

Beherrschung komplexer Produktionsprozesse durch Autonomie

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Dr. rer. pol.
in der Wissenschaftsdisziplin „Betriebswirtschaftslehre“

eingereicht an der
Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Potsdam

von
Dipl.-Ing. Hanna Katharina Theuer

Disputation am 14. Januar 2022

Soweit nicht anders gekennzeichnet, ist dieses Werk unter einem Creative-Commons-Lizenzvertrag Namensnennung 4.0 lizenziert.

Dies gilt nicht für Zitate und Werke, die aufgrund einer anderen Erlaubnis genutzt werden. Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

1. Gutachter und Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Norbert Gronau

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. Prozesse und Systeme

Universität Potsdam

2. Gutachterin:

Prof. Dr. rer pol Moreen Heine

Institut für Multimediale und Interaktive Systeme

Universität Lübeck

Online veröffentlicht auf dem

Publikationsserver der Universität Potsdam:

<https://doi.org/10.25932/publishup-54184>

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-541842>

Abstract

Modern technologies enable the actors of a production process to autonomous decision-making, information-processing, and decision- execution. It devolves hierarchical controlled relationships and distributes decision-making among many actors. Positive consequences include using local competencies and fast on-site action without (time-)consuming cross-process planning run by a central control instance. Evaluating the decentralization of the process helps to compare different control strategies and thus contributes to the mastery of more complex production processes. Although the importance of the communication structure of these actors increases, no method uses this as a basis for operationalizing decentralization.

This motivates the focus of this thesis. It develops a three-level evaluation model determining the decentralization of a production process based on two determinants: the communication and decision-making structure of the autonomous actors involved. Based on a definition of decentralization of production processes, it set requirements for a key value that determines the structural autonomy of the actors and selects a suitable social network analysis metric. The possibility of integrated decision-making and decision execution justifies the additional consideration of the decision structure. The differentiation of both factors forms the basis for the classification of actors; the multiplication of both values results in the characteristic value *real autonomy* describing the autonomy of an actor, which is the key figure of the model's first level.

Homogeneous actor autonomy characterizes a high *decentralization of the process step*, which is the object of consideration of the second level of the model.

Comparing the existing with the maximum possible decentralization of the process steps determines the *Autonomy Index*. This figure operationalizes the decentralization of the process at the third level of the model.

A simulation study with two simulation experiments – a central and a decentral controlled process – at Zentrum Industrie 4.0 validates the evaluation model. The application of the model to an industrial production process underlines the practical applicability.

Zusammenfassung

Moderne Technologien befähigen die beteiligten Akteure eines Produktionsprozesses die Informationsaufnahme, Entscheidungsfindung und -ausführung selbstständig auszuführen. Hierarchische Kontrollbeziehungen werden aufgelöst und die Entscheidungsfindung auf eine Vielzahl von Akteuren verteilt. Positive Folgen sind unter anderem die Nutzung lokaler Kompetenzen und ein schnelles Handeln vor Ort ohne (zeit-)aufwändige prozessübergreifende Planungsläufe durch eine zentrale Steuerungsinstanz. Die Bewertung der Dezentralität des Prozesses hilft beim Vergleich verschiedener Steuerungsstrategien und trägt so zur Beherrschung komplexerer Produktionsprozesse bei.

Obwohl die Kommunikationsstruktur der an der Entscheidungsfindung beteiligten Akteure zunehmend an Bedeutung gewinnt, existiert keine Methode, welche diese als Grundlage für die Operationalisierung der Dezentralität verwendet. Hier setzt diese Arbeit an. Es wird ein dreistufiges Bewertungsmodell entwickelt, das die Dezentralität eines Produktionsprozesses auf Basis der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der am Prozess beteiligten, autonomen Akteure ermittelt.

Aufbauend auf einer Definition von Dezentralität von Produktionsprozessen werden Anforderungen an eine Kennzahl erhoben und – auf Basis der Kommunikationsstruktur – eine die strukturelle Autonomie der Akteure bestimmende Kenngröße der sozialen Netzwerkanalyse ermittelt. Die Notwendigkeit der zusätzlichen Berücksichtigung der Entscheidungsstruktur wird basierend auf der Möglichkeit der Integration von Entscheidungsfindung und -ausführung begründet.

Die Differenzierung beider Faktoren bildet die Grundlage für die Klassifikation der Akteure; die Multiplikation beider Werte resultiert in dem die Autonomie eines Akteurs beschreibenden Kennwert *tatsächliche Autonomie*, welcher das Ergebnis der ersten Stufe des Modells darstellt. Homogene Akteurswerte charakterisieren eine hohe *Dezentralität des Prozessschrittes*, welcher Betrachtungsobjekt der zweiten Stufe ist. Durch einen Vergleich der vorhandenen mit der maximal möglichen Dezentralität der Prozessschritte wird auf der dritten Stufe der *Autonomie Index* ermittelt, welcher die Dezentralität des Prozesses operationalisiert.

Das erstellte Bewertungsmodell wird anhand einer Simulationsstudie im Zentrum Industrie 4.0 validiert. Dafür wird das Modell auf zwei Simulationsexperimente – einmal mit einer zentralen und einmal mit einer dezentralen Steuerung – angewendet und die Ergebnisse verglichen. Zusätzlich wird es auf einen umfangreichen Produktionsprozess aus der Praxis angewendet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Forschungsthematik	1
1.1	Zielsetzung und Einordnung	2
1.1.1	Motivation	2
1.1.2	Forschungsfrage	4
1.1.3	Wissenschaftlicher Beitrag	6
1.2	Forschungsdesign und Aufbau der Arbeit	8
2	Grundlegende Betrachtung des Diskursbereiches	13
2.1	Definition und Abgrenzung des Begriffes Komplexität	15
2.1.1	Komplexität in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen	15
2.1.2	Abgrenzung von Komplexität und Kompliziertheit	16
2.1.3	Komplexität von Produktionssystemen	18
2.2	Umgang mit Komplexität in Produktionssystemen	20
2.2.1	Managementansätze zum Umgang mit Komplexität	21
2.2.2	Methoden zum Umgang mit Komplexität in Produktions- systemen	26
2.2.3	Zusammenfassende Betrachtung	42
2.3	Dezentrale Produktionssteuerung durch Autonomie	42
2.3.1	Vergleich zentraler und dezentraler Produktionssteuerung	43
2.3.2	Autonomie in Produktionsprozessen	47
2.3.3	Messung von Autonomie	51
2.3.4	Autonome Technologien	54
2.4	Interaktion in Produktionsprozessen	55
2.4.1	Grenzen der Automatisierungspyramide	56
2.4.2	Auflösung der Automatisierungspyramide	59
2.5	Zusammenfassende Betrachtung	61

3	Konzeption des Bewertungsmodells	63
3.1	Autonome Akteure	64
3.1.1	Herleitung der Akteursklassen	66
3.1.2	Prüfung der Akteursklassen auf autonome Fähigkeiten	68
3.1.3	Kommunikationsmethoden	72
3.2	Strukturelle Autonomie dezentraler Akteure	74
3.2.1	Abgrenzung klassischer Formen struktureller Beziehungen	75
3.2.2	Herleitung der Definition der Akteursautonomie	77
3.2.3	Falsifizierung von Zentralitätsmaßen	81
3.2.4	Verifizierung	87
3.2.5	Abgrenzung der Prozessschritte	90
3.2.6	Zusammenfassende Betrachtung	90
3.3	Entscheidungsautonomie	90
3.3.1	Motivation	91
3.3.2	Berechnung der Entscheidungsautonomie	91
3.4	Tatsächliche Autonomie	94
3.4.1	Klassifikation von Akteuren	95
3.4.2	Beispielhafte Anwendung	99
3.5	Dezentralität des Prozessschrittes	101
3.6	Dezentralität des Prozesses	107
3.6.1	Autonomie Index	107
3.6.2	Erweitertes Wertstromdesign	109
3.6.3	Zusammenfassende Betrachtung	111
3.7	Produktionskennzahl zur Nutzenbewertung	112
3.8	Zusammenfassende Betrachtung	113
4	Simulationsgestützte Validierung	115
4.1	Grundlagen simulationsbasierter Validierung	116
4.1.1	Validierung	116
4.1.2	Darlegung der Simulation als geeignete Methode zur Validierung	116
4.1.3	Allgemeines Vorgehen bei einer Simulationsstudie	118
4.1.4	Anwendungsbezogenes Vorgehen bei einer Simulationsstudie	122
4.2	Vorstellung Simulationsumgebung	125
4.3	Vorstellung Beispielprozess	128

4.4	Zieldefinition	131
4.5	Datenauswertung	132
4.5.1	Datenbasis strukturelle Autonomie	133
4.5.2	Datenbasis Entscheidungsautonomie	136
4.5.3	Ermittlung der Kennwerte	139
4.6	Simulationsexperiment 1: Zentrale Produktionssteuerung	139
4.6.1	Ermittlung der Kennwerte der Prozessschritte	140
4.6.2	Ermittlung der Kennwerte des Prozesses	147
4.7	Simulationsexperiment 2: Dezentrale Produktionssteuerung	149
4.7.1	Ermittlung der Kennwerte der Prozessschritte	149
4.7.2	Ermittlung der Kennwerte des Prozesses	158
4.8	Vergleich der Szenarien und zusammenfassende Betrachtung	159
5	Validierung in der Praxis	163
5.1	Vorstellung des Praxisprozesses	163
5.2	Berücksichtigung nicht-autonomer Akteure und Informationsobjekte	165
5.3	Anwendung des Bewertungsmodells auf den Praxisprozess	166
5.3.1	Analyse Prozessschritt Fertigung Komponente A	167
5.3.2	Analyse Prozesskennwerte	169
5.4	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen als Basis für Prozessverbesserungen	170
5.5	Fazit	175
6	Schlussbetrachtung und Ausblick	177
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	177
6.2	Beitrag zur Forschung	179
6.3	Kritische Würdigung	183
6.4	Ausblick	184
A	Überprüfung der Hauptgruppen der sozialen Netzwerkanalyse hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen an den Kennwert	185
B	Bewertung vorhandener Action-Arten	191
C	Prozessdarstellungen Simulationsexperimente 1 und 2 (Swimlane-Diagramme)	195

D Prozessschrittübergreifende Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen	205
E Ergebnisse der Simulationsläufe	209
F Kommunikationsbeziehungen des Praxisbeispiels	211
G Visualisierung der Kommunikationsdiagramme und Kennzahlen des Praxisbeispiels	217
Literaturverzeichnis	245
Abbildungsverzeichnis	281
Tabellenverzeichnis	287
Formelverzeichnis	293
Abkürzungsverzeichnis	297

Kapitel 1

Einführung in die Forschungsthematik

Produzierende Unternehmen stehen sich ändernden Marktbedingungen gegenüber [Raza et al. 2018; Wiendahl et al. 2007]. Insbesondere durch die Globalisierung hat sich der Markt von einem Verkäufer- in einen Käufermarkt gewandelt [Bauer 2017, S. 1704; Lorenzer et al. 2010], bei dem die Unternehmen gezwungen sind, sich noch stärker an den Kundenanforderungen [Cichos u. Aurich 2016], beispielsweise hinsichtlich Losgröße und Termintreue [Francesco et al. 2019], auszurichten. Neben bewährten Organisationsprinzipien wie der schlanken Produktion [Shingo 1992, S.67 ff.], stehen durch technologische Entwicklungen wie cyber-physischen Systemen (CPS) im Rahmen von Industrie 4.0 weitere – auch in Kombination verwendbare [Bauer et al. 2018] – Möglichkeiten zum adäquaten Umgang mit den gestiegenen Anforderung zur Verfügung [Meissner et al. 2017]. Durch deren Integration in die am Prozess beteiligten technischen Akteure, kann die Entscheidungsfindung auf eine Vielzahl an Akteuren verteilt und somit eine dezentrale Produktionssteuerung geschaffen werden [Windt 2008]. Dieser Steuerungsform werden im Vergleich zur zentralen Steuerung verschiedene Vorteile, wie eine gesteigerten Reaktionsgeschwindigkeit [Meissner et al. 2017] und eine Erhöhung der Wandlungsfähigkeit zugeschrieben [Mourtzis u. Doukas 2013]. Dabei gilt es prozessindividuell das richtige Maß an Dezentralität zu ermitteln [Gronau et al. 2010b]. Hier setzt diese Arbeit an.

Motiviert durch die steigende Komplexität von Produktionsprozessen, den Chancen zu deren Beherrschung durch die dezentrale Produktionssteuerung und der

damit verbundenen erhöhten Entscheidungs- und Kommunikationskompetenz der beteiligten Akteure, wird ein Bewertungsmodell für die Dezentralität von Produktionsprozessen erarbeitet, dass die Dezentralität auf Basis der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der Akteure ermittelt. Durch die Verwendung von den Prozess beschreibenden Kennzahlen, können Auswirkungen und der Nutzen bewertet und objektiv vergleichbar gemacht werden. Es liegt ein Bewertungssystem vor, welches zielgerichtet die individuelle und situative Ausgestaltung dezentraler Produktionssysteme erlaubt und deren Potenziale für die den konkreten, individuell betrachteten Prozess messbar macht. Es wird ein Beitrag für gezieltere Investitionen und die strategische Entwicklung produzierender Unternehmen geleistet. Der Nutzen einer dezentralen Steuerung hinsichtlich einer Prozessverbesserung wird aufgezeigt. Die Ergebnisse der Arbeit können einen Beitrag zur weiteren Verbreitung dezentraler Steuerungsstrategie sowie deren gezielteren Einsatz leisten.

Gegenstand dieses Kapitels ist neben der detaillierten Darlegung der Zielsetzung und wissenschaftlichen Einordnung der Dissertationsschrift die Beschreibung des Forschungsdesigns sowie der Aufbau der Arbeit.

1.1 Zielsetzung und Einordnung

Aufbauend auf der Darlegung der Motivation werden die dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsfrage formuliert und die zu deren Beantwortung notwendigen Teilfragen erläutert. Anschließend wird – basierend auf einer kurzen Darstellung der Wissenschaftsdisziplin Wirtschaftsinformatik – der wissenschaftliche Beitrag der Arbeit dargelegt.

1.1.1 Motivation

In der modernen Industrie stehen produzierende Unternehmen, u. a. als Folge von Globalisierung und Marktunsicherheit [ElMaraghy et al. 2012; Shou et al. 2017] hohen Anforderungen gegenüber [Galizia et al. 2020]. Dazu zählen insbesondere die steigende Variantenvielfalt [Kersten et al. 2005], die Marktvolatilität [Papakostas et al. 2009], die Internationalisierung des Beschaffungs- und Absatzmarktes [ElMaraghy u. Urbanic 2004], unerwartete Änderungen der Kundenanforderungen (beispielsweise in Form von Änderungen der bestellten Stückmenge oder Produkt-

ausprägung) [Syska 2006, S. 75 ff], geringe Produktionsgrößen kundenindividueller Produkte bis hin zur Losgröße 1 [Mourtzis u. Doukas 2013], ein steigender Vernetzungsgrad durch die Reduzierung der Fertigungstiefe im Unternehmen [Müller u. Tschöpe 2020], Unterschiede in den Ziel-, Planungs- und Entscheidungssystemen kooperierender Unternehmen in der Supply Chain [Leang et al. 2018], als auch gesetzliche Regelungen [Piya et al. 2017]. Die Erfüllung der Kundenanforderungen sowie der zielorientierte Umgang mit den genannten Herausforderungen ist ein wichtiger Erfolgsfaktor zur Festigung und Stärkung der Marktposition produzierender Unternehmen [Link 2014, S. 68]. Die genannten Punkte führen zu einer Steigerung der Prozesskomplexität. Unter Prozess wird hier der Vorgang der betrieblichen Leistungserstellung verstanden (siehe Kapitel 2).

Weiter führt auch die Produktkomplexität zu einer Erhöhung der Komplexität der Prozesse, mit der sie hergestellt werden [Schuh et al. 2017b; Scheer et al. 2006, S. 153], weshalb die Gestaltung des Produktes als ein wichtiger Faktor für die Prozesskomplexität gilt [ElMaraghy u. Urbanic 2003]. Moderne Produkte weisen heutzutage eine hohe Komplexität auf, die durch die Anzahl und Variabilität ihrer Komponenten bestimmt wird [Schuh et al. 2017b]. Sie bestehen aus vielen tausend Teilen, deren Fertigung und Montage hunderte Arbeitsschritte umfassen können [ElMaraghy et al. 2012]. Diese Produkte beinhalten dabei nicht nur mechanische und elektronische Komponenten, sondern auch Software, Kontrollmodule, sowie Mensch-Maschine-Schnittstellen. Die Ausstattung von Produkten mit Kommunikationstechniken, zur Einbindung in das Internet im Rahmen des Internet der Dinge, trägt ebenfalls zur Erhöhung der Produktkomplexität bei [ElMaraghy et al. 2012].

Die Beherrschung der Prozesskomplexität ist eine notwendige Voraussetzung zur Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit und Erhöhung der Wandlungsfähigkeit¹ und befähigt die Unternehmen so, den Kundenanforderungen adäquat zu begegnen. Die dezentrale Steuerung von Produktionsprozessen gilt als eine Möglichkeit, um den Anforderungen gerecht zu werden [Zawisza 2019, S. 39; Köhler et al. 1997]. Durch die Integration von moderner Informationstechnologie in den Prozess kann ein durchgängiger Informationsfluss erzielt werden [Forstner u. Dümmler 2014],

¹Es wird hier Bezug auf das Potsdamer Wandlungsfähigkeitsverständnis genommen, dass die Fähigkeit eines Systems beschreibt, veränderte Anforderungen aus der Umwelt effizient und effektiv wahrnehmen und handhaben zu können [Gronau u. Weber 2009].

bei dem die Befähigung der Akteure und die Wandlung strikt hierarchischen hin zu heterarchischen Steuerungsstrukturen zu einer auf eine Vielzahl von Akteuren aufgeteilten, dezentralen Entscheidungsfindung führt [Windt 2008]. Diese steht im Gegensatz zur zentralen Entscheidungsfindung, bei der sämtliche Anweisungen von einer einzigen zentralen Instanz ausgehen und alle anderen Instanzen ausschließlich ausführende Aufgaben haben [Westkämper et al. 1998]. Überlegungen zum Nutzen der dezentralen Produktionssteuerung gab es bereits in den 1990er Jahren (z. B. [Kluth u. Storr 1997; Köhler et al. 1997; Mussbach-Winter 1997]). Mögliche Umsetzungskonzepte waren die Segmentierung der Fertigung oder die Fraktale Fabrik [Mourtzis u. Doukas 2013]. Heute tragen cyber-physische Systeme zur Befähigung technischer Akteure hinsichtlich ihrer Kommunikations- und Entscheidungsfähigkeit bei [Tonelli et al. 2021] und bieten so die Möglichkeit der technischen Umsetzung einer dezentralen Produktionssteuerung.

1.1.2 Forschungsfrage

Der Nutzen dezentraler Steuerungsstrukturen ist wie gezeigt bekannt, jedoch ist es nicht möglich allgemeine Aussagen über den besten Grad an Dezentralität zu treffen. Vielmehr muss prozessindividuell untersucht werden, mit welchem Umsetzungsgrad die angestrebten Ziele am besten erreicht werden können. Es ist notwendig, den Grad an Dezentralität zu operationalisieren. Aus der beschriebenen Problemstellung leitet sich die folgende Forschungsfrage ab:

Wie lässt sich die Dezentralität von Produktionsprozessen bewerten?

Für deren Beantwortung werden weitere Fragen definiert, welche gleichzeitig als Leitlinie für den Erkenntnisgewinn dieser Arbeit dienen:

- (1) Was bedeutet Dezentralität von Produktionsprozessen?
- (2) Welcher Zusammenhang besteht zwischen Autonomie und Dezentralität?
- (3) Welches sind die relevanten autonomen Akteure in dezentral gesteuerten Produktionssystemen und wie kann deren Autonomie operationalisiert werden? Welche Faktoren müssen dabei berücksichtigt werden?

- (4) Wie kann die Kommunikationsstruktur autonomer Akteure operationalisiert werden?
- (5) Wie kann die Entscheidungsstruktur autonomer Akteure operationalisiert werden?
- (6) Wie können Akteure hinsichtlich ihrer Bedeutung in der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur klassifiziert werden?

Die übergeordnete Forschungsfrage fokussiert die Erstellung eines Bewertungsmodells für die Ermittlung des Grades an dezentraler Steuerung von Produktionsprozessen. Dafür wird zunächst die Akteurebene betrachtet und dann – gegebenenfalls über mehrere Zwischenschritte – ein den Prozess beschreibender Wert ermittelt.

Dabei stellt das Ergebnis von Frage (1) eine wesentliche theoretische Grundlage dar. Durch den Vergleich vorhandener Definitionen von Dezentralität und die Berücksichtigung aktueller, technischer Möglichkeiten soll ein allgemeines Verständnis von dezentralen Produktionsprozessen erzielt werden, welches durch konkrete Anforderungen an die beteiligten Akteure operationalisiert wird.

Dabei sollen in (2) auch die notwendigen Eigenschaften autonomer Akteure ermittelt und der Zusammenhang zwischen der Autonomie von Akteuren und der dezentralen Produktionssteuerung untersucht werden.

Darauf basierend sollen in (3) geeignete Akteursklassen ermittelt werden, deren Instanzen grundsätzlich über die notwendigen Fähigkeiten verfügen. Es wird ermittelt, wie die Autonomie operationalisiert werden kann und welche Faktoren dabei einen Einfluss haben.

Die Möglichkeiten der Messung und Bewertung der Kommunikationsstruktur autonomer Akteure ist Gegenstand der Forschungsfrage (4). Durch den Vergleich verschiedener Metriken soll – unter Beachtung der Ergebnisse aus (1) – eine für den Untersuchungsstand geeignete ausgewählt werden.

Abschließend wird untersucht, wie die Entscheidungsstruktur in dezentral gesteuerten Produktionsprozessen analysiert werden kann (5).

Zudem stellt sich die Frage nach einer geeigneten Klassifizierung von Akteuren hinsichtlich ihrer Bedeutung in der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur (6).

Die Nicht-Ziele umfassen insbesondere die Untersuchung der gegenseitigen Abhängigkeiten von Komplexität und dezentraler Prozessteuerung sowie der Ableitung von Gestaltungsempfehlungen für konkrete Produktionssysteme hinsichtlich des besten Grades an dezentraler Produktionssteuerung. Es wird demnach nicht untersucht, ob und in wieweit eine dezentrale Produktionssteuerung zur Komplexitätsreduzierung oder -vermeidung beitragen kann. Stattdessen wird die Komplexität von Produktionssystemen als die für die Bearbeitung der zentralen Forschungsfrage dieser Arbeit motivierende Konstante angenommen, die es zu beherrschen gilt.

1.1.3 Wissenschaftlicher Beitrag

Nachfolgend wird eine Einführung in die Wissenschaftsdisziplin Wirtschaftsinformatik gegeben, die Einbindung der vorliegenden Arbeit in diesen Kontext beschrieben und darauf aufbauend der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit motiviert.

Die gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik ist den anwendungsorientierten Wissenschaftsdisziplinen (Design Science) zuzuordnen [Österle et al. 2010]. Sie versteht sich als Wissenschaft mit einer methodenpluralistischen Erkenntnisstrategie [Wilde u. Hess 2007], die sich Instrumenten aus Real-, Formal- und Ingenieurwissenschaften bedient [WKWI 1994]. Die praktische Relevanz von Erkenntnissen steht bei der Wirtschaftsinformatik von Anfang an im Fokus [Peppers et al. 2018; Robra-Bissantz u. Strahringer 2020]. Dabei werden in der deutschsprachigen Wirtschaftsinformatik insbesondere konstruktive Methoden verwendet, während die englischsprachige Schwesterdisziplin *Information Systems Research (ISR)* einen verhaltenswissenschaftlichen Fokus hat [Österle et al. 2010, S. 1], bei dem das Verhalten und die Auswirkung existierender Informationssysteme auf Organisationen untersucht wird [Schreiner et al. 2015].

Wilde u. Hess konsolidieren elf Methoden in einem Methodenspektrum der Wirtschaftsinformatik. Es umfasst neben den konstruktionsorientierten Methoden Prototyping, Simulation, Referenzmodellierung, formal-deduktive, konzeptionell-deduktive und argumentativ-deduktive Analyse und Aktionsforschung die behavioristischen Methoden Grounded Theory, quantitativ-empirische Querschnittsanalyse, qualitativ-empirische Querschnittsanalyse, Fallstudien, Labor- und Feldexperimente sowie Ethnographie [Wilde u. Hess 2006]. Laudon et al. erweitern das Spektrum um die soziale Netzwerkanalyse (SNA) [Laudon et al. 2015, 65f], welche die (soziale) Interaktion zwischen Akteuren oder deren Artefakten in einem Netzwerk

betrachtet, um so Rückschlüsse über Funktionen und Qualität von Akteuren und Netzwerken ziehen zu können [Otte u. Rousseau 2002]. Becker et al. empfehlen dabei eine Kombination verschiedener Methoden [Becker et al. 2003, S. 23].

Erkenntnisgegenstand der Wirtschaftsinformatik sind insbesondere Informationssysteme in Wirtschaft und Gesellschaft, wobei hier soziotechnische Systeme, die sowohl Menschen (personelle Aufgabenträger), Informations- und Kommunikationstechnologien (maschinelle Aufgabenträger), Organisationen sowie die Beziehungen zwischen diesen drei Gruppen, fokussiert werden [Österle et al. 2010]. Erkenntnisziele sind insbesondere Handlungsanleitungen zur Konstruktion und zum Betrieb von Informationssystemen sowie Innovationen in den Informationssystemen selbst; mögliche Ergebnistypen werden durch die (Weiter-) Entwicklung nützlicher IT-Lösungen durch Generierung von Artefakten – insbesondere Konstrukte, Modelle, Methoden, Modellierungssprachen, Systeme sowie konkrete Prototypen oder produktive Informationssysteme – geschaffen [Österle et al. 2010; Schreiner et al. 2015]. Betrachtet werden zudem die Auswirkungen des Einsatzes von IT-Lösungen in Form von Modellen, Methoden oder Systemen [Strangmeier 2008].

Erkenntnisziel dieser Arbeit ist die Schaffung eines Verständnis über die Operationalisierung von Dezentralität in Produktionsprozessen basierend auf der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der beteiligten menschlichen und technischen Akteure und die Erstellung eines darauf aufbauenden Bewertungsmodells. Die zusätzliche Bewertung des Prozesses anhand einer geeigneten Prozesskennzahl, wie beispielsweise der Durchlaufzeit, des Lean Index oder der Maschinenauslastung erlaubt eine Nutzenbewertung der betrachteten Produktionssteuerung und leistet so einen praktischen Beitrag zur Verbesserung von Produktionsprozessen und Stärkung der Marktposition industrieller Unternehmen. Die in der Wissenschaftsdisziplin Wirtschaftsinformatik geforderte praktische Relevanz sowie die Gestaltungsorientierung sind somit gegeben.

Erkenntnisgegenstand sind industrielle Produktionsprozesse, die durch das Zusammenwirken von Menschen, Informations- und Kommunikationsstruktur (in Form betrieblicher Anwendungssysteme, in Hardware integrierter Entscheidungs- und Kommunikationstechnologien zur Schaffung intelligenter Entitäten und die für den Datenaustausch notwendige Kommunikationsinfrastruktur) sowie den Beziehungen unter den Gruppen als soziotechnisches System angesehen werden können. Die Einbindung moderner Informationstechnik in bestehende Praxisprozesse sowie

die Analyse notwendiger Prozessanpassungen und resultierender Prozessänderungen ist ein wichtiger Gegenstand der Wirtschaftsinformatik.

Für das Bewertungsmodell wird die soziale Netzwerkanalyse auf die Interaktionen zwischen menschlichen und technischen Akteuren übertragen. Die Verifikation des Modells wird mittels einer Simulationsstudie durchgeführt. Damit werden zwei Methoden aus dem Methodenspektrum der Wirtschaftsinformatik verwendet. Die Arbeit erfüllt damit die Anforderungen der Wissenschaftsdisziplin Wirtschaftsinformatik.

1.2 Forschungsdesign und Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit verfolgt einen gestaltungsorientierten Ansatz. Es ist zweckmäßig, dass sich dieser auch im Forschungsdesign widerspiegelt, um so einen geeigneten Rahmen zu schaffen und einen zielorientierten und strukturierten Aufbau der Arbeit zu ermöglichen. Durch die Anwendung der Design Science Research Methodology (DSRM) for Information Systems Research nach Peffers et al. [Peffers et al. 2007] wird dieser Anforderung Genüge getragen. Die Autoren stellen ein aus sechs Aktivitäten bestehendes Modell vor:

- (I) In der ersten Aktivität wird die Problemstellung definiert und der Mehrwert des angestrebten Artefaktes beschrieben (Identify Problem and Motivation/-Problemanalyse).
- (II) Die Anforderungsanalyse ist Gegenstand der zweiten Aktivität. Sie umfasst neben der Ableitung von Zielen aus der Problemstellung auch eine Betrachtung des aktuellen Stands bestehender Lösungen (Define Objectives of a Solution/Anforderungsanalyse).
- (III) Fokus der dritten Aktivität ist die Konzeption des Artefaktes. Sie umfasst die Bestimmung der gewünschten Funktionalität des Artefaktes sowie die Erstellung an sich (Design and Development / Konzeption und Methodenentwurf).
- (IV) Gegenstand der vierten Aktivität ist die Demonstration des entwickelten Artefaktes (Demonstration/Demonstration).

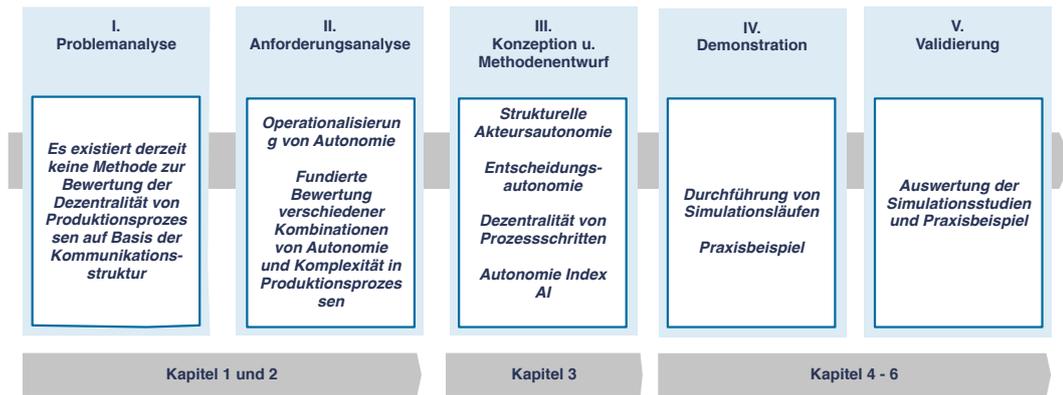


Abb. 1.1: Vorgehensmodell der vorliegenden Dissertationsschrift (in Anlehnung an [Peffer et al. 2007])

- (V) In der fünften Aktivität wird untersucht, inwieweit das Artefakt eine Lösung für die aufgestellte Problemstellung dargestellt. Dieses umfasst insbesondere den Vergleich der aufgestellten Ziele mit den tatsächlich beobachteten Ergebnissen (Evaluation/Validierung).
- (VI) Die abschließende sechste Aktivität fokussierte die Kommunikation der Forschungsergebnisse unter anderen Wissenschaftlern sowie – sofern angemessen – weiteren Zielgruppen wie beispielsweise praktizierenden Fachleuten (Communication/Kommunikation).

Für die vorliegende Arbeit wird das Modell wie in Abbildung 1.1 angewendet. Neben den Kernelementen der jeweiligen Aktivitäten enthält die Abbildung auch die Zuordnung der Kapitel zu den Stufen. Die im DSRM vorgeschlagene sechste Aktivität wird durch die Dissertation sowie ihrer geplanten Veröffentlichung realisiert und nicht gesondert betrachtet.

Das erste Kapitel führt in die Forschungsthematik ein und ihren wissenschaftlichen Beitrag dar. Es umfasst zudem die Aufstellung der übergeordneten Forschungsfrage sowie die Ableitung von Teilfragen, die der Arbeit als Leitfaden dienen (Problemanalyse).

Im zweiten Kapitel wird der grundlegende Diskursbereich betrachtet und die Anforderungen an das zu erstellende Artefakt aufgestellt. Dazu werden die zentralen Begriffe und Bereiche Komplexität, dezentrale Produktionssteuerung, Autonomie, Methoden zum Umgang mit Komplexität sowie Interaktion in Produktionssystemen erläutert. Die Bedeutung der Kommunikation für die dezentrale Produkti-

onssteuerung wird aufgezeigt. Durch einen Vergleich vorhandener Methoden zur Bestimmung der Dezentralität wird dargelegt, dass die Kommunikation in der Bewertung der Dezentralität bislang noch nicht ausreichend Betrachtung gefunden hat. Die Relevanz der Forschungsfrage wird so begründet (Anforderungsanalyse).

Gegenstand des dritten Kapitels ist die Konzeption eines dreistufigen Bewertungsmodells für die Dezentralität von Produktionsprozessen auf Basis der Kommunikationsstruktur der beteiligten Akteure, welches als Artefakt dieser Arbeit dient. Dazu werden zunächst mögliche Akteursklassen ermittelt und die grundsätzliche Eignung ihrer Instanzen als autonome Akteure überprüft. Im Anschluss wird basierend auf klassischen Formen struktureller Beziehungen ein Verständnis für Dezentralität geschaffen und daraus die Eignung der sozialen Netzwerkanalyse sowie des Zentralitätsmaßes Closeness für die Bewertung der Kommunikationsstruktur abgeleitet. Weiter wird die Notwendigkeit der Einbeziehung der Entscheidungsverteilung aufgezeigt und eine Integration von Kommunikationsstruktur und Entscheidungsverteilung in den die Autonomie des Akteurs beschreibenden Kennwert *tatsächliche Autonomie* vorgenommen. Basierend auf der Unterscheidung von Kommunikations- und Entscheidungsfähigkeit wird eine Klassifizierung verschiedener Akteure erarbeitet. Die die Akteure beschreibenden Kennwerte werden zunächst in einen den Prozessschritt und im Anschluss in einen den Prozess beschreibenden Kennwert aggregiert. Das Kapitel schließt mit der Motivation zur Auswahl einer Prozesskennzahl zur Nutzenbewertung (Konzeption und Methodenentwurf).

Das vierte Kapitel umfasst die simulationsgestützte Verifikation des aufgestellten Bewertungsmodells im Zentrum Industrie 4.0. Nach der Darlegung der Eignung der Simulation als Verifikationsinstrument, sowie der Vorstellung von Simulationsumgebung und Beispielprozess, wird das Vorgehen der Datenauswertung erläutert.

Es werden zwei Simulationsexperimente – einmal mit einer zentralen und einmal mit einer dezentralen Produktionssteuerung – durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse werden vergleichend zusammengefasst und mit den zuvor aufgestellten Anforderungen an der Bewertungsmodell verglichen (Demonstration).

Die praktische Anwendbarkeit des Modells wird in Kapitel 5 anhand eines realen Prozesses validiert. Dabei wird die Eignung für Prozesse mit einer hohen Anzahl an Prozessschritten und Akteuren dargelegt. Weiterhin wird der Umgang mit nicht-autonomen Akteuren und Informationsobjekten diskutiert und die Eignung

von Kommunikationsdiagrammen für die Generierung alternativer Prozessszenarien motiviert (Validierung).

Das abschließende Kapitel 6 umfasst neben der Zusammenfassung der Ergebnisse und der zusammenfassenden Beantwortung der Forschungsfragen auch eine kritische Würdigung sowie einen Ausblick auf weitere mögliche Forschungsaktivitäten.

Kapitel 2

Grundlegende Betrachtung des Diskursbereiches

Dieses Kapitel beschreibt grundlegende Begriffe des relevanten Betrachtungsbereichs der vorliegenden Arbeit und stellt die Basis für die Beantwortung der Forschungsfrage in den darauffolgenden Kapiteln dar. Die Notwendigkeit der Betrachtung der Forschungsfrage wird so begründet.

Zunächst werden grundlegende Begriffe für diese Arbeit abgegrenzt. Anschließend werden der Terminus der Komplexität in Produktionssystemen definiert und vorhandene Methoden zum Umgang mit Komplexität beschrieben und klassifiziert. Der Nutzen der durch die Interaktion autonomer Akteure realisierbaren dezentralen Produktionssteuerung für den Umgang mit komplexen Produktionsprozessen wird motiviert. Anschließend wird dargelegt, wie autonome Strukturen und Technologien zu deren Realisierung beitragen. Der vierte Abschnitt fokussiert die für die dezentrale Produktionssteuerung notwendige Interaktion der beteiligten Akteure. Schwerpunkt bildet die Vorstellung der klassischen Automatisierungspyramide sowie deren Grenzen. Das Kapitel endet mit einer zusammenfassenden Betrachtung.

Den Erkenntnisgegenstand dieser Arbeit bilden *industrielle Produktionsprozesse*. Dieser Begriff beschreibt den Vorgang der betrieblichen Leistungserstellung bei dem technologisch, zeitlich und örtliche bestimmte Produktionsressourcen (Mensch, Maschine, Material und Information) [Schuh u. Schmidt 2014, S. 1] zu einem physischen Produkt verarbeitet werden. Ein Produktionsprozess besteht im Verständnis

dieser Arbeit aus einem bis mehreren Prozessschritten, wobei ein Prozessschritt mehreren Produktionsprozessen zugeordnet sein kann (n:m-Kardinalität). Alle, an dem Prozessschritt ausführenden oder entscheidenden Einheiten, werden im Rahmen der Konzeption des Bewertungsmodells dieser Arbeit als *Akteur* bezeichnet. Zwischen Prozessschritt und Akteur besteht eine n:m-Kardinalität.

Mehrere verschiedene oder gleichartige Produktionsprozesse, die nicht zwangsläufig an einem physischen Ort sein müssen [Schuh u. Schmidt 2014, S. 3], bilden ein *Produktionssystem*. Produktionssysteme sind eine kennzeichnende Eigenschaft von Produktionsunternehmen, in denen ein in der Regel durch Lieferanten bezogener Input – in ein physischen Output (Produkt) transformiert wird [Keen et al. 2019]. Weitere Abteilungen produzierender Unternehmen sind Unternehmensführung, Rechnungswesen oder Personalwesen [Schneider et al. 2017].

Abbildung 2.1 visualisiert wichtige Begriffe und deren Zusammenhang.

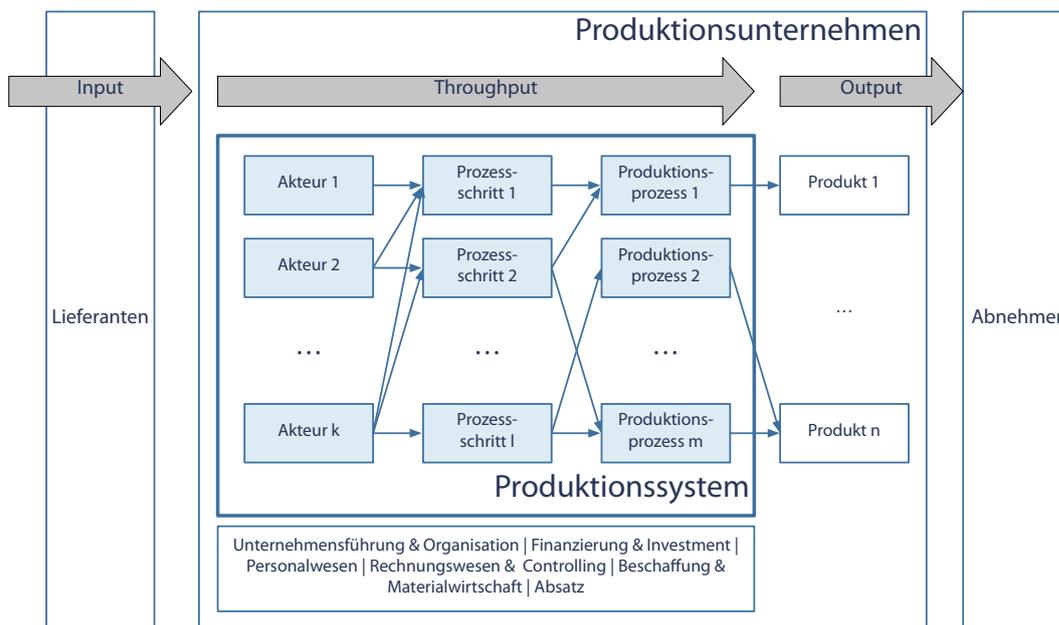


Abb. 2.1: Einordnung wichtiger Begriffe eines Produktionssystems

2.1 Definition und Abgrenzung des Begriffes Komplexität

Es existiert keine einheitliche Definition des Komplexitätsbegriffes [Schoeneberg 2014a]. Vielmehr werden in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedliche Begriffserklärungen verwendet. Für die Herleitung und Konkretisierung einer für diese Arbeit geltende Definition von Komplexität in Produktionssystemen werden daher zunächst Definitionen verschiedener wissenschaftlichen Disziplinen vorgestellt und Gemeinsamkeiten erarbeitet. Zu Beginn wird der Begriff erläutert und darauf aufbauend die Komplexität bestimmenden Faktoren auf Basis einer Literaturrecherche ermittelt. Hierauf basierend wird begründet, warum ein Produktionssystem als komplex bezeichnet werden kann und dessen Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit zielführend ist. Es folgt die Vorstellung und Klassifizierung verschiedener Methoden zum Umgang mit komplexen Produktionsprozessen. Abschließend wird die Kommunikation zwischen den an dem Produktionsprozess beteiligten Akteuren beschrieben.

2.1.1 Komplexität in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen

In der Systemtheorie wird Komplexität als das Verhältnis zwischen den Elementen eines Systems und den sie verbindenden Relationen definiert, wobei die Komplexität des betrachteten Systems umso höher ist, je stärker die Elemente miteinander vernetzt sind [Gronau 2017, S. 50]. Als System wird im Rahmen dieser Arbeit als eine Gruppe oder Kombination verbunden und voneinander abhängiger bzw. interagierender Elemente verstanden, die eine Einheit bilden [Arnold u. Furmans 2007]. Eine Herausforderung der Systemdefinition ist die zielorientierte Systemabgrenzung, bei der festgelegt werden muss, welche Elemente zu dem betrachteten System gehören und welche Teile der relevanten bzw. irrelevanten Umwelt sind, da nur die Elemente und Beziehungen bei der Bestimmung der Komplexität betrachtet werden, die sich innerhalb des Systems befinden [Krallmann 2002, S. 23]. Entscheidend für die Zuordnung ist die Fragestellung, ob die einzelnen Elemente beeinflussbar sind. Während beeinflussbare Elemente zur relevanten Umwelt gehören, werden nicht beeinflussbare Elemente der irrelevanten Umwelt zugeordnet.

Weiter unterscheidet die Systemtheorie zwischen der dynamischen [Matt 2010], der strukturellen [Scholz-Reiter et al. 2006] und der subjektiven Komplexität [Bruhn u. Blockus 2009]. Der Fokus dieser Betrachtungsweise liegt demnach in der Auswahl der Systemelemente sowie der Gestaltung ihrer Vernetzung.

Die Kybernetik befasst sich mit der Kontrolle (Steuerung, Regulierung und Lenkung) von Systemen. Komplexität wird hier mit dem Aufwand für die Systemkontrolle definiert: während diese bei einfachen Systemen keine Schwierigkeit darstellt, gibt es bei komplexen Systemen teilweise große Herausforderungen. Kernfragen der Kybernetik sind dabei, wie die Komplexität unter Kontrolle gebracht werden kann und wie ein entsprechendes System geschaffen sein muss [Malik 1998].

Luhmann als Vertreter der Wissenschaftsdisziplin Soziologie definiert Komplexität als einen autologischen, selbstbezüglichen Begriff, der Eigenschaften beschreibt, die im Rahmen einer Beobachtung von Zusammenhängen und Relationen zwischen Elementen von Themenbereichen, Dingen, Systemen etc. auf einen Blick nicht überschaubar sind [Luhmann 1984, S. 46f.]. Diese Nichtüberschaubarkeit nimmt auch der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Mainzer als Kriterium von Komplexität auf. Er definiert Komplexität als eine Eigenschaft von Systemen mit vielen Elementen, bei denen die Selbstorganisation der Ordnung von Nichtlinearität geprägt ist [Mainzer 1999, S. 6]. Nichtlinearität bezeichnet dabei die Unbestimmtheit, die eine große Wirkung bei kleinen Änderungen nicht zwingend, aber möglich macht [Mainzer 1999, S. 360]. Er fokussiert demnach die unvorhersehbaren Änderungen von Elementen und deren Beziehungen in dem betrachteten System.

Gemeinsamkeiten der unterschiedlichen Definitionen sind die Betrachtung von Systemelementen, deren Beziehungen untereinander sowie dynamischer und nicht linearer Veränderungen von Systemelementen und Beziehungen. Folglich müssen neben der Anzahl der Elemente, deren Verbindungen untereinander sowie Veränderungen im zeitlichen Verlauf betrachtet werden.

2.1.2 Abgrenzung von Komplexität und Kompliziertheit

Bei der Untersuchung dynamischer Systeme nimmt die Emergenz, bei der durch das Zusammenspiel von Systemelementen neue Systemeigenschaften entstehen können, eine zusätzliche Rolle ein [Luhmann 1984, S. 43]. Dabei sind die Systemdynamik und der daraus resultierende Grad der vorherrschenden Unsicherheit ein wichtiger Abgrenzungsfaktor gegenüber dem Begriff Kompliziertheit [Schoeneberg 2014a],

der als Vielzahl und Vielfalt von Systemen, Problemen, Algorithmen oder Daten definiert ist [Jäger et al. 2013]. Komplizierte Systeme haben demnach eine Strukturkomplexität, jedoch keine Verhaltensunsicherheiten, weshalb sie nach Denk u. Pfneissl exakt prognostizierbare Systeme sind [Denk u. Pfneissl 2009, S. 19].

Ein weiteres Unterscheidungskriterium zwischen Kompliziertheit und Komplexität ist die Möglichkeit der deterministischen Steuerung. Bei komplexen Systemen sind nicht alle Einflussgrößen bekannt, sie folgen demnach einer nicht linearen Dynamik und lassen keine deterministische Steuerung zu [Scholz-Reiter u. Ter-vo 2007]. Komplizierte Systeme bestehen auch aus vielen gekoppelten Elementen, unterliegen jedoch einer linear-kausalen Ursachen-Wirkungskette [Wüthrich et al. 2018, S.; Karban 2015, S. 60].

Darauf aufbauend stellen Ulrich u. Probst eine idealisierte Unterscheidung von Systemtypen dar [Ulrich u. Probst 1995]. Demnach sind komplexe Systeme solche, die sowohl eine hohe Nichtlinearität und Dynamik, als auch eine hohe Anzahl von Elementen, Varietät und Emergenz innehaben [Ulrich u. Probst 1995].

Abbildung 2.2 zeigt, wie Systeme bei einer Unterscheidung der Dimensionen Nichtlinearität/Dynamik sowie Vielzahl/Varietät/Emergenz gegliedert werden können: Während einfache Systeme in beiden Dimensionen eine geringe Ausprägung haben, sind komplexe Systeme durch jeweils hohe Ausprägungen charakterisiert. Komplizierte Systeme sehen sie dann vorliegen, wenn genau einer der beiden Achsenwerte stark ausgeprägt ist. Diese Ansicht unterscheidet sie von anderen Autoren, bei denen nur komplexe Systeme eine hohe Ausprägung von Dynamik und Nichtlinearität aufweisen.

Auch ElMaraghy et al. sehen einen entscheidenden Faktor bei der Definition von Komplexität in der Dynamik der Elemente sowie deren Beziehungen, der auch die Abgrenzung komplizierter und komplexer Systeme begründet [ElMaraghy et al. 2012]. Während einfache Systeme leicht verständlich sind, können komplizierte Systeme nur noch mit erhöhtem Aufwand begriffen werden. Im Gegensatz zu komplexen Systemen ist aber ein vollständiges Verständnis möglich. Komplexe Systeme sind hingegen stets durch Unsicherheiten hinsichtlich der Elemente sowie deren Ausprägungen gekennzeichnet [ElMaraghy et al. 2012]. Steigen Elementanzahl und Dynamik weiter an, kann der entstehende Zustand als chaotisch bezeichnet werden. Chaotische Systeme sind durch eine große Änderung der Ergebnisse, bei einer geringen Änderung der Eingangskonditionen geprägt [ElMaraghy et al. 2012]. Das

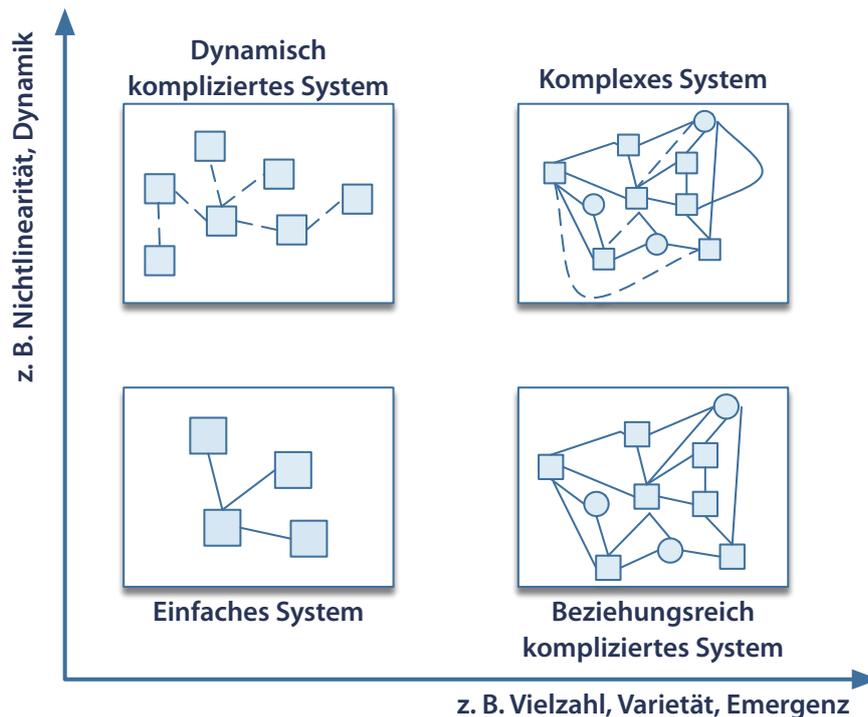


Abb. 2.2: Idealisierte Unterscheidung der Systemtypen (Ulrich u. Probst 1995)

aufgezeigte allgemeine Verständnis für Komplexität wird nachfolgend auf den Betrachtungsgegenstand Produktionsprozesse angewendet.

2.1.3 Komplexität von Produktionssystemen

In einem Produktionssystem gibt es zahlreiche unterschiedliche Systemelemente, die miteinander in Beziehung stehen. Dazu gehören insbesondere Menschen, Maschinen und Anlagen, Halbzeuge, Werkzeuge, Transporteinrichtungen und -fahrzeuge sowie IT-Systeme und die für ihre Verwendung notwendigen Ein- und Ausgabegeräte [Westkämper et al. 2009; Bergmann 2008, S. 5]. Diese müssen je nach Anforderung flexibel eingesetzt werden.

Aus der Varietät und Anzahl der Systemelemente sowie deren für die notwendige Erfüllung der Kundenanforderungen erforderliche Wandlungsfähigkeit resultierenden Dynamik, wird ersichtlich, dass ein Produktionssystem gemäß der zuvor hergeleiteten Kriterien als komplexes System eingestuft werden kann [Gronau 2015]. Dabei wird in einem Produktionssystem zwischen unterschiedlichen, sich beeinflussenden Komplexitätsarten unterschieden [Kluth et al. 2014]. Diese und deren gegenseitige Abhängigkeiten werden im Folgenden näher erläutert.

Schuh et al. nehmen eine Unterteilung nach Produkt-, Koordinations-, Umwelt- und Prozesskomplexität vor [Schuh et al. 2006]. Die *Produktkomplexität* beschreibt die Mannigfaltigkeit von Zuständen und Zustandskonfigurationen produktinhärenter Merkmale. Sie nimmt direkte Einfluss auf die prozessuale Komplexität produzierender Unternehmen [Bauernhansl 2017, Hvam et al. 2020, Vogel u. Lasch 2016, Zerres 2014, S. 302 f] und ist dadurch neben der Sortimentsbreite ein entscheidender Faktor für das Komplexitätsmanagement produzierender Unternehmen [Kopenhagen 2014, S. 114].

Die *Koordinationskomplexität* wird durch Anzahl und Heterogenität unterschiedlicher, miteinander agierender Organisationseinheiten beeinflusst, wobei zwischen internen und externen Einheiten unterschieden wird. Sie beschreibt den Kommunikations- und Abstimmungsbedarf zwischen dem betrachteten Unternehmen und vor-, zwischen- und nachgelagerten Organisationseinheiten, wie beispielsweise Zulieferern und Fremdfertigern [Schuh et al. 1998]. Die *Umweltkomplexität* betrachtet Zustände und Zustandskonfigurationen relevanter, aber nicht beeinflussbarer Umweltelemente des Marktes [Bruhn u. Blockus 2009]. Mit *Prozesskomplexität* wird die Mannigfaltigkeit von Zuständen und Zustandskonfigurationen eines (Produktions-)Prozesses beschrieben [Schuh et al. 2006]. Nach Syska wird Komplexität durch Vielfalt und deren Handhabung entlang der Wertschöpfungskette erzeugt. Dazu gehören insbesondere die Lieferanten-, die Material-, die Teile-, die Varianten-, die Distributionskanal- und die Kundenvielfalt [Syska 2006]. Woodward verwendet zudem den Begriff der *technischen Komplexität* eines Produktionsprozesses, der das Ausmaß beschreibt, in dem ein Produktionsprozess standardisiert, programmiert und automatisiert werden kann, so dass eine Kontrolle und die Vorhersagbarkeit der Ergebnisse leicht möglich sind [Woodward 1958]. Eine hohe technische Komplexität liegt vor, wenn eine gute Programmierbarkeit und eine hohe Automatisierung möglich sind. Die Ergebnisse eines Prozesses mit einer hohen technischen Komplexität haben tendenziell eine standardisierte Qualität. Demgegenüber stehen Prozesse, die beispielsweise aufgrund ihres Adhoc-Charakters nur schwer automatisierbar sind und bei denen menschliche Arbeit (insb. Fähigkeiten und Wissen) einen hohen Stellenwert einnimmt. Diese Prozesse sind im Vorhinein nur in einem begrenzten Maß vorhersehbar [Bouncken u. Jones 2008], wobei gerade hier der im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellte Ansatz zur dezentralen Produktionssteuerung mit autonomen Akteuren vielfältige Möglichkeiten bietet.

Weitere Unterteilungsmöglichkeiten ergeben sich durch die Betrachtung des *Komplexitätsumfangs* (Teil-, Produkt-, System- und Systemen von Systemen) und *Komplexitätstypen* (interne und externe Komplexität). Die (unternehmens-)externe Komplexität wird durch die Umwelt des betrachteten Systems determiniert und kann durch das betrachtete Unternehmen selbst nicht beeinflusst werden. Die interne Komplexität dient dem zweckorientierten Umgang mit den externen Anforderungen [Schuh et al. 2006]. Für den Unternehmenserfolg ist es von hoher Bedeutung, den richtigen Grad an interner Komplexität umzusetzen. Während eine zu geringe interne Komplexität zu einer Nichterfüllung der externen Anforderungen führt, generiert eine zu hohe interne Komplexität zu hohe Kosten. Daher ist der adäquate Umgang mit den vorliegenden internen Komplexitätsarten zwingend notwendig, um die Unternehmenstätigkeit erfolgreich durchführen und die Unternehmensziele erfolgreich erreichen zu können [Ashby 1957]. Es ist erforderlich, das gesamte Unternehmen mit den verschiedenen, sich beeinflussenden Komplexitätsarten zu betrachten. So müssen beispielsweise die Produktionsprozesse angepasst werden, wenn sich ein Produkt ändert. Durch eine Erhöhung der Produktkomplexität resultiert oftmals auch eine Erhöhung der Prozesskomplexität [Hvam et al. 2020].

2.2 Umgang mit Komplexität in Produktionssystemen

Wie zuvor erläutert, muss der Umgang mit Komplexität in Produktionssystemen, sowohl auf Produkt- als auch auf Prozessebene, auf die Unternehmensziele sowie interne und externe Einflüsse und Gegebenheiten angepasst sein. In dieser Arbeit wird die Prozessebene fokussiert, jedoch findet aufgrund des Zusammenhangs zwischen Produkt- und Prozesskomplexität auch eine Betrachtung von Einflüssen auf und Umgang mit der Produktkomplexität statt.

Im Rahmen der präventiven Komplexitätsvermeidung und der reaktiven Komplexitätsreduzierung existieren verschiedene Methoden zur Senkung „überschüssiger“ – d. h. für die Erfüllung der externen Anforderungen nicht unbedingt notwendiger – Komplexität. Da jedoch auch der verbesserte Prozess häufig immer noch eine hohe Komplexität aufweist, muss dieser entsprechend begegnet werden. Dafür eignen sich Methoden der Komplexitätsbeherrschung [Schoeneberg 2014b].

Komplexitätstypen		Interne Komplexität	Externe Komplexität		
Komplexitätsarten	Koordinationskomplexität	Produktkomplexität	Prozesskomplexität	Umweltkomplexität	
Komplexitätsumfang	Teilekomplexität	Produktkomplexität	Systemkomplexität	Systeme von Systemkomplexität	
Managementansätze	Akzeptanz	Bepreisung	Reduzierung	Vermeidung	
	Beherrschung		Erhöhung	Verlagerung	
Methoden	Betriebliches AWS	Big Data Analytics	Business Intelligence	Fertigungssegmentierung	Fraktale Fabrik
	Variantenbestimmungspunkt	Bevorratungsebene	HMS	Informationstechnologie	Produktmodularisierung
	Prozessautomatisierung	Schlanke Produktion		Selbststeuerung	Produktportfoliomanagement
	Produktplattformen	Standardisierung		Industrie 4.0	Variantenmanagement

Abb. 2.3: Kategorisierungen von Komplexität – hervorgehoben sind die für diese Arbeit relevanten Merkmale

Im Folgenden werden zunächst grundlegende Managementansätze zum Umgang mit Komplexität beschrieben. Anschließend werden 18 konkrete Methoden vorgestellt und den verschiedenen Ansätzen zugeordnet. Es wird hergeleitet, inwiefern die dezentrale Produktionssteuerung zur Beherrschung komplexer Produktionsprozesse beitragen kann. Abbildung 2.3 zeigt eine Übersicht über die nachfolgenden Kategorisierungen von Komplexität. Hervorgehoben sind jeweils die für diese Arbeit relevanten Ausprägungen.

2.2.1 Managementansätze zum Umgang mit Komplexität

In der Literatur werden bei der Betrachtung des Umgangs mit Komplexität in Produktionsprozessen im Wesentlichen die drei Managementansätze Vermeidung, Reduzierung und Beherrschung aufgeführt [Schoeneberg 2014b]. Diese haben einen direkten Einfluss auf die Gestaltung des internen Prozesses. Weitere, seltener angewendete Möglichkeiten sind die Komplexitätserhöhung [Kluth et al. 2014], die Kom-

plexitätsverlagerung sowie die Komplexitätsakzeptanz [Puhl 1999, S. 22]. Nachfolgend werden die verschiedenen Managementansätze vorgestellt; in Tabelle 2.1 werden die drei wichtigsten Managementansätze zusammengefasst dargestellt.

Komplexitätsbeherrschung

Fokus der Komplexitätsbeherrschung ist die effiziente Handhabung der nicht vermeidbaren inneren Komplexität. Ziel ist es, dass mit der benötigten internen Komplexität, die durch die externe Komplexität erforderlich wird, adäquat umgegangen wird [Gießmann 2010]. Die Komplexitätsbeherrschung dient dem langfristigen Umgang mit dem betrachteten Gegenstand [Hooshmand et al. 2013] und hat daher in der Prozessgestaltung eine besondere Relevanz.

Produktionsprozesse verfügen stets über eine gewisse Komplexität, um den gestellten externen Anforderungen adäquat begegnen zu können. Für einen erfolgreichen Umgang ist es daher notwendig, diese Komplexität mit geeigneten Methoden beherrschen zu können. Daher bildet diese Managementmethode den Betrachtungsschwerpunkt dieser Arbeit.

Komplexitätsreduzierung

Im Rahmen der Komplexitätsreduzierung werden kurzfristig wirksame Maßnahmen [Hooshmand et al. 2013] durchgeführt, um die innere Komplexität, die als Überkomplexität identifiziert wurde, zu verringern [Kluth et al. 2014]. Beispielhafte Maßnahmen sind die Eliminierung unrentabler Produktvarianten sowie die Reduzierung organisatorischer oder informationstechnischer Schnittstellen [Hooshmand et al. 2013]. Methoden der Komplexitätsreduzierung sind zeitlich vor denen der Komplexitätsbeherrschung anzuwenden. Diese Managementmethode wird in dieser Arbeit nicht fokussiert.

Komplexitätsvermeidung

Im Fokus der Komplexitätsvermeidung liegt die präventive Verhinderung der Entstehung neuer Komplexität. Dabei wird bereits bei der Planung neuer Prozesse bzw. prozessbeeinflussender Faktoren, wie beispielsweise der Produktgestaltung, gezielt auf eine niedrige Komplexität geachtet [Schoeneberg 2014a]. Die Komple-

xitätsvermeidung ist mittel- bis langfristig wirksam [Hooshmand et al. 2013]. Diese Managementmethode wird in dieser Arbeit nicht fokussiert.

Komplexitätsakzeptanz

Die Komplexitätsakzeptanz ist ein Verfahren, bei der Ursache und Wirkung der komplexitätsbestimmenden Prozesse als Black Box betrachtet werden und keine Auseinandersetzung mit den Auswirkungen erfolgt [Hasenpusch et al. 2004]. Die soziologische Betrachtung der Begriffes fokussiert die gesteigerte Widerstandsfähigkeit der Betroffenen durch Erfahrungen und die darauf basierende Erweiterung des Umgangs mit der Komplexität durch die Betroffenen selbst und ihrer direkten Umwelt [Mehigan 2005, S. 48]. Komplexitätsakzeptanz ist kein Gegenstand der Wirtschaftsinformatik und wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Komplexitätsbepreisung

Bei der Bepreisung wird analysiert, welche Produkte in welchem Maße zur Wertschöpfung und zur Gesamtkomplexität der Unternehmung beitragen. Darauf basierend werden die Produktpreise festgelegt. Die Kunden zahlen im Endeffekt nicht ausschließlich für das Produkt, sondern auch für die durch seine Herstellung entstandene Komplexität. Allerdings ist diese Methode nicht immer passend und die Umsetzung häufig schwierig [Kluth et al. 2014]. Zudem kann dieser Ansatz nur ein Hilfsmittel darstellen, da die Unternehmen trotzdem mit der Komplexität umgehen müssen. Durch die finanziellen Mehreinnahmen können allerdings die anderen Ansätze zumindest in Teilen finanziert werden [Bauernhansl et al. 2014]. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz als Hilfsansatz deklariert und in der folgenden Gegenüberstellung nicht weiter betrachtet.

Komplexitätserhöhung

Die Komplexitätserhöhung (auch als Komplexitätsgenerierung bezeichnet) [Kluth et al. 2014] fokussiert die Ebene der Produktkomplexität. Aufgrund der direkten Abhängigkeit von Produkt- und Prozesskomplexität, ist bei Produktänderungen die Betrachtung des herstellenden Prozesses zwingend notwendig. Diese Managementmethode kann angewendet werden, wenn Produkte nicht den Anforderungen von dem Markt entsprechen und eine Erhöhung der Produktkomplexität zu einer

besseren Akzeptanz der Produkte führt [Kluth et al. 2014]. Ziel der Komplexitätserhöhung ist das Erreichen der optimalen Komplexität [Puhl 1999, S. 23]. Daher ist auch dieser Ansatz nur als Hilfsansatz zu sehen bzw. kann er auch als eine Produktneuentwicklung angesehen werden und wird in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

Komplexitätsverlagerung

Bei der Komplexitätsverlagerung wird die Komplexität in einzelne Module des Systems verlagert und die Komplexität aus Systemsicht dadurch reduziert [Gepp et al. 2013]. Auch kann die Komplexität in angrenzende Systeme wie beispielsweise andere organisatorische Einheiten oder Zulieferer verlagert werden, wenn die organisatorischen und technischen Gegebenheiten dieses ermöglichen [Spiller et al. 2012]. Entscheidungen über die Auslagerung von Modulen oder Prozessschritten werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht betrachtet.

Es wurde dargelegt, dass alle Methoden einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Prozesskomplexität haben. Letztendlich muss eine prozess-individuelle positive Komplexität vorliegen, um die externen Anforderungen erfüllen zu können. Es gilt, dieser notwendigen Komplexität adäquat gerecht zu werden. Daher liegt die Komplexitätsbeherrschung im Fokus dieser Arbeit.

Management-ansatz	Zeitpunkt	Veränderung der vorhandenen Komplexität	Ziel	Risiko
Beherrschung	während	nein	Anwendung von Maßnahmen zum sicheren Umgang mit der vorhandenen Komplexität	keine ausreichende Beherrschung möglich
Reduzierung	während	ja	Identifikation und Reduzierung von Komplexitätstreibern, die nicht benötigt werden	falsche oder zu viele Elemente werden reduziert, so dass der extern geforderte Komplexität nicht mehr entsprochen werden kann
Vermeidung	vor	präventiv	präventive Identifikation und Reduzierung von Komplexitätstreibern, die nicht benötigt werden	wichtige Merkmale werden von Anfang an nicht berücksichtigt, so dass der extern geforderte Komplexität nicht mehr entsprochen werden kann

Tab. 2.1: Zusammenfassende Betrachtung der drei gängigsten Managementansätze zum Umgang mit Komplexität

2.2.2 Methoden zum Umgang mit Komplexität in Produktionssystemen

In diesem Abschnitt werden – alphabetisch sortiert – 18 Methoden vorgestellt, die für den Umgang mit Komplexität in Produktionssystemen geeignet sind. Unter Methoden werden hier Technologien oder Vorgehensweisen verstanden, die der konkreten Umsetzung der zuvor genannten Managementansätze dienen. Neben der allgemeinen Beschreibung wird auch auf den Wirkungsbereich (Produkt bzw. Prozess) sowie den verfolgten Ansatz eingegangen. Tabelle 2.2 fasst die Methoden hinsichtlich ihres Wirkungsbereichs sowie des verwirklichten Managementansatzes zusammen. Dabei werden die Komplexitätsbeherrschung, -reduzierung und -vermeidung betrachtet. Es werden geeignete Methoden für die Komplexitätsbeherrschung aufgezeigt und der Nutzen der in dieser Arbeit verwendeten dezentralen Produktionssteuerung dargelegt.

Betriebliche Anwendungssysteme

Informationssysteme fokussieren die Prozessebene (produzierender) Unternehmen und tragen sowohl zur Reduzierung als auch zur Beherrschung von Komplexität bei.

Insbesondere vor dem Hintergrund, dass Informationssysteme selbst komplex sind [Aier u. Schönherr 2007, S. 19], ist die zielorientierte Auswahl und konsequente Ausrichtung an den Unternehmensprozessen ein entscheidender Erfolgsfaktor [Berlak 2003]. Die Verwendung flexibel skalierbarer Informationssysteme ist eine Möglichkeit zur Beherrschung einer gegebenen Komplexität [Schoeneberg 2014a]. Durch das Zusammenschließen von Modulen oder Services eines oder mehrerer Anbieter, kann den spezifischen Anforderungen eines Unternehmens flexibel begegnet werden. Grundvoraussetzung dafür ist die flexible Schnittstellengestaltung [Schoeneberg 2014a].

Betriebliche Anwendungssysteme dienen der Durchführung betrieblicher Aufgaben in zahlreichen Funktionsbereichen und Prozessen eines Unternehmens [Gabriel 2016]. Das Bewertungsobjekt lässt eine Unterscheidung in operative und dispositive Anwendungssysteme zu, deren Reichweite operativ bzw. strategisch ist [Müller 2015, S. 45]. Während Enterprise Resource Planning (ERP)-Lösungen prozessübergreifend relevante Ressourcen verwaltet [Gronau 2016, S. 43], existieren wei-

tere IT-Lösungen, die spezifische Aufgabenbereiche fokussieren. Produzierende Unternehmen verwenden beispielsweise Fertigungssteuerungssysteme, Manufacturing Execution Systeme (MES) oder Speziallösungen für Logistik, Maschinendatenerfassung, Qualitätsmanagement oder Simulation [Theuer 2021]. Die beiden meist verbreiteten Lösungsarten – ERP und MES – werden nachfolgend beschrieben.

Der Nutzen von *ERP-Lösungen* ist mannigfaltig. Gronau führt neun Vorteile von ERP-Systemen in verschiedenen Unternehmensbereichen auf [Gronau 2016, S. 47 f], von denen einige – z. B. Geschäftsprozesse und Informationen – einen direkten Bezug zur Komplexität der betrachteten Unternehmen haben. Als weitere Vorteile nennt er die Automatisierung von Abläufen und die Prozessstandardisierung [Gronau 2016, S. 49ff.]. ERP-Systeme umfassen „... die Verwaltung aller zur Durchführung der Geschäftsprozesse notwendigen Informationen über mindestens drei Ressourcen (Material, Personal, Kapazitäten (Maschinen, Handarbeitsplätze etc.), Finanzen und Information)“ [Gronau 2016, S. 43]. Sie ermöglichen die IT-gestützte Ausführung von Prozessen, beispielsweise im Rechnungswesen, in der Personalwirtschaft, im Vertrieb, in der Materialwirtschaft oder in der Produktion.

Der Planungszyklus von ERP-Lösungen beträgt Tage bzw. Wochen [Frey et al. 2020]. Änderungen, beispielsweise durch Verzögerungen bei der Materiallieferung oder kurzfristigen Änderungen von Kundenbestellungen, können daher nur mit Verzögerung berücksichtigt werden. Es existieren sowohl branchenorientierte als auch branchen-übergreifende ERP-Lösungen [Görtz u. Hesseler 2007, S. 58ff.]. Für die Fertigung als Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit relevante Branchenlösungen sind beispielsweise ERP-Lösungen für den Anlagenbau, die Einmalfertigung oder die Serienfertigung. Technische Funktionsbereiche (CAx) gehören hingegen nicht zum Funktionsumfang [Martin et al. 2002].

Da der Detaillierungsgrad von ERP-Lösungen in Bezug auf die Produktionsplanung und -steuerung in der Regel relativ grob ist, sind unmittelbare Aussagen über die realen Produktionsabläufe in der Regel nicht möglich [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2007, S. 2]. MES bieten eine mögliche Ergänzung. Sie befinden sich in der Automatisierungspyramide auf der Betriebsleitebene und integrieren nach dem Verein Deutscher Ingenieure e.V. acht Aufgabenbereiche [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2007], die als ein Ziel eine Komplexitätsbeherrschung verfolgen [Gerberich 2011, S. 182]:

Feinplanung und -steuerung, Betriebsmittelmanagement, Materialmanagement, Personalmanagement, Datenerfassung, Leistungsanalyse, Qualitätsmanagement und Informationsmanagement.

Der Betrachtungsgegenstand von MES-Lösungen sind ein bis mehrere Aufträge bei einer Fristigkeit von einer bis mehrere Schichten. Der Betrachtungshorizont liegt bei einigen Sekunden bis zu einer Schicht [Frey et al. 2020], wodurch sie eine höhere Detaillierung der Planung und eine schnellere Reaktion auf Änderungen als ERP-Systeme ermöglichen. Die genannten MES-Aufgaben haben Auswirkungen auf die Prozesse eines produzierenden Unternehmens. Insbesondere sind dabei die folgenden zehn Unternehmensprozesse betroffen [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2007]

- Arbeitsvorbereitung
- Produktion
- Transporte
- Materialwirtschaft
- Qualitätssicherung
- Personalwirtschaft
- Rückverfolgung
- Instandhaltung
- Kontinuierliche Verbesserung
- Controlling

Die Auflistung zeigt, dass MES-Lösungen eine Vielzahl von komplexitätsbestimmenden Bereichen in Produktionssystemen adressieren, weshalb sie zum Betrachtungsgegenstand gehören. Viele der am Markt verfügbaren Lösungen haben einen großen Funktionsumfang und bieten einen Großteil der genannten Funktionen an [Theuer 2021].

Big Data Analytics

Big Data Analytics eignet sich sowohl als Grundlage für die Erarbeitung von Maßnahmen zur Reduzierung von Prozesskomplexität, als auch für deren Beherrschung. Der technologische Fortschritt führt zu einer stetig steigenden Anzahl an erzeugten und gespeicherten Daten, die für die Generierung von Informationen und Wissen verwendet werden [Gronau 2012]. Mögliche Datenquellen sind u. a. betriebliche Informationssysteme, in Maschinen und Anlagen für die kontinuierliche Erhebung ihrer Zustände integrierte Sensoren, Geoinformationen, Rückmeldungen von Mitarbeitenden über Prozesse und Verhaltens- und Bewegungsmuster von Weblog- und Click-Stream-Analysen [Schoeneberg u. Pein 2014, S. 310]. Der zunehmende Anteil an unstrukturierten und semi-strukturierten Informationen erschwert die Auswertung durch den Menschen [Eckerson 2011, S. 7]. Big Data beschreibt in diesem Zusammenhang Datensets und Analyse Methoden für sehr große (von Terabits zu Exabytes) Datenmengen [Chen et al. 2012]. Big Data zeichnen sich durch große Datenvolumina (Volume), ihrer Vielfalt (Variety) und einer hohen Geschwindigkeit (Velocity), mit der die Daten generiert, verarbeitet und analysiert werden, aus [Gadatsch 2015; McAfee u. Brynjolfsson 2012].

Es gilt, die vorliegenden Daten zielgerichtet auszuwerten und aufzubereiten, um darauf basierend eine fundierte Entscheidungsbasis zu erstellen [Schoeneberg u. Pein 2014, S. 310]. Anwendungspotenziale von Big Data in Produktionsprozessen sehen Manyika et al. insbesondere in der Erhöhung der Prozesstransparenz, der Verwendung von Andon-Boards und der Aufdeckung und Darstellung von Bottlenecks durch die Implementierung der Prinzipien schlanker Produktionsprozesse und der digitalen Fabrik sowie der Verbesserung der Durchsatzleistung und der Herstellung kundenindividueller Produkte durch die Analyse operativer Sensordaten [Manyika et al. 2011, S. 78]. Dabei können insbesondere auch solche Maßnahmen identifiziert werden, die der Reduzierung und Beherrschung von Komplexität dienen.

Business Intelligence

Business Intelligence kann sowohl zur Beherrschung von Prozesskomplexität, als auch zur Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen als Grundlage für die Prozessumgestaltung verwendet werden. Unter dem Begriff werden Konzepte, Methoden und Informationssysteme subsumiert [Krawatzek et al. 2013], die der Unterstüt-

zung, Durchführung und Kontrolle betrieblicher Aktivitäten mithilfe maschineller Intelligenz dienen [Weber 2020]. Durch Business Intelligence wird die (subjektive) organisationale Intelligenz bei der Wahrnehmung, dem Monitoring, der Interpretationen sowie dem Verstehen von Zusammenhängen unterstützt [Hummeltenberg 2014]. Eine besondere Bedeutung kommen informationsgetriebenen Entscheidungsunterstützungssystemen zu, die der Gewinnung und Verbreitung von Erkenntnissen für und über betriebliche Abläufe dienen und so eine Grundlage für die Ermittlung von Maßnahmen zur Reduzierung und Beherrschung der Komplexität von Produktionsprozessen bildet.

Fertigungssegmentierung

Die Fertigungssegmentierung ist, wenn sie in der Neuplanung von Produktionsprozessen verwendet wird, der Komplexitätsvermeidung zuzuordnen, kann aber auch im Rahmen der Umgestaltung von Prozessen zur Komplexitätsreduzierung beitragen. Sie bildet die Basis für die modulare Fabrik.

Ziel dieser Methode ist die Beherrschung und Verringerung der Komplexität durch eine Entflechtung der Kapazitäten [Syska 2006, S. 66]. Dafür wird die Fertigung in autonome, produktorientierte und dem Wertschöpfungsfluss folgende Produktionseinheiten (Module) restrukturiert [Weber 2020, S. 87ff.], die durch nicht-hierarchische Koordinationsformen koordiniert werden [Picot et al. 1998, S. 201]. Durch die horizontale Ressourcenintegration der Fertigungssegmentierung sollen die Kosten- und Produktivitätsvorteile der Fließfertigung mit der hohen Flexibilität der Werkstattfertigung kombiniert werden [Bliss 2000, S. 52]. Definiert werden die geschaffenen Segmente durch die fünf Merkmale Markt- und Zielausrichtung, Produktorientierung, Integration indirekter Funktionen, Kostenverantwortung und dem Umschließen mehrerer Stufen der logistischen Kette eines Produkts [Wildemann o D]. Weiterhin sind sie durch die Übernahme von Steuerungsaufgaben, eine dezentrale Entscheidungskompetenz und Ergebnisverantwortung sowie die Möglichkeit der Anwendung unterschiedlicher strukturoptimierender Planungs- und Steuerungskonzepte charakterisiert [Nedeß et al. 1995].

