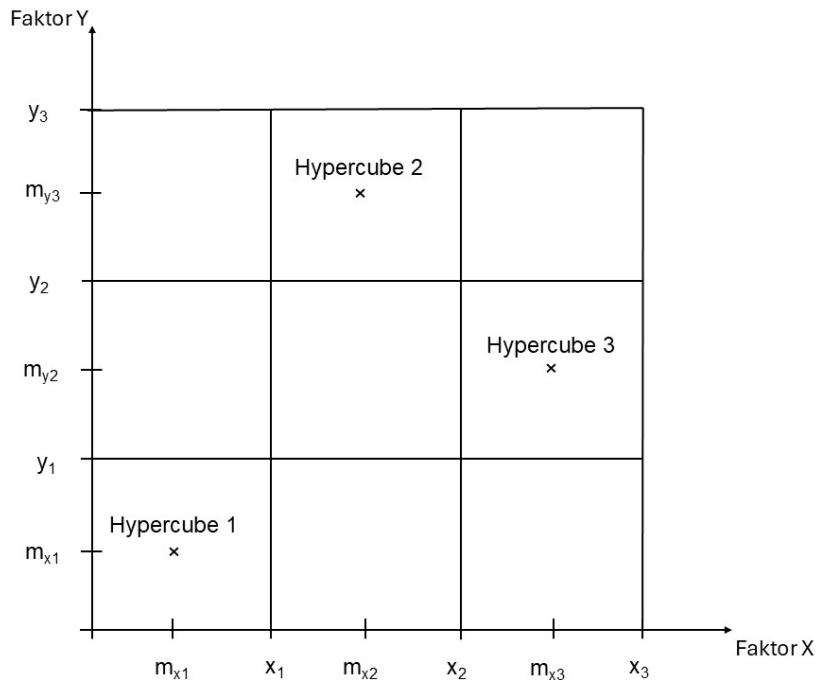


Abbildung 8: Graphische Darstellung von zweidimensionalen Hypercubes für die Faktoren X und Y

Zur Veranschaulichung der Entstehung von Hypercubes wird das oben eingeführte Beispiel mithilfe von Abbildung 8 visualisiert. Für $d = 2$ liegen zwei Faktoren X und Y vor. Jeder der beiden Faktoren wird für $n = 3$ in drei Intervalle x_i und y_i mit $i = 1, \dots, n$ unterteilt. In jedem Intervall lassen sich jeweils die Mittelpunkte m_{x_i} und m_{y_i} mit $i = 1, \dots, n$ bestimmen. Daraus ergeben sich für die beiden Faktoren insgesamt $3^2 = 9$ mögliche zweidimensionale Hypercubes als Paare der Mittelpunkte m_{x_i} und m_{y_i} der beiden Faktoren X und Y. In Abbildung 8 werden drei der neun beispielhaften zweidimensionalen Hypercubes dargestellt, die jeweils ein Paar von Mittelpunkten der Faktoren X und Y bilden. Hypercubes definieren die Struktur des Faktorraums und entsprechen allen möglichen Kombinationen von Mittelpunkten, die durch die Intervalle jedes Faktors bestimmt sind. Im nächsten Schritt werden geeignete DPs ausgewählt. Während Hypercubes die Struktur des Faktorraums definieren und alle möglichen

Kombinationen von Mittelpunkten repräsentieren, sind DPs spezifische Punkte innerhalb dieser Struktur, die für ein Experiment ausgewählt werden. Es ist entscheidend, dass für jeden Faktor jeder Wert einzigartig ist, es darf sich also nur ein Wert in jedem der Intervalle befinden. Dies bedeutet, dass in jedem Intervall nur ein Punkt pro Faktor platziert wird, sodass keine Überlappungen der Werte in den einzelnen Intervallen auftreten. Dieser Auswahlprozess stellt sicher, dass die Werte gleichmäßig über den Wertebereich der Faktoren verteilt sind. Dadurch ist gewährleistet, dass sich die einzelnen DPs der DM einzigartig sind. Im Folgenden wird die Konstruktion einer DM auf Grundlage der soeben definierten und vorgestellten Elemente und Bedingungen sukzessive erläutert.

- (a) Der Ausgangspunkt ist eine Matrix X , welche n Zeilen und d Spalten aufweist. Jede Spalte enthält dabei die ganzen Zahlen k mit $k = 1, 2, \dots, n$.
- (b) Für jede einzelne Spalte werden die ganzen Zahlen k zufällig angeordnet
- (c) Jede ganze Zahl k wird durch den dazugehörigen Intervall-Mittelwert $\frac{2k-1}{2n}$ ersetzt
- (d) Jede i -te Zeile der Matrix X entspricht nun dem i -ten DP für das Experiment und sieht beispielsweise für $n = 3$ folgendermaßen aus:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ 5 & 1 \\ \frac{5}{6} & \frac{5}{6} \\ 3 & 5 \\ \frac{3}{6} & \frac{3}{6} \end{pmatrix}$$

- (e) Im letzten Schritt erfolgt eine Skalierung der Matrixwerte auf die jeweiligen, konkreten Werte der Faktoren. Dies resultiert in einer Matrix, die der Darstellung in Tabelle 6 entspricht.

Die hier beschriebene Methode des DoE resultiert in einer DM, welche im Rahmen eines Experiments verwendet wird, um dem Wachstum der DPs entgegenzuwirken. Die DM besteht aus gleichmäßig über den gesamten Wertebereich verteilten Mustern der Ausprägungen jedes einzelnen Faktors. Dazu wird der gesamte Wertebereich jedes Faktors zunächst in gleichmäßige Intervalle unterteilt, wobei durch die Randomisierung dennoch ein großer Teil des Wertebereichs abgedeckt wird. Jede der n Zeilen der DM entspricht somit einem DP und jede der d Spalten der einzelnen Faktoren der DPs.

4.2.4 High Performance Computing

Horne und Seichter (2014) definieren das HPC als eine Kombination von Hard- und Softwareelemente in Form eines einzelnen Supercomputers mit tausenden Prozessoren, eines Netzwerkes aus zusammenhängenden Computern oder eines einfachen, leistungsstarken Desktop-Computers mit Mehrkern-Prozessoren. Der Hauptverwendungszweck von HPC im Kontext des Data Farming besteht in der Bereitstellung von Mitteln zur reibungslosen und schnellen Durchführung von Simulationsexperimenten (Horne und Seichter 2014). Die Autoren führen aus, dass die Generierung einer signifikanten Menge an Daten die Verwendung von leistungsstarker Hardware in Kombination mit einwandfreier Software erfordert. Ein weiterer Zweck des HPC stellt die Speicherung sowie die AVIZ der generierten Daten dar (Horne und Seichter 2014).

4.2.5 Analyse und Visualisierung

Nach den Aussagen von Horne und Seichter (2014) spielt die AVIZ der im Zuge des Simulationsexperiments großen Menge an generierten Daten eine entscheidende Rolle im gesamten Data-Farming-Prozess. Dabei bezeichnet den Autoren zufolge die Analyse den Prozess der Untersuchung von Daten. Dazu werden statistische Verfahren zur Zusammenfassung und

Präsentation der Daten verwendet, um relevante Informationen hervorzuheben und Schlussfolgerungen zu ziehen (Horne und Seichter 2014). Die Autoren erläutern, dass ein wesentlicher Aspekt bei der Analyse von Daten darin besteht, diejenigen Elemente auszuwählen, die für die adressierten Fragestellungen von Relevanz sind. Außerdem stellt die Auswahl einer geeigneten Analyseverfahren eine entscheidende Rolle dar (Horne und Seichter 2014). Mithilfe der Analyse der Daten durch statistische Verfahren ist es beispielsweise möglich Regressionsmodelle zur Vorhersage der Daten zu erstellen (Law 2017). Eine weitere Möglichkeit stellt die numerische Analyse im Form des euklidischen Abstand dar. Dieser beschreibt den quadratischen Abstand zwischen mehreren Punkten und ist nach Bosch (2021) für den zweidimensionalen Fall folgendermaßen definiert:

$$d(P1, P2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (11)$$

Die Quadrierung der Abstände führt zu einer stärkeren Gewichtung größerer Abstände als kleinerer (Bosch 2021). Mithilfe dieser Berechnung können Abweichungen der Werte unterschiedlicher Faktoren bestimmt und somit ein Vergleich durchgeführt werden. Die Visualisierung hingegen umfasst Horne und Seichter (2014) zufolge eine Vielzahl von graphischen Analysetechniken, welche ebenfalls zur Untersuchung von Daten eingesetzt werden können. Das Hauptziel der Visualisierung besteht in der Optimierung und Beschleunigung des Prozesses der Untersuchung von Daten, indem ein besseres Verständnis der Data-Farming-Prozesse vermittelt wird (Horne und Seichter 2014). Die Autoren weisen darauf hin, dass in der Praxis kaum ein Analyseprozess oder eine Präsentation von Analyseergebnissen ohne eine Visualisierung von Daten erfolgt. Sowohl die Analyse als auch die Visualisierung dienen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung (Horne und Seichter 2014). Aus diesem Grund werden den Autoren zufolge die Techniken der AVIZ in sämtlichen Teilprozessen des Data-Farming-Prozesses eingesetzt. Dies erfolgt sowohl bei der Erstellung von Szenarien und Modellen als auch während oder im Anschluss an die Durchführung von Experimenten (Horne und Seichter 2014).

5 Vorstellung der Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten

Wie in Kapitel 2 ausgeführt, stellen sowohl die Aggregation als auch die Disaggregation von Daten einen fundamentalen Teil der Leistungsbewertung einzelner Prozesse einer Fertigung in den verschiedenen hierarchischen Ebenen von produzierenden Unternehmen (siehe Abschnitt 3.1) dar. Die Verfügbarkeit der Daten im benötigten Detaillierungsgrad erweist sich in der Praxis häufig als Herausforderung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Daten einer Fertigung in den verschiedenen hierarchischen Ebenen des Unternehmens in aggregierter Form vorliegen (siehe Abschnitt 2.1). Die in Abschnitt 3.1 dargestellten, einzelnen Prozesse einer Fertigung bilden die Grundlage für die Aggregation von Daten. Die während eines Prozesses erfassten Daten werden mithilfe von geeigneten Methoden der Aggregation von Daten zu den in Abschnitt 3.2 vorgestellten KPIs aggregiert. Dieses Vorgehen dient der Komplexitätsreduktion in der Analyse einzelner Prozesse und soll die Entscheidungsfindung in den unterschiedlichen hierarchischen Ebenen eines Unternehmens unterstützen. Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, ist es jedoch in vielen Situationen erforderlich, diese aggregierten Daten durch Disaggregation in ihre ursprünglichen Elemente zu zerlegen. Die entstehenden Rohdaten ermöglichen eine detaillierte Analyse der einzelnen Prozesse innerhalb einer Fertigung. Um den Anforderungen an die unterschiedlichen Detaillierungsgrade von Daten einer Fertigung zu begegnen, werden geeignete Methoden zur Aggregation und Disaggregation eingesetzt. Die in Abschnitt 3.2 erläuterte Vorgehensweise zur Leistungsbewertung einer Fertigung entspricht einer gängigen Methode der Aggregation. Die vorliegenden Daten werden unter Zuhilfenahme einer Berechnungsvorschrift zu KPIs aggregiert. Eine weitere Herausforderung stellt die Identifikation einer geeigneten Methode zur Disaggregation dar, die sich je nach Anwendungsfall unterscheidet. In der Literatur werden verschiedene Methoden präsentiert, die sich in ihrer Vorgehensweise ähneln, jedoch eine hohe Variation hinsichtlich ihrer Umsetzung aufweisen. Der in Kapitel 4 vorgestellte Data-Farming-Prozess stellt eine standardisierte Vorgehensweise des Data Farming dar und ermöglicht die Generierung einer signifikanten Menge an Daten durch ein Simulationsmodell.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Hauptziel, ein geeignetes Simulationsmodell im Zuge eines Data-Farming-Prozesses zu identifizieren. Dieses Simulationsmodell dient potenziell zur Disaggregation aggregierter Daten einer Fertigungslinie in Form von KPIs. Zur Erreichung dieses Ziels wird im ersten Schritt ein vollständiger Prozess zur Aggregation und anschließender Disaggregation von Daten vorgestellt. Im ersten Schritt wird der in Abschnitt 4.2 vorgestellte Data-Farming-Prozess Loop of Loops in einer modifizierten Version erläutert, um im nächsten Schritt als Teilprozess in den gesamten Aggregations- und Disaggregationsprozesses eingeordnet zu werden. Der Aggregations- und Disaggregationsprozesses des ersten Schrittes in Abbildung 9 abgebildet und entspricht einer modifizierten Version des Aggregations- und Disaggregationsprozesses, welcher in Kapitel 2 erläutert und mithilfe von Abbildung 1 dargestellt ist.

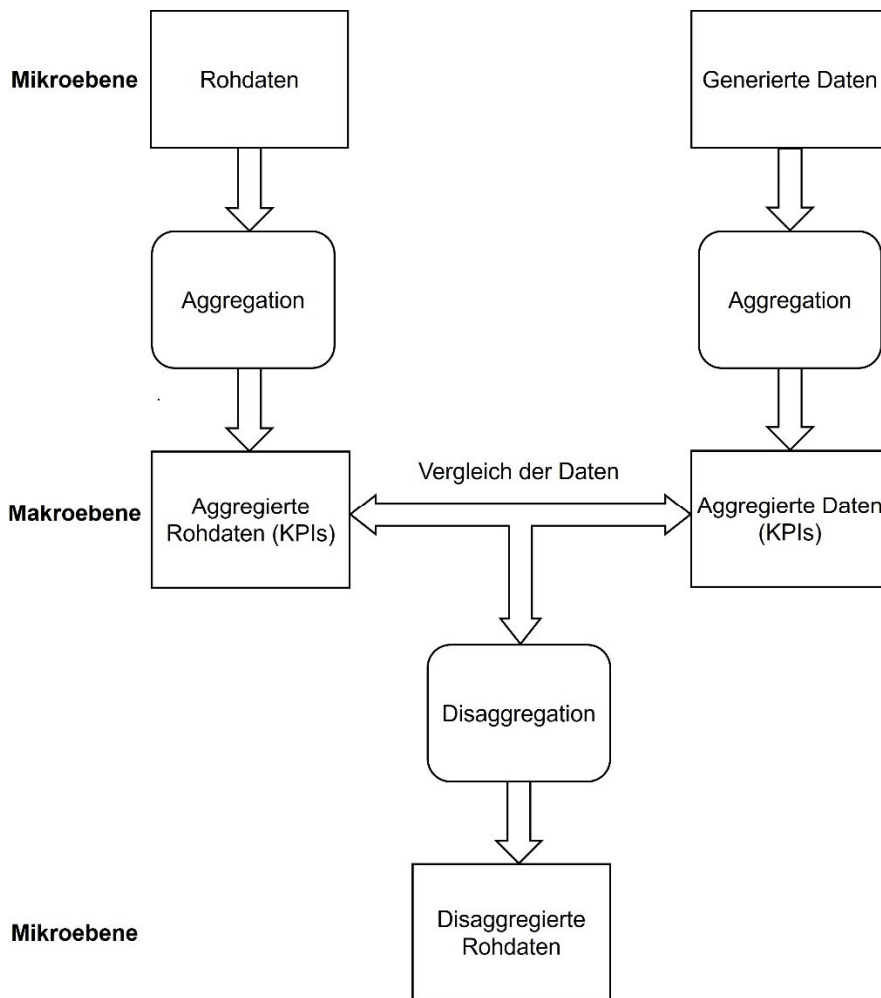


Abbildung 9: Vollständiger Prozess zur Aggregation und Disaggregation von Daten

Der in Abbildung 9 dargestellte Aggregations- und Disaggregationsprozess resultiert aus einer Modifikation des in Abbildung 1 abgebildeten Aggregations- und Disaggregationsprozesses aus Kapitel 2. In den weiteren Ausführungen wird der Aggregations- und Disaggregationsprozesses in Abbildung 1 als ursprünglicher Prozess und der in Abbildung 9 als modifizierter Prozess bezeichnet. Im Folgenden werden die wesentlichen Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Prozesse erörtert.

Eine Gemeinsamkeit beider Prozesse stellt deren grundlegende Vorgehensweise dar. Die Mikroebene fungiert sowohl beim ursprünglichen als auch beim modifizierten Prozess als Ausgangspunkt. Anschließend erfolgt eine Aggregation auf Makroebene, gefolgt von einer erneuten Disaggregation, die die Analyse wieder auf die Mikroebene zurückführt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die verwendeten Methoden bei der Aggregation und Disaggregation einen wesentlichen Unterschied darstellen. Weitere wesentliche Unterschiede zwischen beiden Prozessen beziehen sich auf den jeweiligen Gegenstand sowie das daraus resultierende Ziel der Aggregation und Disaggregation. Im ursprünglichen Prozess bildet ein Modell den Gegenstand der Aggregation und Disaggregation, während sich der modifizierte Prozess mit der Aggregation und Disaggregation von Daten befasst. Des Weiteren wird im ursprünglichen Modell das Ziel verfolgt, ein Mikromodell durch Aggregation zu vereinfachen, dieses aggregierte Makromodell im nachfolgenden Schritt zu lösen und anschließend zu disaggregieren, um einen Rückschluss auf die Lösung des Mikromodells zu ziehen. Folglich entspricht das Ziel des ursprünglichen Prozesses der Lösung eines vereinfachten Makromodells, um auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse Rückschlüsse auf das ursprüngliche Mikromodell zu ziehen. Das Ziel des modifizierten Prozesses besteht in der Aggregation von Rohdaten eines realen Systems,

welche anschließend mit Daten verglichen werden, die durch einen Data-Farming-Prozess generiert und ebenfalls aggregiert werden. Unter Berücksichtigung bestimmter Vergleichskriterien wird sichergestellt, dass die generierten Daten hinreichend genau den realen Rohdaten entsprechen, wodurch potenziell die Disaggregation der Daten ermöglicht wird.

Der in Abbildung 9 dargestellte modifizierte Aggregations- und Disaggregationsprozess wird im weiteren Verlauf als Gesamtprozess bezeichnet. Im Folgenden wird der Gesamtprozess in einer sukzessiven Vorgehensweise präsentiert. Der Ausgangspunkt des Gesamtprozesses entspricht der Mikroebene. Ausgehend von dieser Ebene umfasst der erste Teilprozess zwei parallele und nahezu identische Vorgänge der Aggregation von Daten. Der einzige Unterschied betrifft die beiden unterschiedlichen zugrunde liegenden Daten. Zum einen erfolgt die Erfassung von Rohdaten eines realen Systems, welches einer Fertigungslinie zuzuordnen ist. Zum anderen werden im Rahmen eines Data-Farming-Prozesses Daten generiert. Die Erfassung der Rohdaten erfolgt mittels geeigneter Sensorik während verschiedener Prozesse innerhalb des betrachteten Systems einer Fertigungslinie. Im Rahmen der Produktion eines Unternehmens stellen die Rohdaten beispielsweise die während des Fertigungsprozesses einer Maschine (siehe Abschnitt 3.1) erfassten quantitativen oder zeitbezogenen Daten dar, welche in Abschnitt 3.2 vorgestellt werden. Die Erfassung einer beträchtlichen Anzahl an Rohdaten während eines Fertigungsprozesses impliziert gemäß den Aussagen in Abschnitt 2.1 in vielen Situationen die Notwendigkeit einer Zusammenfassung dieser Daten, um sich auf Makroebene einen Überblick über das betrachtete System zu verschaffen. Die generierten Daten werden mithilfe eines Simulationsexperiments im Zuge eines Data-Farming-Prozesses erzeugt. Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, wird durch den Data-Farming-Prozess ein möglichst breites Spektrum an Faktoren betrachtet, wodurch die Analyse einer Vielzahl potenzieller Ergebnisse ermöglicht wird. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die generierten Daten möglichst genau dem abgebildeten System aus dem ersten Teilprozess entsprechen. Sowohl die Rohdaten des realen Systems als auch die durch das Data Farming generierten Daten stellen die Grundlage für alle weiteren Teilprozesse dar.

Ausgehend vom Ausgangspunkt auf Mikroebene erfolgt sowohl für die Rohdaten als auch für die generierten Daten die Aggregation auf identische Art und Weise. Unter Zuhilfenahme eines geeigneten Aggregationsverfahrens werden die Daten in die Makroebene überführt. Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, wird bei der Aggregation eine Summenstruktur durch die Zusammenfassung verschiedener Elemente mit ähnlicher Struktur auf einer Ebene erzeugt und dienen als Grundlage zur Bewertung der Leistung. Die Aggregation stellt folglich eine Form der Zusammenfassung dar, welche unter Nutzung standardisierter Berechnungsvorschriften umgesetzt wird. Durch diese Berechnungsvorschriften entstehen beispielsweise die in Abschnitt 3.2 vorgestellten KPIs.

Im nachfolgenden Teilprozess erfolgt ein Vergleich der generierten Daten mit den Rohdaten des realen Systems. Der Vergleich wird in aggregierter Form auf Makroebene mithilfe geeigneter mathematischer Methoden durchgeführt. Es erfolgt eine Evaluierung der Fragestellung, inwieweit die generierten Daten in der Lage sind, die Rohdaten widerzuspiegeln. In diesem Schritt wird die Funktionsfähigkeit der Methode überprüft. Die zentrale Fragestellung, die es im Rahmen dieses Teilprozesses zu beantworten gilt, ist, ob das mithilfe der Methode die aggregierten Rohdaten hinreichend genau widerzuspiegeln. Ist die Evaluierung erfolgreich, wird potenziell eine Disaggregation der Daten ermöglicht. Dies begründet sich darin, dass bei einer Übereinstimmung der aggregierten Rohdaten und der generierten Daten eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine große Ähnlichkeit der zugrunde liegenden Daten besteht. Eine Disaggregation ist erforderlich, da in vielen Situationen die Notwendigkeit besteht, die Aggregation rückgängig zu machen oder die Daten nur in aggregierter Form vorliegen (siehe Abschnitt 2.2). Die Disaggregation von Daten stellt gemäß Abschnitt 2.2 eine Umkehrung der Aggregation dar und erlaubt eine Analyse der Daten in einem höheren Detaillierungsgrad. Dazu werden die aggregierten Elemente auf Makroebene in ihre ursprünglichen Elemente auf Mikroebene zerlegt. Wie oben erwähnt, erfolgt die Generierung von Daten im Rahmen eines Data-Farming. Im nachfolgenden Abschnitt wird eine modifizierte Version des in Abschnitt 4.2 erläuterten

spezifischen Data-Farming-Prozesses Loop of Loops vorgestellt, welche Abbildung 10 dargestellt ist. Anschließend wird dieser spezifische Data-Farming-Prozess in den gesamten Aggregations- und Disaggregationsprozess eingeordnet wird.