Fraktale Fabrik

Ein Fraktal ist ein natürliches oder künstliches Gebilde oder geometrisches Muster, welches keine ganzzahlige, sondern eine gebrochene Dimensionalität besitzt und

zudem einen hohen Grad von Selbstähnlichkeit aufweist. Ein Beispiel für ein solches Gebilde, welches von Mandelbrot geprägt wurde, ist ein Objekt, das aus einer Vielzahl verkleinerter Kopien seiner selbst besteht [Mandelbrot 1977, S. 41-43]. Die fraktale Fabrik kann durch eine Aufteilung der Aufgaben bei der Reduzierung bzw. – wenn bereits in der Planung eingesetzt – bei der Vermeidung von Prozesskomplexität helfen. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die zusätzlich für die Koordination der Fraktale entstehende Komplexität die eingesparte Komplexität nicht überschreitet.

Grundlage der fraktalen Fabrik sind autonom agierende und in ihrer Zielausrichtung selbstähnliche Subsystemen, die sich dynamisch zu einem Gesamtsystem zusammenschließen und sich selbstständig an veränderte Anforderungen anpassen können [Wycisk 2009, S. 4]. Ihr Ziel ist die Abkehr tayloristischer und der Aufbau dezentraler Strukturen [Mussbach-Winter 1997].

Indem Sie den Aufbau von Produktionssystemen aus fraktalen Einheiten postulierten, übertrugen Warnecke u. Hüser dieses Konzept erstmals auf industrielle Anwendungen [Warnecke u. Hüser 1996, S. 136]. Kennzeichnende Merkmale fraktaler Strukturen in Produktionssystemen sind ihre Selbstorganisation, Zielorientierung und Dynamik [Ruhe 1994]. Da fraktale Architekturen keinem festen Organisationsverbund unterliegen, wird eine dynamische Anpassung an Umfeldveränderungen ohne jegliche Beschränkungen durch die Organisationsstruktur ermöglicht. Sie sind nach dem Bottom Up-Prinzip aufgebaut [Lindemann u. Gronau 2009].

Alle Hierarchieebenen verfügen über eine absolute Entscheidungsfreiheit sowohl bei der Aufgabenausführung als auch bei der Organisation, wobei auch die verwendeten Methoden und Verfahren frei bestimmt werden können [Bergmann 2010]. Höhere Hierarchieebenen übernehmen dabei nur die Aufgaben, die von niedrigeren Ebenen nicht erfüllt werden können [Lindemann u. Gronau 2009].

Fraktale Strukturen können in der Praxis heute beispielsweise als eigenständige Geschäftseinheiten oder Fertigungs- und Montagezellen gefunden werden. Eine Herausforderung dabei ist die Implementierung von Produktionssystemen, die eine effektive Koordination, Selbstorganisation sowie eine dynamische Restrukturierung des Verbunds der fraktalen Einheiten erlauben, da isolierte Lösungen dem Kerngedanken des Konzepts nicht gerecht werden [Gronau u. Lindemann 2009; Gronau u. Theuer 2011].

Gestaltung der Wertschöpfungskette

Die Gestaltung der Wertschöpfungskette kann zur Beherrschung und Vermeidung der Prozesskomplexität beitragen. Syska nennt als mögliche Maßnahmen die Verschiebung der Bevorratungsebene in Richtung Anfang und die Nachverlagerung des Variantenbestimmungspunktes in Richtung Ende der Wertschöpfungskette [Syska 2006].

Insbesondere durch die aus den individuellen Kundenanforderungen resultierende Steigerung der Variantenzahl, erhöht sich die Prognoseunsicherheit bezüglich des Produktionsprogrammes [Syska 2006, S. 77]. Um weiterhin eine hohe Termintreue und kurze Fertigungszeiten zu ermöglichen, versuchen viele Unternehmen diese mit hohen Beständen im Fertigteilelager zu kompensieren [Dangelmaier 2001, S. 73]. Diese Bevorratung birgt neben einer Erhöhung der Bestandskosten und einer eventuellen Veralterung der gelagerten Produkte, auch die Gefahr der Überdeckung von Prozessproblemen [Shingo 1992, S. 36]. Eine gezielte Vorverlagerung der Bevorratungsebene kann diese Gefahren reduzieren [Syska 2006, S. 77]. Es ist notwendig, die für die jeweilige Prozesskette geeignete Bevorratungsebene sowie die Größe des Lagers individuell zu bestimmen. Kriterien sind dabei der Erfüllung der Kundenanforderungen (insbesondere erwartete Lieferzeit) und die Kosten sowie nicht monetären Gefahren der Lagerhaltung [Syska 2006, S. 77]. Anzumerken ist, dass der Grundansatz der schlanken Produktion eine komplette Vermeidung von Lagern ist [Shingo 1992, S. 68ff.], die dafür notwendigen Voraussetzungen (insbesondere eine perfekt getaktete Fertigung und ein damit ermöglichter One-Piece-Flow) aber oftmals nicht realisiert werden können.

Ziel der Nachverlagerung des Variantenbestimmungspunktes ist die Erweiterung der auftragsunabhängigen Prozessschritte durch eine Verschiebung des Variantenbestimmungspunktes an das Ende der Wertschöpfungskette [Nebl 2011, S. 782]. Dadurch können bis zum Variantenbestimmungspunkt die Vorteile der auftragsneutralen Produktherstellung genutzt werden [Buchholz 2012, S. 221]. Folge ist eine größtmögliche auftragsneutrale Produktionsfolge, die – bei gleichbleibendem möglichen Grad der Produktindividualisierung – zu einer späten Berücksichtigung der individualisierten Leistungserstellung in der Fertigungsplanung und -steuerung resultiert [Bliss 2000, S. 47].

Holonic Manufacturing System

Der Ansatz holonischer Produktionssysteme hilft bei der Beherrschung und Vermeidung von Prozesskomplexität. Er beruht auf Erfahrungen der Sozialforschung [Gronau u. Levina 2008].

Ein Holon bezeichnet ein eigenständiges und vollständiges Element, das über die Fähigkeit verfügt, bestimmte Funktionen auszuführen. Sie sind Steuerungselement für die ihnen untergeordneten Subelemente und werden gleichzeitig von den ihnen übergeordneten Elementen gesteuert. Holone verfügen über eine hohe Autonomie und sind weiterhin durch Selbststeuerung und Kooperation gekennzeichnet. Bei ihrer Aufgabenerfüllung sind sie weitestgehend unabhängig, ihr Handlungsspielraum ist jedoch von einem übergeordneten Zielsystem mit festen Regeln und Strukturen vorgegeben [Tharumarajah et al. 1998]. Die feste und an sich stabile Hierarchie wird als *Holarchie* [Botti u. Giret 2008] bezeichnet.

Übertragen auf Produktionsprozesse hergeben sich Holonic Manufacturing Systeme, bei denen eine grundsätzliche Aufteilung in einen physischen, materialverarbeitenden und informationsverarbeitenden Teil vorgenommen wird. Beide Teile bestehen aus holonischen Elementen und sind über einen Datenaustausch miteinander verbunden [Sugimura et al. 2007]. Ein holonisches Produktionssystem umfasst den gesamten Aufgabenbereich eines Produktionssystems und zielt auf agile und flexible Produktionsprozesse [Gronau u. Levina 2008].

Industrie 4.0

Industrie 4.0 fokussiert die Prozessebene und dient insbesondere der Komplexitätsbeherrschung. Es stellt einen „Werkzeugkasten“ an Methoden zur dezentralen Informationsaufnahme, Entscheidungsfindung und -ausführung zur Verfügung und ist damit ein Befähiger der Selbststeuerung sowie der darauf aufbauenden dezentralen Produktionssteuerung.

Die Verbesserung von Rechenleistung, Geschwindigkeit und Speicherkapazität [ElMaraghy 2019] und die Reduzierung von Bauteilgrößen haben in Verbindung mit neuartigen Kommunikationstechniken zur Etablierung cyber-physischer Systeme beigetragen [Ribeiro 2017]. Diese aus Sensorik, Aktorik, Prozessor und Kommunikator bestehenden eingebetteten Systeme [Gorltd et al. 2017] ermöglichen eine enge Verzahnung physischer Produktionselemente mit Informations- und Kommu-

nikationstechnik und bilden so die Grundlage der vierten industriellen Revolution [Lucks 2017, S. 3]. Durch ihre Integration in Produktionselemente sowie deren intelligente Verknüpfung mittels Kommunikationsnetzen werden Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte zum Austausch hochauflösender Prozessdaten in Quasi-Echtzeit und Kooperation befähigt [Kersten et al. 2017]. Industrie 4.0 ermöglicht eine horizontale und vertikale Integration aller Prozesse [Chen et al. 2020] entlang der Wertschöpfung – vom Lieferanten über den Produzenten bis hin zum Kunden [Reinhart 2017, S. VII] – und darauf basierend eine verbesserte Integration der Kundenanforderungen in den Prozess [Bender 2018].

Allgemeine Potenziale von Industrie 4.0 sind eine Erhöhung der Prozesstransparenz [Steven et al. 2019], ein direkter Informationsaustausch zwischen den Beteiligten, eine sehr hohe Awareness, ein mögliches autonomes Verhalten der Beteiligten, ein unmittelbarer Datenzugriff sowie eine schnelle Anpassungsfähigkeit auf kurz- oder langfristige Ereignisse, wie Ausfälle der Produktionslinie oder Änderungen der Produkthanforderungen [Dalenogare et al. 2018]. Auch kann Industrie 4.0 zu höheren Umsätzen beitragen [Kagermann et al. 2016]. Konkret können sich Potenziale für die Befriedigung von Kundenwünschen hinsichtlich individueller Produkte bei gleichzeitiger Kostenreduktion und Qualitätsverbesserung, die verbesserte globale Vernetzung, die Instandhaltung und die Ablaufoptimierung ergeben. Dabei werden Optimierungen nicht mehr lokal, sondern unter Betrachtung der globalen Fertigungssituation durchgeführt [Schuh et al. 2017a].

Informationstechnologie

Der Begriff Informationstechnologie subsumiert sämtliche Hard- und Softwaretechnologien, die der Datenverarbeitung dienen. Dazu gehört insbesondere die Computertechnik. Sie stellt das Bindeglied zwischen der elektronischen Technologie und der Informatik dar. Informationstechnologie bildet die technische Grundlage zur digitalen Vernetzung der operativen Systeme eines Produktionsbetriebs. Eine hohe Kompatibilität der Systeme sowie die Verfügbarkeit und Verwendung geeigneter Schnittstellen nehmen eine wichtige Bedeutung für die erfolgreiche Verwendung ein [Sinsel 2020, S. 108]. Informationstechnologie kann zur Beherrschung von Prozesskomplexität im Unternehmen beitragen [Schoeneberg 2014a]. Die durch die stärkere Integration der Informationstechnologie in Maschinen und Anlagen resultierende Steigerung der Funktionsumfänge [Eigner et al. 2012, S. V] ist nicht Teil

der Betrachtung, wird aber in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt (vgl. insbesondere Kapitel 2.4).

Produktmodularisierung

Die Produktmodularisierung ist ein Verfahren, das die Produktkomplexität fokussiert. Sie kann sowohl zu ihrer Vermeidung als auch zu ihrer Reduzierung eingesetzt werden. Verschiedene Studien haben positive Auswirkungen der Produktmodularisierung auf Prozesskennwerte gezeigt. So wiesen Jacobs et al. eine Verkürzung von Durchlaufzeiten in der Automobilindustrie nach [Jamshidi 2017], Lau et al. stellen eine Verbesserung des Kundenservices, eine Erhöhung der Flexibilität sowie verkürzte Lieferzeiten fest [Lau et al. 2007].

Das Gestaltungsprinzip der Modularisierung wird bereits seit vielen Jahren im Bereich der Informationssysteme und Sachgüter angewendet und findet zudem auch in der Logistik eine zunehmende Bedeutung [Straube u. Mayer 2007]. Ziel der Modularisierung ist die Schaffung unabhängiger, weitgehend entkoppelter Einheiten, die mit standardisierten Schnittstellen verbunden sind, ohne auf benötigte Fähigkeiten und die geforderte Qualität zu verzichten [Wildemann 2014]. Es entstehen relativ autonome Einheiten, deren internen Beziehungen eine stärkere Bindung vorweisen, als die externen Beziehungen [Kopenhagen 2014, S. 119]. Weisen die Einheiten eines betrachteten Produktes nur geringe Wechselwirkungen zueinander auf, bewirken Veränderungen einzelner Bestandteile keine oder nur geringe Veränderungen an weiteren Systemelemente [Schulz 2014]. Die wesentliche Herausforderung besteht in der Ermittlung der Schnittstellen, entlang derer sich die Produkte sinnvoll zerlegen lassen, um später eine möglichst hohe Flexibilität hinsichtlich der Möglichkeiten der Zusammensetzung zu ermöglichen. Eine fundierte Kenntnis der Anforderungen ist ein weiterer wichtiger Erfolgsfaktor [Wildemann 2014]. Eine Modularisierung wirkt sich auf die Varietät und Konnektivität von Produkten aus und nimmt dadurch einen direkten Einfluss auf die Produktkomplexität [Kopenhagen 2014, S. 119].

Durch die Produktmodularisierung kann die Anzahl der Bauteile bei gleichbleibender oder sogar steigender Anzahl der Varianten gesenkt werden. Diese Reduzierung hat unmittelbare Auswirkungen auf die Gestaltung des das Produkt herstellenden Produktionsprozesses. Produkte werden nun aus mehreren Modulen zusammengesetzt, die flexibel ausgetauscht werden können. Diese Rekombination ermög-

licht die Herstellung einer hohen Anzahl von Varianten auf einem einzigen Band, so dass eine Erhöhung der Varianten, welche bei der traditionellen Herstellung in der Regel zu einer Erhöhung von Kosten und Komplexität führen, direkt in den Ablauf integriert wird. Das Wissen über deren wirklichen Produkthanforderungen, weiteren potenziell interessanten Produktmerkmalen und die Zahlungsbereitschaft stellt die Basis für Gestaltung der einzelnen Module dar [Wildemann 2014].

Nachteile der Modularisierung sind die Zunahme von Schnittstellen, die Gefahr redundanter Strukturen und die daraus resultierende mögliche Zunahme von Größe und Gewicht der Produkte. Weiter kann die Verringerung der Komplexität zu einer leichteren Kopierbarkeit durch konkurrierende Unternehmen führen [Schulte 2007, S. 412]. Der Grad der Modularisierung muss daher genau abgewogen werden.

Produktplattformen

Produktplattformen dienen der Komplexitätsvermeidung von Produkten. Sie bezeichnen eine Kombination einer Anzahl von Teilen oder Komponenten, die von einer Produktgruppe gemeinsam genutzt wird [Meyer 2007, S. 7]. Sie werden als Basis sowohl für die Herstellung von Produktvarianten, als auch marken- und firmenübergreifend verwendet [Zerres 2014, S. 302 f]. Durch die Verwendung von Produktplattformen wird die Teilevielfalt, die damit verbundene Produktkomplexität [Simpson 2004] sowie die Komplexität des die Produkte herstellenden Prozesses reduziert. Dem gegenüber steht meist die Erhöhung von Entwicklungskosten und -zeit [Zerres 2014, S. 303].

Produktportfoliomanagement

Das Produktportfoliomanagement dient der präventiven Komplexitätsvermeidung. Es hat direkte Auswirkungen auf die Anzahl und Vielfalt der von einem Unternehmen herzustellenden Produkte und wirkt sich daher indirekt auch auf die Prozesskomplexität aus [Bauernhansl 2017].

Ein Produktportfolio beschreibt den Umfang der von einem Unternehmen auf dem Markt geplanten, angebotenen und abgekündigten Produkten und Produktvarianten [Schicker u. Strassl 2019]. Das Produktportfoliomanagement dient der Klassifizierung sowie der Auswahl und Festlegung des aktuellen und geplanten Produktportfolios [Avak 2006, S.4].

Das Produktportfoliomanagement hat direkte Auswirkungen auf die Anzahl und Vielfalt der von einem Unternehmen herzustellenden Produkte und wirkt sich daher – wie oben dargelegt – auch auf die Prozesskomplexität aus.

Prozessautomatisierung

Das Ziel der Prozessautomatisierung ist eine Verbesserung des Prozesses nach technischen, finanziellen oder personellen Kriterien. Sie dient der Beherrschung von Prozesskomplexität [Schildt u. Kastner 1998, S. 1] und zielt auf die Integration aller Funktionsbereiche einer technischen Anlage mit Hilfe informationsverarbeitender Systeme, so dass eine möglichst effektive Durchführung technischer Prozesse erreicht werden kann [Schildt u. Kastner 1998, S. 16]. Bei vollständig automatisierten Prozessen beschränken sich die Aufgabe des Menschen im fertig gestalteten Prozess auf die Eingabe von Zielvorstellungen an das Prozessergebnis [Lauber u. Göhner 1999, S. 9] und ein manuelles Eingreifen, falls es zu einer Abweichung vom ordnungsgemäßen Prozessablauf kommt [Wäfler 1999]. Im Rahmen der Prozessautomatisierung werden mittels Sensorik physikalische Größen des Prozesses selbst sowie der den Prozess umgebenden Umwelt wahrgenommen [Favre-Bulle 2013, S. 17]. Über einen Algorithmus werden sie verarbeitet und darauf basierend Handlungsentscheidungen ermittelt, die im nächsten Schritt von Aktoren im betrachteten Prozess durchgeführt werden [Carpanzano u. Jovane 2007]. Durch die regelmäßige Durchführung der genannten Schritte ist es möglich, den Prozess stets nach den vorgegebenen Zielvorstellungen zu lenken [Theuer 2018].

Verschiedene Forscher gehen davon aus, dass durch die Einbindung von Sensorik, der Auswertung der anfallenden Daten und einer darauf basierenden angepassten Prozessteuerung und -überwachung weitreichende Potenziale im Umgang mit komplexen Produktionssystemen entstehen [vgl. z. B. Krüger 2007; Monostori u. Prohaszka 1993].

Schlanke Produktion

Durch schlanke Produktionsprozesse werden eine Vermeidung bzw. eine Reduzierung der Komplexität verfolgt. Die Methode entstand in den 1950 Jahren im Rahmen des Toyota Produktionssystems in der Automobilindustrie [Syska 2006, S. 85] und wird heute weltweit in verschiedenen Branchen erfolgreich angewendet [Jones

et al. 1999, S. 15ff.]. Sie verfolgt das Ziel einer hohen Qualität, einer hohen Liefertreue sowie geringen Herstellungskosten bei konsequenter Ausrichtung der Prozesse auf die Kundenanforderungen. Für die gleichzeitige Erreichung der drei Hauptziele sollen jegliche nicht-wertschöpfende Prozesse – als Verschwendung bezeichnet – im Unternehmen minimiert werden [Kamiske u. Brauer 2003, S. 47]. Durch schlanke Prozesse werden Komplexität verringert, überflüssige Technologien und Informationen vermieden und die Menschen bei ihrer täglichen Arbeit unterstützt [Zuehlke 2008]. Dafür stehen zahlreiche Methoden für die Ermittlung, Reduzierung und Vermeidung von Verschwendung zur Verfügung, welche je nach der im Unternehmen vorliegenden Situation ausgewählt und kombiniert werden können [Shingo 1992, S. 115ff.].

Selbststeuerung

Die Selbststeuerung zielt auf eine Verbesserung von Produktionsprozessen. Sie kann – je nach Anwendungszeitpunkt – zur Komplexitätsvermeidung, -reduzierung und -beherrschung eingesetzt beitragen.

Die Steuerung komplexer Systeme ist eine Hauptaktivität des Komplexitätsmanagements [Puhl 1999, S. 24].

Selbststeuerung beschreibt die dezentrale Entscheidungsfindung autonomer Objekte innerhalb heterarchischer Organisationsstrukturen [Freitag et al. 2004]. Über eine Vielzahl vernetzter Regelkreise können sich selbstregelnde komplexe Systeme eigenständig unter Kontrolle halten [Schwäke 2020, S. 74]. Eine Selbststeuerung erfordert selbststeuernde Objekte. Diese sind durch die Fähigkeit zielorientiert mit weiteren Systemelementen interagieren, gekennzeichnet. Weiterhin ist eine Kommunikation der Objekte untereinander notwendig, um so Informationen auszutauschen, die für die eigene Entscheidungsfindung relevant sind [Windt 2006].

Die dezentrale Produktionssteuerung wird mithilfe des Prinzips der Selbststeuerung realisiert [Windt 2006]. Damit stellt sie eine wesentliche Grundlage für diese Arbeit dar.

Standardisierung

Standardisierung beschreibt die Vereinheitlichung von Gegenständen und Verfahrensweisen [Zerres 2014, S. 301]. Sie führt zu einer Reduzierung der angebotenen Varianz und verringert dadurch die resultierende Komplexität [Gräßler 2004, S. 57].

In Produktionssystemen werden Produkt- und Prozessstandardisierung unterschieden. Da sie hauptsächlich in der Planung und Gestaltung von Produkten bzw. Prozessen verwendet wird, ist sie der Komplexitätsvermeidung zuzuordnen. Produktstandardisierung wird durch die zielorientierte Gestaltung von Produkten, beispielsweise durch die Verwendung von Baukästen, Baureihen [Zerres 2014, S. 301], Modulen oder Paketen [Schuh u. Caesar 1989, S. 58f] realisiert. Bei der Prozessstandardisierung nimmt insbesondere die Verwendung standardisierter technischer Schnittstellen zur Verbindung verschiedener Produktionseinheiten eine wichtige Rolle ein. Standardisierung kann dementsprechend sowohl die Produkt- als auch die Prozessebene betreffen.

Variantenmanagement

Unter Variantenmanagement werden sämtliche Vorgänge zusammengefasst, die der Optimierung der Variantenvielfalt und der Beherrschung der Auswirkungen variantenreicher Produktspektren dienen. Es kann sowohl präventiv, d. h. während der Festlegung der Produktspektren (Komplexitätsvermeidung), als auch bei bestehenden Produktspektren (Komplexitätsreduzierung) angewendet werden [Buchholz 2012, S. 7]. Diese Methode fokussiert die Produktebene.

Eine Variante beschreibt die Änderung inhärenter Eigenschaften eines Produktes und zielt auf die Erweiterung des Produktspektrums zur Anpassung der Produkte an Kundenwünsche oder Marktvorgaben [Beuth Verlag 1996]. Ziel ist die Steigerung des Kundennutzens, die Generierung zusätzlichen Umsatzes und Gewinns sowie die Erreichung einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit [Avak 2006, S. 3ff.].

Die Festlegung der Anzahl angebotener Varianten muss genau überdacht werden. Durch Kannibalisierungseffekte kann sich bei steigender Variantenvielfalt ein degressiver Nutzenvergleich ergeben [Wildemann 2008]. Gleichzeitig verursacht eine hohe Variantenvielfalt und die damit verbundene erhöhte Teilevielfalt eine Steigerung der Produktkomplexität [Heina 1999, S. 11], die wiederum die Kosten in verschiedenen Unternehmensbereichen erhöht. Auch können durch die erhöhte Teilevielfalt Skaleneffekte verloren gehen. Der inverse Erfahrungskurveneffekt beschreibt in diesem Zusammenhang, dass eine Verdopplung der Variantenzahl die Erhöhung der Stückkosten von 20 bis 30 Prozent bewirken kann [TCW 2005]. Aus den genannten Gründen ist es daher sinnvoll, die durch die Erhöhung der Variantenzahl entstandenen Kosten und Nutzen gegenüberzustellen, den maximalen

Nutzenüberschuss zu ermitteln und darauf basierend die optimale Variantenzahl zu bestimmen. Durch eine Integration der Komplexität in die Bewertung – beispielsweise mittels einer Kostenbewertung – kann sie bei der Bestimmung der optimalen Variantenzahl berücksichtigt werden.

Methode	Wirkbereich		Managementansatz			
	Produkt	Prozess	Vermeidung	Reduzierung	Beherrschung	Beherrschung
Betriebliche Anwendungssysteme		X		X		X
Big Data Analytics		X		X		X
Business Intelligence		X		X		X
Fertigungssegmentierung		X	X	X		
Fraktale Fabrik		X	X	X		
Nachverlagerung Variantenbestimmungspunkt		X	X	X		
Verschiebung Bevorratungsebene		X	X	X		
Holonic Manufacturing System		X				
Informationstechnologie		X				X
Produktmodularisierung	X		X	X		
Prozessautomatisierung		X				X
Schlanke Produktion		X	X	X		
Selbststeuerung		X	X	X		X
Produktportfoliomanagement	X		X			
Produktplattformen	X		X			
Standardisierung	X	X	X			
Industrie 4.0		X				X
Variantenmanagement	X		X			

Tab. 2.2: Zuordnung von Methoden zum Umgang mit Komplexität zu Managementansätzen und Wirkbereich

2.2.3 Zusammenfassende Betrachtung

Es wurde gezeigt, dass es verschiedene Managementansätze zum Umgang mit Komplexität im Unternehmen gibt, die jeweils durch unterschiedliche Methoden umgesetzt werden können (siehe zusammenfassende Darstellung in Tabelle 2.2). Eine Kombination aus dem Methodenportfolio ist zielführend. Bei der Gestaltung von Produkten und den sie herstellenden Prozessen ist darauf zu achten, dass die durch die externen Anforderungen erzeugte notwendige interne Komplexität nicht unterschritten wird, da ansonsten die Gefahr besteht, dass die Kundenanforderungen nicht erfüllt und daher die gewünschte Geschäftstätigkeit nicht ausreichend umgesetzt werden kann. Ein adäquater Umgang mit der erforderlichen Komplexität ist demnach erforderlich.

Wie erläutert, ist die Selbststeuerung eine Möglichkeit zur Beherrschung von Komplexität. Sie ist eine grundlegende Voraussetzung der dezentralen Produktionssteuerung. Durch das Aufkommen neuer, integrierter Technologien ist diese Steuerungsmethode in den letzten Jahren – insbesondere in Zusammenhang mit der vierten industriellen Revolution – in den Fokus von Wissenschaft und Praxis gerückt. Aufgrund dieser Entwicklung und den vielfältigen Möglichkeiten, die durch die dezentrale Produktionssteuerung erreicht werden können, fokussiert diese Arbeit diese Methode. Im folgenden Kapitel 2.3 werden die dezentrale Produktionssteuerung sowie die Grundlagen autonomer Technologien – als Basis für die Umsetzung der dezentralen Steuerung – vorgestellt.

2.3 Dezentrale Produktionssteuerung durch Autonomie

Dezentrale Strukturen können Unternehmen helfen, den heutigen Anforderungen des Marktes gerecht zu werden [Kluth u. Storr 1997; Petschow et al. 2014; Sundermeier et al. 2020].

Wesentliche Ziele sind die Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit und der Wandlungsfähigkeit des betrachteten Systems [Hichert et al. 1996, S. 360ff.; Ten Hompel u. Henke 2014]. Durch eine Aufgabenintegration können zudem Kostenvorteile gegenüber der zentralen Produktionssteuerung erzielt werden [Milberg 1991, S. 14]. Unter Struktur wird in dieser Arbeit die Anordnung der am Prozessschritt betei-

ligten Akteure verstanden. Eine Verbindung von Akteuren wird dabei durch eine gerichtete Kommunikationsbeziehung realisiert.

Im Folgenden werden zunächst die Anwendungsdomänen der erarbeiteten Lösung – die zentrale und dezentrale Produktionssteuerung – erläutert und verglichen und die Notwendigkeit der Betrachtung der dezentralen Produktionssteuerung zur Beherrschung komplexer Produktionsprozesse motiviert.

2.3.1 Vergleich zentraler und dezentraler Produktionssteuerung

Unter Produktionsplanung und -steuerung wird die Gesamtheit aller organisatorischen Aufgaben zur Auftragsabwicklung in einem Industrieunternehmen verstanden [Nebl 2011, S. 753]. Die operative Produktionsplanung erstellt auf Basis vorliegender Aufträge und vorhandener Ressourcen ein Produktionsprogramm [Lödding 2005, S. 107ff.], das unter anderem die Menge und die Art der herzustellenden Produkte definiert und terminiert [Nebl 2011, S. 605]. Die Fristigkeit der Produktionsplanung reicht von der jährlichen Planung des Jahresproduktionsprogramms bis hin zur Reihenfolgeplanung pro Schicht [Nebl 2018, S. 449]. Die Ergebnisse der Produktionsplanung bilden die Basis für die Produktionssteuerung [Grundstein et al. 2013]. Ihr Ziel ist die Umsetzung des in der Produktionsplanung festgelegten Produktionsprogramms. Sie gliedert sich in die drei Hauptaufgaben Auftragsveranlassung, Auftragsüberwachung und Auftragssicherung [Furmans u. Kilger 2019, S. 200]. Unter Auftragsveranlassung werden Aufgaben zusammengefasst, die für die Freigabe und Einsteuerung der Aufträge in die Fertigung und Montage notwendig sind. Fokus der Auftragsüberwachung ist die Aufnahme von Rückmeldungen aus dem Produktionsprozess [Bandow 2019], die darauf basierende Ermittlung des Ist-Zustandes und dessen Vergleich mit dem Soll-Zustand. Sie dient der Sicherung des Produktionsvollzugs [Meudt et al. 2017]. Die Auftragssicherung umfasst Methoden, die dem Angleich der Ist- an die Sollplanung dienen [Nebl 2011, S. 752ff.].

Grundlegend werden die zentrale und die dezentrale Produktionssteuerung unterschieden, die im Folgenden detailliert werden. Dafür wird zunächst der Begriff des Tätigkeitsspielraums erläutert und anschließend für die Erläuterung der notwendigen Fähigkeiten der beteiligten Akteure bei beiden Steuerungsarten verwendet. Es wird aufgezeigt, wie sich die Fähigkeiten der an der Produktionssteuerung

beteiligten Einheiten bei der zentralen und dezentralen Produktionssteuerung unterscheiden.

Der Tätigkeitsspielraum ist ein mehrdimensionales Konstrukt der Arbeitspsychologie, der die Anzahl der Möglichkeiten, unter denen eine Person oder Gruppe unter gegebenen persönlichen und strukturellen Rahmenbedingungen handeln und gestalten kann, bezeichnet [Bradtke et al. 2016, S. 12]. Er setzt sich aus dem Handlungs- und dem Entscheidungsspielraum zusammen [Ulich 2020, S. 187]. Der Handlungsspielraum bestimmt das Ausmaß an möglicher Flexibilität bei der Ausführung von Teilhandlungen bzw. -aufgaben. Er wird durch die Summe der vorhandenen Möglichkeiten zum unterschiedlichen aufgabenbezogenen Handeln, in Bezug auf Verfahrenswahl, Mitteleinsatz und der zeitlichen Organisation von Aufgabenbestandteilen bestimmt [Ulich 2011, S. 187]. Der Entscheidungsspielraum beschreibt das Ausmaß an Kompetenz der betrachteten Person oder Gruppe zur Festlegung bzw. Abgrenzung von Tätigkeiten oder Aufgaben. Es wird betrachtet, wie weit der für die Erledigung der Aufgabe notwendige Arbeitsablauf – unter Berücksichtigung eines übergeordneten Regelwerks – selbst strukturiert bzw. diesen und das Endprodukt kontrolliert werden kann [Ulich 2011, S. 187]. Für die Bestimmung der Größe des Entscheidungsspielraums müssen die Anzahl der zu treffenden Entscheidungen, als auch die jeweils zur Verfügung stehenden Entscheidungsalternativen betrachtet werden [Jeschke 2017, S. 49]. Der Tätigkeitsspielraum der Einheiten ist in zentral gesteuerten Produktionsprozessen stark eingeschränkt. Die auszuführenden Arbeitsschritte (Handlungsspielraum) sowie der dafür gewählte Arbeitsablauf (Entscheidungsspielraum) werden durch die zentrale Instanz bestimmt. Die dezentrale Produktionssteuerung ist hingegen durch mehr Freiheiten in beiden Spielräumen gekennzeichnet.

In Tabelle 2.3 sind die charakteristischen Eigenschaften der zentralen und dezentralen Produktionssteuerung gegenübergestellt. Beide Steuerungsformen werden im Folgenden detailliert.

Zentrale Produktionssteuerung

Die zentrale Produktionssteuerung ist durch strenge Kontrollhierarchien und stark heterogene Entscheidungsstrukturen charakterisiert [Willeke et al. 2017]. Bei ihr wird – im Extremfall – ein Großteil der Entscheidungen von einer zentralen Instanz der höchsten Hierarchieebene getroffen. Arbeitsanweisungen werden an die

darunter gelegenen Ebenen weitergeleitet [Lindemann u. Gronau 2009], wobei der Entscheidungsspielraum mit sinkender Hierarchieebene abnimmt. Den Akteuren der unteren Ebenen verbleibt häufig kein Entscheidungsspielraum, sie dienen lediglich der Ausführung geplanter Tätigkeiten [Westkämper et al. 1998]. Während einige Akteure die Fähigkeit besitzen mehrere Aufgaben durchzuführen, sind andere auf eine Aufgabe spezialisiert. Ein Vorteil der zentralen Produktionssteuerung liegt in der Erreichung von Kostenvorteilen durch funktionale Spezialisierung [Westkämper et al. 1998]. Nachteile ergeben sich insbesondere durch verschiedene Fristigkeiten [Gebhard u. Kuhn 2007; Van Brackel 2009, S. 20] (während auf der obersten Ebene Planungsläufe teilweise wöchentlich durchgeführt werden, finden auf der untersten Fertigungsebene Veränderungen in Quasi-Echtzeit statt [Kocsi et al. 2020]), der Aufgabenverteilung auf die unterschiedlichen Hierarchieebenen und die dadurch verursachte verzögerte und unflexible Berücksichtigung von Rückmeldungen [Kropik u. Kropik 2021]. Es besteht die Gefahr, dass Rückmeldungen veralten, weshalb valide Detailplanungen – insbesondere als Reaktion auf Störungen – der oberen Hierarchieebene nur bedingt realisierbar sind [Adam 1998b, S. 616]. Jede Änderung hat Auswirkungen auf den gesamten Produktionsplan und verursacht neben einem zeitlichen Verzug komplexe Koordinierungsmaßnahmen [Kropik u. Kropik 2021].

Der dadurch resultierende Nachteil der Inflexibilität wird von einigen Unternehmen durch das Anlegen von Beständen kompensiert [Werner 1999, S. 19]. Negative Auswirkungen der Vorratshaltung sind die Entstehung von Lagerkosten, die Erhöhung des gebundenen Kapitals sowie die Gefahr der Veraltung der gelagerten Produkte. Zudem können Bestände Fehler des Produktionsprozesses verdecken und so eine Aufdeckung und Behebung verhindern [Vollmer 2009].

Die zentrale Produktionssteuerung stößt insbesondere bei den heutigen, oftmals komplexen Produktionssystemen an ihre Grenzen. Durch die Vielzahl an Systemelementen sowie deren Dynamik können bereits kleine Abweichungen einzelner Akteure großen Auswirkungen auf das Gesamtsystems verursachen. Verzögerte Rückmeldungen und fest terminierte Planungsläufe führen zu verspäteten Reaktionen und verhindern damit eine problemadäquate und zeitnahe Anpassung der Produktion. Negative Folgen sind unter anderem Terminverzögerungen, Qualitätseinbußen und notwendige Mehrarbeit.

Dezentrale Produktionssteuerung

Das charakteristische Ziel der dezentralen Produktionssteuerung sind wenige Hierarchiestufen mit homogen verteilten Entscheidungskompetenzen [Windt 2006], die selbstständig über die optimalen Herstellungsmethoden, die Produktqualität und die zeitliche Abwicklung von Aufträgen entscheiden [Mussbach-Winter 1997].

Realisiert wird diese Steuerungsform durch die Etablierung kleiner, weitgehend unabhängiger Leistungserbringer [Köhler et al. 1997], die eine Aufhebung bzw. Aufweichung der strikt voneinander abgegrenzten Hierarchie- und Planungsstufen der zentralen Produktionssteuerung [Westkämper et al. 1998] bewirkt. Der Handlungs- und Entscheidungsspielraum der Akteure wird im Gegensatz zu denen der zentralen Steuerung erhöht und weisen untereinander geringere Unterschiede auf.

Durch die Fähigkeit der Akteure selbstständig Entscheidungen treffen zu können, werden anstelle einer gleichzeitigen Planung für alle Bereiche der Produktion, Pläne für Teilbereiche erstellt [Loos 2017]. Auf diese Weise kann flexibler auf externe Anforderungen reagiert werden. Die Koordination der dezentralen Akteure wird über ein Unternehmenszielsystem mit definierten Zielvereinbarungen sowie der Definition von Kunden-Lieferanten-Beziehungen realisiert [Köhler et al. 1997]. Damit Brüche in der Supply Chain und Kostennachteile durch isolierte Optima vermieden werden, muss das Wissen aller an dem Prozess beteiligten Akteure mit einer gemeinsamen Zielsetzung berücksichtigt werden und eine Abstimmung über den gesamten Fertigungsprozess erfolgen [Mussbach-Winter 1997].

Die dezentrale Produktionssteuerung erlaubt eine kurzfristige Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse und trägt somit zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit bei [Mussbach-Winter 1997]. Weitere Vorteile sind die Erreichung von Kostenvorteilen durch eine Aufgabenintegration [Westkämper et al. 1998], die Erhöhung der Transparenz, eine Verringerung der Prognoseanteile, die Verbesserung der Planungsqualität und eine Reduzierung und Beherrschung der Komplexität [Köhler et al. 1997]. Lass u. Gronau konnten nachweisen, dass durch eine Dezentralisierung der Entscheidungsfindung eines Transportsystems dessen Komplexität reduziert werden kann [Lass u. Gronau 2020]. Als nachteilig wird aufgeführt, dass die hohe Komplexität der Planungs- und Steuerungsaufgaben nur in speziellen Fällen exakte Ergebnisse erlaubt und daher Heuristik und Funktionen, die eine interaktive Planung durch Visualisierung von Terminierung und Maschinenbelegung unterstützen, verwendet werden [Adam 1998b, S. 614f.].

Die Granularität der Hierarchieebenen und die damit verbundene Entscheidungskompetenz der Akteure muss für jeden Prozess separat bestimmt werden [Süssenguth et al. 1991]. Für die Erlangung valider Ergebnisse sind Verfahren sinnvoll, die eine durchgängige, prozessorientierte Betrachtung erlauben und unternehmensspezifische Anforderungen berücksichtigen [Gronau et al. 2010b]. Lass hat in seiner Arbeit verschiedene Testumgebungen verglichen und motiviert durch die Ergebnisse eine Simulationsumgebung entwickelt, die die genannten Anforderungen erfüllt [Lass 2017, S. 97ff.]. Daneben wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Testumgebungen für den Einsatz moderner Technologien in Produktionsprozessen entwickelt, welche Prozessanalysen mit unterschiedlichen Fokus ermöglichen. Eine Übersicht über deutsche Testumgebungen findet sich beispielsweise auf der Internetpräsenz des Labs Network Industrie 4.0 e.V. [LNI e.V. o D].

Der Nutzen der Dezentralisierung wird bereits seit über 20 Jahren diskutiert (vgl. beispielsweise [Köhler et al. 1997; Ramsauer 1997, S. 202]). Durch technologische Entwicklungen sind jedoch erst in den letzten Jahren umfassende Möglichkeiten entstanden [Faber 2019; Huber 2018, S. 2; Wang et al. 2017], welche die Übertragung von Entscheidungs-, Ausführungs- und Kommunikationsfähigkeiten auf dezentrale Akteure fördert und zur Erhöhung der Genauigkeit der Planungsergebnisse beiträgt. Zusammengefasst werden diese Technologien unter dem Begriff Autonome Technologien, der im Folgenden detailliert wird. Eine dezentrale Produktionsplanung und -steuerung kann mithilfe autonomer Akteure realisiert werden [Zeidler et al. 2019].

2.3.2 Autonomie in Produktionsprozessen

Abgeleitet von den griechischen Wörtern *autós* (selbst) und *nómos* (Gesetz) beschreibt Autonomie einen Zustand der Selbstbestimmung /-verwaltung, Unabhängigkeit und Entscheidungsfreiheit [Smilansky 2018]. Der Begriff wird in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen verwendet, von denen einige für diese Arbeit relevante in Tabelle 2.4 mit ihren Betrachtungsgegenständen gegenübergestellt sind. Gemein ist ihnen, dass ein Fokus auf einzelnen Akteuren, die im Vergleich zur nicht-autonomen Gestaltung mit wesentlich mehr Fähigkeiten ausgestattet sind, liegt.

	Zentrale PPS	Dezentrale PPS
Fokus	Erzielung von Kostenvorteilen durch funktionelle Spezialisierung	Erzielung von Kostenvorteilen durch Aufgabenintegration, erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit, Mitarbeitermotivation
Organisationsstruktur	funktionell	prozessorientiert
Hierarchie	stark ausgeprägt	flach
Entscheidungen	durch wenige, zentrale Einheiten	durch viele, dezentrale Einheiten
Varianz Entscheidungsspielraum der beteiligten Einheiten	heterogen	homogen
Größe Entscheidungsspielraum der beteiligten Einheiten	abhängig von der Hierarchieebene	groß, begrenzt durch übergeordnetes Zielsystem
Tätigkeitsprofil der beteiligten Einheiten	Ausführung geplanter Tätigkeiten	nehmen zusätzlich zur Ausführung der Tätigkeiten, Planungs- und Steuerungsaufgaben wahr
Beispielhafte Umsetzung	tayloristischer Ansatz	Industrie 4.0

Tab. 2.3: Vergleich wichtiger Merkmale zentraler und dezentraler Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

Während Philipp et al. Autonomie in Produktionsprozessen als „... die Fähigkeit von Objekten in nicht-deterministischen Systemen, Entscheidungen unabhängig ausführen zu können...“ definieren [Philipp et al. 2006], beschreibt Zuehlke Autonomie als eine Erweiterung von Automation [Zuehlke 2008]. Automatisierte Systeme sind bereits mit Sensoren und Aktoren versehen. Sie führen Aufgaben in einer zuvor von einem menschlichen Bediener – ggf. unter Nutzung von Hilfssystemen, festgelegten Reihenfolge – bedienerarm durch [Rosen et al. 2015]. In autonomen

Domäne	Betrachtungsobjekt	Quelle
Arbeitspsychologie	Tätigkeit	[Ulich 2011, S. 187]
	Person Gruppe Arbeitsautonomie	[N.Kiggundu 1983]
Automatisierungstechnik	Maschine / Anlage	[Rosen et al. 2015]
Produktionswissenschaft	Produktionssystem	[Böse u. Windt 2007a; Grundstein et al. 2015]
	Produktionsprozess	[Gronau et al. 2013b; Theuer 2011]
	Akteur	[Zeidler et al. 2019]
Soziologie	Person	[Vanderhaegen 2010]
Wirtschaftsinformatik	Softwareagent	[Unland 2014]
Organisationswissenschaft	Entscheidung	[Taggart 1996]
	Arbeitsgruppen	[Shane et al. 1995]
	Person	[Breaugh 1999]

Tab. 2.4: Vergleich der Betrachtungsgegenstände der Autonomie unterschiedlicher Domänen

Systemen werden den Akteuren Aufgaben, wie beispielsweise die Reaktion auf Änderungen von Produktvariationen und -volumen sowie Ausnahmefällen und Fehlern [Rosen et al. 2015], zur selbstständigen Erfüllung übertragen. Sie können so zur Erhöhung der Anpassungsgeschwindigkeit beitragen [Wycisk 2009, S. 308]. Dabei ist eine Abstimmung und Verhandlung zwischen den Akteuren notwendig, welche einem Regelwerk unterliegen muss.

Zu unterscheiden sind bei der Durchführung von Aufgaben die Zielfestlegung und die Zielerfüllung. Während die Zielfestlegung durch eine übergeordnete Einheit vorgegeben wird bzw. durch eine Verhandlung zwischen Management und Akteur entsteht, liegt die Zielerfüllung in der Verantwortung der autonomen Akteure [Westkämper et al. 1998]. Im Rahmen der Aufgabenübertragung muss die deren Entscheidungskompetenz so weit gestärkt werden, dass die jeweilige Aufgabenstellung ganzheitlich betrachtet werden kann. Diese Voraussetzung ist dann erfüllt, wenn der Akteur zur Ausführung aller Teilschritte des PDCA-Zyklus (Plan-

Do-Check-Act) nach Deming befähigt ist [Westkämper et al. 1998]. Der PDCA-Zyklus wird im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung verwendet. Neben den Planungs- und Prüfschritten beinhaltet er die beiden umsetzungsorientierten Handlungsschritte *Do* und *Act* [Lindemann 2005, S. 36]. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer umfangreichen Erweiterung der Fähigkeiten der Akteure. Jedoch merkt Förster an, dass es notwendig ist, den Handlungs- und Planungsspielraum der Akteure einzugrenzen, damit das lokale Einzelinteresse das Gesamtinteresse der übergeordneten Einheit nicht verletzt [Förster 2014, S. 19]. Trotz der Eingrenzung müssen beiden Spielräume noch vorhanden sein, da die Akteure ansonsten keine Entscheidungs- und Handlungsfreiheit mehr hat und dementsprechend keine Autonomie mehr vorliegt.

Auch Abbildung 2.4 motiviert die Betrachtung der Ebene der Akteure. Dargestellt sind die Kriterien eines autonomem Produktionssystems sowie deren mögliche Ausprägungen. Es ist ersichtlich, dass die Entscheidungsfindung auf Akteursebene durchgeführt wird und eine Koordination zwischen den Akteuren erforderlich ist. Windt definiert drei grundlegende Fähigkeiten autonomer Akteure [Windt 2008]:

- die selbstständige Informationsverarbeitung,
- die selbstständige Entscheidungsfindung und
- die selbstständige Entscheidungsausführung.

Unter Informationsverarbeitung sind die Möglichkeiten zu Dateneingabe, Datenspeicherung und Datenaggregation zusammengefasst. Die Entscheidungsfindung verlangt nach einem übergeordneten Zielsystem und einem Regelwerk, das als Grundlage für die Entscheidungen der dezentralen Akteure dient. Diese Eigenschaft deckt sich mit dem Kriterium *Ziele der Akteure* nach [Westkämper et al. 1998]. Zur Abstimmung und Koordination der Produktionsprozesse ist ein Daten- und Informationsaustausch zwischen den Akteuren notwendig [Gräßler u. Pöhler 2020]. Dieser bedingt eine sichere und verlässliche Interaktion zwischen den beteiligten Akteuren [Andelfinger u. Hänisch 2017, S. 48].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass dezentral gesteuerte Produktionsprozesse neben einem übergeordneten Regelwerk auch Akteure mit stark erweiterten Fähigkeiten sowie eine verlässliche Kommunikation zwischen den Akteuren erfordert. Für die Bewertung der Dezentralität eines Produktionsprozesses ist daher

Kategorie	Kriterium	Ausprägung			
Entscheidungsfindung	Zeitliches Verhalten des Zielsystems	statisch	überwiegend statisch	überwiegend dynamisch	dynamisch
	Organisationsstruktur	hierarchisch	überwiegend hierarchisch	überwiegend heterarchisch	heterarchisch
	Anzahl der Entscheidungsalternativen	keine	einige	viele	unbegrenzt
	Art der Entscheidungsfindung	statisch	regelbasiert		lernend
	Ort der Entscheidungsfindung	Systemebene	Subsystemebene		Elementebene
	Determinismus des System-/Elementverhaltens	System + Element +	System + Element -	System - Element +	System - Element -
Informationsverarbeitung	Ort der Datenhaltung	zentral	überwiegend zentral	überwiegend dezentral	dezentral
	Ort der Datenverarbeitung	zentral	überwiegend zentral	überwiegend dezentral	dezentral
	Interaktionsfähigkeit	keine	Datenbereitstellung	Kommunikation	Koordination
Entscheidungsausführung	Flexibilität	unflexibel	weniger flexibel	flexibel	hoch flexibel
	Identifizierbarkeit (der Elemente)	keine	einige	viele	alle
	Fähigkeit zur Zustandsmessung	keine	andere	selbst	selbst und andere
	Mobilität	stationär	gering mobil	mobil	stark mobil



Abb. 2.4: Kriterien zur Autonomiebestimmung (Böse u. Windt 2007b)

die Betrachtung der Fähigkeiten der Akteure als auch deren Kommunikationsstruktur notwendig. Vor diesem Hintergrund werden verschiedene vorhandene Ansätze zur Messung der Autonomie in Produktionssystemen vorgestellt und überprüft, inwiefern die beiden genannten Elemente berücksichtigt werden.

2.3.3 Messung von Autonomie

Die Quantifizierung des Grades an Autonomie in Produktionssystemen bzw. -prozessen erlaubt einen Vergleich verschiedener Prozessszenarien. Ein objektiver Nutzenvergleich wird ermöglicht. Das Betrachtungsobjekt unterscheidet sich je nach der wissenschaftlichen Domäne, aus der der Quantifizierungsansatz stammt. Nachfolgend werden verschiedene Quantifizierungsansätze für Autonomie vorgestellt und die Anwendbarkeit für Produktionssysteme diskutiert.

Arbeitspsychologische Betrachtung

In der Arbeitspsychologie wird Autonomie als die Größe des mit der betrachteten Tätigkeit verbundenen Entscheidungsspielraums charakterisiert [Ulich 2011, S.187]. Für die Bestimmung der Größe des Entscheidungsspielraums ist neben der Anzahl an möglichen Entscheidungen auch die zur Verfügung stehende Anzahl an Alternativen pro Entscheidung von Bedeutung. Demnach steigt die Autonomie mit der Summe aus Anzahl von Entscheidungen und verfügbaren Entscheidungsalternativen, die von einer Person für eine bestimmte Tätigkeit selbstständig durchgeführt werden dürfen, an. Fokussiert werden die Möglichkeiten, die einzelne Personen bei der Ausführung ihrer Tätigkeit haben [Ulich 2011, S. 187]. Eine Übertragung auf Akteure in Produktionssystemen ist möglich, es ist jedoch keine Aggregation auf das Gesamtsystem beschrieben. Zudem wird die Kommunikationsstruktur zwischen den Personen nicht betrachtet. Da diese wie beschrieben für die Bewertung der Dezentralität von Produktionsprozessen relevant ist, ist er für deren Quantifizierung nicht anwendbar.

Autonomie von Produktionssystemen

Das Marktmodell von Gronau fokussiert die einzelnen Akteure des Produktionssystems [Gronau 2019]. Jedes cyber-physische System wird als ein mit seiner Umwelt agierender Marktteilnehmer interpretiert, der – in Abhängigkeit seines Grades an Selbstbestimmung – einen Autonomiegrad innehat (Degree of Autonomy DoA). Der DoA ist umso höher, umso selbstbestimmter das cyber-physische System handelt, der Wert kann zwischen 0 (keine eigenen Handlungen möglich) und 100 (alle Handlungen werden selbstbestimmt) liegen. Der sich durch die Summierung der DoA aller in dem betrachteten Produktionssystem agierenden cyber-physischen Systemen (u. a. Werkstücke, Maschinen, Werkzeuge, logistische Einheiten oder Menschen) ergebene Wert, gibt Aufschluss über das Autonomie-Angebot des gesamten Systems [Gronau 2019]. Dieses Angebot wird der mathematisch ermittelten Nachfrage gegenübergestellt, welche den Koordinationsaufwand und die dynamische Varianz der Anforderungen berücksichtigt [Gronau u. Theuer 2016]. Wird die Ermittlung der Nachfrage bereichsbezogen durchgeführt, kann eine Autonomielandkarte erstellt werden. Dieses Modell berücksichtigt die Akteursebene, zieht

jedoch nicht die Kommunikationsstruktur der Marktteilnehmer in die Betrachtung ein.

Grundstein et al. stellen in ihrer Arbeit einen Ansatz vor, der die Autonomie von Produktionssystemen bewertet [Grundstein et al. 2015]. Er basiert auf den Ergebnissen von [Böse u. Windt 2007a] und erweitert diese um Kriterien der Kopplung von Fertigungssteuerungssystemen und dem Produktionsprozess. Sie definieren 24 Kriterien in fünf Autonomie-Kategorien, die jeweils in drei bis vier quantifizierte und gewichtete Charakteristiken unterteilt sind. Berücksichtigt werden Kriterien der Entscheidungsfindung, Informationsverarbeitung, Entscheidungsausführung sowie Art und Intensität der Verknüpfung zum Fertigungssteuerungssystem. Im Rahmen der Analyse wird untersucht, wie das jeweilige Kriterium ausgeprägt ist. Die Summe der zugehörigen gewichteten Charakteristiken ergibt die Bewertung der Autonomie. Der Wertebereich liegt zwischen 0 (geringst mögliche Autonomie) und 156 (höchst mögliche Autonomie) [Grundstein et al. 2015]. Die Interaktionsfähigkeit innerhalb des Systems wird als ein Kriterium berücksichtigt (Merkmalsausprägungen: Datenzuordnung, Kommunikation, Koordination), betrachtet wird jedoch die Produktionssystem- und nicht die Systemelementebene.

Organisationelle Betrachtung

Lumpkin et al. stellen in ihrer Arbeit acht Methoden zur Bewertung von Autonomie in Organisationen vor [Lumpkin et al. 2009]. Fokussiert werden dabei die ausführenden Arbeitsgruppen. In der Hälfte der vorgestellten Bewertungsschemata werden unter anderem die Freiheit bei der Wahl der Arbeitsmethode und der Aufgabenreihenfolge als Kriterium verwendet. Weitere Merkmale sind die Job-Charakteristik, die Zusammensetzung des Teams und die Zentralität der Aufgabenausführung [Lumpkin et al. 2009, S. 50ff.]. So gibt die Work Method Autonomy Scale von Breugh an, wie viel Wahlfreiheit Individuen bei der Wahl ihrer Arbeitsmethode, der Arbeitsreihenfolge sowie der zeitlichen Gestaltung ihrer Aufgaben haben [Breugh 1999]. Weiterhin wird berücksichtigt, in wie weit die Individuen die Kriterien für die Bewertung ihrer Arbeitsleistung selbst festlegen können [Lumpkin et al. 2009, S. 50ff.; Breugh 1999]. Der Fokus der Decision Making Autonomy Skala von Taggart untersucht die Einflussnahme übergeordneter Organisationseinheiten produzierender Unternehmen bei der Entscheidungsfindung [Lumpkin et al. 2009, S. 50ff.; Taggart 1996]. Diese Ansätze fokussieren insbesondere Wahlfrei-

heiten bei der Ausgestaltung der übertragenden Aufgaben. Eine Bewertung der für die Ausführung notwendigen Abstimmung zwischen den Individuen wird nicht durchgeführt.

Zusammenfassende Betrachtung

Die Auflistung in Tabelle 2.5 zeigt, dass bislang kein geeigneter Quantifizierungsansatz für die Autonomie von Produktionsprozessen existiert, der sowohl die Kommunikations- als auch die Entscheidungsstruktur von Akteuren betrachtet und eine Aggregation der Akteurswerte auf die Systemebene vorsieht. Das motiviert die Erstellung eines entsprechenden Bewertungsmodells in Kapitel 3.

Domäne	Betrachtungs- objekt		Betrachtungs- fokus		Quelle
	Akteur	System	Kommu- nikation	Entschei- dung	
Arbeits- psychologie	X				[Ulich 2011]
Produktions- wissenschaft	X	X	X		[Gronau 2019]
		X	X	(X)	[Grundstein et al. 2015]
Organisations- theorie	X	X			[Lumpkin et al. 2009]
	X	X			[Taggart 1996]

Tab. 2.5: Vergleich Von Bewertungsansätzen für Autonomie

2.3.4 Autonome Technologien

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden autonome Technologien als die technologischen Befähiger für die dezentrale Produktionssteuerung verstanden. Sie ermöglichen die Akteure zur selbstständigen Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und Entscheidungsausführung. Ein dezentrales Produktionssystem setzt sich aus Steuerungskonzepten, Organisationsstrategien und Technologiebündeln zusammen [Gronau et al. 2010a]. Unter dem Begriff Organisationsstrategie wird eine anpassungsfähige und flexible Aufbauorganisation verstanden. Der Impuls

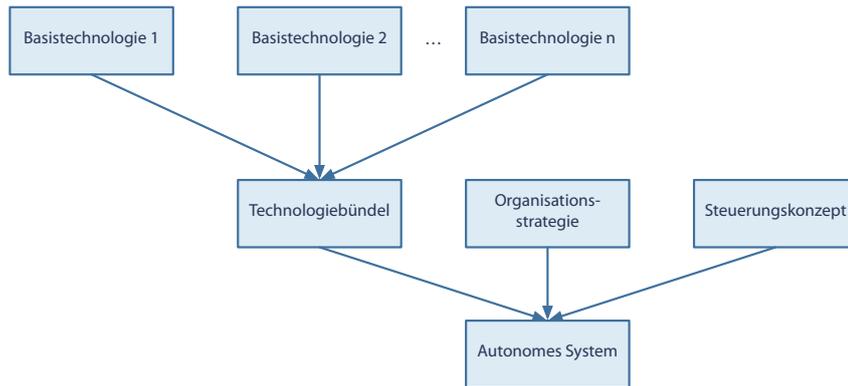


Abb. 2.5: Hierarchieebenen eines autonomen Systems (Gronau et al. 2013a)

für eine Anpassung kann sowohl durch einen internen als auch durch einen externen Wandel verursacht werden. Technologiebündel bestehen aus einer Vielzahl von Basistechniken. Abbildung 2.5 stellt die Hierarchieebenen eines autonomen Systems dar.

Bei der Übertragung von autonomen Fähigkeiten auf die Akteure von Produktionsprozessen werden diese mit Entscheidungskompetenz (positiver Entscheidungsspielraum) ausgestattet. Besitzen die Akteure zudem die Möglichkeit, die getroffenen Entscheidungen selbst auszuführen (positiver Handlungsspielraum), ist eine Übertragung des beschriebenen Ansatzes auf Produktionsprozesse möglich. Der Betrachtungsfokus wird erweitert: es werden nicht mehr ausschließlich Menschen, sondern auch technische Elemente betrachtet.

2.4 Interaktion in Produktionsprozessen

Die dezentrale Produktionssteuerung erfordert für die Abstimmung und Koordination der Produktionsprozesse ein Daten- und Informationsaustausch zwischen den Akteuren [Gräßler u. Pöhler 2020]. Notwendige Voraussetzung ist eine sichere und verlässliche Interaktion zwischen den beteiligten Leistungseinheiten [Andelfinger u. Hänisch 2017, S. 48]. Für die Betrachtung der organisatorisch möglichen Interaktionsbeziehungen werden – ausgehend von der klassischen Automatisierungspyramide sowie deren Grenzen für die dezentrale Produktionssteuerung – verschiedene Kommunikationsmodelle vorgestellt.

2.4.1 Grenzen der Automatisierungspyramide

Zur Steuerung (teil-)automatisierter Produktionsprozesse werden eine Vielzahl technischer Hardwarekomponenten (insbesondere Rechentechnik, Netzwerktechnik, Peripherie) und Softwarelösungen (insbesondere Anwendungs- und Systemsoftware) verwendet, die gemeinsam eine komplexe und vielschichtige Struktur ergeben [Goudz u. Erdogan 2021, S. 30; Kleinemeier 2014]. Auch auf Grund der weiter voranschreitenden Automatisierung gilt es, die verschiedenen Komponenten aufeinander abzustimmen und Schnittstellen zu definieren. Als ein geeignetes Beschreibungsmodell hat sich für Produktionssysteme die Form einer Pyramide erwiesen [Zacher u. Reuter 2014, S. 2]. Im Folgenden wird zunächst die klassische Automatisierungspyramide nach Siepmann [Siepmann 2016] vorgestellt und ihr Aufbau erläutert. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Vernetzung industrieller Produktionsprozesse im Rahmen von Industrie 4.0 werden die Grenzen des Modells aufgezeigt und verschiedene Varianten zur seiner Auflösung dargelegt.

Aufbau der klassischen Automatisierungspyramide

Die aus sechs Stufen bestehende Automatisierungspyramide unterteilt die anfallenden Prozesse zur Datenerhebung und -verarbeitung in einzelne Ebenen und bewirkt dadurch eine Reduzierung der Komplexität in der industriellen Fertigung [Siepmann 2016]. Die oberen drei Ebenen basieren auf dem CIM (Computer Integrated Manufacturing)-Modell [Siepmann 2016, S. 49], das betriebswirtschaftliche Informationssysteme durch die Daten-, Funktions-, Organisations- und Steuerungssicht beschreibt [Scheer 1991]. Durch die zunehmende Automatisierung industrieller Prozesse in den 1970er und 1980er Jahren wurden Ergänzungen des bestehenden bis hin zum heute verwendeten Modell erforderlich [Siepmann 2016]. Damit wurde insbesondere auch der Menge und dem Bedarf der anfallenden Informationen sowie den unterschiedlichen Zeitanforderungen der Ebenen begegnet [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2007].

Aufgrund der breiten Anwendungsmöglichkeit und des großen Auslegungsspielraums, werden verschiedene Varianten der Automatisierungspyramide entwickelt, bei denen – je nach Anwendungsfall – Ebenen entfernt, ergänzt oder zusammengefasst werden. Zudem weichen Ebenenbezeichnungen voneinander ab [Meudt et al. 2017]. Meudt et al. stellen 25 Definition gegenüber, die sich in der Anzahl der

Ebenen von drei bis sieben unterscheiden. Allgemein durchgesetzt hat sich das Modell von Siepman, das aus sechs hierarchisch angeordneten Ebenen besteht, welche die verschiedenen Ebenen der automatisierten Fertigung in einem Unternehmen widerspiegeln und vertikal miteinander integriert sind [Siepman 2016]. Das Modell ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Anzahl der Schnittstellen zwischen den Ebenen untereinander ist gering, wodurch sie weitestgehend isoliert betrachtet und gesteuert werden [Schöning u. Dorchain 2014, S. 544]. Unterteilen lassen sich die Ebenen in zwei Systemarten: Ebene 4 und 5 gehören zu den Systemen der Office-IT (ERP- und MES-Lösungen), Ebenen 1 bis 3 zu den Systemen des Automatisierungsbereiches (SCADA, SPS sowie Ein- und Ausgangssignale auf der Feldebene). Die unterste Ebene 0 stellt die Prozessebene dar.

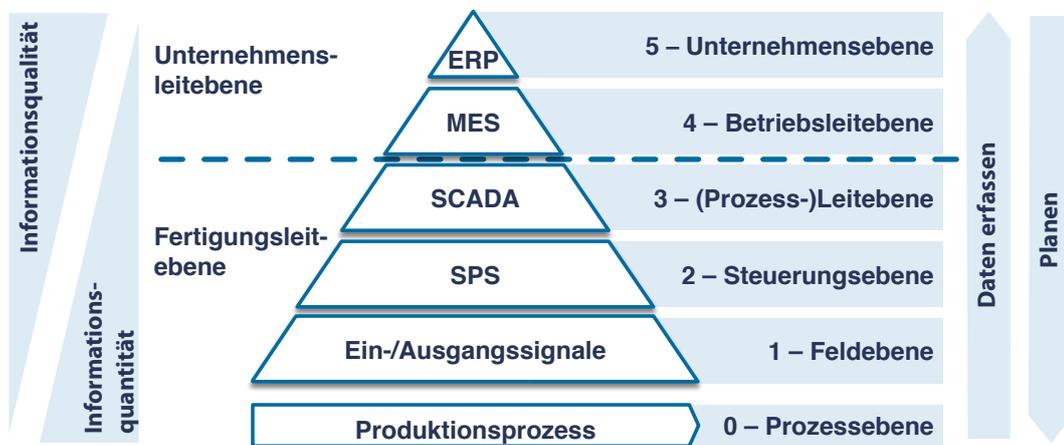


Abb. 2.6: Die Automatisierungspyramide (in Anlehnung an Siepman 2016)

Die Automatisierungspyramide ist durch die folgenden wesentliche Merkmale geprägt [Neubauer et al. 2017, S.37; Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2007]:

- Eine *ebenenübergreifende Kommunikation* findet ausschließlich zwischen direkt benachbarten Ebenen statt.
- Der *Zeithorizont* einer Ebene ist umso länger, je höher die Ebene ist. Während der Zeithorizont auf der Unternehmensleitebene mehrere Tage bzw. Schichten und auf der Fertigungsleitebene mehrere Sekunden bis hin zu einer Schicht beträgt, liegt er auf den Ebenen der Automatisierung im Bereich von Millisekunden bis Sekunden.

- Die *Fristigkeit* der Entscheidungen, die auf einer Ebene getroffen werden, ist umso geringer, je tiefer die Ebene ist. Auf der obersten Ebene liegt sie bei mehreren Wochen bis Monaten, auf der Fertigungsleitebene bei einer bis mehreren Schichten und in den unteren Ebenen im Sekunden- bis hin zum Minutenbereich.
- Die *Informationsqualität* und die *Informationsquantität* der Ebenen verlaufen antiproportional: Während die Unternehmensleitebene wenige Daten in hoher Qualität zur Verfügung stellt, werden auf der untersten Ebene eine Vielzahl von Daten mit einer geringen Informationsqualität erzeugt. Informationsqualität beschreibt den Grad der „... Gesamtheit der Anforderungen an eine Information bzw. ein Informationsprodukt, die sich auf deren Eignung zur Erfüllung gegebener Informationsbedarfe beziehen“ [Nohr 2001].

Für die effiziente Übertragung und Verarbeitung der anfallenden Daten findet von den unteren zu den oberen Ebenen eine Datenaggregation statt. Dabei weisen die unteren Ebenen aufgrund der erforderlichen schnellen Datenverarbeitung der Informationsflüsse Echtzeitanforderungen auf [Vogel-Heuser et al. 2009].

Heute werden auf jeder Ebene der klassischen Automatisierungspyramide diverse Softwaresysteme mit oft proprietären Schnittstellen verwendet, die bei jeder Änderung angepasst oder umprogrammiert werden müssen [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2007]. Sie sind teilweise nicht miteinander vernetzt oder erlauben aufgrund unterschiedlicher Semantik keine Datenintegration, wodurch inkonsistente Stamm- und Bewegungsdaten entstehen [Vogel-Heuser 2014]. Die Aufnahme zuverlässiger Prozessdaten für die Produktionsplanung und -steuerung verursacht daher einen hohen Aufwand [Meudt et al. 2017]. Zusätzlich sind die auf der untersten Ebene der Automatisierungspyramide befindlichen Feldgeräte (Aktoren und Sensoren) in den letzten Jahren deutlich leistungsstärker geworden [Neubauer et al. 2017, S. 37]. Die aus diesen Entwicklungen resultierende zunehmende Ausstattung der an den Produktionsprozessen beteiligten Akteuren mit autonomen Eigenschaften sowie deren zunehmende Vernetzung verursachte Anstieg von zu übertragenden und zu verarbeitenden Daten, bringt die klassische, streng hierarchische Automatisierungspyramide an ihre Grenzen [Neubauer et al. 2017, S. 37; Siepmann 2016]. Die mittels cyber-physischer Systeme (siehe Kapitel 2.2.2) vernetzte digitale Fabrik der Zukunft bedingt einen horizontalen und vertikalen Informationsaustausch [Nör-

dingler 2015], um den gestiegenen Performance-Anforderungen gerecht zu werden [Siepmann 2016].

Die Automatisierungspyramide kann eine dezentrale Produktionssteuerung nicht adäquat abbilden, da die Kommunikationsbeziehungen und der Entscheidungsprozess (Entscheidungsfindung - Entscheidungsausführung) nicht mehr streng hierarchisch ablaufen. Daher ist es notwendig, die Beziehungen der Elemente der Automatisierungspyramide zu betrachten und neue Kommunikationsstrukturen zu etablieren [Nördinger 2015].

2.4.2 Auflösung der Automatisierungspyramide

Wie erläutert, ist davon auszugehen, dass pyramidenförmige Kommunikationsstrukturen den durch die dezentrale Produktionssteuerung entstehenden Anforderungen nicht gerecht wird. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur solche Strukturen vorgestellt, die eine Abkehr von der Pyramidenform darstellen. Beschrieben werden das Automatisierungsdiabolo sowie ein Netzwerk mit verteilten Systemen.

Mit dem *Automatisierungsdiabolo* von Vogel-Heuser et al. werden die starren Ebenen der Automatisierungspyramide aufgelöst. Es besteht aus zwei Bereichen, die über ein gemeinsam genutztes Informationsmodell miteinander kommunizieren können (siehe Abbildung 2.7). Der obere Bereich ist mit der Unternehmensleitebene gleichzusetzen, während der untere der Produktionsleitebene entspricht [Vogel-Heuser et al. 2009]. In diesem Bereich ist eine horizontale Integration der Produktionsanlagen möglich [Flad et al. 2017]. Das Informationsmodell bedingt standardisierte und herstellerunabhängige Datenaustauschformate, um die Flexibilität der Einbindung dezentraler Leistungseinheiten und Informationssysteme zu gewährleisten [Vogel-Heuser et al. 2009].

Durch die Ausstattung der Leistungseinheiten mit autonomen Technologien und die drauf basierende Möglichkeit zur Etablierung cyber-physischer Produktionssysteme kann die klassische Automatisierungspyramide aufgelöst werden [Monostori 2014]. Während die Kontroll- und Feldebene weiter existieren um die höchstmögliche Leistung für kritische Kontrollschleifen zu ermöglichen, sind die anderen Ebenen dezentral ausgerichtet und durch zahlreiche Kommunikationsbeziehungen zwischen Akteuren der verschiedenen Ebenen charakterisiert [Monostori 2014]. So wird ein verteiltes System geschaffen, bei dem die Akteure „... eine Menge interagierender Prozesse (oder Prozessoren), die über keinen gemeinsamen Speicher

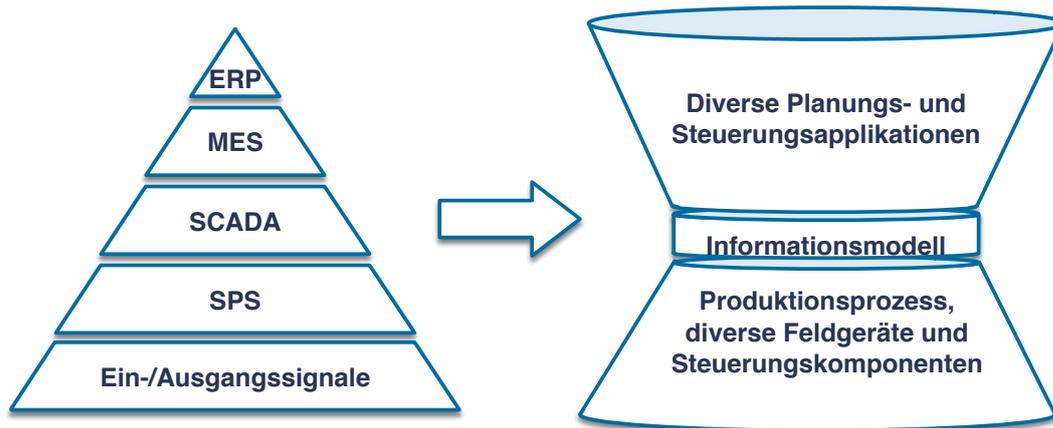


Abb. 2.7: Auflösung der hierarchischen Automatisierungspyramide in das Automatisierungsdiabolo (Vogel-Heuser et al. 2009)

verfügen und daher über Nachrichten miteinander kommunizieren“ [Schütz 1997, S. 208] repräsentieren.

Abbildung 2.8 verdeutlicht die verschiedenen Kommunikationsbeziehungen. Zum Aufbau und Aufrechterhaltung eines solchen Netzwerkes ist es notwendig, dass Schnittstellen zur Verfügung stehen. Kommunikationsstandards erhöhen die Flexibilität des Prozesses, da sie die herstellerunabhängige Integration von Maschinen und Anlagen ermöglichen [Lenz et al. 2017]. Die Integration des Menschen in den Prozess erfordert bedienerfreundliche Schnittstellen und Visualisierungen [Post 2014, S. 21].

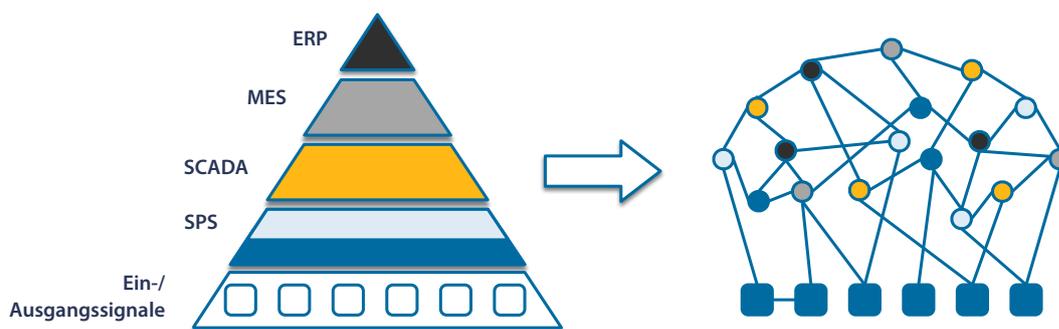


Abb. 2.8: Auflösung der hierarchischen Automatisierungspyramide in ein Netzwerk mit verteilten Services (Monostori 2014)

Die beiden vorgestellten Methoden zur notwendigen Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide verdeutlichen, dass in dezentralen Produktionsprozessen die Anzahl der Kommunikationsbeziehungen zwischen den verschiedenen Ak-

teuren ansteigt. Während zuvor nur Schnittstellen zwischen direkt benachbarten Ebenen existierten, ist davon auszugehen, dass künftig Schnittstellen zwischen allen Ebenen notwendig sind. Neben den technischen Akteuren muss dabei auch der Mensch als Bediener und Ausführender betrachtet werden. Dieses motiviert die Klassifizierung der Akteursklassen in dezentralen Produktionsprozessen sowie die Erarbeitung möglicher Formen ihrer Kommunikationsbeziehungen in Kapitel 3.1.

2.5 Zusammenfassende Betrachtung

In diesem Kapitel wurde durch die Beschreibung der grundlegenden Begriffe der Arbeit und deren Zusammenhang ein Verständnis für Komplexität in Produktionssystemen geschaffen und aufgezeigt, dass es notwendig ist, der hohen Komplexität heutiger Produktionsprozesse entsprechend zu begegnen. Zwar existieren zahlreiche Methoden zur Komplexitätsvermeidung und -reduzierung, doch kann die Komplexität eines Produktionsprozesses aufgrund hoher externer Anforderungen nicht vollständig verhindert werden. Für einen adäquaten Umgang mit den Prozessen und eine erfolgreiche Ausführung der Geschäftsaktivitäten ist es daher notwendig, Methoden zur Beherrschung der internen Komplexität zu etablieren.

Eine Möglichkeit, die in den letzten Jahren aufgrund der Verbreitung neuer, integrierter Kommunikationstechnologien stark an Bedeutung gewonnen hat, ist die dezentrale Produktionssteuerung, die durch Selbststeuerung der beteiligten Leistungseinheiten realisiert werden kann. Die Selbststeuerung bedingt autonome Fähigkeiten der Akteure sowie eine verlässliche Kommunikation zwischen ihnen. Um ein stabiles und wirtschaftliches System zu etablieren ist es notwendig, prozessindividuell den richtigen Grad an dezentraler Steuerung zu ermitteln. Die Quantifizierung der Dezentralität stellt einen notwendigen Faktor für den Vergleich verschiedener Szenarien dar. Die Relevanz der Eigenschaften der autonomen Akteure und deren Kommunikationsbeziehungen motiviert deren Berücksichtigung bei der Modellerstellung im nachfolgenden Kapitel 3.

Kapitel 3

Entwicklung eines Modells zur Bewertung der Dezentralität von Produktionsprozessen

Ziel dieses Kapitels ist die Erstellung eines Bewertungsschemas für die Dezentralität von Produktionsprozessen basierend auf der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der beteiligten autonomen Akteure. Das intendierte Bewertungsschema stellt das grundlegende Artefakt dieser Arbeit dar und dient als Basis für die Beantwortung der zentralen Forschungsfrage. Abbildung 3.1 stellt das grundsätzliche Vorgehen dar. Es dient als Struktur für dieses Kapitel.