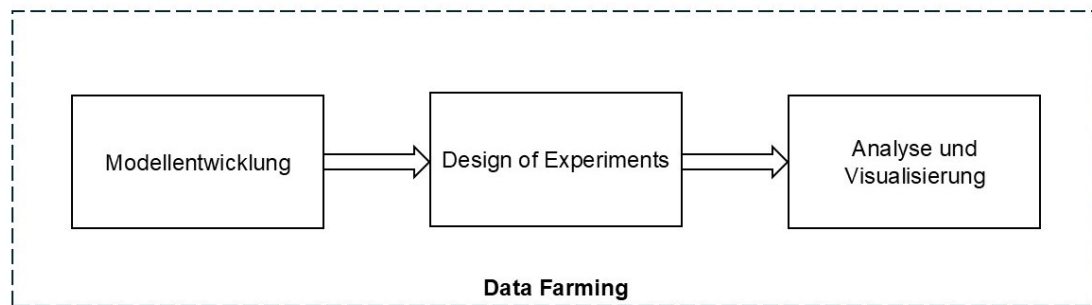


Abbildung 10: Linearer Data-Farming-Prozess: Loop of Loops

Der in Abbildung 10 dargestellte Data-Farming-Prozess entspricht einer modifizierten linearen Version des in Abschnitt 4.2 vorgestellten Data-Farming-Prozesses Loop of Loops. Zu Beginn sei zu erwähnen, dass der in Abschnitt 4.2.1 erläuterte erste Teilprozess des RSP aus Gründen der Komplexitätsreduktion vernachlässigt wird. Es wird lediglich ein spezifisches Szenario betrachtet und in ein Simulationsmodell überführt. Das HPC (siehe Abschnitt 4.2.4) wird ebenfalls vernachlässigt, da es aufgrund der geringen Menge an Daten, die im Zuge dieser Arbeit generiert werden, nicht von Bedeutung ist. Daher wird der üblicherweise iterative Data-Farming-Prozess im Rahmen dieser Arbeit als ein linearer Prozess bestehend aus ME, DoE und AVIZ behandelt. Nachfolgend wird der gesamte Data-Farming-Prozess und anschließend alle Teilprozesse sukzessive erläutert. Der Gesamtprozess kann in drei Teilprozesse unterteilt werden: zunächst die ME, dann das DoE und schließlich die AVIZ, in welcher die Ergebnisse des Data-Farming integriert werden. Der erste Teilprozess des linearen Data-Farming-Prozesses umfasst die Modellierung des abgebildeten Systems einer Fertigungslinie (siehe Abschnitt 4.2.2). Dies ist erforderlich, um eine möglichst realitätsnahe Beschreibung aller dynamischen Prozesse des Systems zu erhalten, welche die Grundlage für die nachfolgende, detaillierte Analyse bildet. Im nachfolgenden Teilprozess erfolgt die Vorstellung eines geeigneten Konzepts zur Durchführung von Experimenten, welches auf dem im vorherigen Schritt erstellten Simulationsmodell basiert. Das hier präsentierte Konzept entspricht der in Abschnitt 4.2.3 dargelegten Methode des LHS für das DoE. Dieses dient der systematischen Planung und anschließenden Durchführung eines Experiments. Die sorgfältige Auswahl der Variation einzelner Faktoren zielt darauf ab, möglichst viele realistische und im ausgewählten Kontext passende Szenarien abzudecken, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Realität übertragbar sind. Der letzte Schritt des Data-Farming-Prozesses erfolgt im Anschluss an die Durchführung des Experiments und stellt die AVIZ der Ergebnisse dar (siehe Abschnitt 4.2.5). Im letzten Teilschritt erfolgt ein Vergleich der im Zuge des Experiments generierten Daten mit den Rohdaten der betrachteten Fertigungslinie unter Zuhilfenahme geeigneter statistischer Methoden. Dieser Vergleich dient der Evaluierung des Erfolgs der Disaggregation der aggregierten Rohdaten durch Data Farming. Dazu wird überprüft, in welchem Maße die generierten Daten den Rohdaten der Fertigungslinie entsprechen.

Im Folgenden wird der erste Teilschritt des in Abschnitt 4.2 präsentierten Data-Farming-Prozesses detailliert erläutert. Im vorliegenden Teilschritt liegt der Fokus auf der ME eines Simulationsmodells. Wie in Abschnitt 4.2.2 dargelegt, entspricht der erste Schritt der ME der Identifikation aller Bedürfnisse und Fragestellungen der Adressaten des Data-Farming-Prozesses. Dazu erfolgt eine Referenzierung der in Abschnitt 3.1 präsentierten Modelle zu den Grundlagen der Fertigungsprozesse (siehe Abbildung 2) sowie der funktionalen Hierarchie in Fertigungsunternehmen (siehe Abbildung 3). Mithilfe dieser Grundlagen werden die Bedürfnisse und Fragestellungen der Adressaten in Bezug auf Fertigungsprozesse in die hierarchischen

Ebenen eines produzierenden Unternehmens eingeordnet. Für das in diesem Kontext betrachtete System einer Fertigungslinie werden alle relevanten Faktoren identifiziert und entsprechend der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Vorgehensweise der ME in ein Simulationsmodell überführt. Dazu ist ein korrektes Verständnis des abzubildenden Systems erforderlich. Zu diesem Zweck werden die in Kapitel 3 vorgestellten Modelle zur Definition, Strukturierung und Bewertung von Prozessen innerhalb einer Fertigung herangezogen. Auf Grundlage dieser Inhalte erfolgt zunächst die Definition von Fertigungsprozessen für den vorliegenden Anwendungsfall. Im Anschluss werden diese in eine strukturierte Fertigungsform überführt und schließlich mithilfe von Berechnungsvorschriften zu Kennzahlen aggregiert. Mithilfe des beschriebenen Vorgehens werden ebenfalls Anforderungen an das Simulationsmodell abgeleitet und geeignete Annahmen getroffen. Die korrekte Auswahl der Anforderungen zielt darauf ab, eine möglichst realitätsnahe Abbildung des betrachteten Systems einer Fertigungslinie in ein Simulationsmodell zu überführen. Die Formulierung geeigneter Annahmen dient der Komplexitätsreduktion, um nur genau die Aspekte des betrachteten Systems zu untersuchen, die für die im Rahmen dieser Arbeit behandelte Fragestellung von Relevanz sind. Im Anschluss erfolgt eine Zusammenfassung aller abgeleiteten Anforderungen sowie getroffener Annahmen, um die darauffolgende Überführung in ein geeignetes Simulationsmodell nachvollziehbar zu gestalten.

Der zweite Teilschritt des Data-Farming-Prozesses beinhaltet das DoE. Im vorliegenden Teilschritt erfolgt die Entwicklung eines Konzepts zur Durchführung eines Experiments, welches auf dem im vorherigen Teilschritt erstellten Simulationsmodell basiert. Wie in Abschnitt 4.2.3 dargelegt, dient das DoE der systematischen Planung eines Experiments. Im Rahmen des DoE erfolgt eine sorgfältige Auswahl an DPs, da komplexe Simulationsmodelle von einer Vielzahl von Faktoren abhängen und die Berücksichtigung aller möglichen Faktoren derzeit technisch nicht realisierbar ist (siehe Abschnitt 4.2.3). Die Ableitung von Anforderungen und das Treffen von Annahmen im Rahmen der ME impliziert bereits eine Filterung der für das Simulationsmodell geeigneten Faktoren, welche während des Experiments variiert werden. In Übereinstimmung mit den Ausführungen in Abschnitt 4.2.3 erfolgt die Durchführung des DoE in Form des LHS, da bei dieser Methode des DoE ein möglichst breites Spektrum an Faktoren betrachtet und gleichzeitig das Wachstum der DPs kontrolliert werden soll. Das Ziel des LHS besteht in der Erzielung einer zufälligen Verteilung der Ausprägungen jedes einzelnen Faktors in gleichmäßigen Abständen über den gesamten Wertebereich. Die Anzahl der ausgewählten DPs bestimmt die Feinheit der Unterteilung des Wertebereichs. Folglich muss eine geeignete Anzahl an DPs gewählt werden, sodass die Unterteilung des Wertebereichs fein genug ist und trotzdem das Wachstum der DPs und daraus resultierende Laufzeiten kontrollierbar sind. Um alle möglichen DPs festzuhalten, wird im Vorlauf des Experiments die DM erstellt. Die Erstellung der DM erfolgt gemäß der in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Vorgehensweise und entspricht bei korrekt durchgeführter Vorgehensweise der in Tabelle 6 dargestellten Form. Die in der DM enthaltenen DPs dienen als Grundlage für ein nachfolgendes Simulationsexperiment. Dazu wird jeder DP, welcher eine Zeile in der DM entspricht, sukzessive abgearbeitet.

Im letzten Teilschritt des Data-Farming-Prozesses erfolgt gemäß den Aussagen in Abschnitt 4.2.5 die AVIZ der während des Experiments erzielten Simulationsergebnisse. Die AVIZ entspricht einer Evaluation und verfolgt das übergeordnete Ziel, zu analysieren und zu bewerten, inwiefern das im Zuge des Data-Farming-Prozesses erstellte Simulationsmodell in der Lage ist, das durch das Modell abgebildete reale System adäquat zu repräsentieren. Um das definierte Ziel zu erreichen, erfolgt im ersten Schritt der Evaluation eine detaillierte numerische Analyse und Bewertung repräsentativer Werte zur Beschreibung der einzelnen Elemente des Simulationsmodells unter Zuhilfenahme geeigneter Methoden. Die hier beschriebene Vorgehensweise zielt darauf ab, mithilfe etablierter mathematischer Methoden eine nachvollziehbare und vergleichbare Analyse und Bewertung zu gewährleisten. Im Zuge dieser Arbeit erfolgt eine Evaluierung der Simulationsergebnisse durch einen Vergleich der während des Experiments generierten Daten mit den Rohdaten der Fertigungslinie. Zur Komplexitätsreduktion werden die Daten der Fertigungslinie im Zuge dieser Arbeit in aggregierter Form verglichen. Im ersten Schritt erfolgt eine Aggregation der generierten Daten der Fertigungslinie. Im Anschluss werden die aggregierten Daten mit den auf identische Weise aggregierten

Rohdaten der Fertigungslinie verglichen. Der Zweck dieses ersten Schrittes besteht darin, das spezifische Muster des LHS zu identifizieren, dessen Daten die Rohdaten der Fertigungslinie am besten reproduziert. Der Vergleich wird den Ebenen zwei und drei der in Abbildung 4 dargestellten Kategorisierung von KPIs durchgeführt. Beim Vergleich in Ebene zwei werden die aggregierten Maschinendaten pro Fertigungsauftrag anhand grundlegender KPIs, und in Ebene drei anhand komplexerer KPIs verglichen. Die Umsetzung des Vergleichs basiert auf der Bildung der euklidischen Distanz zwischen den aggregierten Werten der generierten Daten der einzelnen Muster des LHS und den aggregierten Werten der Rohdaten. Der geringste Abstand zwischen den aggregierten Werten entspricht dem Muster, welches die Rohdaten der Fertigungslinie in besonders adäquater Weise repräsentiert.

Im Anschluss an die numerische Analyse und Bewertung erfolgt der zweite Schritt der Evaluation. Der zweite Teilschritt beinhaltet die Visualisierung, d. h. die graphische Darstellung der unmittelbaren Ergebnisse des Simulationsversuchs bzw. der bereits durch statistische Methoden ausgewerteten Resultate. Die graphische Darstellung der Simulationsergebnisse dient dem Zweck, einen schnellen und umfassenden Überblick über eine Vielzahl an generierten Daten zu gewinnen, um auf diese Weise eine zeitlich effiziente Evaluierung des Experiments zu ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit erfolgt eine verkürzte Behandlung dieses Teilschritts. Der Schwerpunkt liegt auf der numerischen Analyse, da diese eine detailliertere Auswertung der Ergebnisse des Simulationsexperiments ermöglicht und somit einen vielversprechenderen Ansatz zur Evaluierung der Simulationsergebnisse darstellt als die hier beschriebene Visualisierung. Im Rahmen wird eine graphische Darstellung der finalen Ergebnisse der AVIZ präsentiert, um eine Einschätzung darüber zu gewinnen, inwiefern die Daten des im ersten Schritt der AVIZ identifizierten DP die Rohdaten am besten repräsentieren. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl die Analyse als auch die Visualisierung der Evaluierung des Data-Farming-Prozesses dienen, welcher einen wesentlichen Element der in diesem Kapitel vorgestellten Methodik eines Aggregations- und Disaggregationsprozesses darstellt. Im nachfolgenden Kapitel erfolgt eine schrittweise Umsetzung der in diesem Kapitel vorgestellten Methodik anhand eines Fallbeispiels. Dieses dient der Evaluierung der Funktionsfähigkeit des theoretischen Teils der Methodik durch den praktischen Teil einer exemplarischen Anwendung. Dieser spezifische Data-Farming-Prozess wird im nächsten Schritt in den in Abbildung 9 abgebildeten Aggregations- und Disaggregationsprozess eingeordnet und ist in der nachfolgenden Abbildung 11 dargestellt.

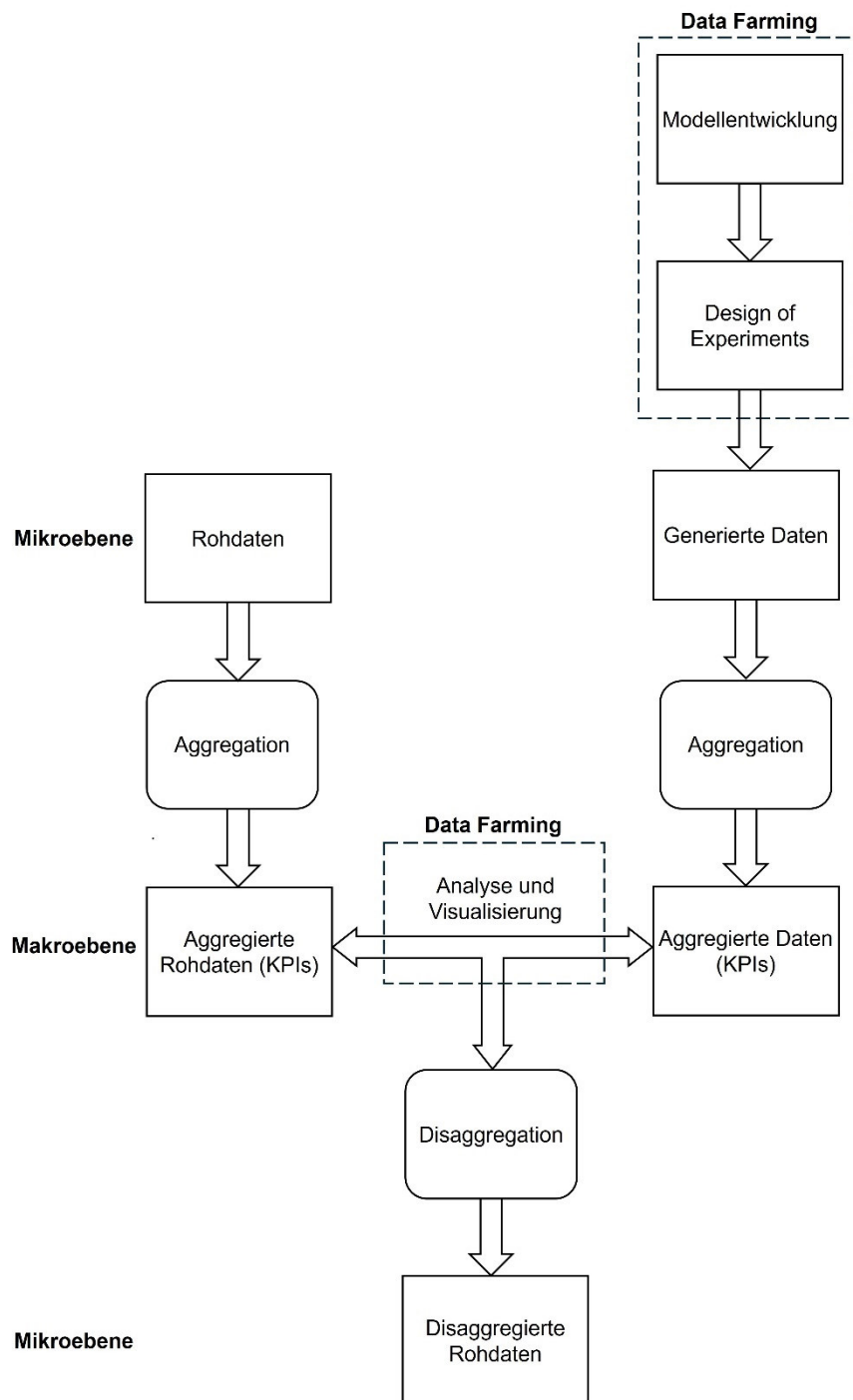


Abbildung 11: Einordnung des linearen Data-Farming-Prozesses Loop of Loops in den gesamten Aggregations- und Disaggregationsprozess

In Abbildung 11 wird der zuvor erläuterte lineare Data-Farming-Prozess Loop of Loops in den gesamten Aggregations- und Disaggregationsprozess integriert. Im Rahmen der Integration erfolgt eine Aufteilung der Elemente des in Abbildung 10 dargestellten Data-Farming-Prozesses mit dem Ziel der Einbindung in den in Abbildung 9 dargestellten Aggregations- und Disaggregationsprozess. Eine direkte Integration des linearen Prozesses in den Aggregations- und Disaggregationsprozess ist nicht möglich, da zwischen der Generierung der Daten durch das Simulationsexperiment und der AVIZ der Daten eine Aggregation stattfindet. Die Annahme, dass Daten häufig ausschließlich in aggregierter Form vorliegen, sowie die daraus abzuleitende Frage, inwiefern eine Reproduktion der aggregierten Rohdaten durch Data-Farming

möglich ist, sind die Gründe für diese Vorgehensweise bei der Integration des linearen Data-Farming-Prozesses in den gesamten Aggregations- und Disaggregationsprozess. Die ersten beiden Schritte des Data-Farming-Prozesses, nämlich die ME und das DoE, werden bei der Generierung der Daten zugrunde gelegt, da diese beiden Schritte die fundamentalen Elemente der eigentlichen Generierung von Daten darstellen. In der Folge werden die generierten Daten mittels Berechnungsvorschriften aggregiert, um im nächsten Schritt mit den Rohdaten des betrachteten Systems verglichen werden zu können. Somit entspricht das letzte Element des zu integrierenden Data-Farming-Prozesses der AVIZ. Die AVIZ entspricht im Aggregations- und Disaggregationsprozess dem Vergleich der aggregierten Rohdaten mit den aggregierten generierten Daten. Durch den Vergleich soll evaluiert werden, inwiefern die aggregierten Rohdaten des betrachteten Systems reproduziert werden können und eine potenzielle Disaggregation ermöglicht werden kann. In diesem Zusammenhang lässt sich der Data-Farming-Prozess Loop of Loops in den zu Beginn dieses Kapitels vorgestellten Aggregations- und Disaggregationsprozess einordnen. Im nachfolgenden Kapitel erfolgt die Umsetzung die Implementierung des Simulationsmodells und der Planung der Durchführung des Simulationsexperiments für das Data Farming. Dies entspricht der Umsetzung der umfangreichen Teilprozesse des Data-Farming der ME und des DoE (siehe Abbildung 11) in einem eigenständigen Kapitel.

6 Entwicklung einer Simulation im Rahmen des Data Farming

Die Entwicklung einer Simulation erfolgt im Rahmen der ME und des DoE als Teilprozesses des Data Farming der in Abschnitt 5.1 vorgestellten prozessualen Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten. Dafür erfolgt zunächst die ME. Das erstellte Simulationsmodell wird im Anschluss im Zuge des DoE für ein Experiment genutzt. Gemäß den Aussagen aus Abschnitt 4.2.2 umfasst die ME im ersten Schritt die Ableitung der Fragestellung und Identifikation der Adressatenbedürfnisse zur Disaggregation von Daten einer Fertigung eines produzierenden Unternehmens. Anschließend werden spezifische Anforderungen an das Simulationsmodell mithilfe der Grundlagen aus Kapitel 2 und Kapitel 3 abgeleitet. Auf Basis der Inhalte der Abschnitte 4.2.2 und 4.2.3 erfolgt im Anschluss die eigentliche Implementierung des Simulationsmodells im Rahmen der ME sowie die Planung und Implementierung des DoE zur Durchführung des Simulationsexperiments unter Verwendung des zuvor implementierten Simulationsmodells.

6.1 Präzisierung der Fragestellung und Identifikation der Bedürfnisse

Im ersten Schritt der ME eines Simulationsmodells erfolgt gemäß den Aussagen in Abschnitt 4.2.2 die Identifikation einer passenden Fragestellung, welche aus dem Hauptziel dieser Arbeit abgeleitet wird. Anschließend werden die Adressaten und die jeweiligen Bedürfnisse der Adressaten, welche zu dieser Fragestellung führen, abgeleitet. Abschließend werden Anforderungen aus den Bedürfnissen der Adressaten an das Simulationsmodell zur Beantwortung der Fragestellung abgeleitet. Das Hauptziel dieser Arbeit besteht in der Identifikation eines geeigneten Simulationsmodells, um die Disaggregation aggregierter Daten einer Fertigungslinie in Form von KPIs (siehe Kapitel 1) zu ermöglichen. Daraus lässt sich die Fragestellung ableiten, inwiefern es mithilfe eines Simulationsmodells und durch ein Experiment im Rahmen des Data-Farming-Prozesses möglich ist, Rohdaten einer Fertigungslinie zu generieren, die eine hohe Übereinstimmung mit den tatsächlichen, realen Daten der Fertigungslinie aufweisen und somit eine möglichst exakte Nachbildung der Realität darstellen. Die Adressaten dieser Frage sind im funktionalen Hierarchiemodell in Fertigungsunternehmen (siehe Abschnitt 3.1) in den unteren Ebenen 1 und 2 zu verorten. Innerhalb dieser Hierarchieebenen besteht die Notwendigkeit, aggregierte Daten einer höheren Ebene in einer niedrigeren Ebene in einem höheren Detaillierungsgrad zu betrachten (siehe Abschnitt 2.2). Durch die Disaggregation wird eine detaillierte Analyse der Rohdaten einzelner Prozesse sowie eine Bewertung und Optimierung dieser Prozesse ermöglicht. Die dadurch erzielten Verbesserungen wirken sich wiederum indirekt auf die Arbeit in der Ebene der Fertigungsprozesse aus. Die Ebene 2 stellt somit einen direkten, die Ebene 1 einen indirekten Adressaten der oben formulierten Fragestellung dar. Im Folgenden werden die Bedürfnisse der Adressaten mithilfe des funktionalen Hierarchiemodells in Fertigungsunternehmen abgeleitet.