Zunächst wird untersucht, welche Akteure für die dezentrale Produktionssteuerung geeignet sind. Dafür wird ermittelt, welche Akteursklassen in der Produktion existieren und ob diese die grundsätzlichen Anforderungen autonomer Akteure erfüllen. Darauf basierend wird eine Formel zur Bestimmung der strukturellen Autonomie von Akteuren motiviert. Dazu wird zunächst ein Verständnis von Dezentralität von Produktionsprozessen geschaffen und operationalisiert. Aus den Kennzahlengruppen der sozialen Netzwerkanalyse wird ein geeigneter Kennwert zur Bestimmung der strukturellen Autonomie von Akteuren ausgewählt. Die Möglichkeit zur Auslagerung bzw. Integration der Entscheidungsfindung und -ausführung motiviert die Berücksichtigung einer zweiten Kenngröße, die die Entscheidungsstruktur berücksichtigt. Es wird eine Klassifikationsmatrix vorgestellt, welche die Akteure nach den beiden Faktoren unterscheidet. Durch die multiplikative Verknüpfung wird ein die Akteure kennzeichnender Autonomiewert ermittelt.

Die Autonomie der Akteure wird im nächsten Schritt zunächst in einen auf den Prozessschritt und nachfolgende auf einen den Prozess bezogenen Dezentralitätswert zusammengeführt. Das dargestellte Vorgehensmodell wird konkretisiert und die jeweils erforderlichen Berechnungsschritte erarbeitet und dargelegt. Zur Bewertung der Auswirkungen der ermittelten Dezentralität wird eine weitere, den Produktionsprozess beschreibende Kennzahl verwendet.

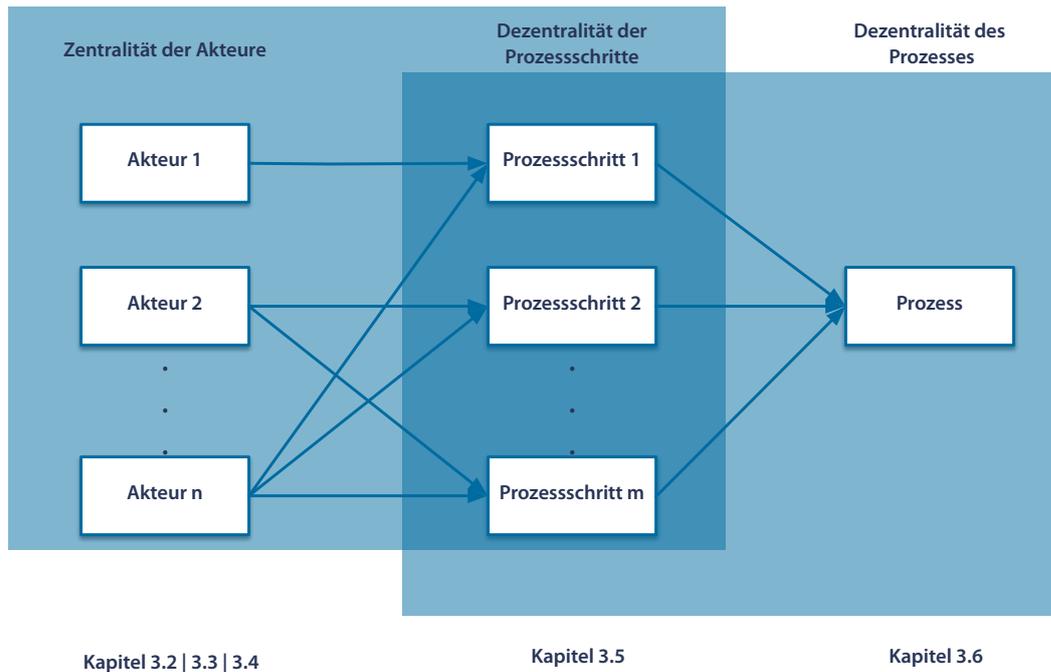


Abb. 3.1: Vorgehen zur Ermittlung der Dezentralität von Produktionsprozessen

3.1 Autonome Akteure

Der verstärkte Einsatz von Elektronik und Informationstechnologie verursachte im Rahmen der dritten industriellen Revolution in den 1960er Jahren eine verstärkte Automatisierung der Produktion [Bauernhansl u. Mische 2020 S. 2; Li et al. 2017]. Während in der ersten Phase vorrangig hierarchische Kontrollstrukturen verwendet wurden, um die zahlreichen Komponenten miteinander zu verbinden [Hatvany 1985], gab es ab den 1980er Jahren Bestrebungen diese strikten Kontrollstrukturen aufzulösen [Roth 1997, S. 19] und die Entscheidungskompetenz im Prozess

nicht mehr nur auf wenige Akteure im Prozess zu bündeln, sondern auf eine große Anzahl an dem Prozess beteiligten Akteure zu verteilen [Adam 1998a, S. 82].

Gründe für diese Dezentralisierung waren unter anderem rechnerische Grenzen der lokalen Akteure, unzuverlässige Kommunikationsverbindungen [Cassandras 1989] zwischen den Ebenen, aber auch eine Stärkung der Mitarbeitermotivation und eine damit verbundene Prozessverbesserung [Wildemann 1997, S. 106, S. 355]. Insbesondere bei Prozessen, welche in Quasi-Echtzeit ausgeführt werden sollten, kam es zu Schwierigkeiten, da die lokalen Akteure bislang nicht über angemessene Rechenkapazitäten verfügten und die zentralen Akteure nicht vollständige auf die detaillierten Sensorinformationen der verteilten Akteure zugreifen konnten [Dilts et al. 1991]. Des Weiteren sind bei hierarchischen Kontrollstrukturen die Auswirkungen auf den Weiterbetrieb bereits bei Ausfällen einer Kommunikationsbeziehung gravierend, da dadurch sämtliche Akteure unterhalb des Ausfalls von der zentralen Steuerungsentität getrennt werden [Hatvany 1985].

Während über lange Zeit die technische Umsetzung auf ihre Grenzen stieß [Hoppe 2014] und die Etablierung dezentraler Produktionssysteme auf rein organisatorischer Weise möglich war, sind in den letzten Jahren umfassende Möglichkeiten geschaffen worden, welche zu wesentlichen Fortschritten in diesem Bereich führten [ElMaraghy 2019]: Im Rahmen der steigenden Technologisierung wurden zunehmend informationsverarbeitende Fähigkeiten in physische Komponenten integriert [Papenfort et al. 2015], wodurch eine Verschmelzung von Steuerungs- und Produktionskompetenzen ermöglicht wurde [Lindemann u. Gronau 2009; Botthoff 2015, S. 93]. Eine hohe Bedeutung nehmen hier cyber-physische Systeme ein, welche die softwaretechnische Informationsverarbeitung und ihre Interaktion mit der umgebenden physischen Welt ermöglichen [Lasi et al. 2014; Vogel-Heuser et al. 2015]. Technische Grundlage dieser Wechselwirkung sind eingebettete Systeme, deren Vernetzung untereinander die Überwachung und Steuerung von (Produktions-)Prozessen als intelligente Regelkreise erlauben [Lee 2008]. Dabei wird durch die Integration von Software und physischen Elementen von Produktionssystemen [Lee 2008] die Möglichkeit der Vereinigung von Fähigkeiten der Entscheidungsfindung und -ausführung durch das Objekt selbst geschaffen [Windt et al. 2010].

Für die Koordination der Ausführung des Produktionsprozesses ist eine Kommunikation zwischen den beteiligten Einheiten der Produktion notwendig. Wie in Ab-

schnitt 2.4.1 gezeigt, erhöht die dezentrale Entscheidungsfindung die Komplexität der Kommunikation [Czap 1991]: Durch die Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide steigt die Varietät der möglichen Kommunikationsbeziehungen an. Weiter fördert diese Form der Produktionssteuerung die Entstehung von Kommunikationsbeziehungen [Wildemann 1996]. Dies motiviert eine erweiterte Betrachtung der Kommunikations- und Entscheidungsprozesse im Produktionsprozess. Kommunikationsbeziehungen beschreiben jeden kommunikativen Zusammenhang zwischen mindestens zwei Kommunikationspartnern, wobei wenigstens eine Kommunikationsquelle und eine Kommunikations Senke notwendig ist [Merten 2013, S. 27].

Abschnitt 3.1.1 identifiziert mögliche autonome Kommunikationsklassen, deren Instanzen – in dieser Arbeit als Akteure bezeichnet – die Kommunikationspartner im Rahmen dieser Arbeit darstellen. Die Erfüllung der notwendigen autonomen Fähigkeiten jeder Kommunikationsklasse auf Basis der von Windt et al. definierten Kriterien [Windt et al. 2010] wird in Abschnitt 3.1.2 überprüft und darauf basierend die Eignung für die weitere Betrachtung in der vorliegenden Arbeit begründet.

3.1.1 Herleitung der Akteursklassen

Die Gestaltung und Analyse dezentraler Produktionssysteme erfordert eine grundlegende Festlegung der zur Verfügung stehenden bzw. beteiligten autonomen Akteursklassen, deren Instanzen die konkreten Akteure in den Prozessen bilden. In diesem Abschnitt werden dafür mögliche Akteursklassen anhand der bisherigen Ergebnisse untersucht und die eventuelle Eignung ihrer Instanzen als autonome Akteure begründet.

Die in Abbildung 2.6 dargestellten, von Siepmann auf der IEC 62264 Normreihe basierenden sechs Ebenen [Siepmann 2016], decken den gesamten Unternehmensprozess technisch ab und erlauben damit eine Ableitung der relevanten Akteursklassen. Im Folgenden wird zunächst die zielorientierte Zusammenfassung der Ebenen in Akteursklassen beschrieben. Es folgt deren detaillierte Betrachtung.

Die oberen beiden Ebenen der Automatisierungspyramide stellen die Unternehmensleitung dar. Auf Basis von Informationen, die in betrieblichen Anwendungssystemen wie beispielsweise ERP- oder MES-Lösungen verarbeitet werden, werden insbesondere Aufgaben, die der Führung eines Betriebes und der Sicherstellung eines reibungslosen Betriebsablaufes dienen, durchgeführt [Heinrich et al. 2017, S. 4ff.]. Es wird die erste zu untersuchende Akteursklasse *Betriebliche Anwen-*

dingssysteme abgeleitet. Die unteren drei Ebenen gehören zu dem Automatisierungsbereich. Dessen Aufgaben umfassen im Wesentlichen die Datenaufnahme und die Prozessausführung [Heinrich et al. 2017, S. 4ff.], während die Planung im Gegensatz zur Unternehmensleitebene nur eine untergeordnete Rolle einnimmt. Durch die Integration der software-basierten Technologien dieser Ebenen in für die Produktion relevante Hardware (z. B. Maschinen, Anlagen, Werkzeuge, Werkstücke, Transportbehälter und Transportfahrzeuge) wird die zweite zu untersuchende Akteursklasse *Fabriksoftware* motiviert.

Es ist davon auszugehen, dass der Mensch künftig trotz eines höheren Grades an Automatisierung Aufgaben in der Ausführung, Planung und Steuerung übernehmen wird [Manzey 2012, S. 337] und Technik nicht ohne den Menschen gedacht werden kann [Robra-Bissantz u. Strahringer 2020]. Dabei werden ihm durch moderne und vernetzte Technologien auf seine Qualifikationen [Galaske et al. 2014] sowie die konkrete Aufgabenstellung zugeschnittene Informationen [Stocker et al. 2014] bereitgestellt, die ihn bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Insbesondere rückt auch die Mensch-Maschine-Kommunikation weiter in den Betrachtungsfokus der Wirtschaftsinformatik [Bächle et al. 2018, S. 8]. Aufgrund dieser Bedeutung wird der *Mensch* als dritte Akteursklasse definiert.

Betriebliche Anwendungssysteme | Akteursklasse 1

Unter dem Begriff der betrieblichen Anwendungssysteme werden in dieser Arbeit produktionsorientierte Softwarelösungen, wie beispielsweise MES-, ERP-, Advanced Planning Systeme (APS-) oder Computer Aided Manufacturing (CAM)-Lösungen subsumiert. Zu ihren Aufgaben gehören insbesondere die Auftrags- und Ressourcenplanung (relevante Ressourcen im Unternehmen sind Material, Personal, Kapazitäten (Maschinen, Handarbeitsplätze etc.)), Finanzen und Information [Gronau 2016, S. 43] sowie das Managen der Produktion von der Einsteuerung bis zur Fertigstellung des Produktes [Mönch 2020]. Technische Geräte, die der Eingabe von Daten in betriebliche Anwendungssysteme dienen, werden im Weiteren zu dieser Akteursklasse gezählt.

Fabriksoftware | Akteursklasse 2

Abzugrenzen von betrieblichen Anwendungssystemen ist die in Maschinen integrierte Software. Sie dient der Verarbeitung von Daten, die beispielsweise über

manuelle Eingaben (Mensch – betriebliche Anwendungssoftware), in den Maschinen integrierte Sensorik (Maschine – betriebliche Anwendungssoftware) oder den Datenaustausch verschiedener Office-IT-Instanzen (betriebliche Anwendungssoftware – betriebliche Anwendungssoftware) verfügbar gemacht werden. In Maschinen und Anlagen integrierte Software dient deren Steuerung auf Basis verarbeiteter Steuerungsbefehle. Im Rahmen dieser Arbeit wird die in Maschinen integrierte Software als Bestandteil der Klasse Fabriksoftware verstanden. Sie leitet sich aus dem Automatisierungsbereich der Automatisierungspyramide ab. Die sich auf den unteren Ebenen befindenden Technologien für die Datenerfassung und die Steuerung technischer Prozesse werden dazu in Fabriksoftware integriert.

Fabriksoftware kann auf allen Ebenen der Automatisierungspyramide nutzbringend eingesetzt werden, ihre Aufgaben können insbesondere Verwaltung, Information, Disposition, Analyse und Prognose umfassen [Gronau 2020].

Mensch | Akteursklasse 3

In der Diskussion um neue, intelligente und dezentrale Produktionsmethoden wird auch die künftige Rolle des Menschen in der Produktion diskutiert. Im Gegensatz zur Computer Integrated Manufacturing (CIM)-Bewegung der 1990er Jahre, in der von Praktikern vielfach die menschenleere Fabrik proklamiert wurde (u. a. [Geitner 1978 S. 470; Fiedler u. Regenhard 1991 S. 12]), wird bei den aktuellen Veränderungen nicht von einer Verdrängung des Menschen aus der Workflow-Ebene ausgegangen (u. a. [Botthof 2015 S.4; Glück 2016 S. 100]). Anzunehmen sind jedoch Veränderung von Arbeitsformen [Gronau et al. 2017] und verwendeten Technologien. Diskutiert werden dabei unter anderem notwendige Anpassungen von Fort- und Ausbildungsinhalten sowie -methoden [Hermann et al. 2017], erforderliche Kompetenzen [Pfeiffer 2015] sowie erweiterte Möglichkeiten für die Werkerassistenz [Deuse et al. 2015].

3.1.2 Prüfung der Akteursklassen auf autonome Fähigkeiten

Basierend auf der Aufspaltung in Teilaufgaben werden im Folgenden die drei zuvor motivierten potenziellen Akteursklassen hinsichtlich der Erfüllung der notwendigen Fähigkeiten autonomer Objekte untersucht. Eine zusammenfassende Darstellung

der Ergebnisse ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Autonome Akteure müssen, wie in Kapitel 2.3.2 dargelegt drei grundlegende Fähigkeiten [Windt et al. 2005] besitzen:

- die selbstständige Informationsverarbeitung,
 - Auslösung von Entscheidungsprozessen
 - Identifikation von Entscheidungsalternativen
 - Bewertung von Entscheidungsalternativen
 - Anweisung der ausgewählten Entscheidungsalternative
 - Kontrolle der ausgewählten Entscheidungsalternative
- die selbstständige Entscheidungsfindung und
 - Erfassung von Informationen
 - Speicherung von Informationen
 - Transformation von Informationen
 - Übertragung von Informationen
- die selbstständige Entscheidungsausführung.
 - Umsetzung der getroffenen Entscheidung
 - Kommunikation der Ergebnisse

Betriebliche Anwendungssysteme | Akteursklasse 1

Bei betrieblichen Anwendungssystemen können Entscheidungen über Schnittstellen oder Benutzerinteraktion ausgelöst werden. Diese umfassen neben der Mensch-Computer-Schnittstelle zur Eingabe von Daten auch den Datenaustausch zwischen verschiedenen Anwendungssystemen via definierter Protokolle sowie Schnittstellen zu Maschinen. Die Identifikation, Bewertung und Kontrolle von Entscheidungsalternativen wird über Algorithmen, die im Prozessor eines Computers ablaufen, durchgeführt. Die Anweisung der ausgewählten Entscheidungsalternativen wird über Schnittstellen zu Maschinen oder anderen Anwendungssystemen sowie Ausgabeschnittstellen im Rahmen der Mensch-Computer-Interaktion umgesetzt (Entscheidungsfindung). Die genannten Schnittstellen dienen auch der Erfassung und

		Mensch	Betriebliches Anwendungssystem	Fabriksoftware
Entscheidungsfindung	Auslösung des Entscheidungsprozesses	Sinnesorgane	Schnittstellen	Schnittstellen Sensorik
	Identifikation von Entscheidungsalternativen	Sinnesorgane Gedächtnis	Algorithmen	Algorithmen
	Bewertung von Entscheidungsalternativen	Sinnesorgane Gedächtnis	Algorithmen	Algorithmen
	Anweisung der ausgewählten Entscheidungsalternative	Sendeorgane	Schnittstellen	Schnittstellen Aktorik
	Kontrolle der ausgewählten Entscheidungsalternative	Sinnesorgane Gedächtnis	Algorithmen	Sensorik Algorithmen
Informationsverarbeitung	Erfassung von Informationen	Sinnesorgane	Schnittstellen	Schnittstellen Sensorik
	Speicherung von Informationen	Gedächtnis	Datenspeicher	Datenspeicher
	Transformation von Informationen	Gedächtnis	Algorithmen	Algorithmen
	Übertragung von Informationen	Sendeorgane	Schnittstellen	Schnittstellen Aktorik
Entscheidungsausführung	Umsetzung der getroffenen Entscheidung	Sendeorgane	Algorithmen Schnittstellen	Schnittstellen Aktorik

Abb. 3.2: Notwendige Fähigkeiten autonomer Akteursklassen (in Anlehnung an Windt 2008)

Übertragung von Informationen im Rahmen der Entscheidungsverarbeitung. Die Informationen werden im Datenspeicher (in physischer Form auf einem Speichermedium) gespeichert und mithilfe von Algorithmen verarbeitet (Informationsverarbeitung). Ausgeführt werden die getroffenen Entscheidungen entweder durch eine Übertragung der relevanten Daten an andere Anwendungssysteme oder physische Geräte, wo sie eine entsprechende Aktion auslösen, oder über verschiedene Ausgabeformen im Rahmen der Mensch-Computer-Interaktion (Entscheidungsausführung).

Fabriksoftware | Akteursklasse 2

Cyber-physische Systeme verbinden durch die Integration von Sensoren, Aktoren und Kommunikatoren die physische mit der virtuellen Welt [Baheti u. Gill 2011] und ermöglichen so die lokale Informationsverarbeitung mit Hilfe eingebetteter Systeme und deren Vernetzung zur Kommunikation untereinander sowie zur Nutzung welt-

weit verfügbarer Daten und Dienste [Lee et al. 2015]. Die Entscheidungsprozesse werden entweder über Schnittstellen zu Menschen, betrieblichen Anwendungssystemen oder anderen Maschinen als auch über Sensorik erfasste physikalische Größen ausgelöst. Ihre Identifikation und Bewertung wird über Algorithmen ermöglicht, die getroffenen Entscheidungen können mittels der genannten Schnittstellen oder über die Umwelt beeinflussende Aktorik angewiesen werden (Entscheidungsausführung). Über die Aufnahme der resultierenden Änderungen über Sensoren sowie die Verarbeitung mittels Algorithmen können ausgewählte Entscheidungsalternativen kontrolliert werden (Entscheidungsfindung). Informationen werden über Schnittstellen oder Sensoren erfasst, in Datenspeichern gespeichert und mittels Algorithmen transformiert (Informationsverarbeitung). Die Möglichkeit der Übertragung von Informationen besteht mittels Schnittstellen und Aktoren. Diese ermöglichen auch die Umsetzung der getroffenen Entscheidung.

Mensch | Akteursklasse 3

Bei menschlichen Entscheidungen handelt es sich um eine Reaktion auf eine bestimmte Situation [Bleicher 1970]. Ausgelöst werden sie beispielsweise durch eine direkte Kommunikation mit anderen Personen, externalisierte Informationen bspw. in Form von Dokumenten, als auch durch Signale wie Farbcodierungen, Alarme, leere Flächen im Rahmen von Sichtkanban, Wärme oder Gerüchen. Dabei werden stets die Sinnesorgane der Person benötigt. Die verschiedenen Entscheidungsalternativen können ebenfalls durch die Sinne sowie Wissen und Erfahrungen aus der Vergangenheit, welche im Gedächtnis gespeichert sind, identifiziert, bewertet und kontrolliert werden. Das (Erfahrungs-)Wissen nimmt insbesondere bei der Bewertung der Entscheidungsalternativen eine entscheidende Rolle ein. Über die Sinne können weiter allgemeine (unter anderem verbal, als auch in Schriftform übermittelte) Regeln aufgenommen werden. Neue Technologien ermöglichen dabei erweiterte Formen der Kommunikation und Interaktion. Die ausgewählten Entscheidungsalternativen kann der Mensch bspw. in Form von Sprache (verbal und nonverbal) und durch die Verwendung nicht-elektronischer und elektronischer Kommunikationsmittel anweisen. Die hierfür benötigten Organe, wie Hände, Mund, Augen, etc. werden unter dem Begriff Sendeorgane zusammengefasst (Entscheidungsfindung). Das Gedächtnis stellt die Grundlage sowohl für ihre Speicherung, als auch für ihre Verarbeitung dar. Die Übertragung von Informationen sowie die Umsetzung der

getroffenen Entscheidung wird durch die Sendeorgane des Menschen ermöglicht (Informationsverarbeitung). Bei der Umsetzung der getroffenen Entscheidung ist dabei insbesondere auch die manuelle Bedienung von Maschinen inkludiert (Entscheidungsausführung).

Abbildung 3.2 fasst die aufgeführten Ergebnisse zusammen. Es wird ersichtlich, dass alle drei untersuchten Akteursklassen die notwendigen Fähigkeiten autonomer Einheiten besitzen und ihre Instanzen daher grundsätzlich als aktive, autonome Akteure zu einer dezentralen Produktionssteuerung beitragen können.

3.1.3 Kommunikationsmethoden

Der Austausch von Daten und Informationen zwischen Instanzen einer und mehrerer Kommunikationsklassen bedarf geeigneter Kommunikationsmethoden. Eine Auswahl vorhandener Methoden wird in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass die Akteure sowohl innerhalb ihrer Kommunikationsklasse als auch klassenübergreifend Möglichkeiten zur Übertragung von Informationen zu anderen Akteuren haben, wodurch eine verteilte Entscheidungsfindung ermöglicht wird.

Es wurden drei Akteursklassen, welche über die notwendigen autonomen Fähigkeiten verfügen, erarbeitet. Es wurde aufgezeigt, dass zwischen den Instanzen der Akteursklassen zahlreiche Arten von Interaktionsbeziehungen existieren. Dies motiviert die weitere Untersuchung der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur für die Ermittlung der Akteursautonomie.

Kommunikationspartner 1	Kommunikationspartner 2	Interaktionsform
Mensch	Mensch	Gespräch, Zeichen
Mensch	Fabriksoftware	Bedienen, Eingabezeilen, Kommandosprachen, Formulare, Menüs, Graphische Oberflächen
Mensch	Betriebliches Anwendungssystem	Alphanumerische Eingabe, Eingabe über Masken und Menüs, Positioniergeräte, Semigraphik, Vollgraphik, Spracheingabe, Gestik, Augmented Reality, Virtual Reality
Fabriksoftware	Maschine	Technische Schnittstellen
Fabriksoftware	Betriebliches Anwendungssystem	Technische Schnittstellen
Fabriksoftware	Mensch	Prozessergebnisse akustische Signale optische Signale
Betriebliches Anwendungssystem	Mensch	Graphische Ausgabe auf Bildschirm Graphische Ausgabe auf Informationsmedium Akkustische Ausgabe
Betriebliches Anwendungssystem	Fabriksoftware	Technische Schnittstellen
Betriebliches Anwendungssystem	Betriebliches Anwendungssystem	Technische Schnittstellen

Tab. 3.1: Übersicht über Interaktionsformen zwischen den verschiedenen Leistungsklassen

3.2 Strukturelle Autonomie dezentraler Akteure

Jeder kommunikative Zusammenhang zwischen mindestens zwei Kommunikationspartnern ist durch Kommunikationsbeziehungen geprägt [Delhees 1994, S. 12]. Dabei werden zwei Formen unterschieden: während vertikale Kommunikationsbeziehungen die hierarchischen Beziehungen, also insbesondere die Kommunikation von Anweisungen sowie die Rückmeldung von Ist-Status und Kontrollinformationen, fokussiert [Delhees 1994, S. 365], finden horizontale Kommunikationsbeziehungen zwischen gleichberechtigten Kommunikationspartnern auf einer Ebene statt und dienen im Wesentlichen der Koordination der durchzuführenden Prozessen. Die Untersuchung dieser Beziehungen in einem Netzwerk aus mehreren Kommunikationspartnern ist Gegenstand der sozialen Netzwerkanalyse (SNA). Als Methode mit Ursprung in der Sozialforschung werden dabei ausschließlich die Verbindungen und Interdependenzen der Kommunikationspartner und nicht deren individuellen Eigenschaften fokussiert [Wasserman u. Faust 1994, S. 8].

Eine prägende Eigenschaft der dezentralen Produktionssteuerung ist die Abkehr von wenigen, kontrollierenden Elementen und wenigen Kommunikationsbeziehungen hin zu einer großen Anzahl an kontrollierenden Elementen und einer starken Vernetzung der Elemente [Lass 2017, S. 50]. Die verwendete Kommunikationsstruktur und die daraus resultierenden Veränderungen sollen Betrachtungspunkt der vorliegenden Arbeit sein. Die Anwendung der sozialen Netzwerkanalyse scheint ein problemadäquates Vorgehen zur Betrachtung der Kommunikationsstruktur zwischen den an dezentral gesteuerten Produktionsprozessen beteiligten Akteuren und ihrer quantitativen Bewertung, da sie umfangreiche Analysemöglichkeiten von strukturellen Beziehungen zwischen mehreren Akteuren bietet [Wasserman u. Faust 1994, S. 25]. Dabei werden in der sozialen Netzwerkanalyse horizontale und vertikale Kommunikation grundsätzlich gleichberechtigt betrachtet, durch die in dieser Arbeit verwendete Einteilung der Akteure in *kontrollierend* und *ausführend* werden jedoch auch hierarchische Kontrollbeziehungen berücksichtigt.

Basierend auf den klassischen Formen struktureller Beziehungen werden nachfolgend Anforderungen an einen Kennwert für die quantitative Bewertung der Kommunikationsstruktur erarbeitet. Darauf basierend werden die fünf Hauptgruppen von Zentralitätsmaßen der sozialen Netzwerkanalyse hinsichtlich ihrer Eignung für

die vorliegende Problemstellung untersucht. Es wird aufgezeigt, dass die Hauptgruppe Closeness den Anforderungen entspricht; verschiedene Kennwerte dieser Hauptgruppe werden verglichen und ein geeigneter Kennwert verifiziert und falsifiziert.

3.2.1 Abgrenzung klassischer Formen struktureller Beziehungen

Die Klassifikation zentraler und dezentraler Akteure und Strukturen hat bereits zahlreiche Wissenschaftler beschäftigt, insbesondere in der Sozialwissenschaft. So definierte Bavelas eine dezentrale Position als eine, die „... Nachrichten durch andere weiterleiten muss“ [Bavelas 1950]. Leavitt beschrieb prägende Eigenschaften zentraler Positionen, als dass eine zentrale Position nicht von anderen zwischengeschalteten Positionen oder weitergeleiteten Nachrichten abhängig ist [Leavitt 1951]. Dilts et al. konkretisierten dahingehend vier Formen von Kontrollstrukturen und stellten Vor- und Nachteile dar: die zentrale Form (Centralized Form), die Hierarchie (Proper Hierarchical Form), die modifizierte Hierarchie (Modified Hierarchical Form) und die Heterarchie (Heterarchical Form) [Dilts et al. 1991]. Dabei werden kontrollierende und ausführende Entitäten unterschieden. Kontrollierende Entitäten sind aktiv an der Entscheidungsfindung beteiligt und können die getroffenen Entscheidungen an ihnen untergeordneten Entitäten übermitteln. Sie können jedoch keine Entscheidungen ausführen. Ausführende Akteure hingegen setzen die Anweisungen, die sie von den ihnen vorgelagerten Entitäten erhalten haben, um. Sie sind nicht an der Entscheidungsfindung beteiligt. Die vier Ausprägungen sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Unterteilung dient im Weiteren als Basis für die Ableitung der Definition an den benötigten Kennwert.

Abbildung 3.3a stellt eine reine zentrale Kontrollstruktur dar. Es gibt nur ein Element A, das Entscheidungen treffen kann und nur dieses Element hat Beziehungen zu den anderen Elementen (a-e). Die anderen Elemente sind nicht untereinander verbunden.

In Abbildung 3.3b ist eine zweite Ebene mit kontrollierenden Akteuren eingefügt. Das bewirkt insbesondere, dass mehr als ein kontrollierendes Element im Netzwerk existiert und die Kontrolle dementsprechend zwischen diesen aufgeteilt wird: Das kontrollierende Element A in der oberen Ebene gibt Informationen an

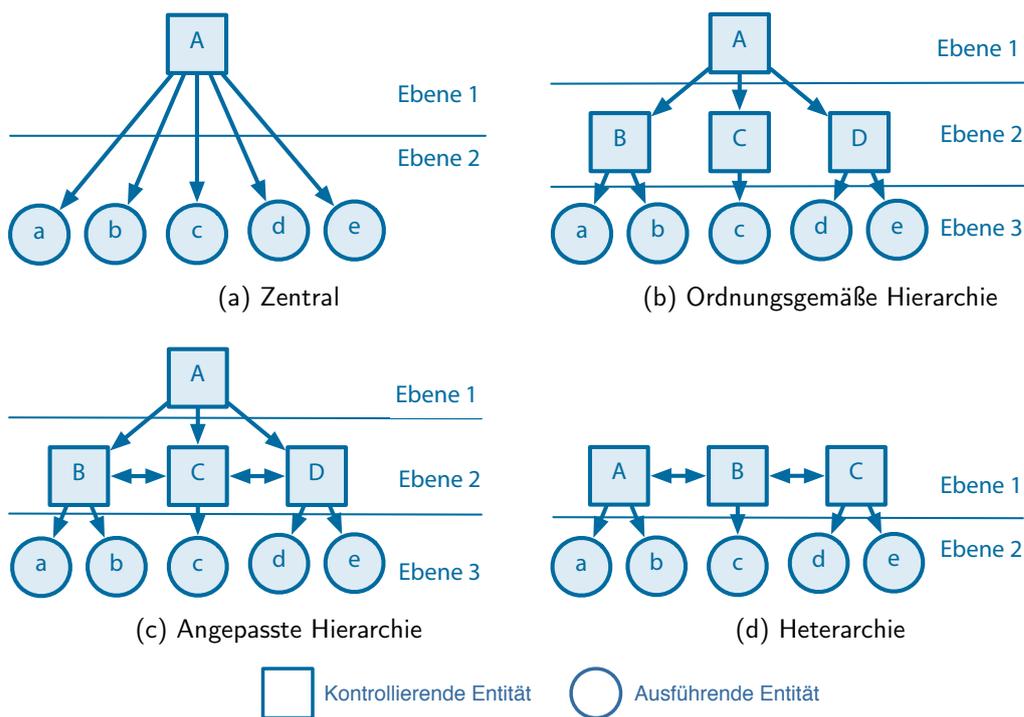


Abb. 3.3: Darstellung verschiedener Kontrollstrukturen (in Anlehnung an [Dilts et al. 1991])

die ihm nachgelagerten kontrollierenden Akteure (B, C, D) weiter, welche diese basierend auf den ihnen vorliegenden Informationen konkretisieren, verarbeiten oder und somit in ihrem Kontrollprozess berücksichtigen. Die resultierenden Ergebnisse werden an die untere Ebene der ausführenden Elemente (a-e) weitergeleitet. Kommunikationsbeziehungen finden ausschließlich hierarchisch statt, eine vertikale Kommunikation zwischen Elementen einer Ebene existiert in der ordnungsgemäßen Hierarchie nicht.

In der angepassten Hierarchie (Abbildung 3.3c) wurden Kommunikationsbeziehungen zwischen den kontrollierenden Elementen der mittleren Ebene ergänzt und somit auch eine horizontale Kommunikation berücksichtigt. Es existieren weiterhin vertikale Kontrollbeziehungen, die erst in der Heterarchie (siehe Abbildung 3.3d) aufgehoben werden. Alle kontrollierenden Elemente (A, B,C) kommunizieren gleichberechtigt auf einer Ebene, zwischen ihnen und den ausführenden Elementen besteht eine vertikale Kommunikation.

Die nachfolgende Tabelle 3.2 stellt die charakterisierenden Eigenschaften der genannten Kontrollstrukturen dar.

	Zentral	Ordnungs- gemäße Hierarchie	Angepasste Hierarchie	Heterarchie
Anzahl kontrollierende Elemente	1	> 1	> 1	> 1
Anzahl Ebenen mit kontrollierendem Element	1	> 1	> 1	1
Horizontale Kommunikation zwischen kontrollierenden Elementen	nicht vorhanden	nicht vorhanden	vorhanden	vorhanden

Tab. 3.2: Klassifikation verschiedener Kontrollstrukturen hinsichtlich ihrer kennzeichnenden Eigenschaften

3.2.2 Herleitung der Definition der Akteursautonomie

In einem ersten Schritt werden aus den in Abbildung 3.3 dargestellten und im vorherigen Unterabschnitt erläuterten Kontrollstrukturen vier Definitionen der Zentralität von Akteuren hergeleitet. Kontrollierende und ausführende Akteure werden dabei zunächst ohne Unterscheidung betrachtet. Nennungen der Elementart dienen lediglich der besseren Verständlichkeit. Die Definitionen werden sowohl verbal als auch mathematisch dargelegt. Im Anschluss werden vorhandene Zentralitätsmodelle der sozialen Netzwerkanalyse mehrstufig hinsichtlich ihrer Eignung zu ihrer Umsetzung untersucht. Dafür wird zunächst per Falsifizierung die grundsätzliche Eignung der Modelle eruiert und nachfolgend eine mathematische Verifizierung vorgenommen.

Es gilt zu definieren, wann ein Akteur die maximale bzw. minimale strukturelle Zentralität erreicht und welchen mathematischen Zusammenhang zwischen den Faktoren und der Zielgröße (Zentralität) hinsichtlich Erhöhung und Minderung ist.

Fokussiert wird jeweils die Betrachtung eines Elementes. Relevante Faktoren sind dabei gemäß der sozialen Netzwerkanalyse die Anzahl der durch das betrachtete Element erreichbaren Elemente sowie die dafür benötigten Schritte.

Definition 1

Anhand von Abbildung 3.3a wird begründet, unter welchen Umständen ein Element die maximale Zentralität erreicht. Sie zeigt eine zentrale Kontrollstruktur. Das einzige kontrollierende Element auf der obersten Ebene 1 kann alle anderen Elemente direkt (gerichtet) und ohne weitere, zwischengeschaltete Elemente erreichen. Eine perfekte Zentralität liegt dementsprechend vor, wenn alle anderen Elemente des betrachteten Netzwerkes direkt, d. h. ohne zwischengeschaltete Elemente, erreicht werden können.

Daraus lässt sich die erste Definition ableiten:

Die strukturelle Autonomie eines Akteurs ist genau dann maximal, wenn er alle Akteure im Netzwerk direkt erreicht.

$$c_i = \max \Leftrightarrow \sum_{j=1}^n a_{ij} = n - 1 \quad \forall i, j \in A, j \neq i$$

mit

c_i : Strukturelle Autonomie von Akteur m

a_{ij} : Eintrag in der i -ten Zeile und j -ten Spalte der Adjazenzmatrix
: (=1, wenn Akteur j ein direkter Nachbar von Akteur i ist, sonst 0)

A : Adjazenzmatrix vom betrachteten Prozessschritt

n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Definition 2

Betrachtet werden nun die Akteure auf der zweiten (Abbildungen 3.3a bzw. 3.3d) bzw. dritten Ebene (Abbildungen 3.3b bzw. 3.3c). Diese (ausführenden) Akteure können keine anderen Akteure erreichen. Sie stellen somit den Gegenpart zu dem zentralen Akteuren dar. Die zweite Definition lautet daher:

Die strukturelle Autonomie eines Akteurs ist genau dann minimal, wenn er keinen anderen Akteur im Netzwerk erreichen kann.

$$c_i = 0 \Leftrightarrow \sum_{j=1}^n r_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in R, j \neq i, n \in \mathbb{R}$$

mit

- c_i : Strukturelle Autonomie von Akteur I
- r_{ij} : Eintrag in der i-ten Zeile und j-ten Spalte der Erreichbarkeitsmatrix
: (=1, wenn Akteur i Akteur j in beliebig vielen Schritten erreichen kann, sonst 0)
- R : Erreichbarkeitsmatrix des betrachteten Prozessschrittes
- n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Definition 3

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Erhöhung der Schritte, werden die Abbildungen 3.3a und 3.3b betrachtet. Sie unterscheiden sich durch die zusätzlichen, kontrollierenden Elemente in der zweiten Ebene. Das Element in der obersten Ebene kann nicht mehr alle anderen Elemente direkt erreichen. Nach der Definition von [Dilts et al. 1991] ist die Dezentralität in Abbildung 3.3b höher. Zur weiteren Konkretisierung der dritten Definition wird ein zusätzliches Szenario herangezogen (siehe Abbildung 3.4). Durch die Verschiebung des mittleren Akteurs der zweiten Ebene und seines nachfolgenden Akteurs an Stelle der beiden ausführenden Akteure, die dem ersten Akteur der zweiten Ebene nachfolgend sind, ergibt sich das auf der rechten Seite der Abbildung dargestellte Szenario. Es ist eine zusätzliche Ebene entstanden. Der kontrollierende Akteur A in der ersten Ebene kann indirekt (über mehrere Schritte) weiterhin die gleiche Anzahl an anderen Akteuren erreichen. Die Summe der dafür benötigten Schritte ist jedoch gestiegen, der Einfluss auf das gesamte Szenario gesunken.

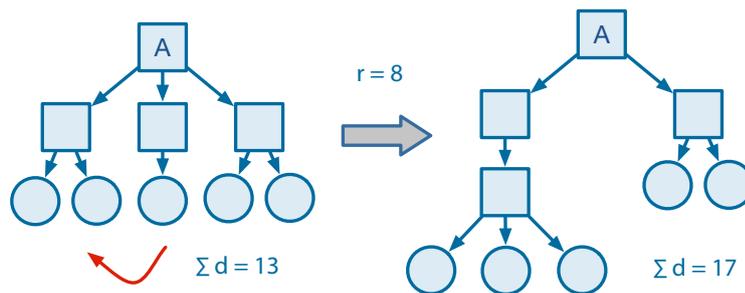


Abb. 3.4: Erhöhung der Entfernungssumme bei gleichbleibender Anzahl der erreichbaren Akteure

Die strukturelle Autonomie eines Akteurs sinkt (bei konstanter Anzahl erreichbarer Akteure) mit zunehmender Entfernung zu den anderen Akteuren.

$$\sum_{j=1}^n d_{lj} > \sum_{j=1}^n d_{kj} \stackrel{!}{\Rightarrow} c_l < c_k, \quad \forall \sum_{j=1}^n r_{lj} = \sum_{j=1}^n r_{kj}, \quad k, l, j \in D$$

mit

d_{lj} : Eintrag in der l-ten Zeile und j-ten Spalte der Distanzmatrix

c_l : Closeness von Akteur l

r_{kj} : Eintrag in der k-ten Zeile und j-ten Spalte der Erreichbarkeitsmatrix

D : Distanzmatrix vom betrachteten Prozessschritt

n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Definition 4

Zur Betrachtung der Auswirkungen einer Erhöhung der erreichbaren Elemente wird ein weiteres Szenario definiert. Abbildung 3.5 stellt eine Erhöhung der Anzahl der erreichten Elemente bei gleichbleibender Entfernungssumme dar. Der betrachtete Akteur A auf Ebene 1 kann mit einer identischen Anzahl von Schritten eine höhere Anzahl von Akteuren erreichen. Sein Einfluss auf das betrachtete Szenario steigt. Aus dieser Betrachtung folgt Definition 4:

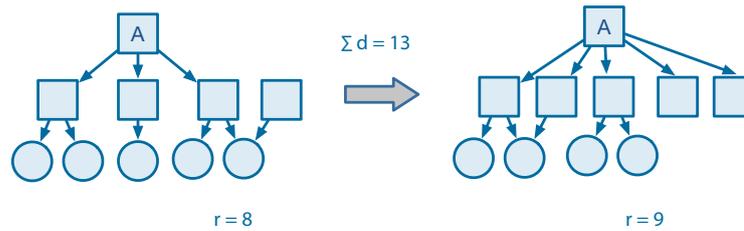


Abb. 3.5: Erhöhung der Anzahl der erreichbaren Akteure bei konstanter Entfernungssumme

Die strukturelle Autonomie eines Akteurs steigt (bei gleichbleibender Summe der Entfernungen) mit steigender Anzahl der erreichten Akteure.

$$\sum_{j=1}^n r_{lj} > \sum_{j=1}^n r_{kj} \wedge \sum_{j=1}^n d_{lj} = \sum_{j=1}^n d_{kj} \Rightarrow c_l > c_k,$$

mit

r_{lj} : Eintrag in der l-ten Zeile und j-ten Spalte der Erreichbarkeitsmatrix

d_{lj} : Eintrag in der l-ten Zeile und j-ten Spalte der Distanzmatrix

c_l : Closeness von Akteur l

D : Distanzmatrix vom betrachteten Prozessschritt

n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Die vier aufgestellten Definitionen stellen die Anforderungen an das Zentralitätsmaß zur Bestimmung der strukturellen Autonomie der Akteure dar. Im Folgenden werden verschiedene vorhandene Zentralitätsmaße hinsichtlich ihrer Erfüllung untersucht.

3.2.3 Falsifizierung von Zentralitätsmaßen

In der sozialen Netzwerkanalyse werden fünf Hauptgruppen von Zentralitätsmaßen unterschieden: Betweenness, Closeness, Degree [Jansen 2006, S. 127ff.], Eigenvektor [Bonacich 2007] und Prestige [Trappmann et al. 2011, S. 27]. Alle klassifizieren den jeweiligen betrachteten Akteurs hinsichtlich seiner Position in einem (sozialen)

Gefüge [Russo u. Koesten 2005], wobei sie unterschiedlichen Zentralitätsdefinitionen unterliegen [Wasserman u. Faust 1994, S. 169ff.]. In jeder Hauptgruppe gibt neben einer Hauptkennzahl, welche direkt die Definition widerspiegelt, mehrere Abwandlungen, die zusätzliche Fokus setzen oder Spezifika – beispielsweise die Aufhebung der Verpflichtung zur starken Verbundenheit (jeder Akteur muss von jedem anderen Akteuren über eine unterschiedliche Anzahl von Schritten erreichbar sein) oder der Betrachtung von gerichteten anstelle von ungerichteten Beziehungen – ermöglichen. Während bei den ersten vier genannten Hauptgruppen der Fokus auf ausgehenden Beziehungen des betrachteten Akteurs zu anderen Akteuren im Netzwerk liegt, werden bei Prestige auf den Akteur gerichtete Beziehungen betrachtet (im Sinne von Wahlen) [Jansen 2006 S. 128; Trappmann et al. 2011 S. 27]. Diese Hauptgruppe wird im Folgenden nicht berücksichtigt, weil sie für den in der vorliegenden Arbeit betrachteten Fall nicht zielführend ist, da keine Wahl-, sondern Kommunikationsbeziehungen betrachtet werden.

In der sozialen Netzwerkanalyse findet keine Unterscheidung verschiedener Akteursarten statt. Eine Bewertung der Akteure wird ausschließlich auf deren Position im strukturellen Netzwerk getroffen. Nachfolgend werden die vier verbliebenen Hauptgruppen basierend auf Abbildung 3.6 beschrieben. Das Element mit der höchsten Zentralität ist in den dargestellten Netzwerken jeweils hervorgehoben. Diese Darstellung verdeutlicht den Betrachtungsfokus der Hauptgruppen und motiviert die fallspezifische Auswahl eines Zentralitätskennwertes auf den vorgestellten Hauptgruppen.

Betweenness-Kennwerte klassifizieren die betrachteten Akteure hinsichtlich ihres Einflusses auf die Verbreitung von Informationen im Netzwerk [Freeman 1978, S. 218ff.]. Grundlage bildet die Anzahl der Schnittstellen zwischen zwei sonst unverbundenen Substrukturen. Die Zentralität der Akteure steigt, je häufiger der betrachtete Akteur auf dem kürzesten Weg anderer Akteure liegt [Freeman 1977]. Beim in Abbildung 3.6a dargestellten Szenario ist Akteur 2 der zentralste. Er liegt auf den beiden kürzesten Wegen zwischen den Akteuren 1 und 3 bzw. 1 und 4. Akteur 3 liegt auf dem kürzesten Weg zwischen den Akteuren 2 und 4. Die Akteure 1 und 4 liegen als Start- und Endpunkt auf keinem kürzesten Weg.

Closeness-Kennwerte bewerten Akteure hinsichtlich ihrer Effizienz im Sinne von Unabhängigkeit. Grundlage der Betrachtung sind die geodätischen Distanzen zwischen den betrachteten und allen anderen, direkt und indirekt mit ihm ver-

bundenen Akteuren [Freeman 1978, S. 224ff.]. Die Betrachtungsbasis bildet die Distanzmatrix. Die Zentralität der Akteure steigt bei sinkender Entfernung zu den anderen Akteuren im Netzwerk [Newman 2005]. Da der abgebildete Graph in Abbildung 3.6b nicht vollständig ist (es können nicht alle Akteure von allen anderen erreicht werden), wird hier der normierte harmonische Closeness-Wert verwendet. Er berechnet sich durch

$$C_{Ha} = \frac{N - 1}{\sum_{i \neq a} \frac{1}{d_{a,i}}}, \quad a, i \in A \quad (3.1)$$

mit

- C_{Ha} : Harmonische Closeness von Akteur a
- $d_{a,i}$: Geodätische Distanz von Akteur a zu Akteur i
- A : Menge der Akteure a
- N : Erreichbare Akteure a

Akteur 1 hat eine harmonische Closeness von $C_{H1} = \frac{4-1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}} = \frac{2}{3}$, Akteur 2 von $C_{H2} = \frac{4-1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} = \frac{2}{3}$. Akteur 3 kann ausschließlich Akteur 4 als direkten Nachbarn erreichen. $C_{H3} = \frac{4-1}{\frac{1}{1}} = \frac{1}{3}$. Akteur 4 hat eine Closeness von 0, da er keinen anderen Akteur erreichen kann. Die maximale Closeness haben entsprechend die Akteure 1 und 2.

Degree-Kennwerte bewerten die Expertise und den Einfluss von Akteuren auf Basis ein- und ausgehender Verbindungen zu benachbarten Verbindungen [Newman 2005]. Grundlage der Betrachtung ist die Adjazenzmatrix, die die vorhandenen Kanten zwischen den Knoten eines Graphen darstellt. Die Zentralität der Akteure steigt, bei steigender Anzahl der direkten Nachbarn (ungerichtetes Netzwerk) bzw. bei steigender Anzahl der ausgehenden Kanten (gerichtetes Netzwerk) [Zhang u. Luo 2017]. Akteur 2 hat zwei ausgehende Beziehungen, während alle anderen Akteure maximal eine ausgehende Beziehung haben. Daher ist Akteur 2 am zentralsten (siehe Abbildung 3.6c).

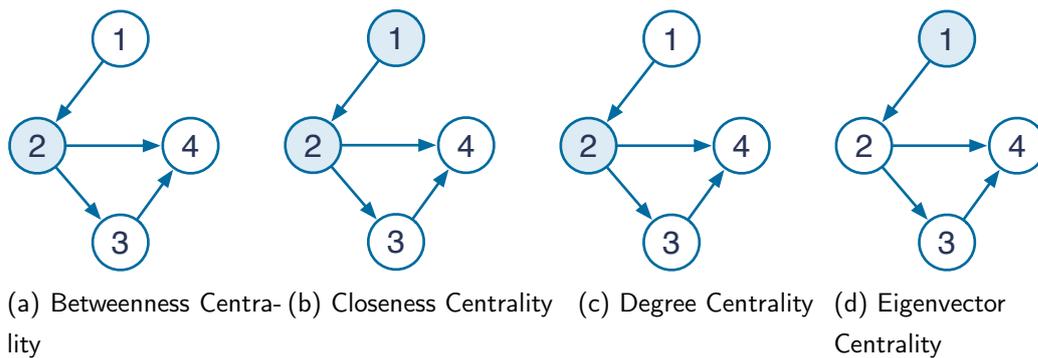
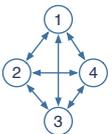
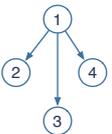
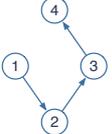
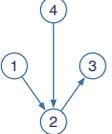
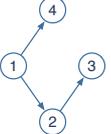


Abb. 3.6: Vergleich der Hauptgruppen der Sozialen Netzwerkanalyse; hervorgehoben: Element mit höchster Zentralität (in Anlehnung an Dilts et al. 1991)

Eigenvektor-Kennwerte bewerten die Verbundenheit im Netzwerk und den direkten Einfluss eines Akteurs auf das Netzwerk. Sie werden rekursiv, d. h. unter der Berücksichtigung der Zentralität der verbundenen Akteure bestimmt. Die Zentralität der Akteure steigt, mit steigender Zentralität der Nachbarknoten [Everett u. Borgatti 1999] (siehe Abbildung 3.6d).

Nachfolgend werden die vier Hauptgruppen hinsichtlich der Erfüllung der oben aufgestellten vier Definitionen anhand der in Abbildung der Titelzeile von Tabelle 3.3 dargestellten Szenarien untersucht. Die Netzwerke 1 bis 3 entsprechen klassischen Netzwerktopologien der Rechnerarchitektur (vollständig, Stern, Linie) [Laudon et al. 2015, S. 346]. Durch sie ist eine vollständige Analyse der Erfüllung der oben aufgestellten Definition 1 und 2 und in Teilen auch der Definitionen 3 und 4 möglich. Die Netzwerke 4 und 5 wurden ergänzt, um die Erfüllung der Definitionen 3 und 4 gezielter betrachten zu können.

Untersuchungsgrundlage bildet in jeder Hauptgruppe die Hauptkennzahl. Abwandlungen von dieser werden im nächsten Schritt der Validierung betrachtet. Ziel ist die Falsifizierung der nicht geeigneten Zentralitätsmaße als Basis für die im nächsten Schritt folgende mathematische Verifizierung. Am Beispiel von Closeness wird erläutert, welche Definitionen durch die Anwendung des Wertes erfüllt werden können. Die auswertenden Tabellen für die weiteren drei Hauptgruppen befinden sich im Anhang A.2, A.3, A.4. Dabei sind in der Tabelle 3.3 die zusammengefassten Ergebnisse dargestellt. Die vollständige Tabelle mit berechneten Werte befindet sich in Anhang A.1.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
					
Def. 1	X	X			
Def. 2		X	X	X	X
Def. 3		X	X		X
Def. 4		X		X	

Tab. 3.3: Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Closeness

Definition 1 sagt aus, dass ein Akteur genau dann eine maximale strukturelle Autonomie hat, wenn er mit allen anderen Akteuren direkt verbunden ist. In Tabelle 3.3 trifft dieses in Szenario 1 für alle, in Szenario 2 nur für Akteur 1 zu. Dem entsprechend müssten in diesen fünf Fällen die Zentralität maximal sein. In Zeile *str. Autonomie* sind die berechneten Werte aufgeführt. In allen fünf genannten Fällen ist die Zentralität 1, in keinem weiteren Szenario erreicht ein Akteur diesen Maximalwert. Definition 1 kann somit durch Szenario 1 und 2 als erfüllt angesehen werden (markiert mit einem X).

Definition 2 sagt aus, dass die strukturelle Autonomie eines Akteurs genau dann 0 ist, wenn der Akteur keinen weiteren Akteur erreichen kann. Diese Voraussetzung wird in Szenario 2 von den Akteuren 2,3,4. in Szenario 3 von Akteur 4 und in Szenario 4 von den Akteuren 3 und 4 erfüllt. In allen Fällen beträgt die berechnete Zentralität 0. Dieser Wert wird von keinem weiteren Akteur der fünf Szenarien erreicht. Der Closenesswert erfüllt demnach auch Definition 2.

Nach Definition 3 sinkt die strukturelle Autonomie mit steigender Entfernungssumme (bei gleichbleibender Anzahl der erreichten Akteure). Akteur 1 in den Szenarien 2 und 3 kann jeweils drei Akteure erreichen. In Szenario 2 beträgt die Entfernungssumme 3, in Szenario 4 6. Dementsprechend muss die strukturelle Autonomie des betrachteten Akteurs in Szenario 2 höher als in Szenario 3 sein. Dieses ist erfüllt ($1 > 0,61$). Ein weiterer Vergleich ist durch die Szenarien 3 und 5 möglich. In Szenario 3 hat Akteur 1 eine Entfernungssumme von 6, in Szenario 5 beträgt diese 4. Beide Male sind drei Akteure erreichbar. Um die Definition zu erfüllen,

müsste Akteur 1 in Szenario 5 eine höhere strukturelle Autonomie haben. Auch dies ist gegeben ($0,83 > 0,61$).

Definition 4 fordert eine Erhöhung der strukturellen Autonomie bei steigender Anzahl der erreichbaren Akteure und gleichbleibender Entfernungssumme. Akteur 1 in den Szenarien 2 und 3 kann jeweils alle drei weiteren Akteure erreichen. Akteur 1 in Szenario 2 kann bei einer Entfernungssumme von 3 drei Akteure erreichen, die Entfernungssumme beträgt 3. Akteur 1 in Szenario 4 hat ebenfalls eine Entfernungssumme von 3, kann jedoch nur zwei Akteure erreichen. Demnach muss die Zentralität von Akteur 1 in Szenario 2 höher sein als die von Akteur 1 in Szenario 4. Da dies gegeben ist ($1 > 0,5$) ist auch diese Definition erfüllt.

Analog zur Closeness-Betrachtung sind die Ergebnisse der Prüfung der Erfüllung der Definitionen für die weiteren Hauptgruppen im Anhang dargestellt. Tabelle 3.4 stellt zusammenfassend dar, welche Kennwerte den vier aufgestellten Definitionen genügen.

	Closeness	Betweenness	Eigenvector	Degree
Definition 1	X	-	-	-
Definition 2	X	-	-	x
Definition 3	X	-	-	-
Definition 4	X	-	-	-

Tab. 3.4: Zusammenfassende Darstellung: Erfüllung der Definitionen durch die vier Zentralitäts-Hauptgruppen

Es wird ersichtlich, dass nur die Hauptgruppe Closeness den zuvor aufgestellten Definitionen gerecht werden kann. In dieser Hauptgruppe existieren verschiedene Kennwerte, die im Folgenden detailliert analog zu der oben durchgeführten Analyse betrachtet werden. Die Analyse wurde mit einem selbst erzeugten Skript in R durchgeführt. Tabelle 3.5 stellt zusammenfassend dar, welche Kennwerte den vier aufgestellten Definitionen genügen. Der Vergleich wird dabei stets pro Kennwert, d. h. zeilenweise durchgeführt. Hervorgehoben sind dabei die Kennwerte, die der Definition 1 entsprechen. Definition 1 wird von den vier Zentralitäts-Kennwerten (fett hervorgehoben) Dangelchev Centrality und Harmonic Closeness Centrality erfüllt. Weighted Closeness wird analog der Harmonic Closeness berechnet, der Wert wird aber zusätzlich mit der Häufigkeit, die eine Verbindung zwischen zwei Akteu-

ren verwendet wird, gewichtet. Dadurch kann es zu Verschiebungen kommen, durch welche die Definitionen dann nicht mehr erfüllt sind. Da Harmonic Closeness am ehesten dem Hauptwert entspricht, wird dieser für die weitere Arbeit ausgewählt.

	Definitionen			
	1	2	3	4
Dangalchev	+	+	+	+
Eccentricity	-	-	-	-
Gil-Schmid	-	+	+	+
Harmonic Closeness	+	+	+	+
Information				
Centraliy	-	-	+	+
Latora	-	-	-	+
Marcov	-	-	+	-
Centrality	-	-	-	-
M-Reach	-	-	-	-
Radiality	-	-	-	-
Weighted Closeness *	+	+	+	+

Tab. 3.5: Zusammenfassende Darstellung der Erfüllung der Definitionen durch die Kennwerte der Hauptgruppe Closeness

3.2.4 Verifizierung

Nachfolgend wird mathematisch verifiziert, dass sich der Kennwert Harmonic Closeness eignet, um die gestellten Definitionen zur Bestimmung der strukturellen Autonomie von Akteuren in dezentral gesteuerten Produktionsprozessen zu erfüllen.

Sei D die $n \times n$ -Matrix eines Graphen $G = (V,E)$ mit

V : Menge von Knoten

E : Menge von Kanten

n : Anzahl der Knoten

R : binäre Erreichbarkeitsmatrix von G

R^x : x-te Ableitung der Adjazenzmatrix A

dann heißt D Distanzmatrix von G. Es gilt: $d_{ij} = \begin{cases} \min R_{ij}^x & \forall r_{x,ij} = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

$$d_{1j} = d_{1j} + a, a \in \{0, 1\}, d \in \mathbb{N}$$

$$r_{ij} = 0 \rightarrow d_{ij} = \infty$$

$$\frac{1}{\infty} = 0$$

Definition 1

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}} \stackrel{!}{=} n - 1, i \neq j, d_{ij} \in \mathbb{N} \Leftrightarrow d_{ij} = 1 \forall j$$

mit

- C_i : Strukturelle Autonomie von Akteur i
- d_{ij} : Distanz zwischen Akteur i und Akteur j
- n : Anzahl Akteure im betrachteten Prozessschritt
- A : Menge der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Es wurde gezeigt, dass nur genau dann eine maximale strukturelle Autonomie erreicht werden kann, wenn die Distanz zwischen dem betrachteten Akteur i und allen weiteren Akteuren $j \in A$ 1 beträgt (also alle anderen Akteure direkt erreicht werden können). Definition 1 ist verifiziert.

Definition 2

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}} \stackrel{!}{=} 0; i \neq j, d_{ij} \in \mathbb{N} \Leftrightarrow d_{ij} = \infty$$

mit

- C_i : Strukturelle Autonomie von Akteur i
- d_{ij} : Distanz zwischen Akteur i und Akteur j
- n : Anzahl Akteure im betrachteten Prozessschritt
- A : Menge der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Es wurde gezeigt, dass nur genau dann eine minimale strukturelle Autonomie erreicht werden kann, wenn die Distanz zwischen dem betrachteten Akteur i und allen

weiteren Akteuren $j \in A$ unendlich ∞ ist (also kein anderer Akteur erreichbar ist). Definition 2 ist verifiziert.

Definition 3

$$\begin{aligned} & \frac{1}{d_{11}} + \frac{1}{d_{12}} \geq \frac{1}{d_{11}} + \frac{1}{d_{12} + a} \text{ mit } d_{1j} = d_{1j+1} + a, a \in \{0, 1\} \\ \Leftrightarrow & \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2} \geq \frac{d_1 + d_2 + a}{a \cdot d_1 + d_1 \cdot d_2} \\ \Leftrightarrow & (d_1 + d_2)(a \cdot d_1 + d_1 \cdot d_2) \geq (d_1 + d_2 + a)(d_1 \cdot d_2) \\ \Leftrightarrow & ad_1^2 + d_1^2d_2 + ad_1d_2 + d_1d_2^2 \geq d_1^2d_2 + d_1d_2^2 + ad_1d_2 \\ \Leftrightarrow & ad_1^2 \geq 0 \end{aligned}$$

mit

d_{ij} : Distanz zwischen Akteur i und Akteur j

Es wurde gezeigt, dass die strukturelle Autonomie durch die Erhöhung der Entfernungssumme bei gleichbleibender Anzahl der erreichbaren Akteure sinkt. Definition 3 ist verifiziert.

Definition 4

$$\begin{aligned} & \bigvee d_{kj_m} \text{ für das gilt } d_{kj_m} = d_{lj_n} + d_{lj_{n+1}} \text{ mit } d_{kj_n} = a \text{ und } d_{ij_n} + d_{ij_{n+1}} = a + b, b > 1 \\ \Leftrightarrow & \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{d_{kj_i}} + \frac{1}{d_{kj_n}} < \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{d_{lj_i}} + \frac{1}{d_{lj_n}} + \frac{1}{d_{lj_{n+1}}} \\ \Leftrightarrow & \sum \frac{1}{a} < \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \\ \Leftrightarrow & 0 < \frac{1}{b} \end{aligned}$$

Es wurde gezeigt, dass die strukturelle Autonomie bei steigender Anzahl der errei- chen Akteure und gleichbleibender Summe der Entfernung steigt. Definition 4 ist verifiziert.

3.2.5 Abgrenzung der Prozessschritte

Für die Prozessschritt-orientierte Auswertung ist es notwendig, dass die Kommunikationsbeziehungen den Prozessschritten zugeordnet werden. Insbesondere weil davon ausgegangen werden muss, dass mehrere Prozessschritte parallel laufen (für mehrere Aufträge) reicht eine ausschließliche Betrachtung des Zeitstempels nicht aus. Stattdessen muss zusätzlich eine logische Betrachtung der Kommunikationsbeziehungen stattfinden, gegebenenfalls ist eine manuelle Zuordnung notwendig.

3.2.6 Zusammenfassende Betrachtung

Basierend auf gültigen Definitionen der Zentralität von Kontrollstrukturen wurden vier Definitionen für die Bewertung der Akteursautonomie in dezentral gesteuerten Produktionsprozessen abgeleitet. Diese wurde im nächsten Schritt als Grundlage für die Bewertung von vier Hauptgruppen der Sozialen Netzwerkanalyse verwendet. Die Hauptgruppe Closeness wurde als geeignet ermittelt. Daraufhin wurden zehn Closeness-Kennwerte untersucht. Es wurde gezeigt, dass der Kennwert Harmonic Closeness alle vier oben aufgestellten Anforderungen erfüllt. Daher kann dieser im weiteren Verlauf für die Ermittlung der tatsächlichen Autonomie von Akteuren in der dezentralen Produktionssteuerung verwendet werden. Weiter wurde das Vorgehen für die für die Abgrenzung der Prozessschritte eines Prozesses beschrieben.

3.3 Entscheidungsautonomie

In Kapitel 3.1 wurde dargelegt, dass autonome Akteure in der Lage sind, Entscheidungen selbstständig treffen und ausführen zu können. Dieses führt zu der Notwendigkeit der Einführung einer zusätzlichen Akteursart, welche eine Verschmelzung von kontrollierendem und ausführenden Akteur darstellt, und im Folgenden als selbstausführender Akteur bezeichnet wird. In Abbildung 3.7 wird die graphische Darstellung aufgezeigt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ausführlich auf die verschiedenen Arten von Akteuren eingegangen. Es gilt die Annahme, dass jeder Akteur, der eine Entscheidung trifft und diese entweder an einen strukturell nachfolgenden Akteuren weitergibt oder selbst verarbeitet, eine positive Autonomie hat, da er aktiv am Entscheidungsprozess involviert ist. Es ist notwendig zu untersuchen, in wie weit eine Erweiterung der Berechnung der Akteursautonomie notwendig ist.

Dazu werden nachfolgend zunächst verschiedene Szenarien miteinander verglichen. Es wird gezeigt, dass die Aufteilung der Entscheidungen auf die am Prozessschritt beteiligten Akteure relevant für die Bestimmung deren Dezentralität ist. Im Anschluss wird der Begriff der Entscheidung erläutert, um eine Grundlage für die Definition der Entscheidungsautonomie zu legen. Der Abschnitt schließt mit einer Klassifizierung von Akteuren und einer darauf basierenden Herleitung der Berechnung für einen weiteren Faktor zur Berechnung der Autonomie von Akteuren in der dezentralen Prozesssteuerung.



Abb. 3.7: Verschmelzung von kontrollierendem und ausführendem Akteur: selbst-ausführender Akteur

3.3.1 Motivation

Abbildung 3.8 stellt zwei Szenarien gegenüber, aus welchen die Notwendigkeit der Berücksichtigung einer weiteren Komponente bei der Bestimmung der Autonomie von Akteuren begründet werden kann. Auf der linken Seite ist ein zentrales Szenario dargestellt. Alle Entscheidungen werden durch einen Akteur getroffen, welcher direkt mit allen anderen Akteuren kommuniziert. Im Gegensatz dazu ist auf der rechten Seite ein Szenario abgebildet, bei welchem alle Akteure an der Entscheidungsfindung beteiligt sind. Die strukturelle Autonomie beider Szenarien ist identisch, jedoch ist die Entscheidungsfindung deutlich unterschiedlich. Daraus resultiert, dass eine reine Betrachtung der strukturellen Autonomie von Akteuren nicht ausreichend ist, um die Dezentralität von Produktionsprozessen zu operationalisieren. Es bedarf einer Erweiterung der Autonomieberechnung der beteiligten Akteure.

3.3.2 Berechnung der Entscheidungsautonomie

Die Entscheidungsautonomie soll auf Basis des dem betrachteten Akteurs zur Verfügung stehenden Entscheidungsspielraums bestimmt werden. Eine Entscheidung ist eine verbindliche Festlegung der zu realisierenden Alternative unter der Beach-

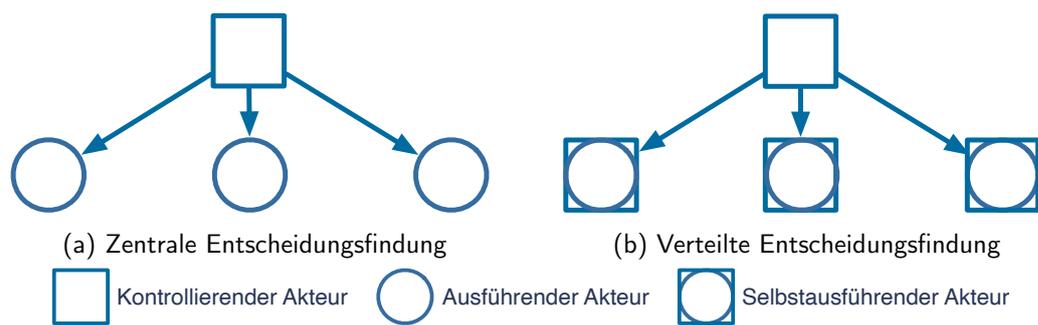


Abb. 3.8: Gegenüberstellung von Szenarien zur Motivation der Berücksichtigung der Entscheidungsautonomie

tung verschiedener Entscheidungskriterien, die sowohl als Entscheidungsregel als auch als Entscheidungsprinzip ausgeprägt sein können [Eilon 1969]. Eine Alternative ist als eine sich gegenseitig ausschließende Handlungsmöglichkeit definiert [Holtmann 2008, S. VII]. Dabei kann grundlegend zwischen für die jeweilige betrachtete Entscheidung relevante und irrelevante Alternativen differenziert werden. Die endliche, aus mindestens zwei relevanten Alternativen bestehende Menge, wird als Alternativenmenge bezeichnet. Bei stetigen Entscheidungsvariablen ist daher eine Diskretisierung der Werte notwendig, da ansonsten eine unendliche Menge resultieren würde. Für die Durchführung eines Produktionsprozesses sind zahlreiche Entscheidungen notwendig. Je nach Organisationsform werden diese von einer unterschiedlichen Anzahl von Akteuren zu unterschiedlichen Zeitpunkten getroffen. Für die Ermittlung der Höhe der Beteiligung eines Akteurs am Entscheidungsprozess können verschiedene Kenngrößen verwendet werden.

- Anzahl Entscheidungen
- Anzahl Alternativen / Größe Entscheidungsraum
- Gewichtete Anzahl Entscheidungen nach Entscheidungsaufwand
- Gewichtete Anzahl Entscheidungen nach Auswirkung der Entscheidung

Die Anzahl der Entscheidungen, die ein Akteur im betrachteten Prozessschritt treffen kann, ist eine relative einfache Bewertung. Sie kann IT-seitig durch Auswertung der Datenprotokolle ermittelt werden. Sind menschliche Akteure involviert, ist es zudem notwendig, dass Interviews geführt werden, welche eine Ermittlung der

getroffenen Alternativen fokussieren, da nicht alle Entscheidungen IT-seitig erfasst werden (insbesondere bei der Kommunikation zwischen zwei Menschen).

Eine weitere Möglichkeit ist die Quantifizierung des Entscheidungsraums. Dabei ist es notwendig, für jede Entscheidung die Anzahl der (relevanten) Alternativen zu ermitteln. Dies kann mit viel Aufwand verbunden sein.

Weiter ist es möglich, die Anzahl der Entscheidungen zu gewichten: Möglichkeiten sind insbesondere der Entscheidungsaufwand, der beispielsweise durch den erforderlichen Rechenaufwand ermittelt werden kann, oder die Auswirkung der getroffenen Entscheidung auf das Prozessergebnis. Bei allen Varianten kann neben der absoluten Anzahl auch der relative Wert zur jeweiligen Gesamtanzahl im Prozessschritt verwendet werden.

Für die gegebene Fragestellung ist der Anteil der Entscheidungsalternativen des betrachteten Akteurs an der gesamten Anzahl der im Prozessschritt getroffenen Entscheidungen ein pragmatischer Kennwert, da dieser vor Ort aufgenommen werden kann und trotzdem eine detaillierte Betrachtung als die reine Anzahl an Entscheidungen erlaubt.

Der Entscheidungsvektor \vec{d}_{ps} ist wie folgt definiert:

$$\vec{d}_{ps} = \begin{bmatrix} d_{1,ps} \\ \dots \\ d_{n,ps} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

mit

\vec{d}_{ps} : Entscheidungsvektor von Prozessschritt ps

$d_{a,ps}$: Anteil an der Gesamtentscheidung von Akteur a in Prozessschritt ps

n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Der Anteil an der Gesamtentscheidung von Akteur a in Prozessschritt ps berechnet sich durch

$$d_{a,ps} = \frac{e_{a,ps}}{\sum_{a=1}^n e_{a,ps}}, a \in A_{ps} \quad (3.3)$$

Er stellt die Entscheidungsautonomie des betrachteten Akteurs dar.

mit

$d_{a,ps}$: Entscheidungsautonomie von Akteur a in Prozessschritt ps

$e_{a,ps}$: Anzahl an Entscheidungsalternativen,
über die Akteur a in Prozessschritt ps verfügt

n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

A_{ps} : Menge der Akteure a in Prozessschritt ps

3.4 Tatsächliche Autonomie

In den vorherigen Abschnitten wurden zwei unterschiedliche Faktoren für die Bestimmung der Zentralität von Akteuren in der Produktionssteuerung motiviert und erläutert. Ziel ist weiterhin, eine integrative Kennzahl zu erzeugen und eine Differenzierung der Dezentralität der hervorgehobenen Akteure in Abbildung 3.8 zu ermöglichen.

Es gilt nachfolgend zu untersuchen, ob die beide Werte einen additiven oder einen multiplikativen Zusammenhang haben. Bei additiven Zusammenhängen bedingen sich beide Werte nicht. Ist einer null und der andere positiv, ist das Ergebnis positiv. Für die vorliegende Betrachtung bedeutet dies, dass ein Akteur auch dann eine positive Autonomie hätte, wenn die strukturelle Autonomie positiv und die Entscheidungsautonomie null ist. Gemäß der Klassifizierung von Akteuren in Abbildung 3.9 handelt es sich hierbei um einen zwischengeschalteten Akteur (Szenario 2 in Tabelle 3.6). Dieser hat rein ausführende Fähigkeiten und trägt nicht zur Entscheidungsfindung bei. Insbesondere kann er auch in einem streng hierarchischen System vorkommen, in dem ein zentraler Akteur alle Entscheidungen trifft und diese über Akteure mehrere Ebenen verteilt. Da dies den dieser Arbeit zugrunde liegenden Annahmen widerspricht, ist die additive Verknüpfung nicht zielführend.

Bei der multiplikativen Verknüpfung ergibt sich nur dann ein positiver Gesamtwert, wenn beide Faktoren positiv sind (die Werte können keinen negativen Wert annehmen, so dass im Weiteren nicht berücksichtigt werden muss, dass die Multiplikation zweier negativer Werte ein positives Ergebnis hat). Durch die eingeführte Erweiterung der Harmonic Closeness für selbstaussführende Akteure hat ein Akteur, welcher Entscheidungen trifft, diese selbst ausführt und keine ausgehenden

	Strukturelle Autonomie	Entscheidungs- autonomie	Addition	Multiplikation
Szenario 1	0	0	0	0
Szenario 2	> 0	0	> 0	0
Szenario 3	> 0	> 0*	> 0	$0 > x > 1$
Szenario 4	> 0	> 0	> 0	$0 > x > 1$

Tab. 3.6: Gegenüberstellung der Resultate der additiven und multiplikativen Verknüpfung von struktureller und Entscheidungsautonomie

Beziehungen zu weiteren Akteuren hat, nach Definition eine positive strukturelle Autonomie. In Tabelle 3.6 sind die vier möglichen Kombinationen von struktureller und Entscheidungsautonomie (0/positiv) mit den jeweils bei additiver und multiplikativer Verknüpfung resultierenden Werten dargestellt.

Nachfolgend wird basierend auf einer Klassifikation der Akteure die Eignung der multiplikativen Verknüpfung detailliert geprüft.

3.4.1 Klassifikation von Akteuren

Im Folgenden werden die einzelnen Formen hinsichtlich der Möglichkeiten der Zusammenführung beider Autonomiebewertungen zu einer integrativen Betrachtung Akteursautonomie untersucht. Es wird detailliert geprüft, ob die zuvor motivierte Multiplikation beider Faktoren geeignet ist.

Die Gegenüberstellung der beiden motivierten Autonomieformen (strukturelle und Entscheidungsautonomie) ergibt die vier, in Abbildung 3.9 dargestellten Grundformen von Akteuren in der dezentralen Produktionssteuerung. Dargestellt sind jeweils die strukturelle Autonomie $C_{a,ps}$, die Entscheidungsautonomie $d_{a,ps}$ sowie die durch multiplikative Verknüpfung resultierende tatsächliche Autonomie $R_{a,ps}$. Es wird jeweils darauf eingegangen, ob der betrachtete Akteur aktiv zur Entscheidungsfindung beiträgt und ob er Entscheidungen selbst ausführen kann. Darauf basierend wird begründet, ob der Wertebereich der durch die Multiplikation resultierenden tatsächlichen Autonomie, gerechtfertigt ist.

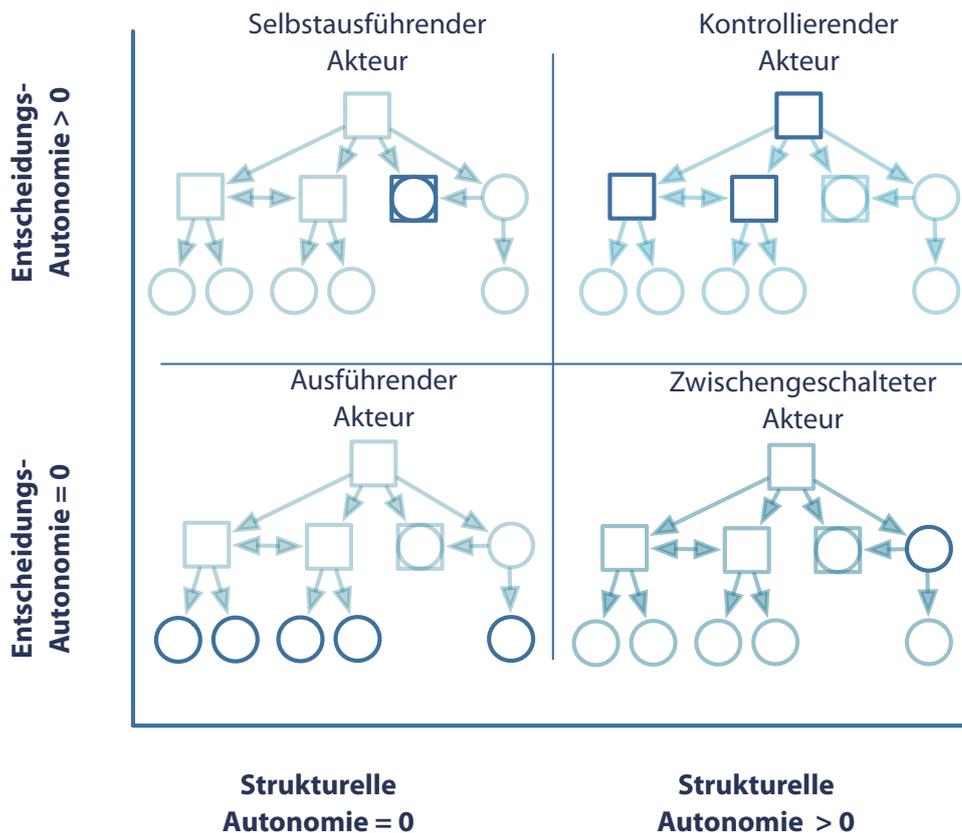


Abb. 3.9: Klassifikation von Akteuren nach struktureller und Entscheidungsautonomie

Ausführender Akteur | $C_{a,ps} = 0, d_{a,ps} = 0, R_{a,ps} = 0$

Beim ausführenden Akteur sind sowohl die strukturelle als auch die Entscheidungsautonomie 0, das heißt, dass er im betrachteten Prozessschritt weder Entscheidungen trifft noch ihm nachfolgende Akteure vorhanden sind. Er führt ausschließlich Anweisungen von anderen Akteuren, die ihm strukturell vorgelagert sind, aus. Damit kann er nicht aktiv zur dezentralen Entscheidungsfindung im Prozessschritt beitragen. Eine Bewertung der zusammengefassten Autonomie mit 0, wie sie auch die Multiplikation der beiden Faktoren ergeben würde, ist daher gerechtfertigt.

Zwischengeschalteter Akteur | $C_{a,ps} > 0, d_{a,ps} = 0, R_{a,ps} = 0$

Der zwischengeschaltete Akteur führt ausschließlich Entscheidungen strukturell vorgelagerter Akteure aus und trifft selbst keine Entscheidungen. Er hat struk-

turell nachgelagerte Akteure, für diese dient er als Trigger: sobald eine Tätigkeit abgeschlossen oder bestimmte, definierte Zwischenergebnisse erreicht sind, beginnt der nachfolgende Akteur. Nachfolgende Akteure können eine beliebige Grundform aufweisen. Da zwischengeschaltete Akteure nicht aktiv zur Entscheidungsfindung beitragen, ist es gerechtfertigt, dass die aus dem Produkt beider Autonomiefaktoren resultierende tatsächliche Autonomie 0 ist.

Selbstaufführender Akteur | $C_{a,ps} = 0, d_{a,ps} > 0, R_{a,ps} > 0$

Selbstaufführende Akteure vereinen die Entscheidungsfindung und die Entscheidungsausführung; sie stellen bezugnehmend auf das Modell aus 3.11 eine Verschmelzung von kontrollierender und ausführender Entität dar. In der Grundform haben selbstaufführende Akteure keinen strukturellen Nachfolger, weshalb dieser Faktor 0 ist. Daher würde bei der Multiplikation ebenfalls ein Nullwert resultieren. Da der selbstaufführende Akteur aktiv an der Entscheidungsfindung des Prozessschrittes beteiligt ist, ist es notwendig, dass diese Akteursform eine positive Bewertung der tatsächlichen Autonomie vorweist. Es gilt daher auch für die strukturelle Autonomie einen positiven Wert zu generieren.

Wie erläutert, stellt diese Akteursform eine Verschmelzung zweier Akteure dar. Wird diese Verschmelzung gedanklich aufgehoben (siehe Abbildung 3.10), hat der kontrollierende Teil genau einen strukturellen Nachfolger und somit eine positive strukturelle Autonomie.

Kontrollierender Akteur | $C_{a,ps} > 0, d_{a,ps} > 0, R_{a,ps} > 0$

Der kontrollierende Akteur trifft selbstständig Entscheidungen, führt diese jedoch nicht selbst aus. Stattdessen gibt es Anweisungen an ihm strukturell nachgelagerte Akteure. Er hat sowohl eine positive strukturelle als auch eine positive Entscheidungsautonomie. Das Produkt beider Werte ist ebenfalls positiv und steigt mit bei steigenden Werten einer der beiden Faktoren.

In der Gesamtbetrachtung muss dabei jedoch berücksichtigt werden, dass ein künstliches Hinzufügen eines weiteren Akteurs Auswirkungen auf die Berechnungen sämtlicher Akteure hat, weil die Anzahl der Akteure Bestandteil der Berechnung ist.

Eine weitere Möglichkeit ist die Interpretation des selbstaufführenden Akteurs als selbstreferenzierend. Für die zugrunde liegende Adjazenzmatrix bedeutet dies

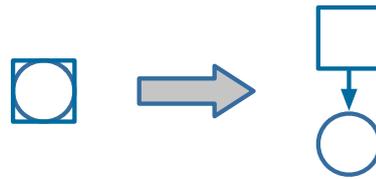


Abb. 3.10: Gedankliche Auflösung des selbstausführenden Akteurs zur Erlangung einer positiven strukturellen Autonomie

einen positiven Wert in der Diagonale. Jedoch berücksichtigt der Harmonic Closeness-Wert die Diagonale nicht. Daher ist es notwendig, eine manuelle Anpassung vorzunehmen. Selbstausführenden Akteuren wird, sofern sie eine nicht-positive strukturelle Autonomie haben, die für den Prozesswert minimal mögliche positive strukturelle Autonomie zugewiesen. Dieser berechnet sich durch

$$C_{a,ps}^{min} = \frac{1}{n-1} \quad (3.4)$$

mit

- $C_{a,ps}^{min}$: Strukturelle Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Anzumerken bleibt, dass auch selbstausführende Akteure eine positive strukturelle Autonomie aufweisen können. Auch in diesem Fall wird die strukturelle Autonomie um den genannten Wert zur Darstellung der Selbstreferenz erhöht. Es ergibt sich die allgemeine Formel für die Berechnung der strukturellen Autonomie selbstausführender Akteuren:

$$C'_{a,ps} = C_{a,ps} + \frac{1}{n-1} + C_{a,ps}^{min} = C_{a,ps} + \frac{1}{n-1} \quad (3.5)$$

mit

- $C'_{a,ps}$: Strukturelle Autonomie vom selbstausführenden Akteur a in Prozessschritt ps
- $C_{a,ps}$: Strukturelle Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Berechnung der tatsächlichen Autonomie

Es wurden die Formeln für die strukturelle und die Entscheidungsautonomie von Akteuren in dezentralen Prozessschritten hergeleitet und die Eignung einer Verknüpfung beider Werte durch Multiplikation begründet. Weiterhin ist festzustellen, dass beide Faktoren einen positiven Einfluss auf die angestrebtem Gesamtwert haben: je höher die strukturelle oder die Entscheidungsautonomie sind, desto höher ist die tatsächliche Autonomie.

Es resultiert die folgende Formel zur Berechnung der tatsächlichen Autonomie von Akteuren in der dezentralen Produktionssteuerung:

$$\begin{aligned}
 R_{a,ps} &= C'_{a,ps} \cdot d_{a,ps} \\
 &= \left(C_{a,ps} + \frac{1}{n_{ps} - 1} \right) \cdot \frac{e_{a,ps}}{\sum_a e_{a,ps}}, a \in A
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

mit

- $R_{a,ps}$: Tatsächliche Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- $C'_{a,ps}$: Strukturelle Autonomie vom selbstauführenden Akteur a in Prozessschritt ps
- $C_{a,ps}$: Strukturelle Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- $d_{a,ps}$: Entscheidungsautonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- $e_{a,ps}$: Anzahl an Entscheidungsalternativen, über die Akteur a in Prozessschritt ps verfügt
- n_{ps} : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt
- A_{ps} : Menge der Akteure a in Prozessschritt ps

3.4.2 Beispielhafte Anwendung

Im Folgenden wird die eben erarbeitete Erweiterung der Berechnung der strukturellen Autonomie anhand von zwei Beispielen veranschaulicht.

Erweiterung um Entscheidungsfähigkeiten

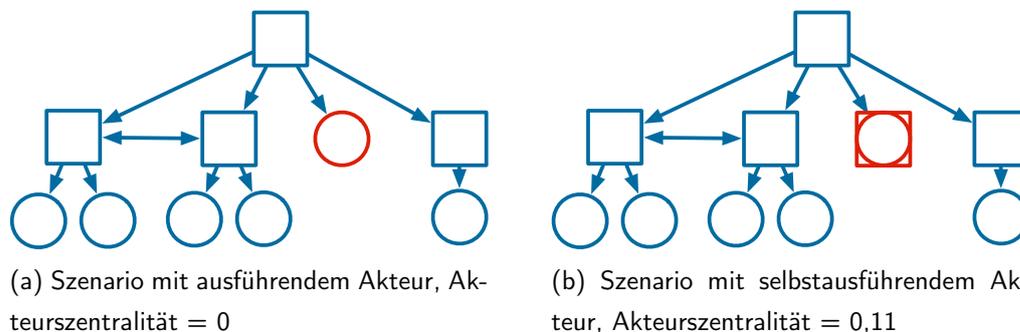


Abb. 3.11: Gegenüberstellung von Szenarien zur Motivation der Berücksichtigung der Entscheidungsautonomie

Abbildung 3.11 fokussiert die Akteursebene. Es sind zwei Szenarien dargestellt, die sich lediglich durch die hervorgehobenen Akteure unterscheiden: der ausführende Akteur auf der linken Seite wird auf der rechten Seite durch einen selbstausführenden Akteuren ersetzt, d. h. dass dieser im betrachteten Prozessschritt nicht mehr nur rein ausführend tätig ist, sondern auch Entscheidungen trifft. Bei einer reinen Zentralitätsbetrachtung würden alle Akteure in beiden Szenarien gleich bewertet werden. Durch die zuvor motivierte Erweiterung wird die strukturelle Autonomie des selbstausführenden Akteurs jedoch positiv:

$$C' = C_{a,ps} + \frac{1}{n-1} = 0 + \frac{1}{10-1} = \frac{1}{9}$$

Integration von Entscheidungsfähigkeiten

In dem in Abbildung 3.12 dargestellten Szenario wird die Ausführung in den entscheidenden Akteuren integriert. Während die Integration bei der Autonomie-Betrachtung für den hervorgehobenen Akteur ohne die vorgestellte Erweiterung eine strukturelle Autonomie von 0 resultiert (es existieren keine ausgehenden Kommunikationsbeziehungen mehr), wird sie durch die Erweiterung positiv.

Dabei unterscheidet sich die strukturelle Autonomie der Akteure in beiden Szenarien, da die Anzahl der Akteure verringert wurde.

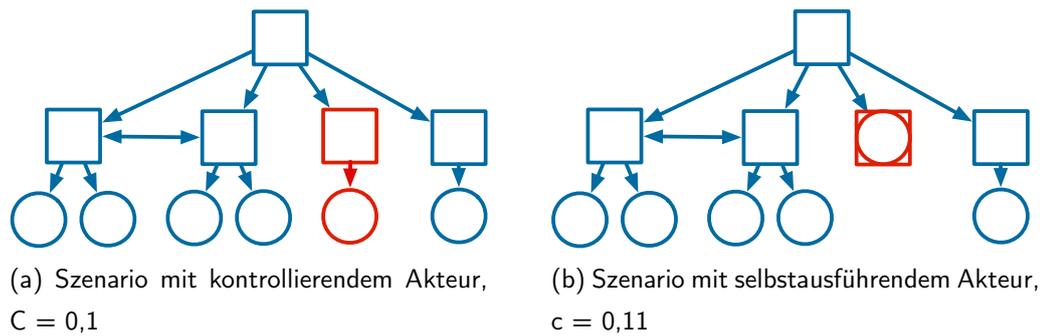


Abb. 3.12: Gegenüberstellung von Szenarien zur Motivation der Berücksichtigung der Entscheidungsautonomie

Die Beispiele verdeutlichen, dass die vorgeschlagene Erweiterung eine Möglichkeit darstellt, um die strukturelle Autonomie selbstausführender Akteure besser berücksichtigen zu können. Dies stellt die Grundlage dar, um im nächsten Schritt einen weiteren Faktor in die Berechnung der Autonomie von Akteuren in der dezentralen Entscheidungsfindung zu integrieren.

3.5 Dezentralität des Prozessschrittes

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Bewertung der Dezentralität von Produktionsprozessen auf Basis der Autonomie von den beteiligten Akteuren. Dafür wird, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, auf die Dezentralität der Prozessschritte zurückgegriffen. Es gilt daher, nachdem die tatsächliche Autonomie $R_{a,ps}$ für jeden am Prozess beteiligten Akteur berechnet wurde, diese Werte im nächsten Schritt zu einem die Dezentralität des Prozessschrittes beschreibenden Kennwert zu aggregieren. Dazu werden Ansätze der sozialen Netzwerkanalyse auf die vorliegende Problemstellung übertragen. Bei der Vorstellung der allgemeinen Ansätze wird auf die Formulierungen der sozialen Netzwerkanalyse zurückgegriffen: der dort verwendete Begriff *Graph* wird in dieser Arbeit als Prozessschritt und *Knoten* als Akteur bezeichnet.

Es werden zunächst zwei Ansätze der Zentralitätsbestimmung von Graphen auf Basis deren Akteurszentralitäten vorgestellt und die Auswahl einer der Ansätze motiviert. Es folgt die Anpassung der mathematischen Formel auf die in dieser Arbeit vorliegenden Bedarfe und deren Erweiterung auf die Ermittlung der Dezentralität.

Bei der Bestimmung von Graph-Zentralitäten existieren zwei grundlegend un-

terschiedliche Ansätze. Die aufeinander aufbauenden Arbeiten bzw. aufeinander beziehenden Veröffentlichungen von Bavelas, Flament, Beauchamp und Sabidussi definieren die Zentralität eines Graphen als dessen Kompaktheit [Bavelas 1950; Beauchamp 1965; Flament 1963; Sabidussi 1966]. Die Zentralität der einzelnen Knoten wird dabei auf Basis der Distanzen zu den anderen Knoten bestimmt, wobei sie je nach Autor zu verschiedenen Werten (Summe aller Distanzen, Anzahl Knoten) in Beziehung gesetzt werden. Die Zentralität eines Graphen wird durch die Summierung der Knotendistanzen (ggf. noch mit einer Normierung auf die Knotenanzahl) ermittelt. Alle Autoren stellen fest, dass ihre Berechnungen für vollständig verbundene und unterrichtete Graphen geeignet sind.

Leavitt, Mackenzie und Nieminen hingegen definieren die Graphzentralität auf der Grundlage der Dominanz eines Punktes [Freeman 1978; Leavitt 1951; Mackenzie 1966; Nieminen 1973, 1974]. Freeman definierte zwei grundlegende Eigenschaften für Zentralitätsbewertungen von Graphen: die Berücksichtigung des Grades, in dem der zentralste Knoten die Zentralität aller anderen Knoten übersteigt und das Verhältnis dieser Überschreitung zu dem theoretisch maximal möglichen Wert dieser Überschreitung.

Darauf bestimmt er die folgende, allgemeine Formel [Freeman 1978]:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n (C_x(p^*) - C_x(p_i))}{\max \sum_{i=1}^n (C_x(p^*) - C_x(p_i))} \quad (3.7)$$

mit

- C_x : Zentralität von Graph x
- $C_x(p^*)$: Maximale Knotenzentralität in Graph x
- $C_x(p_i)$: Knotenzentralität von Knoten i in Graph x
- n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

In seiner Arbeit vergleicht er die Anwendung der Formel für die Zentralitätsmaße Degree, Betweenness und Closeness anhand von den 34 unterscheidbaren, ungerichteten (nicht vollständig verbundenen) Graphen mit fünf Akteuren. Er stellt fest,

dass die Graph-Zentralität für das Extremszenario des Sterns bei allen drei Ansätzen 1 und beim vollständig verbundenen Graphen 0 ergibt. Bei den Zwischenwerten hingegen gibt es deutliche Unterschiede.

In Tabelle 3.7 sind für die beiden Extremszenarien (Zentral/Stern; Konzentration der Entscheidungen auf kontrollierenden Akteur) und (Dezentral/vollständig verbunden; gleichmäßige Verteilung der Entscheidungen auf alle Akteure) in dieser Arbeit motivierten Autonomie-Arten sowie durch deren Multiplikation resultierende tatsächliche Autonomie dargestellt. Im zentralen Szenario kann Akteur 1 alle anderen Akteure als Nachbarn direkt erreichen, während diese über keine ausgehenden strukturellen Beziehungen verfügen. Alle Entscheidungen werden vom zentralen Akteur getroffen. Die Erwartung an die Kennzahl ist, dass dieses Szenario eine Zentralität von 1 hat. Im dezentralen Szenario sind alle Akteure direkt miteinander verbunden, jeder Akteur trifft die gleiche Anzahl von Entscheidungen. Die Erwartung an die Kennzahl ist, dass dieses Szenario eine Zentralität von 0 hat.

Zeile $\#c_{a,ps} > 0$ gibt an, von welcher Anzahl an Akteuren aktiv eine Kommunikation ausgeht, d. h. das sie über eine positive strukturelle Autonomie verfügen. Zeile $\#d_{a,ps} > 0$ gibt an, welche Anzahl an Akteuren am Entscheidungsprozess beteiligt sind, d. h. über eine positive Entscheidungsautonomie verfügen. Es ist erkennbar, dass bei beiden Autonomie-Arten in der dezentralen Produktionssteuerung die Anzahl höher ist als in der zentralen.

In der Zeile *Struktur* ist die Gleichverteilung der tatsächlichen Autonomie der Akteure im Szenario bewertet. Während im zentralen Szenario die Akteure sehr heterogene Ausprägungen haben, sind sie im dezentralen Szenario identisch und die Struktur daher homogen. Der in der vorletzten Zeile aufgeführten *Zentralität nach Freeman* kann entnommen werden, dass die Ergebnisse der Zentralität den definierten Anforderungen entsprechen. Die Anwendung der Formel zur Berechnung der Zentralität von Freeman ist dementsprechend geeignet.

	Zentral				Dezentral			
Akteur	1	2	3	4	1	2	3	4
Strukturelle Autonomie	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Entscheidungsautonomie	1,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25	0,25
Tatsächliche Autonomie	1,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25	0,25
$\#c_{a,ps} > 0$	1				4			
$\#d_{a,ps} > 0$	1				4			
Struktur	Heterogen				Homogen			
Zentralität Freeman	$\frac{3}{3} = 1$				$\frac{0}{3} = 0$			
Dezentralität	$1 - 1 = 0$				$1 - 0 = 1$			

Tab. 3.7: Gegenüberstellung der tatsächlichen Autonomie von Akteuren in einer zentralen und einer dezentralen Struktur

Es ist jedoch eine Anpassung notwendig. Während Freeman ungerichtete Graphen verwendete, werden in dieser Arbeit gerichtete Graphen betrachtet. Daher kann seine Formel für die Berechnung auf Basis der Closeness-Zentralität nicht direkt übernommen werden. Es muss eine Anpassung des Divisors, der die maximal mögliche Summe der Unterschiede zwischen den Zentralitäten der Akteure angibt, vorgenommen werden: Maximale Unterschiede liegen beim Stern vor. Während ein Akteur direkte Verbindungen zu allen anderen Akteuren hat ($\sum d = n - 1$) können alle weiteren Akteure keinen weiteren erreichen ($\sum d = 0$). Die maximal mögliche Distanzsumme ergibt sich somit durch

$$\max \sum_{i=1}^n (C_x(p^*) - C_x(p_i)) = (n - 1) - 0 = n - 1$$

Damit ergibt sich als Formel für die Berechnung der Zentralität von Prozessschritten

$$C_{ps} = \frac{\sum_{a=1}^n (R'_{a,ps} - R_{a,ps})}{n - 1} \quad (3.8)$$

mit

- C_{ps} : Zentralität der Prozessschrittes ps
- $R'_{a,ps}$: Maximale Autonomie in Prozessschritt ps
- $R_{a,ps}$: Tatsächliche Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt

Unter der gegebenen Voraussetzung, dass die berechnete Zentralität im Wertebereich $0 \leq C_{ps} \leq 1$ liegt und der Annahme, dass Zentralität und Dezentralität des Prozessschrittes linear gegenläufig sind (die Summe beider Werte also stets 1 ergibt), ergibt sich die (vorläufige) Formel zur Berechnung der Dezentralität von Prozessschritten

$$D_{ps} = 1 - C_{ps} = 1 - \frac{\sum (R'_{ps} - R_{a,ps})}{n_{ps} - 1} \quad (3.9)$$

mit

- D_{ps} : Dezentralität des Prozessschrittes ps
- C_{ps} : Zentralität der Prozessschrittes ps
- R'_{ps} : Maximale Akteursautonomie in Prozessschritt ps
- $R_{a,ps}$: Tatsächliche Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- n_{ps} : Anzahl der Akteure in Prozessschritt ps

In Abbildung 3.13 sind die Dezentralitätswerte verschiedener Szenarien eines Prozessschrittes mit 40 Akteuren dargestellt. Dabei wird die Entscheidungsfindung gleichverteilt auf eine unterschiedliche Anzahl von Akteuren aufgeteilt (ein Akteur

entscheidet alles – Dezentralität = 0; alle 40 Akteure entscheiden gleich – Dezentralität = 1). Die blaue Kurve stellt die Ergebnisse der Dezentralitätsberechnung gemäß Formel 3.9 dar. Der durch die vorherigen multiplikativen Verknüpfungen resultierende asymptotische Verlauf der Kurve erschwert die Differenzierung der Werte insbesondere bei hohen Dezentralitätswerten. Eine Unterscheidung ist im verwendeten Beispiel erst in der vierten Nachkommastelle des Prozesskennwertes möglich möglich.

Um eine deutlichere Abstufung zu ermöglichen, wird die Formel um eine Wurzel ergänzt (Formel 3.10), wodurch die Werte der grünen Linie resultieren. Da insbesondere bei den Extremwerten 0 und 1 keine Änderungen entstehen und ebenfalls die Reihenfolge der Dezentralitätswerte gleich bleibt, erfüllt die Formel weiterhin die aufgestellten Anforderungen.

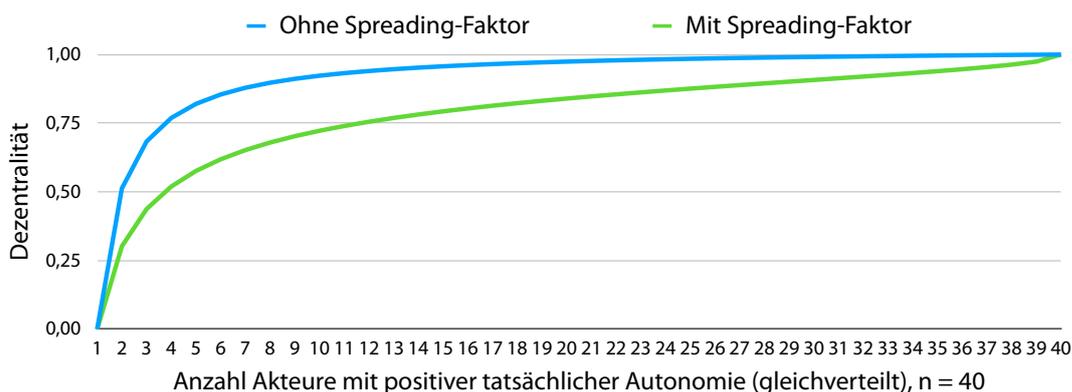


Abb. 3.13: Verwendung eines Korrekturfaktors zum Spreading der Daten

$$D_{ps} = 1 - C_{ps} = 1 - \sqrt{\frac{\Sigma(R'_{a,ps} - R_{a,ps})}{n - 1}} \quad (3.10)$$

mit

D_{ps} : Dezentralität des Prozessschrittes ps

C_{ps} : Zentralität der Prozessschrittes ps

$R'_{a,ps}$: Maximale Autonomie in Prozessschritt ps

$R_{a,ps}$: Tatsächliche Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps

n : Anzahl der Akteure in Prozessschritt ps

Diese Formel ermöglicht die Quantifizierung der Dezentralität des Prozessschrittes als zweite Stufe des Vorgehens aus Abbildung 3.1. Die Berechnung stellt die Grundlage für die zusammenfassende Berechnung einer Prozesskennzahl, die Gegenstand des folgenden Abschnitts ist.

3.6 Dezentralität des Prozesses

Im dritten Schritt werden die zuvor ermittelten Kennwerte für die Dezentralität von Prozessschritten zu einem den Prozess beschreibenden Kennwert kombiniert. Dafür wird der Autonomie Index AI entwickelt. Im Folgenden wird zunächst die grundlegende Idee des Index sowie seine Berechnung erläutert. Der Kennwert ist Bestandteil des erweiterten Wertstromdesigns, die eine verbesserte Dokumentation von dezentral gesteuerten Prozessen ermöglicht [Theuer 2011].

3.6.1 Autonomie Index

Der Autonomie Index ist ein Kennwert, welcher die Dezentralität eines Prozesses auf Basis der Dezentralität der dem Prozess zugehörigen Prozessschritte bestimmt. Er wurde in Anlehnung an den Flussgrad (Lean Index) entwickelt, welcher eine grundlegende Kennzahl der schlanken Produktion ist und die wertschöpfende Zeit eines Prozesses der gesamten Durchlaufzeit eines Produktes durch den Prozess gegenüberstellt [Drees u. Sack 2011; Erlach 2020 S. 102].

Für die Definition des Autonomie Index ist es notwendig, die Basis für den Vergleich zu definieren. Dabei wurden verschiedene Möglichkeiten auf Ihre Anwendbarkeit untersucht:

- Anzahl dezentral gesteuerter Prozesse
- Summe Prozesszeit der dezentral gesteuerten Prozesse
- Summe von durch autonome Akteure übermittelte Datenmenge

Die Analysen haben gezeigt, dass die Anzahl der dezentral gesteuerten Prozesse geeignet ist, um die Autonomie des Prozesses zu charakterisieren. Der Autonomie Index berechnet sich demnach als Quotient der dezentral gesteuerten Prozesse zur gesamten Anzahl der Prozesse (Summe der dezentral und zentral gesteuerten Prozesse).

$$AI = \frac{\sum D_{ps}}{n_{ps}} \quad (3.11)$$

mit

AI : Autonomie Index

D_{ps} : Dezentralität von Prozessschritt ps

n_{ps} : Anzahl Prozessschritt im betrachteten Prozess

Während in den ersten Überlegungen zum Autonomie Index eine binäre Klassifizierung der Prozesse angedacht war (dezentral/zentral) [Gronau u. Theuer 2016; Theuer 2011], fand im Laufe der Forschungsarbeit eine Erweiterung statt. Nun wird ein stetiger Wert zwischen 0 und 1 für die Quantifizierung der Dezentralität des Prozessschrittes zugrunde gelegt, wodurch eine genauere Bewertung der Dezentralität des Prozesses ermöglicht wird. Der Autonomie Index steigt bei steigender Dezentralität der Prozessschritte.

Das im folgenden Unterabschnitt vorgestellte erweiterte Wertstromdesign differenziert Prozesse hinsichtlich ihrer Zentralität/Dezentralität. Dafür ist es notwendig einen Grenzwert festzulegen, ab dem ein Prozessschritt als dezentral eingestuft wird. Dessen Bestimmung muss prozessindividuell erfolgen beruhen. Eine

Möglichkeit bietet die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse bei der die Reaktion der abhängigen Variablen auf Änderungen der Ausgangswerte analysiert wird. Der Schwellwert könnte dabei durch das Maximum der ersten Ableitung der Funktion ermittelt werden.

3.6.2 Erweitertes Wertstromdesign

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde eine Erweiterung des Wertstromdesigns für die Berücksichtigung von Prozessen mit dezentraler Steuerung erarbeitet. Diese soll insbesondere auch eine detaillierte Darstellung und Dokumentation des Informationsflusses ermöglichen. Die Erweiterung besteht aus einer Anpassung der Symbolik zur Visualisierung dezentral gesteuerter Prozesse und eines Data Dictionary zur Dokumentation der relevanten Steuerungsdaten [Gronau et al. 2013b; Lass et al. 2012].

Wertstromdesign (englisch: Value Stream Design (VSD)) beschreibt eine strukturierte, semiformale Methode zur vollständigen Visualisierung von Prozessketten eines Produktionsprozesses mit den zugehörigen Material- und Informationsflüssen [Heinen 2008]. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Darstellung der logistischen Verknüpfungen, welche durch unterschiedliche Symbole dargestellt werden. Hierdurch sind charakteristische Merkmale des Produktionsablaufes schnell zu erkennen [Erlach 2020, S. 7]. Die Methode wurde ursprünglich im Rahmen des Toyota Produktionssystems für die Massenproduktion in der Automobilindustrie entwickelt [Erlach 2020, S. XVI]. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Differenzierung wertschöpfender und nicht wertschöpfender Prozesse. Dadurch wird eine Grundlage für Prozessanalysen im Rahmen der schlanken Produktion, bei denen ein Prozessschritt, welcher dem Produkt keinen Mehrwert zufügt, als Verschwendung angesehen und nach Möglichkeit vermieden wird, geschaffen [Arnold u. Furmans 2007]. Informationsflüsse werden berücksichtigt, allerdings nur auf einem sehr aggregierten Level dargestellt. Die Methode wird direkt auf der Werkstattebene durchgeführt. Ein interdisziplinäres Team geht dabei vom letzten Prozess schrittweise bis zum ersten und nimmt dabei relevante Prozess- und Lagerkennzahlen auf. Durch diese Richtung soll sichergestellt werden, dass der Kunde bzw. der Kundentakt berücksichtigt wird [Erlach 2020, S. 46]. Dieser gibt den theoretischen Zeitraum an, in der die Produkte fertig gestellt werden müssen, um den Kundenbedarf vollständig zu befriedigen. Die Methode wird in unterschiedlichen Fertigungsformen und

Branchen sowie auf verschiedenen Aggregationsebenen (bspw. Produktions- aber auch Supply Chain-Ebene) verwendet [Rother u. Shook 2003].

Erweiterung der Symbolik um den Aspekt der Dezentralität

Bei der Betrachtung (teil-)autonomer Produktionsprozesse ist es notwendig, dass autonome und nicht autonome Prozessschritte unterschieden werden können. Im Sinne des Wertstromdesigns muss daher eine Symbolik geschaffen werden, welche dieses in einer einfachen Art und Weise ermöglicht. Dazu soll auf die vorhandene Symbolik zurückgegriffen und diese erweitert werden. Abbildung 3.14 zeigt die Darstellung eines Prozesses in der Symbolik des Wertstromdesigns. Abbildung stellt die Erweiterung dar. Durch die Markierung in der rechten oberen Ecke des Vierecks wird eine leicht durchführbare Kennzeichnung dezentraler Prozessschritte ermöglicht.

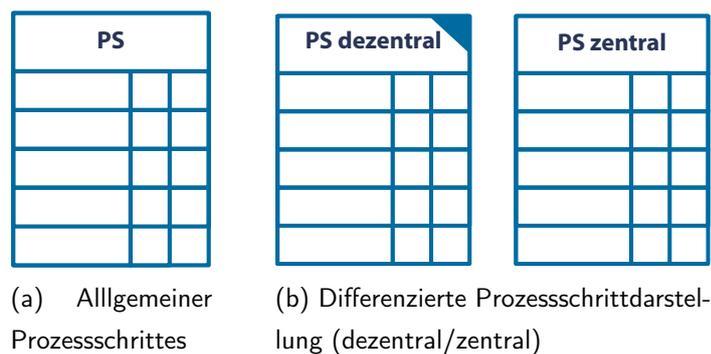


Abb. 3.14: Erweiterte Symbolik des Wertstromdesign um Aspekte der Dezentralität

Data Dictionary mit Merkmalen der dezentralen Prozesssteuerung

Für die Reproduzierbarkeit autonomer Prozesse ist eine Dokumentation aller zur Prozessausführung notwendigen Daten, unabdingbar. Hierzu gehören alle Daten, welche zwischen den unterschiedlichen Produktionsobjekten ausgetauscht werden, als auch diejenigen, welche für die Entscheidungsfindung notwendig sind. Die relevanten Daten können dabei in die drei Oberklassen Prozess-, Informations- und Produktdaten aufgeteilt werden. Prozessschrittdaten sind für jeden einzelnen Prozessschritt spezifisch. Dazu gehören alle Informationen, die für selbstständige Handlungsentscheidungen notwendig sind. Informationsdaten spezifizieren den Datenaustausch (beispielsweise zwischen Produkt und Maschine/Prozess). Sie sind

notwendig, um den informationstechnischen Aufbau der einzelnen Prozesse nachzubilden zu können. Die Klasse der Produktdaten spezifiziert das Produkt, an dem gearbeitet wird. Eine Auswahl möglicher Daten ist in der folgenden Aufzählung dargestellt:

- Prozessschrittdaten
 - Vordefinierte Prozessregeln
 - Rüstzeitmatrix
 - Anzahl verschiedener Produkte, die an dem Prozessschritt bearbeitet werden
 - Ausführungszeit, für jedes Produkt

- Informationsflussdaten
 - Art der Speicherung (zentral (in Datenbank) oder dezentral (am Objekt) Datenspeicherung)
 - Für den Datenaustausch verwendete Technologie
 - Frequenz des Datenaustauschs
 - Datenmenge pro Datenaustausch
 - Mission Critical Index: was passiert, wenn die benötigten Daten nicht vorhanden sind

- Produktdaten
 - Produkttyp
 - Relevanz (z. B. Eilauftrag oder nicht)
 - Geplantes Fertigstellungsdatum
 - Zusatzinformationen

3.6.3 Zusammenfassende Betrachtung

In diesem Kapitel wurde ein Vorgehen zur Bestimmung der Dezentralität von Produktionsprozessen beschrieben. Der den Prozess beschreibenden Wert *Autonomie*

Index wird basierend auf der Dezentralität der Prozessschritte ermittelt. Die *Dezentralität der Prozessschritte* wiederum ist abhängig von der Autonomie der am Prozessschritt beteiligten Akteure. Sie wird über die Anwendung von Freeman's Formular for Centralization bestimmt. Bei der Bewertung der Relevanz der einzelnen Akteure an der dezentralen Entscheidungsfindung mittels der akteursbezogenen *tatsächlichen Autonomie* werden sowohl die Kommunikations- als auch die Entscheidungsstruktur der Akteure berücksichtigt. Für die Bewertung der Kommunikationsstruktur wird dabei der Kennwert Harmonic Closeness, für die Bewertung der Entscheidungsstruktur ein anteiliger Entscheidungsvektor verwendet. Abbildung 3.15 stellt das gesamte Vorgehen graphisch dar. Es ist das wesentliche Artefakt der vorliegenden Dissertationsschrift.

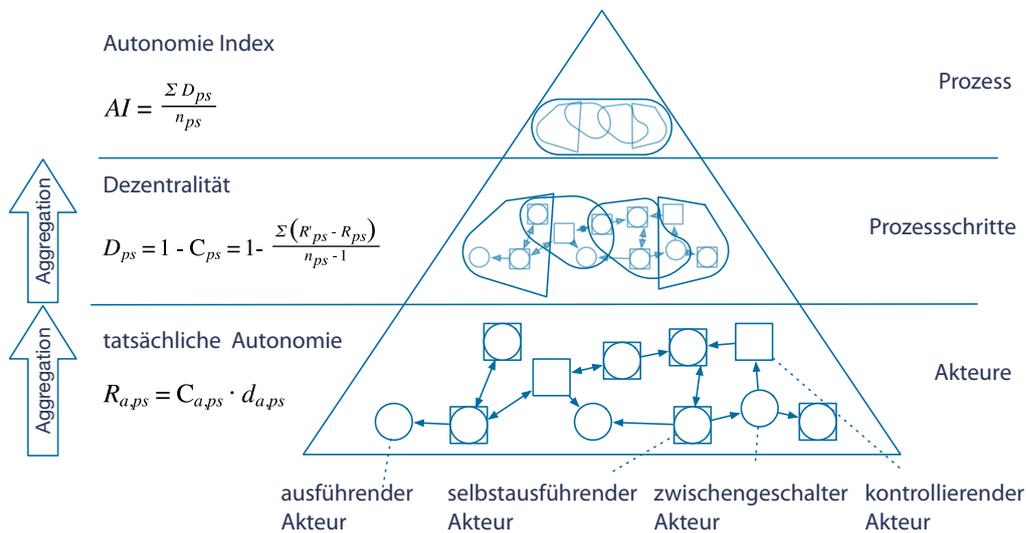


Abb. 3.15: Modell zur Bestimmung der Dezentralität von Prozessen

3.7 Produktionskennzahl zur Nutzenbewertung

Zur Bewertung des Beitrags von Autonomie zur Beherrschung der Komplexität, ist neben der Operationalisierung die Bewertung des Nutzens notwendig. Produktionsprozesse können nach zahlreichen Kriterien bewertet werden. Neben direkt messbaren Werten (Ausführungs- und Rüstzeiten), existieren zahlreiche, aus mehreren Werten berechenbare Kennzahlen. Im VDMA-Einheitsblatt 66412 wurden 22 betriebswirtschaftliche Kennwerte zusammengetragen, welche einen Fokus auf

die Bewertung von Produktionsprozessen setzen [VDMA 2009]. Für die Nutzenbewertung kann kein allgemeiner Kennwert ausgewählt werden. Vielmehr ist es notwendig, dass der Wert den individuellen Anforderungen und Gegebenheiten des zu analysierenden Prozesses gerecht wird.

3.8 Zusammenfassende Betrachtung

Durch die Gegenüberstellung von der Dezentralität des Prozesses und einer das Prozessergebnis bewertenden Produktionskennzahl können Szenarien mit verschiedenem Grad an Dezentralität verglichen und der prozessindividuelle Nutzen der dezentralen Produktionssteuerung ermittelt werden. Wie beschrieben, nimmt die Kommunikations- und Steuerungsstruktur der am Prozess beteiligten Akteure in der dezentralen Produktionssteuerung eine wichtige Rolle ein. Jedoch reicht es durch die Möglichkeit der Integration von Steuerungs- und Ausführungsfähigkeiten nicht länger aus, ausschließlich die strukturellen Beziehungen zur Bestimmung der Dezentralität zu verwenden. Daher wurde ein dreistufiges Vorgehen entwickelt, das zunächst die Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der am Prozessschritt beteiligten, autonomen Akteure quantifiziert und darauf basierend dessen Dezentralität ermittelt. Im dritten Schritt werden die Dezentralitätswerte der Prozessschritte zu dem Prozess beschreibenden Autonomie Index aggregiert. Die Gegenüberstellung mehrerer Tupel von Autonomie Index und Prozesskennzahl ermöglichen die Bewertung des Nutzens der dezentralen Produktionssteuerung für den betrachteten Prozess.

Zunächst wurden die drei Akteursklassen Mensch, Fabriksoftware und betriebliches Anwendungssystem ermittelt und dargelegt, dass deren Instanzen über die notwendigen Fähigkeiten autonomer Akteure (selbstständige Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung, Entscheidungsausführung) verfügen. Die Grundlage des Modells bildet die Analyse der Kommunikationsstruktur dieser Akteure mittels sozialer Netzwerkanalyse. Ausgehend von einer Definition von Dezentralität von Produktionsprozessen wurde nachgewiesen, dass der Kennwert harmonische Closeness für die Operationalisierung der strukturellen Autonomie der einzelnen autonomen Akteure geeignet ist. Durch die Verwendung eines zweiten, die Entscheidungsstruktur beschreibenden Wertes, wird der Möglichkeit der Integration von Steuerungs- und Ausführungsfähigkeiten in einem Akteur Genüge getragen.

Für die Bestimmung der Dezentralität der Prozessschritte wird eine auf gerichtete Beziehungen angepasste Formel für die Zentralitätsberechnung von Graphen nach Freeman verwendet. Die Ermittlung des Autonomie Index erfolgt in Analogie zum Lean Index durch die Gegenüberstellung der vorhandenen zur maximal möglichen Dezentralität.

Kapitel 4

Simulationsgestützte Validierung

Ziel des Kapitels ist die Validierung der Anwendbarkeit des im vorherigen Kapitels erarbeiteten Modells zur Bewertung der Dezentralität von Produktionsprozessen auf Basis der Kommunikationsbeziehungen und Entscheidungsstruktur der beteiligten Akteure. Das Bewertungsmodell wird dafür exemplarisch im Zentrum Industrie 4.0 (siehe Kapitel 4.2) angewendet. Es wurde diese Simulationsumgebung gewählt, da sie über eine hohe Flexibilität hinsichtlich der zu simulierenden Prozesse verfügt und die Integration von Menschen und unterschiedlichen industriellen Technologien ermöglicht. Dadurch kann die Kommunikationsstruktur zwischen den Instanzen der drei Kommunikationsklassen für verschiedene Steuerungsszenarien ermittelt werden.

In diesem Kapitel wird zunächst die Eignung simulationsbasierter Experimente aufgezeigt. Im Anschluss wird die verwendete Simulationsumgebung vor- und der Bezug zu den oben erarbeiteten Akteursklassen sowie deren Instanzen hergestellt. Es folgen die Darstellung des verwendeten Beispielprozesses sowie die Erläuterung der zugehörigen Datenauswertung. Dabei wird insbesondere auf den Aufbau und die Verarbeitung des Kommunikationsprotokolls und der Entscheidungsmatrix eingegangen. Um die Aussagekraft des Modells hinsichtlich der Unterscheidung von zentraler und dezentraler Steuerung zu bewerten, werden zwei Szenarien untersucht: während Kapitel 4.6 die zentrale Steuerung untersucht, betrachtet Kapitel 4.7 ein dezentrales Szenario.

4.1 Grundlagen simulationsbasierter Validierung

In diesem Abschnitt wird die theoretische Grundlage für die nachfolgende simulationsbasierte Validierung des aufgestellten Analysemodells gelegt. Dafür wird zunächst ein Verständnis für den Begriff der Validierung geschaffen und erläutert, warum die Validierung des Modells ein notwendiger Schritt für diese Arbeit darstellt. Im Anschluss daran wird basierend auf der Vorstellung eines Methodenspektrum der Wirtschaftsinformatik die Eignung der Simulation als geeignetes Analyseinstrument motiviert. Es folgt die Darstellung des allgemeinen Vorgehens bei der Durchführung von Simulationsstudien sowie dessen spezifische Anwendung für diese Arbeit.

4.1.1 Validierung

Der Verein Deutscher Ingenieure e.V. definiert Validierung als „...die Prüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original“ [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a]. Dafür ist es notwendig, dass Untersuchungsziel genau zu definieren, um die Modellprüfung problemspezifisch vornehmen zu können [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a]. Dabei nimmt insbesondere auch die Qualität der verwendeten Daten eine wichtige Rolle ein [Rabe et al. 2008, S. 15].

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Übereinstimmung der Ergebnisse des erstellten Bewertungsmodells mit dem originalen, im Zentrum Industrie 4.0 (siehe Kapitel 4.2) dargestellten Prozess überprüft werden. Dafür ist eine vergleichende Anwendung des Modells in verschiedenen Szenarien notwendig: es werden ein zentrales und ein dezentrales Szenario dargestellt und die resultierenden Ergebnisse analysiert. Der Vergleich der Ergebnisse erlaubt es, die Erfüllung der in den Kapiteln 3.2 und 3.3 aufgestellten Anforderungen zu überprüfen und darauf basierend eine Aussage über die Anwendbarkeit des Bewertungsmodells für die in Kapitel 1.1.2 aufgestellte Forschungsfrage zu treffen.

4.1.2 Darlegung der Simulation als geeignete Methode zur Validierung

Die Anpassung der für das Modell relevanten Parameter der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur ist in einer realen Fabrikumgebung nur mit sehr hohem

zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich. Daher ist es erforderlich für die nachfolgende Validierung auf eine geeignete Methode aus dem Methodenspektrum der Wirtschaftsinformatik zurückzugreifen. Schreiner et al. stellen basierend auf der Arbeit von Wilde u. Hess ein Methodenspektrum vor, das zehn Methoden der Wissenschaftsdisziplin Wirtschaftsinformatik beinhaltet [Schreiner et al. 2015; Wilde u. Hess 2007]. Laudon et al. ergänzen das Spektrum mit der Sozialen Netzwerkanalyse um eine elfte Methode [Laudon et al. 2015] (siehe auch 1.1).

Davon eignen sich die Simulation und das Laborexperiment für die Anwendung in dieser Arbeit am besten, da beide die gezielte Manipulation von Parametern in einem Modell bzw. einer kontrollierten Umgebung zum Gegenstand haben [Laudon et al. 2015]. Bei der Simulation werden das Verhalten des zu untersuchenden Systems in einem formalen System und die Umweltzustände durch Belegung der Modellparameter abgebildet [Wilde u. Hess 2007]. Während Wilde u. Hess den Erkenntnisgewinn sowohl auf der Modellkonstruktion als auch durch die Beobachtungen der resultierenden Modellgrößen beziehen [Wilde u. Hess 2007], fokussieren Gilbert u. Troitzsch bei der Simulation das Experimentieren mit dem Modell an sich [Gilbert u. Troitzsch 2005]. Damit grenzen sie die Methode vom Experiment ab, bei der der Fokus auf der Untersuchung von Kausalzusammenhängen liegt und der Forschungsgegenstand kontrolliert wird.

Die Manipulation von Parametern ist insofern notwendig, dass nur so eine vergleichende Betrachtung der Modellergebnisse ermöglicht und darauf basierend eine Aussage hinsichtlich der Gültigkeit des erarbeiteten Modells getroffen werden kann. Die kontrollierte Umgebung ist aufgrund der Unverhältnismäßigkeit des hohen Aufwandes bei Umsetzung verschiedener Steuerungskonzepte in einem realen Produktionssystem erforderlich. Beide Methoden haben gemäß des von Schreiner et al. aufgestellten Methodenprofils einen hohen Formalisierungsgrad. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrem Paradigma: während Laborexperimente verhaltenswissenschaftlich geprägt und der Modellklasse der empirischen Methoden zuzuordnen sind, hat die Simulation einen konstruktiven Fokus [Schreiner et al. 2015] und befindet sich gemeinsam mit der formal-deduktiven Methode im Bereich der formal-analytischen Modellklasse. Der Auswertungsfokus dieser Arbeit liegt im konstruktiven Bereich, weshalb nachfolgend die Simulation zur Validierung verwendet wird.

Abzugrenzen von der inhaltlichen Trennung der beiden erläuterten Methoden ist die in der VDI-Richtlinie 3633 verwendete Begriffskombination. So werden dort

Simulationsexperimente mit mehreren Simulationsläufen definiert, bei denen durch die systematische Variation von Modellparametern, Ablaufregeln und Anfangszuständen unterschiedliche Ergebnisse erzielt und eine vergleichende Bewertung ermöglicht werden [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2013]. Der Begriff des Experimentes ist hier also nicht als eigenständige Methode, sondern als ein Teil einer Simulation anzusehen, welcher sich von einem anderen Experiment durch einen anderen Betrachtungsfokus und damit variierender Parameter bei gleichbleibendem Simulationsmodell unterscheidet. Nachfolgend wird das Vorgehen zur Durchführung einer Simulationsstudie basierend auf der DIN 3633, Blatt 1 erläutert und für die konkrete Durchführung dieser Arbeit angewendet.

4.1.3 Allgemeines Vorgehen bei einer Simulationsstudie

Im Blatt 1 der VDI-Richtlinie 3633 wird für die Ausführung einer Simulationsstudie ein dreiphasiges Vorgehen (Vorbereitung, Durchführung, Auswertung) mit insgesamt sechs, teilweise iterativ rückgekoppelten Aufgaben sowie vor- und nachgelagerten Fragestellungen vorgestellt [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a]. Nachfolgend wird das allgemeine Vorgehen erläutert und im Anschluss die Anwendung auf die in dieser Arbeit durchgeführte Simulationsstudie angewendet. Das Vorgehen ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Im ersten Schritt der ersten Phase (Vorbereitung) wird die Simulationswürdigkeit der Problemstellung bewertet. Als Kriterien werden u. a. das Kosten-Nutzenverhältnis, die Komplexität des Problems und die wiederholte Verwendung des Simulationsmodells berücksichtigt. Bei einer positiven Bewertung müssen im nächsten Schritt die Aufgabe und das Ziel der Simulationsstudie formuliert und der durch die Durchführung resultierende Aufwand abgeschätzt werden [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008b]. Für den nun folgenden Aufbau der Simulationsdatenbasis ist die Ermittlung, Aufbereitung und Abstimmung der für die Simulation relevanten Daten notwendig. Berücksichtigt werden müssen insbesondere die Beschreibung relevanter Systemkomponenten sowie Zustandsveränderungen [Nedeß et al. 2008]. Der Umfang und der festzulegende Erfassungszeitraum hängen dabei maßgeblich von der Komplexität des zu simulierenden Prozesses ab. Im nächsten Schritt wird – basierend auf einem existierenden oder gedachten Systems – ein experimentelles, statisches Modell als Basis für das Simulationsmodell geschaffen. Dabei werden durch eine tiefgehende Analyse des betrachteten Systems sowie des-

4.1 Grundlagen simulationsbasierter Validierung

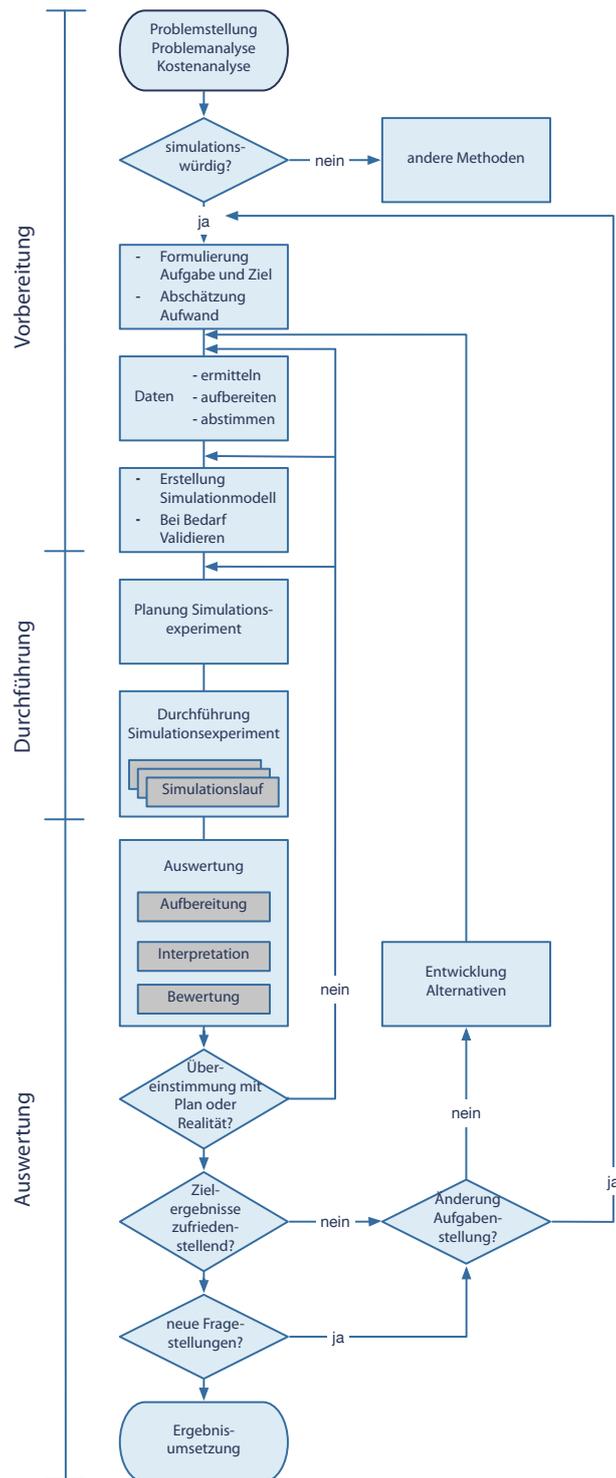


Abb. 4.1: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a,b]

sen Abstraktion die drei allgemeinen Merkmale eines Modells nach Stachowiak Verkürzungsmerkmal, Abbildungsmerkmal und pragmatisches Merkmal [Stachowiak 1980] fokussiert. Es ist notwendig, einen angemessenen Grad an Abstraktion zu wählen, da mit einer Erhöhung des Detaillierungsgrades häufig auch die Fehleranfälligkeit sowie der Validierungsaufwand steigen [Prinz 2003]. Für die Strukturierung wird dabei ein methodisches Vorgehen mit den aufeinander aufbauenden Schritten Festlegung des Systems, Festlegung der Aufbaustruktur des Systems und Festlegung der Ablaufstruktur des Systems vorgeschlagen [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a]. Die Ablauforganisation umfasst neben der Berücksichtigung externer Einflussgrößen wie politische und rechtliche Normen, interne Einflussfaktoren zu denen die Struktur des Planungs- und des Informationssystems und damit verbunden auch die Auslegung der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur gehören [Balzer et al. 2020; Pfohl 2021]. Diese erste Modellierungsstufe wird im Weiteren durch die Verwendung geeigneter, auf Modellierungskonzepten beruhenden Beschreibungsmethoden entweder mittels einer Programmiersprache oder durch die Verwendung der Modellwelt eines Simulators in ein simulationsfähiges, dynamisches Modell der zweiten Modellierungsstufe überführt [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008b]. Um später belastbare Ergebnisse mit der Simulation erreichen zu können, ist eine Validierung des Modells sowie der für seine Erstellung erhobenen Daten notwendig [Rabe et al. 2008, S. 15]. Dabei wird eine ausreichende Qualität des Simulationsmodells – in der Regel über eine hinreichende Übereinstimmung von Modell und Original – nachgewiesen [Barth et al. 2021]. Während bei der Simulation bestehender Modelle ein Abgleich von Ist-Daten des Originals mit den Simulationsdaten zweckmäßig ist, muss bei der Simulation von Neuplanungen insbesondere auf Erfahrungen der an der Validierung beteiligten Verantwortlichen zurückgegriffen werden. Mit der Validierung schließt die erste Phase ab [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008b].

In der zweiten Phase wird ein Simulationsexperiment, gegebenenfalls mit mehreren Simulationsläufen [Wenzel 2018], durchgeführt. Ein Simulationslauf entspricht „... der Nachbildung des Verhaltens eines Systems mit einem spezifizierten ablauffähigen Modell über einen bestimmten Zeitraum“ [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008b, S. 2]. Das Simulationsexperiment dient laut Definition vom Verein Deutscher Ingenieure e.V. „... der gezielten empirischen Untersuchung des Modellverhaltens über einen bestimmten Zeitraum durch wiederholte Simulationsläufe mit

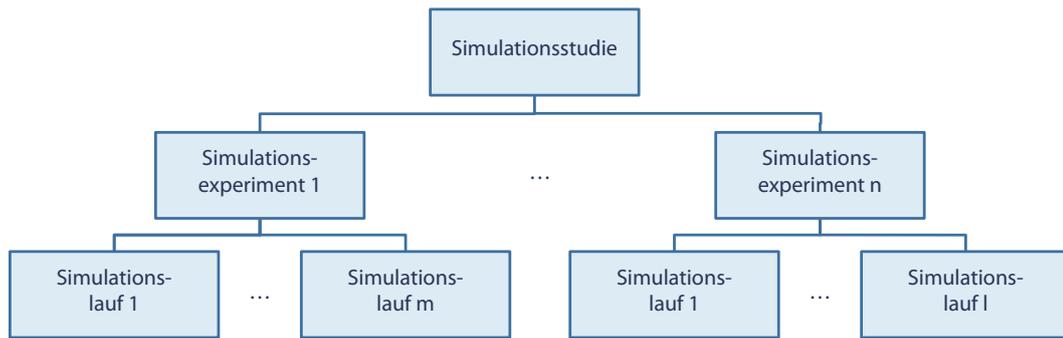


Abb. 4.2: Struktureller Aufbau einer Simulationsstudie [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a]

systematischen Parametervariationen“ [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008b, S. 2]. Eine Simulationsstudie kann sich aus mehreren Simulationsexperimenten zusammensetzen, sofern in der Analysephase die Notwendigkeit der Anpassung des Modells ermittelt wird. Dementsprechend ergibt sich der in Abbildung 4.2 strukturelle Aufbau einer Simulationsstudie.

An die Phase der Durchführung schließt die Auswertung an, die aus der Analyse sowie mehreren darauf basierenden Fragestellungen, die zu Rücksprüngen im Vorgehensmodell führen können, besteht. Für die Analyse werden die während der Simulationsläufe aufgenommenen Daten zunächst in ein geeignetes Format aufbereitet [Ritzschke u. Wiedemann 1998]. Dazu werden die Daten während des Simulationslaufs protokolliert oder direkt vorverdichtet und in Abhängigkeit der Aufgabenstellung weiter analytisch oder visuell aufbereitet. Die aufbereiteten Daten dienen als Grundlage für die Interpretation, wobei insbesondere auch durch den Vergleich der Ergebnisse der Simulationsstudie Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Parameterveränderungen gezogen werden können (bspw. durch Sensitivitätsanalysen) [Gronau 2017, S. 294 f]. Die Einbindung von Experimentalplanung und -auswertung in die allgemeine Vorgehensweise bei der Simulation ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Analyse schließt mit der Bewertung der Interpretation ab. Daran anschließend erfolgt eine Überprüfung der Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem Plan oder der Realität, eine Bewertung der Zufriedenheit mit den Zielergebnissen sowie die Entscheidung, ob weitere Fragestellungen mit dem vorhandenen Simulationsmodell untersucht werden sollen. Die Ergebnisse der Prüfungen können zu der Notwendigkeit von Rücksprüngen innerhalb des Vorgehensmodells führen.

Das Vorgehensmodell schließt mit der Ergebnisumsetzung ab [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a].

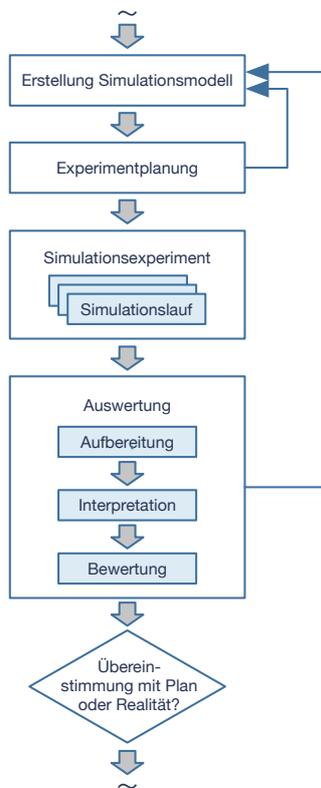


Abb. 4.3: Experimentplanung und Auswertung in einer Simulationsstudie (Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008b)

4.1.4 Anwendungsbezogenes Vorgehen bei einer Simulationsstudie

Basierend auf der Beschreibung des allgemeinen Vorgehens bei der Durchführung einer Simulationsstudie im vorherigen Abschnitt wird dessen Anwendung für die durchgeführte Simulationsstudie erläutert.

Prüfung Simulationswürdigkeit Die Simulationswürdigkeit lässt sich insbesondere durch ein im Vergleich zum realen Produktionsprozess deutlich günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis begründen. Während im realen Produktionsprozess weitreichende organisatorische und technische Anpassungen notwendig sind und somit

ein hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand entsteht, kann bei der Simulation auf die bestehende Simulationsumgebung und ein validiertes Modell im Zentrum Industrie 4.0 zurückgegriffen werden. Der erhöhte Aufwand für die Untersuchung der Zielstellung in einer realen Produktionsumgebung wäre nicht verhältnismäßig. Zudem bietet er für die Beantwortung der zu untersuchenden Zielsetzung keinen wesentlichen Mehrwert.

Zielformulierung Das Ziel der Simulationsstudie ist die Untersuchung der Anwendbarkeit des in Kapitel 3 vorgestellten Modells zur Bestimmung der Dezentralität von Produktionsprozessen basierend auf der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der beteiligten autonomen Akteure.

Aufwandsabschätzung Der Aufwand für die Erstellung des Simulationsmodells ist aufgrund der Wiederverwendung der bestehenden, validierten Simulationsumgebung als adäquat einzustufen.

Datenermittlung Eine Datenermittlung ist nicht notwendig, da auf ein fertiges Modell (siehe Beschreibung des Beispielprozesses in Abschnitt 4.3) zurückgegriffen werden kann.

Erstellung und Validierung des Simulationsmodells Es muss kein Simulationsmodell erstellt werden, da auf ein fertiges Modell zurückgegriffen werden kann.

Planung des Simulationsexperiments Relevant ist die Entscheidung über die Anzahl und Ausgestaltung der Simulationsstudien inkl. der zu variierenden Parameter und deren Belegung. Um die Zielsetzung bewerten zu können, ist die Durchführung von zwei Simulationsexperimenten notwendig: in einem Experiment wird eine zentrale Steuerung verwendet, in dem anderen eine dezentrale. Bei der zentralen Steuerung werden strikte hierarchische Kommunikationsbeziehungen und Entscheidungs- und Weisungsbefugnisse ausgehend von der zentralen Steuerungseinheit (Control Center) vorgegeben. Im zweiten Simulationsexperiment sollten diese Beschränkungen aufgehoben und durch die Akteure frei wählbare Kommunikationsbeziehungen sowie eine hohe Entscheidungsfähigkeit aller Akteure ersetzt

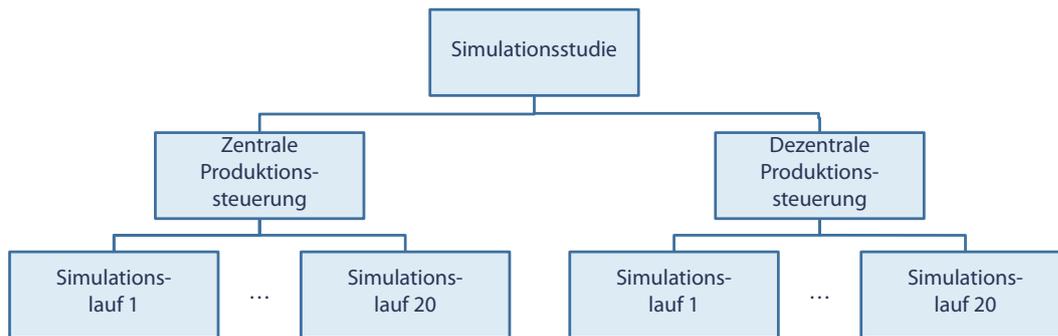


Abb. 4.4: Struktureller Aufbau der durchzuführenden Simulationsstudie [in Anlehnung an Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a]

werden. Jedes Simulationsexperiment soll aus 20 Simulationenläufen bestehen, um so Auswirkungen, die durch unterschiedliches Verhalten der beteiligten menschlichen Akteure berücksichtigen zu können. Dabei sollen um eine Beeinflussung der Simulationsergebnisse durch Lerneffekte zu vermeiden die Simulationsteilnehmer variiert werden. Der strukturelle Aufbau der verwendeten Simulationsstudie ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Auswertung Die Kommunikationsbeziehungen zwischen den Akteuren werden automatisch in einer Datenbank gespeichert und die Anzahl der Entscheidungsalternativen je Akteur und Prozessschritt in einer csv-Datei hinterlegt (siehe auch Abbildung 4.7). Beide Einflussgrößen werden in R importiert und die jeweiligen Autonomie-Arten sowie die daraus resultierenden Kennwerte ermittelt und ausgegeben. Zusätzlich werden Plots für Kommunikationsstrukturen der einzelnen Prozessschritte erzeugt. Als Prozesskennzahl wird die Durchlaufzeit für beide Werkstückträger manuell im Prozess ermittelt. Die Ergebnisse der Simulationenläufe werden zunächst zu Kennwerten für die jeweilige Simulationsstudie konsolidiert. Die resultierenden Autonomie Index-Werte bilden im Anschluss die Grundlage zur Validierung des aufgestellten Analysemodells. Der Vergleich der Prozesskennzahlen lässt eine Bewertung des Nutzens von dezentraler Produktionssteuerung für den simulierten Prozess zu. Die Beschreibung des Vorgehens zur Auswertung des Simulationsexperimentes ist Gegenstand von Abschnitt 4.5.

4.2 Vorstellung Simulationsumgebung

Die Simulation wird im Zentrum Industrie 4.0 in Potsdam durchgeführt. Die dort verfügbare hybride Simulationsumgebung vereint Vorteile der physischen Modellfabrik (Anschaulichkeit) und der computerorientierten Simulation (Flexibilität hinsichtlich des zu simulierenden Prozesses) durch eine Kombination aus physischen und virtuellen Komponenten [Gronau u. Theuer 2011]. Die Idee zu dieser Simulationsumgebung wurde im Technologieprogramm AUTONOMIK [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie o Da] im Rahmen des Forschungsprojektes *Leistungsfähigkeitsbeurteilung unabhängiger Produktionsobjekte (LUPO)* [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie o Db] entwickelt und durch Lass umgesetzt [Lass 2017]. Er definierte sechs für die Modellierung von Produktionsszenarien grundsätzliche Elementklassen [Lass 2017], welche im Rahmen dieser Arbeit um die Elementklasse *Mobile Devices* ergänzt wurden. Zudem wurde die Klasse AutoID-Geräte in der übergeordneten Klasse Sensorik aufgelöst.

- *Demonstratoren* in Form mobiler und stationärer Cubes
- *Materialflusssystem* durch konfigurierbares Transportsystem zur Bewegung der mobilen Cubes und verschiedene Varianten von Pufferelementen
- *Betriebliche Anwendungssysteme* als MES mit Terminals zur Betriebsdatenerfassung
- *Handhabungsgeräte* in Form von Industrierobotern inklusive typspezifischer Steuerung
- *Sensorik* zur visuellen und akustischen Aufnahme der Umgebung, inkl. AutoID-Geräten
- *Interaktionspartner Mensch* als Werker (Handarbeitsplatz) und Maschinenbediener
- *Mobile Devices* zur unterstützenden mobilen Datenaufnahme und -eingabe durch den Interaktionspartner Mensch

Die *Demonstratoren* bilden sämtliche am Prozess beteiligten Maschinen/Anlagen sowie Werkstückträger ab. Unterschieden werden mobile, welche einen Ladungsträger bzw. ein Halbzeug abbilden, und stationäre Cubes, welche für die

Abbildung von Maschinen oder Anlagen verwendet werden. Diese Cubes sind physische Quader, in denen Rechen- und Speicherkapazitäten verbaut sind. Diese ermöglichen die Datenerfassung und -verarbeitung und Interaktion mit der Umwelt.

Über *Kommunikationstechnik* können die Cubes mit weiteren Instanzen der technischen (nicht-menschlichen) Akteursklassen (Fabriksoftware und Betriebliche Anwendungssoftware) kommunizieren. Die an den Seiten angebrachten Bildschirme visualisieren die Prozessschritte als Standbild oder Video und ermöglichen so die Durchführung spezifischer Aufgaben durch den Meister oder den Auszubildenden wie beispielsweise die Wartung. Zudem erhöhen sie die Immersion des Nutzers hinsichtlich des simulierten Prozesses und damit auch dessen Akzeptanz. Auf der Oberseite eines jeden Cubes ist ein Touchscreen integriert. Dieser ermöglicht dem Nutzer die dem Simulationslauf vorgelagerte Konfiguration (beispielsweise Festlegung, welche Maschine in welcher Ausprägung dargestellt werden soll) als auch die Maschinenbedienung während der Simulation. Zudem werden darüber relevante Produkt-, Prozess- und Auftragsinformationen in Form eines Dashboards dargestellt.

Der *physische Materialfluss* ist über eine Rollenbahn realisiert, welche aus 14 Modulen, die in fünf einzeln ansteuerbare Segmente unterteilt sind, besteht [Lass u. Gronau 2020]. Sie transportiert die mobilen Cubes innerhalb der Simulationsumgebung zwischen den verschiedenen Bearbeitungsschritten. Dabei suchen sie sich selbstständig über die Kommunikation mit der Transportanlage, den stationären und den weiteren im Prozess befindlichen mobilen Cubes einen geeigneten Weg. Dabei werden insbesondere auch Blockierungen durch andere, wartende mobile Cubes erkannt und sofern möglich, durch eine alternative Route umfahren. Sobald ein mobiler Cube in einen stationären Cube eingefahren ist, findet automatisch dessen Anmeldung statt. Der Prozessstart kann je nach Konfiguration automatisch oder manuell erfolgen. Abbildung 4.5 zeigt eine Prinzipskizze der eben erläuterten Elemente.

Betriebliche Anwendungssysteme werden im Zentrum Industrie 4.0 als zentrale Fertigungseinheit insbesondere mit den Aufgaben eines MES verwendet.

Die Simulationsanlage kann bzgl. der Rolle des eingesetzten Anwendungssystems flexibel konfiguriert werden: von einer vollständigen Einbindung des Systems mit der kompletten Übernahme der Entscheidungs- und Steuerungsaktivitäten (zentrales Szenario) bis hin zur ausschließlichen Auftragsfreigabe durch

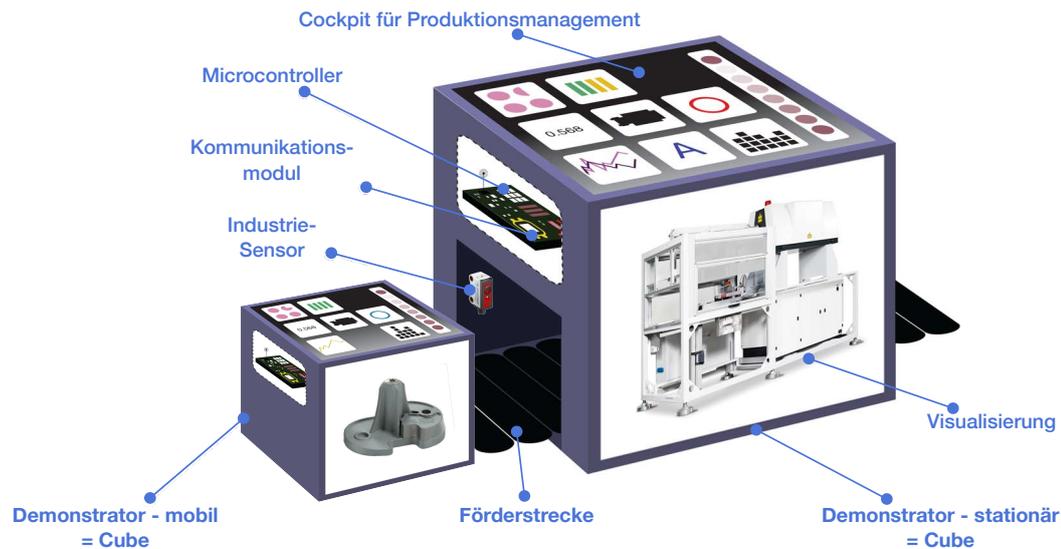


Abb. 4.5: Prinzipskizze des stationären und des mobilen Cubes sowie ihrer physischen Verbindung durch eine Rollenbahn (Lass 2017, S. 141)

das System und einer vollständigen Übertragung der Entscheidungs- und Steuerungsaktivitäten auf die dezentralen Entitäten (dezentrales Szenario).

In den Simulationsprozess können in Abhängigkeit des darzustellenden Prozesses sowie der Verfügbarkeit verschiedene Industrieroboter (im Simulationsexperiment wird ein Mitsubishi RV-6SDL verwendet) eingebunden werden, welche unter dem Begriff *Handhabungsgeräte* subsumiert werden. Die Einbindung unterschiedlicher, typspezifischer Steuerungen ist durch industrie-typische Schnittstellen, wie beispielsweise Ethernet-basierte Feldbussysteme, möglich.

Im Rahmen der Simulationsläufe werden zwei Ebenen unterschieden: die *Simulationsbetriebsebene* und die *Simulationsebene*. Während die Simulationsbetriebsebene die physischen Eigenschaften der Demonstratoren nachbildet und deren Steuerung dient, bildet die Simulationsebene die physischen Eigenschaften der Maschinen da und dient deren Steuerung [Lass 2017, S. 135ff.].

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 dargelegt, wird der Mensch auch in cyber-physischen Produktionssystemen eine wichtige Rolle innehaben. Daher ist es unverzichtbar, dass die Simulationsumgebung eine aktive Integration des Interaktionspartners Mensch ermöglicht. Durch die Verwendung mobiler Ein- und Ausgabegeräte (beispielsweise Tablets, Smart Glasses oder Smart Watches) AutoID-Geräten sowie über die Eingabe an den Bedienoberflächen der Demonstratoren ist ein menschl-

cher Eingriff in den Prozess möglich. Eine Informationsaufnahme kann sowohl optische (Dashboards, Visualisierung des Prozesses und Statusanzeige auf den Seitenbildschirmen der Demonstratoren, Beobachtung des Prozesses) als auch akustisch über eingespielte Signale erfolgen. Da der Auswertungsfokus der Simulation auf den Auswirkungen durch eine Veränderung der Entscheidungsfindung liegt, sollen Parameter, die hierdurch nicht beeinflussbar sind, minimiert und gleiche Randbedingungen geschaffen werden (*ceteris paribus*). Es besteht daher die Möglichkeit, dass die menschliche Interaktion durch den Computer gescriptet wird, um so die Beeinflussung des Prozessergebnisses durch variierendes Verhalten menschlicher Prozessbeteiligter zu verringern. Zudem übernehmen Roboter in der Simulation neben realen Roboterarbeitsplätzen auch menschliche Aufgaben. Ziel ist dabei nicht der Ersatz der menschlichen Arbeitskraft, sondern eine hohe Reproduzierbarkeit von Simulationsergebnissen durch eine geringe Varianz in der Prozessausführung (Dauer, Qualität) durch den Menschen.

Für die Aufnahme von Objekteigenschaften und (physikalischen) Prozessparametern können *Sensoren* zur Umgebungswahrnehmung in den Prozess eingebunden werden. Die Auswertung der erhobenen Daten kann eine wichtige Grundlage für die Prozessanpassung darstellen.

Bezüglich der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Akteursklassen, ergibt sich die folgende Zuordnung der vorgestellten Elemente.

- **Mensch:** Interaktionspartner Mensch, Scripted Worker
- **Betriebliches Anwendungssystem:** Betriebliche Anwendungssysteme
- **Fabriksoftware:** Demonstratoren, Materialfluss, Handhabungsgeräte, Sensorik, Mobile Devices

Interaktionspartner der Instanzen der Akteursklasse Mensch ist vorrangig die Betriebssoftware der Geräte, da mit dem hybriden Konzept Freiheitsgrade bei der Modellierung hinsichtlich virtueller oder realer Implementierung bestehen. Alle notwendigen Elemente sind in der Modellebene der Simulationsumgebung umgesetzt.

4.3 Vorstellung Beispielprozess

Für die Anwendung des im vorherigen Kapitels vorgestellten Analyse-Konzeptes wird ein Prozess zur Herstellung optischer Linsen verwendet. Dieser wurde 2018

bei einem Schweizer Linsenhersteller aufgenommen. Der Modellprozess umfasst die vier Prozessschritte: Schleifen, Beschriftung, Färberei und Qualitätskontrolle. Der erste Prozessschritt kann auf zwei parallelen Maschinen durchgeführt werden. Bild 4.6 stellt den Prozess als Wertstromdiagramm dar. Angegeben ist jeweils die für die Modellierung gewählten Bearbeitungsdauer sowie die Anzahl im Prozessschritt getroffener Entscheidungen. Auf die Ermittlung der Entscheidungen wird in Kapitel 4.5.2 eingegangen.

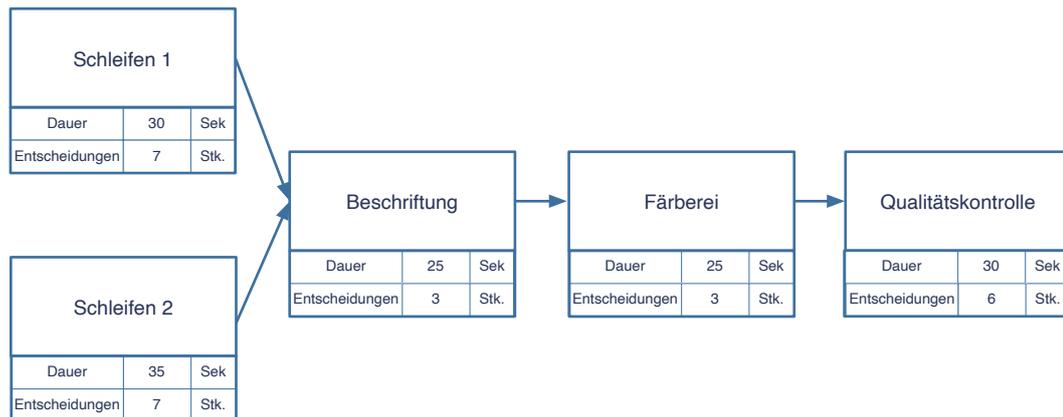


Abb. 4.6: Wertstromdiagramm des verwendeten Beispielprozesses

Die folgenden Instanzen sind – nach Akteursklassen klassifiziert – am Prozess beteiligt:

- Mensch
 - **Azubi**: Menschlicher Akteur, welcher eine Anzahl an Aktivitäten im Prozess durchführt. Kann Maschinen bedienen und am Tablet Informationen erhalten sowie Eingaben tätigen.
 - **Meister**: Menschlicher Akteur, welcher eine Anzahl an Aktivitäten im Prozess durchführt. Kann Maschinen bedienen und am Tablet Informationen erhalten sowie Eingaben tätigen. Kann Aufgaben an den Azubi delegieren. Kann Freigaben für Prozessveränderungen oder Maschinenkonfigurationen erteilen.