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, werden sowohl in Ebene 3 der Unternehmensführung als auch in Ebene 2 des MOM im Rahmen des funktionalen Hierarchiemodells aggregierte Daten, beispielsweise in Form von Kennzahlen, verwendet. Die genannten Kennzahlen entsprechen den in Abschnitt 3.2 erläuterten grundlegenden und komplexen KPIs. In den Ebenen 2 und 3 eines produzierenden Unternehmens entstehen grundlegende und komplexe KPIs durch einfache und mehrfache Aggregation von Daten einer Fertigung. Der durch die Aggregation geschaffene Überblick über die Daten dient hierbei der Reduktion der Komplexität des betrachteten Systems (siehe Abschnitt 2.1). Sowohl bei der mehrfachen Aggregation zur Bestimmung komplexer KPIs als auch bei einer einmaligen Aggregation zu grundlegenden KPIs gehen Informationen über den Ursprung der einzelnen aggregierten Elemente verloren. Um die Quelle von Fehlern, Engpässen oder einer unzureichenden Leistung einer Maschine zu identifizieren, ist somit eine Betrachtung der aggregierten Daten in einem höheren Detaillierungsgrad erforderlich (siehe Abschnitt 2.2). Sofern Daten einer Fertigung lediglich in Form von aggregierten Kennzahlen zur Verfügung stehen, lässt sich eine Problemstellung ableiten, die die Annahme des Bedürfnisses der Adressaten nach der Disaggregation von Daten bestätigt. Die Analyse

der einzelnen Elemente der Fertigung, aus denen die komplexen oder grundlegenden KPIs gebildet werden, erweist sich in den unteren Hierarchieebenen in vielen Konstellationen als von großem Stellenwert. Diesbezüglich ist zu vermerken, dass in Situationen, in denen Daten einer Fertigung in den oberen Hierarchieebenen lediglich in Form von aggregierten Kennzahlen vorliegen, die Analyse der Daten beeinträchtigt wird.

Zusammenfassend lassen sich bei den Adressaten auf den unteren beiden Ebenen des funktionalen Hierarchiemodells eines Fertigungsunternehmens Bedürfnisse identifizieren, welche aus der aufgezeigten Fragestellung zur Disaggregation von Daten resultieren. Die Disaggregation von Daten von Ebene 3 in Ebene 2 oder 1 im funktionalen Hierarchiemodell entspricht entweder der Zerlegung von Daten in Form von komplexen KPIs in grundlegende KPIs oder der Zerlegung grundlegender KPIs in ihre ursprüngliche Rohform. Die genannten Schritte der Disaggregation erlauben eine detailliertere Analyse der Fertigung, sodass eine Analyse der Fertigungsprozesse in einem höheren Detaillierungsgrad möglich ist. Dies resultiert in einer vereinfachten Analyse, Bewertung und Optimierung der zugrundeliegenden Prozesse, wodurch die direkt damit verbundenen Tätigkeiten im MOM und daraus resultierend auch indirekt die in der Ebene der Fertigungsprozesse unterstützt werden. Folglich kann bestätigt werden, dass die Ebenen 1 und 2 des funktionalen Hierarchiemodells als potenzielle Adressaten der Fragestellung nach der Disaggregation von Daten infrage kommen. Im Anschluss an die Identifikation einer Fragestellung und den dazugehörigen Bedürfnissen der Adressaten werden spezifische Anforderungen an das Simulationsmodell abgeleitet.

6.2 Ableiten und Spezifikation von Anforderungen an das Simulationsmodell

Im Anschluss an die Identifikation der Fragestellung sowie der dazugehörigen Bedürfnisse der Adressaten und der daraus resultierenden Anforderungen an das Simulationsmodell folgt in diesem Abschnitt der zweite Schritt der ME. Entsprechend den spezifischen Anforderungen der Adressaten erfolgt die Transformation der Fragestellungen und Bedürfnisse in ein geeignetes Simulationsmodell (siehe Abschnitt 4.2.2). Die strukturierte Erstellung des verfolgt das Ziel, das System einer Fertigung mit hinreichender Genauigkeit zur Realität umzusetzen, um auf diese Weise die oben formulierte Fragestellung zu beantworten. Dazu werden im zweiten Teilschritt der ME unter Zuhilfenahme der in Kapitel 3 vorgestellten Systemmodelle einzelner Prozesse und ihrer Bewertung sowie der Struktur einer Fertigung ebenfalls Anforderungen an die einzelnen Elemente des Simulationsmodells abgeleitet. Des Weiteren werden weitere Anforderungen für das Simulationsmodell getroffen, um die Komplexität des realen Systems zu reduzieren und nur die zu interessierenden Teile des betrachteten Systems zu untersuchen. Die genannten Anforderungen lassen sich demnach nicht aus der übergeordneten Fragestellung und den Bedürfnissen ableiten, sondern aus den einzelnen Elementen einer Fertigung. Im Folgenden werden acht Anforderungen an das Simulationsmodell abgeleitet und spezifiziert. Diese dienen der Umsetzung eines übergeordneten Ziels der ME, nämlich der möglichst exakten Umsetzung des Systems einer Fertigungslinie in ein experimentierfähiges Modell im Rahmen des Data Farming.

Anforderung 1: Das Simulationsmodell muss in der Lage sein, unterschiedliche Rohdaten für jeden Prozess innerhalb der Fertigungslinie zu generieren

In Übereinstimmung mit den zuvor dargelegten Bedürfnissen der Adressaten besteht für jedes Element der Fertigungslinie die Anforderung, Rohdaten jedes einzelnen Prozesses einer Maschine bis zur Fertigstellung eines Fertigungsauftrags zu generieren. Die zugrunde liegenden Rohdaten des betrachteten Systems liegen für einen Fertigungsauftrag vor und sollen für jeden Auftrag unterschiedlich sein, um eine möglichst realitätsnahe Repräsentation der Daten einer Fertigungslinie zu gewährleisten.

Im Anschluss an die erste Anforderung wird in den folgenden Anforderungen zwei und drei die grundlegenden Elemente der zu generierenden quantitativen und zeitbezogenen Daten festgelegt. Dafür erfolgt im ersten Schritt eine Herleitung gefolgt von einer Erläuterung der benötigten Grundelemente der Fertigung. Die Grundelemente zeichnen sich dadurch aus, dass sich alle weiteren Elemente aus ihnen bestimmen lassen. Die einzelnen Elemente der zur Bewertung benötigten Leistungskennzahlen in Form von KPIs (siehe Abschnitt 3.2) dienen dabei als Grundlage für die Ableitung der benötigten Elemente, für die durch das Simulationsmodell Daten generiert werden sollen. Daher erfolgt zunächst eine Erläuterung der Kategorisierung von KPIs gemäß der in Abbildung 4 dargestellten Struktur. Die Kategorisierung beginnt auf der untersten Ebene mit der Erfassung von Daten, die auf der nächsten Ebene zu grundlegenden KPIs und auf der obersten Ebene zu komplexen KPIs aggregiert werden. Anschließend erfolgt eine Erläuterung der komplexen KPIs, um diese in ihre einzelnen Elemente, die grundlegenden KPIs, zu zerlegen. Daraufhin werden die grundlegenden KPIs erläutert und ebenfalls in ihre einzelnen Elemente zerlegt. Die Elemente der grundlegenden KPIs entsprechen wiederum Grundelementen, die direkt während des Herstellungsprozesses erfasst werden, sowie weiteren Elementen, die aus diesen Grundelementen gebildet werden. Mithilfe dieser Grundelemente können somit alle weiteren Elemente und Kennzahlen des Prozesses bestimmt werden. Für die ME des Simulationsmodells werden auf dieser Grundlage weitere Anforderungen abgeleitet.

Die unterste Ebene der in Abbildung 4 dargestellten Struktur zur Kategorisierung von KPIs stellt die Datenebene dar. In dieser Ebene wird eine Vielzahl von Daten mithilfe geeigneter Sensorik in einem Informationssystem erfasst und verarbeitet. Die Ausprägungen dieser Daten entsprechen quantitativen Daten, also Daten, die sich auf eine Menge in einem bestimmten Kontext beziehen, oder zeitbezogenen Daten. Das Informationssystem erfasst und verarbeitet die Daten auf der untersten Ebene und stellt die Verbindung zwischen den verschiedenen Ebenen her. Diese grundlegenden KPIs können in die drei Kategorien Qualität, Produktivität und Wartung unterteilt werden und spiegeln in den meisten Fällen die Leistung in einer dieser drei Kategorien wieder. Im Folgenden werden nur die KPIs für die Kategorien Qualität und Produktivität betrachtet. Die oberste Ebene der in Abbildung 4 dargestellten Struktur bilden die komplexen KPIs. Komplexe KPIs geben einen Überblick über die gesamte Leistung des betrachteten Systems und werden durch Aggregation mehrerer grundlegender KPIs gebildet. Da die komplexen KPIs aus mehreren grundlegenden KPIs bestehen, repräsentieren sie mehr als eine der drei Kategorien. Da die grundlegenden KPIs auf die Kategorien Qualität und Produktivität Bezug nehmen, gilt dies auch für die komplexen KPIs. Die grundlegenden KPIs stellen somit die erste Ebene der Aggregation dar und die komplexen KPIs die zweite Ebene der Aggregation.

Der im Zuge dieser Arbeit betrachtete komplexe KPI stellt die OEE dar (siehe Tabelle 5). Dieser wird entsprechend dem Anhang A in zwei Teilen definiert. Zum einen mit Bezug auf den Inhalt und zum anderen über den Kontext. Die OEE wird auch als Gesamtanlageneffektivität bezeichnet, da sie einen Überblick über die gesamte Fertigung in einer Kennzahl bietet. Sie stellt ein Bewertungsmaß für die Produktivität einer gesamten Fertigung dar, indem sie drei grundlegende KPIs verbindet. Die OEE wird aus dem Produkt dreier grundlegender KPIs der Verfügbarkeit, Effektivität und Qualitätsrate gebildet.

Die Verfügbarkeit und Effektivität entsprechen der Kategorisierung grundlegender KPIs für die Produktivität (siehe Abbildung 4). Unter Verfügbarkeit wird das Verhältnis der Istzeit der Fertigung zur Betriebsollzeit verstanden, welches die zeitliche Effizienz einer Maschine quantifiziert (siehe Anhang B). Die Istzeit der Fertigung entspricht der tatsächlichen Zeit, in der eine Maschine wertschöpfende Tätigkeiten durchführt, und wird unmittelbar während des Fertigungsprozesses erfasst. Der Begriff der Betriebsollzeit bezeichnet hingegen die geplante Nutzungszeit einer Maschine pro Auftrag und wird im Rahmen eines Fertigungsauftrages vorgegeben. Die Effektivität wird durch das Verhältnis des Produktes Fertigungszeit pro Einheit und der produzierten Gesamtmenge zur Istzeit der Fertigung gebildet (siehe Anhang C). Unter der Fertigungszeit pro Einheit wird die geplante Zeit der Fertigung für ein Werkstück oder Teil verstanden. Der Begriff der produzierten Gesamtmenge beschreibt die gesamte im Rahmen

eines Fertigungsauftrages produzierte Menge an Produkten. Die Istzeit der Fertigung entspricht erneut der tatsächlichen Zeit, in der eine Maschine wertschöpfende Tätigkeiten durchführt. Die Qualitätsrate wird als grundlegender KPIs für die Qualität eingeordnet. Sie wird aus dem Verhältnis der während eines Fertigungsauftrages fehlerfrei produzierten Produkte zu den insgesamt gefertigten Produkten gebildet (siehe Anhang D). Die fehlerfreien Produkte entsprechen dabei denjenigen Produkten, bei deren Fertigung keine Fehler entstanden sind. Unter den insgesamt gefertigten Produkten wird die Menge an Produkten verstanden, die im Rahmen eines Fertigungsauftrages vorgegeben ist und gefertigt werden sollen.

Im Rahmen der Ermittlung von KPIs werden für verschiedene Elemente einer Fertigung Daten erfasst oder durch einen Fertigungsauftrag vorgegeben. Aus den soeben definierten grundlegenden KPIs werden im nächsten Schritt die Grundelemente abgeleitet, mit denen alle weiteren KPIs ermittelt werden können. Dies begründet sich darin, dass manche Elemente durch den Fertigungsauftrag als gegeben anzusehen sind und andere Elemente unmittelbar während des Prozesses erfasst werden. Alle weiteren Elemente können auf Grundlage dieser Elemente bestimmt werden. Die einzelnen Daten, aus denen die grundlegenden KPIs gebildet werden, stellen sowohl quantitative als auch zeitbezogene Daten dar. Dies impliziert die grundlegende Anforderung, dass das zu erstellende Simulationsmodell die Generierung von Daten in diesen beiden Ausprägungen umfasst. Im Folgenden werden bestimmte Elemente der Ausprägungen der Daten als grundlegende Elemente bezeichnet. Des Weiteren wird angenommen, dass einige weitere Elemente durch einen Fertigungsauftrag als gegeben betrachtet werden können. Diese Elemente werden ebenfalls nachfolgend festgehalten.

Anforderung 2: Festlegung der grundlegenden Elemente der quantitativen Daten, welche durch das Data Farming generiert werden sollen

In Tabelle 2 sind die Elemente für die Erfassung quantitativer Daten dargestellt. Die grundlegenden Elemente der quantitativen Daten aus Tabelle 2 sind die fehlerfreien und fehlerbehafteten Produkte. Die Ausprägungen dieser Daten können unmittelbar während des Prozesses erfasst werden. Aus der Summe der Daten dieser beiden grundlegenden Elemente lässt sich die gesamte Anzahl der gefertigten Produkte berechnen. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass die gesamten gefertigten Produkte durch den auszuführenden Fertigungsauftrag gegeben sind. Aus diesen Aussagen lassen sich Anforderungen an das Simulationsmodell ableiten. Die grundlegenden Elemente der quantitativen Daten, welche mittels des Simulationsmodells generiert werden sollen, umfassen die fehlerbehafteten Produkte. Die Differenz der vorgegebenen gesamten gefertigten Produkte und der fehlerbehafteten Produkte ergibt die Menge an fehlerfreien Produkten, die im Rahmen des Auftrages gefertigt werden. Fehlerbehaftete Produkte stellen somit einen Teil der zu generierenden Daten im Rahmen des Data Farming dar. Auf dieser Basis werden alle weiteren Elemente mithilfe von Berechnungsvorschriften ermittelt.

Anforderung 3: Festlegung der grundlegenden Elemente der zeitbezogenen Daten, welche durch das Data Farming generiert werden sollen

Eine wesentlich größere Menge an Daten, die erfasst werden müssen, stellen die zeitbezogenen Maschinendaten dar. In Tabelle 2 sind die Elemente für die Erfassung zeitbezogener Daten dargestellt. Die grundlegenden Elemente dieser Daten sind demnach die Istzeiten der Fertigungszeit, der Rüstzeit, der Ausfallzeit und der Leerlaufzeit. Die Ermittlung der zeitbezogenen Daten erfolgt wiederum auf Basis der zuvor erläuterten grundlegenden Elemente. Diese werden im Folgenden erläutert. Das Ziel der Berechnungen zeitbezogener Daten besteht in der Bestimmung der Belegungszeit (Sollzeit), welche für die Bestimmung des grundlegenden KPIs der Verfügbarkeit erforderlich ist. In Anlehnung an die in

Tabelle 4 dargestellten Elemente lässt sich die Bearbeitungszeit (Istzeit) aus der Summe der Fertigungszeit (Istzeit) und der Rüstzeit (Istzeit) bilden. Daher entsprechen die Istzeiten der Fertigungszeit und der Rüstzeit den Grundelementen. Die Summe der Bearbeitungszeit (Istzeit) und der Ausfallzeit (Istzeit) ergibt wiederum die Belegungszeit (Istzeit) der Maschine. Die Grundelemente werden daher um die Ausfallzeit (Istzeit) ergänzt. Die Belegungszeit (Sollzeit) lässt sich schließlich durch Summierung der Belegungszeit (Istzeit) und der Leerlaufzeit (Istzeit) ermitteln. In der Folge werden die Grundelemente um die Leerlaufzeit (Istzeit) erneut ergänzt. Durch diese Reihe von Berechnungen lassen sich nahezu alle für die Bestimmung der grundlegenden KPIs benötigten Elemente bestimmen. Lediglich die Fertigungszeit pro Einheit, welche für die Bestimmung des grundlegenden KPIs der Effektivität benötigt wird, wird an dieser Stelle als vorgegeben angenommen und muss folglich nicht bestimmt werden. Mithilfe dieser Aussagen lassen sich folgende Anforderungen an das Simulationsmodell ableiten. Durch das Simulationsmodell müssen zeitbezogene Daten aller Grundelemente, also der Istzeiten der Fertigungszeit, der Rüstzeit, der Ausfallzeit und der Leerlaufzeit, generiert werden. Alle weiteren Elemente zeitbezogener Daten und daran anknüpfenden grundlegenden KPIs lassen sich auf dieser Grundlage bestimmen.

Anforderung 4: Das Modell soll eine isolierte Abbildung der wertschöpfenden Prozesse innerhalb des Bearbeitungssystems ermöglichen

In diesem Teilschritt der Erstellung des Simulationsmodells werden aus den in Kapitel 3 verwendeten Systemmodellen weitere Anforderungen an die Struktur des Modells abgeleitet. Ein Fertigungsprozess stellt gemäß den Aussagen in Abschnitt 3.1 einen wertschöpfenden Prozess innerhalb einer Fertigung dar. Im Rahmen dieses Prozesses erfolgt eine Transformation der als Input eingesetzten Materialien, Halbzeuge und Bauteile in Output in Form von Produkten und Fertigteilen. Dabei ist eine Vielzahl von miteinander in Wechselwirkung stehenden Faktoren zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Betrachtung der in Abbildung 2 dargestellten Fertigungsprozesse innerhalb des Bearbeitungssystems. Dabei wird die Annahme getroffen, dass das Bearbeitungssystem und die zugehörigen Fertigungsprozesse isoliert von ihrer Umgebung betrachtet werden. Diese Annahme wird damit begründet, dass der Einfluss der Betriebsmittel- und Materialsysteme auf die Wertschöpfung deutlich geringer eingeschätzt wird als der Einfluss der Prozesse im Bearbeitungssystem selbst. Eine analoge Einschätzung gilt für Ressourcen wie Raum, Energie und Informationen. Der Fokus liegt somit auf den einzelnen von ihrer Umgebung abgegrenzten Prozessen, die Maschinen zur Erfüllung eines Fertigungsauftrages durchführen.

Anforderung 5: Der strukturelle Aufbau der Fertigungslinie muss im Simulationsmodell möglichst realitätsnah abgebildet werden

Die fünfte Anforderung lässt sich aus dem übergeordneten Ziel der ME ableiten. Die Elemente des Simulationsmodells einer Fertigung entsprechen den einzelnen Maschinen, welche innerhalb dieser Fertigung miteinander interagieren. Der strukturelle Aufbau des Simulationsmodells entspricht somit der Struktur einer Fertigungslinie (siehe Abschnitt 3.1). Ein System wird gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.2 als eine Menge miteinander interagierender Elemente, die in einem bestimmten Kontext abgegrenzt von ihrer Umgebung betrachtet werden, definiert. Ein Prozess wird definiert als die Gesamtheit von interagierenden Vorgängen innerhalb eines Systems. Daraus lässt sich ableiten, dass innerhalb eines Systems eine Menge an Prozessen abgegrenzt von ihrer Umgebung miteinander interagieren. Das betrachtete System stellt in diesem Kontext eine Fertigungslinie innerhalb eines produzierenden Unternehmens dar. Die Menge an Prozessen entsprechen den Vorgängen an den jeweiligen Maschinen. Gemäß den Aussagen in Abschnitt 4.2.2 ist es im Rahmen ME eines Simulationsmodells erforderlich, die dynamischen Prozesse eines Systems in einem experimentierfähigen Modell möglichst realitätsnah abzubilden.

Anforderung 6: Das Simulationsmodell muss eine sequenzielle Reihenfertigung ohne parallele Prozesse abbilden können

Im Zuge der ME des Simulationsmodells werden somit eine Vielzahl dieser einzelner isolierten Prozesse von Maschinen miteinander verknüpft. In der Folge werden die Prozesse einer Fertigung gemäß den Aussagen in Abschnitt 3.1 in eine strukturierte Form überführt. Die Strukturierung dient dazu, ein besseres Verständnis für das System im Allgemeinen und für die Abläufe innerhalb des Systems herzustellen, wodurch eine präzisere Abbildung der realen Fertigungsprozesse im Simulationsmodell ermöglicht wird. Im ersten Schritt erfolgt eine Betrachtung der Fertigungsart. Bei der Fertigungsart erfolgt eine Differenzierung zwischen Einzel- und Mehrfachfertigung. Gegenstand dieser Arbeit sind Fertigungsaufträge für eine Vielzahl an Produkten. In diesem Kontext entspricht die betrachtete Fertigung der einer Mehrfachfertigung, weshalb die folgenden Erläuterungen sich auf diese Fertigungsart beziehen. Die Mehrfachfertigung lässt sich in Abhängigkeit der Stückzahl in Wiederhol-, Varianten-, Serien- und Massenfertigung unterteilen. Die in dieser Arbeit betrachtete Unterteilung der Fertigungsart entspricht der Serienfertigung. Einen weitaus größeren Einfluss als die Fertigungsarten auf das Simulationsmodell nimmt die in Abschnitt 3.1 erläuterten Fertigungsformen. Diese Fertigungsformen dienen der räumlichen, organisatorischen und zeitlichen Strukturierung der einzelnen Elemente der Fertigung. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Fertigungsform der Linien- bzw. Reihenfertigung betrachtet. Gemäß den Aussagen in Abschnitt 3.1 erfolgt bei dieser Fertigungsform eine Anordnung der Wirk- und Arbeitssysteme in einer Reihe, wobei die technologische Arbeitsvorgangsfolge sowie die Fertigungstechnologien berücksichtigt werden. Auf Grundlage dieser Aussagen lässt sich die Struktur des zu implementierenden Simulationsmodells ableiten. Das Ziel des Simulationsmodells ist die Abbildung einer bestimmten Anzahl an Maschinen, die in einer Reihe angeordnet sind. Die einzelnen Maschinen führen nacheinander die entsprechenden Bearbeitungen an einem Werkstück durch, bis der Zustand des Werkstücks dem des gewünschten Fertigteils entspricht. Ein weiteres Merkmal der Reihenfertigung stellt das zeitliche Durchlaufprinzip des Reihenverlaufs dar. Dieses Prinzip besagt, dass alle Fertigungsschritte nacheinander ohne zeitliche Taktung mehrerer parallel durchgeführter Fertigungsschritte abgearbeitet werden. Dadurch entstehen lediglich Wartezeiten für Maschinen innerhalb einer Reihe von Fertigungsschritten, nicht jedoch zwischen zwei parallel ablaufenden Reihen von Fertigungsschritten.