- Fabriksoftware
 - **Beschriftungsroboter**: Roboter, der für die Durchführung des Prozessschrittes, bei dem die Linsen mittels Laser beschriftet werden, verantwortlich ist.
 - **Brille**: Mobile Datenbrille (Augmented Reality), über der dem Nutzer Wartungsanweisungen angezeigt werden können.
 - **Färbereimaschine**: Maschine, die für die Durchführung des optionalen Prozessschrittes, bei dem die Oberflächen der Linsen gemäß des Fertigungsauftrages behandelt (Härten, Anti-Reflex) werden, verantwortlich ist.
 - **Qualitätsprüfplatz**: Arbeitsstation, an der die für die Prüfung der Einhaltung der an das Produkt gestellten Anforderungen, notwendigen Prozessschritte durchgeführt werden.
 - **Schleifmaschine 1**: Maschine, die für die Durchführung des Schleifens der Linsen, verantwortlich ist. Diese Maschine ist äquivalent zu Schleifmaschine 2.
 - **Schleifmaschine 2**: Maschine, die für die Durchführung des Schleifens der Linsen, verantwortlich ist. Diese Maschine ist äquivalent zu Schleifmaschine 1.
 - **Werkstückträger**: Werkstückträger, auf dem sich ein Los mit Linsen (Werkstück) befindet.
 - **TabletAzubi**: Tablet, über das dem Azubi mobil Prozessinformationen bereit gestellt werden und über das gewisse Aufgaben angestoßen werden können. Es wird ergänzend zur Entscheidungsfindung verwendet.
 - **TabletMeister**: Tablet, über das dem Meister mobil Prozessinformationen bereit gestellt werden und über das gewisse Aufgaben angestoßen werden können; Aufgaben können auch an den Azubi delegiert werden.
 - **TabletAzubi**: Tablet, über das dem Azubi mobil Prozessinformationen bereit gestellt werden und über das gewisse Aufgaben angestoßen werden können. Es wird ergänzend zur Entscheidungsfindung verwendet.

- **Transportanlage:** Physische Rollenbahn, über das die Werkstückträger zwischen den verschiedenen, am Prozess beteiligten Maschinen befördert wird.
- Betriebliches Anwendungssystem
 - **Control Center:** Zentrale Datenplattform, die als Fertigungssteuerungssystem gewisse Entscheidungsprozesse verantwortet. Das Control Center übernimmt die wesentlichen Aufgaben eines MES.

Der betrachtete Prozess startet mit dem Regelbetrieb der Herstellung der Linsen. Dabei wird ein Los der Linsen auf einem Werkstückträger transportiert. Nach kurzer Zeit wird ein Eilauftrag eingesteuert. Ziel ist, dass der Eilauftrag in der geforderten Zeit von 2 Minuten und 15 Sekunden gefertigt wird. Gleichzeitig soll der Regelbetrieb mit einer möglichst geringen Durchlaufzeit produziert werden. Es werden zwei Szenarien simuliert. Beim ersten Szenario wird die Entscheidungsfindung in großen Teilen von dem Control Center übernommen; im Anschluss werden die Steuerungsbefehle an die anderen Akteure weitergegeben. Die Entscheidungsfindung im zweiten Szenario findet dezentral durch die einzelnen Akteure statt, die ihre eigenen Entscheidungen teilweise selbstständig ausführen. Dafür wurden die dezentralen Akteure mit lokaler Intelligenz ausgestattet. Der Beispielprozess eignet sich für die Validierung des erarbeiteten Bewertungsmodells, da die Differenzierung von zentraler und dezentraler Steuerung möglich ist. Die durchgeführten, notwendigen Kommunikationsbeziehungen sowie die Aufteilung des Anteils am Entscheidungsprozess je Akteur kann variiert werden. Damit sind die für das Modell relevanten Parameter veränderbar, so dass die Auswirkungen analysiert werden können.

4.4 Zieldefinition

In der Simulationsstudie wird die Anwendbarkeit des in Kapitel 3 erarbeiteten Modells zur Bestimmung der Dezentralität basierend auf der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der beteiligten autonomen Akteure untersucht. Der Fokus liegt auf der Überprüfung der Übereinstimmung der resultierenden Dezentralitätskennzahlen sowie dem Autonomie Index mit den Erwartungen an das Modell. Weiter wird für den simulierten Prozess ein exemplarischer Vergleich der resultierenden

Prozesskennzahlen durchgeführt. In Abschnitt 3.5 wurden ein streng hierarchisches sowie ein perfekt heterarchisches Szenario verglichen. Dazu wird eine Tabelle mit den für die Modellanwendung relevanten Kennwerten aufgestellt (siehe Tabelle 3.7). Die folgenden grundlegenden Annahmen liegen der Untersuchung zu Grunde.

- Dezentral gesteuerte Produktionsprozesse haben eine höhere Anzahl an der Kommunikation beteiligten Akteure als in einem vergleichbaren (d. h. insbesondere gleiche Art und Anzahl an Akteuren) zentral gesteuerten Produktionsprozess ($\#c_{a,ps} > 0$).
- Die Entscheidungsfindung ist bei dezentral gesteuerten Produktionsprozessschritten auf mehr Akteure aufgeteilt als in einem vergleichbaren zentral gesteuerten Produktionsprozess. Das bedeutet insbesondere, dass die Anzahl der Akteure, die mindestens eine relevante Entscheidung treffen können, bei dezentral gesteuerten Prozessschritten höher ist ($\#d_{a,ps} > 0$).

Daraus lassen sich die folgenden Kernaussagen ableiten. Diese bilden die zu überprüfenden Zielkriterien.

- Die Homogenität der tatsächlichen Akteursautonomie ist bei dezentral gesteuerten Produktionsprozessen höher, als bei vergleichbaren zentralen gesteuerten Produktionsprozessen (Betrachtung Prozessschrittebene).
- Der Autonomie Index AI steigt bei steigender Dezentralität der Prozesssteuerung.

Nachfolgend wird die durchgeführte Datenauswertung beschrieben, Abschnitt 4.8 vergleicht abschließend die ermittelten Ergebnisse beider Simulationsexperimente hinsichtlich der aufgestellten Kriterien.

4.5 Datenauswertung

In diesem Abschnitt wird die Ermittlung der strukturellen Autonomie sowie der Entscheidungsautonomie auf Basis der Simulationsdaten beschrieben. Dafür wird zunächst die Aufbereitung der Datenbasis für die beiden Faktoren der Akteursautonomie eingegangen. Darauf folgend wird das Vorgehen zur Ermittlung der Kennwerte auf Akteurs-, Prozessschritt- und Prozessebene vorgestellt. Verwendete Pro-

gramme und Funktionen werden genannt. Das gesamte Vorgehen zur Auswertung ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

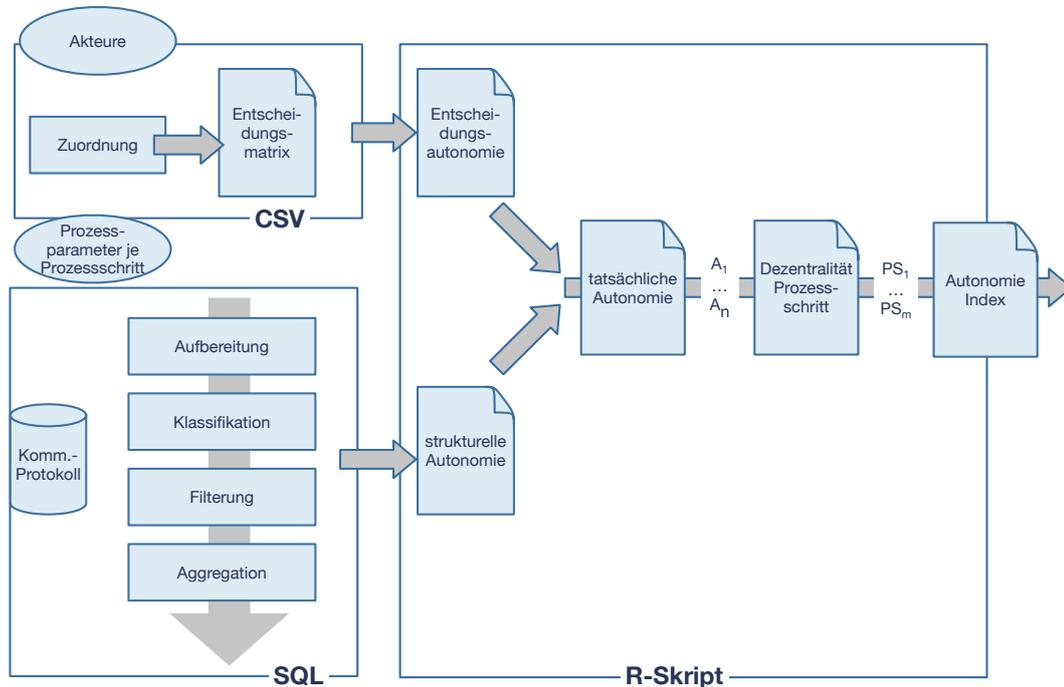


Abb. 4.7: Skizzierung des Vorgehens zur Datenauswertung

4.5.1 Datenbasis strukturelle Autonomie

Grundlage für die Analyse der Kommunikationsbeziehungen bildet das Kommunikationsprotokoll. Dieses beinhaltet sämtliche Datenbeziehungen, die während des Prozesses zwischen den beteiligten Akteuren bestehen. Zur Anwendung der im vorherigen Kapitel 3 erarbeiteten Modells müssen die Daten aus diesem Datenpool zielgerichtet ausgewertet werden. Dafür werden die Daten aufbereitet, klassifiziert, gefiltert und aggregiert. Nachfolgend wird zunächst der Aufbau des Kommunikationsprotokolls und im Anschluss dessen Auswertung beschrieben.

Aufbau des Kommunikationsprotokolls

Sämtliche Kommunikationsaktivitäten, die für die Ausführung der Prozessschritte notwendig sind, werden in einer zentralen MySQL-Datenbank, die die fünf Attribute *id* (Primärschlüssel), *timestamp*, *sender*, *recipient* und *action* beinhaltet,

protokolliert. Zusätzlich werden die Attribute *relevant* und *prozessschritt* ergänzt, die wie nachfolgend erläutert, über SQL-Abfragen befüllt werden. Die in Abbildung 4.8 dargestellte Tabelle stellt einen Auszug aus dem Kommunikationsprotokoll dar. Grundlage der Auswertung bildet ein SQL-Statement, das alle vor-

timestamp	sender	recipient	action
2020-07-07 20:12:00	Werkstuecktraeger2	Schleifmaschine1	start_process
2020-07-07 20:12:05	Schleifmaschine1	Meister	status_g
2020-07-07 20:12:05	Schleifmaschine1	Meister	play
2020-07-07 20:12:25	Schleifmaschine1	Meister	status_y
2020-07-07 20:12:25	Schleifmaschine1	Werkstuecktraeger2	finish_process
2020-07-07 20:12:25	Schleifmaschine1	Meister	pause
2020-07-07 20:12:25	Schleifmaschine1	Meister	status_y
2020-07-07 20:12:34	Werkstuecktraeger2	Beschriftungsroboter	start_process
2020-07-07 20:12:43	Werkstuecktraeger1	Schleifmaschine1	start_process
2020-07-07 20:12:48	Schleifmaschine1	Meister	status_g
2020-07-07 20:12:48	Schleifmaschine1	Meister	play
2020-07-07 20:13:08	Schleifmaschine1	Meister	status_y
2020-07-07 20:13:08	Schleifmaschine1	Werkstuecktraeger1	finish_process
2020-07-07 20:13:08	Schleifmaschine1	Meister	pause
2020-07-07 20:13:08	Schleifmaschine1	Meister	status_y
2020-07-07 20:13:59	Werkstuecktraeger2	Qualitaetspruefplatz	start_process
2020-07-07 20:14:14	Qualitaetspruefplatz	Werkstuecktraeger2	finish_process
2020-07-07 20:14:42	Werkstuecktraeger2	Schleifmaschine1	start_process

Abb. 4.8: Ausschnitt des Kommunikationsprotokolls

handenen, relevanten Sender-Empfänger-Beziehungen für den jeweils betrachteten Prozess ermittelt. Für die Auswertung werden die Attribute *sender*, *recipient*, *action* und *timestamp* herangezogen. Aus *sender* und *recipient* lässt sich die eigentliche Kommunikationsbeziehung zwischen zwei Akteuren ableiten, *action* dient der Relevanzbewertung eines Datensatzes, der Wert des *timestamp* ist ein Faktor für die Zuordnung des Datensatzes zu einem Prozessschritt.

Aufbereitung

Da die Namen der Akteure in der Datenbank nicht im Klartext gespeichert werden, ist für die spätere übersichtliche Auswertung deren Umbenennung möglich. Dafür werden per UPDATE-Befehl notwendige Anpassungen vorgenommen. Zudem ist es notwendig, dass Datensätze zur Abbildung der Kommunikation mit den menschlichen Akteuren hinzugefügt werden. Zwar werden Eingaben protokolliert, welcher Akteur diese vorgenommen hat, wird jedoch derzeit nicht automatisch gespeichert. Auch wird die verbale Kommunikation zwischen den menschlichen Akteuren Meister und Azubi nicht protokolliert. Da beide Angaben für die spätere Auswertung

essentiell sind, werden sie durch Beobachtung während der Simulation erhoben und nachträglich manuell per INSERT-Befehl ergänzt.

Klassifikation und Filterung

Es muss bestimmt werden, welche Datensätze relevant für die Auswertung sind. Dafür wird anhand des Attributs *action*, das 48 Werte einnehmen kann, ermittelt, ob er der Simulations- oder der Simulationsbetriebsebene zuzuordnen ist. Es bedarf deren Klassifizierung, da für die Bewertung der Dezentralität des Prozessschrittes ausschließlich die Kommunikationsbeziehungen der Simulationsebene relevant sind. Die der Simulationsbetriebsebene zugeordneten Datensätze dienen ausschließlich der Konfiguration des zu simulierenden Prozesses und sind daher einer höheren Ebene zugeordnet [Lass 2017, S. 135ff.]. Tabelle B.1 stellt die für die Kommunikationsauswertung relevanten action-Arten mit einer kurzen Beschreibung dar. Die Tabelle dient als Grundlage für die spätere Auswahl der relevanten Datensätze. Tabelle B.2 führt die nicht-relevanten action-Arten auf. Für die relevanten Datensätze wird das zusätzlich erzeugte Attribut *relevant* TRUE gesetzt, für alle weiteren Datensätze hat dieses Attribut den Wert FALSE.

Um eine Auswertung der Kommunikationsbeziehungen je Prozessschritt zu realisieren, ist die zusätzliche Attribuierung der Datensätze notwendig, bei der bestimmt wird, welcher Datensatz zu welchem Prozessschritt gehört. Es wird ein mehrstufiges Verfahren angewendet. Zunächst wird aufgrund des Zeitstempels eine grobe Unterteilung der Prozesse vorgenommen; dieser Schritt ist jedoch nur eingeschränkt nutzbar, da in beiden Szenarien Prozesse parallel laufen und eine genaue zeitliche Abgrenzung daher nicht zielführend ist. Im nächsten Schritt werden logische Regeln angewendet, welche einem genauen Prozessverständnis zu Grunde liegen. Dabei werden insbesondere die Sender-Empfänger-Beziehungen analysiert. So wird die Annahme getroffen, dass Kommunikationsbeziehung zwischen einer Maschine eines und einer Maschine eines nachfolgenden Prozesses dem Prozessschritt der ersten Maschine zugehörig ist.

Im nächsten Schritt werden die Datensätze gefiltert. Es werden nachfolgend nur die Datensätze betrachtet, welche gemäß der vorherigen Klassifikation als relevant eingestuft wurden.

Aggregation

Für die Auswertung der Kommunikationsbeziehungen wird eine Auflistung aller relevanten Sender-Empfänger-Beziehungen pro Prozessschritt benötigt. Sie wird per SELECT-Befehl aus der Datenbank aggregiert.

```
SELECT sender, recipient FROM communication_log_linsen WHERE  
(prozessschritt=ps AND relevant= TRUE)GROUP BY sender, recipient;
```

4.5.2 Datenbasis Entscheidungsautonomie

Für die Berechnung der Entscheidungsautonomie der beteiligten Akteure ist es in einem ersten Schritt notwendig, die zur Verfügung stehenden Parameter sowie die jeweils zugehörigen Alternativen zu ermitteln, da sie die Grundlage für die Berechnung bilden. Im Zentrum Industrie 4.0 können die für die jeweilige Prozessausführung verwendeten Parameter über die Dashboards der stationären Cubes manuell eingestellt werden. Der Prozessschritt startet erst nach vollständiger Konfiguration. Dabei wird angenommen, dass keine Restriktionen der Faktorkombinationen existieren, wodurch die Alternativen beliebig miteinander kombiniert werden können.

Es besteht zudem die Möglichkeit, dass die Auswahl automatisch (für das zentrale Szenario) durch das zentrale Steuerungssystem (Control Center) getroffen wird, sodass ein manuelles Eingreifen nicht mehr notwendig ist. In der nachfolgenden Tabelle 4.1 sind die fünf Prozessschritte sowie die Transportanlage mit ihren jeweiligen Parametern und den verfügbaren Alternativen dargestellt. Zusätzlich ist angegeben, ob eine Vorgabe durch den Fertigungsauftrag gegeben ist (Produktmerkmal). Anderenfalls wird angenommen, dass die Auswahl keinen Einfluss auf das Prozessergebnis (das Produkt), sondern nur auf die Prozesskennzahlen (insbesondere Durchlaufzeit, Qualität) hat (Prozessmerkmal). So muss beispielsweise beim Prozessschritt Färberei (Abbildung 4.9) die Stärke der Tönung auf die Anforderung aus dem Fertigungsauftrag angepasst werden, während die Anzahl der Linsen auf dem Träger individuell entschieden werden kann.

Nach der Ermittlung der durch die Modellierung vorgesehenen, verfügbaren Prozessparameter ist eine Zuordnung der Akteure notwendig, die über die Auswahl der jeweiligen Alternativen entscheidet. Diese wird auf der Simulationsbetriebsebene durchgeführt. Als ein Vorteil der hybriden Simulation kann die Zuordnung frei nach den Erfordernissen des zu betrachteten Szenarios erfolgen. So können durch

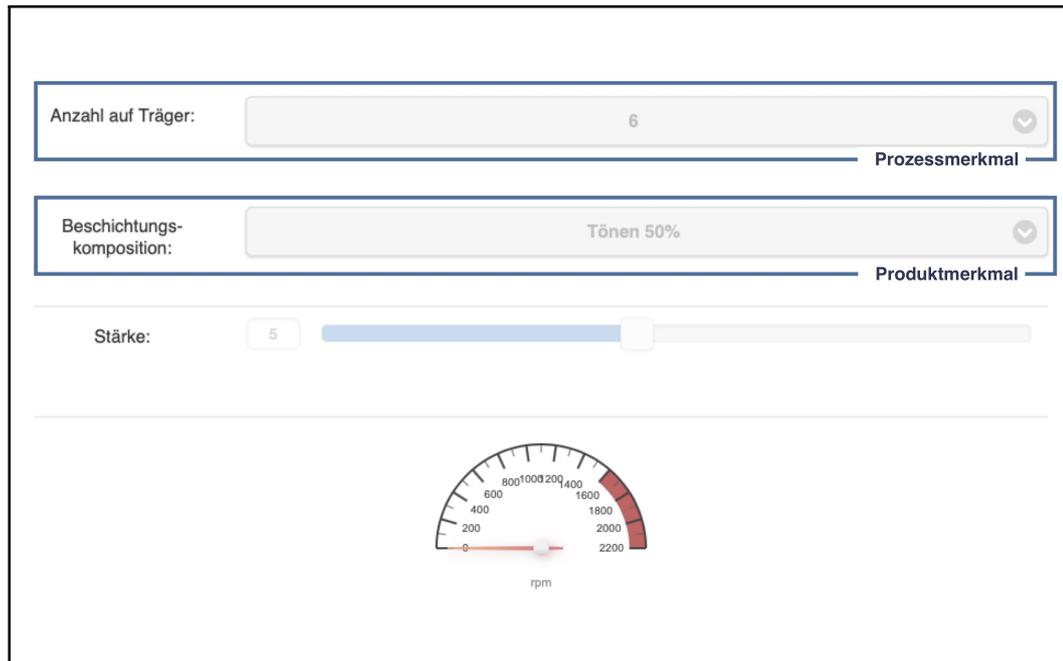


Abb. 4.9: Ausschnitt aus dem Dashboard mit Auswahlmöglichkeiten des Prozessschrittes Färberei

eine Variation im Vorfeld des Simulationslaufes verschiedene Steuerungskonzepte realisiert werden.

Für die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Szenarien wird für eine verbesserte Vergleichbarkeit jeweils die gleiche Anzahl an Entscheidungsalternativen pro Prozessschritt zugrunde gelegt. Tabelle 4.1 führt die Entscheidungsparameter und -alternativen beider Szenarien auf. Die ersten drei Spalten (Prozessschritt, Parameter, Alternativen) beinhalten den betrachteten Prozessschritt, die entsprechenden Parameter sowie die verfügbaren Parameter. Spalte # gibt die Anzahl der unterscheidbaren Alternativen je Parameter an. In Spalte Σ ist die Summe aller unterscheidbarer und auswählbarer, d. h. nicht durch den Fertigungsauftrag vorgegebener Alternativen verzeichnet (in Klammern ist die Gesamtzahl inkl. der durch den Fertigungsauftrag vorgegebenen Alternativen vermerkt). In Spalte *Vorgabe FAUF* sind die Alternativen gekennzeichnet, die durch den Fertigungsauftrag vorgegeben sind.

Prozessschritt	Parameter	Alternativen	#	Σ	Vorgabe FAUF
Schleifen	Programm	Vorschleifen, Grobschliff, Feinschliff, Polieren	3		X
	Intensität	Stufe 1 (10s), Stufe 2 (20s), Stufe 3 (30s), Stufe 4 (50s), Stufe 5 (80s), Stufe 6 (130s)	6	7 (16)	X
	Auswahl Schleifmaschine	Schleifmaschine 1, Schleifmaschine 2	2		
	Prüfung	fehlerfrei, fehlerhaft	2		
	Startpunkt	sofort/Eilauftrag, vorziehen, Reihenfolge	3		
Beschriftung	Text	freie Eingabe	4		X
	Schriftgröße	klein, groß	2		X
	Schriftart	A, B	2	3 (13)	X
	Rahmen	ja, nein	2		X
	Startpunkt	sofort/Eilauftrag, vorziehen, Reihenfolge	3		
Färberei	Farbe	ohne, gelblich, bläulich	3		X
	Intensität	Tönen 50 % , Tönen 70 % , doppelt Entspiegeln	3		X
	Stärke	Stufe 1, Stufe 2, Stufe 3, Stufe 4, Stufe 5, Stufe 6	6	3 (15)	X
	Startpunkt	sofort/Eilauftrag, vorziehen, Reihenfolge	3		
Qualitätskontrolle	Prüfungsart	Standard/Sicht, Intensiv/Labor	2		
	Anzahl	Stichprobe, 100%-Prüfung	1	6	
	Startpunkt	sofort/Eilauftrag, vorziehen, Reihenfolge	3		
Transport	Route	mit depatcher, ohne depatcher	2	2	

Tab. 4.1: Übersicht über die Entscheidungsparameter und -alternativen

4.5.3 Ermittlung der Kennwerte

Die Ermittlung der strukturellen Autonomie, der Entscheidungsautonomie und der tatsächlichen Autonomie der Akteure erfolgt in der Programmiersprache R. Für die Ermittlung der strukturellen Autonomie werden die Daten aus der Datenbank abgerufen und aufbereitet. Mit der Funktion `closeness` aus dem Paket `tnet` wird die strukturelle Autonomie ermittelt. Als Basis für die Berechnung der Entscheidungsautonomie wird eine csv-Datei importiert, in der die Anzahl der Entscheidungsalternativen je Akteur und Prozessschritt in einer Matrix gespeichert sind. Strukturelle Autonomie, Entscheidungsautonomie und tatsächliche Autonomie werden in einer Tabelle zusammengefasst und als csv-Datei ausgegeben.

Diese Datei wird im nächsten Schritt für die Ermittlung der Prozessschritt- und Prozesskennwerte mittels selbst geschriebenem Code verwendet. Zusätzlich werden Plots der Kommunikationsstruktur je Prozessschritt als pdf-Datei erzeugt.

4.6 Simulationsexperiment 1: Zentrale Produktionssteuerung

Im zentralen Simulationsexperiment nimmt das *Control Center* eine entscheidende Rolle ein. Das Control Center ist eine Instanz der Akteursklasse *Betriebliches Anwendungssystem* und repräsentiert ein „klassisches“ zentrales Fertigungssteuerungssystem, wie es insbesondere durch MES- oder ERP-Lösungen zur Verfügung gestellt wird. Neben der Auftragsplanung wird hier die Fertigungs(fein)planung sowie die Ressourcenverwaltung realisiert. Sämtliche Interaktionen zwischen den Instanzen der Akteursklassen *Betriebliches Anwendungssystem* und *Fabriksoftware* laufen bidirektional über diese zentrale Instanz: Arbeitsaufträge werden auf die ausführenden Instanzen der Akteursklasse *Fabriksoftware* verteilt und Rückmeldungen entgegengenommen, gespeichert und verarbeitet. Nur die Kommunikationsbeziehungen der beiden Instanzen der Akteursklasse *Mensch* – Meister und Azubi – sind nicht mit dem Control Center verbunden; stattdessen findet Informationserfassung und -übertragung sowie die Entscheidungsausführung direkt mit den Instanzen der Fabriksoftware statt. Eine Interaktion kann beispielsweise die Bedienung oder Konfiguration von Maschinen sein. Das bedeutet insbesondere auch, dass in dem Simulationsexperiment keine direkte Interaktion mit dem *Control Center* darge-

stellt ist. Dieser Planungsprozess wird als vorgelagert und nicht relevant für die Betrachtung der Analyse verstanden.

Für die Auswertung der Simulationsläufe wird gemäß des im vorherigen Kapitel erarbeiteten Analysemodells für die vier Prozessschritte zunächst die Dezentralität des Simulationsexperiments und anschließend – basierend auf den Kennwerten der Prozessschritte – der Autonomie Index des Prozesses bestimmt. Die Produktionskennzahl wird erhoben.

4.6.1 Ermittlung der Kennwerte der Prozessschritte

Nachfolgend werden die vier Prozessschritte des zentralen Simulationsexperiments analysiert. Dafür wird der Prozessschritt zunächst verbal erläutert und als Swimlane-Diagramm (siehe Anhang C) dargestellt. Diese Diagrammart verdeutlicht die Zuständigkeiten von Akteuren in Prozessschritten sowie deren Interaktionen [Jeyaraj et al. 2014] und stellt so im Rahmen dieser Arbeit eine geeignete Methode für die Visualisierung des Prozesses sowie der Kommunikationsbeziehungen der Akteure dar. Dabei entspricht jede Swimlane – auch bei mehrfachem Aufruf – einem autonomen Akteur. Eine Ausnahme bilden die beiden Werkstückträger 1 und 2: Da diese in den meisten Fällen gleich behandelt werden, werden sie zur Erhöhung der Übersichtlichkeit der Diagramme zusammengefasst als doppeltes Viereck dargestellt. Die Diagramme bilden weitergehend auch die zeitliche Reihenfolge des Prozessablaufes ab, kleinere Anpassungen wurden zur Erhöhung der Übersichtlichkeit vorgenommen.

Im nächsten Schritt wird die Kommunikationsstruktur visualisiert. Diese Diagrammart besteht aus Knoten und Kanten [Wasserman u. Faust 1994, S. 94ff.]. Die Knoten repräsentieren in dieser Arbeit die Akteure, die Kanten stellen die Kommunikationsbeziehungen dar. Sie visualisieren, ob eine Kommunikationsbeziehung zwischen zwei Knoten besteht. Unterschieden werden können gerichtete und ungerichtete Kanten [Wasserman u. Faust 1994, S. 198]. Für die Darstellung von Kontrollbeziehungen ist es notwendig, gerichtete Kanten zu verwenden, da die Angabe wer wen kontrolliert, relevant ist.

Die Verteilung der Entscheidung auf die Akteure wird beschrieben. Abschließend werden die drei die Akteure beschreibenden Kennwerte (strukturelle Autonomie, Entscheidungsautonomie, tatsächliche Autonomie) und die Dezentralität des Prozessschrittes berechnet und erläutert.

Prozessschritt 1: Schleifen

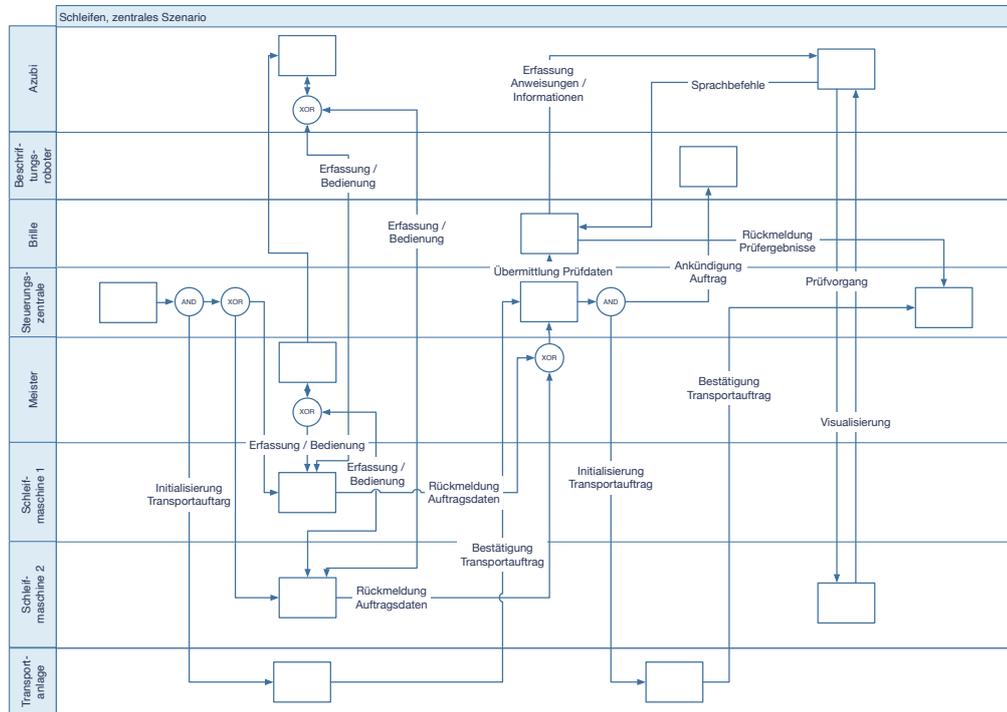


Abb. 4.10: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 1 im zentralen Simulationsexperiment | Schleifen

Das Control Center entscheidet, auf welcher der beiden parallel Schleifmaschinen (Schleifmaschine 1, Schleifmaschine 2) der Fertigungsauftrag ausgeführt werden soll und löst dementsprechend einen Transportauftrag des Werkstückträgers zu der ausgewählten Maschine aus. Die beiden menschlichen Akteure Meister und Azubi erfahren direkt an der Schleifmaschine, welcher Auftrags als nächstes ansteht und nehmen die notwendige Konfiguration und Bedienung der Anlage vor. Dabei erläutert der Meister dem Azubi einige Einstellungen, die dieser dann selbstständig ausführt. Die Beendigung des Prozesses wird von der Schleifmaschine direkt an das Control Center gemeldet. Dieses löst einen erneuten Transportauftrag bei der Transportanlage aus und meldet den Auftrags beim nachfolgenden Prozessschritt Beschriftung an.

An Schleifmaschine 2 wird zudem eine notwendige, routinemäßige Wartung durchgeführt. Dazu wird eine Datenbrille unterstützend verwendet. Der Brille werden Daten aus dem Control Center übermittelt. Der Meister bekommt visuelle

Anweisungen und Hinweise. Über Sprachbefehle steuert der Meister die Brille und dokumentiert die durchgeführten Prüfungen. Zusätzlich können Fotos aufgenommen werden. Die Brille leitet die Prüfergebnisse und Fotos an das Control Center weiter, wo sie im zentralen Modul für Qualitätssicherung gespeichert werden. Der Meister entscheidet, ob die Prüfmerkmale erfüllt sind. Das Swimlane-Diagramm von diesem Prozessschritt ist in Abbildung 4.10 dargestellt, Abbildung 4.11 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

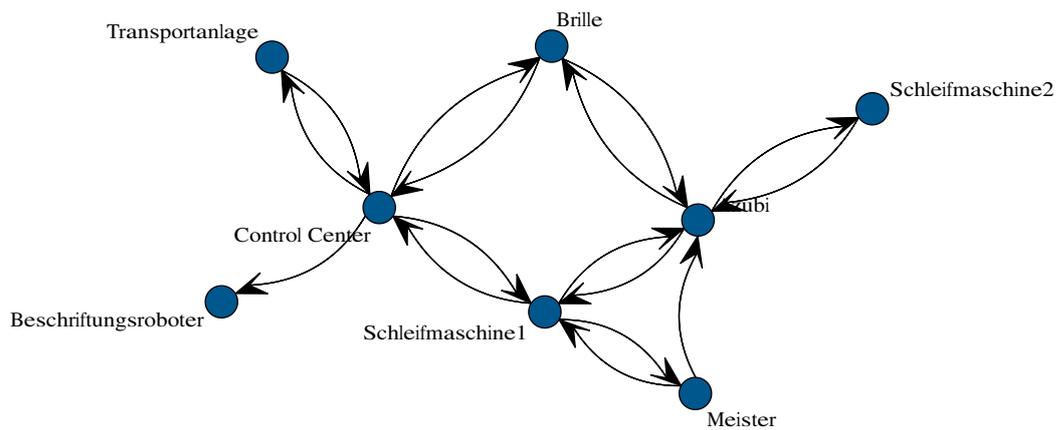


Abb. 4.11: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 1 (zentral)

Akteur	$d'_{a,1}$	$C_{a,1}$	$R_{a,1}$
Azubi	0,000	0,536	0,000
Beschriftungsroboter	0,000	0,000	0,000
Brille	0,000	0,529	0,000
Control Center	0,714	0,464	0,332
Meister	0,286	0,321	0,092
Schleifmaschine 1	0,000	0,343	0,000
Schleifmaschine 2	0,000	0,395	0,000
Transportanlage	0,000	0,261	0,000
$D_1 :$			0,436

Tab. 4.2: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 1 (zentral)

In Tabelle 4.2 sind zeilenweise die den Akteur betreffenden, relevanten erhobenen und berechneten Kennwerte zur Ermittlung der Dezentralität des betrachteten Prozessschrittes 1 dargestellt. In Spalte $d'_{a,1}$ ist die Entscheidungsautonomie (entspricht dem relativen Anteil an Entscheidungen je Akteur im betrachteten Prozessschritt) eingetragen. Spalte $C_{a,1}$ enthält die berechnete strukturelle Autonomie, Spalte $R_{a,1}$ die tatsächliche Autonomie. Unter der Tabelle steht die Dezentralität des ersten Prozessschrittes D_1 .

Es ist erkennbar, dass das Control Center mit einer Entscheidungsautonomie von 0,714 den größten Teil der Entscheidungen trifft. Des weiteren hat nur noch der Meister eine positive Entscheidungsautonomie. Alle anderen Akteure treffen keine Entscheidungen. Dabei hat der Akteur Beschriftungsroboter eine strukturelle Zentralität von 0, daher ist er gemäß der Klassifikationsmatrix (siehe Abbildung 3.9) als ausführender Akteur klassifiziert. Die anderen Akteure haben eine positive strukturelle Zentralität und somit zwischengeschaltete Akteure (mit oder ohne ausführenden Aktivitäten). Dieser Prozessschritt hat mit einem Dezentralitätswert von 0,436 die höchste Dezentralität im betrachteten Prozess.

Prozessschritt 2: Beschriftung

Auch im zweiten Prozessschritt sendet das Control Center Auftragsdaten an den Beschriftungsroboter, kommuniziert bidirektional mit der Transportanlage und kündigt das zu bearbeitende Werkstück beim nachfolgenden Prozessschritt Färberei an. Zudem verwendet der Meister ein mobiles Tablet, über das er die Beschriftungsanlage konfiguriert. Diese Einstellungen werden nicht direkt an die Beschriftungsroboter übermittelt, sondern zunächst an das Control Center und von dort aus an die Beschriftungsroboter. Parallel beobachtet der Meister die Beschriftungsroboter und greift bei Bedarf direkt in die Bedienung bzw. Konfiguration ein. Die den Prozess betreffenden Entscheidungen hinsichtlich Startpunkt und Transport werden vom Control Center getroffen. Das Swimlane-Diagramm von diesem Prozessschritt ist in Abbildung C.2 dargestellt, Abbildung 4.12 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

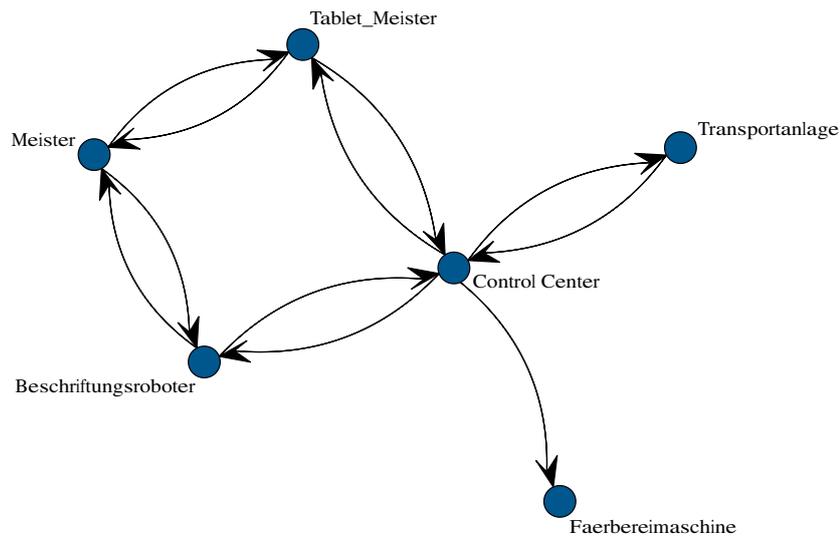


Abb. 4.12: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 1 (zentral)

Akteur	$d_{a,2}$	$C_{a,2}$	$R_{a,2}$
Beschriftungsroboter	0,000	0,700	0,000
Control Center	1,000	0,900	0,900
Färbereimaschine	0,000	0,000	0,000
Meister	0,000	0,633	0,000
Tablet Meister	0,000	0,700	0,000
Transportanlage	0,000	0,567	0,000
$D_2 :$			0,051

Tab. 4.3: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 1 (zentral)

In diesem Prozessschritt sind sechs Akteure beteiligt, wovon bis auf den Akteur Färbereimaschine alle Akteure eine positive strukturelle Zentralität haben. Da das Control Center sämtliche Entscheidungen ausführt, hat nur dieses eine positive tatsächliche Autonomie. Die Färbereimaschine ist als ausführender Akteur, alle anderen Akteure sind als zwischengeschalteter Akteure klassifiziert. Mit einem Dezentralitätswert von 0,051 hat der Prozessschritt Beschriftung den geringsten Wert in dem betrachteten Prozess. Tabelle 4.3 fasst die Ergebnisse zusammen.

Prozessschritt 3: Färberei

Die Kommunikationsbeziehungen des Control Centers zu dem betrachteten Prozessschritt Färberei, dem nachfolgenden Prozessschritt Qualitätskontrolle sowie der Transportanlage sind im vierten Prozess analog zu den in den vorherigen beschriebenen Prozessschritten. Alle Ausführungsbefehle und Prozessergebnisse werden über das Control Center kommuniziert. Abweichend ist die Integration von zwei mobilen Tablets, die vom Meister und vom Azubi genutzt werden. Dabei bekommt das Tablet des Meisters Informationen vom zentralen Control Center. Der Meister liest diese Informationen und trifft entsprechende Entscheidungen, welche er in das Tablet eingibt. Diese werden teilweise direkt an das Control Center übertragen, von wo sie an die Färbereimaschine weitergeleitet werden. Zudem delegiert der Meister Aufgaben über das Tablet an den Azubi, der diese im Anschluss direkt an der Färbereimaschine ausführt. Die Kommunikation der beiden Tablets findet direkt ohne Einbindung des Control Centers statt. Die den Prozess betreffenden Entscheidungen hinsichtlich Startpunkt und Transport werden vom Control Center getroffen. Das Swimlane-Diagramm von diesem Prozessschritt ist in Abbildung C.3 dargestellt, Abbildung 4.13 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

Akteur	$d_{a,3}$	$C_{a,3}$	$R_{a,3}$
Azubi	0,000	0,571	0,000
Control Center	1,000	0,762	0,762
Färbereimaschine	0,000	0,488	0,000
Meister	0,000	0,476	0,000
Qualitätsprüfplatz	0,000	0,000	0,000
Tablet Azubi	0,000	0,595	0,000
Tablet Meister	0,000	0,714	0,000
Transportanlage	0,000	0,488	0,000

$D_3 : 0,127$

Tab. 4.4: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 1 (zentral)

Am Prozessschritt Färberei sind acht Akteure beteiligt. Die Entscheidungsfindung wird erneut ausschließlich vom Control Center durchgeführt. Da er zudem

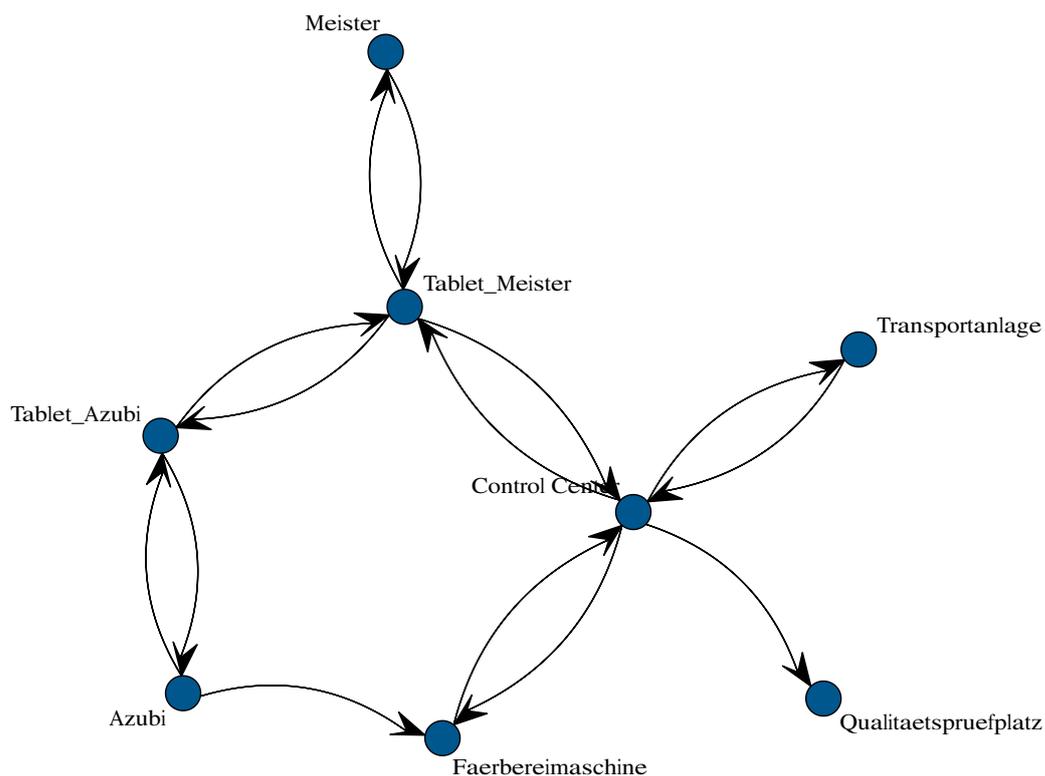


Abb. 4.13: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 1 (zentral)

eine positive strukturelle Zentralität hat, ist er ein kontrollierender Akteur. Bis auf den Akteur Qualitätsprüfplatz haben alle anderen Akteure eine positive strukturelle Zentralität. Sie sind zwischengeschaltete Akteure (mit oder ohne ausführenden Aktivitäten). Tabelle 4.4 fasst die Ergebnisse zusammen.

Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle

Die Qualitätskontrolle ist der letzte Prozessschritt im betrachteten Prozess des Simulationsexperiments. Das Control Center übermittelt Prüfanweisungen (Prüfart und die Anzahl der zu prüfenden Linsen) an den Qualitätsprüfplatz, wo sie vom Azubi erfasst, ausgeführt und dokumentiert werden. Die Ergebnisse werden an das Control Center zurück gespielt. Auch in diesem Prozessschritt kommuniziert das Control Center mit der Transportanlage, um den Transport der Werkstücke zu und vom Qualitätsprüfplatz zu initiieren. Das Swimlane-Diagramm von die-

sem Prozessschritt ist in Abbildung C.4 dargestellt, Abbildung 4.14 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

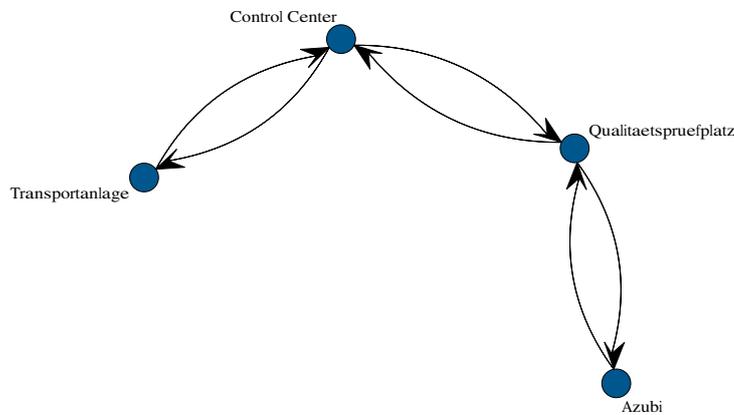


Abb. 4.14: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 1 (zentral)

Akteur	$\sum d_{a,4}$	$d_{a,4}$	$C_{a,4}$	$R_{a,4}$
Azubi	0	0,000	0,611	0,000
Control Center	6	1,000	0,833	0,833
Qualitätsprüfplatz	0	0,000	0,833	0,000
Transportanlage	0	0,000	0,611	0,000

$D_4 : 0,087$

Tab. 4.5: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 1 (zentral)

Am Prozessschritt Qualitätskontrolle sind vier Akteure beteiligt, von denen alle eine positive strukturelle Zentralität haben. Da nur das Control Center über eine positive Entscheidungsneutralität verfügt, hat ausschließlich dieser Akteur eine positive tatsächliche Autonomie. Alle andere Akteure sind zwischengeschaltete Akteure. Tabelle 4.5 fasst die Ergebnisse zusammen.

4.6.2 Ermittlung der Kennwerte des Prozesses

Der aus den vorher beschriebenen Prozessschritten bestehende Prozess wird durch den Autonomie Index AI sowie die Produktionskennzahl beschrieben.

Dezentralität des Prozesses

PS	Prozess	# a	# $c_{a,ps} > 0$	# $d_{a,ps} > 0$	D_{ps}
1	Schleifen	8	7	2	0,436
2	Beschriftung	6	5	1	0,051
3	Färberei	8	7	3	0,127
4	Qualitätskontrolle	4	4	1	0,087

Tab. 4.6: Übersicht über die Dezentralitätswerte der Prozessschritte sowie des Prozesses, Simulationsexperiment 1 (zentral)

$$AI = \frac{\sum D_{ps}}{n_{ps}} = \frac{0,701}{4} = 0,175$$

Tabelle 4.6 stellt die zuvor beschriebenen Dezentralitätswerte der Prozessschritte im zentralen Simulationsexperiment dar. Zudem wird der Autonomie Index AI berechnet. Er beträgt 0,150. Der Wertebereich des Autonomie Index liegt zwischen 0 und 1, wobei 0 eine streng zentrale und 1 eine perfekt dezentrale Produktionssteuerung beschreibt. Demnach repräsentiert das Ergebnis eine eher geringe Dezentralität. Das entspricht den Erwartungen an das Modell.

Produktionskennzahl zur Nutzenbewertung

Aufgrund der oben genannten Zielsetzung (fristgemäße Herstellung des Eilauftrags bei möglichst geringer Durchlaufzeit für den normalen Fertigungsauftrag) eignet sich die Durchlaufzeit als Kennzahl zur Nutzenbewertung. Die Werte wurden als Durchschnitt aus mehreren Simulationsläufen gebildet. Tabelle 4.7 gibt den Durchschnitt der aufgenommenen Durchlaufzeiten sowie deren Varianz an. Die aufgenommenen Zeiten befinden sich in Anhang E.1. Die Varianz ermöglicht eine Aussage über die Robustheit des Prozesses. Je geringer die Varianz ist, desto robuster, d. h. reproduzierbarer, ist der Prozess. Dadurch können Durchlaufzeiten verlässlicher berechnet und die Liefertermintreue verbessert werden.

Die Auswertung zeigt, dass der Eilauftrag in keinem Simulationslauf rechtzeitig fertiggestellt werden konnte (Anforderung 2'15"). Die Standardabweichung zeigt zudem, dass der Prozess durch das Einschieben des Eilauftrags nicht robust ist; die Einhaltung des zugesagten Liefertermins ist beim Auftreten unvorhergesehener Aufträge gefährdet.

Simulationslauf	Auftrag	
	1	2
Durchschnitt	3'07"	3'05'
Standardabweichung σ	0'12"	0'15"

Tab. 4.7: Zusammenfassende Kennzahlen der Durchlaufzeiten der Werkstückträger je Simulationslauf (n=20), Simulationsexperiment 1 (zentral)

4.7 Simulationsexperiment 2: Dezentrale Produktionssteuerung

Im zweiten Simulationsexperiment wird ein dezentrales Szenario des oben vorgestellten Beispielprozesses verwendet. Die beteiligten Akteure sind stark vernetzt, die Entscheidungsfindung unter ihnen aufgeteilt. Die deutlich höhere Anzahl an Kommunikationsbeziehungen zwischen den beteiligten Akteuren, ihre stärkere Verzahnung sowie das Fehlen eines Akteurs, der im strukturellen Mittelpunkt steht, verdeutlichen die Grundsätze der dezentralen Produktionssteuerung. Im Folgenden wird die Kommunikationsstruktur der Prozessschritte visualisiert und beschrieben. Die Aufteilung der Entscheidungen wird erklärt. Die Kennzahlen der Prozessschritte werden tabellarisch aufgeführt und anschließend in eine den Prozess beschreibende Tabelle überführt.

4.7.1 Ermittlung der Kennwerte der Prozessschritte

Prozessschritt 1: Schleifen

Der Fertigungsauftrag wird vom Control Center an den Werkstückträger 1 geleitet. Dabei werden ihnen alle relevanten Auftragsparameter mitgeteilt. Der Werkstückträger kommuniziert mit beiden Schleifmaschinen, um zu ermitteln, an welcher er bearbeitet werden soll, damit die Zielkriterien am besten erreicht werden können. Sobald die Auswahl getroffen ist, fordert der Werkstückträger einen Transport aus dem Eingangslager zu Schleifmaschine 1 an. Dafür prüft die Transportanlage welche Abschnitte des Transportweges frei sind und bestimmt darauf basierend den optimalen Weg. Sobald das Werkstück an Schleifmaschine 1 angekommen ist, wird die Bearbeitung automatisch initiiert. Meister und Azubi werden sowohl durch die

Änderung der Statusampel, die Akustik sowie die visuelle Prozessausführung über den Prozessstart informiert. Über das an Schleifmaschine 1 befindliche Dashboard können von ihnen Informationen zum Prozessstatus sowie relevante Parameter (unter anderem Prozessart, verwendeter Körnungsgrad und Temperatur) aufgenommen werden. Nach der Beendigung des Schleifprozesses teilt die Schleifmaschine dies dem Werkstück mit. Anschließend findet eine Kommunikation zwischen dem bearbeiteten Werkstück 1 und dem Beschriftungsroboter statt, um die Verfügbarkeit der Maschine anzufragen und den nächsten Fertigungsauftrag anzukündigen. Zudem fordert das Werkstück einen Transport zum Beschriftungsroboter an. Die Transportanlage ermittelt selbstständig den für die Situation besten Transportweg und steuert das Werkstück entsprechend.

Bevor die Linsen auf dem zweiten Werkstückträger bearbeitet werden können, tritt an Schleifmaschine 1 ein Fehler auf, welcher durch den Meister durch das Nachfüllen von Kühlmittel behoben wird. Schleifmaschine 1 teilt Werkstück 2 mit, dass sich die Bearbeitung verzögert. Um die Wartezeit möglichst gering zu halten, kommuniziert Werkstück 2 mit Schleifmaschine 2, um festzustellen, ob diese verfügbar ist und die geforderte Bearbeitung auf der Parallelmaschine früher abgeschlossen sein könnte. Da dieses der Fall ist, teilt Werkstückträger 2 Schleifmaschine 1 mit, dass es von Schleifmaschine 2 bearbeitet werden wird. Werkstückträger 2 fordert bei der Transportanlage einen Transport an. Das Swimlane-Diagramm von diesem Prozessschritt ist in Abbildung C.6 dargestellt, Abbildung 4.15 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

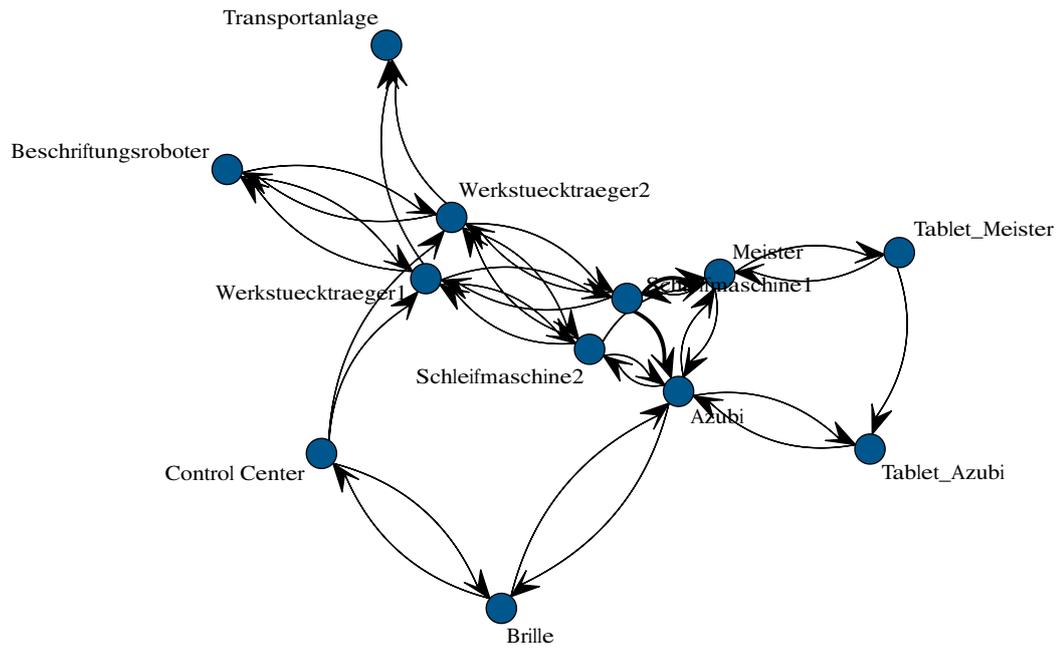


Abb. 4.15: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Akteur	$d_{a,1}$	$C_{a,1}$	$R_{a,1}$
Azubi	0,071	0,556	0,040
Beschriftungsroboter	0,000	0,334	0,000
Brille 0	0,000	0,486	0,000
Control Center	0,143	0,534	0,076
Meister	0,071	0,443	0,032
Schleifmaschine 1	0,143	0,124	0,018
Schleifmaschine 2	0,143	0,344	0,049
Tablet Azubi	0,000	0,209	0,000
Tablet Meister	0,000	0,262	0,000
Transportanlage	0,143	0,083	0,012
Werkstückträger 1	0,143	0,387	0,055
Werkstückträger 2	0,143	0,292	0,042

$$D_1 : 0,768$$

Tab. 4.8: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Am ersten Prozessschritt im dezentralen Simulationsexperiment sind zwölf Akteure beteiligt, von denen acht Entscheidungen treffen können und somit über eine positive Entscheidungsautonomie verfügen. Alle Akteure haben eine positive strukturelle Autonomie. Es resultieren acht Akteure mit einer positiven tatsächlichen Autonomie, die zwischen 0,012 (Transportanlage) und 0,076 (Control Center) variiert. Die Akteure Beschriftungsroboter, Brille, Tablet Azubi und Tablet Meister sind ausführende Akteure. Der resultierende Dezentralitätswert des Prozessschrittes beträgt 0,780. Er ist damit deutlich höher als die entsprechenden Dezentralitätswerte im ersten Simulationsexperiment mit zentraler Produktionssteuerung. Im Vergleich mit den drei weiteren Prozessschritten, hat der betrachtete die höchste Dezentralität. Tabelle 4.8 fasst die Ergebnisse zusammen.

Prozessschritt 2: Beschriftung

Werkstückträger 1 wird vor Werkstückträger 2 zum dritten Prozessschritt transportiert. Er teilt dem Beschriftungsroboter die relevanten Parameter mit. Sobald er an der Maschine ist, startet automatisch die Bearbeitung. Der Meister bedient den Beschriftungsroboter über sein Tablet. Dabei werden sowohl Informationen auf dem jeweiligen Tablet ausgegeben, als auch eingegeben. Zudem findet eine Kommunikation zwischen den Tablets statt. Der Meister delegiert Aufgaben an den Azubi, die Rückmeldung wird an das Tablet des Meisters übertragen. Zusätzlich findet in diesem Prozessschritt eine verbale Kommunikation zwischen Meister und Azubi statt.

Nach Beendigung des Beschriftungsprozesses kommuniziert Werkstückträger 1 mit dem nachfolgenden Prozessschritt Färberei, um dessen Verfügbarkeit zu erfragen und den nächstmöglichen Starttermin zu terminieren. Sobald dieser geklärt ist, fordert Werkstückträger 1 einen Transport zur Färbereimaschine an. Die Transportanlage ermittelt die verfügbaren Transportabschnitte, bestimmt darauf basierend den optimalen Transportweg und den mögliche Ankunftszeitpunkt, welche sie der Färbereimaschine mitteilt. Sobald Schleifmaschine 2 die Bearbeitung von Werkstückträger 2 beendet hat und die Beschriftung von Werkstückträger 2 beendet ist, teilt die Schleifmaschine dem Werkstückträger dies mit. Daraufhin fragt der Werkstückträger beim Beschriftungsroboter nach freien Kapazitäten an und initiiert – basierend auf der Rückmeldung des Beschriftungsroboters – bei der Transportanlage einen Transportauftrag. Das Swimlane-Diagramm von diesem Prozessschritt

ist in Abbildung C.7 dargestellt, Abbildung 4.16 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

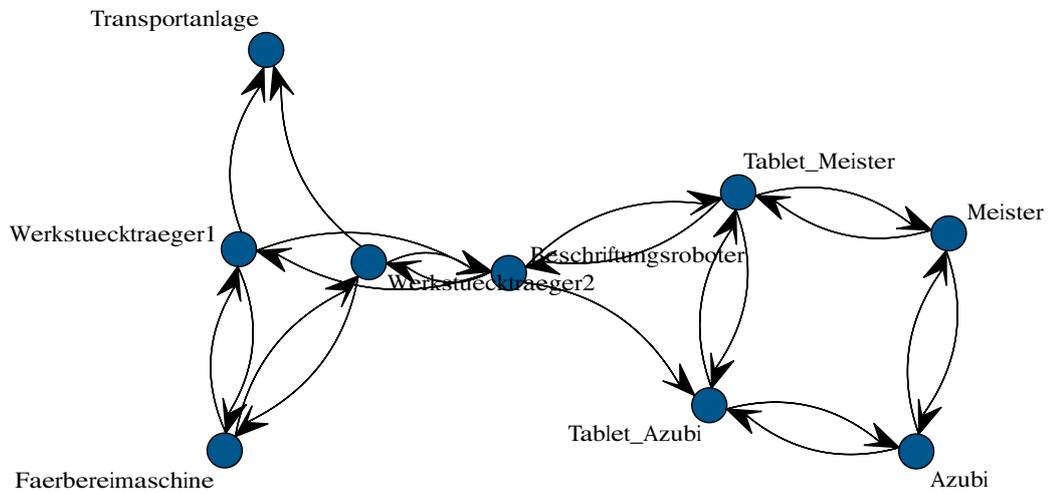


Abb. 4.16: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Akteur	$d_{a,1}$	$C_{a,1}$	$R_{a,1}$
Azubi	0,000	0,467	0,000
Beschriftungsroboter	0,333	0,750	0,250
Färbereimaschine	0,000	0,521	0,000
Meister	0,000	0,521	0,000
Tablet Azubi	0,000	0,521	0,000
Tablet Meister	0,000	0,646	0,000
Transportanlage	0,333	0,111	0,037
Werkstückträger 1	0,167	0,646	0,108
Werkstückträger 2	0,167	0,467	0,078

$$D_2 : 0,529$$

Tab. 4.9: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Beim Prozessschritt Beschriftung sind alle Akteure durch eine positive strukturelle Autonomie gekennzeichnet. Die vorhandenen Entscheidungsalternativen sind

auf vier Akteure verteilt. Vier Akteure haben eine positive tatsächliche Autonomie, die zwischen 0,037 (Transportanlage) und 0,250 (Beschriftungsroboter) variiert. Die Akteure Azubi, Färbereimaschine, Meister, Tablet Azubi und Tablet Meister sind zwischengeschaltete Akteure, während Beschriftungsroboter, Transportanlage, Werkstückträger 1 und Werkstückträger 2 kontrollierende Akteure sind. Die zusammenfassende, die Homogenität der Akteurswerte beschreibende Dezentralität des Prozessschrittes beträgt 0,529. Tabelle 4.9 fasst die Ergebnisse zusammen.

Prozessschritt 3: Färberei

Werkstückträger 1 meldet sich bei der Färbereimaschine mit den entsprechenden Parameterwerten an. Sobald er zur Färbereimaschine transportiert wurde, beginnt automatisch die Bearbeitung. Der Meister stellt manuell Parameter an der Färbereimaschine ein; zur Entscheidungsfindung nutzt er auch sein Tablet. Der Azubi beobachtet den Färbereivorgang und gibt darauf basierend Daten auf seinem Tablet ein. Die beiden Tablets sind miteinander verbunden und tauschen Daten aus. Nach Beendigung des Färbereivorgangs kommuniziert Werkstückträger 1 mit dem nachfolgenden Prozess der Qualitätskontrolle und terminiert den nächstmöglichen Bearbeitungszeitpunkt. Werkstückträger 1 fordert bei der Transportanlage den Transport zum Qualitätsprüfplatz an. Die Transportanlage ermittelt die freien Transportabschnitte und terminiert so den optimalen Transportweg. Sie meldet den geplanten Ankunftszeitpunkt von Werkstückträger 1 beim Qualitätsprüfplatz an. Werkstückträger 2 wird analog zu Werkstückträger 1 bearbeitet. Das Swimlane-Diagramm von diesem Prozessschritt ist in Abbildung C.8 dargestellt, Abbildung 4.17 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

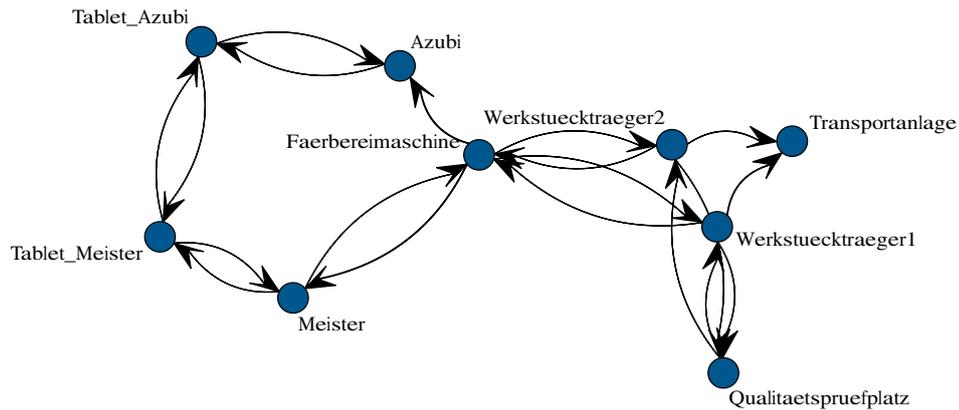


Abb. 4.17: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Akteur	$d_{a,1}$	$C_{a,1}$	$R_{a,1}$
Azubi	0,125	0,198	0,025
Färbereimaschine	0,125	0,375	0,047
Meister	0,250	0,407	0,102
Qualitätsprüfplatz	0,000	0,273	0,000
Tablet Azubi	0,000	0,377	0,000
Tablet Meister	0,000	0,344	0,000
Transportanlage	0,250	0,111	0,028
Werkstückträger 1	0,125	0,368	0,046
Werkstückträger 2	0,125	0,376	0,047

$$D_3 : 0,721$$

Tab. 4.10: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Am Prozessschritt Färberei sind im dezentralen Simulationsexperiment neun Akteure beteiligt. Davon haben acht eine positive strukturelle Autonomie und jeweils sechs eine positive Entscheidungs- und tatsächliche Autonomie. Der Akteur Azubi hat mit 0,025 den geringsten, der Akteur Meister mit 0,102 den höchsten tatsächlichen Autonomiewert. Der Qualitätsprüfplatz ist ein ausführender Akteur, Tablet Azubi und Tablet Meister jeweils zwischengeschaltete Akteure. Die ande-

ren Akteure sind kontrollierende Akteure. Die Dezentralität des Prozessschrittes beträgt 0,721. Tabelle 4.10 fasst die Ergebnisse zusammen.

Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle

Werkstückträger 1 meldet sich beim Qualitätsprüfplatz an, welcher durch den Azubi bedient wird. Dabei signalisiert der Werkstückträger dem Azubi, wenn basierend auf der vorherigen Prozessausführung der Verdacht besteht, dass die Qualität nicht ausreichend und eine gesonderte Prüfung notwendig ist. Nach Abschluss der Prüfung wird dem Werkstückträger 1 das Prüfergebnis mitgeteilt. Der Werkstückträger fordert bei der Transportanlage den Transport ins Fertigwarenlager an und teilt dem Control Center seine Fertigstellung und die Ergebnisse der Qualitätsprüfung mit. Der Werkstückträger wird final ins Fertigwarenlager transportiert. Mit Werkstückträger 2 wird analog verfahren. Das Swimlane-Diagramm von diesem Prozessschritt ist in Abbildung C.9 dargestellt, Abbildung 4.18 visualisiert die Kommunikationsbeziehungen der Akteure.

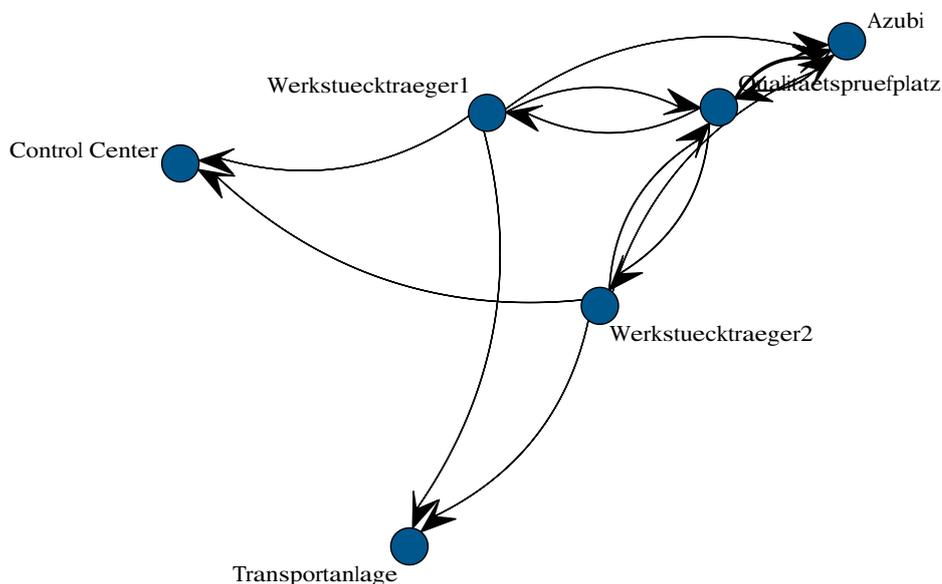


Abb. 4.18: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Akteur	$d_{a,1}$	$C_{a,1}$	$R_{a,1}$
Azubi	0,200	0,069	0,014
Control Center	0,000	0,000	0,000
Qualitätsprüfplatz	0,200	0,152	0,030
Transportanlage	0,200	0,167	0,033
Werkstückträger 1	0,200	0,650	0,130
Werkstückträger 2	0,200	0,650	0,130

$D_4 : 0,703$

Tab. 4.11: Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Am vierten Prozessschritt sind sechs Akteure beteiligt. Die Entscheidungsautonomie ist gleichmäßig auf fünf Akteure verteilt, der sechste Akteur – das Control Center – trifft keine Entscheidungen. Zudem gehen von ihm keine Kommunikationsbeziehungen aus, so dass er als ausführender Akteur zu klassifizieren ist. Die Transportanlage ist ein selbstausführender Akteur, wodurch er trotzdem er keine ausgehende Kommunikationsbeziehungen zu anderen Akteuren hat, über eine positive Closeness verfügt (selbst referenzierend). Die anderen Akteure haben eine positive strukturelle und tatsächliche Autonomie – es handelt sich bei allen um kontrollierende Akteure. Die Werte der tatsächlichen Autonomie liegen zwischen 0,014 (Azubi) und 0,130 (Werkstückträger 1 und Werkstückträger 2), die Dezentralität des Prozessschrittes beträgt 0,703. Tabelle 4.11 fasst die Ergebnisse zusammen.

4.7.2 Ermittlung der Kennwerte des Prozesses

Der aus den vorher beschriebenen Prozessschritten bestehende Prozess wird durch den Autonomie Index AI sowie die Produktionskennzahl beschrieben.

Autonomie Index | Dezentralität des Prozesses

PS	Prozess	# a	# $c_{a,ps} > 0$	# $d_{a,ps} > 0$	D_{ps}
1	Schleifen	12	12	8	0,768
2	Beschriften	9	9	4	0,529
3	Färberei	9	8	6	0,721
4	Qualitätskontrolle	6	5	5	0,703

Tab. 4.12: Übersicht über die Dezentralitätswerte der Prozessschritte sowie des Prozesses, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

$$AI = \frac{\sum D_{ps}}{n_{ps}} = \frac{2,721}{4} = 0,680$$

In Tabelle 4.12 sind die vier die Prozessschritte beschreibenden Dezentralitätswerte angegeben. Es ist ersichtlich, dass diese deutlich über den Werten des zentralen Simulationsexperimentes (siehe Tabelle 4.6) liegen. Der resultierende Autonomie Index $AI_{dezentral} = 0,680$ ist damit deutlich höher als der entsprechende Wert aus dem zentralen Simulationsexperiment ($AI_{zentral} = 0,175$). Das Ergebnis dieses Vergleichs entspricht den Erwartungen an das erstellte Modell.

Produktionskennzahl zur Nutzenbewertung

Analog zum zentral gesteuerten Simulationsexperiment sind in Tabelle 4.13 die durchschnittliche Durchlaufzeit sowie die Standardabweichung der 20 Simulationenläufe des dezentralen Simulationsexperiments dargestellt (die vollständige Auflistung der Werte befindet sich im Anhang in Tabelle E.1). Die Zeitvorgabe beim Eilauftrag konnte in 17 von 20 Simulationenläufen erreicht werden. Die Standardabweichung liegt mit fünf bzw. zwei Sekunden deutlich unter der des zentralen Simulationsexperiment. Das dezentrale Simulationsexperiment weist somit eine höhere Robustheit auf.

	Auftrag	
Simulationslauf	1	2
Durchschnitt	3'02"	2'14"
Standardabweichung σ	0'05"	0'02"

Tab. 4.13: Zusammenfassende Kennzahlen der Durchlaufzeiten der Werkstückträger je Simulationslauf (n=20), Simulationsexperiment 2 (dezentral)

4.8 Vergleich der Szenarien und zusammenfassende Betrachtung

In den vorherigen Abschnitten wurde das in dieser Arbeit erstellte Bewertungsmodell in zwei Simulationsexperimenten, welche einen vierstufigen Produktionsprozess, einmal mit einer zentralen und einmal mit einer dezentralen Produktionssteuerung darstellen, angewendet. Dafür wurden im Zentrum Industrie 4.0 der gleiche Produktionsprozess mit einer zentralen und einer dezentralen Produktionssteuerung umgesetzt. Durch die Ergebnisse soll die praktische Anwendbarkeit des Modells validiert werden. Es ist notwendig, dass die erzielten Ergebnisse mit den erwarteten Ergebnissen übereinstimmen. In Tabelle 4.14 sind die relevanten Kennwerte beider Szenarien aufgeführt. Der Erstellung der Szenarien liegen die folgenden Annahmen zugrunde (siehe auch Tabelle 3.2):

- Dezentral gesteuerte Produktionsprozesse haben eine höhere Anzahl an der Kommunikation beteiligten Akteuren als in einem vergleichbaren zentral gesteuerten Produktionsprozess ($\#c_{a,ps} > 0$).
- Die Entscheidungsfindung ist bei dezentral gesteuerten Produktionsprozessschritten auf mehr Akteure aufgeteilt als bei zentral gesteuerten Produktionsprozessschritten. Das bedeutet insbesondere, dass die Anzahl der Akteure, die mindestens eine relevante Entscheidung treffen können, bei dezentral gesteuerten Prozessschritten höher ist ($\#d_{a,ps} > 0$).

Folgende Erwartungen an das Bewertungsmodell sind zu überprüfen:

- Prozessschrittebene: Die Homogenität der tatsächlichen Autonomie der Akteure ist bei einem dezentral gesteuerten Prozessschritt höher als bei einem zentral gesteuerten (D_{ps}).
- Prozessebene: Der Autonomie Index AI steigt bei steigender Dezentralität des Prozesses.

Die in der Tabelle aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass die berechnete Dezentralität der Prozessschritte D_{ps} bei allen vier Prozessschritten im dezentralen Simulationsexperiment deutlich höher ist als im zentralen Fall. Ebenso verhält es sich mit dem den Prozess beschreibenden Autonomie Index AI. Es konnte somit gezeigt werden, dass das aufgestellte Bewertungsmodell in der simulationsbasierten Überprüfung den Erwartungen entspricht.

Weiterhin wird davon ausgegangen, dass eine dezentrale Produktionssteuerung helfen kann, auf unvorhergesehene Ereignisse adäquat zu reagieren und robuste Prozesse zu schaffen. Beide Annahmen wurden in der Simulation bestätigt. Allerdings ist dieses auch auf den Simulationsprozess an sich zurückzuführen. Eine Anwendung des Modells in realen Produktionsprozessen und ein Vergleich der erzielten Ergebnisse bieten eine Möglichkeit, um diese These zu untermauern. Diese Analyse wird in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Sie kann Teil eines weiteren Forschungsvorhabens sein.

PS	zentral							dezentral								
	$\#a$	$\#c_{a,ps} > 0$	$\#d_{a,ps} > 0$	$\#R_{a,ps} > 0$	$maxC_{a,ps}$	$maxd_{a,ps}$	$maxR_{a,ps}$	D_{ps}	$\#a$	$\#c_{a,ps} > 0$	$\#d_{a,ps} > 0$	$\#R_{a,ps} > 0$	$maxC_{a,ps}$	$maxd_{a,ps}$	$maxR_{a,ps}$	D_{ps}
1	8	7	2	2	0,536	0,714	0,332	0,436	12	12	8	8	0,556	0,143	0,076	0,768
2	6	5	1	1	0,900	1,000	0,900	0,051	9	9	4	4	0,750	0,333	0,250	0,529
3	8	7	3	1	0,762	1,000	0,762	0,127	9	8	6	6	0,407	0,250	0,102	0,721
4	4	4	1	1	0,833	1,000	0,833	0,087	6	5	5	5	0,650	0,200	0,130	0,703
AI	0,175							0,680								
DLZ σ	3'07" (Auftrag 1, Normaler Auftrag) 12"							3'02" (Auftrag 1, Normaler Auftrag) 5"								
	3'05 (Auftrag 2, Eilauftrag) 15"							2'14" (Auftrag 2, Eilauftrag) 2"								

Tab. 4.14: Vergleich wichtiger Kennwerte des zentralen und dezentralen Simulationsexperiments

Kapitel 5

Validierung in der Praxis

Im vorherigen Kapitel 4 wurde anhand eines Prozesses mit vier Prozessschritten und insgesamt 13 an der Ausführung beteiligten Akteuren das in Kapitel 3 erarbeitete Bewertungsmodell in einer Simulationsstudie im Zentrum Industrie 4.0 validiert. In der Praxis bestehen Produktionsprozesse häufig jedoch aus deutlich mehr Prozessschritten, zudem ist eine höhere Anzahl an Akteuren an der Leistungserstellung beteiligt. Ziel dieses Kapitels ist, die Anwendbarkeit des Modells auf umfangreichere Prozesse aufzuzeigen.