Anforderung 7: Es muss gewährleistet sein, dass die Vergleichbarkeit durch standardisierte Simulationsläufe im Modell sichergestellt ist

Das Simulationsmodell muss pro Simulationslauf jeweils einen Fertigungsauftrag desselben Umfangs vollständig durchlaufen. Diese Konsistenz gewährleistet die Vergleichbarkeit der Leistung der Fertigung bei gleichen Auftragsbedingungen und bietet eine fundierte Grundlage zur Bewertung der Prozessleistung.

Anforderung 8: Die Datenerfassung der Produktionsmengen und -zeiten der einzelnen Produktionsprozesse muss im Simulationsmodell implementiert werden

Für jeden Fertigungsauftrag müssen die generierten Daten alle relevanten Produktionsmerkmale erfassen, einschließlich der Produktionsmengen und Prozesszeiten, die in einer bestimmten Zeitspanne während verschiedener Prozesse erzeugt werden (siehe Abschnitt 3.2). In Tabelle 7 sind alle Anforderungen strukturiert dargestellt und kurz erläutert.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Anforderungen an das Simulationsmodell

Nummer	Beschreibung
1	Das Simulationsmodell muss in der Lage sein, Rohdaten für jeden Prozess innerhalb der Fertigungslinie zu generieren
2	Festlegung der grundlegenden Elemente der quantitativen Daten, welche durch das Data Farming generiert werden sollen
3	Festlegung der grundlegenden Elemente der zeitbezogenen Daten, welche durch das Data Farming generiert werden sollen
4	Das Modell soll eine isolierte Abbildung der wertschöpfenden Prozesse innerhalb des Bearbeitungssystems ermöglichen
5	Der strukturelle Aufbau der Fertigungslinie muss im Simulationsmodell möglichst realitätsnah abgebildet werden
6	Das Simulationsmodell muss eine sequenzielle Reihenfertigung ohne parallele Prozesse abbilden können
7	Es muss gewährleistet sein, dass die Vergleichbarkeit durch standardisierte Simulationsläufe im Modell sichergestellt ist
8	Die Datenerfassung der Produktionsmengen und -zeiten der einzelnen Produktionsprozesse muss im Simulationsmodell implementiert werden

In Tabelle 7 sind sowohl die Nummer als auch die dazugehörige Beschreibung der jeweiligen Anforderung an das Simulationsmodell zusammengefasst. Auf Basis der in Tabelle 7 zusammengetragenen Anforderungen erfolgt im nächsten Schritt die Implementierung des Simulationsmodells.

6.3 Implementierung von Simulationsmodell und DoE

Im vorliegenden Kapitel erfolgt die eigentliche Implementierung, folglich die Umsetzung des Simulationsmodells in einer zuvor ausgewählten Entwicklungsumgebung. Die in dieser Arbeit verwendete Programmiersprache C++ (Microsoft Corporation 2021) wird in der Entwicklungsumgebung Visual Studio 2019 angewendet (Dieterich 2000; Microsoft Corporation 2019). Die Implementierung des Modells umfasst sowohl die ME als Teilprozess des gesamten Aggregations- und Disaggregationsprozesses, welcher in Abschnitt 5 erläutert wurde, als auch die Umsetzung des DoE zur praktischen Anwendung des zu erstellenden Modells in einem Simulationsexperiment. Das Ziel besteht in der Umsetzung des Simulationsmodells, welche den in Abschnitt 6.2 festgelegten Anforderungen entspricht, in einer benutzerfreundlichen Anwendung. Dies dient der Beantwortung der in Abschnitt 6.1 festgelegten Fragestellung nach der Disaggregation bereits aggregierter Daten. Das implementierte Modell generiert durch ein Simulationsexperiment im Rahmen des Data Farming eine vom Benutzer festgelegte Menge an Daten. Aus diesem Grund umfasst dieses Kapitel ebenfalls die Umsetzung des DoE zur Durchführung des Simulationsexperiments. Im ersten Schritt erfolgt die Vorstellung der Benutzeroberfläche, um einen Überblick über die äußere Form des Programm zu erhalten. Anschließend wird mithilfe eines Programmablaufplans (PAP) die grundlegende Struktur des Hauptprogramms graphisch dargestellt und anschließend erläutert. Dieses Hauptprogramm dient zur Steuerung der Simulation mithilfe einer Benutzeroberfläche. Dabei wird es dem Benutzer ermöglicht allgemeine Faktoren und Wertebereiche festzulegen und die Simulation basierend auf den Benutzereingaben zu starten. Beim Start der Simulation werden alle weiteren Funktionalitäten der Simulation in Form von Unterprogrammen aufgerufen. Die weiteren in diesem

Hauptprogramm beinhalteten Unterprogramme werden ebenfalls sukzessive durch weitere PAPs erläutert. Im ersten Schritt erfolgt die Vorstellung der Benutzeroberfläche zur Simulationssteuerung zum Generieren von Daten einer Fertigungslinie mithilfe von Abbildung 12.

Simulationssteuerung zum Generieren von Daten einer Fertigungslinie

Allgemeine Simulationsfaktoren einer Fertigungslinie

Anzahl der Produkte für einen Auftrag:

Anzahl der Maschinen in der Reihenfertigung:

Anzahl der Design Points des LHS-Musters im Wertebereich der Simulationsfaktoren:

Festlegung des Wertebereichs der Simulationsfaktoren einer Fertigungslinie

Minimale Durchschnittliche Fertigungszeit (Sekunden):	<input type="text" value="60"/>	Maximale Durchschnittliche Fertigungszeit (Sekunden):	<input type="text" value="180"/>
Minimale Standardabweichung der Fertigungszeit (Sekunden):	<input type="text" value="3"/>	Maximale Standardabweichung der Fertigungszeit (Sekunden):	<input type="text" value="15"/>
Minimale Durchschnittliche Ausfallzeit (Sekunden):	<input type="text" value="30"/>	Maximale Durchschnittliche Ausfallzeit (Sekunden):	<input type="text" value="90"/>
Minimale Wahrscheinlichkeit fehlerhafter Produkte:	<input type="text" value="0.005"/>	Maximale Wahrscheinlichkeit fehlerhafter Produkte:	<input type="text" value="0.02"/>
Minimale Wahrscheinlichkeit, dass kein Ausfall auftritt:	<input type="text" value="0.85"/>	Maximale Wahrscheinlichkeit, dass kein Ausfall auftritt:	<input type="text" value="0.95"/>

Abbildung 12: Benutzeroberfläche der Simulationsteuerung zum Generieren von Daten einer Fertigungslinie

Die in Abbildung 12 dargestellte Benutzeroberfläche dient der Steuerung der Simulation. Nachfolgend werden einige Klassen vorgestellt, welche im Programm „Projektarbeit_Simulation“ enthalten sind. Die Implementierung der Benutzeroberfläche erfolgt in einer eigenständigen Klasse, die den Namen "GUI" (siehe Anhangsdatei „Abgabe_Programmcode“) trägt. Die Funktionalitäten der Klasse „GUI“ zum Erstellen einer Benutzeroberfläche werden durch das Einbinden der header-Dateien <SFML/Graphics.hpp> und „TGUI/TGUI.hpp“ zur Verfügung gestellt (Gomila 2023; Texus 2023). Die Klasse beinhaltet eine Methode mit dem Namen „erstelleUndStarteGUI“. Bei Aufruf dieser Methode öffnet sich die in Abbildung 12 dargestellte Benutzeroberfläche in einem separaten Fenster. Diese umfasst eine Reihe von Bezeichnungen und dazugehörigen Eingabefeldern. Im Folgenden erfolgt eine sukzessive Erläuterung aller Elemente der Benutzeroberfläche. Die allgemeinen Simulationsfaktoren der Fertigungslinie werden im oberen Teil durch Benutzereingaben in den dazugehörigen Feldern festgelegt. Im ersten Schritt erfolgt die Festlegung der Anzahl der Maschinen in Reihenfertigung sowie der Anzahl der Produkte für einen Auftrag durch den Benutzer. Zur Umsetzung des DoE als Teil des Aggregations- und Disaggregationsprozesses (siehe Abschnitt 5) wird im nächsten Schritt die Anzahl der DPs eines LHS-Musters festgelegt. Diese Eingabe entspricht der Anzahl der Faktorkombinationen und definiert die Schrittweite, also die Präzision, mit der der Wertebereich der Simulationsfaktoren vom Minimum bis zum Maximum während der Simulation durchlaufen wird. Sowohl die Anzahl der Maschinen, Produkte sowie der DPs legen den Um-

fang der durch das Data Farming zu generierenden Daten fest. Für einen DP wird entsprechend der Faktorkombination jeweils ein Datensatz generiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Eingabe des Wertebereichs der Simulationsfaktoren, der durch die minimalen und maximalen Werte der einzelnen Faktoren definiert wird. Dies wird durch den Benutzer im unteren Bereich der Benutzeroberfläche umgesetzt. Die genaue Erläuterung der einzelnen Faktoren, welche im Rahmen der Simulation verwendet werden, erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt. Für alle Simulationsfaktoren sind bereits vordefinierte Standardwerte in den jeweiligen Eingabefeldern hinterlegt, um dem Benutzer einen einfachen Zugang zu den jeweiligen Dimensionen der Faktoren zu ermöglichen. Die Durchführung der Simulation erfolgt durch Betätigen der entsprechenden Schaltfläche „Start der Simulation“ am unteren Ende der Benutzeroberfläche. Bei Betätigung der Schaltfläche „Start der Simulation“ wird ein einziger Simulationsdurchlauf für eine festgelegte Anzahl an DPs gestartet. Ein Simulationsexperiment besteht aus mehreren Simulationsdurchläufen. Nach dessen Aktivierung werden die zuvor durch den Benutzer eingegebenen Simulationsfaktoren verwendet, um die Simulation zu starten. Dabei werden eine Vielzahl von Methoden aufgerufen, welche im Folgenden mithilfe eines PAP erläutert werden (siehe Abbildung 13).

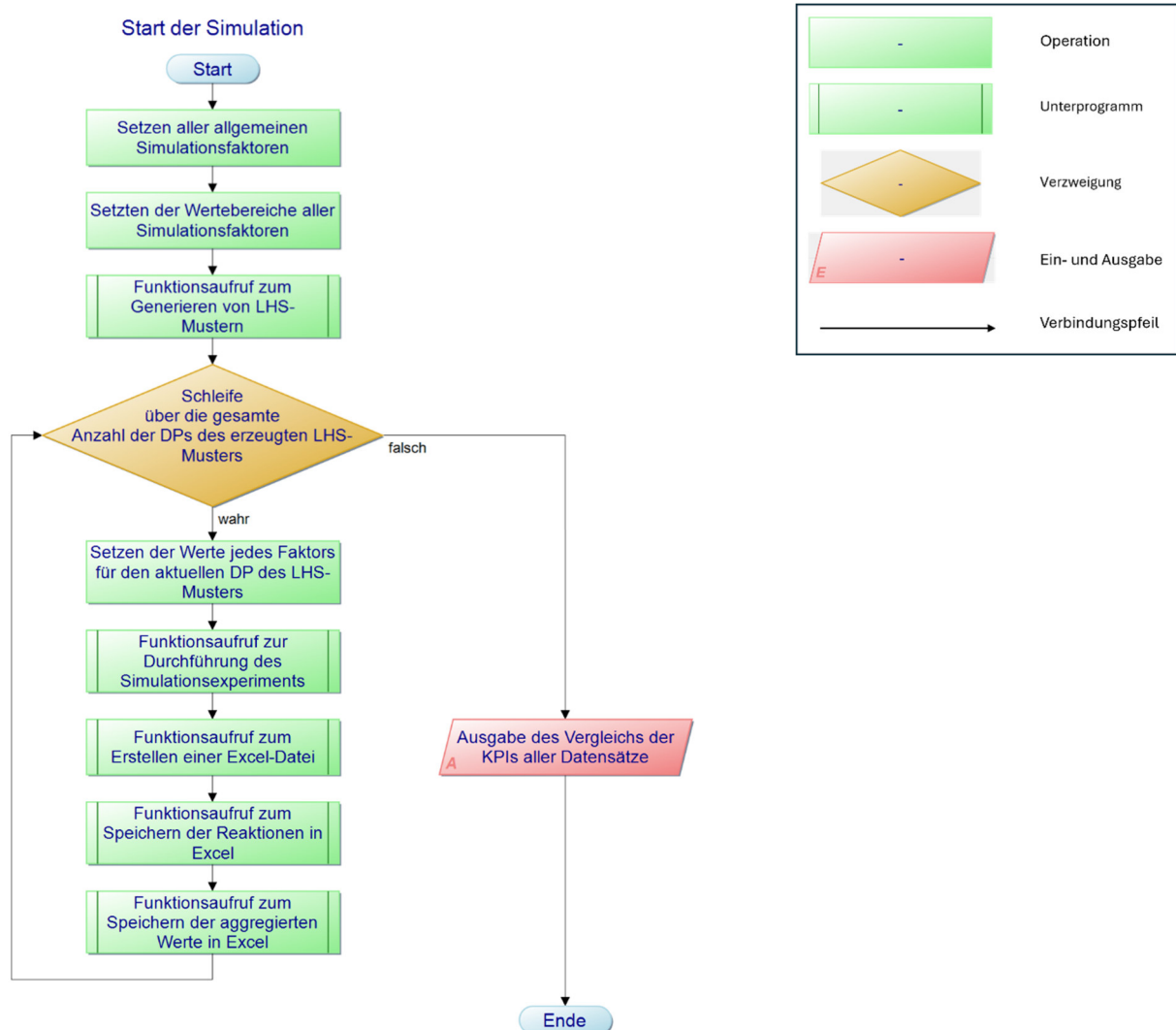


Abbildung 13: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Schaltfläche zum Starten der Simulation

Der in Abbildung 13 dargestellte PAP dient der Veranschaulichung der Funktionsweise der in Abbildung 12 dargestellten Schaltfläche „Start der Simulation“, welche sich am unteren Ende

der Benutzeroberfläche befindet. Mit Betätigung dieser Schaltfläche wird ein Durchlauf der Simulation gestartet und die einzelnen Elemente des PAP sukzessive abgearbeitet. Beim Start der Simulation werden im ersten Schritt alle Simulationsfaktoren auf die vom Benutzer eingegebenen Werte gesetzt. Dasselbe gilt für die Wertebereiche der jeweiligen Simulationsfaktoren. Anschließend erfolgt der Aufruf des Unterprogramms zum Generieren eines LHS-Musters im Hauptprogramm. Dafür wird im nächsten Schritt eine Klasse zur Implementierung der eigentlichen Simulation mit der gleichnamigen Bezeichnung „simulation“ (siehe Anhangsdatei „Abgabe_Programmcode“) erstellt. In dieser Klasse wird eine Methode „generiereMusterLHS“ zum Generieren eines für diesen Simulationsdurchlauf einzigartigen LHS-Musters erstellt. Durch diesen Methodenaufruf wird gemäß der vom Benutzer festgelegten Anzahl der DPs für die Simulationsfaktoren im dazugehörigen Wertebereich ein LHS-Muster erzeugt und in einer DM festgehalten. Hier wird lediglich ein Muster erzeugt, welches zu einem späteren Zeitpunkt angewendet wird. Diese gewährleisten auf Basis eines randomisierten Verfahrens eine zufällige Verteilung der Werte über den gesamten Wertebereich. Das nachfolgende PAP, welches in Abbildung 14 dargestellt ist, verdeutlicht die Funktionsweise des implementierten LHS. Die Umsetzung erfolgt mithilfe von C++ in Visual Studio 2019 (Dieterich 2000; Microsoft Corporation 2019).

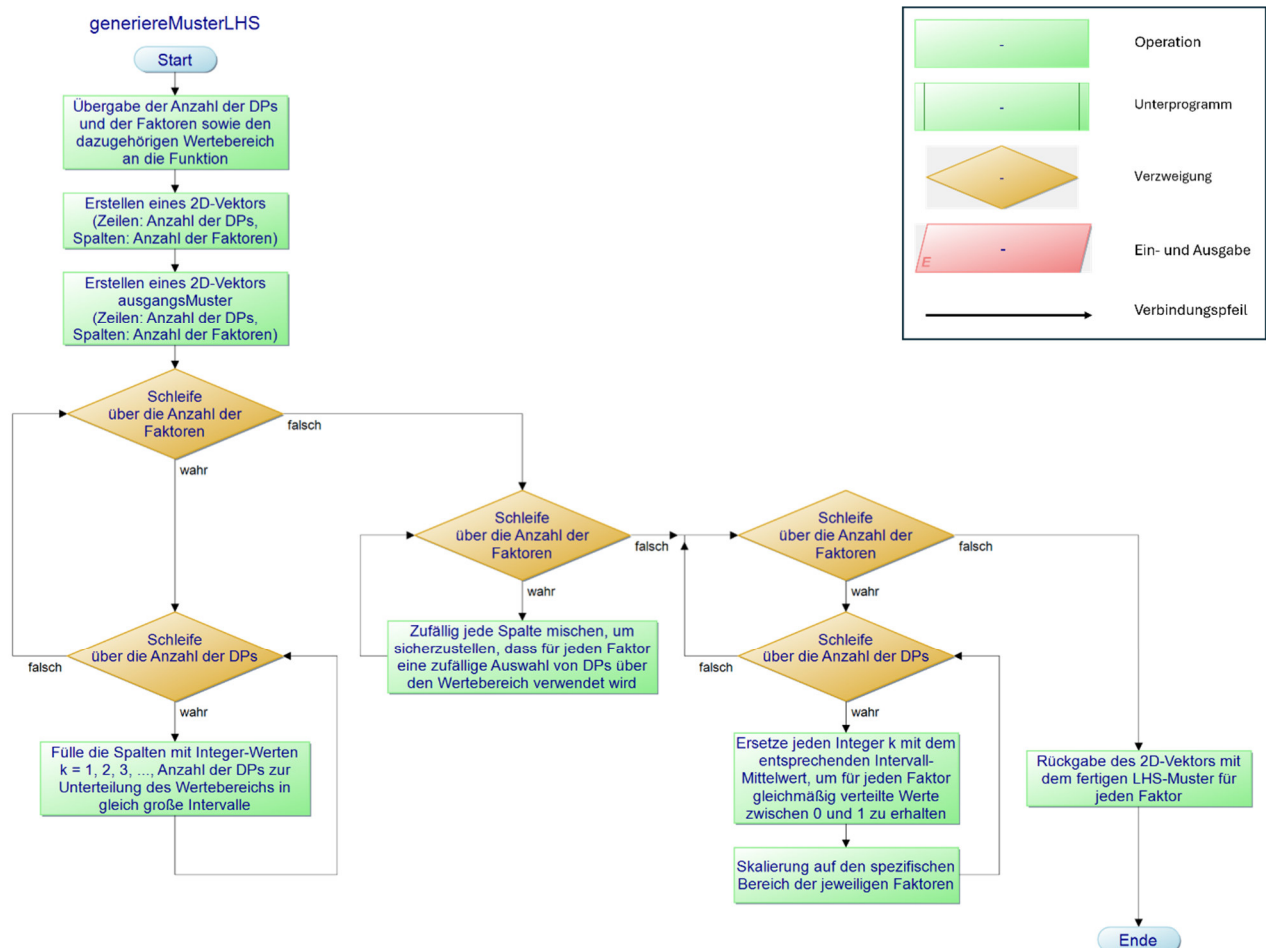


Abbildung 14: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise des Latin-Hypercube-Sampling

Der in Abbildung 14 dargestellte PAP verdeutlicht die Umsetzung der Generierung des LHS-Musters als eigenständige Methode in der Klasse „simulation“ mit dem Namen „generiereMusterLHS“. Die Erstellung eines solchen Musters erfolgt im Rahmen des DoE (siehe Abschnitt 4.2.3) und ermöglicht die detaillierte Betrachtung eines möglichst breiten Wertebereich bei gleichzeitiger Kontrolle über das Wachstum aller möglichen DPs beizubehalten. Die

vorliegende Umsetzung entspricht der Erstellung einer DM zur Vorbereitung des DoE im Sinne der Planung des Simulationsexperiments. Die eigentliche Anwendung erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der Durchführung des Simulationsexperiments. Im ersten Schritt erfolgt die Übermittlung der Anzahl der DPs und der Faktoren sowie des Wertebereichs für jeden Faktor an die Methode, um ein LHS-Muster mithilfe der Methode zu erzeugen. Im Anschluss werden zwei zweidimensionale Vektoren erstellt. Zum einen wird ein Vektor für das Ausgangsmuster erstellt, zum anderen ein Vektor für das fertige LHS-Muster, welches aus dem Ausgangsmuster resultiert. Die Zeilen beider Vektoren entsprechen der Anzahl der DPs während die Spalten der Anzahl der Faktoren entsprechen. Im nächsten Schritt erfolgt die Füllung jeder Spalte im Vektor des Ausgangsmusters mit Integer-Werten von eins bis zur Anzahl der DPs unter Zuhilfenahme einer geeigneten Schleife. Die Integer-Werte einer Spalte werden im weiteren Verlauf durch die tatsächlichen Werte im Wertebereich der jeweiligen Faktoren ersetzt. Im darauffolgenden Schritt erfolgt zuerst eine zufällige Mischung der Integer-Werte jeder Spalte des Ausgangsmusters, um eine zufällige Auswahl von DPs für jeden Faktor sicherzustellen. In der Folge werden die randomisierten Integer-Werte im Vektor des Ausgangsmusters zur Ermittlung der entsprechenden Intervall-Mittelpunkte verwendet (siehe Abschnitt 4.2.3). Dadurch werden für jeden Faktor die randomisierten Werte des Ausgangsmusters gleichmäßig auf einen Wertebereich zwischen null und eins normiert. Für jeden Intervall-Mittelpunkt erfolgt eine Skalierung auf den spezifischen Wertebereich des aktuellen Faktors, welcher im Vektor des fertigen LHS-Musters gespeichert wird. Im letzten Schritt wird das fertige LHS-Muster in Form eines Vektors von der Methode zurückgegeben. Dieser zweidimensionale Vektor entspricht der in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten DM. Die Evaluierung der Funktionsfähigkeit sowie Veranschaulichung der Methode "generiereLHSMuster" erfolgt anhand einer beispielhaften Verteilung der Werte eines einzelnen Faktors einer Spalte in der DM, welche in Abbildung 15 dargestellt ist.

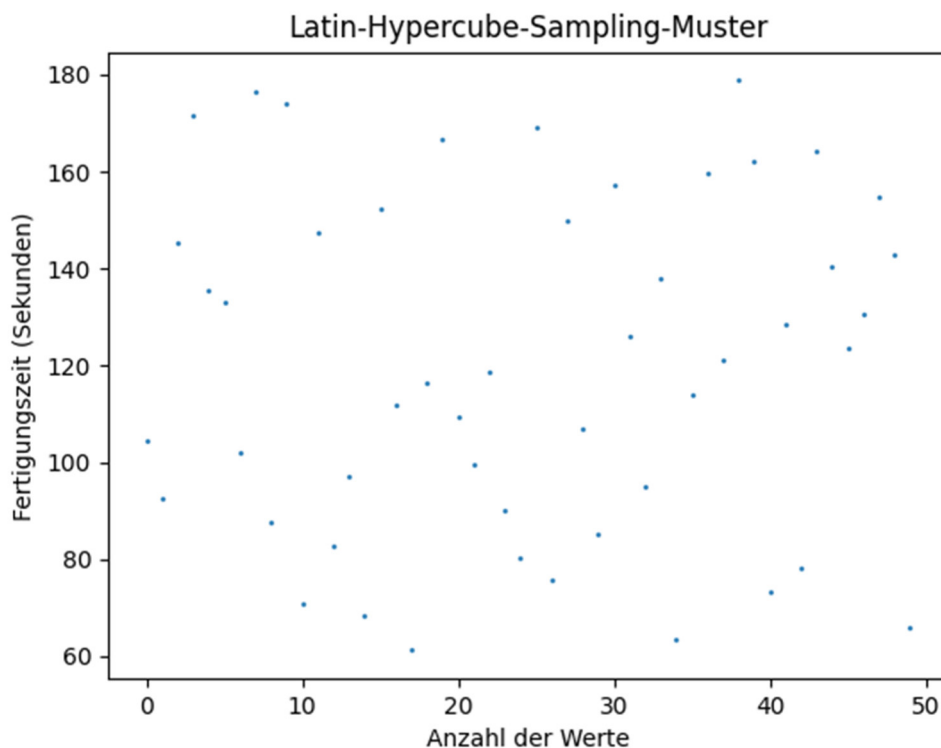


Abbildung 15: Beispielhaftes Latin-Hypercube-Sampling-Muster für Fertigungszeiten

Mithilfe der Funktionalitäten der Header-Datei „matplotlib.h“ gemäß der veröffentlichten Software von Hunter, John D., et al. (2023) ist in Abbildung 15 ein beispielhaftes LHS-Muster für die Fertigungszeiten dargestellt. In dieser Abbildung werden die Anzahl der Werte für das LHS-

Muster den dazugehörigen randomisierten Werten des betrachteten Faktors gegenübergestellt. Es ist eine gleichmäßige Verteilung der Werte über den gesamten Wertebereich zu erkennen, wodurch die Funktionsfähigkeit der Erstellung eines LHS-Musters durch die Methode „generiereMusterLHS“ bestätigt wird. Die Generierung eines einzigartigen LHS-Musters für einen einzelnen Simulationsdurchlauf resultiert beispielsweise in einer Verteilung der Werte eines Faktors für eine Spalte, wie in Abbildung 15 dargestellt. Durch die Kombination mehrerer Spalten unterschiedlicher Faktoren entsteht eine DM mit einzelnen DPs, d. h. möglichen Kombinationen der Werte aller Faktoren, als Zeilen und den verschiedenen Faktoren als Spalten. Entsprechend der Vorgehensweise der Schaltfläche zum Starten der Simulation (siehe Abbildung 13) wird nach dem Aufruf des Unterprogramms „generiereLHSMuster eine Schleife über die gesamte Anzahl der erzeugten LHS-Muster implementiert. In dieser Schleife wird jeder Faktor für die aktuelle Kombination des LHS-Musters gesetzt. Im nächsten Schritt erfolgt für den aktuellen DP der Aufruf des Unterprogramms „durchfuehrungSimulation“ als Methode der Klasse „simulation“ (siehe Anhangsdatei „Abgabe_Programmcode“) zur Durchführung der Simulation einer Fertigungslinie. Zur Erläuterung der Funktionsweise der Durchführung der Simulation wird erneut ein PAP, welches in Abbildung 16 dargestellt ist, verwendet.

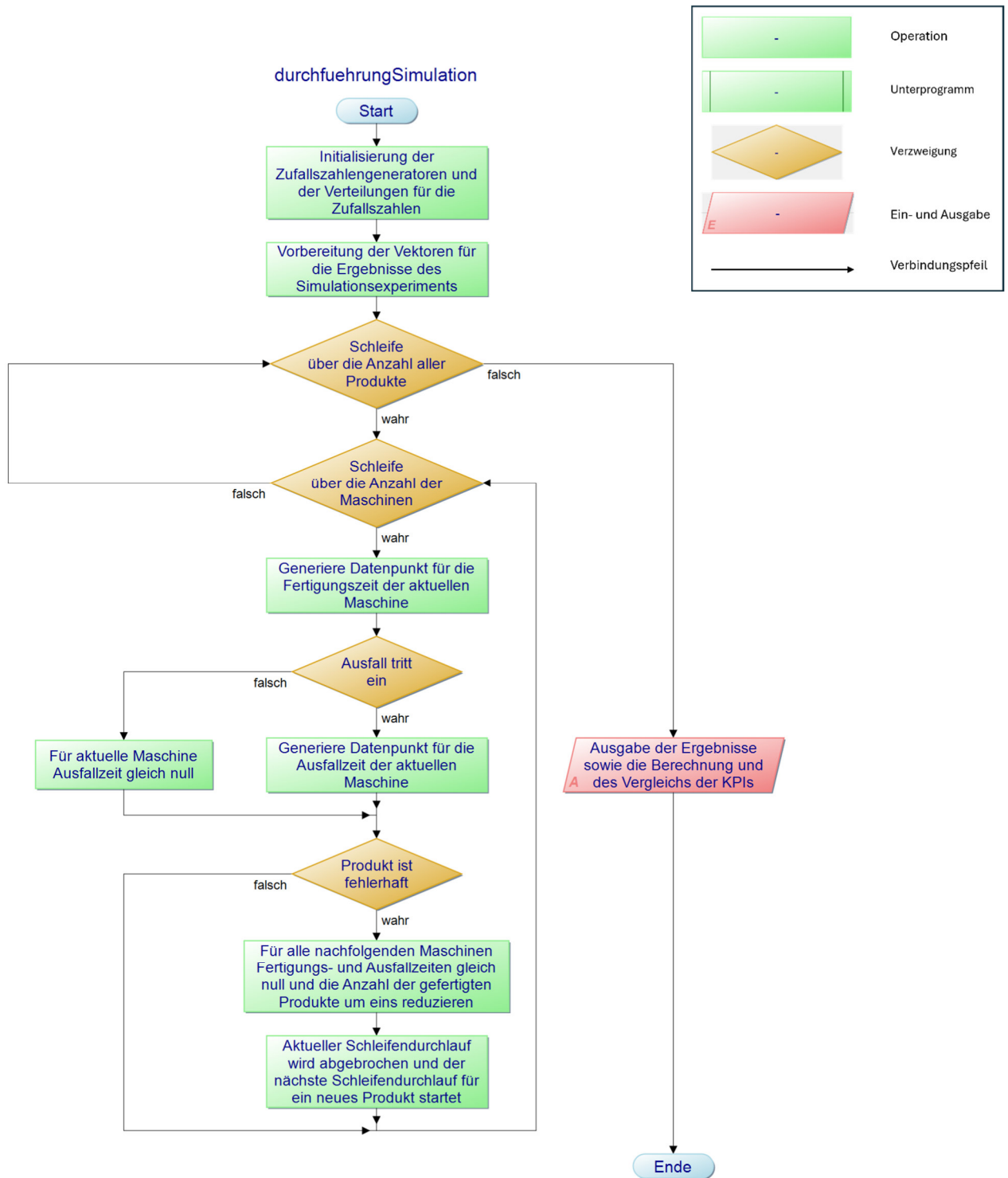


Abbildung 16: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Durchführung der Simulation einer Fertigungslinie

Die Durchführung der Simulation einer Fertigungslinie folgt der in Abbildung 16 dargestellten Vorgehensweise. In der Klasse „simulation“ wird eine Methode „durchfuehrungSimulation“ erstellt, welche entsprechend den Anforderungen aus Tabelle 7 eine Fertigungslinie in Reihenfertigung modelliert. Das Simulationsmodell muss in der Lage sein, unterschiedliche Rohdaten für jeden Prozess innerhalb der Fertigungslinie zu generieren (siehe Anforderung 1). Aus dem Grund, dass die Methode zur Durchführung der Simulation innerhalb einer Schleife aufgerufen wird, entspricht ein Methodenaufruf der Durchführung eines einzelnen Fertigungsauftrages.

Im ersten Schritt erfolgt die Generierung der Fertigungsdaten unter Zuhilfenahme von Zufallszahlengeneratoren sowie diverser Verteilungen. Diese befinden sich standardmäßig in der Header-Datei "random" der C++ Entwicklungsumgebung Visual Studio 2019 (Dieterich 2000; Microsoft Corporation 2019). Die Generierung erfolgt für die unterschiedlichen quantitative und zeitbezogene Elemente einer Fertigung. Diese Zufallszahlengeneratoren erzeugen einen Zufallszahlenstrom zwischen einem minimalen und maximalen Wert und werden mit einem sogenannten Seed initialisiert. Um zu gewährleisten, dass sich die erstellten Zufallszahlen keinem sich wiederholenden Muster folgen, müssen mit jedem Funktionsaufruf neue Zufallszahlengeneratoren mit einzigartigen Seeds erstellt werden. Im nächsten Schritt werden statistische Verteilungsfunktionen, welche sich ebenfalls in der Header-Datei „random“ befinden, erstellt. Die Erstellung der Verteilungsfunktionen erfolgt gemäß den Anforderung 2 und 3 an die Grundelemente der quantitativen und zeitbezogenen Daten. Die Fertigungszeiten werden mithilfe einer Normalverteilung dargestellt. Im Rahmen dieses Prozesses erfolgt eine Generierung von Werten, welche sich um einen durchschnittlichen Wert der Fertigungszeiten mit einer festgelegten Standardabweichung bewegen. Um die Komplexität zu reduzieren, wird im nächsten Schritt die Annahme getroffen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers oder des Ausfalls einer Maschine stets mit gleicher Wahrscheinlichkeit gegeben ist. Das Auftreten eines Fehlers während eines Prozesses der Produktion sowie den Ausfall einer gesamten Maschine werden durch jeweils eine Bernoulli-Verteilung dargestellt. Die beiden Verteilungen geben das Auftreten eines Ereignisses unter einer bestimmten, über die Zeit konstanten Wahrscheinlichkeit an. Falls der Ausfall einer Maschine eintritt, wird die tatsächliche Ausfallzeit mithilfe einer Exponentialverteilung dargestellt. Die Exponentialverteilung gibt, entsprechend dem Lambda-Wert, ein zufälliges Zeitintervall an. Der Wert von Lambda entspricht der Ausfallrate der einzelnen Maschinen und wird zur Komplexitätsreduktion ebenfalls für jede Maschine als konstant angenommen. Die für die Verteilungsfunktionen herangezogenen Werte unterliegen einer Variation und entsprechen den Werten der DM, die durch das LHS in einem bestimmten Muster generiert werden.

Im nachfolgenden Schritt werden die Vektoren, welche zum Speichern der generierten Daten für die Fertigungszeiten, Ausfallzeiten, fehlerhaften Produkte und die Anzahl der tatsächlich gefertigten Produkte dienen, erstellt und anschließend vorbereitet. Die Vorbereitung umfasst das Löschen bereits bestehender Daten sowie das Festlegen der Größe entsprechend der Anzahl der Maschinen in den Spalten und der Anzahl der gefertigten Produkte in den Zeilen. Im Folgenden werden die vorbereiteten Vektoren mit den jeweiligen Daten gefüllt. Dafür wird das Bearbeitungssystem isoliert von der Umgebung betrachtet, wodurch der Fokus auf die Prozesse innerhalb des Systems gelegt wird (siehe Anforderung 4). Zur Umsetzung wird eine äußere Schleife über die gesamte Anzahl der Produkte erstellt. In der äußeren Schleife wird eine boolesche Zustandsvariable erstellt, welche für jedes einzelne Produkt angibt, ob ein Fehler vorliegt oder nicht. Zu Beginn der Schleife wird jedes aktuelle Produkt als nicht fehlerhaft angenommen. Ebenfalls in der äußeren Schleife über die Anzahl der Produkte wird eine innere Schleife über die Anzahl der Maschinen in der Reihenfertigung erstellt. Die Struktur der Schleifen ist darin begründet, dass jedes einzelne Produkte jede Maschine in der Reihenfertigung durchlaufen muss, um in den Zustand eines Fertigteils überführt zu werden (siehe Anforderung 5). Diese Struktur folgt der Fertigung in Reihe ohne parallele Prozesse und erfordert somit keine zeitliche Taktung der Prozesse (siehe Anforderung 6). Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden alle folgenden Schritte der inneren Schleife auf identische Art und Weise wiederholt (siehe Anforderung 7). Gemäß der Anforderung 8 wird im Folgenden die Generierung der quantitativen und zeitbezogenen Daten implementiert. In der inneren Schleife wird im ersten Schritt ein Datenpunkt für die Fertigungszeit entsprechend der Normalverteilung generiert. Anschließend wird mithilfe der Bernoulli-Verteilung überprüft, ob ein Ausfall der aktuellen Maschine vorliegt, wodurch es zu einer zwischenzeitlichen Unterbrechung der Fertigungsprozesses kommen kann. Beim Eintreten dieses Falls wird ein Datenpunkt für die Ausfallzeit entsprechend der Exponentialverteilung generiert. Ist dies nicht der Fall, wird die Ausfallzeit auf null gesetzt. Im nächsten Schritt wird ebenfalls mithilfe der Bernoulli-Verteilung überprüft, ob das aktuelle Produkt fehlerhaft ist. Wenn das Produkt fehlerhaft ist, werden alle nachfolgenden Fertigungs- und Ausfallzeiten der Maschinen für das aktuelle Produkt auf null gesetzt. Dies ist

in der vereinfachten Annahme begründet, dass die Weiterbearbeitung eines fehlerhaften Produktes nicht ohne weitere Maßnahmen möglich ist und der Fertigungsprozess mit dem nächsten Produkt fortgesetzt wird. Außerdem wird die Anzahl der gefertigten Produkte für alle nachfolgenden Maschinen um eins reduziert, da der Fertigungsprozess nicht fortgesetzt werden kann. Im letzten Schritt erfolgt die Ausgabe der simulierten Daten für den Benutzer sowie der Berechnung und des Vergleichs der generierten Daten mit den Rohdaten der Fertigungslinie mithilfe eines weiteren Unterprogramms „berechneUndVergleicheKPIs“. Die Implementierung des Vergleichs der generierten Daten mit den Rohdaten der Fertigungslinie wird im Folgenden mithilfe von Abbildung 17 zur Darstellung der Methode „berechneUndVergleicheKPIs“ strukturiert erläutert. Diese Methode ist ebenfalls Element der Klasse „simulation“ (siehe Anhangsdatei „Abgabe_Programmcode“) enthalten.

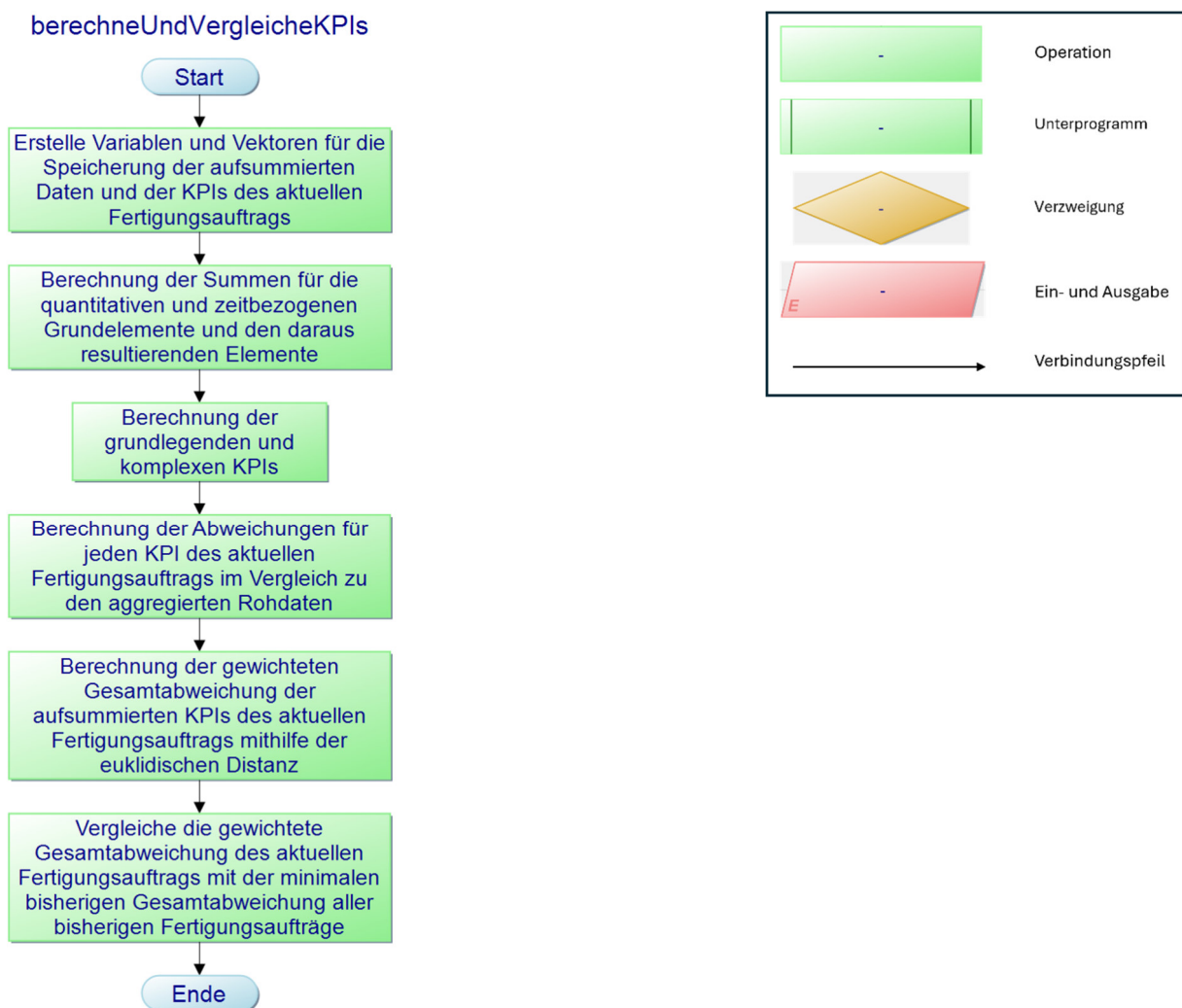


Abbildung 17: Programmablaufplan zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Berechnung und des Vergleichs der KPIs

Die Vorgehensweise zur Berechnung und zum Vergleich der KPIs kann dem PAP in Abbildung 17 entnommen werden. In dieser Abbildung ist die Funktionsweise der Funktion „berechneUndVergleicheKPIs“ dargestellt. Die Berechnung der KPIs sowie der Vergleich der generierten Simulationsdaten mit den Rohdaten in Form von KPIs stellen wesentliche Schritte im Rahmen des Aggregations- und Disaggregationsprozesses (siehe Abschnitt 5) dar. Der Vergleich dient der Evaluierung der Fähigkeit der simulierten Daten, die Rohdaten der Fertigungslinie adäquat abzubilden. Im Rahmen des Simulationsexperiments werden eine Vielzahl

von Faktorkombinationen durchlaufen, wobei entsprechende Daten der Fertigungslinie im Rahmen eines Fertigungsauftrags generiert werden. Die nachfolgenden Berechnungen werden für die Daten jeder dieser Faktorkombinationen durchgeführt und basieren auf den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Formeln zur Bewertung von Fertigungsprozessen. Im ersten Schritt erfolgt die Erstellung von Variablen für die Speicherung der aufsummierten Werte der generierten Daten sowie der daraus resultierenden KPIs. In der Folge werden die Summen der quantitativen und zeitbezogenen Daten der Grundelemente berechnet, da diese die Grundlage für alle weiteren Berechnungen bilden. Im nächsten Schritt erfolgt die Ermittlung der Summen der Belegungszeiten und fehlerfreien Produkte unter Zuhilfenahme der Grundelemente. Anschließend werden auf Basis der aufsummierten quantitativen und zeitbezogenen Daten die grundlegenden und komplexen KPIs berechnet. Im Folgenden werden die Abweichungen zwischen den jeweiligen KPIs des aktuellen Fertigungsauftrags und den KPIs der Rohdaten der Fertigung bestimmt. In der Folge wird die gewichtete Gesamtabweichung als Summe der einzelnen Abweichungen der KPIs des aktuellen Fertigungsauftrags mithilfe der euklidischen Distanz bestimmt. Die Gewichtung aller KPIs ist identisch, da davon ausgegangen wird, dass alle KPIs für die Fertigung von gleicher Relevanz sind. Im finalen Schritt erfolgt ein Vergleich der gewichteten Gesamtabweichung des aktuellen Fertigungsauftrags mit der minimalen Gesamtabweichung aller bisherigen Fertigungsaufträge, um ein potenzielles neues Minimum zu identifizieren. Dadurch wird sichergestellt, dass der Datensatz, welcher die Rohdaten in optimaler Form abbildet, festgehalten wird.

Im finalen Schritt der in Abbildung 13 dargestellten Funktionsweise der Schaltfläche zum Starten der Simulation erfolgt die Erstellung einer tabellarischen Datei für jeden Fertigungsauftrag mithilfe weiterer Unterprogramme. Für die Erstellung einer solchen Datei weiteren Verlauf der Arbeit die Software Microsoft Excel verwendet (Microsoft Corporation 2021). Dafür wird die Header-Datei "xlsxwriter.h" gemäß der veröffentlichten Software von J. McNamara (2023) in Visual Studio 2019 eingebunden und die Funktionalitäten zum Schreiben von Daten in Excel in einer eigenen Klasse „excelExporter“ implementiert (siehe Anhangsdatei „Abgabe_Programmcode“). In dieser Datei werden zum einen die Eingangsfaktoren und Reaktionen der verschiedenen Faktoren des Simulationsexperiments gespeichert und zum anderen die aggregierten Werte in Form von KPIs. Dieser Schritt dient der Dokumentation der generierten Daten aller Fertigungsaufträge im Rahmen des Simulationsexperiments. In der Zusammenfassung lässt sich festhalten, dass bei Betätigung der Schaltfläche zum Start der Simulation zunächst die Faktoren und die dazugehörigen Wertebereiche gesetzt werden. Daraufhin wird auf Basis dieser Faktoren ein LHS-Muster generiert, welches anschließend als Grundlage für die Durchführung eines Simulationsexperiments dient. Die Ergebnisse dieses Experiments werden schließlich gespeichert. Zur Anwendung der implementierten Methoden werden Objekte der Klassen „GUI“, „simulation“ und „excelExporter“ in der main-Funktion (siehe Anhangsdatei „Abgabe_Programmcode“) erstellt. Anschließend wird die Methode „erstelleUndStartGUI“ der Klasse mit den Objekten der Klassen „simulation“ und „excelExporter“ aufgerufen, um die Anwendung bei der Ausführung der Anwendung zu erstellen und zu öffnen. Nachfolgend wird die Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten anhand eines Fallbeispiels angewendet.