Dafür wird zunächst der zugrundeliegende Praxisprozess vorgestellt. Die Notwendigkeit von Regeln zur Berücksichtigung (nicht-autonomer) Informationsobjekte und technischer Akteure wird erläutert und die aufgestellten Regeln präsentiert. Es folgt die Anwendung des Bewertungsmodells auf den Prozess und die Darstellung der Ergebnisse. Im Anschluss wird auf Basis der Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen eine mögliche Prozessverbesserung vorgeschlagen. Das Kapitel schließt mit einem Fazit zur Anwendbarkeit des Bewertungsmodells in der Praxis.

5.1 Vorstellung des Praxisprozesses

Für die nachfolgende Analyse wird ein Prozess aus der variantenreichen Kleinserienfertigung eines großen deutschen Industrieunternehmens verwendet. Der Prozess besteht aus 13 Prozessschritten, an dem insgesamt 24 Akteure der drei Akteursklassen beteiligt sind. Der Materialtransport im Prozess erfolgt über Transportwagen, wobei einem Transportwagen genau ein Auftrag zugeordnet ist. In einigen Bereichen des Prozesses werden FIFO (First In First Out)-Linien verwendet. Der Prozess

beinhaltet Verzweigungen, teilweise können zudem Rücksprünge erforderlich sein. In einigen Fällen wird zudem ein Fremdfertiger eingebunden. Die Informationsweitergabe erfolgt über Informationsobjekte, welche in Form von auf Papier ausgedruckten Fertigungsaufträgen vorliegen. Ein Fertigungsauftrag (FAUF) besteht aus fünf unterschiedlichen Informationsobjekten.

Die folgenden Instanzen – klassifiziert nach Akteursklassen – sind am Prozess beteiligt:

- Mensch
 - Auftragskoordinator
 - Auftragsplaner
 - Disponent
 - Einkäufer
 - Fertigungskontrolleur
 - Fertigungssteuerer
 - Kommissionierer
 - Lackierer
 - Lagerist
 - Mitarbeiter Lager
 - Mitarbeiter Lagerbüro
 - Mitarbeiter Vertrieb
 - Mitarbeiter Warenverteilzentrum
 - Monteur
 - Prüfer
 - Versandmitarbeiter
 - Werker
- Betriebliches Anwendungssystem
 - SAP
 - TIDAS (Engineering Software)

- Fabriksoftware
 - Megamat
- Weitere, nicht-autonome Akteure
 - Bohrmaschine
 - Drehmaschine
 - Schleifmaschine
 - Transportwagen

5.2 Berücksichtigung nicht-autonomer Akteure und Informationsobjekte

Die Analyse des Praxisprozesses beruht auf einer umfangreichen Dokumentation des Prozesses in Form erweiterter ereignisgesteuerter Prozessketten (eEPK). Die Diagramme enthalten neben dem zeitlichen und logischen Ablauf, die für die Arbeitsschritte verantwortlichen menschlichen Akteure sowie die verwendeten Informationsobjekte und weitere verwendete technische, nicht-autonome Akteure. Für die Ableitung der Kommunikationsbeziehungen aus den eEPK wurden im ersten Schritt Annahmen getroffen, die nachfolgend erläutert werden.

- Bei der Verwendung betrieblicher Anwendungssysteme wird stets eine bidirektionale Kommunikation zwischen menschlichem Akteur und System angenommen, da sowohl vom Menschen Daten erfasst (System → Mensch) als auch Daten eingegeben (Mensch → System) werden. Eine Verfeinerung mit Angabe des verwendeten Moduls findet nicht statt.
- Die Kommunikation zwischen Menschen – beispielsweise bei der Übergabe des Transportwagens oder papier-basierten Informationsobjekten – wird stets eine bidirektionale Kommunikationsbeziehung angenommen. Diese kann beispielsweise als die Übermittlung von Zusatzinformationen zum Auftrag oder als Bestätigung, dass der übergebene Transportwagen angekommen ist, ausgeprägt sein.

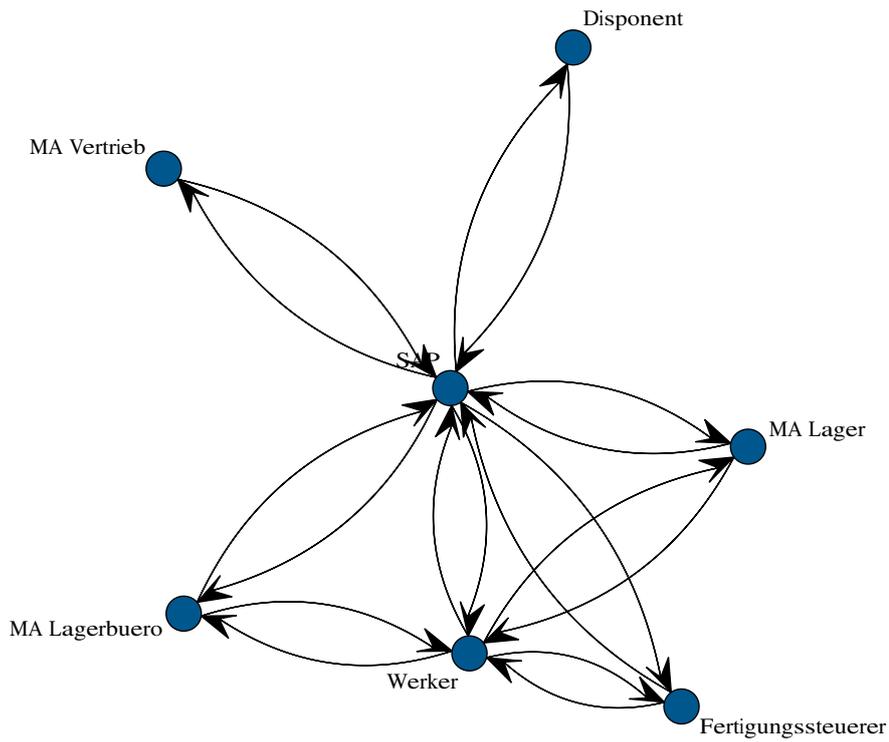


Abb. 5.3: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,6}$	$C_{a,6}$	$R_{a,6}$
Disponent	0,091	0,583	0,053
Fertigungssteuerer	0,045	0,667	0,030
MA Lager	0,045	0,667	0,030
MA Lagerbüro	0,045	0,667	0,030
MA Vertrieb	0,045	0,583	0,027
SAP	0,682	1,000	0,682
Werker	0,045	0,833	0,038

$$D_6 : 0,196$$

Tab. 5.1: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel

5.3.2 Analyse Prozesskennwerte

Analog zu dem vorgestellten Prozessschritt *Fertigung Komponente A* wurden die weiteren zwölf Prozessschritte des Praxisprozesses untersucht. Die zugehörigen Abbildungen und Diagramme sind im Anhang G (G.1 bis G.13) dargestellt. Tabelle 5.2 zeigt für jeden Prozessschritt die Anzahl der beteiligten autonomen Akteure ($\# a$), die Anzahl der Akteure mit einer positiven strukturellen ($\#c_{a,ps} > 0$) und Entscheidungsautonomie ($\#d_{a,ps} > 0$) sowie die Dezentralität des Prozessschrittes (D_{ps}). Weiterhin ist der die Dezentralität des Prozesses beschreibende Kennwert Autonomie Index AI berechnet.

Es ist ersichtlich, dass die Dezentralität der Prozessschritte variiert. Während Prozessschritt 4 (Lagervorbereitung) mit 0,065 die geringste Dezentralität aufweist, hat Prozessschritt 2 (Erstellung Fertigungsauftrag) mit 0,470 den höchsten Wert. Der resultierende, den Prozess beschreibende Autonomie Index beträgt 0,282. Insgesamt liegt demnach eine eher geringe Dezentralität vor, d. h. dass der Prozess weitestgehend von einer zentralen Instanz gesteuert wird.

PS	Prozessschritt	$\# a$	$\#c_{a,ps} > 0$	$\#d_{a,ps} > 0$	D_{ps}
1	Erstellung Planauftrag	3	3	3	0,084
2	Erstellung Fertigungsauftrag	5	5	5	0,470
3	Einkauf	3	3	3	0,138
4	Lagervorbereitung	2	2	2	0,065
5	Kommissionierung	4	4	3	0,353
6	Fertigung Komponente A	7	7	7	0,196
7	Fertigung Komponente B	7	7	4	0,161
8	Fertigung Komponente C	7	7	6	0,196
9	Fertigung Komponente D	7	7	7	0,173
10	Montage	3	3	2	0,214
11	Prüfung	5	5	5	0,213
12	Lackieren	5	5	4	0,277
13	Versand	4	4	4	0,373

Tab. 5.2: Kennzahlen der Prozessschritte des Praxisbeispiels

$$AI = \frac{\sum D_{ps}}{n_{ps}} = \frac{2,916}{13} = 0,224$$

5.4 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen als Basis für Prozessverbesserungen

Die visuelle Darstellung der Kommunikationsbeziehungen kann Anhaltspunkte für eine Verbesserung des Prozesses hinsichtlich der Dezentralität liefern. Neben sehr zentralen Akteuren können beispielsweise auch sehr weit entfernte Akteure, die nur über einen langen Kommunikationsweg erreichbar sind, identifiziert werden. Mit dem Wissen über die Möglichkeiten, welche die Integration cyber-physischer Elemente in den Produktionsprozess bietet, können auf diesen Erkenntnissen beruhende alternative Szenarien entwickelt werden. Dabei muss neben dem Informationsfluss und der Entscheidungsstruktur auch zwingend die Umsetzung des Materialflusses beachtet werden. Daher sind u. a. Überlegungen zur Mobilität von bearbeitenden Akteuren, Werkstücken und Werkzeugen und zur Gestaltung des Materialflusses (beispielsweise starre Transportwege, flexible Transportwege (von Mensch gesteuert/fahrerlos)) durchzuführen. Zur Analyse der Auswirkungen des neuen Szenarios bieten sich flexible Simulationsumgebungen, wie beispielsweise das Zentrum Industrie 4.0, an.

Der zuvor beschriebene Prozess wurde basierend auf den Visualisierungen der Kommunikationsbeziehungen analysiert und Prozessalternativen erarbeitet. Die folgenden Überlegungen liegen der Prozessverbesserung zugrunde:

- Transportwagen, Bohrmaschine, Drehbank und Säge sind durch die Integration intelligenter Technologien als autonome Akteure (Akteursklasse Fabriksoftware) gestaltet. Dadurch werden sie befähigt, aktiv an der Entscheidungsfindung teilzunehmen und die Vorteile der dezentralen Produktionssteuerung gefördert. Der starken – vom SAP-System ausgehenden – Zentralität der Steuerung wird entgegengewirkt.
- Der Transportwagen ist ein fahrerloses Transportsystem, das selbstständig den Weg zum nächsten Bearbeitungsschritt ermittelt. Eine manuelle Bedienung wird obsolet, so dass die am Prozess beteiligten menschlichen Akteure wertschöpfenden Tätigkeiten nachgehen können.

- Der Transportwagen ist mit einem bedienbaren Display ausgestattet, durch das seine Bedienung durch menschliche Akteure ermöglicht wird. Bearbeitungsergebnisse oder -anmerkungen können durch den Menschen direkt vor Ort dem Werkstück (1:1-Beziehung von Transportwagen und Werkstück) zugeordnet werden. Die Notwendigkeit der Eingabe von Daten über mit dem zentralen SAP verbundenen Betriebsdatenerfassungsterminals (BDE-Terminals) wird so vermieden.

In Anhang G (G.14 bis G.26) sind die Prozessschritte visualisiert und die Kennwerte aller 13 Prozessschritte dargestellt. Prozessschritt 6 wird nachfolgend genauer erläutert. Tabelle 5.5 stellt die Ergebnisse beider Prozessszenarien vergleichend dar.

Neben den genannten grundsätzlichen Annahmen zur Erstellung der Prozessalternativen wurden für Prozessschritt 6 (Fertigung Komponente A) die folgenden Änderungen durchgeführt.

- Das betriebliche Anwendungssystem SAP teilt dem Transportwagen die Auftragsdaten zu Beginn des Prozessschrittes mit. Nach Beendigung aller Arbeitsschritte meldet der Transportwagen dies an das System zurück. Material- und Informationsfluss werden so parallelisiert und die Anzahl der Kommunikationsbeziehungen vom bzw. zum SAP-System deutlich reduziert.
- Der Transportwagen terminiert selbstständig durch die Kommunikation mit den autonomen Akteuren Bohrmaschine Drehbank und Säge die Bearbeitungsreihenfolge und -zeitpunkte. Durch diese dezentrale Entscheidungsfindung kann stets die zum Betrachtungszeitpunkt vorliegende Situation berücksichtigt werden, wodurch sich gegenüber der Vorausplanung durch eine zentrale Steuerung die Flexibilität gegenüber Abweichungen erhöht.

Es resultiert das in Abbildung 5.4 dargestellte Diagramm sowie die in Tabelle 5.3 aufgeführten Kennwerte. Es wird ersichtlich, dass der Transportwagen eine deutlich zentrale Rolle einnimmt und die Zentralität des betrieblichen Anwendungssystems SAP an Zentralität verliert. Die ERP-Lösung hat nur noch bidirektionale Kommunikationsbeziehungen zu den drei menschlichen Akteuren Mitarbeiter Vertrieb, Fertigungssteuerer und Disponent, welche dem eigentlichen wertschöpfenden Fertigungsprozess vor- und nachgelagerte Aufgaben ausführen. Die Verbindung

zwischen SAP und Fertigung findet ausschließlich durch eine Kommunikationsbeziehung zum Transportwagen statt. Im Vergleich sind an dem verbesserten Prozess mehr Akteure an der Entscheidungsfindung beteiligt als im Ursprungsprozess. Das ist insbesondere durch die Ausstattung zuvor nicht autonomer Akteure mit den Fähigkeiten zur Informationsaufnahme, Entscheidungsfindung und Entscheidungsausführung begründet.

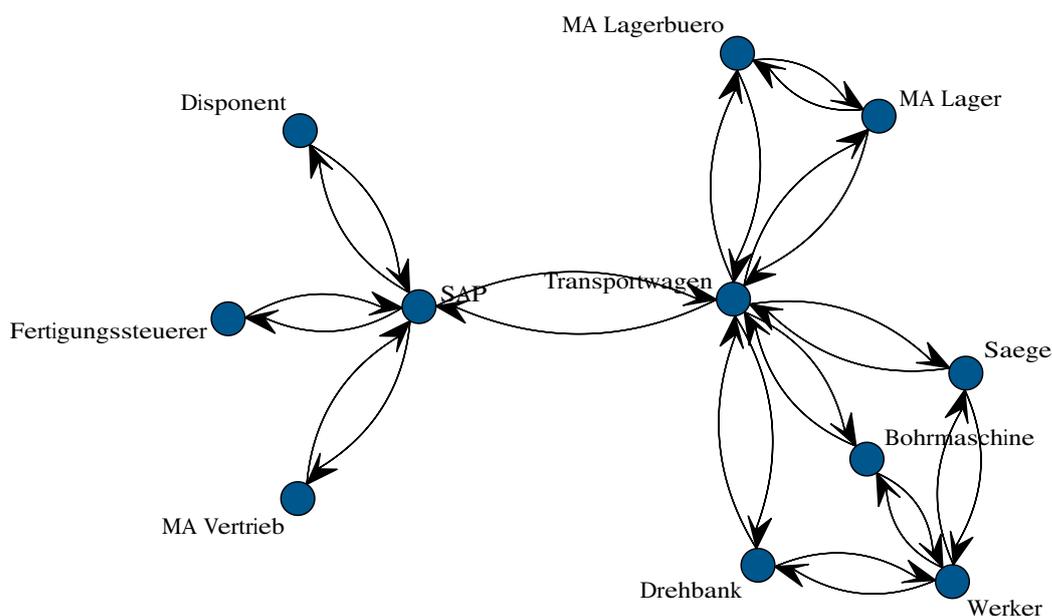


Abb. 5.4: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, überarbeitetes Praxisbeispiel

Tabelle 5.4 stellt die die Akteure und den Prozessschritt beschreibenden Kennwerte gegenüber. Die Akteurskennwerte sind im verbesserten Prozess homogener als im ursprünglichen Prozess. Weiter wird verdeutlicht, dass die Dezentralität des Prozessschrittes im Vergleich gestiegen ist. Die strukturelle- und Entscheidungsautonomie sowie die daraus resultierende tatsächliche Autonomie der Akteure sind ausgeglichener. Der Vergleich einer bewerteten Prozesskennzahl kann aufgrund fehlender Daten nicht durchgeführt werden.

5.4 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen als Basis für
Prozessverbesserungen

Akteur	$d_{a,6I}$	$c_{a,6I}$	$R_{a,6I}$
Bohrmaschine	0,037	0,550	0,020
Disponent	0,074	0,442	0,033
Drehbank	0,074	0,550	0,041
Fertigungssteuerer	0,037	0,442	0,016
MA Lager	0,037	0,533	0,020
MA Lagerbuero	0,037	0,533	0,020
MA Vertrieb	0,037	0,442	0,016
Saege	0,074	0,550	0,041
SAP	0,259	0,683	0,177
Transportwagen	0,296	0,800	0,237
Werker	0,037	0,525	0,019

$$D_{6I} : 0,556$$

Tab. 5.3: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, überarbeitetes Praxisbeispiel

Akteur	Ursprünglicher Prozess	Verbesserter Prozess
	$R_{a,6}$	$R_{a,6I}$
Bohrmaschine	0,000	0,020
Disponent	0,053	0,033
Drehbank	0,000	0,041
Fertigungssteuerer	0,030	0,016
MA Lager	0,030	0,020
MA Lagerbüro	0,030	0,020
MA Vertrieb	0,027	0,016
Säge	0,000	0,041
SAP	0,682	0,177
Transportwagen	0,000	0,237
Werker	0,038	0,019
Dezentralität	0,196	0,556

Tab. 5.4: Vergleich der Prozessergebnisse, Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel

PS	Original							Dezentral								
	$\#a$	$\#c_{a,ps} > 0$	$\#d_{a,ps} > 0$	$\#R_{a,ps} > 0$	$maxC_{a,ps}$	$maxd_{a,ps}$	$maxR_{a,ps}$	D_{ps}	$\#a$	$\#c_{a,ps} > 0$	$\#d_{a,ps} > 0$	$\#R_{a,ps} > 0$	$maxC_{a,ps}$	$maxd_{a,ps}$	$maxR_{a,ps}$	D_{ps}
1	3	3	3	3	1,000	0,882	0,882	0,084	3	3	3	3	1,000	0,882	0,882	0,084
2	5	5	5	5	0,875	0,484	0,363	0,470	5	5	5	5	1,000	0,419	0,419	0,437
3	4	4	4	4	1,000	0,789	0,789	0,138	4	4	4	4	1,000	0,524	0,524	0,353
4	2	2	2	2	1,000	0,983	0,983	0,065	3	3	3	3	1,000	0,400	0,400	0,684
5	4	4	3	3	1,000	0,789	0,482	0,353	5	5	5	5	1,000	0,400	0,400	0,476
6	7	7	7	7	1,000	0,682	0,682	0,196	11	11	11	11	0,800	0,296	0,237	0,556
7	7	7	4	4	0,789	0,914	0,724	0,161	11	11	11	11	0,800	0,296	0,237	0,556
8	7	7	6	6	1,000	0,682	0,682	0,196	10	10	10	10	0,778	0,308	0,239	0,559
9	7	7	7	7	1,000	0,714	0,714	0,173	10	10	10	10	0,778	0,320	0,249	0,548
10	3	3	2	2	1,000	0,882	0,662	0,214	4	4	4	4	1,000	0,471	0,314	0,608
11	5	5	5	5	1,000	0,682	0,682	0,213	6	6	6	6	1,000	0,227	0,227	0,652
12	5	5	4	4	0,750	0,750	0,563	0,277	6	6	5	5	0,767	0,400	0,280	0,552
13	4	4	4	4	0,833	0,750	0,458	0,373	5	5	5	5	0,875	0,500	0,271	0,571
AI	0,224							0,511								

Tab. 5.5: Vergleich wichtiger Kennwerte der beiden Szenarien des Praxisprozesses

5.5 Fazit

Die in diesem Kapitel durchgeführte Anwendung des Bewertungsmodells auf den Praxisprozess hat gezeigt, dass eine Übertragung auf umfangreiche Prozesse möglich ist. Dabei wurde die Notwendigkeit der Berücksichtigung nicht-autonomer Akteure motiviert und ein entsprechendes Regelwerk aufgestellt. Weiter wurde die Eignung der Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen als Grundlage für Prozessverbesserungen begründet.

Kapitel 6

Schlussbetrachtung und Ausblick

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vorliegenden Abhandlung zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich der Forschungsfragen reflektiert. Anschließend folgt eine kritische Würdigung der Arbeit sowie ein Ausblick mit Diskussion des weiteren Forschungsbedarfs.

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell zur Bestimmung der Dezentralität von Produktionsprozessen auf Basis der Kommunikations- und Entscheidungsstrukturen der beteiligten Akteure erarbeitet. Es stellt das wesentliche Artefakt dieser Arbeit da. Dafür werden basierend auf der Automatisierungspyramide zunächst die Akteursklassen *Mensch*, *Fabriksoftware* und *betriebliches Anwendungssystem* hergeleitet und die grundsätzliche Eignung derer Instanzen für die autonome Prozessausführung anhand von zehn notwendigen Eigenschaften begründet. Die Instanzen der Akteursklassen stellen im Weiteren die Grundlage für die Anwendung des erarbeiteten dreistufigen Modells dar.

Anschließend wird ein Verständnis für den Begriff der Dezentralität im Untersuchungsbereich der Produktionsprozesse geschaffen. Die strikte Trennung von kontrollierenden und ausführenden Akteuren wird hinterfragt und die Notwendigkeit einer dritten Akteursart hergeleitet. Basierend auf der möglichen Integration informationstechnischer, software-basierter mit mechanischen und elektronischen Kom-

ponenten im Rahmen cyber-physischer Systeme wird daher der selbstaufführende Akteur, der sowohl kontrollierende als auch ausführende Aufgaben übernimmt, motiviert. Als zweites Artefakt der Arbeit wird darauf basierend ein zweidimensionales Bewertungsschema für die Bewertung der Autonomie der Akteure erarbeitet. Dieses unterscheidet die strukturelle Autonomie und die Entscheidungsautonomie. Während die strukturelle Autonomie mittels der sozialen Netzwerkanalyse eine Bewertung des einzelnen Akteurs in der betrachteten Kommunikationsstruktur vornimmt, fokussiert die Entscheidungsautonomie die Aufteilung der Entscheidungsfindung auf die Akteure eines Prozessschrittes. Durch die Multiplikation beider Werte wird ein Kennwert erzeugt, welcher die tatsächliche Autonomie des Akteurs beschreibt. Dieser stellt das Ergebnis der ersten Stufe des Bewertungsmodells dar.

Durch die Anwendung der Zentralitäts-Formel von Freeman werden auf der zweiten Stufe die Akteurswerte zu einem den Prozessschritt charakterisierenden Dezentralitätswert aggregiert. Basis dafür bildet die Homogenität der Akteurswerte: je gleichmäßiger die Autonomie der Akteure verteilt ist, desto dezentraler ist der Prozessschritt. Im Gegensatz dazu steht ein zentrales Szenario, bei dem wenige Akteure eine hohe und die Großzahl der Akteure eine geringe tatsächliche Autonomie haben – die Werte weisen hier eine hohe Heterogenität auf. In der dritten Stufe werden die Dezentralitätswerte der Prozessschritte zu einem die Dezentralität des Prozesses beschreibenden Kennwert – dem Autonomie Index – aggregiert.

Im nächsten Schritt wird die Anwendung des Bewertungsmodells simulationsbasiert im Zentrum Industrie 4.0 überprüft. Dafür werden ein zentrales und ein dezentrales Szenario eines Produktionsprozesses definiert und simuliert. Die Kommunikationsstruktur wird anhand des Kommunikationsprotokolls ausgewertet und die Entscheidungsstruktur ermittelt. Als unabhängige, den Prozess beschreibende Kennzahl wird zudem die Durchlaufzeit erhoben. Durch die mehrfache Ausführung der Simulation wird ein Durchschnittswert gebildet, der belastbarer als ein nur einmal aufgenommener Wert ist. Zudem kann durch die Berechnung der Standardabweichung eine Aussage über die Robustheit des Simulationsprozesses getroffen werden. Im Ergebnis wird deutlich, dass das Bewertungsmodell die erwarteten Ergebnisse hinsichtlich der Dezentralität von Prozessschritten und Prozess liefert. Durch die Anwendung des Bewertungsmodells an einem umfangreichen Industrieprozess wird die praktische Anwendbarkeit dargelegt.

6.2 Beitrag zur Forschung

Mit den Ergebnissen der Arbeit wird eine – gemäß der Grundsätze der Wissenschaftsdisziplin Wirtschaftsinformatik – gestaltungs-orientierte Anwendung der sozialen Netzwerkmethodologie auf den Erkenntnisgegenstand intelligent vernetzter Produktionsprozesse im Rahmen von Industrie 4.0 vorgenommen. Es wird ein Modell erarbeitet, das die Bewertung des Grades an Dezentralität von Produktionsprozessen basierend auf der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur der beteiligten Akteure ermöglicht. So wird ein Beitrag zur systematischen Bewertung dezentraler Steuerungsstrukturen und deren Auswirkungen auf den Prozess geleistet. Damit legt die Arbeit eine Grundlage für auf ihr aufbauende Analysen zum prozessindividuellen Nutzen einer dezentralen Steuerung sowie einer sich daraus ergebenden Ableitung allgemeingültiger Beobachtungen, beispielsweise hinsichtlich des Nutzens der dezentralen Steuerung in unterschiedlichen Fertigungs- und Organisationstypen oder Branchen.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit werden nachfolgend die in Kapitel 1.1.2 aufgestellte Forschungsfrage sowie die sich daraus ergebenden weiteren aufgeführten Fragestellungen beantwortet und im Anschluss der Beitrag zur Forschung beschrieben.

Wie lässt sich die Dezentralität von Produktionsprozessen bewerten?

Die Dezentralität von Produktionsprozessen kann anhand des wesentlichen Artefakts dieser Arbeit – eines dreistufigen Bewertungsmodells – analysiert werden. Dabei werden auf der ersten Stufe die strukturelle Position jedes Akteurs auf Basis des Closeness-Kennwertes der sozialen Netzwerkanalyse ermittelt sowie deren Anteil an der Entscheidungsfindung bestimmt. Die Ergebnisse werden dann auf der nächsten Stufe in einen die Dezentralität des Prozessschrittes beschreibenden Wert integriert und abschließend auf Stufe drei in den Prozesskennwert Autonomie Index zusammengefasst.

(1) Was bedeutet Dezentralität von Produktionsprozessen?

Kennzeichnend für dezentrale Produktionsprozesse sind hierarchische Steuerungsstrukturen sowie eine verteilte Entscheidungsfindung, die durch eine Anzahl von Akteuren ausgeführt wird, die jeweils über einen positiven Entscheidungsspielraum verfügen, also selbstständig über für den Prozessschritt relevante Fragestellungen entscheiden können und dürfen. Hierarchieebenen und damit verbundene Kontrollflüsse werden aufgelöst. Sowohl die strukturelle Position der Akteure als auch deren Entscheidungskompetenz sind in der dezentralen Steuerung homogen – in der perfekten dezentralen Steuerung gibt es eine Gleichverteilung – auf die Akteure verteilt. Damit steht diese Steuerungsform im Gegensatz zur zentralen Steuerung, in der eine heterogene Verteilung der genannten Faktoren charakterisierend ist (im Extremfall gehen alle Steuerungsbefehle von einer Instanz aus, die auch alle Entscheidungen trifft).

(2) Welcher Zusammenhang besteht zwischen Autonomie und Dezentralität?

Autonomie bezeichnet eine mögliche Eigenschaft von Akteuren, die die selbstständige Informationsaufnahme, Entscheidungsfindung und Entscheidungsdurchführung voraussetzt. Dezentralität beschreibt eine Steuerungsstruktur von Produktionsschritten und -prozessen. Autonome Akteure werden in dieser Arbeit als eine notwendige Voraussetzung für die Umsetzung der dezentralen Produktionssteuerung verstanden.

(3) Welches sind die relevanten autonomen Akteure in dezentral gesteuerten Produktionssystemen und wie kann deren Autonomie operationalisiert werden? Welche Faktoren müssen dabei berücksichtigt werden?

Die relevanten autonomen Akteure sind Instanzen der drei Akteursklassen *Mensch*, *betriebliche Anwendungssysteme* und *Fabriksoftware*, die aus der klassischen Automatisierungspyramide abgeleitet und hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Möglichkeit zur Erfüllung der Voraussetzungen von Autonomie untersucht werden. Die Klasse Mensch beinhaltet alle an der Prozesssteuerung beteiligten Personen, die Klasse betriebliche Anwendungssysteme umfasst Softwarelösungen zur Planung und Steuerung betrieblicher Prozesse, wie beispielsweise MES- und ERP-Lösungen. Durch

die Integration von Software in für die Produktion relevante Hardware (z. B. Maschinen, Anlagen, Werkzeuge, Werkstücke, Transportbehälter und Transportfahrzeuge) wird die Akteursklasse Fabriksoftware motiviert.

Für die Operationalisierung der Autonomie der Akteure werden neben ihrer strukturellen Position auch die Verteilung der Entscheidungskompetenz betrachtet. Beide Faktoren werden multiplikativ in dem Kennwert *tatsächliche Autonomie* zusammengefasst. Verzerrungseffekte durch die Integration bzw. Auslagerung von Entscheidungs- und Ausführungskompetenzen werden vermieden und eine umfassende Bewertung ermöglicht. Die Herangehensweise zur Ermittlung sowie der Wert selbst stellen wesentliche Ergebnisse der Arbeit dar.

- (4) Wie kann die Kommunikationsstruktur autonomer Akteure operationalisiert werden?

Die strukturelle Position eines Akteurs wird basierend auf der Kommunikationsstruktur des Prozessschrittes ermittelt. Dafür wird die soziale Netzwerkanalyse als Methode aus dem Methodenspektrum der Wirtschaftsinformatik angewendet. Es wird dargelegt, dass der Kennwert *Harmonic Closeness* für die Bewertung der strukturellen Autonomie von Akteuren hinsichtlich des aufgestellten Verständnis von Dezentralität von Produktionsprozessen geeignet ist. Dieser Wert operationalisiert die Autonomie auf Grundlage der geodätischen Distanzen zwischen dem betrachteten Akteur und allen anderen, direkt und indirekt mit ihm verbundenen Akteuren. Die strukturelle Autonomie eines Akteurs steigt bei sinkender Entfernung zu den anderen Akteuren im Netzwerk. Dabei ermöglicht der Kennwert auch die Betrachtung von nicht vollständigen und gerichteten Kommunikationsstrukturen.

- (5) Wie kann die Entscheidungsstruktur autonomer Akteure operationalisiert werden?

Für die Ermittlung der Entscheidungsstruktur wird der Anteil an der Gesamtzahl der Entscheidungsalternativen je Akteur betrachtet. Dazu werden zunächst die für den Prozessschritt relevanten Entscheidungen und im Anschluss die jeweils verfügbaren Alternativen ermittelt. Durch Summierung wird die Gesamtanzahl der Alternativen bestimmt. Das Verhältnis von der Anzahl an Entscheidungsalternativen, über die der betrachtete Akteur im betrachteten Prozessschritt verfügt, zur

ermittelten Gesamtanzahl entspricht der Entscheidungsautonomie. Die Entscheidungsautonomie stellt neben der strukturellen Autonomie den zweiten Faktor für die Berechnung der tatsächlichen Autonomie von Akteuren dar, die die Grundlage für die Ermittlung der Dezentralität des Prozesses bildet.

- (6) Wie können Akteure hinsichtlich ihrer Bedeutung in der Kommunikations- und Entscheidungsstruktur klassifiziert werden?

Basierend auf der Differenzierung von struktureller und Entscheidungsautonomie wird eine Vierfeld-Matrix (siehe Abbildung 6.1) entwickelt. Sie unterscheidet jeweils eine neutrale sowie eine positive strukturelle $C_{a,ps}$ und Entscheidungsautonomie $d_{a,ps}$, wodurch vier Akteurstypen resultieren.

Die Matrix ermöglicht eine Differenzierung der Akteure und steigert so das Verständnis über die Kommunikations- und Entscheidungsstruktur des Prozessschrittes.

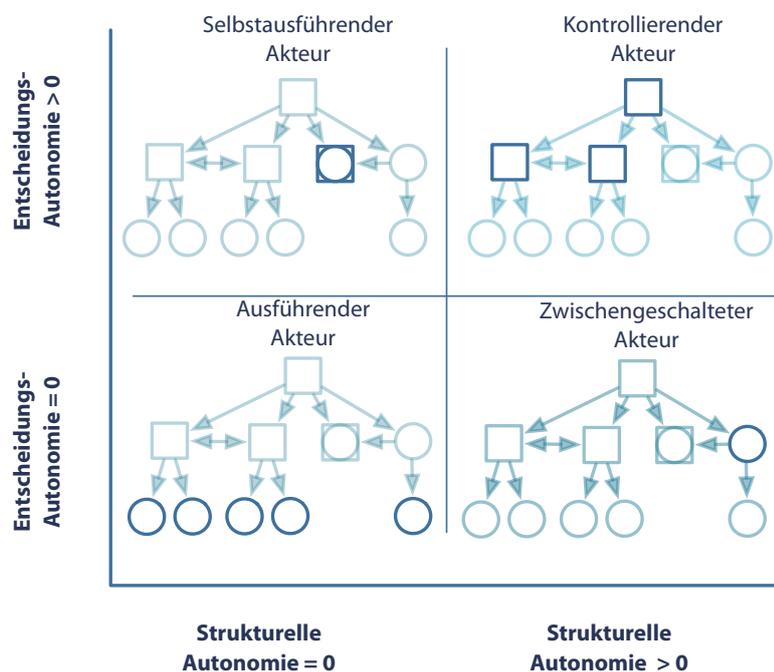


Abb. 6.1: Klassifikation von Akteuren nach struktureller und Entscheidungsautonomie

6.3 Kritische Würdigung

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Modell zur Bewertung der Dezentralität von Produktionsprozessen basierend auf der Kommunikationsstruktur der beteiligten Akteure. Die Validierung des Modells wird mittels einer Simulationsstudie im Zentrum Industrie 4.0 unter Laborbedingungen durchgeführt. Neben der automatisierten Aufnahme von Kommunikationsbeziehungen der Instanzen der nicht-menschlichen Akteursklassen betriebliche Anwendungssysteme und Fabriksoftware, kann dort die Interaktion der beteiligten Menschen aufgrund der überschaubaren räumlichen Ausdehnung vollständig ermittelt werden.

Bei einer Überführung in eine reale Produktionsumgebung lässt sich nicht ausschließen, dass die Datenerfassung unvollständig ist. Erfahrungsgemäß ist die Interaktion menschlicher Akteure untereinander als auch mit den technischen Komponenten des Produktionsprozesses von auf die individuelle Situation reagierende Handlungen geprägt. Diese können kurze Absprachen und Zurufe oder auch kleinere manuelle Eingriffe in den Prozessablauf, wie beispielsweise das Ausrichten eines Werkstücks sein. Eine vollständige Überwachung erfordert insbesondere bei räumlich verteilten Prozessen einen großen Aufwand – entweder durch menschliche Beobachter oder durch technische Instrumente wie Kameras und Mikrophone, wobei hier mit rechtlichen Einschränkungen hinsichtlich der Überwachung einzelner Personen sowie deren Arbeitsleistung zu rechnen ist.

Eine weitere Herausforderung der praktischen Anwendung betrifft die Operationalisierung der Entscheidungsautonomie. Sowohl die vollständige Ermittlung der Entscheidungsalternativen, als auch deren Zuweisung zu den beteiligten Akteuren ist in der Realität nur schwer realisierbar. Gründe sind insbesondere Entscheidungen mit kontinuierlichen Werten, wie beispielsweise Bearbeitungsdauern, welche theoretisch eine unendliche Anzahl an Entscheidungsalternativen beinhalten. Es ist notwendig, eine sinnvolle Diskretisierung vorzunehmen – bei falscher Wahl wird das Ergebnis des Modells verfälscht. Auch bei der Zuordnung der Akteure zu den Entscheidungsalternativen sind Herausforderungen zu erwarten, insbesondere weil eine eindeutige Zuordnung der Entscheidungen nicht immer möglich ist.

Eine weitere Restriktion der praktischen Umsetzbarkeit ist die Realisierung verschiedener Szenarien eines realen Prozesses in der Fabrik, da bei der Umstrukturierung jeweils ein hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand zu erwarten ist. Durch die

Szenarien können die Auswirkungen verschiedener Steuerungsstrategien verglichen werden. Es kommt zudem zu Stillständen der Produktion, wodurch weitere finanzielle Verluste entstehen. Insbesondere bei bestehenden Prozessen (Brownfield) liegt der Nutzen des Bewertungsmodells daher in einer nachträglichen Bewertung durchgeführter Restrukturierungsmaßnahmen. Bei neu geplanten Prozessen (Greenfield) hingegen ist auch eine Nutzung des Modells als eine Hilfestellung bei der Ausgestaltung der Prozesssteuerung denkbar.

Die Grenzen des entwickelten Modells liegen folglich in der Ermittlung der realen Eingangsdaten sowie dem hohen Aufwand bei der Umsetzung verschiedener Szenarien eines Produktionsprozesses. Durch eine Untersuchung der Prozesse in geeigneten Simulationsumgebungen wie dem Zentrum Industrie 4.0 können die Risiken gemindert werden. Voraussetzung ist jedoch auch hier eine geeignete Abstraktion des realen Prozesses sowie die darauf basierende Modellbildung.

6.4 Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit ergibt sich ein weiterführender möglicher Forschungsbedarf, welcher insbesondere die praktische Anwendung des Modells in einem realen Produktionsprozess mit den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Herausforderungen betrifft. Ein weiterer Forschungsansatz besteht in der Anwendung des Modells für verschiedenartige Produktionsprozesse – beispielsweise klassifiziert nach unterschiedlichen Fertigungs- und Organisationstypen oder Branchen. Basierend auf einem Vergleich der Ergebnisse kann die Frage untersucht werden, ob der Nutzen dezentraler Steuerungsstrukturen anhand bestimmter Kriterien klassifiziert werden kann und ob sich Best Practice ableiten lassen.

In diesen Zusammenhang ist auch die vergleichende Untersuchung mit weiteren Bewertungsmodellen möglich.

Anhang A

Überprüfung der Hauptgruppen
der sozialen Netzwerkanalyse
hinsichtlich der Erfüllung der
Anforderungen an den Kennwert

	Szenario 1				Szenario 2				Szenario 3				Szenario 4				Szenario 5			
Akteur	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Str. Autonomie	1	1	1	1	1	0	0	0	0,61	0,50	0,33	0	0,50	0,30	0	0,50	0,83	0,33	0	0
Def. 1	X				X															
Def. 2					X				X				X							
Def. 3					X				X											
Def. 4					X								X							

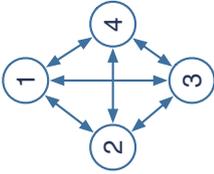
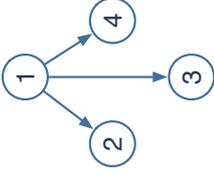
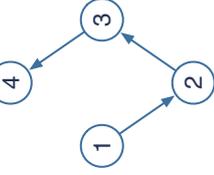
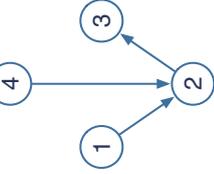
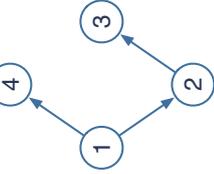
Tab. A.1: Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Closeness

	Szenario 1				Szenario 2				Szenario 3				Szenario 4				Szenario 5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Akteur	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Zent.	1	1	1	1	0	1	0	0	0,61	0,50	0,33	0	0,50	0,30	0	0,50	0,83	0,33	0	0
Def. 1	X				X				-											
Def. 2					X				X				X						X	
Def. 3					-				-				-						-	
Def. 4					-				X				-						-	

Tab. A.2: Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Degree

	Szenario 1				Szenario 2				Szenario 3				Szenario 4				Szenario 5			
Akteur	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Zent.	1	1	1	1	0	1	0	0	0,61	0,50	0,33	0	0,50	0,30	0	0,50	0,83	0,33	0	0
Def. 1	-				-				-				-							
Def. 2	-				-				-				-							
Def. 3	-				-				-				-							
Def. 4	-				-				-				-							

Tab. A.3: Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Betweenness

	Szenario 1				Szenario 2				Szenario 3				Szenario 4				Szenario 5			
																				
Akteur	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Zent.	1	1	1	1	0	1	0	0	0,61	0,50	0,33	0	0,5	0,33	0	0,50	0,83	0,33	0	0
Def. 1	-								-				-							
Def. 2					X				-				-							
Def. 3					-				-				-							
Def. 4					-				X				-							

Tab. A.4: Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Eigenvektor

Anhang B

Bewertung vorhandener Action-Arten

action	Beschreibung	Beteiligte Akteure
client_log	Log-Nachricht (Click-Events)	Bedienoberfläche, Log-Service
cycle_stop	Werkstückträger am Ende des Durchlaufs anhalten.	Control Center, Werkstückträger
deregister_piece	Werkstückträger abmelden (Freigabe der Position auf dem Transportsystem)	Werkstückträger, Transportsystem
machine_online	Neue Maschine registriert	Server, Control Center
machine_state_update	Maschinenstatus hat sich geändert	Server, Control Center
movement_operation_finished	Rückmeldung: Ziel erreicht	Transportsystem, Werkstückträger
new_priority_lot	Benachrichtigung über neues Prioritätslos (Start des Lernszenarios)	Lernszenario-Ablaufsteuerung, Tablet Meister
pause	Video anhalten	Maschine, Maschinenvisualisierung
piece_offline	Werkstückträger abgemeldet	Transportsystem (Server), Control Center
piece_online	Neuer Werkstückträger registriert	Transportsystem (Server), Control Center
piece_state_update	Zustand des Werkstückträgers hat sich geändert	Transportsystem (Server), Control Center
play	Video start	Maschine, Maschinenvisualisierung
priority_lot_planned	Prio-Auftrag wurde eingeplant.	Tablet Meister, Lern-Ablaufsteuerung (Control Center)
register_control_center	Anmeldung als Control Center (sprich: abonniere Statusinformationen, z.B. 'machine_state_update')	Control Center, Server
register_machine	Anmeldung als Maschine, mit Angabe von Position und Typ	Maschine, Server
register_piece	Werkstückträger registrieren, Position auf dem Transportsystem blockieren	Werkstückträger, Transportsystem
robo_start	Roboterprogramm starten	Bedienoberfläche, Roboter
robo_stop	Rückmeldung: Roboterprogramm abgeschlossen	Roboterarm, Roboter-Bedienoberfläche
start_tutorial	Geführten Ablauf auf der Maschinenoberfläche starten	Lern-Ablaufsteuerung (Control Center), Maschine
start_tutorial_activation	Geführten Ablauf <i>Einbinden von Schleifmaschine 2</i> starten	Lern-Ablaufsteuerung (Control Center), Schleifmaschine 2
start_tutorial_skype	Geführten Ablauf <i>Produktionsplaner anrufen</i> starten	Lern-Ablaufsteuerung (Control Center), Schleifmaschine 1
status_00	Icon Handlungsbedarf anzeigen	AR-Brille
status_off	Nichts anzeigen	AR-Brille
update_machine_status	Status der Maschine hat sich geändert	Maschine, Server
websocket_connected	Eine Verbindung zum Server wurde hergestellt	Server, Control Center
websocket_disconnected	Eine Verbindung zum Server wurde getrennt	Server, Control Center

Tab. B.1: Für die Auswertung der Kommunikationsstruktur relevante Action-Arten

action	Beschreibung	Beteiligte Akteure
calibration_pb_finished	Geführte Einrichtung der Maschine abgeschlossen	Pulverbeschichtungs-Maschine, Lernszenario-Ablaufsteuerung
calibration_q_finished	Geführte Einrichtung der Maschine abgeschlossen	Qualitätskontrolle-Maschine, Lernszenario-Ablaufsteuerung
finish_process	Bearbeitungsschritt abgeschlossen, Werkstückträger kann weiterfahren	Maschine, Werkstückträger
grinding_machine_faulty	Schleifmaschine fehlerhaft	Lernszenario-Ablaufsteuerung, Tablet
grinding_machine_maintenance_assigned	Wartung der Schleifmaschine zugewiesen an Werker	Tablet, Lernszenario-Ablaufsteuerung
grinding_machine_maintenance_scheduled	Wartung der Schleifmaschine geplant	Tablet, Lernszenario-Ablaufsteuerung
inscription_configured	Geführte Einrichtung der Maschine abgeschlossen	Maschine Beschriftung (Roboter), Lernszenario-Ablaufsteuerung
maintain_grinding_machine	Benachrichtigung über Wartungsauftrag an Schleifmaschine	Lernszenario-Ablaufsteuerung, Tablet
move_to_position	Fahrauftrag von aktueller Position zu angegebener Zielposition	Werkstück, Transportsystem
notification_configure_inscription	Nachricht an Azubi	Planungssystem, Azubi
notification_configure_machines	Nachricht an Meister	Planungssystem, Werker
priority_process_cleared	Freigabe eines Auftrags	Meister, Werkstück/Planungssystem
request_machine	Anfrage nach freien Maschinen vom Typ X. Oder die Antwort auf selbige Anfrage,	Werkstückträger, Server
sm1_failed	Schleifmaschine fehlerhaft	Schleifmaschine 1, Lernszenario-Ablaufsteuerung
sm1_refilled	Kühlmittel nachgefüllt	Schleifmaschine 1, Lernszenario-Ablaufsteuerung
sm2_activated	Rückmeldung von Maschine, wenn Aufgabe (= Freigabe von Schleifmaschine 1) erledigt	Schleifmaschine 2, Lernszenario-Ablaufsteuerung Tablet, Control Center
!start_fail	Wie 'start_process', nur dass die Maschine nach der Bearbeitung in den Fehlerzustand wechselt.	Werkstück, Schleifmaschine 1
start_process	für Start Prozessschritt	Werkstückträger, Maschine
status_g(grün)	Statusampel grün	Maschine, Visualisierung
status_r(rot)	Statusampel rot	Maschine, Visualisierung
status_y(yellow)	Statusampel gelb	Maschine, Visualisierung

Tab. B.2: Für die Auswertung der Kommunikationsstruktur nicht relevante Action-Arten

Anhang C

Prozessdarstellungen

Simulationsexperimente 1 und 2
(Swimlane-Diagramme)

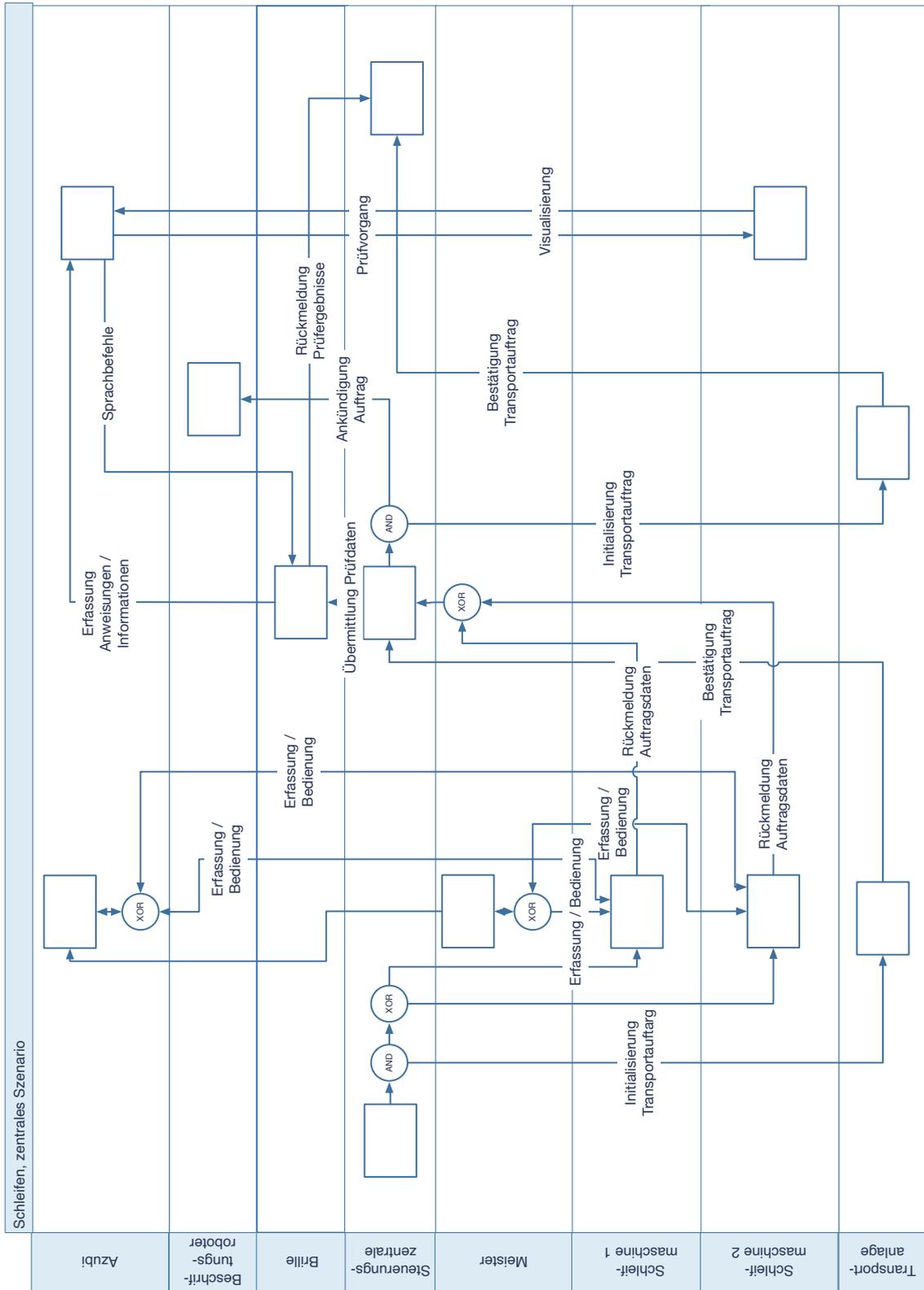


Abb. C.1: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 1 (zentral)

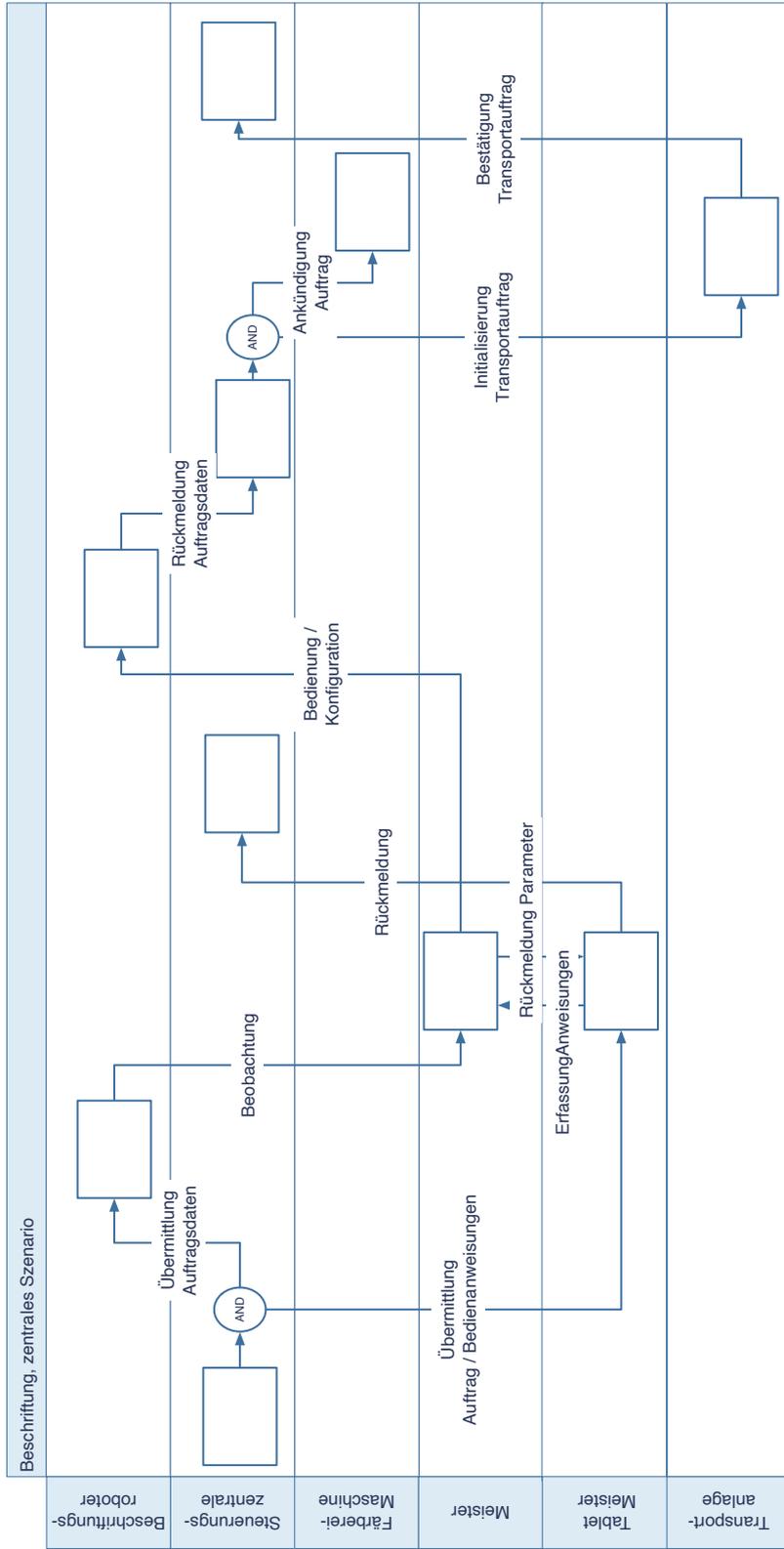


Abb. C.2: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 1 (zentral)

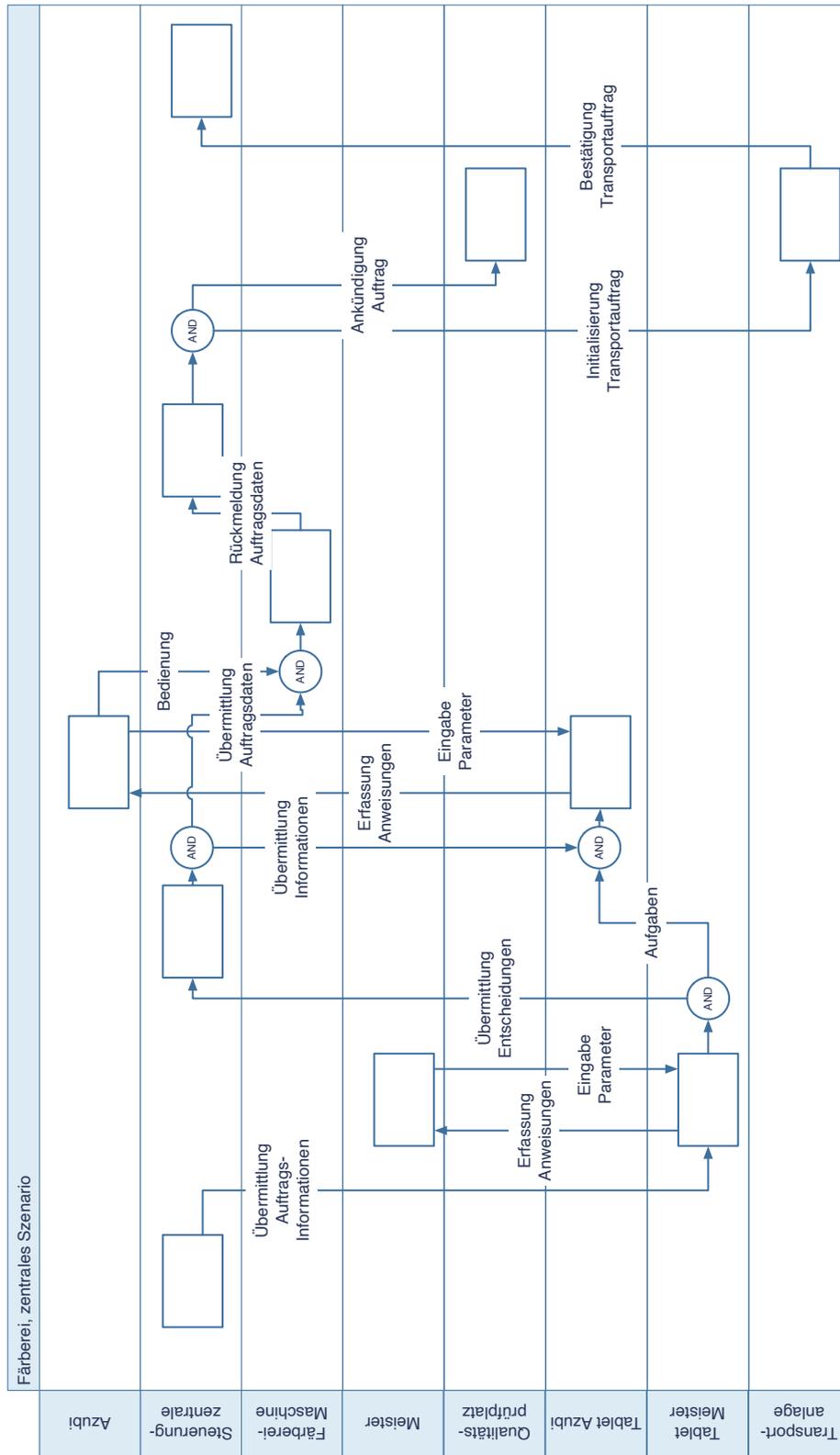


Abb. C.3: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 1 (zentral)

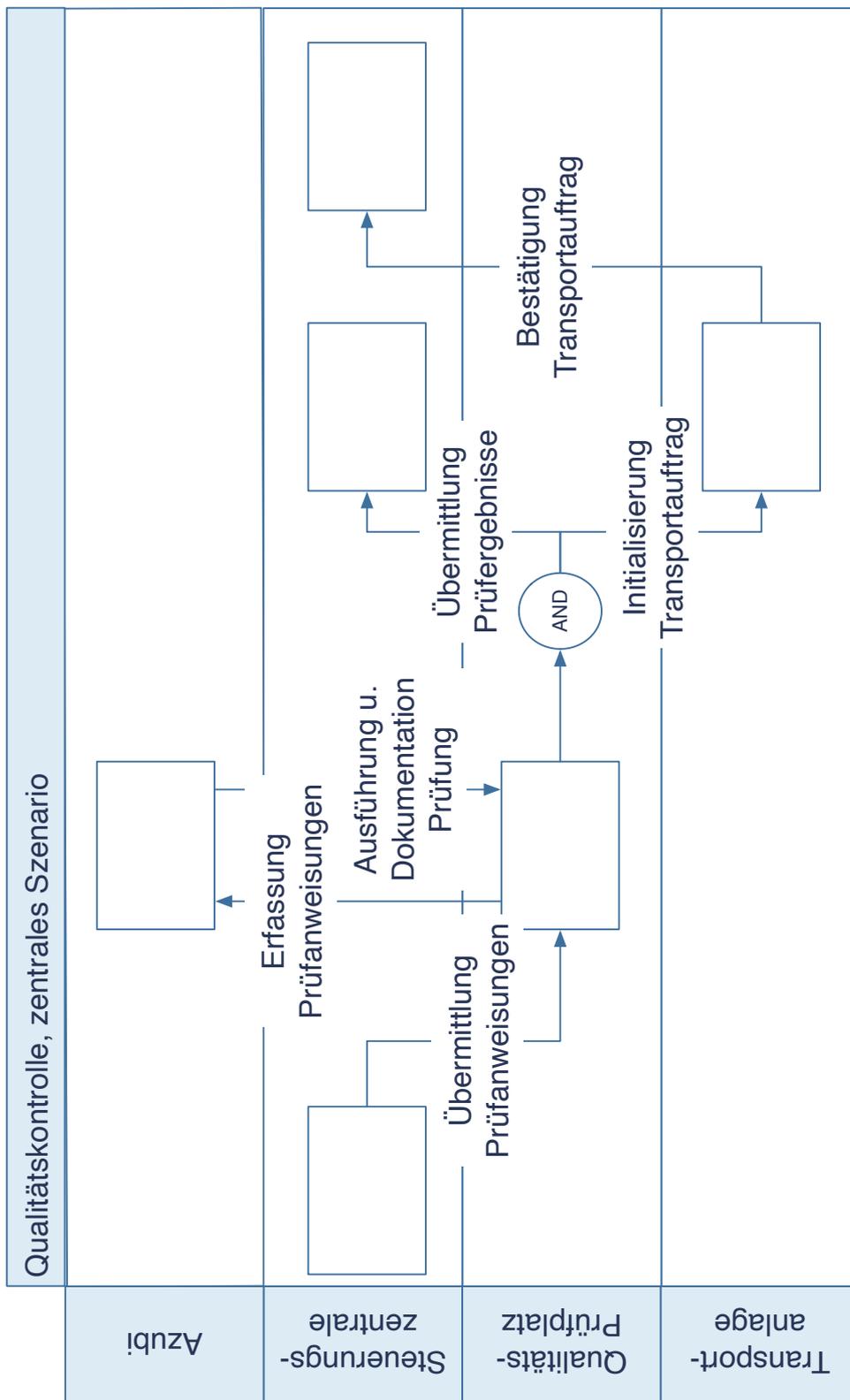


Abb. C.4: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 1 (zentral)

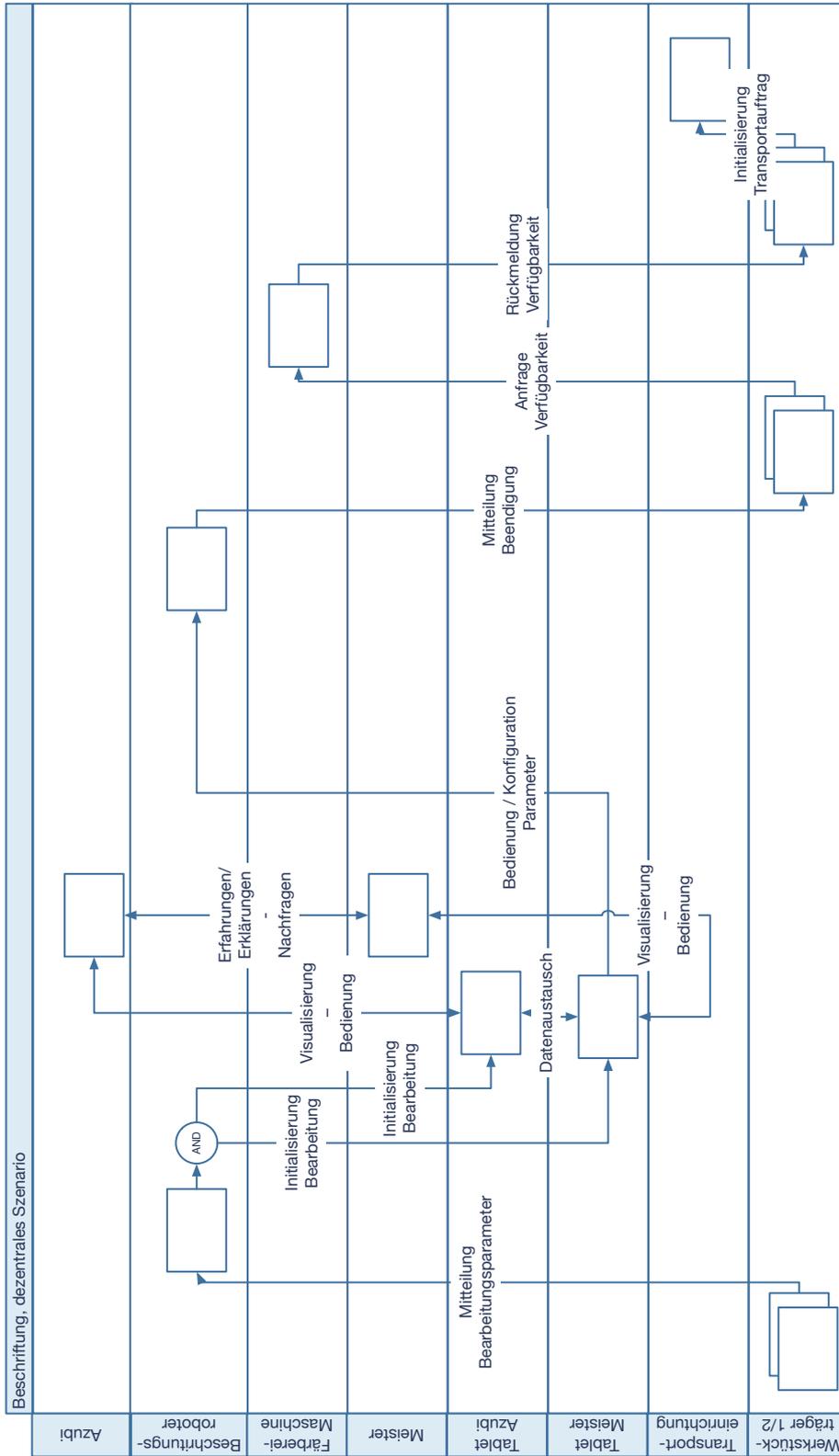


Abb. C.7: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 2: Beschreibung),
Simulationsexperiment 2 (dezentral)

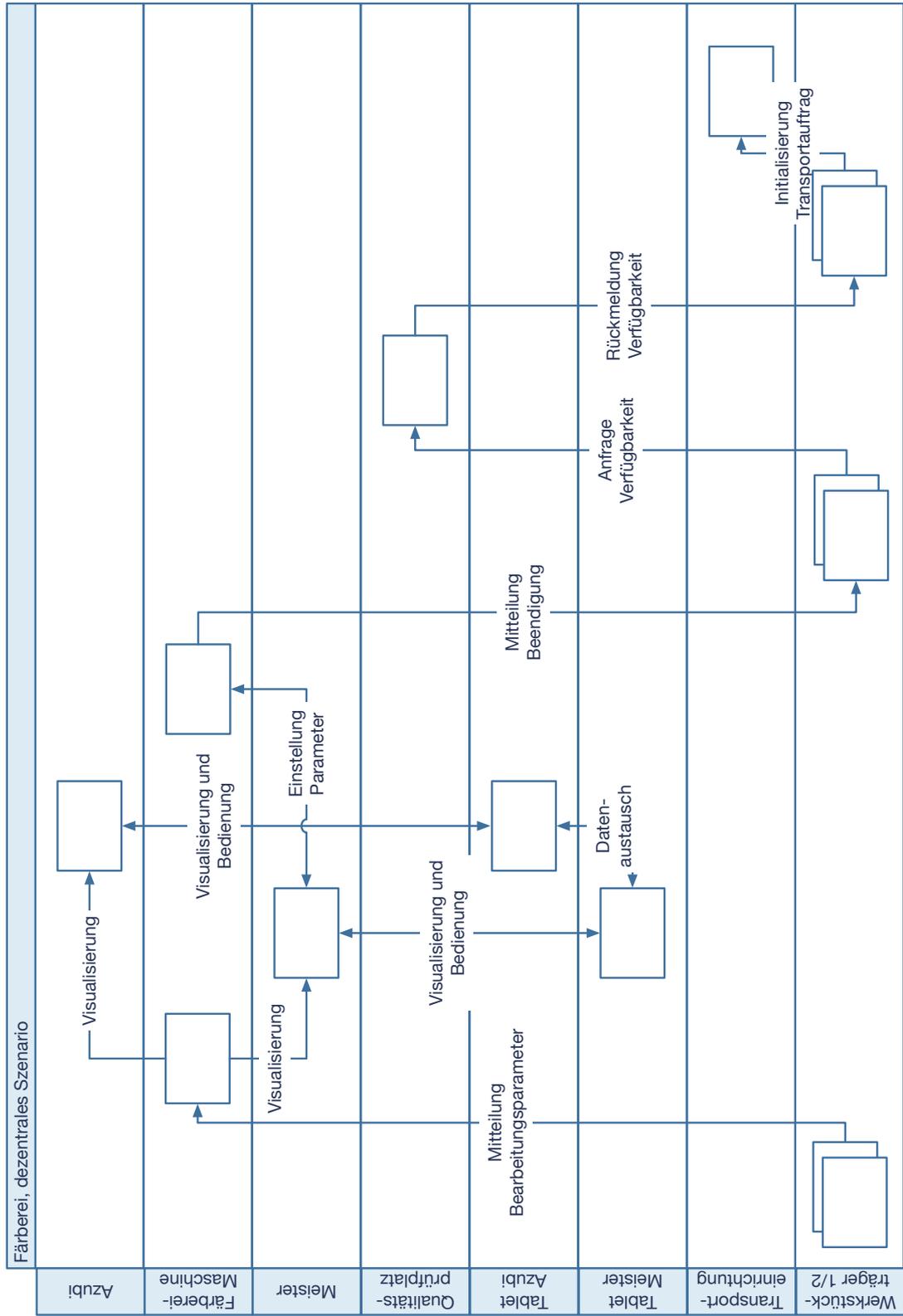


Abb. C.8: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

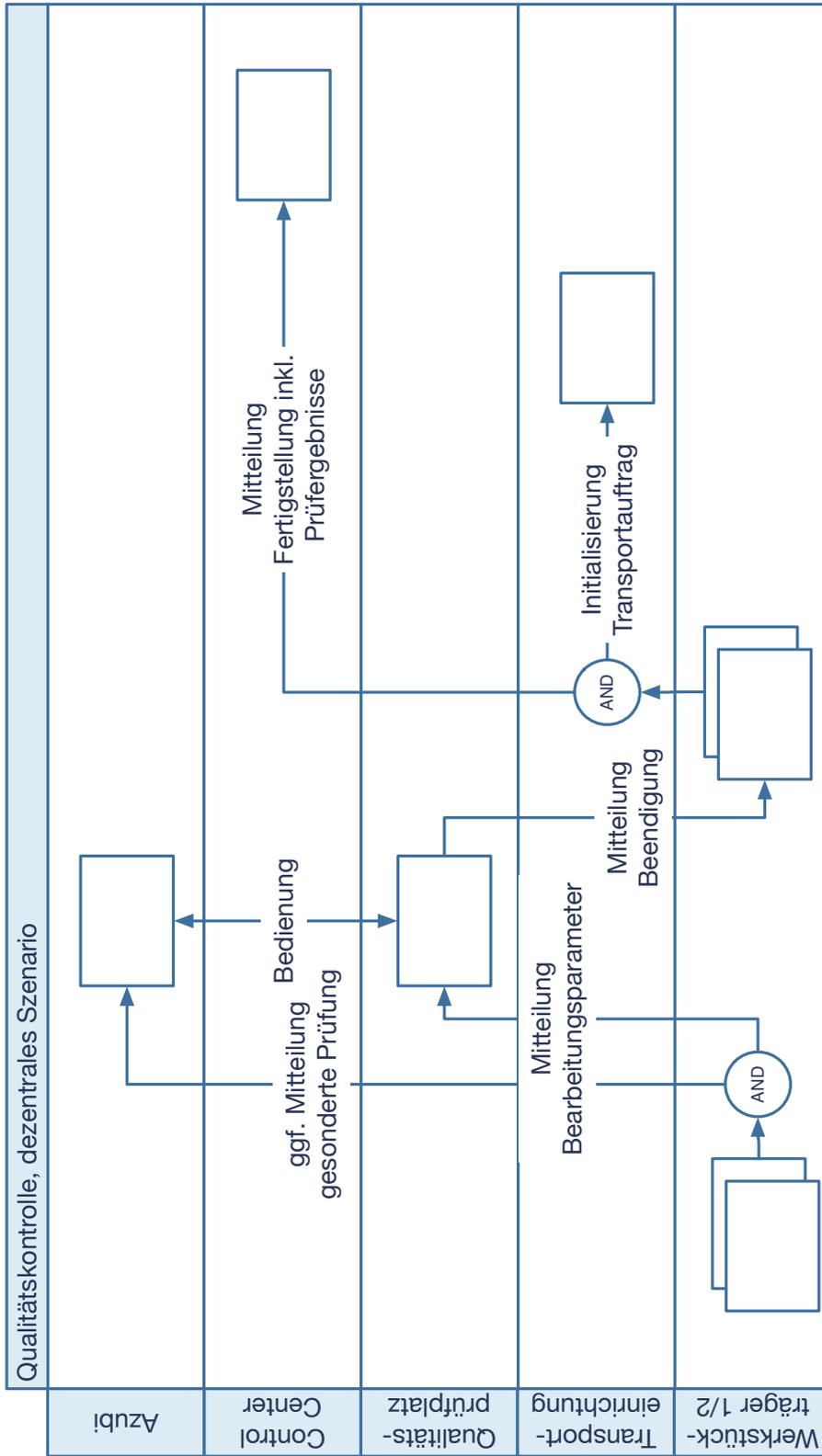


Abb. C.9: Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 2 (dezentral)

Anhang D

Prozessschrittübergreifende Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen

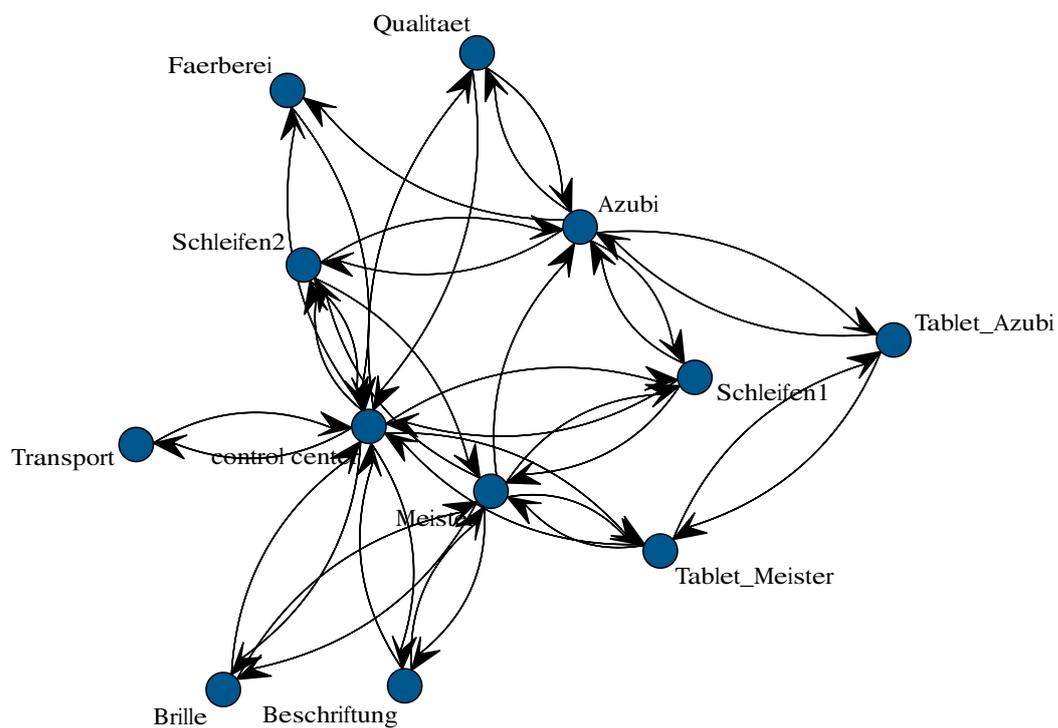


Abb. D.1: Visualisierung aller Kommunikationsbeziehungen, Simulationsexperiment 1 (zentral)