7 Anwendung der Methode zur Aggregation- und Disaggregation von Daten

Im diesem Abschnitt erfolgt die Anwendung der in Kapitel 5 präsentierten prozessualen Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten, welche anhand eines Fallbeispiels einer Fertigungslinie durchgeführt wird. Zunächst wird dazu das Fallbeispiel mit seiner vorgegebenen Struktur vorgestellt. Das vorliegende Fallbeispiel dient der Durchführung eines Simulationsexperiments im Rahmen des in Kapitel 5 vorgestellten Aggregations- und Disaggregationsprozesses. Die schrittweise Befolgung der einzelnen Schritte der Methodik des Aggregations- und Disaggregationsprozesses dient der Realisierung des Simulationsexperiments. Im Anschluss werden die Ergebnisse präsentiert, bewertet und in die zentrale Fragestellung dieser Arbeit nach der Möglichkeit zur Disaggregation von Daten eingeordnet.

7.1 Vorstellung des Fallbeispiels einer Fertigungslinie

Das in der vorliegenden Arbeit thematisierte Fallbeispiel entspricht der Fertigung von Produkten durch eine Fertigungslinie eines produzierenden Unternehmens. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die im Zuge dieser Arbeit betrachtete Fertigungslinie keiner realen, sondern einer exemplarischen Fertigungslinie entspricht. Dies bedeutet, dass die Funktionsweise dieser exemplarischen Fertigungslinie, beispielsweise hinsichtlich des Aufbaus und der Parametrisierung, zwar auf realen Fertigungslinien von produzierenden Unternehmen basiert, jedoch nicht eins zu eins auf eine reale Fertigungslinie übertragen werden kann. Die Form der exemplarischen Fertigung entspricht einer Reihenfertigung von sechs Maschinen und ist in Abbildung 18 dargestellt.

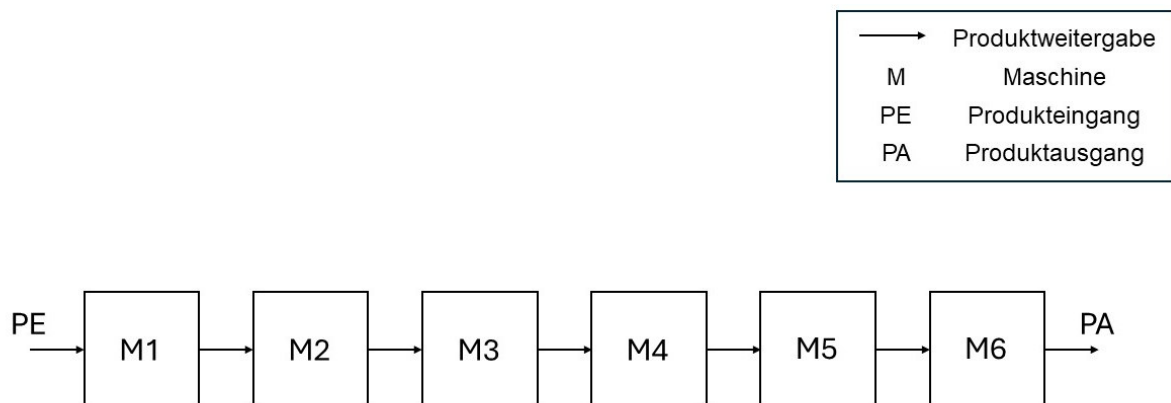


Abbildung 18: Reihenfertigung (Fallbeispiel)

Gemäß der Struktur der Fertigungslinie, welche in Abbildung 18 dargestellt ist, werden die Fertigungsprozesse nacheinander entsprechend der Funktionsweise einer Reihenfertigung ohne zeitliche Taktung paralleler Prozesse durchgeführt. Die Reihenfertigung umfasst sechs Maschinen. Ein zu bearbeitendes Produkt wird im Zustand eines Rohteils am Produkteingang an die erste Maschine weitergegeben. Darauf folgt die Überführung des Rohteils in den nächsten Fertigungszustand durch die Durchführung eines Fertigungsprozesses. Anschließend wird das Produkt an die nächste Maschine weitergegeben, welche die Bearbeitung fortsetzt. Dieser Vorgang wiederholt sich bis das Produkt an der letzten Maschine in den Zustand eines Fertigteils überführt wird und an den Produktausgang weitergegeben wird. Die Anordnung dieser Maschinen dient zur Fertigung eines Produktes, welches im Rahmen eines Auftrages wiederholt gefertigt wird. Der Umfang des Auftrags beläuft sich auf der Fertigung von 100 Produkten. Es wird angenommen, dass jede Maschine einen Teilprozess des gesamten Fertigungsprozesses zur Fertigung eines einzelnen Produktes durchführt. Ebenfalls wird angenommen, dass

alle Maschinen zur gleichen Zeit beschafft worden sind und somit identische Werte für die jeweiligen Faktoren aufweisen. Zur Fertigung eines Produktes wird für jeden Teilprozess eine gewisse Fertigungszeit benötigt. Der Sollwert der Fertigungszeit pro Produkt wird auf 120 Sekunden festgelegt. Es wird weiterhin angenommen, dass bei Ausfall einer Maschine eine Zeitspanne in Form einer Ausfallzeit entsteht, in der keine weiteren Prozesse durchgeführt werden können bis eine Wartung erfolgt ist. Nach erfolgreicher Wartung wird der aktuelle Prozess fortgesetzt. Außerdem wird angenommen, dass bei fehlerhafter Durchführung des Prozesses einer Maschine alle nachfolgenden Prozesse entfallen. Während des Prozesses werden Daten in Hinblick auf Quantität und Zeit erfasst und verarbeitet. Die Wertebereiche der einzelnen Faktoren werden mithilfe von Informationen aus verschiedenen Experteninterviews abgestimmt, um möglichst realitätsnahe Werte einer Fertigungslinie zu erhalten. Im nächsten Abschnitt erfolgt die Anwendung des Aggregations- und Disaggregationsprozesses anhand des Fallbeispiels der soeben vorgestellten Fertigungslinie.

7.2 Anwendung des Aggregations- und Disaggregationsprozesses

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt die Anwendung des in Abschnitt 5 mithilfe von Abbildung 9 dargestellten vollständigen Aggregations- und Disaggregationsprozesses anhand des in Abschnitt 7.1 vorgestellten Fallbeispiels einer Fertigungslinie. Dabei wird der gesamte Prozess in verschiedene Teilprozesse unterteilt, welche in einer sukzessiven Vorgehensweise erläutert und umgesetzt werden. Der Gesamtprozess besteht aus drei Teilprozessen, welche in Abbildung 19 dargestellt sind.

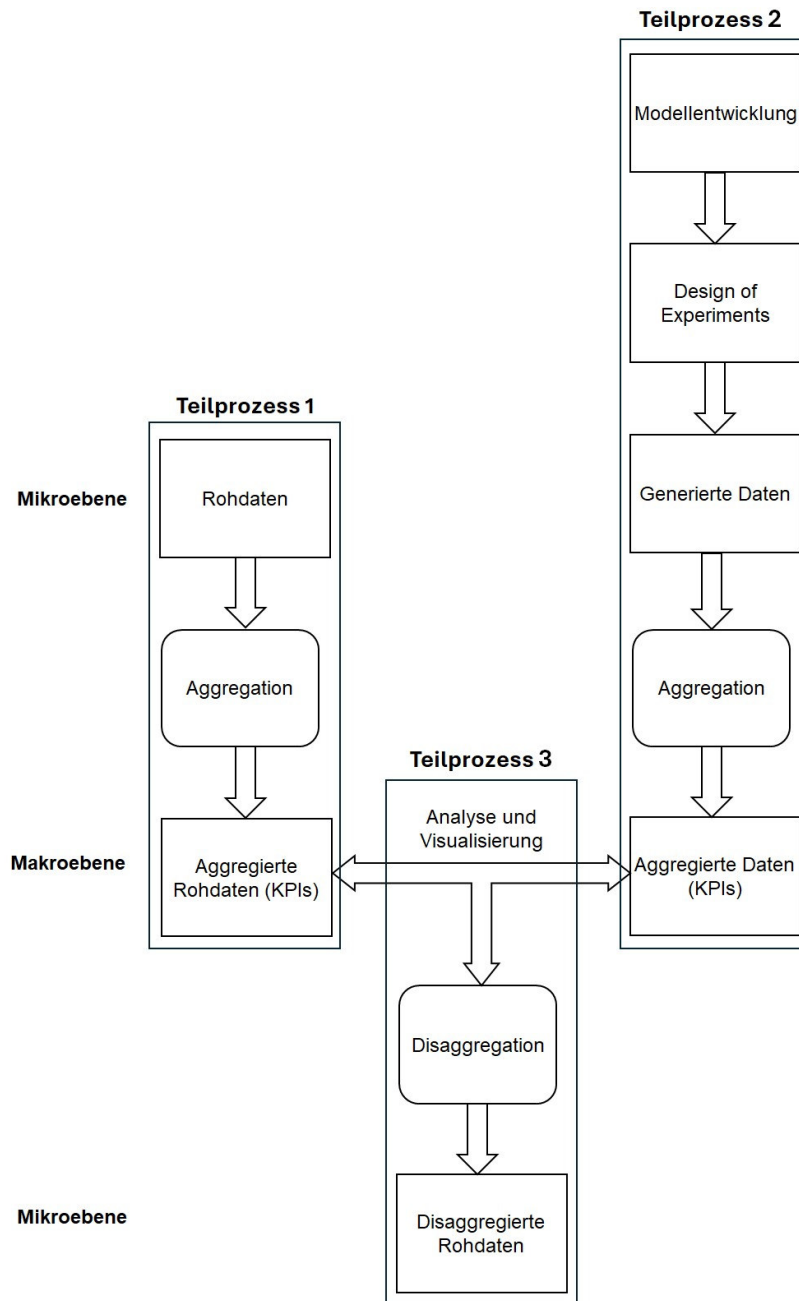


Abbildung 19: Umsetzung der Teilprozesse des Aggregations- und Disaggregationsprozesses

Im Folgenden werden die drei in Abbildung 19 dargestellten Teilprozesse des gesamten in Abschnitt 5 vorgestellten Aggregations- und Disaggregationsprozesses sukzessive erläutert

und umgesetzt. Der erste Teilprozess befasst sich mit der Verarbeitung der vorliegenden Rohdaten einer realen Fertigungslinie. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Rohdaten einer Fertigungslinie in einem einzelnen, unabhängigen Simulationsdurchlauf zufällig generiert. Dies entspricht einer leicht modifizierten Form der in Abschnitt 6.3 implementierten Klasse „simulation“ und kann im Programm „Projektarbeit_Rohdaten“ eingesehen werden. Der Kern der Modifikation besteht in der randomisierten Initialisierung der Werte einiger Faktoren der Simulation, um einen einzigen Simulationsdurchlauf durchzuführen. Die Parametrisierung der Faktoren werden durch Informationen aus Experteninterviews festgelegt. Dadurch sollen möglichst realitätsnahe Rohdaten erhalten werden. Die modifizierte Vorgehensweise wird im Folgenden erläutert. In der in Abschnitt 6.3 vorgestellten Anwendung zur Durchführung des Simulationsexperiments erfolgt eine Festlegung der Werte verschiedener Faktoren auf einen diskreten Wert und einen Wertebereich (siehe Abbildung 12). Um die Vergleichbarkeit zwischen den Rohdaten und den generierten Daten zu gewährleisten, werden die diskreten Werte zur Festlegung des Umfangs der Simulation den identischen Werten des Simulationsexperiments entsprechen. Dazu zählen die Werte der Anzahl der Maschinen in der Reihenfertigung und die Anzahl der Produkte, die in einem Fertigungsauftrag hergestellt werden sollen. Der diskrete Wert der Anzahl der DPs des LHS-Musters spielt bei der Generierung der Rohdaten keine Rolle. Diese Vorgehensweise lässt sich dadurch begründen, dass der betreffende Wert lediglich zur Unterteilung des Wertebereichs der Reproduktion der Daten der jeweiligen Faktoren im Rahmen des DoE dient. Die Generierung der Rohdaten erfolgt innerhalb eines einzigen Simulationsdurchlaufs, wobei die Werte der Faktoren einem diskreten Wert und nicht einer Vielzahl von Werten in einem Wertebereich entsprechen. Folglich wird ein einzelner zufälliger Wert für jeden Faktor im definierten Wertebereich zwischen dem minimalen und maximalen Wert mithilfe einer gleichmäßigen Verteilung ermittelt. Die zuvor genannten Werte dienen der Durchführung eines einzigen Simulationsdurchlaufs, dessen Ziel die Generierung möglichst realistischer Rohdaten der Fertigungslinie ist. Im darauffolgenden Schritt werden die generierten Rohdaten aggregiert, um die grundlegenden und komplexen KPIs der Rohdaten zu bilden. Sowohl die generierten als auch die aggregierten Daten werden in einer Excel-Datei gespeichert (siehe Angangsdatei „Produktion_Rohdaten“). Die Umsetzung der soeben beschriebenen Vorgehensweise zur Generierung von Daten sowie der Aggregation dieser Daten erfolgt durch einmalige Ausführung des Programms „Projektarbeit_Rohdaten“

Im nächsten Schritt gilt es nun, mithilfe der im Rahmen des Simulationsexperiments Daten zu generieren. Dies entspricht dem zweiten Teilprozess, welcher in Abbildung 19 dargestellt ist. Das Ziel besteht in der möglichst genauen Reproduktion der Rohdaten, um im Anschluss potenzielle Daten für eine erfolgreiche Disaggregation zu identifizieren. Im diesen Teilprozess erfolgt die eigentliche Durchführung des Simulationsexperiments anhand des in Abschnitt 6.3 implementierten Simulationsmodells. Die Durchführung der einzelnen Simulationsdurchläufe des Simulationsexperiments erfolgt entsprechend der im gleichen Abschnitt durchgeführten DoE. Im ersten Schritt wird das Programm „Projektarbeit_Simulation“ gestartet, sodass sich die in Abbildung 12 dargestellte Benutzeroberfläche zur Simulationssteuerung öffnet. Durch Betätigung der Schaltfläche "Start der Simulation" wird ein einzelner Simulationsdurchlauf für ein spezifisches LHS-Muster initiiert. Das gesamte Simulationsexperiment umfasst jedoch mehrere Simulationsdurchläufe. Vor Betätigung der Schaltfläche zum Starten der Simulation werden alle Werte und Wertebereiche der Faktoren festgelegt. Dazu werden im ersten Schritt die allgemeinen Simulationsfaktoren der Fertigungslinie betrachtet. Eine Zusammenfassung der Werte der allgemeinen Simulationsfaktoren ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Werte der allgemeinen Simulationsfaktoren

Allgemeiner Simulationsfaktor (X)	Wert ($X \in$)
Anzahl der Maschinen in Reihenfertigung	{6}
Anzahl der Produkte	{100}
Anzahl der DPs	{1, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000}

Für einen Simulationsfaktor X wird in Tabelle 8 der Wertebereich mit der Bezeichnung $X \in$ Wertebereich festgelegt. In Übereinstimmung mit den Werten in Tabelle 8 wird die Anzahl der Maschinen in Reihenfertigung auf sechs und die Anzahl der Produkte auf den Wert 100 festgelegt. Diese Werte werden über den gesamten Verlauf des Experiments konstant gehalten. Die Anzahl der DPs, die im LHS-Muster generiert werden sollen, wird nach jedem Simulationsdurchlauf manuell erhöht. Die Menge an Werten, die die Anzahl der DPs über das gesamte Simulationsexperiment annehmen kann, ist ebenfalls Tabelle 8 zu entnehmen. Das Simulationsexperiment umfasst somit die Erhöhung der Anzahl der DPs des LHS-Musters, um sukzessive die Genauigkeit der Unterteilung des Wertebereichs zu erhöhen. Dies dient zur Überprüfung, inwiefern eine genauere Unterteilung des Wertebereichs eine bessere Reproduktion der Rohdaten gewährleistet. Die Werte für die Anzahl der DPs entsprechen beim ersten Simulationsdurchlauf einem niedrigen Wert der mit jedem Simulationsdurchlauf sukzessive erhöht wird.

Im nächsten Schritt werden die Wertebereiche der Faktoren festgelegt. Während eines Simulationsdurchlaufs werden die Werte der Faktoren entsprechend dem generierten LHS-Muster in einem festgelegten Wertebereich variiert. Mithilfe der Informationen aus einigen Experteninterviews erfolgt eine sinnvolle und realitätsnahe Festlegung der minimalen und maximalen Werte zur Bestimmung des Wertebereichs. Die Festlegung des Wertebereichs ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Wertebereiche der Simulationsfaktoren

Simulationsfaktor (X)	Wertebereich ($X \in$)
Durchschnittliche Fertigungszeit	[60, 180]
Standardabweichung der Fertigungszeit	[3, 15]
Durchschnittliche Ausfallzeit	[30, 90]
Wahrscheinlichkeit fehlerhafter Produkte	[0.005, 0.02]
Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall	[0.85, 0.95]

Für einen Simulationsfaktor X wird in Tabelle 9 der Wertebereich mit der Bezeichnung $X \in$ Wertebereich festgelegt. Der in Tabelle 9 dargestellte Wertebereich wird über das gesamte Simulationsexperiment konstant gehalten. Lediglich die Anzahl der DPs für das LHS-Muster wird erhöht, um die Genauigkeit der Unterteilung der festgelegten Wertebereiche zu variieren. Nach der Festlegung aller Werte und Wertebereiche auf der Benutzeroberfläche kann ein einzelner Simulationsdurchlauf mithilfe der Schaltfläche „Start der Simulation“ gestartet werden. Mehrere Simulationsdurchläufe entsprechen dem gesamten Simulationsexperiment. Mit jedem Simulationsdurchlauf wird die Anzahl der DPs erhöht. Entsprechend der aktuellen Anzahl der DP des LHS-Musters werden eine Vielzahl von Datensätzen generiert. Die Daten jedes einzelnen Datensatzes werden auf identische Weise wie die Rohdaten der Fertigungslinie zu

grundlegenden und komplexen KPIs aggregiert. Diese aggregierten Daten gilt es im dritten und letzten Teilprozess aus Abbildung 19 zu vergleichen, um somit eine potenzielle Disaggregation der Daten zu ermöglichen.

Nach Ausführung des zweiten Teilprozesses stehen für alle verschiedenen Werte der Anzahl der DPs des LHS-Musters eine entsprechende Anzahl von Datensätzen zur Verfügung. Jeder einzelne Datensatz enthält die generierten Daten sowohl in Rohform als auch in aggregierter Form. Im Rahmen des dritten Teilprozesses erfolgt für jeden Simulationsdurchlauf ein Vergleich der Rohdaten mit den generierten Daten der Produktionslinie auf Aggregationsebene der KPIs. Dieser Vergleich wird für jeden einzelnen Datensatz eines Simulationsdurchlaufs durchgeführt. Mithilfe des Vergleichs werden die Abweichungen der einzelnen KPIs durch das Bilden der Differenzen ermittelt. Außerdem wird mithilfe der euklidischen Distanz eine Gesamtabweichung aller KPIs ermittelt. Die Ergebnisse der Vergleiche werden ebenfalls in der Excel-Datei gespeichert und dienen der weiteren Bewertung der Ergebnisse, um festzustellen, ob eine potenzielle Disaggregation der Daten auf diese Art und Weise möglich ist. Wenn für jeden Wert der Anzahl der DPs des LHS-Musters eine entsprechende Menge an Datensätzen erzeugt wurde, diese Daten aggregiert und verglichen wurden, gilt das Simulationsexperiment als abgeschlossen. Im folgenden Abschnitt werden nur die Ergebnisse der Simulation vorgestellt und auf dieser Grundlage die Funktionalität des Aggregations- und Disaggregationsprozesses evaluiert.

7.3 Vorstellung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt die Vorstellung der Ergebnisse des abgeschlossenen Simulationsexperiments. Das Simulationsexperiment umfasst mehrere Simulationen durchläufe. Jeder Simulationen durchlauf entspricht mehreren DP, welche durch ein LHS-Muster festgelegt werden. Innerhalb eines Simulationen durchlaufs werden für jeden DP eine Menge an Daten in einem Datensatz gespeichert. Somit entstehen in jedem Simulationen durchlauf eine Vielzahl an Datensätzen. Die Daten jedes einzelnen Datensatzes werden anschließend zu KPIs aggregiert. Ziel des Simulationsexperiments ist es, für jeden Simulationen durchlauf den Datensatz zu identifizieren, dessen KPIs die geringste Gesamtabweichung zu den KPIs der Rohdaten der Fertigungslinie aufweisen. Mithilfe der identifizierten Datensätze ist potenziell eine Disaggregation der aggregierten Daten möglich. Durch die Variation der Anzahl der DPs des LHS-Musters werden mehrere Simulationen durchläufe durchgeführt. Das Ziel dieses Kapitels ist die Vorstellung der jeweils Ergebnisse mit der geringsten Gesamtabweichung bei der Variation der Anzahl der DPs des LHS-Musters. Dazu wird für jeden einzelnen Simulationen durchlauf die jeweils geringste Gesamtabweichung strukturiert vorgestellt und erläutert. Darüber hinaus erfolgt eine Vorstellung der einzelnen Bestandteile der Gesamtabweichung des KPIs, welcher die geringste Gesamtabweichung zu den KPIs der Rohdaten der Fertigungslinie aufweist. Die Umsetzung der Vorstellung und Erläuterung erfolgt mithilfe einer Tabelle sowie einer geeigneten graphischen Darstellung. Im ersten Schritt werden die Ergebnisse des Simulationsexperiments in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Tabellarische Darstellung der Simulationsergebnisse

Anzahl der Design Points (n)	Minimale Gesamtabweichung
1	0.324116
5	0.0832452
10	0.0557124
25	0.0388756
50	0.0380349
100	0.0359984
250	0.0359223
500	0.0363478
1000	0.0359818
2500	0.0359735
5000	0.0359155
10000	0.0359423

Die DP in Tabelle 10 werden entsprechend den Aussagen in 4.2.3 im Folgenden mit n bezeichnet. In Tabelle 10 werden in jeder Zeile die einzelnen Simulationen durchläufe für die unterschiedliche Anzahl an DPs des gesamten Simulationsexperiments dargestellt. Die Tabelle gibt eine Zusammenfassung der Anzahl der DPs sowie der dazugehörigen minimalen Gesamtabweichung, um einen Überblick über die Zahlenwerte zu erhalten. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden die Werte der Simulationsergebnisse der Tabelle 10 präsentiert. Eine erneute explizite Referenzierung dieser Ergebnisse wird somit impliziert. Nachfolgend werden

diese Wertepaare von n und der minimalen Gesamtabweichung aus Tabelle 10 in Abbildung 20 graphisch dargestellt, wodurch eine weitere Übersicht über die Simulationsergebnisse gegeben wird.