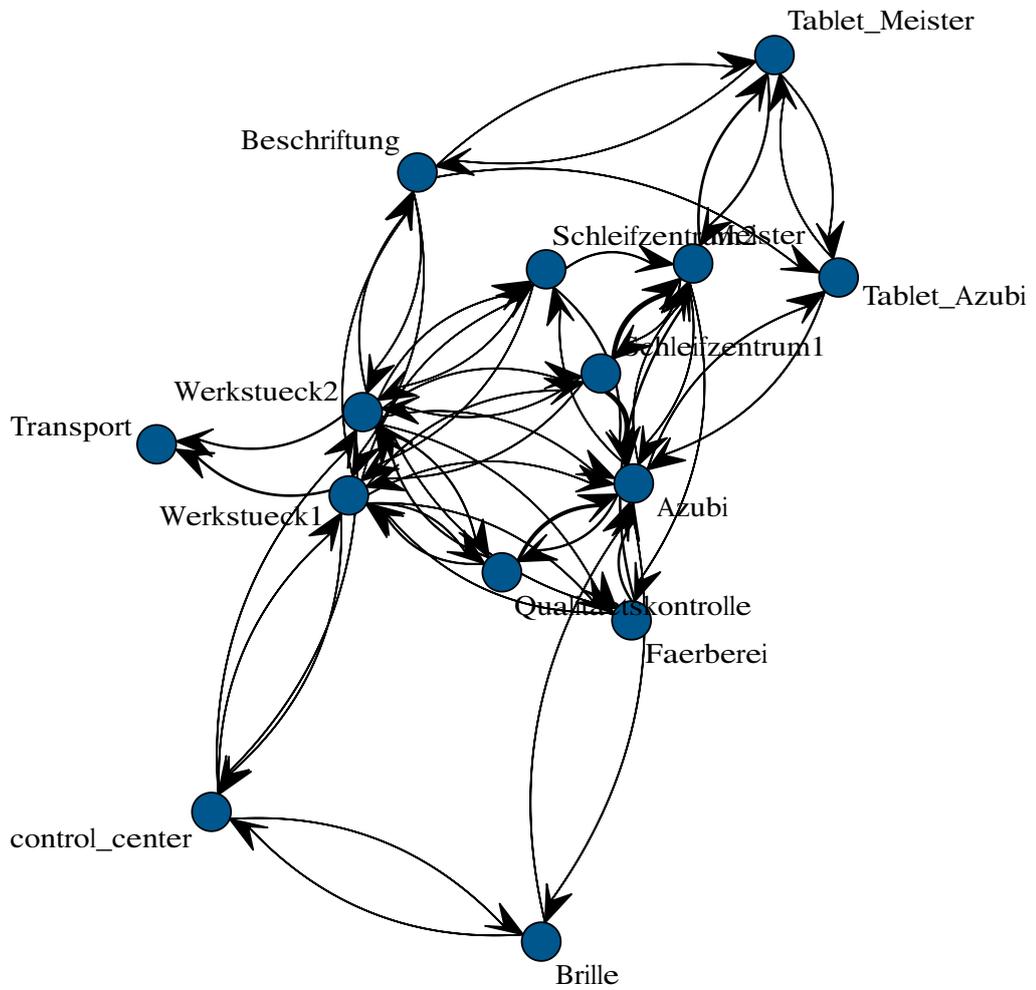


Abb. D.2: Visualisierung aller Kommunikationsbeziehungen, Simulations-
experiment 2 (dezentral)

Anhang E

Ergebnisse der Simulationsläufe

Simulationslauf	zentral		dezentral	
	Auftrag		Auftrag	
	1	2	1	2
1	3'00"	3'05"	2'14"	3'04"
2	3'35"	3'30"	2'13"	2'57"
3	2'45"	3'00"	2'12"	3'12"
4	2'50"	2'55"	2'15"	3'06"
5	2'52"	2'54"	2'13"	3'10"
6	3'05"	2'55"	2'14"	3'06"
7	2'55"	3'10"	2'15"	3'04"
8	3'10"	3'20"	2'13"	3'00"
9	3'20"	2'55"	2'16"	2'57"
10	2'59"	3'13"	2'15"	3'03"
11	3'00"	2'59"	2'17"	2'54"
12	3'23"	3'25"	2'12"	2'59"
13	2'49"	3'22"	2'13"	3'06"
14	2'53"	2'51"	2'16"	3'00"
15	3'30"	3'08"	2'11"	2'57"
16	3'04"	3'15"	2'15"	3'3"
17	2'46"	2'46"	2'13"	2'59"
18	3'03"	3'00"	2'12"	2'54"
19	3'20"	3'12"	2'15"	2'57"
20	3'15"	3'18"	2'12"	3'06"
Durchschnitt	3'07"	3'05"	3'02"	2'14"
Standardabweichung σ	0'12"	0'15"	0'05"	0'02"

Tab. E.1: Vergleich der Durchlaufzeiten der Werkstückträger je Simulationslauf (n=20) im dezentralen Simulationsexperiment

Anhang F

Kommunikationsbeziehungen des Praxisbeispiels

Kapitel F Kommunikationsbeziehungen des Praxisbeispiels

Sender	Recipient	Prozessschritt	Sender	Recipient	Prozessschritt
SAP	Auftragskoordinator	1	Disponent	SAP	3
SAP	MA Vertrieb	1	Einkaeufer	SAP	3
MA Vertrieb	SAP	1	MA Lagerbueno	SAP	4
Auftragskoordinator	SAP	1	SAP	MA Lagerbueno	4
SAP	Disponent	2	SAP	Lagerist	5
SAP	Fertigungssteuerer	2	Megamat	Lagerist	5
TIDAS	Fertigungssteuerer	2	MA Lagerbueno	Lagerist	5
Fertigungssteuerer	MA Lagerbueno	2	SAP	Lagerist	5
Disponent	SAP	2	Lagerist	MA Lagerbueno	5
Fertigungssteuerer	SAP	2	SAP	MA Lagerbueno	5
Fertigungssteuerer	TIDAS	2	Lagerist	Megamat	5
MA Lagerbueno	Fertigungssteuerer	2	Lagerist	SAP	5
SAP	Auftragskoordinator	3	MA Lagerbueno	SAP	5
SAP	Disponent	3	Disponent	SAP	6
SAP	Einkaeufer	3	Fertigungssteuerer	SAP	6
Auftragskoordinator	SAP	3	Fertigungssteuerer	Werker	6

Sender	Recipient	Prozessschritt	Sender	Recipient	Prozessschritt
MA Lager	SAP	6	SAP	Fertigungssteuerer	7
MA Lagerbueno	SAP	6	SAP	MA Lager	7
MA Vertrieb	SAP	6	SAP	MA Lagerbueno	7
SAP	MA Vertrieb	6	SAP	Auftragskoordinator	7
SAP	Fertigungssteuerer	6	Werker	Fertigungssteuerer	7
SAP	MA Lagerbueno	6	Werker	MA Lagerbueno	7
SAP	Werker	6	Auftragskoordinator	SAP	7
SAP	Disponent	6	Disponent	SAP	7
SAP	MA Lager	6	Fertigungssteuerer	SAP	7
Werker	MA Lagerbueno	6	MA Lager	SAP	7
Werker	Fertigungssteuerer	6	MA Lagerbueno	SAP	7
Werker	MA Lager	6	Fertigungssteuerer	Werker	7
Werker	SAP	6	MA Lagerbueno	Werker	7
MA Lager	Werker	6	SAP	Auftragskoordinator	8
MA Lagerbueno	Werker	6	SAP	Disponent	8
SAP	Disponent	7	SAP	Fertigungssteuerer	8

Kapitel F Kommunikationsbeziehungen des Praxisbeispiels

Sender	Recipient	Prozessschritt	Sender	Recipient	Prozessschritt
SAP	MA Lagerbureau	8	MA Lagerbureau	SAP	9
SAP	Werker	8	MA Lagerbureau	Werker	9
SAP	MA Lager	8	MA Vertrieb	SAP	9
Werker	Fertigungssteuerer	8	SAP	Werker	9
Werker	MA Lagerbureau	8	SAP	Fertigungssteuerer	9
Werker	SAP	8	SAP	Disponent	9
Auftragskoordinator	SAP	8	SAP	MA Lagerbureau	9
Disponent	SAP	8	SAP	MA Vertrieb	9
Fertigungssteuerer	SAP	8	SAP	MA Lager	9
Fertigungssteuerer	Werker	8	MA Lager	Werker	9
MA Lager	SAP	8	MA Lager	SAP	9
MA Lagerbureau	SAP	8	Werker	Fertigungssteuerer	9
MA Lagerbureau	Werker	8	Werker	MA Lager	9
Disponent	SAP	9	Werker	MA Lagerbureau	9
Fertigungssteuerer	SAP	9	SAP	Monteur	10
Fertigungssteuerer	Werker	9	Monteur	SAP	10

Sender	Recipient	Prozessschritt	Sender	Recipient	Prozessschritt
Kommissionierer	Monteur	10	Fremdfertiger	Auftragsplaner	12
Monteur	Kommissionierer	10	Auftragsplaner	Fremdfertiger	12
SAP	Pruefer	11	SAP	Lackierer	12
Pruefer	SAP	11	Pruefer	Lackierer	12
Monteur	SAP	11	Lackierer	Pruefer	12
Pruefer	Fertigungskontrolleur	11	Lackierer	SAP	12
Fertigungskontrolleur	Pruefer	11	SAP	Auftragsplaner	12
SAP	Fertigungskontrolleur	11	Auftragsplaner	SAP	12
Fertigungskontrolleur	SAP	11	Transporteur	MA Warenverteilungszentrum	13
Fertigungskontrolleur	MA Lagerburo	11	SAP	MA Warenverteilungszentrum	13
MA Lagerburo	Fertigungskontrolleur	11	MA Warenverteilungszentrum	SAP	13
MA Lagerburo	SAP	11	Versandmitarbeiter	Transporteur	13
SAP	MA Lagerburo	11	MA Warenverteilungszentrum	Transporteur	13
SAP	Monteur	11	Transporteur	Versandmitarbeiter	13

Anhang G

Visualisierung der Kommunikationsdiagramme und Kennzahlen des Praxisbeispiels

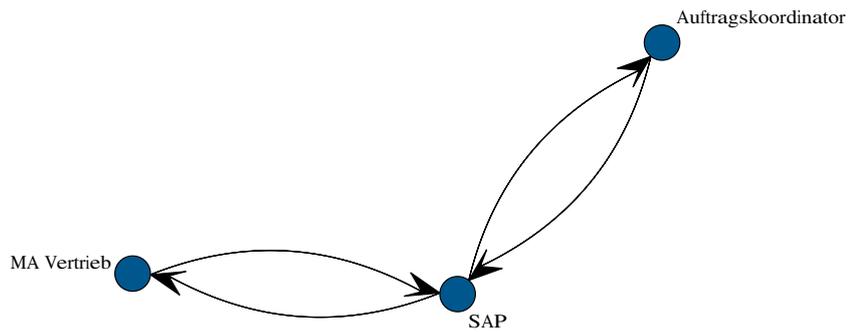


Abb. G.1: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 1: Erstellung Planauftrag, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,1}$	$C_{a,1}$	$R_{a,1}$
Auftragskoordinator	0,059	0,750	0,044
MA Vertrieb	0,059	0,750	0,044
SAP	0,882	1,000	0,882

$D_1 : 0,084$

Tab. G.1: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Erstellung Planauftrag, Praxisbeispiel

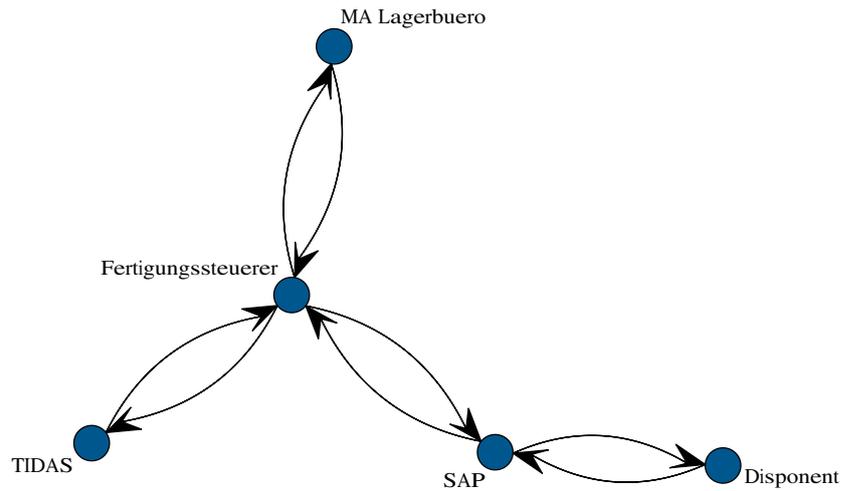


Abb. G.2: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,2}$	$C_{a,2}$	$R_{a,2}$
Disponent	0,065	0,542	0,035
Fertigungssteuerer	0,097	0,875	0,085
MA Lagerbuero	0,032	0,583	0,019
SAP	0,484	0,750	0,363
TIDAS	0,323	0,583	0,188

$$D_2 : 0,470$$

Tab. G.2: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel

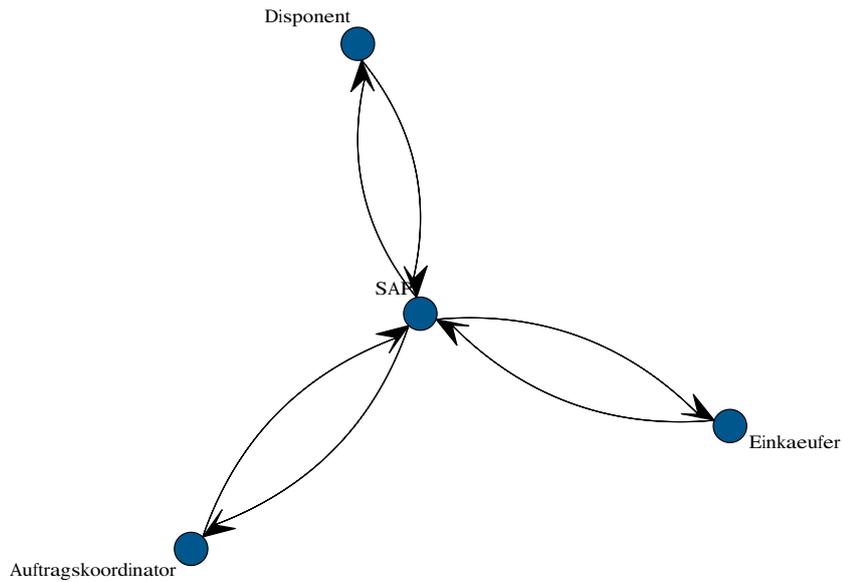


Abb. G.3: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 3: Einkauf, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,3}$	$C_{a,3}$	$R_{a,3}$
Auftragskoordinator	0,667	0,611	0,035
Disponent	0,105	0,667	0,070
Einkaeufer	0,053	0,667	0,035
SAP	0,789	1	0,789

$D_3 : 0,138$

Tab. G.3: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Einkauf, Praxisbeispiel

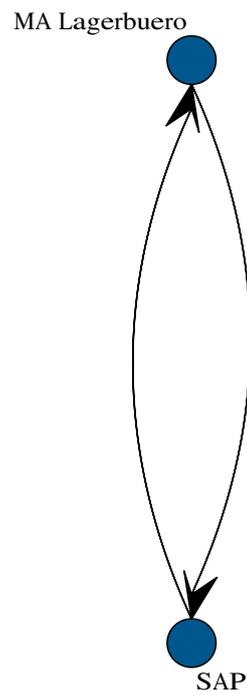


Abb. G.4: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 4: Lagervorbereitung, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,4}$	$C_{a,4}$	$R_{a,4}$
MA Lagerbuero	0,063	1,000	0,063
SAP	0,938	1,000	0,938

$D_4 : 0,065$

Tab. G.4: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Lagervorbereitung, Praxisbeispiel

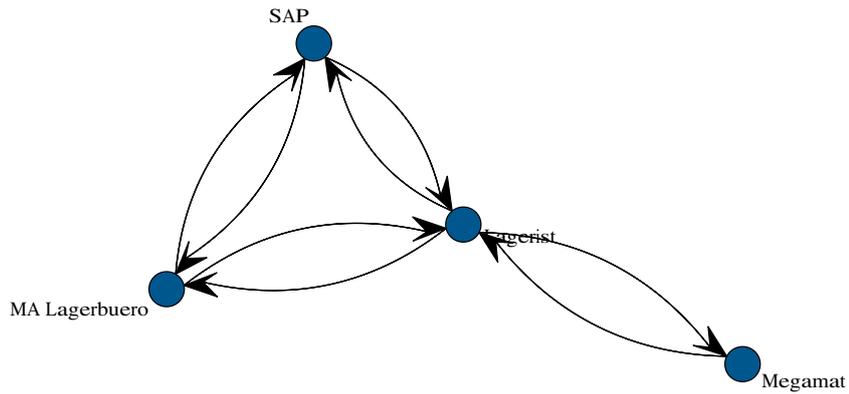


Abb. G.5: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 5: Kommissionierung, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,5}$	$C_{a,5}$	$R_{a,5}$
Lagerist	0,158	1,000	0,158
MA Lagerbuero	0,053	0,667	0,035
Megamat	0,000	0,667	0,000
SAP	0,789	0,611	0,482

$$D_5 : 0,353$$

Tab. G.5: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 5: Kommissionierung, Praxisbeispiel

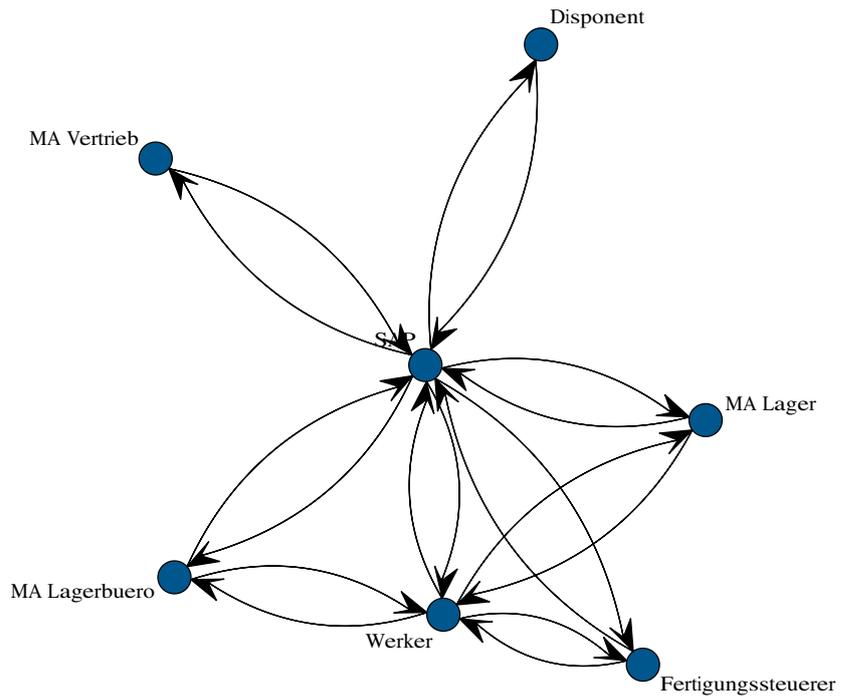


Abb. G.6: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,6}$	$C_{a,6}$	$R_{a,6}$
Disponent	0,091	0,583	0,053
Fertigungssteuerer	0,045	0,667	0,030
MA Lager	0,045	0,667	0,030
MA Lagerbuero	0,045	0,667	0,030
MA Vertrieb	0,045	0,583	0,027
SAP	0,682	1,000	0,682
Werker	0,045	0,833	0,038

$$D_6 : 0,196$$

Tab. G.6: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel

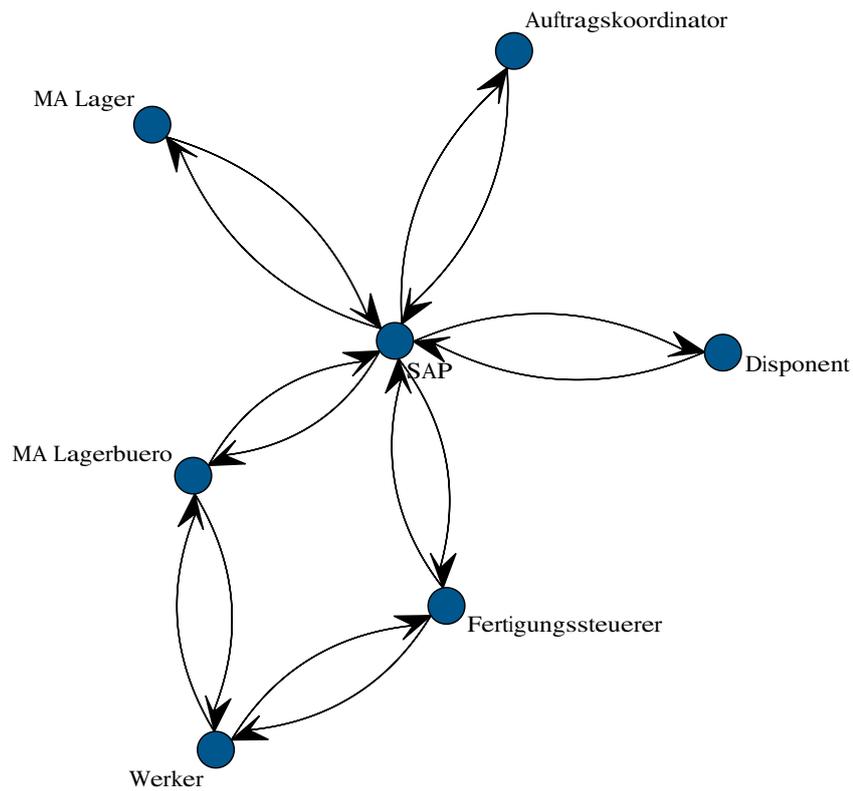


Abb. G.7: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 7: Herstellung Komponente B, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,7}$	$C_{a,7}$	$R_{a,7}$
Auftragskoordinator	0,000	0,556	0,000
Disponent	0,000	0,556	0,000
Fertigungssteuerer	0,667	0,500	0,035
MA Lager	0,105	0,556	0,058
MA Lagerbuero	0,000	0,667	0,000
SAP	0,789	0,917	0,724
Werker	0,053	0,583	0,031

$$D_7 : 0,161$$

Tab. G.7: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 7: Fertigung Komponente B, Praxisbeispiel

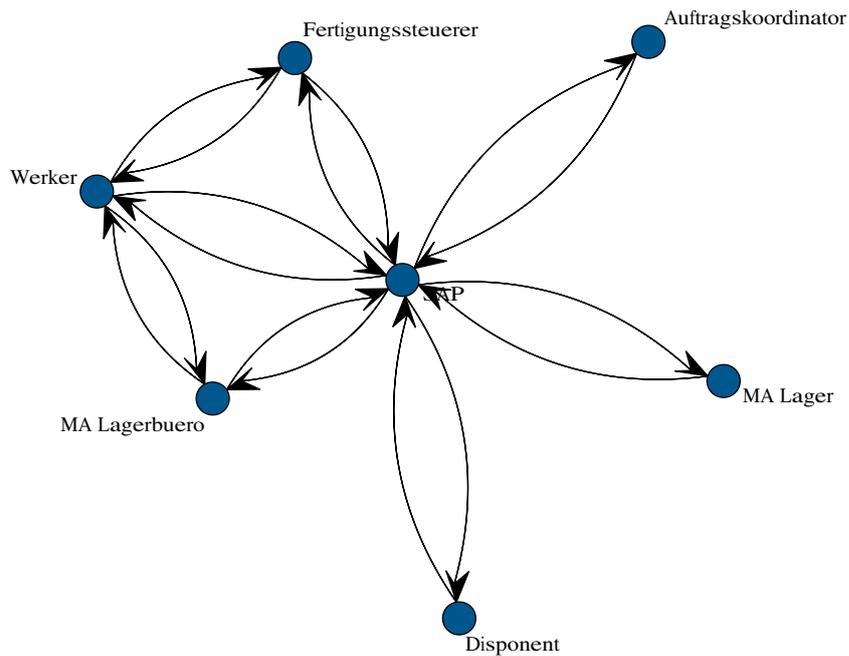


Abb. G.8: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 8: Herstellung Komponente C, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,8}$	$C_{a,8}$	$R_{a,8}$
Auftragskoordinator	0,091	0,583	0,053
Disponent	0,000	0,583	0,000
Fertigungssteuerer	0,667	0,500	0,030
MA Lager	0,045	0,583	0,027
MA Lagerbuero	0,045	0,667	0,030
SAP	0,682	1,000	0,682
Werker	0,091	0,750	0,068

$$D_8 : 0,196$$

Tab. G.8: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 8: Fertigung Komponente C, Praxisbeispiel

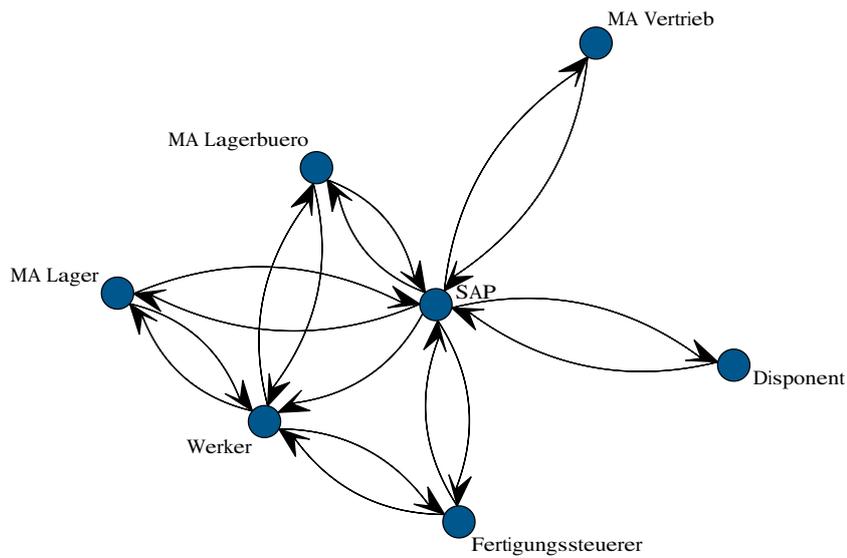


Abb. G.9: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 9: Herstellung Komponente D, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,9}$	$C_{a,9}$	$R_{a,9}$
Disponent	0,048	0,583	0,028
Fertigungssteuerer	0,048	0,667	0,032
MA Lager	0,048	0,667	0,032
MA Lagerbuero	0,048	0,667	0,032
MA Vertrieb	0,048	0,583	0,028
SAP	0,714	1,000	0,714
Werker	0,048	0,694	0,033

$$D_9 : 0,173$$

Tab. G.9: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 9: Fertigung Komponente D, Praxisbeispiel

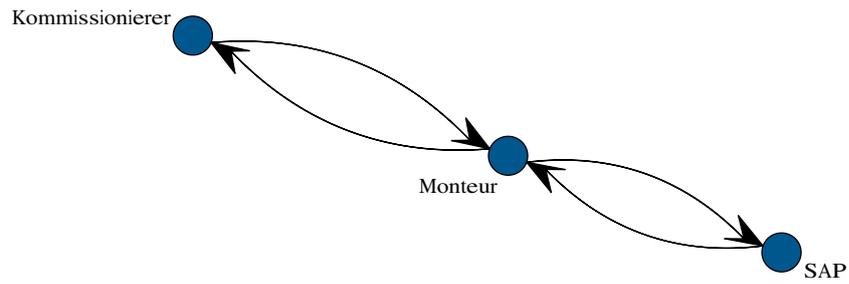


Abb. G.10: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 10: Montage, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,10}$	$C_{a,10}$	$R_{a,10}$
Kommissionierer	0,118	0,750	0,088
Monteur	0,000	1,000	0,000
SAP	0,882	0,750	0,662

$D_{10} : 0,214$

Tab. G.10: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 10: Montage, Praxisbeispiel

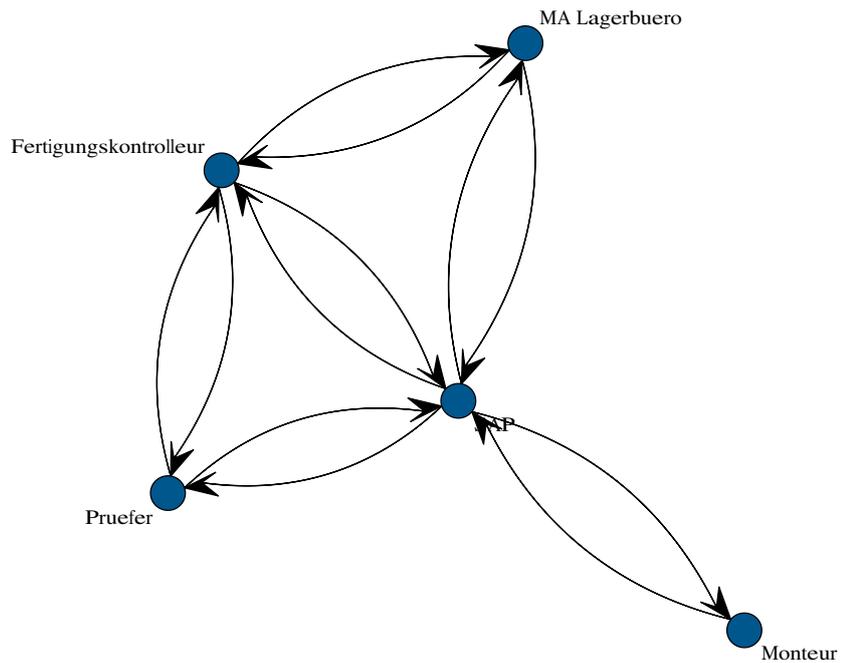


Abb. G.11: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 11: Prüfung, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,11}$	$C_{a,11}$	$R_{a,11}$
Fertigungskontrolleur	0,136	0,875	0,119
MA Lagerbuero	0,045	0,750	0,034
Monteur	0,045	0,625	0,028
Pruefer	0,091	0,750	0,068
SAP	0,682	1,000	0,681

$$D_{11} : 0,213$$

Tab. G.11: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 11: Prüfung, Praxisbeispiel

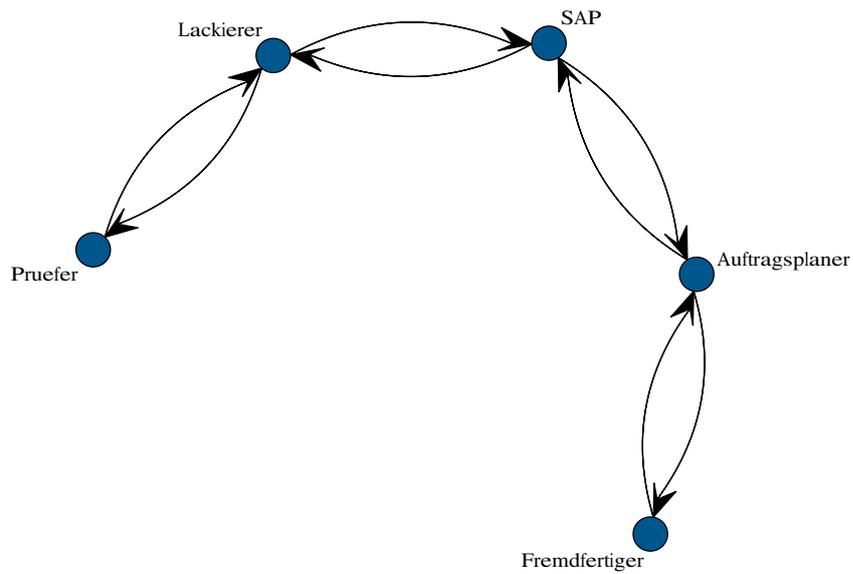


Abb. G.12: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 12: Lackieren, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,12}$	$C_{a,12}$	$R_{a,12}$
Auftragsplaner	0,100	0,708	0,071
Fremdfertiger	0,000	0,521	0,000
Lackierer	0,050	0,708	0,035
Pruefer	0,100	0,521	0,052
SAP	0,750	0,750	0,563

$$D_{12} : 0,277$$

Tab. G.12: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 12: Lackieren, Praxisbeispiel

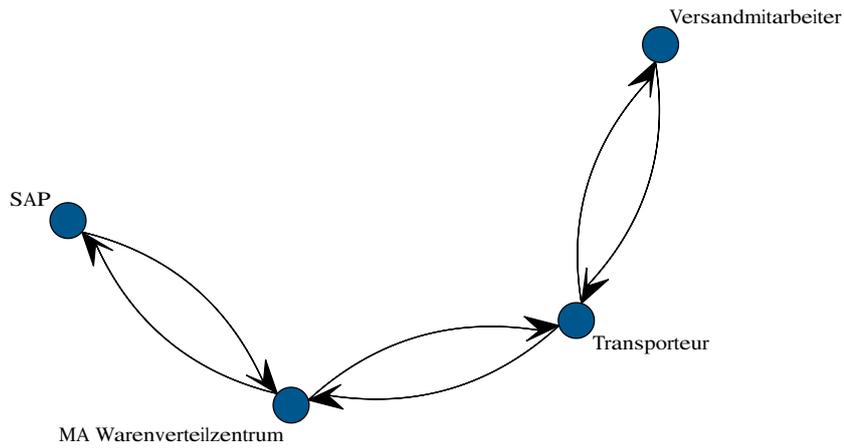


Abb. G.13: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 13: Versand, Praxisbeispiel

Akteur	$d_{a,13}$	$C_{a,13}$	$R_{a,13}$
MA Warenverteilzentrum	0,150	0,833	0,125
SAP	0,750	0,611	0,458
Transporteur	0,050	0,833	0,042
Versandmitarbeiter	0,050	0,611	0,031

$D_{13} : 0,373$

Tab. G.13: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 13: Versand, Praxisbeispiel

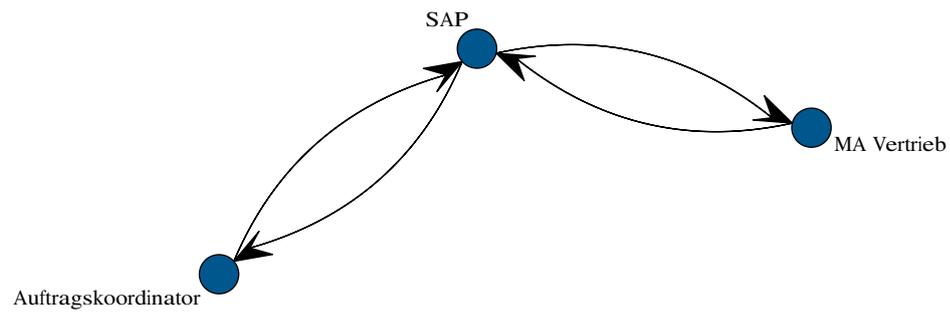


Abb. G.14: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 1: Erstellung Planauftrag , Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,1_v}$	$C_{a,1_v}$	$R_{a,1_v}$
Auftragskoordinator	0,059	0,750	0,044
MA Vertrieb	0,059	0,750	0,044
SAP	0,882	1,000	0,882

$D_{1_v} : 0,084$

Tab. G.14: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Erstellung Planauftrag, Praxisbeispiel verbessert

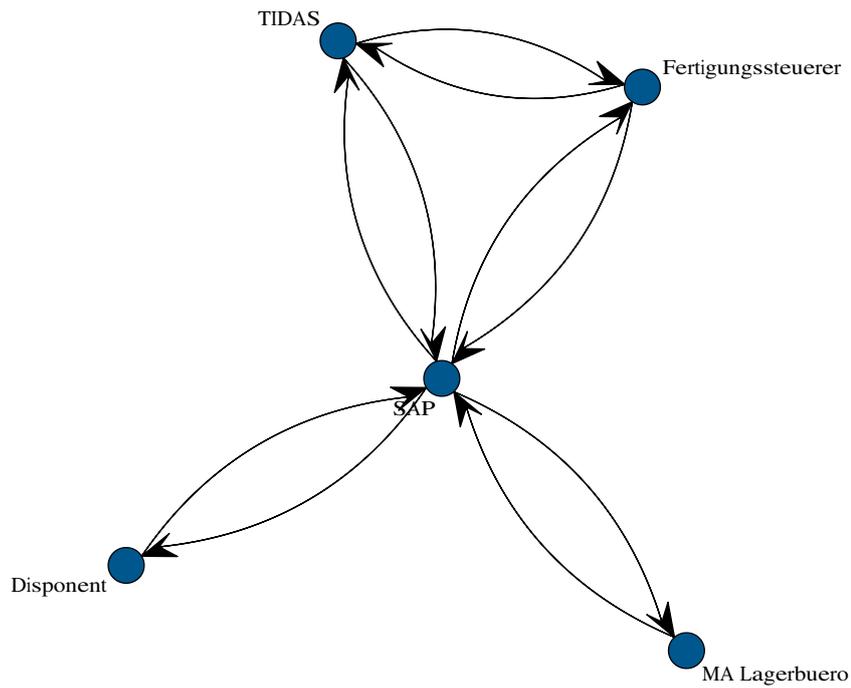


Abb. G.15: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,2_v}$	$C_{a,2_v}$	$R_{a,2_v}$
Disponent	0,097	0,625	0,060
Fertigungssteuerer	0,097	0,750	0,073
MA Lagerbuero	0,097	0,625	0,060
SAP	0,419	1,000	0,419
TIDAS	0,290	0,750	0,218

$$D_{2_v} : 0,437$$

Tab. G.15: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel verbessert

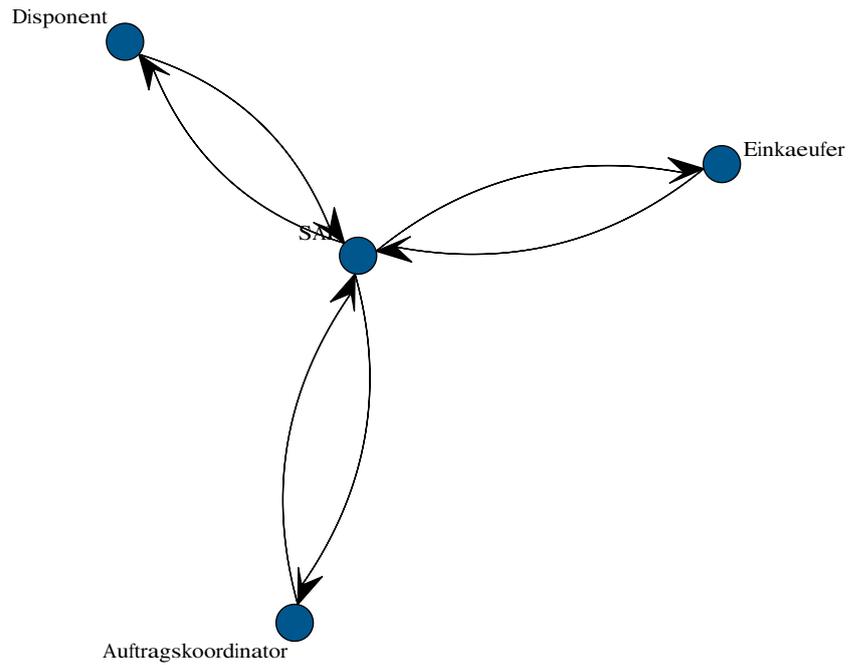


Abb. G.16: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 3: Einkauf, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,3_v}$	$C_{a,3_v}$	$R_{a,v}$
Auftragskoordinator	0,143	0,665	0,095
Disponent	0,238	0,667	0,159
Einkaeufer	0,095	0,667	0,063
SAP	0,524	1,000	0,524

$D_{3_v} : 0,353$

Tab. G.16: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Einkauf, Praxisbeispiel verbessert

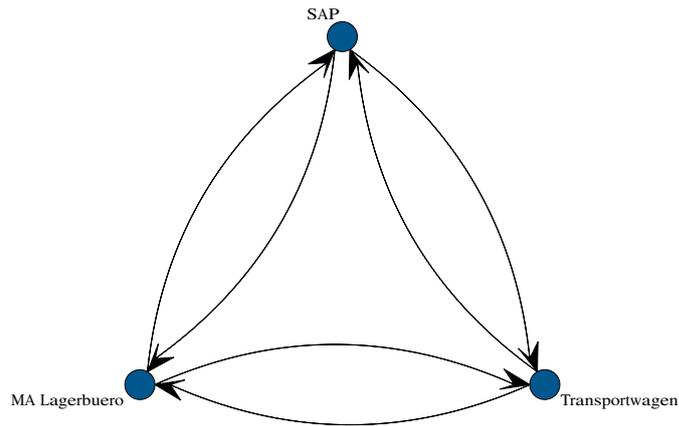


Abb. G.17: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 4: Lagervorbereitung, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,4_v}$	$C_{a,4_v}$	$R_{a,4_v}$
MA Lagerbuero	0,333	1,000	0,333
SAP	0,400	1,000	0,400
Transportwagen	0,267	1,000	0,267

$D_{4_v} : 0,684$

Tab. G.17: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Lagervorbereitung, Praxisbeispiel verbessert

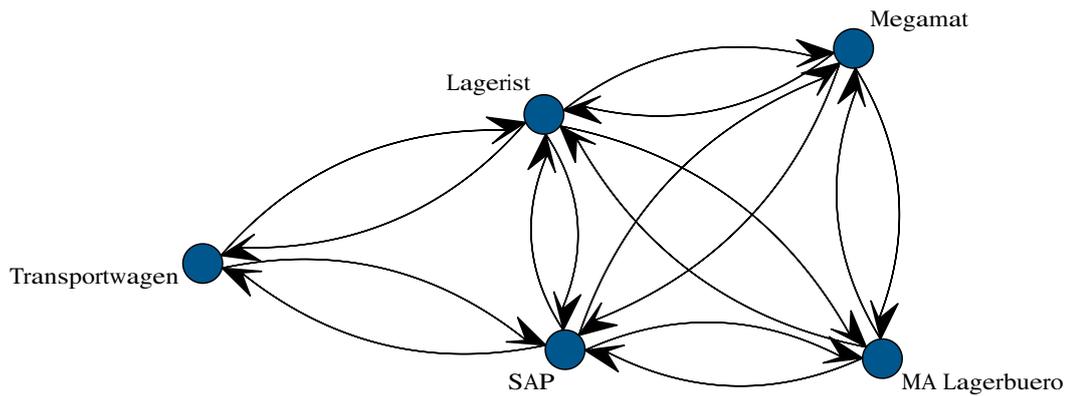


Abb. G.18: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 5: Kommissionierung, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,5_v}$	$C_{a,5_v}$	$R_{a,5_v}$
Lagerist	0,150	1,000	0,150
MA Lagerbuero	0,150	0,750	0,113
Megamat	0,100	0,875	0,088
SAP	0,400	1,000	0,400
Transportwagen	0,200	0,750	0,150

$$D_{5_v} : 0,476$$

Tab. G.18: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 5: Kommissionierung, Praxisbeispiel verbessert

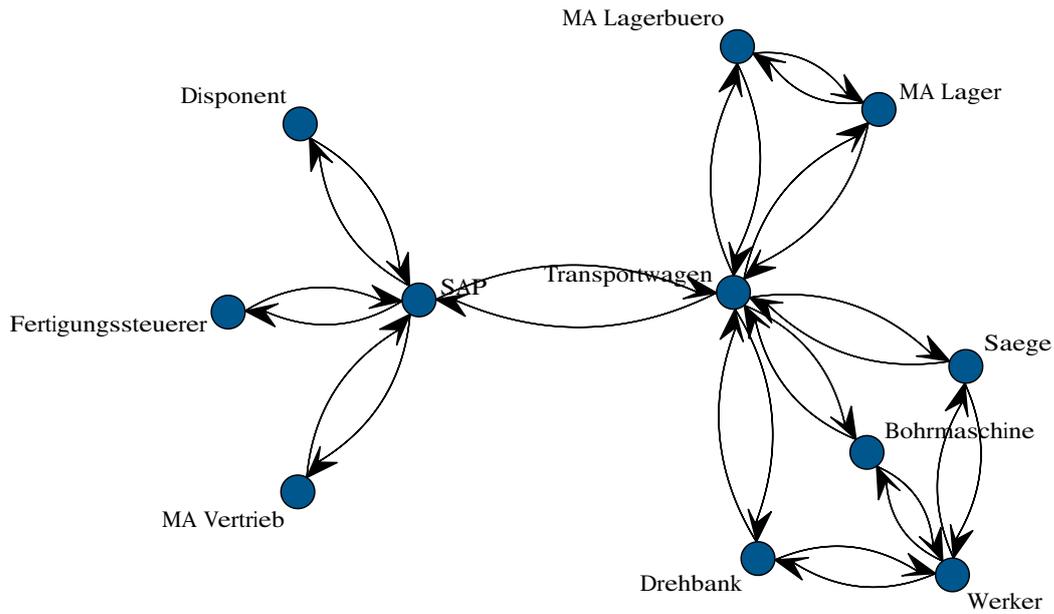


Abb. G.19: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,6_v}$	$C_{a,6_v}$	$R_{a,6_v}$
Bohrmaschine	0,037	0,550	0,020
Disponent	0,074	0,442	0,033
Drehbank	0,074	0,550	0,041
Fertigungssteuerer	0,037	0,442	0,016
MA Lager	0,037	0,533	0,020
MA Lagerbuero	0,037	0,533	0,020
MA Vertrieb	0,037	0,442	0,016
Saege	0,074	0,550	0,041
SAP	0,259	0,683	0,177
Transportwagen	0,296	0,800	0,237
Werker	0,037	0,525	0,019
$D_{6_v} :$			0,556

Tab. G.19: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel verbessert

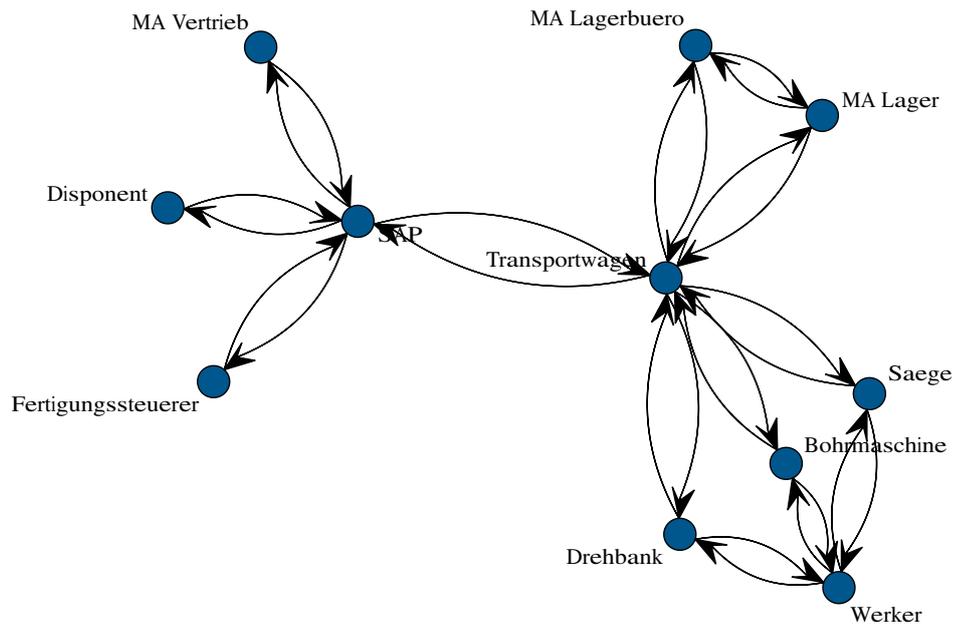


Abb. G.20: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 7: Herstellung
Komponente B, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,7_v}$	$C_{a,7_v}$	$R_{a,7_v}$
Bohrmaschine	0,037	0,550	0,020
Disponent	0,074	0,442	0,033
Drehbank	0,074	0,550	0,041
Fertigungssteuerer	0,037	0,442	0,016
MA Lager	0,037	0,533	0,020
MA Lagerbuero	0,037	0,533	0,020
MA Vertrieb	0,037	0,442	0,016
Saenge	0,074	0,550	0,041
SAP	0,259	0,683	0,177
Transportwagen	0,296	0,800	0,237
Werker	0,037	0,525	0,019

$$D_{7_v} : 0,556$$

Tab. G.20: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 7: Fertigung Komponente B, Praxisbeispiel verbessert

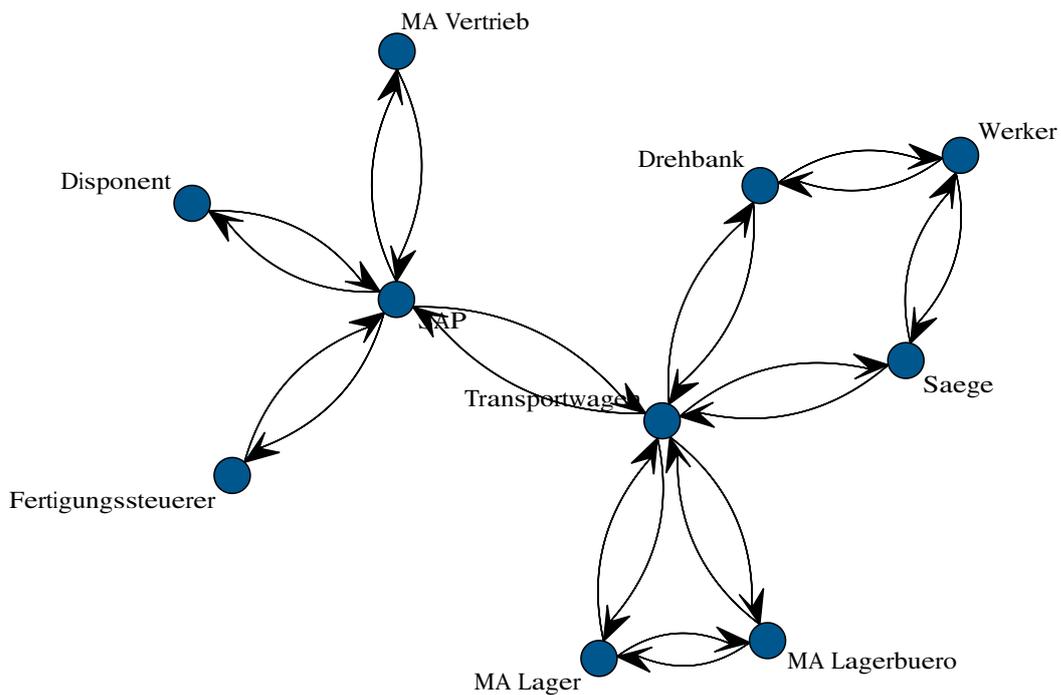


Abb. G.21: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 8: Herstellung Komponente C, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,8_v}$	$C_{a,8_v}$	$R_{a,8_v}$
Disponent	0,077	0,454	0,035
Drehbank	0,077	0,556	0,043
Fertigungssteuerer	0,038	0,454	0,017
MA Lager	0,038	0,537	0,021
MA Lagerbuero	0,038	0,537	0,021
MA Vertrieb	0,038	0,454	0,017
Saage	0,077	0,556	0,043
SAP	0,269	0,704	0,189
Transportwagen	0,308	0,778	0,239
Werker	0,038	0,472	0,018

$D_{8_v} : 0,559$

Tab. G.21: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 8: Fertigung Komponente C, Praxisbeispiel verbessert

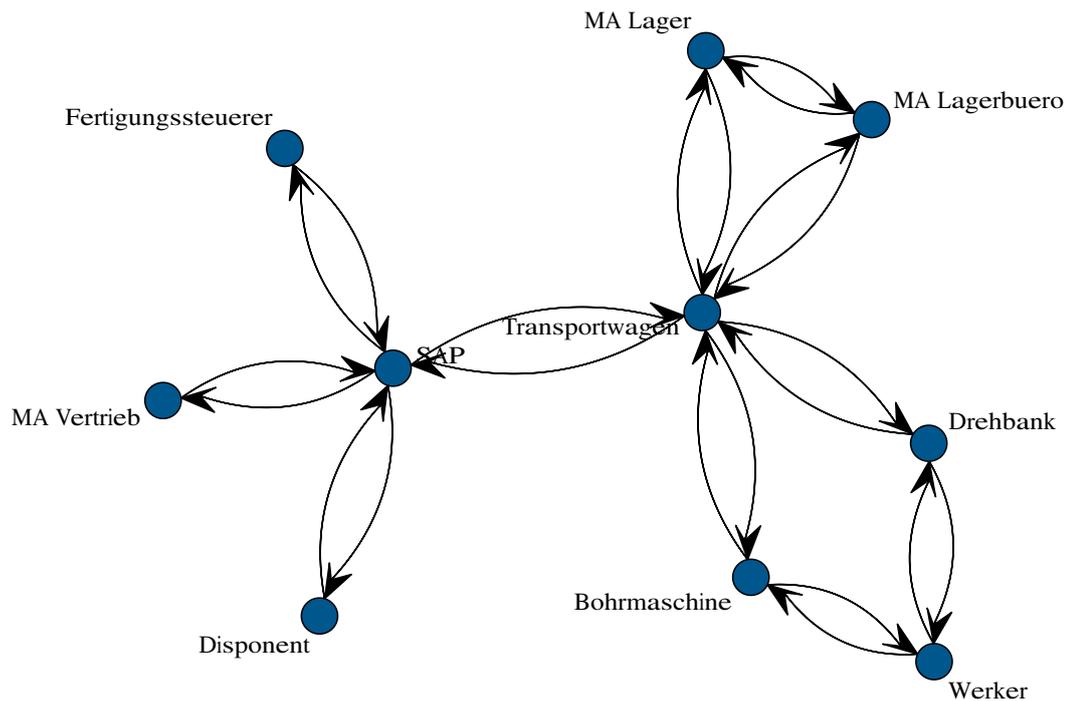


Abb. G.22: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 9: Herstellung Komponente D, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,9_v}$	$C_{a,9_v}$	$R_{a,9_v}$
Bohrmaschine	0,040	0,556	0,022
Disponent	0,080	0,454	0,036
Drehbank	0,080	0,556	0,044
Fertigungssteuerer	0,040	0,454	0,018
MA Lager	0,040	0,537	0,021
MA Lagerbuero	0,040	0,537	0,021
MA Vertrieb	0,040	0,454	0,018
SAP	0,280	0,704	0,197
Transportwagen	0,320	0,778	0,249
Werker	0,040	0,472	0,019

$$D_{9_v} : 0,548$$

Tab. G.22: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 9: Fertigung Komponente D, Praxisbeispiel verbessert

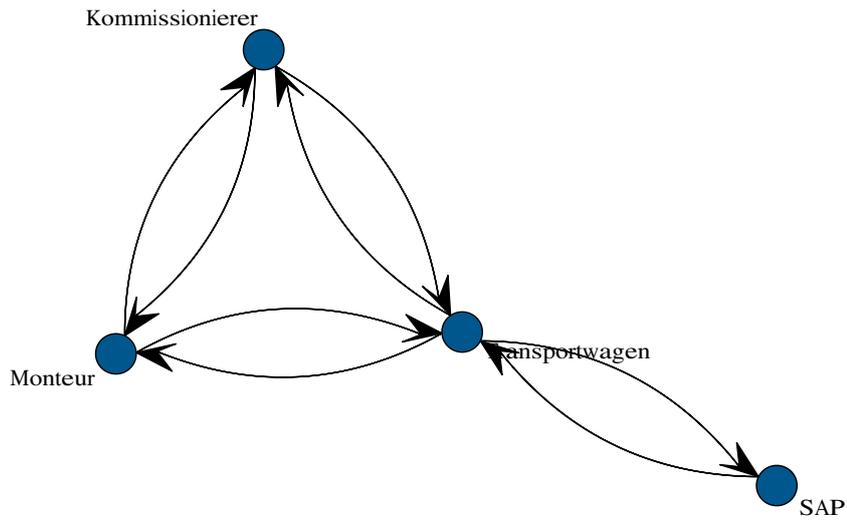


Abb. G.23: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 10: Montage, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,10_v}$	$C_{a,10_v}$	$R_{a,10_v}$
Kommissionierer	0,118	0,833	0,098
Monteur	0,176	0,833	0,147
SAP	0,471	0,667	0,314
Transportwagen	0,235	1,000	0,235
$D_{10_v} :$			0,608

Tab. G.23: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 10: Montage, Praxisbeispiel verbessert

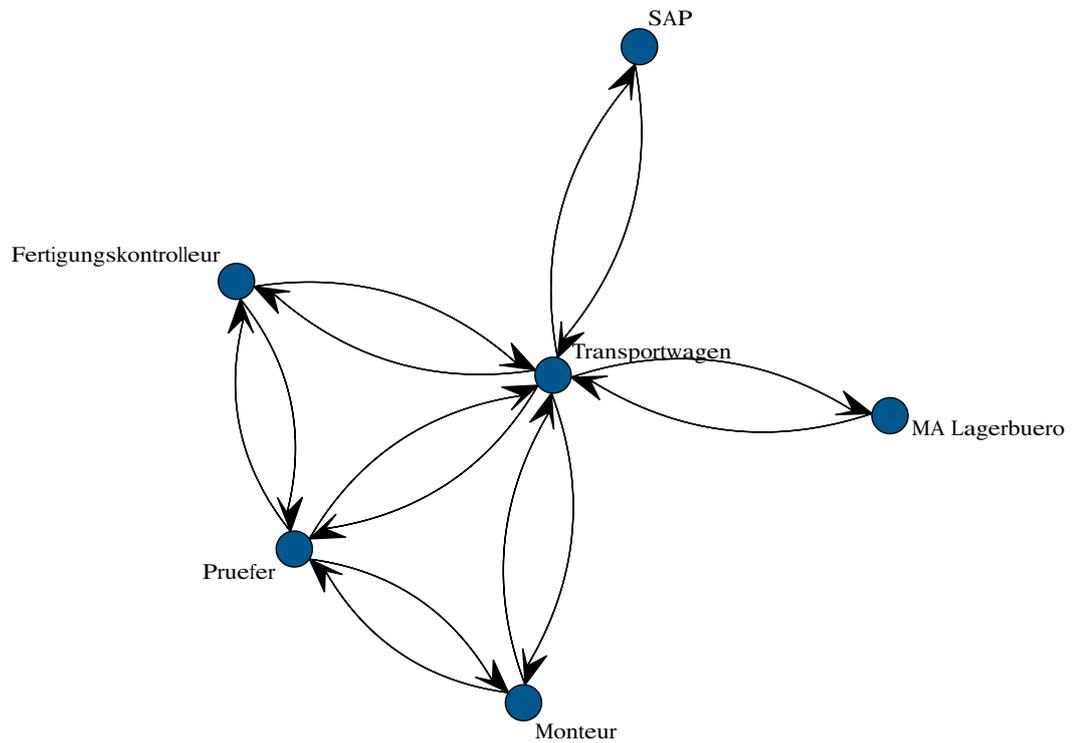


Abb. G.24: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 11: Prüfung, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,11_v}$	$C_{a,11_v}$	$R_{a,11_v}$
Fertigungskontrolleur	0,136	0,700	0,095
MA Lagerbuero	0,091	0,600	0,055
Monteur	0,091	0,700	0,064
Pruefer	0,227	0,800	0,182
SAP	0,227	0,600	0,136
Transportwagen	0,227	1,000	0,227

$D_{11_v} : 0,652$

Tab. G.24: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 11: Prüfung, Praxisbeispiel verbessert

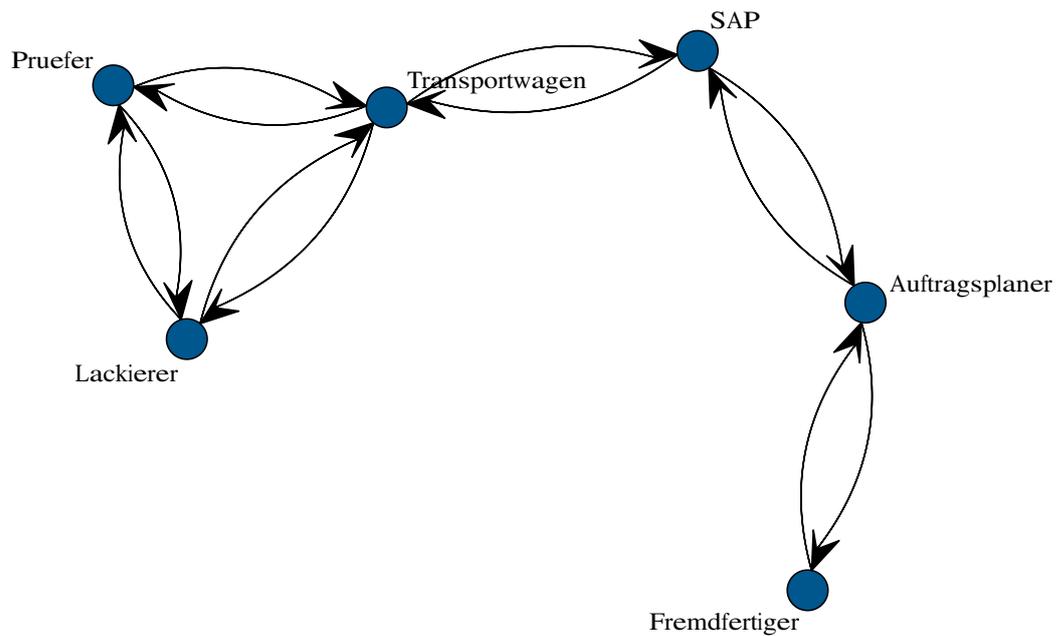


Abb. G.25: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 12: Lackieren, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,12_v}$	$C_{a,12_v}$	$R_{a,1_v}$
Auftragsplaner	0,150	0,633	0,095
Fremdfertiger	0,000	0,467	0,000
Lackierer	0,150	0,617	0,093
Pruefer	0,150	0,617	0,093
SAP	0,400	0,700	0,280
Transportwagen	0,150	0,767	0,115

$$D_{12_v} : 0,552$$

Tab. G.25: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 12: Lackieren, Praxisbeispiel verbessert

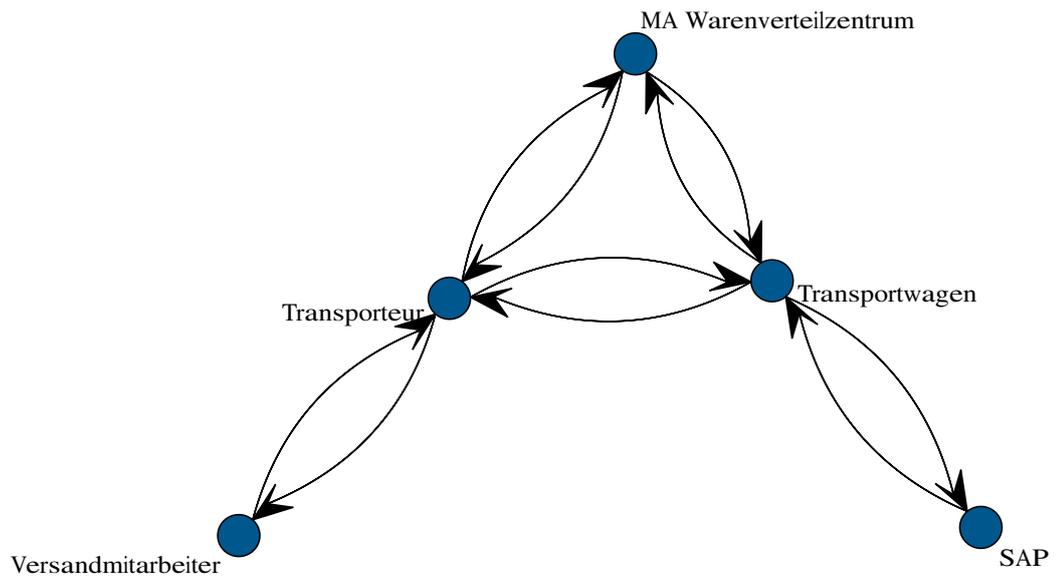


Abb. G.26: Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 13: Versand, Praxisbeispiel verbessert

Akteur	$d_{a,13_v}$	$C_{a,13_v}$	$R_{a,13_v}$
MA Warenverteilzentrum	0,150	0,583	0,088
SAP	0,500	0,542	0,271
Transporteur	0,100	0,875	0,088
Transportwagen	0,150	0,750	0,113
Versandmitarbeiter	0,100	0,583	0,058

$D_{13_v} : 0,571$

Tab. G.26: Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 13: Versand, Praxisbeispiel verbessert

Kapitel G Visualisierung der Kommunikationsdiagramme und Kennzahlen des Praxisbeispiels

PS	Prozess	# a	# $c_{a,ps} > 0$	# $d_{a,ps} > 0$	D_{ps}
1	Erstellung Planauftrag	3	3	3	0,084
2	Erstellung Fertigungs- auftrag	5	5	5	0,437
3	Einkauf	4	4	4	0,353
4	Lagervorbereitung	3	3	3	0,684
5	Kommissionierung	5	5	5	0,4756
6	Fertigung Komponente A	11	11	11	0,556
7	Fertigung Komponente B	11	11	11	0,556
8	Fertigung Komponente C	10	10	10	0,559
9	Fertigung Komponente D	10	10	10	0,548
10	Montage	4	4	4	0,608
11	Prüfung	6	6	6	0,652
12	Lackieren	6	6	5	0,552
13	Versand	5	5	5	0,571

Tab. G.27: Kennzahlen der Prozessschritte des überarbeiteten Praxisbeispiels

$$AI = \frac{\sum D_{ps}}{n_{ps}} = \frac{6,637}{13} = 0,511$$

Literaturverzeichnis

- [Adam 1998a] ADAM, Dietrich: Grundlagen industrieller Produktion. In: *Produktions-Management*. Springer, 1998, S. 1–116
- [Adam 1998b] ADAM, Dietrich: *Produktionsmanagement*. Gabler Verlag, 1998
- [Aier u. Schönherr 2007] AIER, Stephan ; SCHÖNHERR, Marten: *Enterprise Application Integration: Flexibilisierung komplexer Unternehmensarchitekturen*. Bd. 2. GITO Verlag Berlin, 2007
- [Andelfinger u. Hänisch 2017] ANDELINGER, Volker P. ; HÄNISCH, Till: *Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern*. Springer, 2017
- [Arnold u. Furmans 2007] ARNOLD, D. ; FURMANS, K. ; VDI, Berlin Springer (Hrsg.): *Materialfluss in Logistiksystemen*. Bd. 5. VDI, Springer, Berlin, 2007
- [Ashby 1957] ASHBY, W. R.: *An Introduction to Cybernetics*. Chapman and Hall Ltd., 1957
- [Avak 2006] AVAK, Björn: *Variant management of modular product families in the market phase*. Bd. 180. ETH Zurich, 2006
- [Bächle et al. 2018] BÄCHLE, Michael A. ; DAURER, Stephan ; KOLB, Arthur: *Einführung in die Wirtschaftsinformatik: ein fallstudienbasiertes Lehrbuch*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2018
- [Baheti u. Gill 2011] BAHETI, Radhakisan ; GILL, Helen: Cyber-physical systems. In: *The impact of control technology* 12 (2011), Nr. 1, S. 161–166
- [Balzer et al. 2020] BALZER, Viktor ; SCHRODI, Thomas ; WIENDAHL, Hans-Hermann: Strategien und Struktur produzierender Unternehmen. In: *Fabrikbetriebslehre 1*. Springer, 2020, S. 35–66

- [Bandow 2019] BANDOW, Gerhard: Instandhaltungslogistik. In: *Betrieb von Logistiksystemen*. Springer, 2019, S. 195–219
- [Barth et al. 2021] BARTH, Mike ; ROSEN, Roland ; KÜBLER, Karl ; JÄKEL, Jens ; RISTIĆ, Mirjana ; HEINZERLING, Till ; SCHEIFELE, Christian: Eine systematische Bewertung der Qualität von Simulationsmodellen: Teil 2: Bewertungsmetrik und Validierung. In: *atp magazin* 63 (2021), Nr. 04, S. 56–63
- [Bauer et al. 2018] BAUER, Harald ; BRANDL, Felix ; LOCK, Christopher ; REINHART, Gunther: Integration of Industrie 4.0 in lean manufacturing learning factories. In: *Procedia manufacturing* 23 (2018), S. 147–152
- [Bauer 2017] BAUER, Jürgen: Produktmarketing und marktorientierte Produktgestaltung. In: *Handbuch Maschinenbau*. Springer, 2017, S. 1703–1707
- [Bauernhansl 2017] BAUERNHANSL, Thomas: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen* Bd. 2, 2017
- [Bauernhansl u. Miehe 2020] BAUERNHANSL, Thomas ; MIEHE, Robert: Industrielle Produktion–Historie, Treiber und Ausblick. In: BAUERNHANSL, Thomas (Hrsg.): *Fabrikbetriebslehre 1*. Springer, 2020, S. 1–33
- [Bauernhansl et al. 2014] BAUERNHANSL, Thomas ; SCHATZ, Anja ; JÄGER, Jens: Komplexität bewirtschaften–Industrie 4.0 und die Folgen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (2014), Nr. 5, S. 347–350
- [Bavelas 1950] BAVELAS, Alex: Communication patterns in task-oriented groups. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* Bd. 6, 1950, S. 725–730
- [Beauchamp 1965] BEAUCHAMP, Murray A.: An improved index of centrality. In: *Behavioral Science – Journal of the Society for General Systems Research* Bd. 10, 1965, S. 161–163
- [Becker et al. 2003] BECKER, Jörg ; HOLTEN, Roland ; KNACKSTEDT, Ralf ; NIEHAVES, Björn: Forschungsmethodische Positionierung in der Wirtschaftsinformatik: epistemologische, ontologische und linguistische Leitfragen / Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik. 2003. – Forschungsbericht

- [Bender 2018] BENDER, Benedict: Industrial Internet of Things – Grundlagen: Teil 1: Industrial Internet of Things – Grundlagen. In: *Industrial Internet of Things – Grundlagen (Band 1)*. Norbert Gronau, 2018, S. 1–38
- [Bergmann 2010] BERGMANN, Günther: Führen mit Zielen–Implementierung und Evaluation. In: *Führen mit Zielen*. Springer, 2010, S. 65–87
- [Bergmann 2008] BERGMANN, Ulf: *Kommunikation als Optimierungskriterium– ein Beitrag zur Systematisierung der Layoutplanung von Produktionssystemen*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2008
- [Berlak 2003] BERLAK, Joachim: *Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen*. H. Utz, 2003
- [Beuth Verlag 1996] BEUTH VERLAG: *DIN ISO 10007 : Leitfaden für Konfigurationsmanagement*. 1996
- [Bleicher 1970] BLEICHER, Knut: Zur Organisation von Entscheidungsprozessen. In: *Zielprogramm und Entscheidungsprozeß in der Unternehmung*. Springer, 1970, S. 55–80
- [Bliss 2000] BLISS, Christoph: *Management von Komplexität: ein integrierter, systemtheoretischer Ansatz zur Komplexitätsreduktion*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, 2000
- [Bonacich 2007] BONACICH, Phillip: Some unique properties of eigenvector centrality. In: *Social networks* 29 (2007), Nr. 4, S. 555–564
- [Böse u. Windt 2007a] BÖSE, F ; WINDT, K: Catalogue of Criteria for Autonomous Control. In: HÜLSMANN, M (Hrsg.) ; WINDT, K (Hrsg.) ; Berlin: Springer (Veranst.): *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics - The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow* Berlin: Springer, 2007, S. 57–72
- [Böse u. Windt 2007b] BÖSE, Felix ; WINDT, Katja: Catalogue of criteria for autonomous control in logistics. In: HÜLSMANN, Michael (Hrsg.) ; WINDT, Katja (Hrsg.): *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics*. Springer, 2007, S. 57–72

- [Botthof 2015] BOTTHOF, Alfons: Zukunft der Arbeit im Kontext von Autonomik und Industrie 4.0. In: BOTTHOF, Alfons (Hrsg.) ; HARTMANN, Ernst A. (Hrsg.): *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, Springer Vieweg, 2015, S. 3–8
- [Botti u. Giret 2008] BOTTI, Vicente ; GIRET, Adriana: *Holonic manufacturing systems*. Springer, 2008
- [Bouncken u. Jones 2008] BOUNCKEN, Ricarda B. ; JONES, Gareth R.: *Organisation: Theorie, Design und Wandel*. München : Pearson Deutschland - Pearson Studium, 2008
- [Bradtke et al. 2016] BRADTKE, E. ; MELZER, M. ; RÖLLMANN, L. ; RÖSLER, U.: *Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Tätigkeitsspielraum in der Arbeit*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2016, 2016
- [Breaugh 1999] BREAUUGH, James A.: Further Investigation of the Work Autonomy Scales: Two Studies. In: SPRINGER (Hrsg.): *Journal of Business and Psychology*, 1999, S. 357–373
- [Bruhn u. Blockus 2009] BRUHN, Manfred ; BLOCKUS, Marc-Oliver: Komplexität bei Dienstleistungen. In: *Ganzheitliche Unternehmensführung in dynamischen Märkten*. Springer, 2009, S. 28–47
- [Buchholz 2012] BUCHHOLZ, Meike: *Theorie der Variantenvielfalt: Ein produktions- und absatzwirtschaftliches Erklärungsmodell*. Gabler Verlag, 2012
- [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie o Da] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Autonomik - Wegbereiter für Industrie 4.0*. Webseite. <https://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AbgeschlosseneProgrammeProjekte/Autonomik/autonomik.html>. Version: o D, Abruf: 13.11.2020
- [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie o Db] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Leistungsfähigkeitsbeurteilung unabhängiger Produktionsobjekte*. Webseite. https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Standardartikel/AutonomikProjekte/autonomik_projekt-lupo.html. Version: o D, Abruf: 13.11.2020

- [Carpanzano u. Jovane 2007] CARPANZANO, E ; JOVANE, F: Advanced automation solutions for future adaptive factories. In: *CIRP annals* 56 (2007), Nr. 1, S. 435–438
- [Cassandras 1989] CASSANDRAS, C.G: Autonomous material handling in computer integrated manufacturing systems. In: *Modelling and Design of flexible manufacturing Systems* (1989), 01, S. 81–89
- [Chen et al. 2020] CHEN, Gaige ; WANG, Pei ; FENG, Bo ; LI, Yihui ; LIU, Dekun: The framework design of smart factory in discrete manufacturing industry based on cyber-physical system. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 33 (2020), Nr. 1, S. 79–101
- [Chen et al. 2012] CHEN, Hsinchun ; CHIA, Roger H. L. ; STORE, Veda C.: Business Intelligence and Analytics: From Big Data to Big Impact. In: *MIS Quarterly* 36 (2012), Nr. 4, S. 1165–1188
- [Cichos u. Aurich 2016] CICHOS, Daniel ; AURICH, Jan C.: Umsetzung technischer Änderungen in der Produktion. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016), Nr. 9, S. 531–534
- [Czap 1991] CZAP, Hans: Kommunikation dezentraler betrieblicher Anwendungen. In: *Organisation und Betrieb von Informationssystemen*. Springer, 1991, S. 275–284
- [Dalenogare et al. 2018] DALENOGARE, Lucas S. ; BENITEZ, Guilherme B. ; AYALA, Néstor F. ; FRANK, Alejandro G.: The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. In: *International Journal of Production Economics* 204 (2018), S. 383–394
- [Dangelmaier 2001] DANGELMAIER, Wilhelm: *Fertigungsplanung: Planung und Ablauf der Fertigung*. Bd. 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001
- [Delhees 1994] DELHEES, Karl H.: Was ist soziale Kommunikation? In: *Soziale Kommunikation*. Springer, 1994, S. 11–47
- [Denk u. Pfneissl 2009] DENK, Robert ; PFNEISSL, Thomas: *Komplexitätsmanagement*. Linde international Fachbuch Wirtschaft, 2009

- [Deuse et al. 2015] DEUSE, Jochen ; BUSCH, Felix ; WEISNER, Kirsten ; STEFFEN, Marlies: Gestaltung sozio-technischer Arbeitssysteme für Industrie 4.0. In: HIRSCH-KREINSEN, Hartmut (Hrsg.) ; ITTERMANN, Peter (Hrsg.) ; NIEHAUS, Jonathan (Hrsg.): *Digitalisierung industrieller Arbeit*, Nomos, 2015, S. 148 – 165
- [Dilts et al. 1991] DILTS, D.M. ; BOYD, N. P. ; WHORMS, H. H.: The Evaluation of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems. In: *Journal of Manufacturing Systems* 10 (1991), S. 79–93
- [Drees u. Sack 2011] DREES, Jörg ; SACK, Christoph: Produktionsoptimierung durch Kennzahlen der Wertstrom-Modellierung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106 (2011), Nr. 6, S. 466–470
- [Eckerson 2011] ECKERSON, Wayne: *Big Data Analytics: Profiling the Use of Analytical Platforms in User Organizations*. TDWI White Papers, 2011
- [Eigner et al. 2012] EIGNER, Martin ; GERHARDT, Florian ; GILZ, Torsten ; NEM, Fabrice M. ; EIGNER, Martin (Hrsg.) ; GERHARDT, Florian (Hrsg.) ; GILZ, Torsten (Hrsg.) ; NEM, Fabrice M. (Hrsg.): *Informationstechnologie für Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [Eilon 1969] EILON, Samuel: What is a decision? In: *Management Science* 16 (1969), Nr. 4, S. B–172
- [ElMaraghy u. Urbanic 2004] EIMARAGHY, W.H. ; URBANIC, R.J.: Assessment of Manufacturing Operational Complexity. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53 (2004), Nr. 1, 401 - 406. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60726-4](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4). – DOI [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60726-4](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4). – ISSN 0007–8506
- [ElMaraghy 2019] ELMARAGHY, Hoda: Smart changeable manufacturing systems. In: *Procedia manufacturing* 28 (2019), S. 3–9
- [ElMaraghy et al. 2012] ELMARAGHY, Waguih ; ELMARAGHY, Hoda ; TOMIYAMA, Tetsuo ; MONOSTORI, Laszlo: Complexity in engineering design and manufacturing. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012), Nr. 2, 793 - 814. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp>.

- 2012.05.001. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>. – ISSN 0007–8506
- [ElMaraghy u. Urbanic 2003] ELMARAGHY, W.H. ; URBANIC, R.J.: Modelling of Manufacturing Systems Complexity. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (2003), Nr. 1, 363 - 366. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60602-7](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60602-7). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60602-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60602-7). – ISSN 0007–8506
- [Erlach 2020] ERLACH, Klaus: *Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik*. Bd. 3. Springer Vieweg, 2020
- [Everett u. Borgatti 1999] EVERETT, Martin G. ; BORGATTI, Stephen P.: The centrality of groups and classes. In: *The Journal of mathematical sociology* 23 (1999), Nr. 3, S. 181–201
- [Faber 2019] FABER, Oliver: Digitalisierung–ein Megatrend: Treiber & Technologische Grundlagen. In: *Management 4.0–Unternehmensführung im digitalen Zeitalter*. Springer, 2019, S. 3–42
- [Favre-Bulle 2013] FAVRE-BULLE, Bernard: *Automatisierung komplexer Industrieprozesse: Systeme, Verfahren und Informationsmanagement*. Springer-Verlag, 2013
- [Fiedler u. Regenhard 1991] FIEDLER, Angela ; REGENHARD, Ulla: *Mit CIM in die Fabrik der Zukunft?: Probleme und Erfahrungen*. Westdeutscher Verlag, 1991
- [Flad et al. 2017] FLAD, Stefan ; WEISSENBERGER, Benedikt ; CHEN, Xinyu ; RÖSCH, Susanne ; VOIGT, Tobias: Automatische Generierung von Fertigungs-Managementsystemen. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2*. Springer, 2017, S. 349–368
- [Flament 1963] FLAMENT, Claude: *Applications of Graph Theory to Group Structure*. Prentice-Hall Series in Mathematical Analysis of Social Behavior, 1963
- [Förster 2014] FÖRSTER, Georg: *Die Rolle von Autonomie und Einfluss bei der Wirkung von Macht auf Handlungsidentifikation*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Diss., 2014

- [Forstner u. Dümmler 2014] FORSTNER, Lisa ; DÜMMLER, Mathias: Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke–Chancen und Potenziale durch Industrie 4.0. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 131 (2014), Nr. 7, S. 199–201
- [Francesco et al. 2019] FRANCESCO, G ; GALIZIA, W ; HODA, E: The evolution of molds in manufacturing: from rigid to flexible. In: *Procedia Manufacturing* 3 (2019), Nr. 3
- [Freeman 1977] FREEMAN, Linton C.: A set of measures of centrality based on betweenness. In: *Sociometry* (1977), S. 35–41
- [Freeman 1978] FREEMAN, Linton C.: Centrality in social networks conceptual clarification. In: *Social Networks* 1 (1978), Nr. 3, S. 215 – 239. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7). – DOI [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7). – ISSN 0378–8733
- [Freitag et al. 2004] FREITAG, Michael ; HERZOG, Otthein ; SCHOLZ-REITER, Bernd: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: *Industrie Management* (2004), S. 23–27
- [Frey et al. 2020] FREY, Dominik ; SCHUH, Günther ; RESCHKE, Jan: Bewertung der Häufigkeit von Planungsläufen im Übergang zur digitalen Fabrik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020), Nr. 3, S. 107–110
- [Furmans u. Kilger 2019] FURMANS, Kai ; KILGER, Christoph: *Betrieb von Logistiksystemen*. Springer, 2019
- [Gabriel 2016] GABRIEL, Roland: Anwendungssystem. In: GRONAU, Norbert (Hrsg.) ; BECKER, Jörg (Hrsg.) ; LEIMEISTER, Jan M. (Hrsg.) ; SINZ, Elmar (Hrsg.) ; SUHL, Leena (Hrsg.): *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik – Online-Lexikon. Neunte Auflage*, GITO, 2016
- [Gadatsch 2015] GADATSCH, Andreas: Prozessmanagement und Big Data: Eine neue Herausforderung. In: *ERP Management* 11 (2015), Nr. 1, S. 53–54
- [Galaske et al. 2014] GALASKE, Nadia ; CHRIST, Alexander ; ANDERL, Reiner et al.: Integration von Menschen in Smart Factories: Ein individualisierbares Profildatenmodell für Industrie 4.0. In: *Design for X-Beiträge zum 25* (2014), S. 133–144

- [Galizia et al. 2020] GALIZIA, Francesco G. ; ELMARAGHY, Hoda ; BORTOLINI, Marco ; MORA, Cristina: Product platforms design, selection and customisation in high-variety manufacturing. In: *International Journal of Production Research* 58 (2020), Nr. 3, S. 893–911
- [Gebhard u. Kuhn 2007] GEBHARD, Marina ; KUHN, Heinrich: Robuste hierarchische Produktionsplanung mit Bedarfsszenarien. In: OTTO, Andreas (Hrsg.) ; OBERMAIER, Robert (Hrsg.): *Logistikmanagement*. Springer, 2007, S. 161–183
- [Geitner 1978] GEITNER, Uwe W.: *CIM-Handbuch: Wirtschaftlichkeit durch Integration*. Friedr. Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1978
- [Gepp et al. 2013] GEPP, Michael ; AMBERG, Michael ; VOLLMAR, Jan: Standardisierungsprogramme im Anlagen-Engineering – Ein Diskussionsbeitrag zur Begriffsbestimmung. In: MAURER, Maik (Hrsg.) ; SCHULZE, Sven-Olaf (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*, Carl Hanser Verlag GmbH and Co. KG, 2013, S. 85–94
- [Gerberich 2011] GERBERICH, Thorsten: *Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie: Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl*. Gabler Verlag, 2011
- [Gießmann 2010] GIESSMANN, Marco: *Komplexitätsmanagement in der Logistik: kausalanalytische Untersuchung zum Einfluss der Beschaffungskomplexität auf den Logistikerfolg*. BoD–Books on Demand, 2010
- [Gilbert u. Troitzsch 2005] GILBERT, Nigel ; TROITZSCH, Klaus: *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill Education (UK), 2005
- [Glück 2016] GLÜCK, Markus: *FAQ – Industrie 4.0*. Symposion Publishing, 2016
- [Gorltdt et al. 2017] GORLDT, Christian ; WIESNER, Stefan ; WESTPHAL, Ingo ; THOBEN, K-D: Product-Service systems im zeitalter von industrie 4.0 in produktion und logistik–auf dem weg zu Cyber-Physischen Product-Service systemen. In: *Dienstleistungen 4.0*. Springer, 2017, S. 363–378
- [Görtz u. Hessler 2007] GÖRTZ, Marcus ; HESSELER, Martin: *Basiswissen ERP-Systeme: Auswahl, Einführung und Einsatz betriebswirtschaftlicher Standardsoftware*. W3I, 2007

- [Goudz u. Erdogan 2021] GOUDZ, Alexander ; ERDOGAN, Sibel: Innovative Technologien als Treiber der Logistikbranche. In: *Digitalisierung in der Corona-Krise*. Springer, 2021, S. 21–42
- [Gräßler 2004] GRÄSSLER, Iris: *Kundenindividuelle Massenproduktion: Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004
- [Gräßler u. Pöhler 2020] GRÄSSLER, Iris ; PÖHLER, Alexander: Produktentstehung im Zeitalter von Industrie 4.0. In: *Handbuch Gestaltung digitaler und vernetzter Arbeitswelten*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2020, S. 383–403
- [Gronau et al. 2010a] *Kapitel LUPO – Leistungsfähigkeitsbeurteilung unabhängiger Produktionsobjekte*. In: GRONAU, N. ; THEUER, H. ; LASS, S.: *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. GITO mbH Verlag, 2010, S. 177–187
- [Gronau 2012] GRONAU, Norbert: Analytic Manufacturing: Gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit durch optimale Nutzung von Fertigungsdaten. In: *PRODUCTIVITY Management* 17 (2012), Nr. 5, S. 19–21
- [Gronau 2015] GRONAU, Norbert: Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen. In: *Industrie Management* 31 (2015), Nr. 3, S. 16–20
- [Gronau 2016] GRONAU, Norbert: *Handbuch der ERP-Auswahl*. Bd. 2. GITO mbH, 2016
- [Gronau 2017] GRONAU, Norbert: *Geschäftsprozessmanagement in Wirtschaft und Verwaltung: Analyse, Modellierung und Konzeption*. Bd. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, 2017
- [Gronau 2019] GRONAU, Norbert: The appropriate degree of autonomy in production systems. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Bd. 21, Elsevier, 2019, S. 70–80
- [Gronau 2020] GRONAU, Norbert: Fabriksoftware – eine Typologie. In: *Fabriksoftware* 25 (2020), S. 17–20

- [Gronau u. Levina 2008] GRONAU, Norbert ; LEVINA, Olga: Gestaltung und Beherrschung naturanaloger Produktionsprozesse. In: *PPS Management* (2008), S. 31–34
- [Gronau u. Lindemann 2009] GRONAU, Norbert ; LINDEMANN, Marcus: Gestaltung marktorientierter Produktionssysteme. In: SPECHT, Dieter (Hrsg.): *Weiterentwicklung der Produktion. Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB*, 2009, S. 43–59
- [Gronau u. Theuer 2011] GRONAU, Norbert ; THEUER, Hanna: Potenziale autonomer Technologien in Produktion und Logistik. In: SIEPERMANN (Hrsg.) ; ELEY (Hrsg.): *Logistik – Gestern, heute, morgen - Festschrift für Richard Vahrenkamp zur Vollendung des 65. Lebensjahres*, GITO Verlag (Berlin), 2011, S. 269–286
- [Gronau u. Theuer 2016] GRONAU, Norbert ; THEUER, Hanna: Determination of the Optimal Degree of Autonomy in a Cyber-Physical Production System. In: *Proceedings of 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016)*, 2016
- [Gronau et al. 2013a] GRONAU, Norbert ; THEUER, Hanna ; LASS, Sander: Anwendungszentrum Industrie 4.0. In: *Produzieren in Deutschland: Wettbewerbsfähigkeit im 21. Jahrhundert*. Gito, 2013, S. 277–298
- [Gronau et al. 2013b] GRONAU, Norbert ; THEUER, Hanna ; LASS, Sander: Evaluation of Production Processes Using Hybrid Simulation. In: WINDT, K. (Hrsg.) ; Springer-Verlag (Veranst.): *Robust Manufacturing Control, Lecture Notes in Production Engineering* Springer-Verlag, 2013, S. 401–413
- [Gronau et al. 2010b] GRONAU, Norbert ; THEUER, Hanna ; LASS, Sander et al.: Productivity evaluation of autonomous production objects. In: *2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics* IEEE, 2010, S. 751–756
- [Gronau et al. 2017] GRONAU, Norbert ; ULLRICH, André ; BENDER, Benedict: Hybride Lernfabrik im Anwendungszentrum Industrie 4.0. In: GRONAU, Norbert (Hrsg.): *Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation*, GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, 2017, S. 1–24

- [Gronau u. Weber 2009] GRONAU, Norbert ; WEBER, Edzard: Wandlungsfähigkeit: Generische Strategien zur Handhabung von Veränderungen in der Umwelt. (2009)
- [Grundstein et al. 2015] GRUNDSTEIN, S. ; SCHUKRAFT, S. ; SCHOLZ-REITER, B. ; FREITAG, M.: Evaluation System for Autonomous Control Methods in Coupled Planning and Control Systems. In: *Procedia CIRP* 33 (2015), 121 - 126. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.023>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.023>. – ISSN 2212-8271. – 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14
- [Grundstein et al. 2013] GRUNDSTEIN, Sebastian ; SCHUKRAFT, Susanne ; GÖRGES, Michael ; SCHOLZ-REITER, Bernd: Autonome Produktionssteuerung bei zentraler Produktionsplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013), Nr. 12, S. 992–994
- [Hasenpusch et al. 2004] HASENPUSCH, Jürgen ; MOOS, Christoph ; SCHWELLBACH, Uwe: Komplexität als Aktionsfeld industrieller Unternehmen. In: MAIER, Frank (Hrsg.): *Komplexität und Dynamik als Herausforderung für das Management*, Deutscher Universitäts-Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2004, S. 131–154
- [Hatvany 1985] HATVANY, J.: Intelligence and Cooperation in Heterarchic Manufacturing Systems. In: *Robotic and Computer-Integrated Manufacturing* 2 (1985), S. 101–104
- [Heina 1999] HEINA, Jürgen: Variantenvielfalt. In: *Variantenmanagement*. Springer, 1999, S. 4–29
- [Heinen 2008] HEINEN, T.: Struktur- und Layoutplanung. In: ARNOLD, D. et a. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*, 2008, S. 307–322
- [Heinrich et al. 2017] HEINRICH, Berthold ; LINKE, Petra ; GLÖCKLER, Michael: *GRUNDLAGEN AUTOMATISIERUNG: sensorik, regelung, steuerung*. Springer-Verlag, 2017
- [Hermann et al. 2017] HERMANN, Thomas ; HIRSCHLE, Sandra ; KOWOL, David ; RAPP, Julian ; RESCH, Ulrike ; ROTHMANN, Johannes: Auswirkungen von

- Industrie 4.0 auf das Anforderungsprofil der Arbeitnehmer und die Folgen im Rahmen der Aus- und Weiterbildung. In: ANDELFINGER, Volker P. (Hrsg.) ; HÄNISCH, Till (Hrsg.): *Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern*, Springer Gabler, Wiesbaden, 2017, S. 239–254
- [Hichert et al. 1996] HICHERT, Rolf ; ROOS, Alexander ; ZIEGLER, Jürgen ; REICHWALD, Ralf ; MÖSLEIN, Kathrin ; MEITNER, Helmut ; SCHWEIGGERT, Franz ; EBERSPÄCHER, Jörg: Information und Kommunikation in dezentralen Strukturen. In: BULLINGER, Hans-Jörg (Hrsg.) ; WARNECKE, Hans-Jürgen (Hrsg.): *Neue Organisationsformen im Unternehmen*. Springer-Verlag, 1996, S. 657–752
- [Holtmann 2008] HOLTSMANN, Jan P.: *Pfadabhängigkeit strategischer Entscheidungen: eine Fallstudie am Beispiel des Bertelsmann-Buchclubs Deutschland*. Kölner Wissenschaftsverlag, 2008
- [Hooshmand et al. 2013] HOOSHMAND, Yousef ; KÖHLER, Peter ; KORFF-KRUMM, Andrea: Komplexitätsbeherrschung und Transparenzerhöhung in der Einzelfertigung. In: *ProduktDaten Journal* 2 (2013), S. 55–9
- [Hoppe 2014] HOPPE, Gerd: High-Performance Automation verbindet IT und Produktion. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer, 2014, S. 249–275
- [Huber 2018] HUBER, Walter: *Industrie 4.0 kompakt–Wie Technologien unsere Wirtschaft und unsere Unternehmen verändern*. Springer, 2018
- [Hummeltenberg 2014] HUMMELTENBERG, Wilhelm ; GRONAU, Norbert (Hrsg.) ; BECKER, Jörg (Hrsg.) ; LEIMEISTER, Jan M. (Hrsg.) ; SINZ, Elmar (Hrsg.) ; SUHL, Leena (Hrsg.): *Business Intelligence*. <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/daten-wissen/Business-Intelligence/index.html/?searchterm=intelligence>. Version:2014, Abruf: 10.03.2018
- [Hvam et al. 2020] HVAM, Lars ; HANSEN, Christian L. ; FORZA, Cipriano ; MORTENSEN, Niels H. ; HAUG, Anders: The reduction of product and process complexity based on the quantification of product complexity costs. In: *International Journal of Production Research* 58 (2020), Nr. 2, S. 350–366

- [Jacobs et al. 2007] JACOBS, Mark ; VICKERY, Shawnee K. ; DROGE, Cornelia: The effects of product modularity on competitive performance: Do integration strategies mediate the relationship? In: *International Journal of Operations and Production Management* Bd. 27, 2007, S. 1046–1068
- [Jäger et al. 2013] JÄGER, Jens M. ; KLUTH, Andreas ; SAUER, Marcus ; SCHATZ, Anja: Komplexitätsbewirtschaftung. In: *Zeitschr. f. wirtsch. Fabrikbetrieb* (2013), Nr. 05, 341–343. https://www.wiso-net.de/document/ZWF_A9D5EA46FF53F77BBEA3AFC91A11599E. ISBN 0932–0482
- [Jamshidi 2017] JAMSHIDI, Mo M.: A system of systems framework for autonomy with big data analytic and machine learning. In: *Procedia Computer Science* 120 (2017), 6. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.202>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.202>. – ISSN 1877–0509. – 9th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perception, ICSCCW 2017, 22-23 August 2017, Budapest, Hungary
- [Jansen 2006] JANSEN, Dorothea: *Einführung in die Netzwerkanalyse: Grundlagen, Methoden, Forschungsbeispiele*. Springer-Verlag, 2006
- [Jeschke 2017] JESCHKE, Barnim G.: *Entscheidungsorientiertes Management: Einführung in eine konzeptionell fundierte, pragmatische Entscheidungsfindung*. De Gruyter Oldenbourg, 2017
- [Jeyaraj et al. 2014] JEYARAJ, ANAND ; SAUTER, VICKI L. ; ST, M: Validation of business process models using swimlane diagrams. In: *Journal of Information Technology Management* 25 (2014), Nr. 4, S. 27–37
- [Jones et al. 1999] JONES, C. et al.: The Lean Enterprise. In: *In: BT Technol J* (1999), Nr. 4, S. Seiten: 15–22
- [Kagermann et al. 2016] KAGERMANN, Henning ; ANDERL, Reiner ; GAUSEMEIER, Jürgen ; SCHUH, Günther ; WAHLSTER, Wolfgang: *Industrie 4.0 in a Global Context: strategies for cooperating with international partners*. Herbert Utz Verlag, 2016

- [Kamiske u. Brauer 2003] KAMISKE, Gerd F. ; BRAUER, Jörg-Peter: *Qualitätsmanagement von A bis Z: Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements*. 4., aktualisierte und erg. Aufl. München : Hanser, 2003
- [Karbon 2015] KARBAN, Walter: *Systemtheorien, Komplexität, Emergenz und der notwendige Betrachter*. Verlag Dr. Kovac, 2015
- [Keen et al. 2019] KEEN, Steve ; AYRES, Robert U. ; STANDISH, Russell: A note on the role of energy in production. In: *Ecological economics* 157 (2019), S. 40–46
- [Kersten et al. 2005] KERSTEN, Wolfgang ; KOEPPEN, Birgit ; MEYER, Christian M. ; KERN, Eva-Maria: Reduktion der Prozesskomplexität durch Modularisierung. In: *Industrie Management* (2005), Nr. 4, S. 11–14
- [Kersten et al. 2017] KERSTEN, Wolfgang ; SCHRÖDER, Meike ; INDORF, Marius: Potenziale der Digitalisierung für das Supply Chain Risikomanagement: Eine empirische Analyse. In: *Betriebswirtschaftliche Aspekte von Industrie 4.0*. Springer, 2017, S. 47–74
- [Kleinemeier 2014] KLEINEMEIER, Michael: Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungsnetzwerken. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer, 2014, S. 571–579
- [Kluth et al. 2014] KLUTH, Andreas ; JÄGERA, Jens ; SCHATZA, Anja ; BAUERNHANSL, Thomas: Evaluation of Complexity Management Systems – Systematical and Maturity-Based Approach. In: *Variety Management in Manufacturing. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems* (2014), S. 224–229
- [Kluth u. Storr 1997] KLUTH, R. ; STORR, A.: Hohe Produktivität durch werkergerichtetes, situationsorientiertes Informationsmanagement. In: FERTIGUNGSTECHNIK, Gesellschaft für (Hrsg.): *FTK'97: Fertigungstechnisches Kolloquium*, 1997, S. 325–349
- [Kocsi et al. 2020] KOCSI, Balázs ; MATONYA, Michael M. ; PUSZTAI, László Péter ; BUDAI, István: Real-time decision-support system for high-mix low-volume production scheduling in industry 4.0. In: *Processes* 8 (2020), Nr. 8, S. 912

- [Köhler et al. 1997] KÖHLER, A. ; LÄMMLE, C ; WIENDAHL, H.-H.: Dezentralisierung und Vernetzung der Produktionsplanung und -steuerung. In: FERTIGUNGSTECHNIK, Gesellschaft für (Hrsg.): *FTK'97: Fertigungstechnisches Kolloquium*, 1997, S. 199–217
- [Kopenhagen 2014] KOPPENHAGEN, Frank: Modulare Produktarchitekturen – Komplexitätsmanagement in der frühen Phase der Produktentwicklung. In: SCHOENEBERG, Klaus-Peter (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*, Springer Gabler, 2014, S. 113–162
- [Krallmann 2002] KRALLMANN, Herrmann (Hrsg.): *Systemanalyse im Unternehmen: Vorgehensmodelle, Modellierungsverfahren und Gestaltungsoptionen*. Bd. 4. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2002
- [Krawatzek et al. 2013] KRAWATZECK, Robert ; ZIMMER, Michael ; TRAHASCH, Stephan: Agile Business Intelligence—Definition, Maßnahmen und Herausforderungen. In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 50 (2013), Nr. 2, S. 56–63
- [Kropik u. Kropik 2021] KROPIK, Markus ; KROPIK, Markus: Logistik. In: *Produktionsleitsysteme für die Automobilindustrie: Digitalisierung des Shop-Floors in der Automobilproduktion* (2021), S. 237–295
- [Krüger 2007] KRÜGER, Jörg: Nachhaltige Produktion durch flexible Automatisierung. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2007), Nr. 6, S. 332–334
- [Lasi et al. 2014] LASI, Heiner ; FETTKE, Peter ; KEMPER, Hans-Georg ; FELD, Thomas ; HOFFMANN, Michael: Industrie 4.0. In: *Wirtschaftsinformatik* 56 (2014), Nr. 4, S. 261–264
- [Lass et al. 2012] LASS, S. ; THEUER, H. ; GRONAU, N.: A New Approach for Simulation and Modeling of Autonomous Production Processes. In: *Proceedings of the 45th Hawaii International Conference on System Sciences (HICCS 2012)*, 2012, S. 1247–1256
- [Lass 2017] LASS, Sander: *Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen*, Universität Potsdam, Diss., 2017

- [Lass u. Gronau 2020] LASS, Sander ; GRONAU, Norbert: A factory operating system for extending existing factories to Industry 4.0. In: *Computers in industry* 115 (2020), S. 103–128
- [Lau et al. 2007] LAU, Antonio K. W. ; YAM, Richard C. M. ; TANG, Esther: The impacts of product modularity on competitive capabilities and performance: An empirical study. In: *International Journal of Production Economics* (2007), S. 1–20
- [Lauber u. Göhner 1999] LAUBER, Rudolf ; GÖHNER, Peter: *Prozessautomatisierung 1*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
- [Laudon et al. 2015] LAUDON, KC ; LAUDON, JP ; SCHODER, D: *Wirtschaftsinformatik: Eine Einführung, 3., vollständig überarbeitete Auflage*. 2015
- [Leang et al. 2018] LEANG, Suh H. ; MAHMOOD, Wan Hasrulnizzam W. ; RAHMAN, Muhamad Arfauz A.: The impact of manufacturing complexity drivers on performance-a preliminary study. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Bd. 328 IOP Publishing, 2018, S. 012010
- [Leavitt 1951] LEAVITT, Harold J.: Some effects of communication patterns on group performance. In: *Journal of abnormal and social psychology* Bd. 46, 1951
- [Lee 2008] LEE, Edward A.: Cyber physical systems: Design challenges. In: *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)* IEEE, 2008, S. 363–369
- [Lee et al. 2015] LEE, Jay ; BAGHERI, Behrad ; KAO, Hung-An: A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. In: *Manufacturing letters* 3 (2015), S. 18–23
- [Lenz et al. 2017] LENZ, Hartmut ; KESSLER, Stephan ; RYTIR, Cindy ; SCHICK, Anette ; SCHNEIDEHAN, Michael: Plug-and-operate für die produktionsnahe Logistik: Aktuelle Herausforderungen und Lösungskonzepte. In: *atp magazin* 59 (2017), Nr. 01-02, S. 38–45
- [Li et al. 2017] LI, Guoping ; HOU, Yun ; WU, Aizhi: Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods. In: *Chinese Geographical Science* 27 (2017), Nr. 4, S. 626–637

- [Lindemann u. Gronau 2009] LINDEMANN, Marcus ; GRONAU, Norbert: Gestaltung marktorientierter Produktionssysteme. In: SPECHT, Dieter (Hrsg.): *Weiterentwicklung der Produktion*. Springer, 2009 (Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB), S. 43–59
- [Lindemann 2005] LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Springer-Verlag, 2005
- [Link 2014] LINK, Patrick: Agile Methoden im Produkt-Lifecycle- 5 Prozess – Mit agilen Methoden die Komplexität im Innovationsprozess handhaben. In: SCHOENEBERG, Klaus-Peter (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [LNI e.V. o D] LNI E.V., Labs Network Industrie 4.: *Testlabs Zusammenarbeit*. Webseite. <https://lni40.de/umsetzung/testzentren/>. Version: o D, Abruf: 28.08.2021
- [Lödding 2005] LÖDDING, Hermann: *Verfahren der fertigungssteuerung*. Bd. 2. Springer, 2005
- [Loos 2017] LOOS, Peter: *Fertigungssteuerung*. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Produktionsplanungs--und--steuerungssystem/Fertigungssteuerung>. Version: 2017, Abruf: 16.01.2018
- [Lorenzer et al. 2010] LORENZER, Thomas ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad: Mit Rekonfigurierbarkeit gewinnt der Anwender. (2010)
- [Lucks 2017] LUCKS, Kai: Grundlagen und Definitionen einer Industrie 4.0. In: *Praxishandbuch Industrie 4* (2017), S. 3–16
- [Luhmann 1984] LUHMANN, Niklas: *Soziale Systeme – Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Suhrkamp, 1984

- [Lumpkin et al. 2009] LUMPKIN, G. T. ; COGLISER, Claudia C. ; SCHNEIDER, Dawn R.: Understanding and Measuring Autonomy: An Entrepreneurial Orientation Perspective. In: *Entrepreneurship Theory and Practice* 33 (2009), S. 47–69
- [Mackenzie 1966] MACKENZIE, Kenneth D.: Structural centrality in communications networks. In: *Psychometrika* Bd. 31, Springer, 1966, S. 17–25
- [Mainzer 1999] MAINZER, Klaus: Komplexe System und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. In: *Komplexe System und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, Springer-Verlag, 1999
- [Malik 1998] MALIK, Fredmund: *Komplexität – was ist das?* 1998
- [Mandelbrot 1977] MANDELBROT, Benoit B.: *Fractals: Form, Chance and Dimension*. W.H.Freeman and Co Ltd, 1977
- [Manyika et al. 2011] MANYIKA, James ; CHUI, Michael ; BROWN, Brad ; BUGHIN, Jacques ; DOBBS, Richard ; ROXBURGH, Charles ; BYERS, Angela H.: *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*. White Paper McKinsey Global Institute, 2011
- [Manzey 2012] MANZEY, Dietrich: Systemgestaltung und Automatisierung. In: *Human Factors*. Springer, 2012, S. 333–352
- [Martin et al. 2002] MARTIN, Reiner ; MAUTERER, Heiko ; GEMÜDEN, Hans-Georg: Systematisierung des Nutzens von ERP-Systemen in der Fertigungsindustrie. In: *WIRTSCHAFTSINFORMATIK* 44 (2002), Nr. 2, S. 109–116
- [Matt 2010] MATT, Dominik T.: Beherrschung der zeitabhängigen Komplexitätszunahme als Schlüssel zur Sicherstellung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen – ein systemtheoretischer Ansatz. In: NYHUIS, Peter (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme* Bd. 237-257, GITO Verlag Berlin, 2010
- [McAfee u. Brynjolfsson 2012] MCAFEE, Andrew ; BRYNJOLFSSON, Erik: *Big Data: The Management Revolution*. Harvard Business Review, 2012
- [Mehigan 2005] MEHIGAN, Tim: Musil mit Luhmann: Das Problem des Vertrauens in Musils Mann ohne Eigenschaften. In: MARTENS, Gunter (Hrsg.) ; RUTHNER,

- Clemens (Hrsg.) ; VOS, Jaak de (Hrsg.): *Musil anders: Neue Erkundungen eines Autors zwischen den Diskursen*, Europäischer Verlag der Wissenschaften, 2005, S. 45–60
- [Meissner et al. 2017] MEISSNER, Hermann ; ILSEN, Rebecca ; AURICH, Jan C.: Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0. In: *Procedia cirp* 62 (2017), S. 165–169
- [Merten 2013] MERTEN, Klaus: *Kommunikation: Eine Begriffs-und Prozeßanalyse*. Bd. 35. Springer-Verlag, 2013
- [Meudt et al. 2017] MEUDT, Tobias ; POHL, Malte ; METTERNICH, Joachim: *Die Automatisierungspyramide – Ein Literaturüberblick*. 2017
- [Meyer 2007] MEYER, Christian M.: *Integration des Komplexitätsmanagements in den strategischen Führungsprozess der Logistik*. Haupt Verlag, 2007
- [Milberg 1991] MILBERG, Joachim: Wettbewerbsfaktor Zeit in Produktionsunternehmen. In: *Wettbewerbsfaktor Zeit in Produktionsunternehmen*. Springer, 1991, S. 11–31
- [Mönch 2020] MÖNCH, Lars: *Manufacturing Execution System*. Webseite. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Manufacturing-Execution-System/index.html?searchterm=manufacturing>. Version: 2020, Abruf: 10.10.2020
- [Monostori 2014] MONOSTORI, László: Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R and D challenges. In: *Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2014, S. 9–13
- [Monostori u. Prohaszka 1993] MONOSTORI, Laszlo ; PROHASZKA, Janos: A Step towards Intelligent Manufacturing: Modelling and Monitoring of Manufacturing Processes through Artificial Neural Networks. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 42 (1993), Nr. 1, 485 - 488. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62491-3](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62491-3). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62491-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62491-3). – ISSN 0007-8506

- [Mourtzis u. Doukas 2013] MOURTZIS, Dimitris ; DOUKAS, Michalis: Decentralized manufacturing systems review: challenges and outlook. In: *Robust Manufacturing Control*. Springer, 2013, S. 355–369
- [Müller 2015] MÜLLER, Andreas: *Wirtschaftlichkeit der Integration: Eine ökonomische Analyse der Standardisierung betrieblicher Anwendungssysteme*. Springer-Verlag, 2015
- [Müller u. Tschöpe 2020] MÜLLER, Christian ; TSCHÖPE, Jan: Risikomanagement in der Supply-Chain. In: *Betriebliches Risikomanagement und Industrieversicherung*. Springer, 2020, S. 531–556
- [Mussbach-Winter 1997] MUSSBACH-WINTER, Ute: Dezentrale Produktionsplanung und -steuerung. In: FERTIGUNGSTECHNIK, Gesellschaft für (Hrsg.): *FTK'97: Fertigungstechnisches Kolloquium*, 1997, S. 420–431
- [Neb1 2018] NEBL, T.: *Production Management. Produktionswirtschaft*. De Gruyter, 2018 (Global Text). <https://books.google.de/books?id=849dDwAAQBAJ>. – ISBN 9783486812107
- [Neb1 2011] NEBL, Theodor: *Produktionswirtschaft*. Bd. 7. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2011
- [Nedeß et al. 2008] NEDESS, Christian ; FRIEDEWALD, Axel ; WAGNER, Lars: Simulationsgestützte Optimierung zur Ablauf-und Strukturverbesserung in Produktionsbetrieben. In: *Advances in simulation for production and logistics applications*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag (2008), S. 469–478
- [Nedeß et al. 1995] NEDESS, Christian ; MALLON, Jürgen ; STROSINA, Christian: Fertigungssegmentierung. In: *Die Neue Fabrik*. Springer, 1995, S. 60–72
- [Neubauer et al. 2017] NEUBAUER, Matthias ; STARY, Christian ; KANNENGIESER, Udo ; HEININGER, Richard ; TOTTER, Alexandra ; BONALDI, David: S-BPM's Industrial Capabilities. In: NEUBAUER, Matthias (Hrsg.) ; STARY, Christian (Hrsg.): *S-BPM in the Production Industry*, Springer Open, 2017, S. 27–68
- [Newman 2005] NEWMAN, Mark E.: A measure of betweenness centrality based on random walks. In: *Social networks* 27 (2005), Nr. 1, S. 39–54

- [Nieminen 1973] NIEMINEN, J.: On the centrality in a directed graph. In: *Social Science Research* 2 (1973), Nr. 4, S. 371–378
- [Nieminen 1974] NIEMINEN, Juhani: On the centrality in a graph. In: *Scandinavian journal of psychology* 15 (1974), Nr. 1, S. 332–336
- [N.Kiggundu 1983] N.KIGGUNDU, Moses: Task independence and job design: Test of a theory. In: *Organizational Behavior and Human Performance*, 1983, S. 145–172
- [Nohr 2001] NOHR, Holger: Management der Informationsqualität. In: RIEKERT, Wolf-Fritz (Hrsg.) ; MICHELSON, Martin (Hrsg.): *Informationswirtschaft: Innovation für die Neue Ökonomie*, 2001, S. 57–77
- [Nördinger 2015] NÖRDINGER, Susanne: Alles neu macht Industrie 4.0. In: *Produktion* (2015), Nr. 11, S. 6–7
- [Österle et al. 2010] ÖSTERLE, Hubert ; WINTER, Robert ; BRENNER, Walter: *Gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik: Ein Plädoyer für Rigor und Relevanz*. Infowerk, 2010
- [Otte u. Rousseau 2002] OTTE, Evelien ; ROUSSEAU, Ronald: Social network analysis: a powerful strategy, also for the information sciences. In: *Journal of information Science* 28 (2002), Nr. 6, S. 441–453
- [Papakostas et al. 2009] PAPAKOSTAS, N. ; EFTHYMIU, K. ; MOURTIZIS, D. ; CHRYSOLOURIS, G.: Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamics approaches. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009), Nr. 1, 437 - 440. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.032>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.032>. – ISSN 0007–8506
- [Papenfort et al. 2015] PAPPENFORT, Josef ; FRANK, Ursula ; STRUGHOLD, Sebastian: Integration von IT in die Automatisierungstechnik. In: *Informatik-Spektrum* 38 (2015), Nr. 3, S. 199–210
- [Peffers et al. 2018] PEFFERS, Ken ; TUUNANEN, Tuure ; NIEHAVES, Björn: Design science research genres: introduction to the special issue on exemplars and criteria for applicable design science research. In: *European Journal of*

- Information Systems* 27 (2018), Nr. 2, 129-139. <http://dx.doi.org/10.1080/0960085X.2018.1458066>. – DOI 10.1080/0960085X.2018.1458066
- [Peffer et al. 2007] PEFFERS, Ken ; TUUNANEN, Tuure ; ROTHENBERGER, Marcus A. ; CHATTERJEE, Samir: A design science research methodology for information systems research. In: *Journal of management information systems* 24 (2007), Nr. 3, S. 45–77
- [Petschow et al. 2014] PETSCHOW, Ulrich ; FERDINAND, Jan-Peter ; DIEKEL, S ; FLÄMIG, Heike: Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit. In: *Schriftenreihe des IÖW* 206 (2014), S. 14
- [Pfeiffer 2015] PFEIFFER, Sabine: *Effects of Industry 4.0 on vocational education and training*. Arbeitspapier, 2015
- [Pfohl 2021] In: PFOHL, Hans-Christian: *Ablauforganisation der Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2021. – ISBN 978–3–662–63057–0, 317–334
- [Philipp et al. 2006] PHILIPP, Thorsten ; BÖSE, Felix ; WINDT, Katja: Autonomously controlled processes - characterisation of complex production systems. In: *Proceedings of 3rd CIRP Conference in Digital Enterprise Technology*, 2006
- [Picot et al. 1998] PICOT, Arnolt ; REICHWALD, Ralf ; WIGAND, Rolf T.: *Die grenzenlose Unternehmung: Information, Organisation und Management*. Bd. 3. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, 1998
- [Piya et al. 2017] PIYA, Sujan ; SHAMSUZZOHA, Ahm ; KHADEM, Mohammad ; AL-KINDI, Mahmoud: Supply chain complexity drivers and solution methods. In: *International Journal of Supply Chain Management* 6 (2017), Nr. 4, S. 43–50
- [Post 2014] POST, Peter: Intelligente Automatisierungskomponenten für die Produktion der Zukunft. In: *Controller Agenda 2017: Trends und Best Practices* (2014), S. 11
- [Prinz 2003] PRINZ, Josef: Simulationsunterstützte Betriebsführung. In: BAYER ohann (Hrsg.) ; COLLISI, Thomas (Hrsg.) ; WENZEL, Sigrid (Hrsg.): *Simulation in der Automobilproduktion*. Springer, 2003, S. 117–127

- [Puhl 1999] PUHL, Henry: *Komplexitätsmanagement : ein Konzept zur ganzheitlichen Erfassung, Planung und Regelung der Komplexität in Unternehmensprozessen*, Universität Kaiserslautern, Diss., 1999
- [Rabe et al. 2008] RABE, Markus ; SPIECKERMANN, Sven ; WENZEL, Sigrid: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Springer Science & Business Media, 2008
- [Ramsauer 1997] RAMSAUER, Christian: *Dezentrale PPS-Systeme Neue Strukturen bei hoher Innovationsdynamik*. Gabler Verlag, 1997. – 209–215 S.
- [Raza et al. 2018] RAZA, Ali ; HAOUARI, Lobna ; PERO, Margherita ; ABSI, Nabil: Impacts of industry 4.0 on the specific case of mass customization through modeling and simulation approach. In: *Customization 4.0*. Springer, 2018, S. 217–234
- [Reinhart 2017] REINHART, Gunther: *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017
- [Ribeiro 2017] RIBEIRO, Luis: Cyber-physical production systems' design challenges. In: *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2017, S. 1189–1194
- [Ritzschke u. Wiedemann 1998] RITZSCHKE, Michael ; WIEDEMANN, Thomas: Gewinnung und Aufbereitung von Simulationsdaten zu Vergleichszwecken. In: *Hrdliczka, V.(Hrsg.): Fortschritte in der Simulationstechnik Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), Hochschulverlag AG an der ETH Zürich (1998)*, S. 283–290
- [Robra-Bissantz u. Strahinger 2020] ROBRA-BISSANTZ, Susanne ; STRAHRINGER, Susanne: Wirtschaftsinformatik-Forschung für die Praxis. In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik (2020)*, S. 1–27
- [Rosen et al. 2015] ROSEN, Roland ; WICHERT, Georg von ; LO, George ; BETTENHAUSEN, Kurt D.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015), Nr. 3, 567 - 572. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>. – ISSN 2405–8963. – 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing

- [Roth 1997] ROTH, Armin: Controlling dezentraler Einheiten mit Hilfe eines ganzheitlichen Steuerungskonzeptes. In: *Organisation und Steuerung dezentraler Unternehmenseinheiten*. Springer, 1997, S. 239–255
- [Rother u. Shook 2003] ROTHER, M. ; SHOOK, J.: *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*. The Lean Enterprise Institute, Inc., Cambridge, USA, 2003
- [Ruhe 1994] RUHE, K-H: Marktorientierte Neugestaltung—Der Mensch steht im Mittelpunkt. In: *Produktionsstrategie für das 21. Jahrhundert*. Springer, 1994, S. 93–112
- [Russo u. Koesten 2005] RUSSO, Tracy C. ; KOESTEN, Joy: Prestige, centrality, and learning: A social network analysis of an online class. In: *Communication Education* 54 (2005), Nr. 3, S. 254–261
- [Sabidussi 1966] SABIDUSSI, Gert: The centrality index of a graph. In: *Psychometrika* 31 (1966), Nr. 4, S. 581–603
- [Scheer 1991] SCHEER, A-W: Wie vermeidet man CIM-Ruinen?—Architektur für eine sichere CIM-Einführung. In: *CIM im Mittelstand*. Springer, 1991, S. 1–14
- [Scheer et al. 2006] SCHEER, August-Wilhelm ; BOCZANSKI, Manfred ; MUTH, Michael ; SCHMITZ, Willi-Gerd ; SEGELBACHER, Uwe: Komplexitäts- und Produktvariantenmanagement bei einem Serienfertiger. In: SCHEER, August-Wilhelm (Hrsg.) ; BOCZANSKI, Manfred (Hrsg.) ; MUTH, Michael (Hrsg.) ; SCHMITZ, Willi-Gerd (Hrsg.) ; SEGELBACHER, Uwe (Hrsg.): *Prozessorientiertes Product Lifecycle Management*, Springer-Verlag, 2006
- [Schicker u. Strassl 2019] SCHICKER, Günter ; STRASSL, Johann: *Produktportfolio-Management im Zeitalter der Digitalisierung*. Weidener Diskussionspapiere, 2019 (69)
- [Schildt u. Kastner 1998] SCHILDT, Gerhard-Helge ; KASTNER, Wolfgang: Prozeßautomatisierung. In: *Prozeßautomatisierung*. Springer, 1998, S. 1–18
- [Schneider et al. 2017] SCHNEIDER, Joachim ; KULMS, Tom ; ROEHDER, Andreas: Unternehmen. In: *Kompendium der Unternehmensführung*. Springer, 2017, S. 1–30

- [Schoeneberg 2014a] SCHOENEGER, Klaus-Peter: Komplexität – Einführung in die Komplexitätsforschung und Herausforderungen für die Praxis. In: SCHOENEGER, Klaus-Peter (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*, Springer Gabler, 2014, S. 13–28
- [Schoeneberg 2014b] SCHOENEGER, Klaus-Peter: Komplexität zwischen wissenschaftlichem 1 Forschungsverständnis und praktischer Umsetzung. In: *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*, Klaus-Peter Schoeneberg, 2014, S. 1–9
- [Schoeneberg u. Pein 2014] SCHOENEGER, Klaus-Peter ; PEIN, Jennifer: Entscheidungsfindung mit Big Data – Einsatz fortschrittlicher Visualisierungsmöglichkeiten zur Komplexitätsbeherrschung betriebswirtschaftlicher Sachverhalte im Unternehmen. In: SCHOENEGER, Klaus-Peter (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*, Springer Gabler, 2014, S. 309–354
- [Scholz-Reiter et al. 2006] SCHOLZ-REITER, Bernd ; PHILIPP, Thorsten ; BEER, Christoph de ; WINDT, Katja ; FREITAG, Michael: Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozesse. In: PFOHL, H.-Ch. (Hrsg.) ; WIMMER, Th. (Hrsg.): *Steuerung von Logistiksystemen – auf dem Weg zur Selbststeuerung. Konferenzband zum 3. BVL-Wissenschaftssymposium Logistik*. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2006, S. 11–25
- [Scholz-Reiter u. Tervo 2007] SCHOLZ-REITER, Bernd ; TERVO, Jan T.: Kausaler Zusammenhang von Komplexität und Dynamik in der Produktion. (2007)
- [Schöning u. Dorchain 2014] SCHÖNING, Harald ; DORCHAIN, Marc: Data Mining und Analyse. In: BAUERNHANSL, Thomas (Hrsg.) ; TEN HOMPEL, Michael (Hrsg.) ; VOGEL-HEUSER, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [Schreiner et al. 2015] SCHREINER, M ; HESS, T ; BENLIAN, A: Gestaltungsorientierter Kern oder Tendenz zur Empirie. In: *Zur neueren methodischen Entwicklung der Wirtschaftsinformatik, Arbeitsbericht, Institut für Wirtschaftsinfor-*

- matik und Neue Medien, Fakultät für Betriebswirtschaft, Ludwig-Maximilians-Universität* (2015), Nr. 1, S. 1–13
- [Schuh u. Caesar 1989] SCHUH, G. ; CAESAR, C: Variantenorientierte Produktgestaltung – Standardisierung und Modularisierung von Serienprodukten. In: *Konstruktion* (1989), S. S. 207–211
- [Schuh et al. 2006] SCHUH, G. ; SCHAUER, A. ; DÖRING, S: Komplexitätsorientierte Gestaltung von Kooperationen. In: *Industrie Management 3* (2006), S. 72–74
- [Schuh et al. 2017a] SCHUH, Günther ; ANDERL, Reiner ; GAUSEMEIER, Jürgen ; HOMPEL, Michael ten ; WAHLSTER, Wolfgang: Industrie 4.0 maturity index. In: *Managing the digital transformation of companies. Munich: Herbert Utz* (2017)
- [Schuh et al. 1998] SCHUH, Günther ; MÜLLER, Stefan ; LEVERING, Volker: Agilität durch virtuelle Fabriken. In: *Zeitschrift wirtschaftliche Fertigung (ZWF)*, 1998, S. 124–126
- [Schuh et al. 2017b] SCHUH, Günther ; RUDOLF, Stefan ; RIESENER, Michael ; DÖLLE, Christian ; SCHLOESSER, Sebastian: Product Production Complexity Research: Developments and Opportunities. In: *Procedia {CIRP}* 60 (2017), 344 - 349. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.006>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.006>. – ISSN 2212–8271. – Complex Systems Engineering and Development Proceedings of the 27th {CIRP} Design Conference Cranfield University, {UK} 10th – 12th May 2017
- [Schuh u. Schmidt 2014] SCHUH, Günther ; SCHMIDT, Carsten: *Produktionsmanagement*. Springer, 2014
- [Schulte 2007] SCHULTE, Christof: *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*. Bd. 7. Vahlen, 2007
- [Schulz 2014] SCHULZ, Christoph: Systemtheorie und Kybernetik als Grundlagen der Modellierung und des Controllings von Komplexität. In: SCHOENEBERG, Klaus-Peter (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*, Springer Gabler, 2014, S. 45–63

- [Schütz 1997] SCHÜTZ, Gerhard: Parallele und verteilte Konzepte. In: *Verteilte-parallelle Ansätze zur Distributionsplanung*. Springer, 1997, S. 191–251
- [Schwäke 2020] SCHWÄKE, Dennis: *Konzeption zur Entwicklung digitaler Regelkreise als Beitrag der smarten Fabrik*, Universität Oldenburg, Diss., 2020
- [Shane et al. 1995] SHANE, S. ; VENKATARAMAN, S. ; MACMILLAN, I.: Cultural differences in innovation championing strategies. In: *Journal of Management* 21 (1995), S. 931–952
- [Shingo 1992] SHINGO, Shigeo: *Das Erfolgsgeheimnis der Toyota-Produktion: eine Studie über das Toyota-Produktionssystem - genannt die Schlanke Produktion*. Landsberg/Lech : Verl. Moderne Industrie, 1992 (Japan-Service)
- [Shou et al. 2017] SHOU, Yongyi ; LI, Ying ; PARK, Young W. ; KANG, Ming: The impact of product complexity and variety on supply chain integration. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* (2017)
- [Siepmann 2016] SIEPMANN, David: Industrie 4.0 – Technologische Komponenten. In: ROTH, Armin (Hrsg.): *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, S. 47–72
- [Simpson 2004] SIMPSON, Timothy W.: Product platform design and customization: Status and promise. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* (2004), S. 3–20
- [Sinsel 2020] SINSEL, Alexander: *Das Internet der Dinge in der Produktion*. Springer, 2020
- [Smilansky 2018] SMILANSKY, Saul: Willensfreiheit–Vom Naturalismus Zum Illusionismus. In: *Grundkurs Willensfreiheit*. mentis, 2018, S. 293–315
- [Spiller et al. 2012] SPILLER, Michael ; LINK, Marco ; LORBACHER, Frank: Produktmodularisierung als Basis für Innovationen im Dienstleistungsbereich: Vorschlag eines Modularisierungsvorgehens unter Berücksichtigung des Innovationsaspekts. In: THOMAS, Oliver (Hrsg.) ; NÜTTGENS, Markus (Hrsg.): *Dienstleistungsmodellierung 2012: Product-Service Systems und Produktivität*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012, S. 2–25

- [Stachowiak 1980] STACHOWIAK, Herbert: Der Modellbegriff in der Erkenntnistheorie. In: *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie* 11 (1980), Nr. 1, S. 53–68
- [Steven et al. 2019] STEVEN, Marion ; KLÜNDER, Timo ; REDER, Laura: Industrie-4.0-Readiness von Supply-Chain-Netzwerken. In: *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*. Springer, 2019, S. 247–267
- [Stocker et al. 2014] STOCKER, Alexander ; BRANDL, Peter ; MICHALCZUK, Rafael ; ROSENBERGER, Manfred: Mensch-zentrierte IKT-Lösungen in einer Smart Factory. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 131 (2014), Nr. 7, S. 207–211
- [Strangmeier 2008] STRANGMEIER, Reinhard: Was ist Wirtschaftsinformatik?— Zum Selbstverständnis einer jungen Wissenschaft. In: BORTFELDT, Andreas (Hrsg.) ; HOMBERGER, Jörg (Hrsg.) ; KOPFER, Herbert (Hrsg.) ; PANKRATZ, Giselher (Hrsg.) ; STRANGMEIER, Reinhard (Hrsg.): *Intelligent Decision Support*. Springer, 2008, S. 447–456
- [Straube u. Mayer 2007] STRAUBE, Frank ; MAYER, Axel: Modularisierung logistischer Systeme – Ein Beitrag zum Management von Komplexität. In: *Industrie Management* 6 (2007), S. 53–55
- [Sugimura et al. 2007] SUGIMURA, Nobuhiro ; SHRESTHA, Rajesh ; TANIMIZU, Yoshitaka ; IWAMURA, Koji: A Study on Integrated Process Planning and Scheduling System for Holonic Manufacturing. In: WANG, Lihui (Hrsg.) ; SHEN, Weiming (Hrsg.): *Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing*, 2007, S. 311–334
- [Sundermeier et al. 2020] SUNDERMEIER, Julian ; GEHLHOFF, Felix ; FAY, Alexander: Development of a Simulation Model to Analyze the Performance of Decentral Rescheduling Algorithms in Production Systems. In: *Simul. Notes Eur.* 30 (2020), Nr. 1, S. 15–22
- [Süssenguth et al. 1991] SÜSSENGUTH, W ; SCHMAGER, B ; ROOS, E: Neuere Aspekte und Entwicklungen innerhalb der Auftragsabwicklung. In: NEDESS, Christian (Hrsg.): *Von PPS zu CIM*. Springer, 1991, S. 169–200

- [Syska 2006] SYSKA, Andreas: *Produktionsmanagement – Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Bd. 1. Gabler Verlag, 2006
- [Taggart 1996] TAGGART, J.H.: Multinational manufacturing subsidiaries in Scotland: Strategic role and economic impact. In: *International Business Review* 5 (1996), Nr. 5, 447 - 468. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0969-5931\(96\)00021-2](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0969-5931(96)00021-2). – DOI [https://doi.org/10.1016/0969-5931\(96\)00021-2](https://doi.org/10.1016/0969-5931(96)00021-2). – ISSN 0969-5931
- [TCW 2005] TCW: *Komplexitätsmanagement*. Handout zum 12. Münchener Management Kolloquium, März 2005
- [Ten Hompel u. Henke 2014] TEN HOMPEL, Michael ; HENKE, Michael: Logistik 4.0. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer, 2014, S. 615–624
- [Tharumarajah et al. 1998] THARUMARAJAH, A. ; WELLS, A. J. ; NEMES, L.: Comparison of emerging manufacturing concepts. In: *Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on*, 1998, S. 325–331
- [Theuer 2011] THEUER, Hanna: Extension of Value Stream Design for the Simulation of Autonomous Production Systems. In: ELMARAGHY, Hoda (Hrsg.) ; Springer Verlag (Veranst.): *Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV 2011)* Springer Verlag, 2011, S. 586–591
- [Theuer 2018] THEUER, Hanna: Industrial Internet of Things – Grundlagen: Teil 5: Automatisierungstechnik I. In: *Industrial Internet of Things – Grundlagen (Band 1)*. Norbert Gronau, 2018, S. 165–202
- [Theuer 2021] THEUER, Hanna: Marktüberblick MES – Industrie 4.0-ready. In: *Fabriksoftware* 26 (2021), Nr. 2, S. 57–65
- [Tonelli et al. 2021] TONELLI, Flavio ; DEMARTINI, Melissa ; PACELLA, Massimo ; LALA, Roberta: Cyber-physical systems (CPS) in supply chain management: from foundations to practical implementation. In: *Procedia CIRP* 99 (2021), S. 598–603

- [Trappmann et al. 2011] TRAPPMANN, Mark ; HUMMELL, Hans J. ; SODEUR, Wolfgang: *Strukturanalyse sozialer Netzwerke: Konzepte, Modelle, Methoden*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011
- [Ulich 2011] ULICH, Eberhard: *Arbeitspsychologie*. Zürich : vdf-Hochschulverl. - Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 2011
- [Ulich 2020] ULICH, Eberhard: *Arbeitspsychologie*. vdf Hochschulverlag AG, 2020
- [Ulrich u. Probst 1995] ULRICH, Hans ; PROBST, Gilbert J.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln Ein Brevier für Führungskräfte*. Paul Haupt, 1995
- [Unland 2014] UNLAND, Rainer: *Agententechnologie*. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/KI-und-Softcomputing/Agententechnologie>. Version: 09 2014, Abruf: 29.01.2018
- [Van Brackel 2009] VAN BRACKEL, Thomas: *Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations-und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen*. Springer-Verlag, 2009
- [Vanderhaegen 2010] VANDERHAEGEN, F.: *Autonomy Control of Human-Machine Systems*. In: *IFAC Proceedings Volumes 43* (2010), Nr. 13, 398 - 403. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.3182/20100831-4-FR-2021.00070>. – DOI <https://doi.org/10.3182/20100831-4-FR-2021.00070>. – ISSN 1474-6670. – 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems
- [VDMA 2009] VDMA: *VDMA-Einheitsblatt 66412-1: Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen*. In: *Berlin: Beuth* (2009)
- [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2007] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI-Richtlinie 5600: Fertigungsmanagementsysteme Manufacturing Execution Systems (MES)*. 2007

- [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008a] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss-und Produktionssystemen - Grundlagen. Blatt 1. In: *Aufl.(Dezember 2008)* (2008)
- [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008b] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss-und Produktionssystemen- Experimentplanung und -auswertung. Blatt 3. In: *Aufl.(Dezember 2008)* (2008)
- [Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2013] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. Thesen und Handlungsfelder, 2013
- [Vogel u. Lasch 2016] VOGEL, Wolfgang ; LASCH, Rainer: Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review. In: *Logistics Research* 9 (2016), Nr. 1, S. 1–66
- [Vogel-Heuser et al. 2009] VOGEL-HEUSER, B. ; KEGEL, G. ; WUCHERER, K.: Global information architecture for industrial automation. In: *atp edition- Automatisierungstechnische Praxis* (2009), S. 108–115
- [Vogel-Heuser 2014] VOGEL-HEUSER, Birgit: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: BAUERNHANSL, Thomas (Hrsg.) ; TEN HOMPEL, Michael (Hrsg.) ; VOGEL-HEUSER, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [Vogel-Heuser et al. 2015] VOGEL-HEUSER, Birgit ; LEE, Jay ; LEITÃO, Paulo: Agents enabling cyber-physical production systems. In: *at- Automatisierungstechnik* 63 (2015), Nr. 10, S. 777–789
- [Vollmer 2009] VOLLMER, Lars: Schnelle und wirkungsvolle Verbesserungen des gesamten Wertschöpfungsprozesses mit Wertstromdesign. In: *Lean Six Sigma : erfolgreiche Kombination von Lean Management, Six Sigma und Design for Six Sigma* (2009), S. 137 – 158
- [Wäfler 1999] WÄFLER, Toni: *Wie sich Mensch und Technik sinnvoll ergänzen: die Gestaltung automatisierter Produktionssysteme mit KOMPASS*. Bd. 18. vdf Hochschulverlag AG, 1999

- [Wang et al. 2017] WANG, Yübo ; ANOKHIN, Oleg ; ANDERL, Reiner: Concept and use case driven approach for mapping it security requirements on system assets and processes in industrie 4.0. In: *Procedia CIRP* 63 (2017), S. 207–212
- [Warnecke u. Hüser 1996] WARNECKE, Hans-Jürgen ; HÜSER, Manfred: *Die Fraktale Fabrik - Revolution der Unternehmenskultur*. Rowohlt, 1996
- [Wasserman u. Faust 1994] WASSERMAN, Stanley ; FAUST, Katherine: *Social network analysis: Methods and applications*. Cambridge University Press, 1994
- [Weber 2020] WEBER, Felix: *Künstliche Intelligenz für Business Analytics*. Springer, 2020
- [Wenzel 2018] WENZEL, Sigrid: Simulation logistischer Systeme. In: TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Modellierung logistischer Systeme*. Springer, 2018, S. 1–34
- [Werner 1999] WERNER, Christian: *Optimierung der Unternehmenslogistik durch SAP*. Bd. 1. Auflage. Igel-Verlag, 1999
- [Westkämper et al. 2009] *Kapitel Ganzheitliche Produktionssysteme*. In: WESTKÄMPER, Engelbert ; HUMMEL, Vera ; RÖNNECKE, Thomas: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 25–46
- [Westkämper et al. 1998] WESTKÄMPER, Engelbert ; WIENDAHL, Hans-Hermann ; BALVE, Patrick: Dezentralisierung und Autonomie in der Produktion. In: *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 9 (1998), Nr. 93, S. 407–410
- [Wiendahl et al. 2007] WIENDAHL, H-P ; ELMARAGHY, Hoda A. ; NYHUIS, Peter ; ZÄH, Michael F. ; WIENDAHL, H-H ; DUFFIE, Neil ; BRIEKE, Michael: Changeable manufacturing-classification, design and operation. In: *CIRP annals* 56 (2007), Nr. 2, S. 783–809
- [Wilde u. Hess 2006] WILDE, Thomas ; HESS, Thomas: Methodenspektrum der Wirtschaftsinformatik: Überblick und Portfoliobildung / Arbeitsbericht. 2006. – Forschungsbericht

- [Wilde u. Hess 2007] WILDE, Thomas ; HESS, Thomas: Forschungsmethoden der wirtschaftsinformatik. In: *Wirtschaftsinformatik* 49 (2007), Nr. 4, S. 280–287
- [Wildemann 1996] WILDEMANN, Horst: Dezentralisierung von Kompetenz und Verantwortung. In: BULLINGER, Hans-Jörg (Hrsg.) ; WARNECKE, Hans-Jürgen (Hrsg.): *Neue Organisationsformen im Unternehmen: ein Handbuch für das moderne Management*. Springer-Verlag, 1996, S. 360 –378
- [Wildemann 1997] WILDEMANN, Horst: Kundennahe Produktion und Zulieferung- Empirische Bestandsaufnahme und aktuelle Tendenzen. In: *Kundenzufriedenheit*. Springer, 1997, S. 93–122
- [Wildemann 2008] WILDEMANN, Horst: Produktkannibalisierung erkennen und vermeiden. In: *Produkt-und Prozessinnovationen in Wertschöpfungsketten*. Springer, 2008, S. 71–83
- [Wildemann 2014] WILDEMANN, Horst: Modularisierung: Die DNA des Erfolgs. In: *PRODUCTIVITY Management* 3 (2014), S. 57–59
- [Wildemann o D] WILDEMANN, Horst: *Fertigungssegmentierung*. Webseite. <https://www.tcw.de/beratungsleistungen/produktion/fertigungssegmentierung-79>. Version: o. D., Abruf: 14.08.2021
- [Willeke et al. 2017] WILLEKE, Nils ; KUHRKE, Benjamin ; KUSCHICKE, Felix ; SCHEFFERMANN, Robert ; UHLMANN, Eckart: Simulativer Vergleich zentraler und dezentraler Steuerungen einer Getriebefertigung. In: WENZEL, Sigrid (Hrsg.) ; PETER, Tim (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*, 2017, S. 249–258
- [Windt 2006] WINDT, Katja: Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik. In: VEC, M. (Hrsg.) ; HÜTT, M. (Hrsg.) ; FREUND, A. (Hrsg.): *Selbstorganisation – Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft*, Böhlau Verlag, Köln, 2006
- [Windt 2008] WINDT, Katja: Ermittlung des angemessenen Selbststeuerungsgrades in der Logistik – Grenzen der Selbststeuerung. In: NYHUIS, Peter (Hrsg.): *Beiträge zur Theorie einer Logistik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, S. 349 – 372

- [Windt et al. 2005] WINDT, Katja ; BÖSE, Felix ; PHILIPP, Thorsten: Criteria and application of autonomous cooperating logistic processes. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Research. Advances in Manufacturing Technology and Management.*, 2005
- [Windt et al. 2010] WINDT, Katja ; PHILIPP, T ; BECKER, Felix Böse T.: Application of a three-component evaluation system for autonomous control in logistics. In: *Proceedings of the Institutional of Mechanical Engineers: Journal of Engineering Management* 224 (2010), Nr. 8, S. 1267–1276
- [WKWI 1994] WKWI, WK d W.: Profil der Wirtschaftsinformatik. Ausführungen der Wissenschaftlichen Kommission der Wirtschaftsinformatik. In: *Wirtschaftsinformatik* 36 (1994), Nr. 1, S. 80–81
- [Woodward 1958] WOODWARD, Joan: Management and Technology. In: *Her Majesty's Stationery Office* (1958)
- [Wüthrich et al. 2018] WÜTHRICH, Hans A. ; OSMETZ, Dirk ; KADUK, Stefan: Mut zum Musterbruch - Organisation als Labor 1 verstehen. In: GMBH, Springer Fachmedien W. (Hrsg.): *ManagementWissen: Was Leader erfolgreich macht*, Markus Sulzberger AND Robert J. Zaugg, 2018, S. 15–22
- [Wycisk 2009] WYCISK, Christine: *Flexibilität durch Selbststeuerung in logistischen Systemen*. Gabler Verlag, 2009
- [Zacher u. Reuter 2014] ZACHER, S. ; REUTER, M.: *Regelungstechnik für Ingenieure: Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. Bd. 14., korrig. Aufl. Springer Vieweg, 2014
- [Zawisza 2019] ZAWISZA, Jacek: Entwicklung und Integration interdependenter Agentensysteme zur dezentralen Produktionsplanung und-steuerung. (2019)
- [Zeidler et al. 2019] ZEIDLER, F ; MÜLLER, D ; TEN HOMPEL, M ; HENKE, M: WIP-Balancing by autonomous control using flexibility oriented decision-making. In: *Proceedings of 48th International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE*, 2019
- [Zerres 2014] ZERRES, Christopher: Notwendigkeit und Strategien eines Komplexitätsmanagements für variantenreiche Produkte – Ein Beitrag am Beispiel

der Automobilbranche. In: SCHOENEBERG, Klaus-Peter (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*, Springer Gabler, 2014, S. 309–354

[Zhang u. Luo 2017] ZHANG, Junlong ; LUO, Yu: Degree centrality, betweenness centrality, and closeness centrality in social network. In: *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2017)* Bd. 132, 2017, S. 300–303

[Zuehlke 2008] ZUEHLKE, Detlef: SmartFactory – from Vision to Reality in Factory Technologies. In: *IFAC Proceedings Volumes 41* (2008), Nr. 2, 14101 - 14108. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02391>. – DOI <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02391>. – ISSN 1474–6670

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorgehensmodell der vorliegenden Dissertationsschrift	9
2.1	Einordnung wichtiger Begriffe eines Produktionssystems	14
2.2	Idealisierte Unterscheidung der Systemtypen	18
2.3	Kategorisierungen von Komplexität	21
2.4	Kriterien zur Autonomiebestimmung	51
2.5	Hierarchieebenen eines autonomen Systems	55
2.6	Die Automatisierungspyramide	57
2.7	Auflösung der hierarchischen Automatisierungspyramide in das Automatisierungsdiabolo	60
2.8	Auflösung der hierarchischen Automatisierungspyramide in ein Netz- werk als verteiltes System	60
3.1	Vorgehen zur Ermittlung der Dezentralität von Produktionsprozessen	64
3.2	Notwendige Fähigkeiten autonomer Akteursklassen	70
3.3	Darstellung verschiedener Kontrollstrukturen	76
3.4	Erhöhung der Entfernungssumme bei gleichbleibender Anzahl der erreichbaren Akteure	80
3.5	Erhöhung der Anzahl der erreichbaren Akteure bei konstanter Ent- fernungssumme	81
3.6	Vergleich der Hauptgruppen der Sozialen Netzwerkanalyse	84
3.7	Verschmelzung von kontrollierendem und ausführendem Akteur: selbstaushührender Akteur	91
3.8	Gegenüberstellung von Szenarien zur Motivation der Berücksichtigung der Entscheidungsautonomie	92
3.9	Klassifikation von Akteuren nach struktureller und Entscheidungs- autonomie	96

3.10	Gedankliche Auflösung des selbstausführenden Akteurs zur Erlangung einer positiven strukturellen Autonomie	98
3.11	Gegenüberstellung von Szenarien zur Motivation der Berücksichtigung der Entscheidungsautonomie	100
3.12	Gegenüberstellung von Szenarien zur Motivation der Berücksichtigung der Entscheidungsautonomie	101
3.13	Verwendung eines Korrekturfaktors zum Spreading der Daten	106
3.14	Erweiterte Symbolik des Wertstromdesign um Aspekte der Dezentralität	110
3.15	Modell zur Bestimmung der Dezentralität von Prozessen	112
4.1	Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie	119
4.2	Struktureller Aufbau einer Simulationsstudie	121
4.3	Experimentplanung und Auswertung in einer Simulationsstudie	122
4.4	Struktureller Aufbau der durchzuführenden Simulationsstudie	124
4.5	Prinzipskizze des stationären und des mobilen Cubes sowie ihrer physischen Verbindung durch eine Rollenbahn	127
4.6	Wertstromdiagramm des verwendeten Beispielprozesses	129
4.7	Skizzierung des Vorgehens zur Datenauswertung	133
4.8	Ausschnitt des Kommunikationsprotokolls	134
4.9	Ausschnitt aus dem Dashboard mit Auswahlmöglichkeiten des Prozessschrittes Färberei	137
4.10	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 1 im zentralen Simulationsexperiment Schleifen	141
4.11	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 1 (zentral)	142
4.12	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 1 (zentral)	144
4.13	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 1 (zentral)	146
4.14	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 1 (zentral)	147
4.15	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	151

4.16	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	153
4.17	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	155
4.18	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	156
5.1	Visualisierung aller Kommunikationsbeziehungen des Praxisbeispiels	166
5.2	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, Praxisbeispiel (unbereinigt)	167
5.3	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, Praxisbeispiel	168
5.4	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, überarbeitetes Praxisbeispiel	172
6.1	Klassifikation von Akteuren nach struktureller und Entscheidungs- autonomie	182
C.1	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulations- experiment 1 (zentral)	196
C.2	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 1 (zentral)	197
C.3	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 3: Färberei, Simulations- experiment 1 (zentral)	198
C.4	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 1 (zentral)	199
C.5	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 1: Schleifen (Teil 1), Simulationsexperiment 2 (dezentral)	200
C.6	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 1: Schleifen (Teil 2), Simulationsexperiment 2 (dezentral)	201
C.7	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	202
C.8	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 3: Färberei, Simulations- experiment 2 (dezentral)	203

C.9	Swimlane-Diagramm von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	204
D.1	Visualisierung aller Kommunikationsbeziehungen, Simulationsexperiment 1 (zentral)	206
D.2	Visualisierung aller Kommunikationsbeziehungen, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	207
G.1	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 1: Erstellung Planauftrag, Praxisbeispiel	218
G.2	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel	219
G.3	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 3: Einkauf, Praxisbeispiel	220
G.4	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 4: Lagervorbereitung, Praxisbeispiel	221
G.5	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 5: Kommissionierung, Praxisbeispiel	222
G.6	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 6: Herstellung Komponente A, Praxisbeispiel	223
G.7	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 7: Herstellung Komponente B, Praxisbeispiel	224
G.8	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 8: Herstellung Komponente C, Praxisbeispiel	225
G.9	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 9: Herstellung Komponente D, Praxisbeispiel	226
G.10	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 10: Montage, Praxisbeispiel	227
G.11	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 11: Prüfung, Praxisbeispiel	228
G.12	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 12: Lackieren, Praxisbeispiel	229
G.13	Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt 13: Versand, Praxisbeispiel	230

G.14 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
1: Erstellung Planauftrag , Praxisbeispiel verbessert	231
G.15 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel verbessert	232
G.16 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
3: Einkauf, Praxisbeispiel verbessert	233
G.17 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
4: Lagervorbereitung,	
Praxisbeispiel verbessert	234
G.18 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
5: Kommissionierung, Praxisbeispiel verbessert	235
G.19 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
6: Herstellung Komponente A, Praxisbeispiel verbessert	236
G.20 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
7: Herstellung	
Komponente B, Praxisbeispiel verbessert	237
G.21 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
8: Herstellung Komponente C, Praxisbeispiel verbessert	238
G.22 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
9: Herstellung Komponente D, Praxisbeispiel verbessert	239
G.23 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
10: Montage, Praxisbeispiel verbessert	240
G.24 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
11: Prüfung, Praxisbeispiel verbessert	241
G.25 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
12: Lackieren, Praxisbeispiel verbessert	242
G.26 Visualisierung der Kommunikationsbeziehungen von Prozessschritt	
13: Versand, Praxisbeispiel verbessert	243

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassende Betrachtung der drei gängigsten Managementansätze zum Umgang mit Komplexität	25
2.2	Zuordnung von Methoden zum Umgang mit Komplexität zu Managementansätzen und Wirkungsbereich	41
2.3	Vergleich wichtiger Merkmale zentraler und dezentraler Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	48
2.4	Vergleich der Betrachtungsgegenstände der Autonomie unterschiedlicher Domänen	49
2.5	Vergleich Von Bewertungsansätzen für Autonomie	54
3.1	Übersicht über Interaktionsformen zwischen den verschiedenen Leistungsklassen	73
3.2	Klassifikation verschiedener Kontrollstrukturen hinsichtlich ihrer kennzeichnenden Eigenschaften	77
3.3	Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Closeness	85
3.4	Zusammenfassende Darstellung: Erfüllung der Definitionen durch die vier Zentralitäts-Hauptgruppen	86
3.5	Zusammenfassende Darstellung der Erfüllung der Definitionen durch die Kennwerte der Hauptgruppe Closeness	87
3.6	Gegenüberstellung der Resultate der additiven und multiplikativen Verknüpfung von struktureller und Entscheidungsautonomie	95
3.7	Gegenüberstellung der tatsächlichen Autonomie von Akteuren in einer zentralen und einer dezentralen Struktur	104
4.1	Übersicht über die Entscheidungsparameter und -alternativen	138
4.2	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 1 (zentral)	142

4.3	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 1 (zentral)	144
4.4	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 1 (zentral)	145
4.5	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 1 (zentral)	147
4.6	Übersicht über die Dezentralitätswerte der Prozessschritte sowie des Prozesses, Simulationsexperiment 1 (zentral)	148
4.7	Zusammenfassende Kennzahlen der Durchlaufzeiten der Werkstückträger je Simulationslauf (n=20), Simulationsexperiment 1 (zentral)	149
4.8	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Schleifen, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	151
4.9	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Beschriftung, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	153
4.10	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Färberei, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	155
4.11	Bestimmung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Qualitätskontrolle, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	157
4.12	Übersicht über die Dezentralitätswerte der Prozessschritte sowie des Prozesses, Simulationsexperiment 2 (dezentral)	158
4.13	Zusammenfassende Kennzahlen der Durchlaufzeiten der Werkstückträger je Simulationslauf (n=20), Simulationsexperiment 2 (dezentral)	159
4.14	Vergleich wichtiger Kennwerte des zentralen und dezentralen Simulationsexperiments	161
5.1	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel	168
5.2	Kennzahlen der Prozessschritte des Praxisbeispiels	169
5.3	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, überarbeitetes Praxisbeispiel	173
5.4	Vergleich der Prozessergebnisse, Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel	173
5.5	Vergleich wichtiger Kennwerte der beiden Szenarien des Praxisprozesses	174

A.1	Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Closeness	186
A.2	Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Degree	187
A.3	Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Betweenness	188
A.4	Analyse der Erfüllung der aufgestellten Definition durch die Hauptgruppe Eigenvektor	189
B.1	Für die Auswertung der Kommunikationsstruktur relevante Action-Arten	192
B.2	Für die Auswertung der Kommunikationsstruktur nicht relevante Action-Arten	193
E.1	Vergleich der Durchlaufzeiten der Werkstückträger je Simulationslauf (n=20) im dezentralen Simulationsexperiment	210
G.1	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Erstellung Planauftrag, Praxisbeispiel	218
G.2	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel	219
G.3	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Einkauf, Praxisbeispiel	220
G.4	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Lagervorbereitung, Praxisbeispiel	221
G.5	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 5: Kommissionierung, Praxisbeispiel	222
G.6	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel	223
G.7	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 7: Fertigung Komponente B, Praxisbeispiel	224
G.8	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 8: Fertigung Komponente C, Praxisbeispiel	225
G.9	Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 9: Fertigung Komponente D, Praxisbeispiel	226

G.10 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 10: Montage, Praxisbeispiel	227
G.11 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 11: Prüfung, Praxisbeispiel	228
G.12 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 12: Lackieren, Praxisbeispiel	229
G.13 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 13: Versand, Praxisbeispiel	230
G.14 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 1: Erstellung Planauftrag, Praxisbeispiel verbessert	231
G.15 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 2: Erstellung Fertigungsauftrag, Praxisbeispiel verbessert	232
G.16 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 3: Einkauf, Praxisbeispiel verbessert	233
G.17 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 4: Lagervorbereitung, Praxisbeispiel verbessert	234
G.18 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 5: Kommissionierung, Praxisbeispiel verbessert	235
G.19 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 6: Fertigung Komponente A, Praxisbeispiel verbessert	236
G.20 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 7: Fertigung Komponente B, Praxisbeispiel verbessert	237
G.21 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 8: Fertigung Komponente C, Praxisbeispiel verbessert	238
G.22 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 9: Fertigung Komponente D, Praxisbeispiel verbessert	239
G.23 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 10: Montage, Praxisbeispiel verbessert	240
G.24 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 11: Prüfung, Praxisbeispiel verbessert	241
G.25 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 12: Lackieren, Praxisbeispiel verbessert	242
G.26 Ermittlung der Dezentralität von Prozessschritt 13: Versand, Praxisbeispiel verbessert	243

G.27 Kennzahlen der Prozessschritte des überarbeiteten Praxisbeispiels . 244

Formelverzeichnis

3.1	Harmonische Closeness	83
3.2	Entscheidungsvektor von Prozessschritt ps	93
3.3	Entscheidungsautonomie von Akteur a in Prozessschritt ps	93
3.4	Minimal mögliche positive strukturelle Autonomie	98
3.5	Strukturelle Autonomie	98
3.7	Zentralität nach Freeman	102
3.8	Zentralität des Prozessschrittes	105
3.9	Dezentralität des Prozessschrittes (vorläufig)	105
3.10	Dezentralität des Prozessschrittes	106
3.11	Autonomie Index AI	108

Verwendete Variablen

- A_{ps} : Menge der Akteure in Prozessschritt ps
- C_{ps} : Zentralität der Prozessschrittes ps
- $C'_{a,ps}$: Strukturelle Autonomie vom selbstauführenden Akteur a in Prozessschritt ps
- $C_{a,ps}$: Strukturelle Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- D_{ps} : Dezentralität des Prozessschrittes ps
- $d_{a,ps}$: Entscheidungsautonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- d_{ij} : Distanz zwischen Akteur i und Akteur j
- \vec{d}_{ps} : Entscheidungsvektor von Prozessschritt ps
- $e_{a,ps}$: Anzahl Entscheidungen, die Akteur a in Prozessschritt ps trifft
- n : Anzahl der Akteure im betrachteten Prozessschritt
- $R_{a,ps}$: Tatsächliche Autonomie von Akteur a in Prozessschritt ps
- $R'_{a,ps}$: Maximale Autonomie in Prozessschritt ps

Abkürzungsverzeichnis

AI	Autonomie Index
APS	Advanced Planning and Scheduling
AWS	Anwendungssystem
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAx	Computer-Aided x
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CPS	Cyber-physikalisches System
DoA	Degree of Autonomy
DSRM	Design Science Research Methodology
eEPK	erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise Resource Planning
ES	Entscheidungsspielraum
FAUF	Fertigungsauftrag
FIFO	First-In-First-Out
HS	Handlungsspielraum
HMS	Holonic Manufacturing System
LUPO	Leistungsfähigkeitsbeurteilung unabhängiger Produktionsobjekte
MES	Manufacturing Execution System
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
SNA	Soziale Netzwerkanalyse
VSD	Value Stream Design
WVZ	Warenverteilzentrum