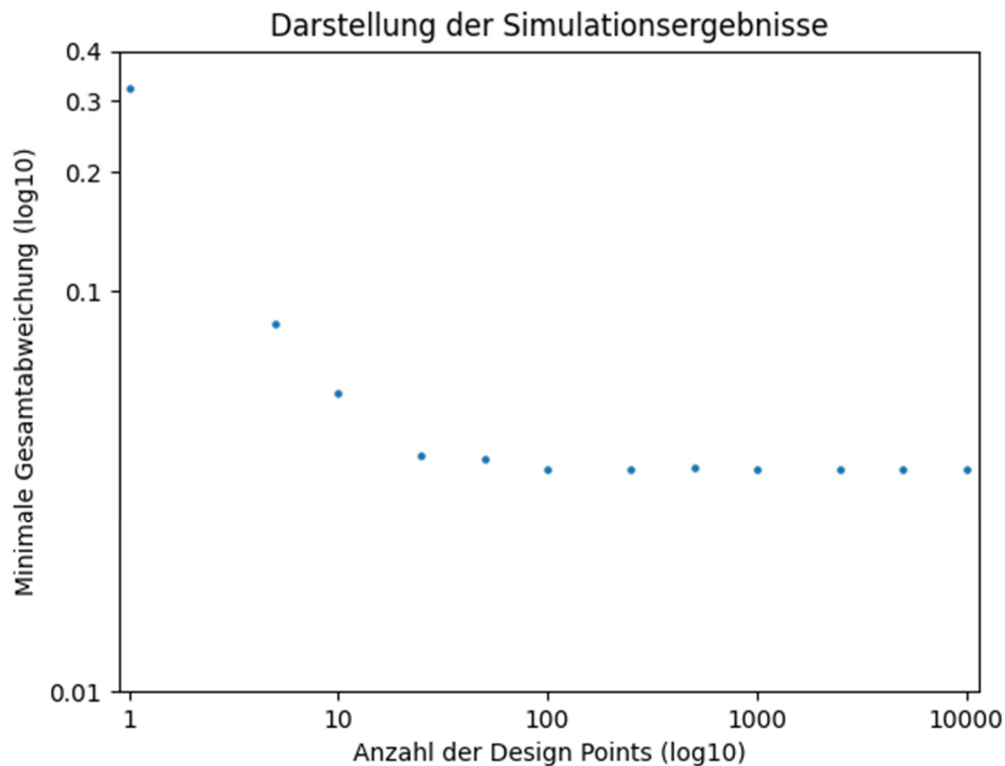


Abbildung 20: Doppelt logarithmische graphische Darstellung der Simulationsergebnisse

Abbildung 20 präsentiert eine graphische Darstellung der Beziehung zwischen der minimalen Gesamtabweichung und der Anzahl der DPs, um eine grundlegende Übersicht über den Umfang dieser Abhängigkeit zu gewinnen. Diese Abbildung wird durch die von Hunter, John D., et al. (2023) veröffentlichten und in Visual Studio 2019 eingebundenen Software erstellt. Im Detail dient sie der Analyse des Zusammenhangs zwischen der mit der Anzahl der DPs steigenden Genauigkeit der Unterteilung des Wertebereichs und der minimalen Gesamtabweichung. Die gewählte Darstellungsform entspricht einer doppelt logarithmischen Darstellung, da die Anzahl der Design Points über mehrere Zehnerpotenzen variiert und gleichzeitig eine verbesserte Skalierung der kleinen Werte der minimalen Gesamtabweichung erforderlich ist, um die Vergleichbarkeit dieser Werte zu gewährleisten. Ziel dieser Darstellungsform ist es, die Analyse der vorliegenden Daten zu erleichtern und ggf. Zusammenhänge und Abhängigkeiten erkennbar zu machen. In Abbildung 20 lässt sich für den Fall $n = 1$ ein Wert von 0,324116 beobachten. Dies entspricht einer hohen minimalen Gesamtabweichung für eine geringe Anzahl an DPs. Des Weiteren ergeben sich für $n = 5$ und $n = 10$ die Werte 0,0832452 und 0,0557124. Es lässt sich somit erkennen, dass mit einer steigenden Anzahl an DPs die minimale Gesamtabweichung verringert wird. Diese Aussagen werden durch die Werte 0,0388756 für $n = 25$ und 0,0380349 für $n = 50$ bestätigt. Für alle weiteren Werte von $n = 100$ bis $n = 10000$ kann keine bzw. nur eine sehr geringe Verringerung der Werte beobachtet werden. Diese Werte konvergieren annähernd gegen einen konstanten Grenzwert von 0,035. Diese Abbildung verdeutlicht, dass zum einen die minimale Gesamtabweichung mit einer steigenden Anzahl an DPs abnimmt, jedoch gegen einen konstanten Wert konvergiert. Der Datensatz, der die der das Minimum der Gesamtabweichung entspricht, stellt potenziell die beste Reproduktion der Rohdaten dar und wird im Folgenden genauer betrachtet. Dies entspricht dem Datensatz, der in der Excel-Datei im Abgabeordner der

Projektarbeit „2856_Fertigung_Daten“ für die Anzahl der DPs mit $n = 5000$ zu finden ist. Im nächsten Schritt erfolgt ein Vergleich der KPIs der Daten aus der Excel-Datei "2856_Fertigung_Daten" mit den KPIs der Rohdaten einer Fertigungslinie. Die Rohdaten entsprechen dem Datensatz in der Excel-Datei „Produktion_Rohdaten“ im Abgabeordner. Zu diesem Zweck werden die entsprechenden Werte in tabellarischer Form in Tabelle 11 gegenübergestellt.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der KPIs der Rohdaten und der generierten Daten der Fertigungslinie

KPI (Y)	Rohdaten	Generierte Daten	Anteil an der Gesamtabweichung (ΔY)
V	0,967651848	0,999995029	0,032343181
E	0,78774842	0,778360368	0,009388062
QR	0,982668977	0,975133215	0,007535762
OEE	0,749055361	0,759001275	0,009945914

In Tabelle 11 werden die Werte der Abweichung eines KPIs Y werden mit ΔY bezeichnet. Mithilfe von Tabelle 11 erfolgt im nächsten Schritt der Vergleich der KPIs der Rohdaten und der generierten Daten der Fertigungslinie. In der Tabelle sind alle verwendeten KPIs sowohl der Rohdaten als auch der generierten Daten gegenübergestellt. In einer weiteren Spalte werden die jeweiligen Anteile der KPIs an der Gesamtabweichung zwischen den Rohdaten und den generierten Daten dargestellt. Die einzelnen Anteile entsprechen Elementen zur Bestimmung der Gesamtabweichung mithilfe der euklidischen Distanz. Den größte Anteil an der Gesamtabweichung weist der KPI der Verfügbarkeit mit $\Delta V = 0,032343181$ vor. Der nächstkleinere Anteil entspricht dem des KPIs der Overall Equipment Effectiveness mit $\Delta OEE = 0,009945914$ gefolgt vom KPI der Effektivität mit $\Delta E = 0,009388062$. Den letzten und geringsten Anteil an der Gesamtabweichung stellt der KPI der Qualitätsrate mit $\Delta QR = 0,007535762$ dar. Im nachfolgenden Abschnitt werden die soeben vorgestellten Ergebnisse bewertet und eingeordnet.

7.4 Bewertung und Einordnung der Ergebnisse

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt die Bewertung und Einordnung der im vorangehenden Abschnitt präsentierten Ergebnisse des Simulationsexperiments. Im ersten Schritt werden die Anzahl der DPs den minimalen Gesamtabweichungen gegenübergestellt. Es wird zunächst festgehalten, dass das Ziel der Simulation in der Erzielung einer möglichst geringen Gesamtabweichung zwischen den KPIs der generierten Daten und der Rohdaten besteht. Das Minimum der Gesamtabweichung wird gesucht, daher entspricht eine Verringerung dieser Gesamtabweichung einer Verbesserung. Im Folgenden wird ein Vergleich des Datensatzes durchgeführt, welcher mit dem Minimum der Gesamtabweichung potenziell die beste Reproduktion der Rohdaten darstellt. Dabei werden die Ergebnisse der Bewertung in den Kontext der Fragestellung eingeordnet. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Bewertung und Einordnung der Ergebnisse in diesem Abschnitt.

Der erste relevante Punkt stellt der hohe Wert der minimalen Gesamtabweichung für $n = 1$ dar. Für $n = 1$ wird für alle Faktoren ein einziger DP erstellt. Aus der daraus resultierenden DM ergibt sich ein einziger Datensatz, wodurch eine gleichmäßige Verteilung der Werte über den gesamten Wertebereich als sehr unwahrscheinlich angenommen wird. Dies lässt sich dadurch begründen, dass für jeden einzelnen Faktor ein einziger Hypercube erstellt wird, dessen Mittelpunkt genau der Mitte des gesamten Wertebereichs des Faktors entspricht. Aus diesem Grund wird die daraus resultierende DM mit hoher Wahrscheinlichkeit keine zufrieden-

stellende Reproduktion der Rohdaten gewährleisten, wodurch die hohe minimale Gesamtabweichung zu erklären ist. Bei steigender Anzahl der DP für $n = 5$ und $n = 10$ wird der Wertebereich jedes Faktors in immer mehr Hypercubes unterteilt, wodurch immer gleichmäßiger über den Wertebereich verteilte Mittelpunkte der Hypercubes und daraus resultierende Werte der Faktoren, entstehen. Dadurch lässt sich begründen, dass die minimale Gesamtabweichung für eine steigende Anzahl an DPs abnimmt. Mit Erhöhung der Anzahl der DPs und damit zusammenhängende erhöhte Präzision der Unterteilung des Wertebereichs resultiert eine verbesserte Reproduktion der Daten. Die reduzierten minimalen Gesamtabweichungen für $n = 25$ und $n = 50$ bestätigen die soeben getroffene Aussage zur verbesserten Reproduktion. Für die steigenden Werte von n erfolgt weiterhin eine präzisere Unterteilung der Wertebereiche der Faktoren, wodurch die erneut verbesserte Gesamtabweichung begründet werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für Werte von $n = 1$ bis $n = 50$ eine Verringerung und somit auch eine Verbesserung der Gesamtabweichung zu erkennen ist. Für alle weiteren Werte von $n = 100$ bis $n = 10000$ konvergieren die minimalen Gesamtabweichungen annähernd gegen einen konstanten Grenzwert von 0,035, im Gegensatz zu den Werten für niedrigere n , bei denen ein geringerer Wert erreicht wird. Es sei darauf verwiesen, dass die Werte der minimalen Gesamtabweichung für hohe n nicht exakt gegen einen Wert von 0,035 konvergieren, sondern eine leichte Schwankung um diesen Wert aufweisen. Dies begründet sich darin, dass durch das LHS-Muster lediglich die Faktoren der Fertigungslinie festgelegt werden, die nachfolgend zur Generierung von Daten mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet werden. Durch die Randomisierung mithilfe dieser Verteilungen unterliegen die generierten Daten einer gewissen Ungenauigkeit, da jeder Datensatz einem einzigartigen Seed der jeweiligen Verteilung entspricht, wodurch eine exakte Reproduktion nahezu unmöglich ist. Aus diesem Grund kommt es zu Schwankungen der generierten Daten und der daraus resultierenden Werte um den Grenzwert von 0,035. Durch die Konvergenz gegen einen Grenzwert kann abgeleitet werden, dass mit ansteigender Zahl der DPs die minimalen Gesamtabweichungen zu Beginn abnehmen, jedoch mit einer immer größer werdenden Anzahl an DPs keine Auswirkungen mehr auf die Verbesserung der Gesamtabweichungen zu verzeichnen sind. Es lässt sich beobachten, dass bei einer bestimmten Anzahl an DPs ein Sättigungseffekt eintritt, wodurch weitere DPs nur noch in geringem Maße oder gar nicht mehr zur Verbesserung der Gesamtabweichung beitragen. Der Sättigungseffekt wird auch als abnehmender Grenznutzen bezeichnet und beschreibt, dass der Informationszuwachs durch einen zusätzlichen DP pro zusätzlichem Punkt abnimmt. Diese Erkenntnis lässt sich dadurch begründen, dass die Präzision im Rahmen der ME und des DoE keine weitere Verbesserung der Gesamtabweichungen für höhere Werte zulässt, da die Modellierung an ihre Grenzen stößt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass das DoE in Form des LHS bereits optimale Ergebnisse liefert und keine weitere Verbesserung der Präzision durch die weitere Erhöhung der Anzahl der DPs möglich ist.

Im nächsten Schritt erfolgt ein Vergleich des Datensatzes, der sich durch das Minimum der Gesamtabweichung als potenziell beste Reproduktion der Rohdaten auszeichnet, mit dem Datensatz der Rohdaten. Im Rahmen des Vergleichs erfolgt zudem eine Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich der zentralen Fragestellung, inwiefern eine Disaggregation von Daten möglich ist. Dieser Datensatz des Minimums der Gesamtabweichung entspricht demjenigen, der in der Excel-Datei "2856_Fertigung_Daten" im Abgabebereich der Projektarbeit für die Anzahl der DPs mit $n = 5000$ zu finden ist. Die Anteile an der Gesamtabweichung der KPIs für E, QR und OEE fallen jeweils mit Werten von unter 0,01 sehr gering aus. Der Anteil der Gesamtabweichung des KPIs von V liegt mit über 0,03 auf einem höheren Niveau als die Anteile der anderen KPIs, jedoch entspricht dies nach wie vor einem sehr geringen Wert. Die sehr geringen Werte stützen die Aussage, dass eine Reduktion der minimalen Gesamtabweichung durch eine Erhöhung von n möglich ist und somit die Reproduktion der Daten verbessert wird. Die signifikante Abweichung des Anteils der Gesamtabweichung von V wirft allerdings die Frage nach ihrem Ursprung auf. Eine valide Aussage zum Ursprung der aggregierten Werte kann an dieser Stelle nicht getroffen werden, da weitere Untersuchungen aller zugrunde liegenden Daten erforderlich sind. In diesem Kontext sei angemerkt, dass im Rahmen dieser Arbeit nicht angenommen wird, dass bei einer geringen Gesamtabweichung der KPIs ein Rückschluss von

den KPIs der generierten Daten auf die Rohdaten der realen Fertigungslinie möglich ist. In der Konsequenz werden lediglich Aussagen über die Reproduktion der KPIs der generierten Daten und der Rohdaten getroffen. Es wird jedoch nahegelegt, dass eine Reproduktion der KPIs der Rohdaten durch die mithilfe des Simulationsmodells generierten Daten möglich ist. Aufgrund der Ähnlichkeit der KPIs der generierten und der Rohdaten werden potenzielle Datensätze identifiziert, die eine Disaggregation der Rohdaten durch exakte Reproduktion dieser ermöglichen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine Erhöhung der Anzahl der DPs die Simulationsergebnisse bis zu einem gewissen Punkt verbessert. Darüber hinaus treten jedoch Grenzen der Modellierungspräzision auf, die durch den Sättigungseffekt beschrieben werden. Trotz dieser Einschränkungen bestätigen die Ergebnisse die Möglichkeit, mithilfe eines Simulationsexperiments realitätsnahe Datensätze zu generieren, die für weitere Analysen oder Optimierungen in der Fertigungslinie verwendet werden können. Nachfolgend werden die bewerteten Ergebnisse diskutiert und ein Fazit gezogen. Im nächsten Kapitel erfolgt eine Diskussion sowie ein Fazit über die Ergebnisse der Arbeit.

8 Diskussion und Fazit

Data-Farming und Disaggregation verfolgen zwar unterschiedliche Ansätze, jedoch ist eine Verbindung beider Verfahren insbesondere in datenintensiven Anwendungen wie Simulationen und Analysen möglich. Gemäß den Ausführungen von Horne und Seichter (2014) bildet Data Farming die Grundlage zur Optimierung von Entscheidungsfindungen im militärischen Bereichen. Gleichermäßen kann gemäß den Aussagen von Hunker (2021) Data Farming im Rahmen des KDD zur Entscheidungsfindung in Supply Chains dienen. Außerdem wird Data Farming zur Prognose des Bedarfs von Wartungsarbeiten an Maschinen verwendet (Hunker et al. 2021). Alle genannten Anwendungsbereiche benötigen als Grundlage eine geeignete Datenbasis, welche in manchen Fällen nur teilweise oder gar nicht in ihrer Rohform vorliegen. Aus diesem Grund kann die Disaggregation von Daten genutzt werden, um Daten in ihrer Rohform zu generieren die hinreichend genau einer Reproduktion der realen Rohdaten des betrachteten Systems entsprechen. Bei erfolgreicher Reproduktion der Rohdaten durch die Disaggregation wird die für weitere Analyseprozesse benötigte Datenbasis geschaffen. Daher zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, eine Verbindung zwischen dem Data-Farming und der Disaggregation von Daten herzustellen und befasst sich mit der neuartigen Fragestellung, ob die mithilfe von Data Farming generierten Daten zur Disaggregation bereits aggregierter Daten genutzt werden können.

Die Beantwortung der in der Problemstellung formulierten Frage nach den Möglichkeiten der Disaggregation bereits aggregierter Daten erfordert zunächst die Diskussion der in Kapitel 5 vorgestellten Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten. Dabei werden die einzelnen Teilprozesse in Abbildung 11 diskutiert. Die Diskussion erfolgt unter Einbezug der Implementierung des Simulation in Kapitel 6 sowie der in Kapitel 7 vorgestellten Ergebnisse der Anwendung der Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten anhand eines Fallbeispiels. Die Methode entspricht einem Aggregations- und Disaggregationsprozess und verfolgt das Ziel, die Fragestellung nach der Disaggregation bereits aggregierter Daten zu beantworten. Der gesamte Aggregations- und Disaggregationsprozess (siehe Abbildung 19) setzt sich aus mehreren Teilprozessen zusammen, welche im Folgenden sukzessive diskutiert werden.

Im ersten Teilprozess wurden Rohdaten einer Fertigungslinie durch einen einzelnen Simulationsdurchlauf generiert. Dafür erfolgte im ersten Schritt die Festlegung der Werte jedes Faktors in einem festgelegten Faktorbereich, der mithilfe von Expertengesprächen definiert worden war. Durch die gesammelten Informationen aus den Expertengesprächen wurden geeignete Faktorbereiche festgelegt. Im nächsten Schritt wurden die Werte für jeden Simulationsfaktor randomisiert im festgelegten Faktorbereich gesetzt. Bei der Generierung der Rohdaten wurde eine randomisierte Erzeugung der Daten gewährleistet, indem für jeden Festlegung der Werte für jeden Faktor einzigartige Seeds verwendet worden sind. Durch die Verwendung einzigartiger Seeds für jeden Faktor wird eine Reproduktion der Rohdaten ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Simulation für Datensätze von $n = 1$ bis $n = 10000$ bestätigen die Einzigartigkeit der generierten Rohdaten, da bei keinem einzigen generierten Datensatz eine exakte Reproduktion der Rohdaten möglich war. Ein möglicher Kritikpunkt bei der Rohdatengenerierung liegt jedoch in den zugrunde liegenden Annahmen und den daraus resultierenden Ungenauigkeiten in der Modellierung der Fertigungslinie. Diese Annahmen wurden im Rahmen der ME getroffen, welche im Folgenden erläutert und diskutiert werden.

Im zweiten Teilprozess wurden Daten einer Fertigungslinie mithilfe eines Simulationsexperiments im Zuge eines Data-Farming-Prozesses generiert. Dafür erfolgte im ersten Schritt die ME anhand vorher festgelegter Anforderungen, welche im Folgenden diskutiert werden. Die erste Anforderung besagt, dass das Simulationsmodell Rohdaten für jeden Fertigungsprozess generieren muss. Die Implementierung des Simulationsmodells in Abschnitt 6.3 sowie die daraus resultierenden Simulationsdaten im Abgabebereich belegten die Erfüllung der Anforderung an die Funktionsweise des Modells. Des Weiteren wurden die Anforderungen 2 und 3 an

die Generierung grundlegender Elemente der quantitativen und zeitbezogenen Daten ebenfalls durch das Simulationsmodell und die dazugehörigen Daten bestätigt. In den Simulationsdaten finden sich jeweils Datensätze, welche alle geforderten grundlegenden zeitbezogenen sowie quantitativen Daten enthalten. Im Rahmen der Implementierung des Simulationsmodells werden sämtliche äußere Störungsfaktoren vernachlässigt, sodass lediglich Störungen innerhalb des betrachteten Systems modelliert werden. Dies erfüllt die Anforderungen 4. Die Anforderung 5 besagt, dass eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Fertigungslinie umgesetzt werden muss. Dies konnte durch das Simulationsmodell nicht gewährleistet werden, da dies im Widerspruch zu Anforderung 4 steht. Dies stellt einen wesentlichen Kritikpunkt in der Umsetzung des Simulationsmodells dar, da die Nähe zur Realität im Gegensatz zu den getroffenen Annahmen zur Komplexitätsreduktion steht und weiterer Analysen bedarf. Die Struktur einer sequenziellen Reihenfertigung ohne parallele Prozesse wird in Abschnitt 6.3 in der geforderten Art und Weise umgesetzt. Die erzeugten Werte in den Simulationsdaten dienen zur Verifikation der Umsetzung. Die Daten legen dar, dass alle Prozesse nacheinander durchgeführt werden, wobei sich Störungen eines Prozesses auf alle in der Reihe vorliegenden Maschinen auswirken. Folglich kann die Erfüllung von Anforderung 6 bestätigt werden. Anforderung 7 verlangt nach standardisierten Simulationdurchläufen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Erfüllung dieser Anforderung ist ebenfalls gegeben, da bei der Durchführung des Simulationsexperiments lediglich die Werte der Faktoren in einem konstanten Faktorbereich variiert werden. Die Anforderung 8, welche die Erfassung der Daten in Bezug auf Menge und Zeit fordert, wird durch die Vollständigkeit der Inhalte der generierten Datensätze bestätigt. Im Anschluss an die ME wurde das DoE als Bestandteil des zweiten Teilprozesses für die Variation der Faktoren des Simulationsexperiments definiert. Das in dieser Arbeit verwendete DoE entspricht dem LHS und gewährleistet eine hinreichende Abdeckung des gesamten Faktorbereichs sowie eine adäquate Laufzeit des Simulationsexperiments. Wie in Abbildung 15 beispielhaft für einen Faktor zu erkennen, wurde das LHS erfolgreich in Abschnitt 6.3 umgesetzt, da die Werte des Faktors gleichmäßig über den gesamten Faktorbereich verteilt sind. Gleichmaßen wurden nicht zu viele Werte eines einzelnen Faktors betrachtet, um den Umfang aller möglichen Faktorkombinationen zu kontrollieren. Sowohl die Rohdaten der Fertigungslinie als auch die wurden im letzten Schritt des ersten und zweiten Teilprozesses mithilfe identischer Berechnungsvorschriften zu KPIs aggregiert.

Im dritten und letzten Teilprozess erfolgte der Vergleich der KPIs der Rohdaten und der generierten Daten. Dieser Vergleich wird im Folgenden diskutiert. Die Werte der Abweichungen zwischen den generierten Daten und den Rohdaten waren sehr gering, wodurch sich die Funktionsfähigkeit der ausgewählten Form des DoE bestätigt werden konnte. Es konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass eine Erhöhung der Anzahl der DPs bis zu einem bestimmten Punkt eine Verbesserung der Reproduktion der Rohdaten bewirkte. Bei einer moderaten Anzahl an DPs wurde eine signifikante Reduktion der Gesamtabweichung beobachtet. Dies lässt den Schluss zu, dass eine feinere Unterteilung der Wertebereiche der Faktoren zu einer genaueren Nachbildung der realen Daten führt. Dadurch wird verdeutlicht, dass die Wahl einer angemessenen Anzahl von DPs einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Simulationsergebnisse hat. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass ab einer bestimmten Anzahl von DPs ein Sättigungseffekt eintritt. Ab diesem Punkt konvergierten die Gesamtabweichungen gegen einen nahezu konstanten Wert, was die Grenzen der Modellierungskapazitäten aufzeigte. Eine weiter steigende Anzahl an DPs führt demnach nur noch zu marginalen Verbesserungen, sodass der zusätzliche Aufwand nicht mehr im Verhältnis zum Nutzen steht. Es lässt sich somit ableiten, dass eine optimale Anzahl von DPs existiert. Zudem deuten die Schwankungen in den Gesamtabweichungen bei höheren DPs darauf hin, dass der Einfluss von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Seeds weiter untersucht werden sollte, um die Präzision des Simulationsmodells zu verbessern. Daher lässt sich feststellen, dass eine exakte Reproduktion der Rohdaten durch die generierten Daten nicht möglich ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Generieren von Daten mithilfe einzigartiger Seeds für die Eingangsparameter der Wahrscheinlichkeitsverteilungen eine perfekte Reproduktion unmöglich macht. Es kann lediglich das Ziel verfolgt werden, die Abweichungen zwischen den generierten Daten und den Rohda-

ten so gering wie möglich zu halten. Zum Abschluss des Vergleichs im Zuge des dritten Teilprozesses wurden die einzelnen Bestandteile des KPIs mit der geringsten Gesamtabweichung zu den KPIs der Rohdaten betrachtet. Dabei hat die höhere Abweichung des KPIs V im Vergleich zu den übrigen Kennzahlen Fragen aufgeworfen, die einer weiteren Untersuchung bedürfen. Eine Überprüfung der zugrunde liegenden Daten könnte Aufschluss darüber geben, warum dieser KPI stärker von den Rohdaten abweicht. Aus diesem Grund kann lediglich mithilfe des Vergleichs der Daten in Form von KPIs keine valide Aussage über den Ursprung der Abweichungen getroffen werden. Dafür müssen die generierten Daten und die Rohdaten der Fertigungslinie auf Mikroebene und nicht auf Makroebene miteinander verglichen werden.

Abschließend wird auf Grundlage der soeben erfolgten Diskussion ein Fazit über die Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten gezogen, da diese den Kern dieser Arbeit darstellt. Der erste Teilprozess zur Generierung der Daten konnte erfolgreich durchgeführt werden, da eine exakte Reproduktion derselben nicht möglich war und somit eine solide Datenbasis geliefert wurde. Der zweite Teilprozess zur Generierung von Daten unter Zuhilfenahme eines Data-Farming-Prozesses bedurfte einiger Einschränkungen, da nicht alle Anforderungen an das Simulationsmodell erfüllt werden konnten. Gleichwohl kann der zweite Teilprozess zur Entwicklung einer Simulation zum Data-Farming als erfolgreich betrachtet werden. Der dritte Teilprozess wurde ebenfalls erfolgreich abgeschlossen. Die Arbeit konnte mehrere Aussagen zur Möglichkeit der Disaggregation aggregierter Daten durch Data-Farming treffen.

Die Resultate werfen gleichermaßen Fragen über die Grenzen der Modellierung auf. Eine Anpassung der Anforderungen an das Modell sowie eine Weiterentwicklung der Komplexität können als Gegenstand weiterer Arbeiten verwendet werden. Des Weiteren sollte untersucht werden, inwiefern eine detailliertere Gegenüberstellung der Daten die Ursprünge der Ungenauigkeiten in den Resultaten aufdeckt und somit eine Optimierung der Modellierung ermöglicht. Eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Methode würde die Generierung einer Datenbasis für eine Vielzahl von Bereichen ermöglichen, die weitere Analysen zulässt. Potenzielle Anwendungsbereiche dieser Methodik sind neben der Herkunft des Data Farming im militärischen Bereich und dem in dieser Arbeit betrachteten Bereich der Fertigung auch die Umweltforschung, Medizin oder Politik. So können beispielsweise in den generierten Rohdaten potenzielle Gründe für die Ursachen des Klimawandels und der Entstehung von Krankheiten identifiziert werden. Ebenso kann eine Analyse der generierten Daten die Entscheidungsfindung in der Politik unterstützen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Abschnitt wird das Hauptziel dieser Arbeit noch einmal kurz angeführt, um im nächsten Schritt die Methoden zur Erreichung dieses Ziels zu erläutern. Anschließend werden die wichtigsten Ergebnisse und daraus resultierende Erkenntnisse zusammengefasst. Abschließend erfolgt die Einordnung des Beitrags dieser Arbeit in den Kontext des bestehenden Wissen und ein Ausblick auf weitere potenzielle wissenschaftliche Arbeiten.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Hauptziel, ein geeignetes Simulationsmodell zu identifizieren, welches die Disaggregation aggregierter Daten einer Fertigungslinie in Form von KPIs ermöglicht. Zur Erreichung des Ziels wird eine Methode zur Aggregation und Disaggregation von Daten ausgearbeitet, welcher ein Simulationsexperiment zur Generierung von Daten im Rahmen eines Data-Farming-Prozesses beinhaltet. Die Ergebnisse des Experiments demonstrieren, dass eine Steigerung der Präzision der Simulation sowie eine verbesserte Reproduktion der Rohdaten erzielt werden kann. Die Ergebnisse belegen die grundlegende Funktionsfähigkeit des Simulationsmodells und demonstrieren, dass die vorliegende Arbeit einer zielführenden Vorgehensweise gefolgt ist, die schrittweise optimierte Ergebnisse hervorgebracht hat. Des Weiteren werden jedoch die Grenzen der Modellierung ersichtlich, da eine Steigerung der Genauigkeit der Simulation lediglich zu einer verbesserten Reproduktion der Daten in begrenztem Umfang führt. Eine weitere Einschränkung zeigt sich beim Vergleich der generierten Daten mit den Rohdaten auf Ebene der KPIs. Ein Vergleich der Daten auf der Ebene der KPIs lässt keine Aussagen auf Ebene der Rohdaten zu. Dies ist darin zu begründen, dass durch die Aggregation spezifische Informationen der Rohdaten verloren gehen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten jedoch Datensätze identifiziert werden, die potenziell zur Disaggregation verwendet werden können. Die tatsächliche Umsetzung der Disaggregation erfordert eine detaillierte Analyse der zugrunde liegenden Daten, welche Gegenstand weiterer wissenschaftlicher Arbeiten sein kann, um an die Erkenntnisse dieser Arbeit anzuknüpfen.

Die vorliegende Arbeit kann somit als Grundlage für weitere wissenschaftliche Arbeiten dienen, wobei die durch den Aggregations- und Disaggregationsprozess identifizierten Daten verwendet oder der Prozess mit dem Ziel erweitert werden kann, eine exakte Reproduktion der Rohdaten einer Fertigungslinie zu ermöglichen. Außerdem besteht die Möglichkeit durch die Erweiterung der Vorgehensweise dieses Prozesses zu evaluieren, inwiefern die in dieser Arbeit identifizierten Werte tatsächlich zur Disaggregation von Daten geeignet sind. Weiterhin stellt sich die Frage, inwiefern der Prozess variiert werden kann, um die Grenzen zu erweitern und eine verbesserte Genauigkeit bei der Generierung von Daten zu erzielen. Dazu ist eine Analyse der Grenzen und Abstrahierung bei der ME und des DoE erforderlich, um potenzielle Verbesserungen zu identifizieren und diese anschließend umzusetzen. Für zukünftige Forschungen könnte es ebenfalls sinnvoll sein, alternative Sampling-Methoden zu untersuchen, die möglicherweise eine noch genauere Reproduktion der Rohdaten ermöglichen, ohne die Anzahl der DPs exponentiell zu erhöhen. Darüber hinaus könnte die Untersuchung von Störungen oder Unsicherheiten in den Fertigungsprozessen, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden, zu einer noch realistischeren Simulation führen. Weitere Forschungen könnten auch die Anwendung der erstellten Modelle auf unterschiedliche Fertigungsprozesse oder die Integration von Echtzeit-Daten zur dynamischen Anpassung der Simulationsergebnisse beinhalten. Letztlich könnte eine tiefere Untersuchung der praktischen Umsetzung und Anwendung der Simulationsergebnisse in der industriellen Praxis helfen, die Vorteile der Simulation weiter zu optimieren und konkrete Verbesserungen in realen Fertigungsumgebungen zu erzielen.

Literaturverzeichnis

ISO 22400-1:2014: Automation Systems and Integration - Key Performance Indicators (KPIs) for Manufacturing Operations Management - Part 1: Overview, Concepts and Terminology.

ISO 22400-2:2014: Automation Systems and Integration - Key Performance Indicators (KPIs) for Manufacturing Operations Management - Part 2: Definitions and Descriptions.

Bauernhansl, Thomas (Hg.) (2020): *Fabrikbetriebslehre 1. Management in der Produktion*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer.

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

Bopp, M.; Herzog, A. (1987): Disaggregation von Bevölkerungsdaten: Probleme und Lösungsansätze am Beispiel der Agglomeration Zürich. In: *Geogr. Helv.* 42 (3), S. 211–220. DOI: 10.5194/gh-42-211-1987.

Bosch, Siegfried (2021): *Lineare Algebra*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Brandstein, Alfred; Horne, Gary (1998): Data Farming: A Meta-Technique for Research in the 21st Century. In: *Maneuver Warfare Science* 1998, S. 93–99.

Braz, Renata Gomes Frutuoso; Scavarda, Luiz Felipe; Martins, Roberto Antonio (2011): Reviewing and Improving Performance Measurement Systems: An Action Research. In: *Management by Measurement Designing Key Indicators and Performance Measurement Systems* 133 (2), S. 751–760. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.06.003.

Cicirelli, Franco; Guerrieri, Antonio; Mastroianni, Carlo; Spezzano, Giandomenico; Vinci, Andrea (Hg.) (2019): *The Internet of Things for Smart Urban Ecosystems*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

Dean, Angela; Voß, Daniel; Draguljić, Danel (2017): *Design and Analysis of Experiments*. Second Edition. Cham, Switzerland: Springer (Springer Texts in Statistics).

Dieterich, Ernst-Wolfgang (2000): *C++*. München, Wien: Oldenbourg.

Dobra, Péter (2022): Towards 100% Overall Equipment Effectiveness (OEE) at Semi-automatic Assembly Lines – Case Study. In: Leszek Borzemski, Henry Selvaraj und Jerzy Świątek (Hg.): *Advances in Systems Engineering*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, S. 281–289.

Fukada, Yoshiro; Patzke, Robert (2010): Standardization of Key Performance Indicator for Manufacturing Execution System. In: SICE (Hg.): *Proceedings of SICE Annual Conference*. SICE Annual Conference. Taipei, Taiwan, 08/18/2010 - 08/21/2010. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 263–265.

Gomila, Laurent (2023): SFML: Simple and Fast Multimedia Library. Online verfügbar unter <https://www.sfml-dev.org/>.

Helbing, Kurt W. (Hg.) (2010): *Handbuch Fabrikprojektierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Horne, Gary; Meyer, Ted (2004): Data Farming: Discovering Surprise. In: Ricki G. Ingalls (Hg.): *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. Winter Simulation Conference (WSC). Washington, D.C, USA, 12/5/2004 - 12/8/2004. New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 792–798.

Horne, Gary; Seichter, Stephan (2014): Data Farming in Support of NATO Operations - Methodology and Proof-of-Concept. In: Andreas Tolk (Hg.): *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. Proceedings of the Winter Simulation Conference. Savannah, GA, USA, 07.12-10.12. New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 2355–2363.

- Hunker, Joachim (2021): Farming for Mining: Combining Data Farming and Data Mining to Gain Knowledge in Supply Chains. In: S. Kim (Hg.): Winter Simulation Conference (WSC). Winter Simulation Conference (WSC). Phoenix, AZ, USA, 12/12/2021 - 12/15/2021. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Hunker, Joachim; Wuttke, Alexander; Scheidler, Anne A.; Rabe, Markus (2021): A Farming-for-Mining-Framework to Gain Knowledge in Supply Chains. In: S. Kim (Hg.): Winter Simulation Conference (WSC). Winter Simulation Conference (WSC). Phoenix, AZ, USA, 12/12/2021 - 12/15/2021. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 1–12.
- Hunter, John D., et al. (2023): matplotlib. Online verfügbar unter <https://pypi.org/project/matplotlib/>.
- Ijiri, Yuji (1971): Fundamental Queries in Aggregation Theory. In: *Journal of the American Statistical Association* 66 (336), S. 766–782. DOI: 10.1080/01621459.1971.10482345.
- DIN EN 62264-1:2014: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie.
- J. McNamara (2023): xlsxwriter. Online verfügbar unter <https://pypi.org/project/XlsxWriter/>.
- Kemper, Hans-Georg; Finger, Ralf (2015): Transformation Operativer Daten. In: Peter Gluchowski und Peter Chamoni (Hg.): Analytische Informationssysteme. Business Intelligence-Technologien und -Anwendungen. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer Berlin Heidelberg, S. 129–145.
- Law, Averill M. (2017): A Tutorial on Design of Experiments for Simulation Modeling. In: Wai Kin Chan, Andrea D'Ambrogio, Grégory Zacharewicz, Navonil Mustafee, Gabriel Wainer und Ernest H. Page (Hg.): Proceedings of the Winter Simulation Conference. Winter Simulation Conference (WSC). Las Vegas, NV, USA, 12/3/2017 - 12/6/2017. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 550–564.
- Leisten, Rainer (1996): Iterative Aggregation und Mehrstufige Entscheidungsmodelle. Heidelberg, Deutschland: Physica-Verlag HD.
- Loibl, Wolfgang; Orthofer, Rudolf (1995): Kleinräumige Disaggregation der NOx - Emissionen aufbauend auf dem Emissionskataster des Umweltbundesamtes. Hg. v. Umweltbundesamt. Wien, Österreich.
- Microsoft Corporation (2019): Visual Studio. Online verfügbar unter <https://visualstudio.microsoft.com/>.
- Microsoft Corporation (2021): Microsoft Excel. Online verfügbar unter <https://www.microsoft.com/de-de/microsoft-365/excel>.
- Ningxuan, Kang; Cong, Zhao; Jingshan, Li; Horst, John A. (2015): Analysis of Key Operation Performance Data in Manufacturing Systems. In: Barbara Carminati (Hg.): Proceedings of the IEEE International Conference on Big Data. IEEE International Congress on Big Data (Big Data Congress). Santa Clara, CA, USA, 10/29/2015 - 11/1/2015. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), S. 2767–2770.
- Patole, Manohar (2018): Localization of SDGs Through Disaggregation of KPIs. In: *Economies* 6 (1), S. 15. DOI: 10.3390/economies6010015.
- Pourghebleh, Behrouz; Navimipour, Nima Jafari (2017): Data Aggregation Mechanisms in the Internet of Things: A Systematic Review of the Literature and Recommendations for Future Research. In: *Journal of Network and Computer Applications* 97, S. 23–34. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.08.006.
- Rabe, Markus; Scheidler, Anne A. (2015): Farming for Mining-Entscheidungsunterstützung mittels Simulation im Supply Chain Management. In: Markus Rabe und Uwe Clausen (Hg.): Simulation in Production and Logistics. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 671–679.

- Ramis Ferrer, Borja; Muhammad, Usman; Mohammed, Wael; Martínez Lastra, José (2018): Implementing and Visualizing ISO 22400 Key Performance Indicators for Monitoring Discrete Manufacturing Systems. In: *Machines* 6 (3), S. 39. DOI: 10.3390/machines6030039.
- Rogers, David F.; Plante, Robert D.; Wong, Richard T.; Evans, James R. (1991): Aggregation and Disaggregation Techniques and Methodology in Optimization. In: *Operations Research* 39 (4), S. 553–582. DOI: 10.1287/opre.39.4.553.
- Spur, Günter (2008): *Hütte - Das Ingenieurwissen*. 33. Aufl. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer (Springer eBook Collection Computer Science & Engineering).
- Stricker, Nicole; Pfeiffer, András; Moser, Emanuel; Kádár, Botond; Lanza, Gisela (2016): Performance Measurement in Flow Lines – Key to Performance Improvement. In: *CIRP Annals* 65 (1), S. 463–466. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.031.
- Texus (2023): TGUI: Texus' Graphical User Interface. Online verfügbar unter <https://tgui.eu/>.
- van Daal, Jeroen; Merkies, A. H. Q. M. (1984): *Aggregation in Economic Research. From Individual to Macro Relations*. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands.
- Wang, Shie-Yuan; Wu, Chia-Ming; Lin, Yi-Bing; Huang, Ching-Chun (2019): High-Speed Data-Plane Packet Aggregation and Disaggregation by P4 Switches. In: *Journal of Network and Computer Applications* 142, S. 98–110. DOI: 10.1016/j.jnca.2019.05.008.
- Westkämper, Engelbert (2006): *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer.

Anhang

Anhang A: Verfügbarkeit

	Begriff	Beschreibung
	Name	Verfügbarkeit
	ID	V
	Beschreibung	Prozentualer Anteil der tatsächlichen an der geplanten Zeit, in der eine Maschine wertschöpfend produziert
Inhalt	Anwendungsbereich	Fertigung
	Formel	$V = \frac{FIZ}{BSZ}$
	Maßeinheit	Dimensionslos
	Wertebereich	$0 \leq V \leq 1$
	Messzeitpunkte	Echtzeit, periodisch oder zu bestimmten Zeitpunkten
	Nutzung	Gibt Überblick über die zeitliche Effizienz einer Maschine
	Beschränkung	Keine Berücksichtigung von Rüstzeiten, Pufferzeiten und variierender Produktqualität
Kontext	Zielgruppe	Unternehmensführung und MOM
	Fertigungsmethodik	Diskret, kontinuierlich oder losweise
	Anmerkungen	Keine

Anhang B: Effektivität

	Begriff	Beschreibung
	Name	Effektivität
	ID	E
	Beschreibung	Maß dafür, wie effektiv eine Maschine während der Fertigungszeit ist
Inhalt	Anwendungsbereich	Fertigung
	Formel	$E = \frac{FSZ \cdot PQ}{FIZ}$
	Maßeinheit	Dimensionslos
	Wertebereich	$E \geq 0$
	Messzeitpunkte	Echtzeit, periodisch oder zu bestimmten Zeitpunkten
	Nutzung	Gibt Überblick über die Effektivität einer Maschine während eines Auftrages
	Beschränkung	Keine Berücksichtigung von variierenden Fertigungsprozessen und menschlichen Faktoren
Kontext	Zielgruppe	Unternehmensführung und MOM
	Fertigungsmethodik	Diskret, kontinuierlich oder losweise
	Anmerkungen	Kann Werte über 1 annehmen, wenn die Istzeiten der Fertigung die Sollzeiten unterschreiten

Anhang C: Qualitätsrate

	Begriff	Beschreibung
	Name	Qualitätsrate
	ID	QR
	Beschreibung	Gesamtprozentsatz der Teile mit guter Qualität nach Nacharbeit
Inhalt	Anwendungsbereich	Fertigung
	Formel	$QR = \frac{GQ}{PQ}$
	Maßeinheit	Dimensionslos
	Wertebereich	$0 \leq QR \leq 1$
	Messzeitpunkte	Echtzeit, periodisch oder zu bestimmten Zeitpunkten
	Nutzung	Gibt einen Überblick über Qualität der gefertigten Produkte
	Beschränkung	Keine Berücksichtigung nachzubearbeitender Produkte und der Kosten
Kontext	Zielgruppe	Unternehmensführung und MOM
	Fertigungsmethodik	Diskret, kontinuierlich oder losweise
	Anmerkungen	Keine

Anhang D: Overall Equipment Effectiveness

	Begriff	Beschreibung
Inhalt	Name	Overall Equipment Effectiveness
	ID	OEE
	Beschreibung	Bewertungsmaß für die Produktivität einer gesamten Fertigung dar, welches sich aus drei grundlegenden KPIs zusammensetzt
	Anwendungsbereich	Fertigung
	Formel	$OEE = V \cdot E \cdot QR$
	Maßeinheit	Dimensionslose Größe
	Wertebereich	$0 \leq OEE \leq 1$
Kontext	Messzeitpunkte	Echtzeit, periodisch oder zu bestimmten Zeitpunkten
	Nutzung	Gibt Überblick über die gesamte Leistung einer Fertigung
	Beschränkung	Keine Berücksichtigung von Materialqualität oder Arbeitsbedingungen und nur begrenzte Aussagekraft über gesamte Unternehmensleistung
	Zielgruppe	Unternehmensführung und MOM
	Fertigungsmethodik	Diskret, kontinuierlich oder losweise